

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DANIEL J.C. COURA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE REDES ÓPTICAS
PASSIVAS BASEADAS EM MODULAÇÃO POR SUB-
PORTADORA**

VITÓRIA
JULHO, 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

DANIEL JOSÉ CUSTÓDIO COURA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE REDES ÓPTICAS
PASSIVAS BASEADAS EM MODULAÇÃO POR SUB-
PORTADORA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Automação.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo E. Vieira Segatto.

VITÓRIA
JULHO, 2009

DANIEL JOSÉ CUSTÓDIO COURA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE REDES ÓPTICAS
PASSIVAS BASEADAS EM MODULAÇÃO POR SUB-
PORTADORA**

Tese submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em de Julho de 2009.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto - Orientador
PPGEE - Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dra. Maria José Pontes
PPGEE - Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Moisés Renato Nunes Ribeiro
PPGEE - Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dra. Shirley Peroni Neves Cani
Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo

Prof. Dr. João Crisostomo Weyl Albuquerque Costa
PPGEE - Universidade Federal do Pará

Para toda a minha família.

Agradecimentos:

Ao professor doutor Marcelo Segatto, pelo incentivo, confiança que permitiram a realização do trabalho.

Aos amigos do LABTEL.

À minha esposa Claudinea pela paciência e atitude positiva frente aos problemas.

À minha mãe e em memória de Ecio João baptista Farina sem eles nunca teria chegado tão longe.

À coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES

Ao dr. Marcio Freitas pela ajuda nas simulações do RSOA.

À Deus.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	14
1.1 - ESCOPO DO TRABALHO.....	16
CAPÍTULO 2 - REDES ÓPTICAS PASSIVAS.....	18
2.1 - INTRODUÇÃO	18
2.2 - TDMA – MÚLTIPLO ACESSO POR DIVISÃO DE TEMPO	22
2.3 - WDMA – MÚLTIPLO ACESSO POR DIVISÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA	25
2.4 - FDMA - MÚLTIPLO ACESSO POR DIVISÃO DE FREQUÊNCIA	30
2.4.1 - <i>FDMA-SCM para uma rede PON</i>	34
2.4.2 - <i>OFDM para uma rede PON</i>	39
2.4.3 - <i>Fonte óptica para redes FDMA PON</i>	42
2.4.3.1 - Fontes ópticas das ONUs com comprimentos de ondas com diferenças maiores que 6 GHz	44
2.4.3.2 - Fontes ópticas das ONUs com comprimentos de ondas com diferenças inferiores a 6 GHz.....	50
2.4.3.3 - Fontes ópticas das ONUs com comprimentos de ondas idênticos	53
2.5 - COMPARAÇÕES ENTRE OS TIPOS DE ACESSO AO MEIO DAS REDES PON.....	56
CAPÍTULO 3 - FDMA-SCM PON COM FONTE ÓPTICA CENTRAL DE ALIMENTAÇÃO	60
3.1 - INTRODUÇÃO	60
3.2 - RSOA FDMA-SCM PON	62
3.3 - EAM FDMA-SCM PON	66
3.4 - SIMULAÇÕES DA FDMA-SCM PON	68
3.4.1 - <i>Canal AWGN - EVM x BER x SNR</i>	69
3.4.2 - <i>EVM x Fator Roll-off do filtro</i>	74
3.4.3 - <i>EVM x Separação entre as subportadoras</i>	75
3.4.4 - <i>Transmissão OLT-ONUs</i>	79

Índice

3.4.5 - Transmissão ONUS-OLT	83
CAPÍTULO 4 - ARQUITETURA BS OFDMA-PON	90
4.1 - INTRODUÇÃO	90
4.2 - PROPOSTA DA ARQUITETURA BS OFDMA-PON	91
4.2.1 - Alocação dinâmica de Banda.....	97
4.3 - ANÁLISE DE DESEMPENHO DA BS OFDMA-PON.....	99
4.3.1 - Simulação com distâncias fixa entre OLT e ONUs e distribuição fixa de subportadoras.....	101
4.3.2 - Simulação com variação nas distâncias entre OLT e ONUs e variação na distribuição de subportadoras.....	106
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	109
5.1 - TRABALHOS FUTUROS	110
APÊNDICE A - EVM – ERROR VECTOR MAGNITUDE	112
BIBLIOGRAFIA	114

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – CONFIGURAÇÕES PARA AS REDES ÓPTICAS (A) PONTO A PONTO, (B) COM ARMÁRIO DE DISTRIBUIÇÃO E (C) PASSIVA	19
FIGURA 2.2 - (A) TOPOLOGIA EM ÁRVORE UTILIZANDO UM DIVISOR 1XN, (B) TOPOLOGIA EM BARRAMENTO UTILIZANDO VÁRIOS DIVISORES 1X2 E (C) TOPOLOGIA EM ANEL UTILIZANDO VÁRIOS DIVISORES DE 1X2.....	21
FIGURA 2.3 – ESQUEMA BÁSICO DE UMA REDE TDMA-PON.....	22
FIGURA 2.4 – WDMA-PON BIDIRECIONAL UTILIZANDO AWG.....	27
FIGURA 2.5 – ESQUEMA BÁSICO DE UMA WDMA-PON USANDO FONTE ÓPTICA DE ALIMENTAÇÃO NA OLT.....	29
FIGURA 2.6 – REPRESENTAÇÃO DO SINAL ODSB.....	32
FIGURA 2.7 – RESPOSTA EM FREQUÊNCIA PARA UMA FIBRA MONOMODO PADRÃO, NO COMPRIMENTO DE ONDA DE 1550 NM.....	34
FIGURA 2.8 – GERAÇÃO DO SINAL FDMA-SCM ÓPTICO NA OLT.....	35
FIGURA 2.9- QUATRO SUBPORTADORAS NAS FREQUÊNCIAS 750MHZ, 1750MHZ, 2750MHZ E 3750MHZ.....	35
FIGURA 2.10 – ESPECTRO ÓPTICO COM 4 SUBPORTADORAS.....	36
FIGURA 2.11 - RECEPÇÃO DO SINAL SCM ÓPTICO EM UMA ONU DE UMA REDE PON.....	37
FIGURA 2.12 - ESPECTRO ELÉTRICO DO SINAL APÓS O FOTODIODO COM SUAS QUATRO SUBPORTADORAS NAS FREQUÊNCIAS 750MHZ, 1750MHZ, 2750MHZ E 3750MHZ MAIS OS PRODUTOS DE INTERMODULAÇÃO.....	37
FIGURA 2.13 – COM AS ONUS SEPARADAS FISICAMENTE AS SUBPORTADORAS SÃO SOMADAS NO ACOPLADOR ÓPTICO.....	38
FIGURA 2.14 - ESQUEMA BÁSICO PARA OFDM.....	40
FIGURA 2.15 - GERANDO O SINAL SCM NO DOMÍNIO ÓPTICO, (A) SEM VARIAÇÃO NOS COMPRIMENTOS DE ONDA DAS ONUS 1 E 2 $\Delta\lambda=0$, (B) COM VARIAÇÃO NOS COMPRIMENTOS DE ONDA DAS ONUS $\Delta\lambda\neq 0$	43
FIGURA 2.16 - ESQUEMA DA REDE PARA TESTE DAS FONTES ÓPTICAS.....	45
FIGURA 2.17 - ESQUEMA BÁSICO PARA A ONU.....	45
FIGURA 2.18 – ESQUEMA BÁSICO PARA O RECEPTOR DO CANAL.....	46
FIGURA 2.19 – ESPECTRO ÓPTICO COM 4 LASERS DE COMPRIMENTOS DE ONDAS DIFERENTES ($\lambda_1=1550,00$ NM, $\lambda_2=1550,10$ NM, $\lambda_3=1550,20$ NM, $\lambda_4=1549,90$ NM) COM SUAS RESPECTIVAS SUBPORTADORAS ($SC1=1,5$ GHZ, $SC2=3,5$ GHZ, $SC3=5,5$ GHZ, $SC4=7,5$ GHZ).....	47
FIGURA 2.20 – ESPECTRO ELÉTRICO DO SINAL COM DOIS COMPRIMENTOS DE ONDA DIFERENTES.....	48
FIGURA 2.21 - ESPECTRO ELÉTRICO DO SINAL COM 4 COMPRIMENTOS DE ONDA DIFERENTES.....	48
FIGURA 2.22 - DIAGRAMA DE OLHO DOS SINAIS RECEBIDOS (A) CANAL 1 - $\lambda_1=1550,00$ NM, (B) CANAL 2 - $\lambda_2=1550,10$ NM, (C) CANAL 3 - $\lambda_3=1550,20$ NM, (D) CANAL 4 - $\lambda_4=1549,90$ NM.....	49
FIGURA 2.23 – CURVA DE FATOR Q, PARA O CASO DE FONTES ÓPTICAS COM COMPRIMENTO DE ONDAS SEPARADOS POR UMA DISTÂNCIA SUPERIOR A 6 GHz ~ 0,05 NM.....	50
FIGURA 2.24 - ESPECTRO ÓPTICO COM 4 LASERS ($\lambda_1=\lambda_3=\lambda_4=1550,00$ NM, $\lambda_2=1550,01$ NM) COM SUAS RESPECTIVAS SUBPORTADORAS ($SC1=1,5$ GHZ, $SC2=3,5$ GHZ, $SC3=5,5$ GHZ, $SC4=7,5$ GHZ).....	51
FIGURA 2.25 - ESPECTRO ELÉTRICO RECEBIDO PELO FOTODETECTOR NA SIMULAÇÃO DA OBI.....	52
FIGURA 2.26 - DIAGRAMA DE OLHO NORMALIZADO DOS SINAIS RECEBIDOS (A) CANAL 1 - $\lambda_1=1550,00$ NM, (B) CANAL 2 - $\lambda_2=1550,01$ NM, (C) CANAL 3 - $\lambda_3=1550,00$ NM, (D) CANAL 4 - $\lambda_4=1550,00$ NM.....	52

FIGURA 2.27 – CURVA DE FATOR Q, PARA O CASO DE OBI E SOBREPOSIÇÃO.....	53
FIGURA 2.28 – ESPECTRO ÓPTICO DA SIMULAÇÃO COM FONTES ÓPTICAS EXATAMENTE IGUAIS.	53
FIGURA 2.29 - ESPECTRO ELÉTRICO PARA FONTES DE COMPRIMENTO DE ONDA EXATAMENTE IGUAIS.	54
FIGURA 2.30 - DIAGRAMA DE OLHO NORMALIZADO DOS SINAIS RECEBIDOS COM OS COMPRIMENTOS DE ONDAS IGUAIS (A) CANAL 1 (B) CANAL 2 (C) CANAL 3 (D) CANAL 4.....	55
FIGURA 2.31 – CURVAS DOS FATORES Q DOS CANAIS DA SIMULAÇÃO COM AS FONTES ÓPTICAS COM EXATAMENTE IGUAIS.....	55
FIGURA 3.1 - ESQUEMA BÁSICO PARA REDE PON COM FONTE ÓPTICA CENTRAL DE ALIMENTAÇÃO.....	61
FIGURA 3.2 – ESQUEMA BÁSICO PARA FDMA-SCM PON QUE UTILIZA O DISPOSITIVO RSOA (FBG É FIBRA DE GRADE DE BRAGG).	63
FIGURA 3.3 - ESQUEMA DE FREQUÊNCIA DO COMPRIMENTO DE ONDA DE DESCIDA.	64
FIGURA 3.4 - ESQUEMA BÁSICO PARA A FDMA-SCM PON QUE UTILIZA O DISPOSITIVO EAM.	67
FIGURA 3.5 - ESQUEMA DA SIMULAÇÃO FIM A FIM EVM X BER X SNR.	69
FIGURA 3.6 – GRÁFICO DE BER X SNR PARA UM SISTEMA ‘FIM A FIM’.....	70
FIGURA 3.7 – EVM X SNR PARA SIMULAÇÃO ‘FIM A FIM’ (A) EVM(%) X SNR E (B) EVM(DB) X SNR.....	71
FIGURA 3.8 – BER X EVM.....	72
FIGURA 3.9 – DIAGRAMA DE CONSTELAÇÃO E DIAGRAMA DE OLHO DOS COMPONENTES I E Q PARA (A) SNR=16 DB E EVM= 30%, (B) SNR=20,52 DB E EVM=10%, (C) SNR= 26 DB E EVM=5% E (D) SNR=30 DB E EVM=3%.	73
FIGURA 3.10 - DIAGRAMA DA SIMULAÇÃO FIM A FIM ELÉTRICO.	74
FIGURA 3.11 – (A) RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA DOS FILTROS PARA FATORES <i>ROLL-OFF</i> DE 0,00, 0,25, 0,50, 0,75 E 1,00 E (B) DETALHAMENTO.....	75
FIGURA 3.12 - EVM X FATOR DE <i>ROLL-OFF</i> DO FILTRO PASSA-BAIXA.	75
FIGURA 3.13 - ESQUEMA DA SIMULAÇÃO EVM X SEPARAÇÃO ENTRE AS PORTADORAS.	76
FIGURA 3.14 – EVM POR CANAIS SCM DA SIMULAÇÃO FIM A FIM SEPARAÇÃO DE CANAIS.....	78
FIGURA 3.15 - EVM X SEPARAÇÃO ENTRE PORTADORAS DA SIMULAÇÃO FIM A FIM SEPARAÇÃO DE CANAIS.....	78
FIGURA 3.16 - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DA FIBRA ÓPTICA EM CIMA DA DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA.....	80
FIGURA 3.17 - ESQUEMA DA SIMULAÇÃO NO SENTIDO DE TRANSMISSÃO OLT-ONUS.....	80
FIGURA 3.18 – SINAL NO TEMPO E O ESPECTRO ELÉTRICO DO SINAL FDMA-SCM NA ENTRADA DO MODULADOR MACH-ZEHNDER.	81
FIGURA 3.19 - ESPECTRO ÓPTICO NA SAÍDA DO MACH-ZEHNDER E APÓS O FILTRO ÓPTICO.	82
FIGURA 3.20 - ESPECTRO ÓPTICO APÓS A FIBRA ÓPTICA E APÓS O DIVISOR DE POTÊNCIA.....	82
FIGURA 3.21 – EVM (%) X CANAIS DA SIMULAÇÃO NO SENTIDO OLT-ONUS.....	83
FIGURA 3.22 - ESQUEMA SIMULAÇÃO ONUS-OLT COM 16 CANAIS.....	85
FIGURA 3.23 – EVM X CANAL PARA SIMULAÇÃO SEM FIBRA ÓPTICA.(IMOD É O ÍNDICE DE MODULAÇÃO)	85
FIGURA 3.24 – ESPECTRO ELÉTRICO (EIXO ESQUERDO EM DBM) DAS PORTADORAS EM CIMA DA RESPOSTA (EIXO DIREITO EM DB) EM FREQUÊNCIA DA FIBRA ÓPTICA DE 20 KM PARA UM COMPRIMENTO DE ONDA DE 1550 NM.	87
FIGURA 3.25 - ESQUEMA DA SIMULAÇÃO ONUS-OLT COMPLETA.	87
FIGURA 3.26 – ESPECTRO ELÉTRICO RECEBIDO DA SIMULAÇÃO ONUS-OLT COMPLETA.....	88
FIGURA 3.27 – EVM X CANAIS DA SIMULAÇÃO ONUS-OLT COMPLETA.	89
FIGURA 4.1 – DISTRIBUIÇÃO DAS SUBPORTADORAS DO SÍMBOLO OFDM ENTRE AS ONUS E O CANAL DE CONTROLE.	92
FIGURA 4.2- ESQUEMA EAM BS OFDM PON.	93
FIGURA 4.3 – ESQUEMA RSOA BS OFDM PON.	94
FIGURA 4.4 - ESPECTRO DIGITAL DO SÍMBOLO OFDM, DEMONSTRANDO A DIVISÃO DO SÍMBOLO ENTRE AS ONUS E O CANAL DE CONTROLE.....	96
FIGURA 4.5 – SOMA DOS SÍMBOLOS OFDM DAS ONUS 1, 2 E 3 NO ACOPLADOR.	96
FIGURA 4.6 – (A) EXEMPLO DE FDMA-PON COM ONUS COM DISTÂNCIAS DE 20 [19+1] KM, 30 [19+11] KM E 50 [19+31] KM, (B) SUBPORTADORAS SOBRE A RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DA FIBRA DA ONU 1, (C) SUBPORTADORAS SOBRE A RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DA FIBRA DA ONU 2 E (D) SUBPORTADORAS SOBRE A RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DA FIBRA DA ONU 3.....	99
FIGURA 4.7 – SIMULAÇÃO – SENTIDO DE TRANSMISSÃO OLT-ONUS.....	102
FIGURA 4.8 - ESPECTRO ELÉTRICO DO SINAL OFDM NA OLT (SENTIDO DE TRANSMISSÃO OLT-ONUS). 102	

Índice de Figuras

FIGURA 4.9 - ESPECTRO ÓPTICO DO SINAL NA SAÍDA DO MZM.....	103
FIGURA 4.10 - SIMULAÇÃO – SENTIDO DE TRANSMISSÃO ONUS-OLT.....	104
FIGURA 4.11 - ESPECTRO ELÉTRICO DA ONU 32 COM CANAL DE CONTROLE.....	104
FIGURA 4.12 - ESPECTRO ÓPTICO DA ONU 32 COM CANAL DE CONTROLE.....	105
FIGURA 4.13 – VALOR MÉDIO DE EVMXONUS PARA SIMULAÇÕES COM DISTÂNCIAS E LARGURAS DE BANDA IGUAIS ENTRE AS ONUS.....	105
FIGURA 4.14 – ESPECTRO ELÉTRICO RECEBIDO NA OLT COM LARGURAS DE BANDA E DISTÂNCIAS DAS ONUS DIFERENTES ENTRE SI.....	107
FIGURA 4.15 – EVM X ONU PARA AS SIMULAÇÕES (A) SEM CONTROLE DE DISTÂNCIA E LARGURA DE BANDA, (B) COM CONTROLE DE DISTÂNCIA E LARGURA DE BANDA.....	108

SIGLAS

Sigla	Descrição
ANSI	<i>American national standards institute</i>
APON	<i>ATM PON (Rede óptica passiva ATM)</i>
ASE	<i>amplified spontaneous emission</i>
ATM	<i>Asynchronous transfer mode (Modo de Transferência Assíncrono)</i>
AWG	<i>arrayed waveguide grating</i>
AWGN	<i>additive white Gaussian noise</i>
BPON	<i>Broadband PON</i>
BS	<i>Bandwidth Scalable</i>
CAG	Controle automático de ganho
CO	<i>Central office (Escritório central)</i>
CO-OFDM	<i>coherent optical orthogonal frequency division multiplexing</i>
CW	<i>Continuous wave (Onda continua)</i>
DD-OOOFDM	<i>direct-detection optical orthogonal frequency division multiplexing</i>
Demux	<i>Demultiplex</i>
DFB	<i>Distributed feedback laser (Laser semiconductor com realimentação distribuída)</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
DSP	<i>Digital signal processing (processamento digital de sinais)</i>
EAM	<i>Electro absorption modulator (Modulador de eletro absorção)</i>
EDFA	<i>Erbium-doped fiber amplifier (Amplificador óptico com fibra dopada com Érbio)</i>
EoD	<i>Education on demand (Educação por demanda)</i>
EPON	<i>Ethernet Passive optical network (Rede óptica passiva Ethernet)</i>
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i>
FDM	<i>Frequency division multiplex (Multiplexação por divisão em frequência)</i>
FDMA	<i>Frequency division multiple access (Múltiplo acesso por divisão de frequência)</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FIR	<i>Finite impulse response</i>

Sigla	Descrição
FP-LD	<i>Fabry-Perót laser diode</i>
FTTC	<i>Fiber to the curb</i> (“Fibra até à calçada”)
FTTH	<i>Fiber to the home</i> (“Fibra até em casa”)
GPON	<i>Gigabit passive optical network</i> (Rede passiva óptica Gigabit)
HDTV	<i>High-definition television</i> (Televisão de alta definição)
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IPTV	<i>Internet protocol television</i> (Televisão em protocolo Internet)
ISI	<i>intersymbol interference</i> (interferência intersimbólica)
MAC	<i>Media access control</i> (Controle de acesso ao meio)
MUX	<i>Multiplex</i>
MZM	<i>Mach-Zehnder modulator</i> (modulador Mach-Zehnder)
OBI	<i>optical beat interference</i> (Interferência devido à batimento óptico)
ODSB	<i>optical double side band</i> (dupla banda lateral óptica)
OFDM	<i>Orthogonal frequency division multiplexing</i> (Multiplexação por divisão de frequência ortogonal)
OFDMA	<i>Orthogonal frequency division multiple access</i> (Múltiplo acesso por divisão de frequência ortogonal)
OLT	<i>Optical line terminal</i> (Terminal de linha óptico)
ONT	<i>Optical network terminal</i> (Terminal de rede óptica)
ONU	<i>Optical network unit</i> (Unidade de rede óptica)
P2MP	<i>Point to multipoint</i> (Ponto a multiponto)
P2P	<i>Peer to peer</i> (Ponto a ponto)
PON	<i>Passive optical network</i> (Rede óptica passiva)
QAM	<i>Quadrature amplitude modulation</i> (Modulação de amplitude em quadratura)
QoS	<i>Quality of service</i> (Qualidade de serviço)
QPSK	<i>Quadrature phase shift keying</i> (Chaveamento em quadratura de fase)
RF	Radio frequência
RN	<i>Remote node</i> (Nó remoto)
RSOA	<i>Reflective semiconductor optical amplifier</i> (Amplificador óptico semicondutor reflexivo)
SCM	<i>Subcarrier modulation</i> (Modulação de subportadora)
SNR	<i>Signal-to-noise ratio</i> (Relação sinal ruído)
SOA	<i>Semiconductor optical amplifier</i> (Amplificador óptico semicondutor)
TDM	<i>Time division multiplex</i> (Multiplexação por divisão de tempo)

Siglas

Sigla	Descrição
TDMA	<i>Time division multiple access</i> (Múltiplo acesso por divisão de tempo)
VoD	<i>video on demand</i> (Vídeo sobre demanda)
VoIP	<i>Voz sobre IP</i>
WDM	<i>Wavelength division multiplexing</i> (Multiplexação por divisão de comprimento de onda)
WDMA	<i>Wavelength division multiple access</i> (Múltiplo acesso por divisão de comprimento de onda)
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

O aumento na utilização das redes de compartilhamento de arquivos (*peer-to-peer*) e o fortalecimento dos serviços baseados em voz e imagens como, por exemplo, IPTV, vídeo sobre demanda, vídeo conferência e jogos online, alteraram os padrões dos tráfegos das redes de acesso. Cada vez mais há a necessidade por redes de acesso com altas taxas de transmissão garantidas.

As redes de acesso ópticas se apresentam como uma tecnologia capaz de prover aos usuários finais taxas de transmissão maiores que 100 Mbps, ao demonstrarem características como imunidade a interferência e grande largura de banda de transmissão. Porém estas características não são as únicas requeridas para uma rede de acesso e outros fatores como custo, simplicidade de instalação, manutenção e capacidade de expansão também desempenham um papel de grande importância.

Um tipo de rede óptica com capacidade de fornecer todos os requerimentos das redes de acesso são as redes ópticas passivas (PON - *Passive Optical Network*). As quais vêm sendo estudadas e testadas em vários esquemas de compartilhamentos de banda de transmissão. As principais técnicas de compartilhamento estudadas são: multiplexação por divisão no tempo - TDM (*Time division multiplex*), multiplexação por divisão de comprimento de onda - WDM (*Wavelength-division multiplexing*), multiplexação por divisão em frequência - FDM (*Frequency division multiplex*).

As PONs se apresentam como uma ótima opção de rede óptica para acesso de última milha, pois permite taxas de transmissão, tanto de subida como de descida, superiores às

taxas apresentadas pelas atuais tecnologias empregadas. Além disto, apresenta maiores distâncias entre as centrais e os consumidores. Em relação às redes ópticas, as PONs apresentam um custo muito menor em transceptores e quilometragem de fibra, se tornando uma opção viável para uma rede de acesso óptica (Kramer, et al., 2002).

As PONs para acesso da última milha podem ser divididas em função das técnicas de múltiplo acesso que empregam. As redes que utilizam as técnicas de múltiplo acesso por divisão de tempo (TDMA - *Time Division Multiple Access*) possuem um custo relativamente baixo e já apresentam redes comerciais padronizadas como EPON (Ethernet PON), GPON (Gigabit PON) e novíssima 10G-EPON. Como o estado da arte das redes TDMA-PONs a 10G-EPON possui capacidade de atender 32 unidades ópticas de rede (ONU – *optical network unit*) a distâncias de até 20 km, além de fornecer através de alocação dinâmica taxas de transmissão de 1 Gbps por ONUs (Hajduczenia, et al., 2007) (IEEE P802.3av Task Force, 2006).

Enquanto as PONs que empregam múltiplo acesso por divisão de comprimento de onda (WDMA - *Wavelength Division Multiple Access*) são as que apresentam a maior promessa de altas taxas de transmissão. Porém devido aos altos custos relacionados aos seus dispositivos ópticos as WDMA-PONs está em desenvolvimento e não possuem versões comerciais.

Outra técnica que tem capacidade de prover as altas taxas de transmissão a custos comparáveis das TDMA-PONs é a técnica de múltiplo acesso por divisão de frequência (FDMA – *Frequency Division Multiple Access*). Porém não é empregado em PONs, devido aos problemas criados pelas diferenças nos comprimentos de onda das fontes ópticas situadas nas ONUs. Estes problemas conhecidos como sobreposição dos canais de frequência e interferência devido à batimento óptico (OBI - *optical beat interference*)

(Wood, et al., 1993) (Woodward, et al., 1998), atrapalham o compartilhamento da banda de transmissão no sentido de transmissão dos usuários para a central.

A primeira contribuição deste estudo é viabilizar as FDMA-PONs através de um sistema de alimentação óptico central construído com uma única fonte óptica posicionada no terminal de linha óptico (OLT – *optical line terminal*). Utilizando-se da fonte óptica central o estudo também irá propor como contribuição duas PONs com tecnologias FDMA. A primeira, nomeada FDMA-SCM PON (SCM *Subcarrier Multiplex*), irá utilizar de dispositivos de RF (radio frequência) para gerar canais de frequência, os quais as ONUs enviaram e receberam seus dados. E a segunda, nomeada BS OFDMA-PON (BS *Bandwidth Scalable, OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), empregará subportadoras ortogonais para transmitir os dados das ONUs.

1.1 - ESCOPO DO TRABALHO

No segundo capítulo tem-se uma visão das principais PONs atuando como redes de acesso. São apresentadas as vantagens, desvantagens e particularidades de cada tipo. E um detalhamento da FDMA-PON com a apresentação das tecnologias que serão empregadas nas redes propostas. Há também a ilustração dos problemas que as fontes ópticas presentes nas ONUs geram na transmissão da rede. Ao final do capítulo há uma pequena comparação entre os tipos das PONs.

O terceiro capítulo apresenta em conjunto a proposta da solução do problema das fontes ópticas com comprimentos de onda diferentes das ONUs e a proposta da rede de acesso FDMA-SCM PON. A FDMA-SCM PON é descrita utilizando dois tipos de moduladores ópticos nas ONUs. A primeira utilizando o amplificador óptico semicondutor reflexivo (RSOA - *Reflective semiconductor optical amplifier*) como

modulador óptico e a segunda usa o modulador de eletro absorção (EAM - *Electro absorption modulator*). A FDMA-SCM PON é analisada através de simulações com a descrição detalhada dos parâmetros utilizados.

No quarto capítulo a proposta da arquitetura BS OFDMA-PON é detalhada como uma rede FDMA com capacidade de empregar alocação dinâmica da banda de transmissão e baseada em OFDMA. Como o OFDMA é uma técnica baseada em OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*) ela apresenta vantagens para as PONs como redução da taxa de símbolo e complexidade de equalização (Armstrong, J, 2009). Finalmente, as conclusões e trabalhos futuros são apresentados no quinto capítulo.

Capítulo 2 - REDES ÓPTICAS PASSIVAS

2.1 - INTRODUÇÃO

O projeto de uma rede de acesso totalmente óptica utilizando uma configuração ponto a ponto tem um esquema básico igual ao mostrado na Fig. 2.1 (a), onde uma fibra óptica exclusiva será destinada a cada assinante da rede. O que impõem a utilização de $2N$ transceptores ópticos e LN km de fibras ópticas, sendo N o número de assinantes da rede e L a distância entre o assinante e o escritório central (CO – *Central Office*).

Nesta configuração a rede tem uma enorme capacidade de transmissão e alcance em distância, porém o custo de instalação e manutenção é proibitivo para assinantes residenciais, além de ocorrer um grande desperdício da capacidade total de transmissão possível.

Para diminuir o custo de instalação das fibras ópticas a configuração com ponto de distribuição pode ser empregada como mostrada na Fig. 2.1 (b). Nessa configuração uma fibra óptica tronco chega até um armário de distribuição. E a partir deste armário, o sinal óptico é dividido e encaminhado através de pequenos enlaces em fibra óptica aos assinantes.

Mesmo com um aumento no número de transceptores de $2N$ para $2N+2$, a configuração consegue diminuir o comprimento total de fibra óptica. Como ponto negativo fica a necessidade de um ponto de distribuição protegido contra vandalismo e variações climáticas. Neste ponto de distribuição a operação adequada dos equipamentos implica em uma infra-estrutura com fornecimento de eletricidade e pode também

requerer a instalação de ar condicionado, de modo que há um aumento no custo de instalação e manutenção das redes.

A próxima configuração considerada consegue diminuir tanto a instalação e manutenção das fibras ópticas como o número de transceptores ópticos. A rede óptica passiva, mostrada na Fig. 2.1 (c), pode ser projetada com L km de fibra óptica e $N+1$ transceptores ópticos, o que significa uma enorme diminuição nos custos de implantação, mesmo ao empregar outros elementos passivos, como o acoplador/divisor de potência óptica.

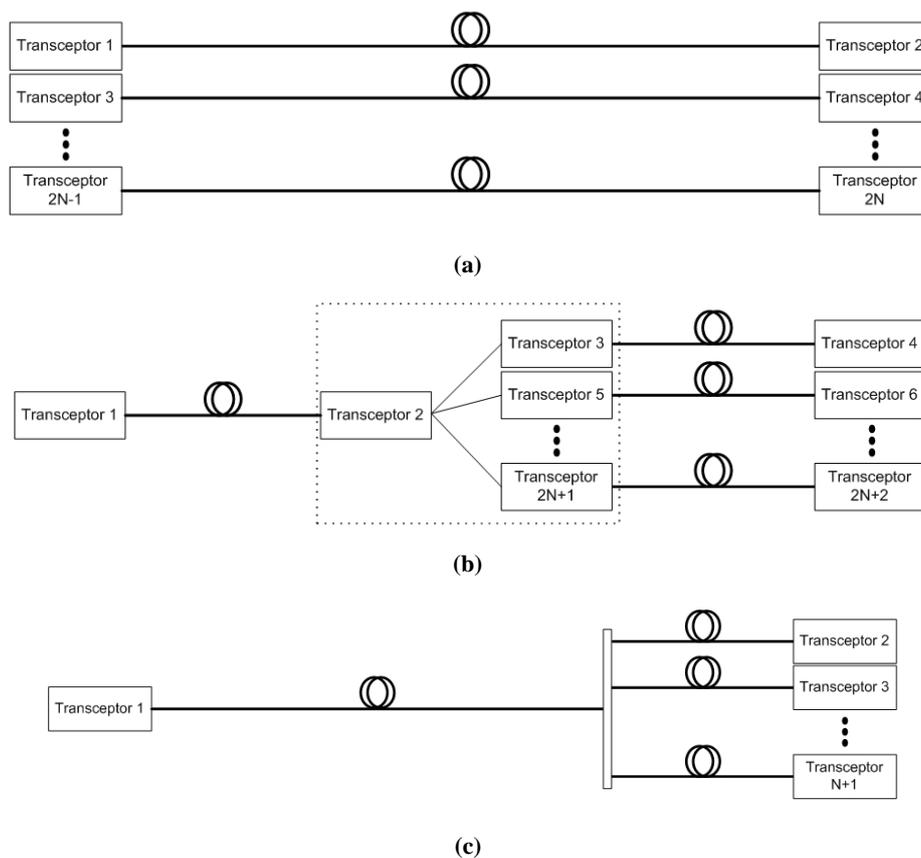


Figura 2.1 – Configurações para as redes ópticas (a) ponto a ponto, (b) com armário de distribuição e (c) passiva.

As PONs se mostram como uma ótima opção para uma rede de acesso totalmente óptica¹ em curtas distâncias, pois apresentam características como custo de implantação e manutenção, flexibilidade e escalonamento superiores às redes ópticas ponto a ponto ou com ponto de distribuição (Kramer, et al., 2002). As PONs são formadas com elementos passivos ópticos com grande largura de banda de transmissão e não possuem interrupções nos caminhos ópticos de transmissão. Assim é possível inserir em paralelos outros serviços, como por exemplo, o serviço broadcast de vídeo, o qual irá aproveitar muito bem as características ponto-multiponto (P2MP) das PONs.

Em uma PON tem-se um terminal de linha óptico (OLT – *optical line terminal*) conectado a N unidades ópticas de rede (ONU – *optical network unit*) por uma fibra óptica com um ou mais acopladores/divisores passivos de potência óptica. Enquanto a OLT se localiza no CO, as ONUs ficam diretamente posicionadas nos assinantes. Essas redes podem ser construídas em diferentes topologias tais como árvore, em barramento, em anel ou combinações entre essas topologias como mostradas na Fig. 2.2.

A forma que o acoplador/divisor de potência óptica atua na PON depende do sentido de transmissão. No sentido OLT para as ONUs (OLT-ONUs) ele é um divisor de potência, assim o sinal óptico colocado pela OLT chega para as ONUs com o mesmo formato, porém com uma fração da potência óptica.

No sentido de transmissão das ONUs para a OLT (ONUs-OLT), as potências ópticas acopladas pelas ONUs chegam apenas a OLT, desta forma não há por parte de nenhuma ONU, o conhecimento das atividades de transmissão, o que poderia provocar colisões entre os dados das ONUs que transmitirem seus serviços ao mesmo tempo.

¹ No texto o termo rede de acesso totalmente óptica se refere a redes onde toda a transmissão de dados ocorre no meio óptico sem a utilização de nenhum dispositivo eletrônico a não ser nas pontas onde o processamento de dados será no domínio elétrico.

Para compartilhar o meio de transmissão óptico sem que ocorram estas colisões as PONs utilizam técnicas de múltiplo acesso ao meio de transmissão. As técnicas básicas de múltiplo acesso mais exploradas pelas PONs são (Kani, et al., 2006):

- Múltiplo acesso por divisão de tempo (TDMA - *Time Division Multiple Access*);
- Múltiplo acesso por divisão de comprimento de onda (WDMA - *Wavelength Division Multiple Access*).

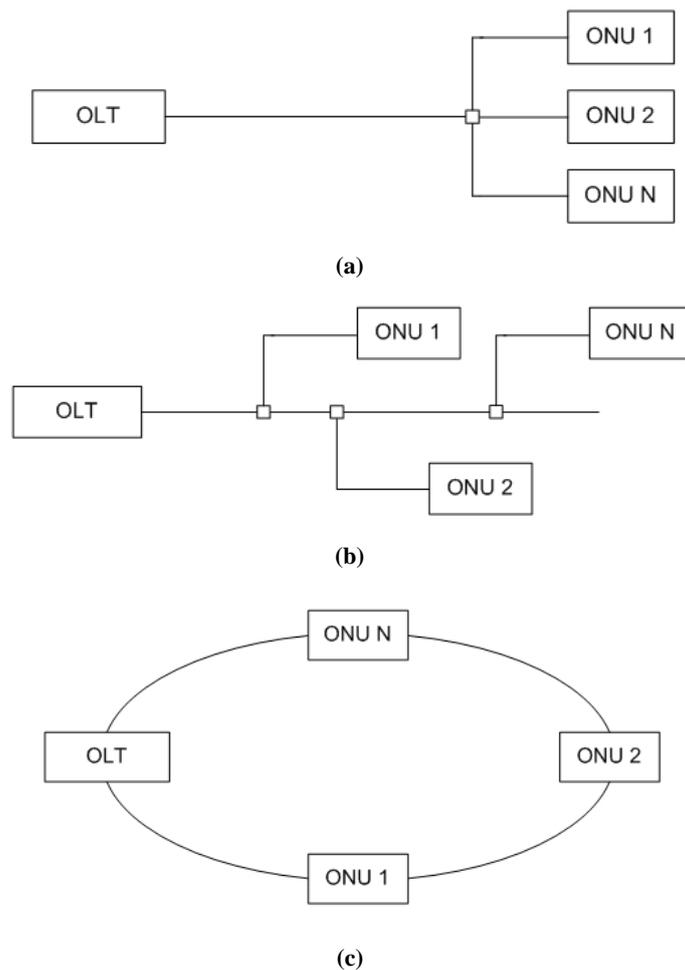


Figura 2.2 - (a) Topologia em árvore utilizando um divisor 1xN, (b) Topologia em barramento utilizando vários divisores 1x2 e (c) Topologia em anel utilizando vários divisores de 1x2.

Outra técnica de múltiplo acesso que possui um histórico bem sucedido em redes de acesso de última milha operando no domínio elétrico é a técnica de múltiplo acesso por divisão de frequência (FDMA – *Frequency Division Multiple Access*).

Este capítulo apresenta as dificuldades enfrentadas para empregar o FDMA em PONs, para depois apresentar uma forma de utilizar apenas a técnica em uma PON. A seção 2.2 apresenta as redes TDMA PON, na seção 2.3 são mostradas as características das redes WDMA PON, na 2.4 as redes FDMA-PON são demonstradas e na 2.5 é feita uma comparação entre os tipos de rede.

2.2 - TDMA – MÚLTIPLO ACESSO POR DIVISÃO DE TEMPO

Nesse método de acesso ao meio de transmissão, a multiplexação da informação ocorre no tempo. A rede divide o tempo total de transmissão do enlace em pequenos intervalos de tempo e desta forma todas as ONUs transmitem dentro do seu intervalo de tempo especificado, o que previne a ocorrência de colisões dos dados (Kramer, 2005).

Na TDMA-PON típica tem-se um comprimento de onda para o tráfego no sentido OLT-ONUs e outro para o sentido ONUs-OLT. A Fig. 2.3 apresenta um esquema básico para uma TDMA-PON (Kramer, et al., 2002).

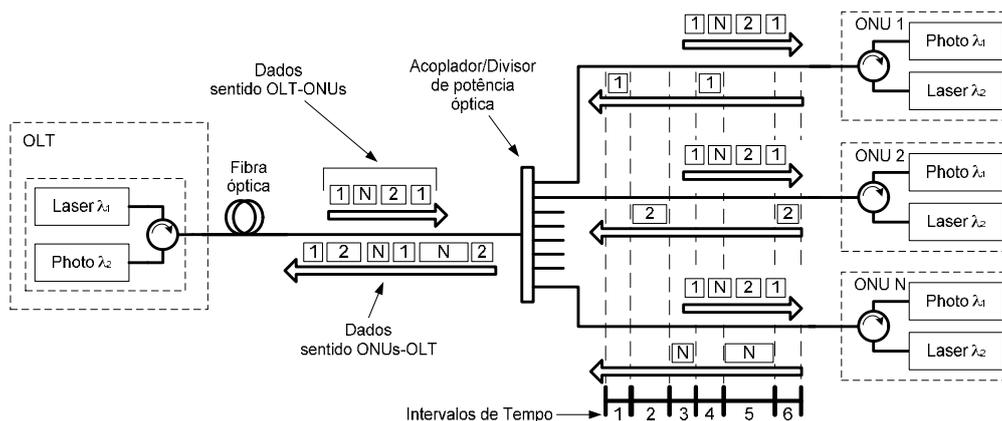


Figura 2.3 – Esquema básico de uma rede TDMA-PON.

No sentido OLT-ONUs a rede opera com transmissão broadcast que significa que o sinal que a OLT acopla na fibra óptica é transmitido de forma idêntica a todas as ONUs. A OLT acrescenta um cabeçalho com endereço da ONU de destino. E desta forma é atribuída à ONU a função de identificar e separar o tráfego que lhe pertence. Esta característica permite que outros serviços paralelos modulados em outros comprimentos de onda como, por exemplo, TV a cabo possa também utilizar a infra-estrutura da rede.

O sentido ONUs-OLT ocorre como um enlace ponto a ponto entre a ONU e a OLT, com uma distribuição de intervalos de tempo para todas as ONUs. Note na Fig. 2.3, que os dados das ONUs 1, 2 e N representados pelos retângulos indicados por 1, 2 e N são distribuídos entre os intervalos de tempo. O responsável pela distribuição sempre é a OLT, pois é a única unidade que consegue ver toda a rede. A distribuição pode seguir esquemas como, por exemplo;

- Distribuição fixa, na qual todas as ONUs recebem sempre um intervalo de tempo fixo;
- Distribuição dinâmica, o tamanho de intervalo de tempo é determinado em função do tráfego requerido pela ONU;
- Distribuição dinâmica diferenciada por classe de serviço, igual à distribuição dinâmica, mas leva em consideração a prioridade dos tráfegos das ONUs.

Quando a OLT tem o conhecimento das necessidades de tráfego das ONUs, ela pode empregar a multiplexagem estatística na distribuição dos intervalos de tempo e assim aumentar a eficiência da rede.

O baixo custo de implantação e manutenção da TDMA-PON a torna muito atrativa. Esse custo é baixo porque as ONUs são exatamente iguais e a OLT pode operar toda a rede com apenas um transceptor.

Mas há alguns problemas, como:

- A taxa de transmissão individual das ONUs estar vinculada diretamente com o número de ONUs;
- A rede também apresenta pouca robustez a falhas. Uma ONU com problemas transmitindo no tempo errado pode prejudicar toda a rede;
- A divisão de potência que ocorre no nó remoto implica em um alcance menor da rede;
- Como as ONUs recebem todos os tráfegos, deve haver um esquema de segurança como criptografia a fim de evitar que tráfegos destinados a uma ONU sejam espionados por outra.

Na definição dos tamanhos dos intervalos de tempo destinados às ONUs outro fator a ser considerado é o tempo de guarda. Nesse tempo de guarda são incluídos os tempos para a ativação e desativação do laser, flutuação do tempo de viagem de ida e volta, para o ajuste no controle automático de ganho (CAG) e ajuste do relógio de recuperação de dados.

No cálculo da taxa de transmissão individual real das ONUs esse tempo de guarda implica em uma diminuição na capacidade máxima da taxa de transmissão de subida de dados do sistema. Outro valor de tempo a ser considerado que depende do padrão da TDMA-PON utilizado é o intervalo para o ciclo de inclusão de novas ONUs, quando nenhuma ONU pode transmitir. Todos esses tempos implicam em uma diminuição da taxa de transmissão individual das ONUs.

As taxas de transmissão individuais das ONUs também sofrem devido ao fato da OLT ser o único com a capacidade de perceber toda a rede e dessa forma fica a cargo dele organizar e distribuir os intervalos de tempo às ONUs. Isso provoca um aumento significativo dos cabeçalhos no sistema, pois todas as ONUs, além do envio de seus dados, devem também acrescentar dados sobre a situação de sua pilha de transmissão.

Há protocolos que padronizam essas redes, o primeiro foi o APON (ATM PON), baseado em células ATM, depois o BPON (Broadband PON) e em seguida o GPON (Gigabit PON) e o EPON (Ethernet PON) e por último a 10G EPON (Kramer, 2005) (Hajduczenia, et al., 2007). A Tabela 2.1 apresenta alguns padrões e taxas das TDMA-PONs. As taxas de transmissão típicas de APON/BPON são 622 Mbps para o sentido OLT-ONUs e 155 Mbps para sentido ONUs-OLT, ou mesmo 622 Mbps simétrico. Enquanto para GPON as taxas de transmissão ficam em 2488 Mbps para o sentido OLT-ONUs e 622 Mbps para o sentido ONUs-OLT. E para o EPON as taxas de transmissão serão simétricas de 1,25 Gbps (Hajduczenia, et al., 2007) (IEEE P802.3av Task Force, 2006) (IEEE 802.3 Ethernet in the First Mile Study Group, 2001) (McGarry, et al., 2004) (Lee, et al., 2006) (Shan, et al., 2001).

Tabela 2.1 – Comparativo de taxa de transmissão para TDMA PONs.

TIPO	APON/BPON		GPON		EPON	10G EPON
Norma	ITU-T G.983		ITU-T G.984		IEEE 802.3h	IEEE 802.3av
Quantidade de ONUs	32		32/64		32	32
Taxa de transmissão OLT-ONUs	155 Mbps	622 Mbps	1,25 Gbps	2,5 Gbps	1,25 Gbps	10 Gbps
Taxa de Transmissão ONUs-OLT	155 Mbps	622 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	1,25 Gbps	10 Gbps

2.3 - WDMA – MÚLTIPLO ACESSO POR DIVISÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA

Na WDMA-PON, todas as ONUs possuem seu próprio par de comprimentos de onda dedicado. Em contraste com o TDMA no qual um comprimento de onda é dividido entre todas as ONUs. Com seu próprio comprimento de onda as ONUs possuem uma conexão

ponto a ponto virtual com a OLT que permite enviar dados, independentemente, do tráfego proveniente das outras ONUs e traz grandes benefícios como transparência de protocolo, garantia de qualidade de serviço (QoS - *Quality of service*), independência da taxa de transmissão, relação sinal ruído (SNR - *Signal-to-noise ratio*) independente do número de ONUs e um nível superior de segurança e privacidade em relação à TDMA-PON.

A independência das taxas de transmissão e a transparência de protocolo da rede permitem designar uma largura de banda dedicada para todas as ONUs que não interfiram ou causem restrições a qualquer outra ONU. É uma grande vantagem que permite ter assinantes com diferentes ONUs e diferentes taxas de transmissão. E, desde que seja respeitada a janela de transmissão do canal WDM, as atualizações das ONUs podem ocorrer sem interferir no funcionamento da rede ou de modo que não provoque uma grande alteração da infra-estrutura da rede.

Na literatura há diversos padrões e esquemas que descrevem como são constituídas as WDMA-PON (Kani, et al., 2006) (Lee, et al., 2006) (Nakamura, et al., 2006) (<http://www.ciphotonics.com/>). A Fig. 2.4 ilustra uma WDMA-PON típica utilizando um esquema com uma fibra bidirecional e um AWG (*arrayed waveguide grating*). Note que todas as ONUs possuem seu próprio comprimento de onda e utiliza-se um AWG independente de temperatura no nó remoto (RN - *Remote Node*) para realizar toda a operação de separação dos comprimentos de onda para as ONUs. De acordo com (Leick, et al., 2006) esse dispositivo passivo possui baixa perda (<5.3 dB), excelente isolamento (> 23 dB), boa estabilidade para variação de temperatura e opera até com 100% de umidade. O espaçamento entre os canais pode ser de 50 a 100 GHz (Lee, et al., 2006), e operar entre a faixa de temperatura de -30 a +70 °C.

O AWG como multiplex/demultiplex (mux/demux) apresenta uma grande vantagem na questão de potência óptica em relação aos divisores de potência. Como o comprimento de onda é direcionado somente a uma ONU, não há divisão da potência óptica do comprimento de onda e isso implica em maiores distâncias para a PON.

No esquema apresentado na Fig. 2.4, todas as ONUs devem ter seu próprio par de transceptores distintos de toda a rede e seu comprimento de onda deve casar com a janela de transmissão do AWG. Isso pode ser realizado com um laser DFB (*Distributed feedback laser*) com controle de temperatura ou um laser sintonizável. O problema dessas soluções é o custo, ainda impraticável para assinantes residenciais.

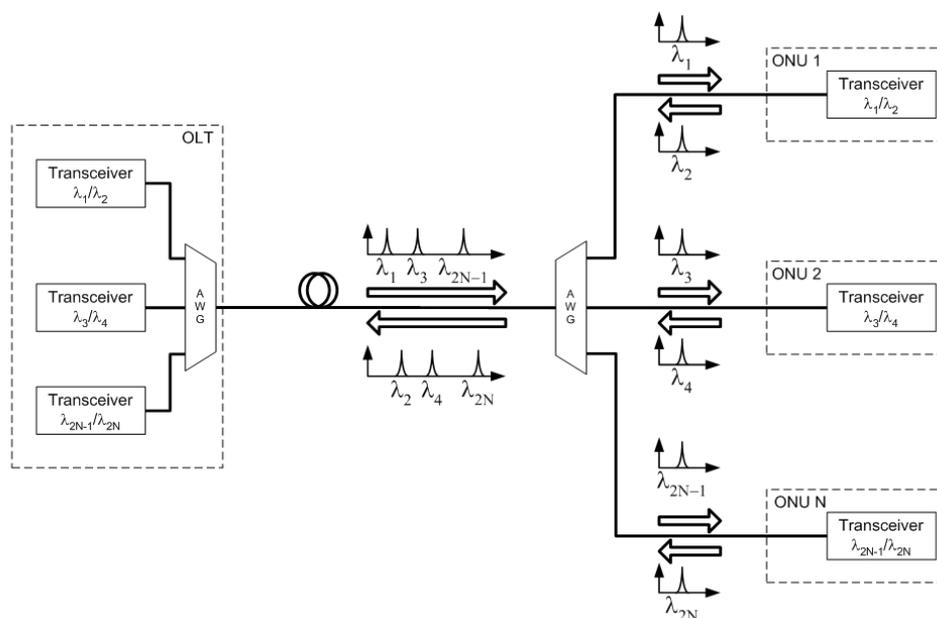


Figura 2.4 – WDMA-PON bidirecional utilizando AWG.

Um modo de resolver esse problema é utilizar ONUs com fontes ópticas de baixo custo independentes do comprimento de onda (*color-free*). Essas ONUs são iguais e podem ser produzidas em escala baixando, consideravelmente, os custos. Há na literatura vários artigos que apresentam uma ONU com fonte óptica *color-free* de baixo custo (Genay, et al., 2005)(Kang, et al., 2006)(Kim, et al., 2006)(Wilson, et al., 2002).

Propõem-se nestes trabalhos esquemas utilizando fontes ópticas alimentadoras centrais localizadas na OLT. Neste caso o sinal óptico de alimentação será gerado por um conjunto de lasers DFB ou por uma fonte de luz que apresenta amplo espectro. Como, por exemplo, uma fonte ASE (*amplified spontaneous emission*). No caso de uma fonte de amplo espectro, ela antes deve ser fatiada por um AWG, técnica que pode diminuir custos (Leick, et al., 2006).

Independentes do esquema de geração da fonte óptica alimentadora, na OLT são geradas várias portadoras ópticas CW (*continuous wave*). As quais são transmitidas pela fibra óptica para as ONUs, onde estas serão moduladas e reenviadas pela fibra óptica à OLT.

Para realizar a modulação dos sinais ópticos CW nas ONUs devem ser utilizados dispositivos de custo relativamente baixo como, por exemplo, o diodo laser Fabry-Pérot (FP-LD - *Fabry-Pérot laser diode*), o amplificador óptico semiconductor reflexivo (RSOA - *Reflective semiconductor optical amplifier*) ou o modulador de eletro absorção (EAM - *Electro absorption modulator*), que trabalham em uma ampla faixa de comprimento de onda.

O dispositivo RSOA apresenta, além da capacidade de modulação, um ganho óptico em uma ampla faixa de comprimentos de onda (Genay, et al., 2005). Isso permite a construção de uma ONU, a qual além de modular independentemente do comprimento de onda, amplifica o sinal óptico incidente, o que implica em um maior alcance para a rede PON. Esse ganho é relatado como sendo 20 dB (Genay, et al., 2005). Essa característica de ganho junto com uma melhor maturidade comercial, transforma o RSOA em uma boa opção para a implementação de ONUs independente de comprimento de onda com um custo efetivo.

A Fig. 2.5 apresenta um esquema básico para uma WDMA-PON que utiliza uma fonte óptica de alimentação na OLT e RSOA nas ONUs. Na OLT dentro do transceptor, um laser é modulado com o tráfego destinado à ONU e gera assim um sinal óptico modulado. Uma fonte óptica produzirá um sinal CW óptico com comprimento de onda diferente que é somado ao sinal modulado. Estes dois comprimentos de onda são propagados pela fibra óptica até a ONU.

Ao chegar à ONU os dois comprimentos de onda são separados com a ajuda do circulador e do filtro reflexivo do tipo grade de Bragg. O comprimento de onda que é modulado com os dados vai para o fotodetector para a recuperação dos dados, enquanto o comprimento de onda CW entra no RSOA onde é amplificado, modulado com os dados destinados a OLT e reenviado pela fibra óptica. Note que todas as ONUs continuam a usar um par de comprimentos de onda, porém como o RSOA responde bem a uma grande faixa de comprimentos de onda as ONUs se tornam independente de comprimento de onda, sendo desta forma igual para todos os assinantes.

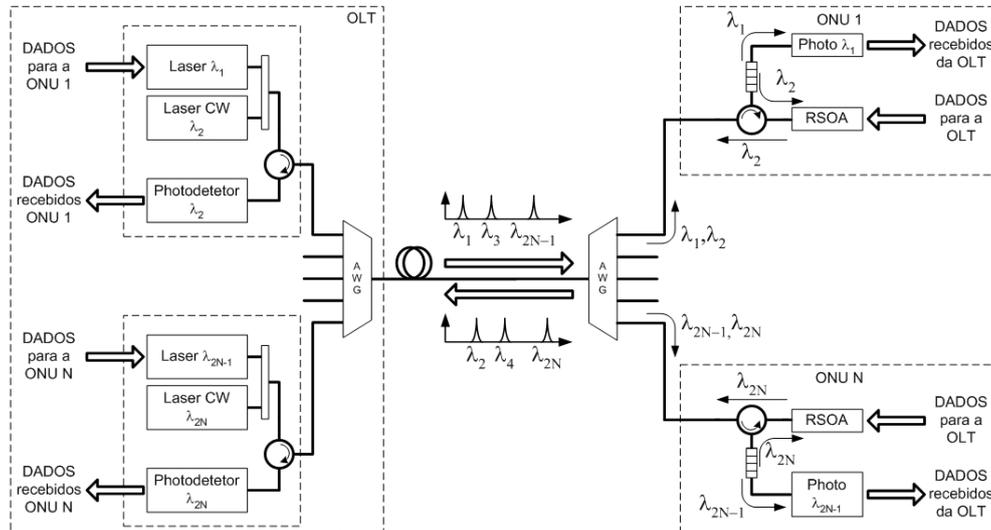


Figura 2.5 – Esquema básico de uma WDMA-PON usando fonte óptica de alimentação na OLT.

A flexibilidade gerada pela independência da taxa de transmissão e de protocolos permite que a rede atenda diversos tipos de usuários na mesma PON. Mas, há um grande desperdício de banda de transmissão, uma vez que o enlace óptico pode, facilmente, operar a taxas de transmissão maiores que 10 Gbps. Contudo poucos usuários residenciais conseguiriam utilizar e pagar por tal enlace. A partir dessas considerações, assume-se que os enlaces da rede devem trabalhar em taxas de transmissão menores mesmo que a infraestruturas física dos enlaces fique subutilizadas.

A WDMA-PON é considerada uma solução para o futuro por causa do seu custo de implantação e manutenção. Porém vários estudos vêm sendo realizados, exaustivamente, para que a rede possa ser implantada. Algumas soluções apresentadas na literatura especializada implicam em um reaproveitamento do comprimento de onda do sentido OLT-ONUs no tráfego do sentido ONUs-OLT (Kwon, Hyuk-Choon; Won, Yong-Yuk; Han, Sang-Kook, 2007)(Kim, et al., 2006)(Kang, et al., 2006). Desse modo todas as ONUs utilizarão apenas um comprimento de onda ao invés do par. Isso diminui o custo, mas aumenta muito a complexidade das ONUs.

2.4 - FDMA - MÚLTIPLO ACESSO POR DIVISÃO DE FREQUÊNCIA

No FDMA as dados são transportados por canais de frequência na fibra óptica. Diferente do WDMA, onde todas as ONUs recebem um comprimento de onda, no FDMA as ONUs dividem entre si a banda de transmissão de um único comprimento de onda.

As características da FDMA-PON que a torna um opção interessante, como uma rede de acesso óptico, inclui-se a capacidade de repartir eficientemente a grande largura de banda de transmissão da fibra óptica, permiti a utilização de esquemas de modulação avançado ampliando a capacidade total de transmissão das ONUs. E por causa da

multiplexação ocorrer no domínio elétrico os dispositivos ópticos de todas as ONUs são iguais, o que implica em um custo baixo de projeto, instalação e manutenção das FDMA-PON.

Na FDMA-PON as taxas de transmissão individuais das ONUs são também independentes, pois os canais de frequência podem ser distribuídos com tamanhos diferentes. De forma que é possível adotar esquemas variados na divisão da largura de banda de transmissão, como por exemplo, as ONUs de 1 a 4 recebem canais de frequência com taxas de transmissão de 1 Gbps, as ONUs de 5 a 10 canais com taxa de 100 Mbps e os de 11 a 32 canais com taxas de 10 Mbps. É uma característica importante para uma rede de acesso, pois permite uma maior flexibilidade na implantação da rede. Esta flexibilidade também pode ser utilizada para que a ampliação da rede ocorra em função do aumento da demanda pelo serviço. Assim a rede de acesso é instalada com um mínimo de investimento para depois ser ampliada em passos pequenos em função da demanda pela mesma, sem que haja a necessidade de mudanças estruturais na rede.

Outro grande fator para o baixo custo da FDMA-PON é que as tecnologias eletrônicas necessárias para gerar os canais de frequência da FDMA-PON apresentam um alto grau de maturidade, pois são as mesmas tecnologias de RF e microondas empregadas atualmente. Essa maturidade facilita em muito a instalação e manutenção da rede de acesso.

Uma FDMA-PON pode ser construída em uma configuração de dois comprimentos de onda, um designado ao tráfego de descida no sentido de transmissão OLT-ONUs e outro para o tráfego de subida no sentido de transmissão ONUs-OLT. Em cada comprimento de onda as ONUs recebem um canal de frequência, este canal de frequência é uma porção limitada da banda de transmissão da fibra óptica. A soma destes dois canais de frequência cria um canal *full-duplex* entre a OLT e as ONUs. O que

possibilita que os tráfegos de dados entre as ONUs e a OLT ocorram, independentemente, das ONUs adjacentes. A quantidade e a largura de banda desses canais dependem de fatores como comprimento de onda da fonte óptica, do tipo da fibra, da distância percorrida ao longo da fibra óptica e da tecnologia empregada nos filtros eletrônicos.

Ao alocar os canais de frequência para as ONUs com larguras de banda de transmissões iguais tanto no sentido OLT-ONUs como no sentido ONUs-OLT os canais tornam-se *full-duplex* simétricos. É uma característica importante para algumas tecnologias cada vez mais utilizadas pelos usuários de banda larga, como vídeo conferência, redes de troca de arquivos *peer-to-peer*, jogos *online* e VoIp (Voz sobre IP).

Para determinar o tamanho da largura de banda de transmissão em RF de um comprimento de onda em uma fibra óptica primeiro devemos saber que quando a fonte óptica é modulada diretamente o sinal óptico resultante tem o formato conhecido como dupla banda lateral óptica (ODSB – *optical double side band*). A Fig. 2.6 ilustra esse formato. Note a criação de duas bandas de frequência laterais redundantes, denominadas como banda lateral inferior e banda lateral superior. Quando estas duas bandas laterais se propagam pela fibra óptica, elas sofrem diferentes deslocamentos de fase devido à dispersão cromática.

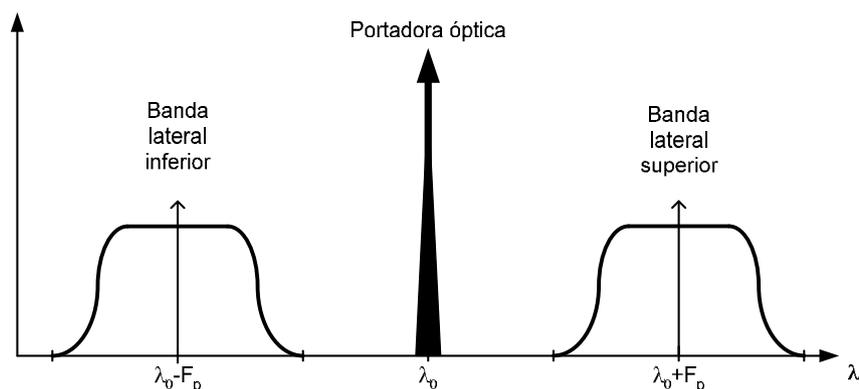


Figura 2.6 – Representação do sinal ODSB.

Ao se propagarem pela fibra óptica com esses deslocamentos de fase diferentes, estas bandas laterais encontram-se, periodicamente, com os sinais opostos, quando elas se anulam em um efeito conhecido como desvanecimento de potência de RF. Este efeito é caracterizado por nulos de potência em certas frequências da banda de transmissão da fibra óptica. Os nulos em frequência variam em função do comprimento de onda do sinal, com a dispersão da fibra, o comprimento da fibra e a potência do sinal injetado. Em regime linear, as frequências nas quais ocorrem os nulos de potência podem ser calculadas através da seguinte equação (Segatto, 2001):

$$f_n = \sqrt{\frac{c}{2\lambda^2 DL} (1 + 2n)} \quad (2.1)$$

onde c é a velocidade da luz, λ o comprimento de onda do laser, D a dispersão da fibra óptica, L o comprimento da fibra óptica e $n = 1, 2, \dots, 8$ a ordem do nulo.

A Fig. 2.7 apresenta o resultado de uma simulação gerada para obter a resposta em frequência para enlaces ópticos de uma fibra monomodo padrão, com o comprimento de onda de 1550 nm, para as distâncias de 10 km, 20 km e 30 km. Pode-se observar que a simulação obtém uma largura de banda de 3 dB de 13 GHz, 9 GHz e 8 GHz para L igual a 10, 20 e 30 km, respectivamente.

Como a razão entre a largura de banda dos canais e o número de canais é um valor finito e limitado, pode existir a necessidade de se utilizar esquemas de modulação que apresentam uma eficiência espectral superior, como exemplo, o QPSK (*quadrature phase shift keying*) ou o QAM (*quadrature amplitude modulation*). Neste trabalho as considerações e simulações serão feitas utilizando a modulação 16QAM.

Serão também considerados dois modos de dividir a banda de transmissão elétrica entre as ONUs. O primeiro esquema é conhecido como FDMA-SCM, onde todas as ONUs recebem uma única subportadora elétrica individual. E o segundo é o OFDMA

onde as ONUs recebem um subconjunto de subportadoras ortogonais. As próximas seções irão descrever estes dois esquemas.

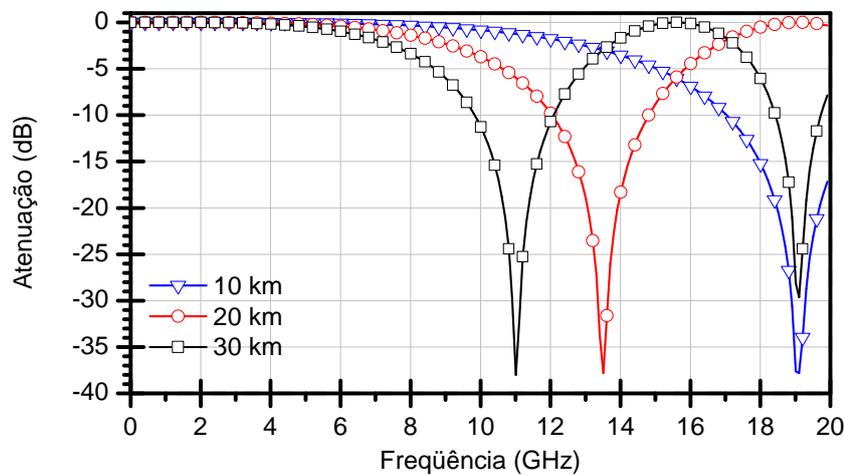


Figura 2.7 – Resposta em freqüência para uma fibra monomodo padrão, no comprimento de onda de 1550 nm.

2.4.1 - FDMA-SCM PARA UMA REDE PON

No sinal FDMA-SCM o canal de freqüência da ONU é formado com uma única subportadora separada por bandas de guarda, para minimizar a interferência entre os canais adjacentes gerada, por exemplo, por filtros e imperfeições dos osciladores.

O sinal FDMA-SCM óptico em uma rede PON é gerado de duas formas distintas. A primeira forma ocorre na OLT, como mostrada pela Fig. 2.8. Os sinais de dados (1, 2,..., N) destinados as ONUs modulam suas subportadoras elétricas (f_1, f_2, \dots, f_N), para então formarem o sinal FDMA-SCM ao serem somados no mux elétrico. Isso permite que o sinal FDMA-SCM seja tratado por dispositivos elétricos como filtros e equalizadores ainda no domínio elétrico, os quais são mais acessíveis que seus pares no domínio óptico.

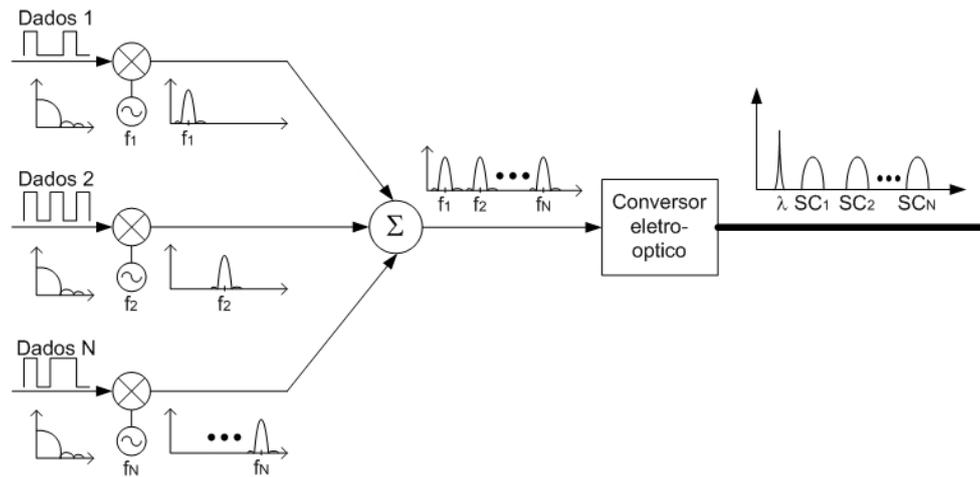


Figura 2.8 – Geração do sinal FDMA-SCM óptico na OLT.

A Fig. 2.9 apresenta um exemplo de um sinal FDMA-SCM elétrico formado por quatro sinais elétricos 16QAM com taxa de transmissão de 1000 Mbps modulados por subportadoras nas frequências de 750, 1750, 2750 e 3750 MHz.

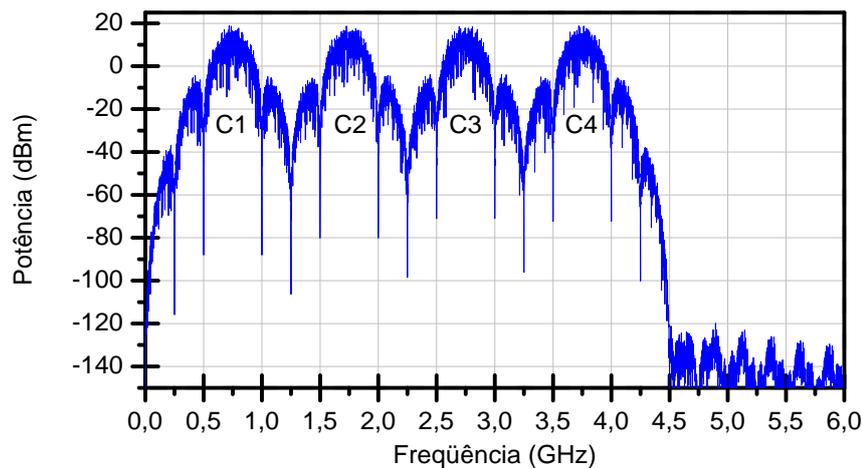


Figura 2.9- Quatro subportadoras nas frequências 750MHz, 1750MHz, 2750MHz e 3750MHz.

Este sinal elétrico é utilizado para modular um laser CW no comprimento de onda igual a 1550 nm através de um modulador Mach-Zehnder (MZM) gerando um sinal FDMA-SCM óptico igual ao mostrado pela Fig. 2.10. Pode-se observar um sinal óptico com uma portadora óptica principal e mais quatro subportadoras com potência óptica em

torno de 20 dB menor. Note no sinal FDMA-SCM óptico a presença das subportadoras nas bandas superior e inferior do comprimento de onda.

Após ser transmitido pela fibra, o sinal é recebido pelas ONUs, como mostrado no esquema da Fig. 2.11. Como pode ser visto, o sinal óptico é divididas em N partes idênticas e através dos fotoreceptores de todas as ONUs retornam ao domínio elétrico.

Um exemplo do sinal elétrico após o fotoreceptor pode ser observado na Fig. 2.12. É possível notar a presença de produtos de intermodulação gerados pela não linearidade quadrática do fotoreceptor. Esses produtos intermodulação diminuem a relação sinal-ruído do sinal recebido e estão diretamente ligados ao número de subportadoras do sistema e da potência recebida pelo fotodiodo. Quando os produtos de intermodulação não se superpõem às subportadoras podem ser retirados pelos filtros de canais.

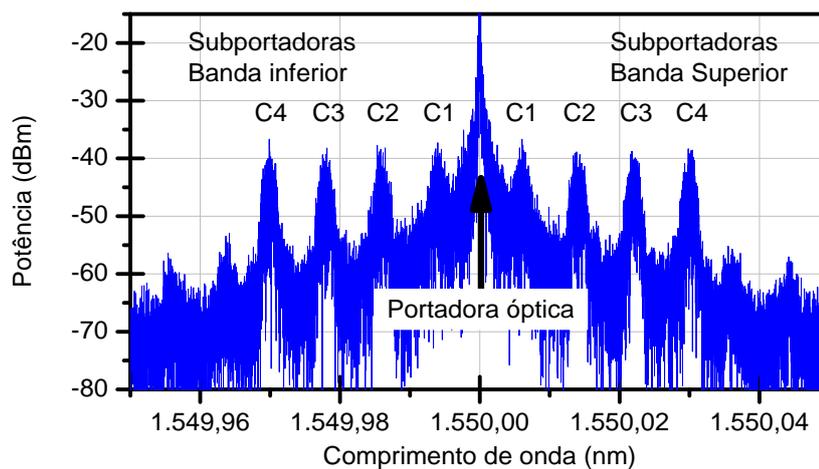


Figura 2.10 – Espectro óptico com 4 subportadoras.

Os filtros de canais também separam as subportadoras destinadas a cada ONU e permitem que depois o sinal de dados retorne à sua frequência original.

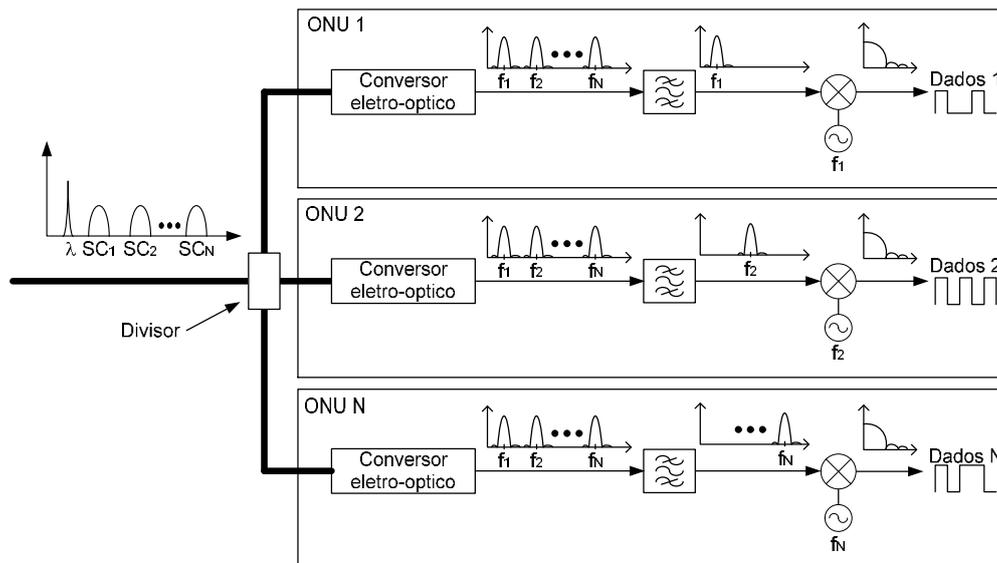


Figura 2.11 - Recepção do sinal SCM óptico em uma ONUs de uma rede PON.

Gerar o sinal SCM no domínio elétrico para depois transmiti-lo pela fibra só pode ser feito na OLT, pois é o único lugar onde se tem todos os tráfegos da rede reunidos. No caso das ONUs isso não ocorre, pois elas estão separadas fisicamente. De forma que não é possível a formação do sinal FDMA-SCM antes de ser convertido para o domínio óptico.

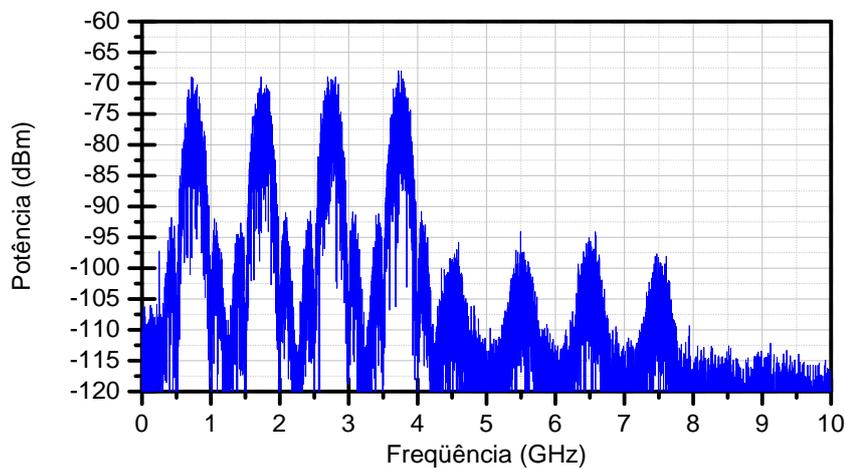


Figura 2.12 - Espectro elétrico do sinal após o fotodiodo com suas quatro subportadoras nas frequências 750MHz, 1750MHz, 2750MHz e 3750MHz mais os produtos de intermodulação.

A geração do sinal FDMA-SCM óptico no sentido de transmissão ONUs-OLT é mostrado na Fig. 2.13.

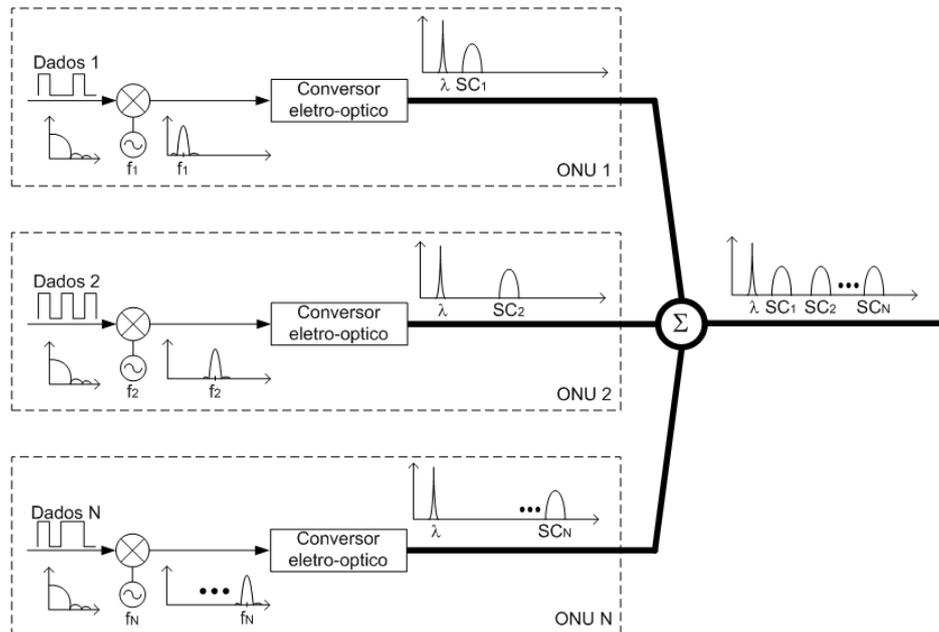


Figura 2.13 – Com as ONUs separadas fisicamente as subportadoras são somadas no acoplador óptico.

Primeiro os sinais de dados destinados a OLT modulam a sua respectiva subportadora. E depois esse sinal já deslocado em frequência modula a portadora óptica. Há, portanto dois processos de modulação: um elétrico e outro óptico. Dessa forma o sinal FDMA-SCM é formado no acoplador de potência, e na sequência é transmitido pela fibra óptica.

Devido ao sinal FDMA-SCM ser montado no domínio óptico surge alguns problemas. Primeiro, a modulação da portadora óptica pelo sinal deslocado em frequência provoca o surgimento de harmônicas no sinal óptico. E para evitar que essas harmônicas se transformem em ruído nos canais adjacentes elas precisam ser filtradas. Porém um filtro óptico estreito o suficiente para retirar esta harmônica é impraticável para uma rede de acesso. Esse problema pode ser mitigado com uma distribuição de frequência na qual as subportadoras evitem que as harmônicas se superponham aos outros canais.

2.4.2 - OFDM PARA UMA REDE PON

O OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*) é utilizado por aplicações como DSL (*Digital Subscriber Line*), televisão de alta definição (HDTV - high-definition television), IEEE 802.11a/g (Wi-Fi) e IEEE 802.16 (WiMAX - *Worldwide Interoperability for Microwave Access*). E possui características como alta eficiência espectral e fácil equalização, imunidade contra multi-percursos e ruídos impulsivos de largura de banda estreita(Prasad, 2004)(Bahai, et al., 2004).

Para a área de comunicações ópticas de acordo com (Armstrong, J, 2009) as características que também apresentam um grande interesse são:

- OFDM é uma solução para a interferência intersimbólica (ISI - *intersymbol interference*) causada por canais dispersivos;
- Mudança do domínio analógico para o domínio digital nos transceptores. Ao promover uma diminuição na complexidade do sistema. Primeiramente permitindo a utilização da FFT/IFFT (*Fast Fourier Transform/Inverse Fast Fourier Transform*) nos processo de modulação e demodulação. E na possibilidade do sinal ser tratado digitalmente o que em geral tem um custo inferior que no domínio analógico.

Para as FDMA-PONs além destas características uma que também deve ser destacada é a capacidade de múltiplo acesso do OFDM. Porque divide de um modo eficiente a largura de banda de transmissão entre as ONUs e habilita que a rede utilize alocação dinâmica. De forma que o sistema possa controlar independentemente as taxas de transmissão de todas as ONUs. Isso significa que há a possibilidade de definir as taxas de transmissões individuais das ONUs em função dos seus tráfegos, trazendo para a FDMA-PON uma das grandes vantagens das TDMA-PONs.

A idéia básica do OFDM consiste em dividir um fluxo de dados com uma elevada taxa de transmissão em vários fluxos de dados menores para então transmiti-los através de subportadoras posicionadas em frequências ortogonais (Prasad, 2004).

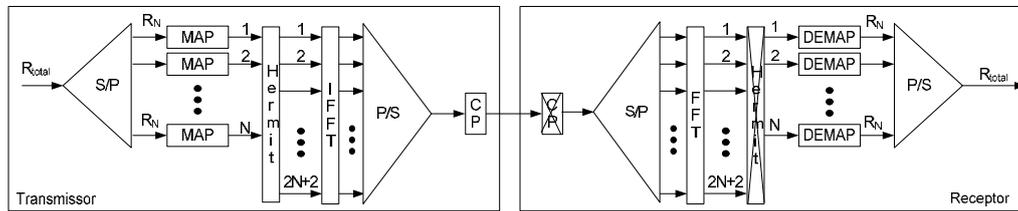


Figura 2.14 - Esquema básico para OFDM.

A Fig. 2.14 mostra o diagrama em blocos do esquema básico que será utilizado para gerar os sinais OFDM neste estudo. Nele o fluxo de bits de dados com uma taxa de transmissão R_{total} é dividido por um conversor série-paralelo em N fluxos menores com taxas de transmissão $R_N = R_{total}/N$.

Esses fluxos menores são mapeados em QAM, para depois adquirirem a simetria Hermitiana (SH) através do bloco Hermit (Schmidt, et al., 2007). Este é um importante bloco, pois ele obriga que o tamanho da IFFT/FFT seja de $2N+2$, mas traz o benefício de que o sinal após a IFFT o sinal seja composto somente por números reais ao invés de números complexos.

O bloco IFFT é o responsável de modular os fluxos de dados em subportadoras ortogonais. E antes de ser transmitido o sinal passa por um conversor paralelo-série e recebe o CP (*cycle prefix*) um intervalo de tempo utilizado para separar os símbolos dos sinais, responsável pelo combate contra a ISI e a dispersão do canal.

No receptor o sinal após ser retirado o CP passa por um conversor série-paralelo para depois ser demodulado pela função da transformada de Fourier (FFT). Na seqüência os símbolos QAM são reconvertidos a bits e alinhados pelo conversor paralelo-série.

O tamanho da FFT/IFFT é um parâmetro importante para o OFDM, pois aumentá-lo reduz a taxa de símbolo da cada subportadora fazendo o sinal menos vulnerável a ISI e

permite diminuir o tamanho do CP, porém aumenta a complexidade do processamento digital do transmissor e do receptor (Jansen, et al., 2007).

Outro parâmetro importante para o OFDM e o CP, que funciona como um intervalo de guarda entre os símbolos. É uma técnica eficaz para eliminar a ISI e para compensar os desvios de sincronização do símbolo OFDM. O CP é a cópia das últimas amostras do símbolo colocadas no início do mesmo símbolo. Como ele contém informações redundantes, é preferível que seja o menor possível. Portanto, é um *Trade-off* entre a robustez a ISI e taxa de transmissão (Shieh, et al., 2006).

Em sistemas ópticos OFDM, a dispersão cromática é uma fonte do ISI e um critério aproximado para minimizar o tamanho da banda de guarda T_{cp} pode ser expresso como

$$T_{CP} \geq \frac{c}{f^2} \times |D| \times L \times Bw \quad (2.2)$$

Onde c é velocidade da luz, f a frequência da portadora óptica, D a dispersão da fibra óptica, L o comprimento da fibra óptica, $Bw=N_u \times \Delta f$ é a largura da banda de transmissão, N_u o número de subportadoras úteis e Δf o espaçamento entre as subportadoras (Shieh, et al., 2006).

Em sistemas com fibras ópticas monomodos a literatura atualmente se divide com as formas de detecção direta óptica (DD-OOFDM – direct-detection optical OFDM) ou com CO-OFDM (coherent optical OFDM) (Armstrong, J, 2009) (Chow, et al., 2008) (Lowery, 2007). Embora CO-OFDM seja um excelente candidato para sistemas com enlaces de transmissão com longa distância, devido a sua maior sensibilidade e eficiência espectral, os custos adicionais devido à complexidade, de ajustes na fase e de polarização o torna inadequado para os nossos propósitos (Jansen, et al., 2007) (Shieh, et al., 2006).

Enquanto o DD-OOFDM possui uma melhor razão custo benefício para aplicações de curto alcance. Uma vez que é mais simples e menos custoso de implementar, pois o

receptor utiliza apenas um único fotodiodo e processamento digital de sinais (DSP). Embora em comparação com o CO-OFDM possua uma menor eficiência espectral uma vez que exige que uma parte maior relativamente maior da potência óptica seja utilizada para transmitir a portadora óptica. Além disso, DD-OOFDM requer uma banda de guarda óptica entre a portadora e as subportadoras OFDM, o que reduz largura de banda de transmissão do sistema (Schmidt, et al., 2007) (Lowery, et al., 2007).

2.4.3 - FONTE ÓPTICA PARA REDES FDMA PON

As TDMA-PONs e FDMA-PONs diferentes das WDMA-PONs operam em apenas um comprimento de onda. Isso simplifica a parte óptica destas redes, influenciando diretamente nos custos de manutenção e operação. Porém as fontes ópticas utilizadas nas TDMA-PONs não são adequadas para as FDMA-PONs. Porque mesmo tendo nominalmente o mesmo comprimento de onda, na verdade os valores reais dos comprimentos de onda das fontes ópticas variam em uma pequena faixa de valores. Por exemplo, em uma TDMA-PON pode-se a ONU 1 transmitir seu tráfego de dados no comprimento de onda 1550,05 nm e a ONU 2 em 1550,06 nm. Como as fontes ópticas das ONUs que não transmitem são desligadas essas pequenas diferenças nos valores de comprimentos de onda não produzem grandes problemas ao funcionamento das redes.

Porém para as FDMA-PONs onde as transmissões dos tráfegos de dados das ONUs para a OLT ocorrem paralelamente, essas pequenas diferenças nos comprimentos de onda produzem problemas como interferência devido à batimento “óptico” (OBI - *optical beat interference*) (Wood, et al., 1993) (Woodward, et al., 1998) e sobreposição dos canais de frequência. A Fig. 2.15 ilustra o problema. Quando há diferença entre os comprimentos de ondas das ONUs ($\Delta\lambda \neq 0$) pode ocorrer a sobreposição das subportadoras e dependendo do valor de $\Delta\lambda$ também pode surgir a OBI.

A OBI surge quando a diferença entre as portadoras ópticas é menor que 6 GHz (i.e. $\sim 0,05$ nm) e é caracterizada pelo surgimento de um sinal de potência relativamente alta em posição igual à diferença entre as subportadoras ópticas (Wood, et al., 1993). E a sobreposição dos canais de frequência pode ocorrer tanto no domínio óptico como no elétrico. No domínio óptico um canal pode cair totalmente ou mesmo parcialmente dentro de outro canal ou mesmo em cima de uma portadora óptica. No domínio elétrico, devido às características quadráticas do fotodiodo, surgem no espectro elétrico produtos de intermodulação das componentes do sinal óptico que podem também sobrepor os canais.

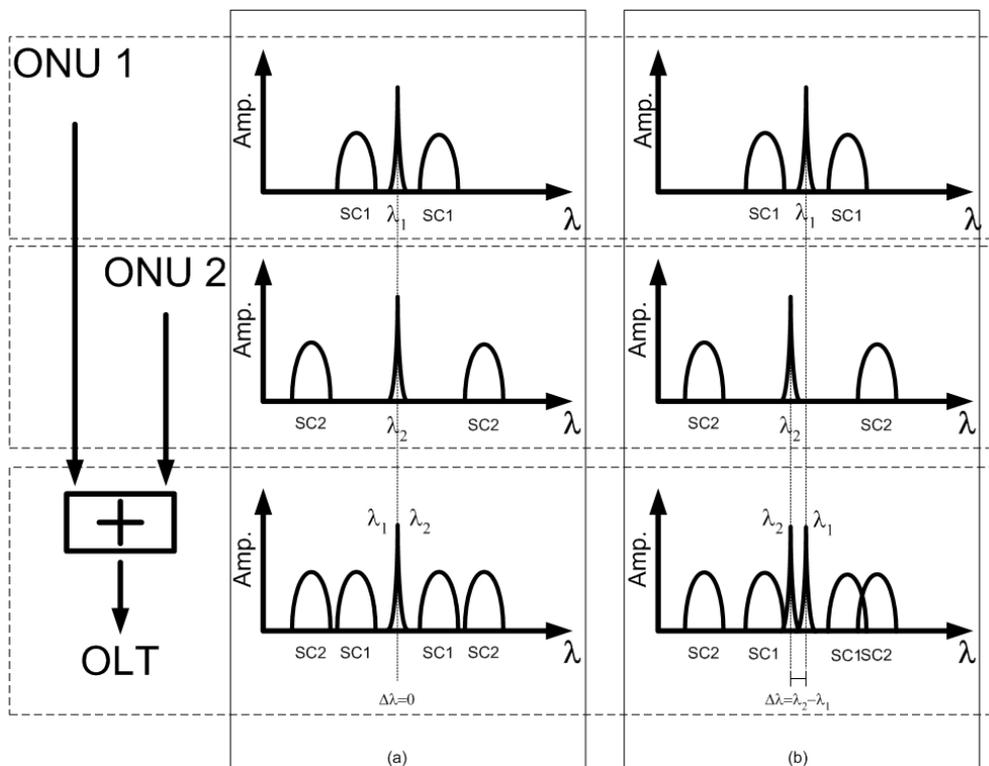


Figura 2.15 - Gerando o sinal SCM no domínio óptico, (a) sem variação nos comprimentos de onda das ONUs 1 e 2 $\Delta\lambda=0$, (b) com variação nos comprimentos de onda das ONUs $\Delta\lambda\neq 0$.

As FDMA-PONs possuem boas características para operarem como redes de acesso, porém devido a esses problemas elas têm sido preteridas em favor das TDMA-PON e WDMA-PON, porque fontes ópticas com o comprimento de onda exatamente iguais são

extremamente custosas e de difícil obtenção. Além de que por estarem separadas fisicamente, as fontes ópticas estarão funcionando em ambientes diferentes com alimentações e temperaturas desiguais, o que pode provocar ligeiras mudanças nos comprimentos de ondas.

Nas duas próximas seções os problemas gerados pelas diferenças entre os comprimentos de onda das fontes ópticas das ONUs serão mais bem ilustrados. Lembrando que esses problemas podem ocorrer ao mesmo tempo quando não se tem um controle rigoroso nos comprimentos de onda das ONUs, porém para uma melhor ilustração eles serão divididos em seções diferentes. E depois na seção 2.4.3.3 será mostrado como seria o funcionamento da rede com fontes ópticas exatamente iguais.

2.4.3.1 - FONTES ÓPTICAS DAS ONUs COM COMPRIMENTOS DE ONDAS COM DIFERENÇAS MAIORES QUE 6 GHz

Quando as diferenças entre os comprimentos de onda das ONUs são maiores que 6 GHz não há OBI (Wood, et al., 1993), então os problemas ocorrem devido à sobreposição tanto no domínio óptico, como pelos produtos de intermodulação no espectro elétrico. Nos dois casos a relação SNR pode ser bem reduzida, mas a sobreposição no domínio óptico é mais raro devido à maior distância entre as portadoras ópticas.

Para demonstrar como a FDMA-SCM PON pode ser afetada pela diferença de comprimentos de ondas nas fontes ópticas, a simulação mostrada na Fig. 2.16 tem a capacidade de variar os comprimentos de ondas das fontes ópticas das ONUs.

Para todas as ONUs é gerado um sinal binário aleatório individual com uma taxa de transmissão de 1 Gbps amostrado com 128 pontos por bit. A Fig. 2.17 apresenta o esquema para as ONUs. Note que o sinal binário é filtrado por um filtro passa-baixa

retangular com uma frequência de corte de 750 MHz para depois ser multiplicado pela subportadora elétrica na frequência do canal SCM próprio da ONU $f_{scm1,2,3,4}$.

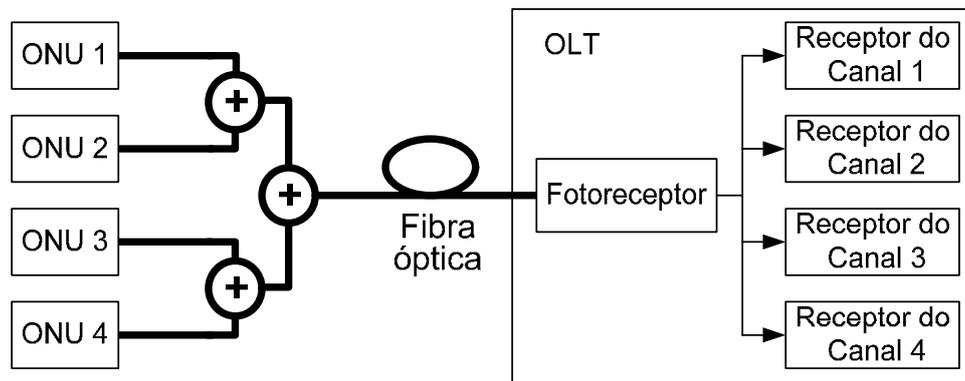


Figura 2.16 - Esquema da rede para teste das fontes ópticas.

Após a multiplicação o sinal é novamente filtrado agora por um filtro passa-faixa retangular de largura de banda 1.5 GHz centralizado na frequência da subportadora elétrica SCM $f_{scm1,2,3,4}$. Esse sinal elétrico é então entregue ao modulador Mach-Zehnder para modular o feixe laser CW gerado com uma potência de -3 dBm.

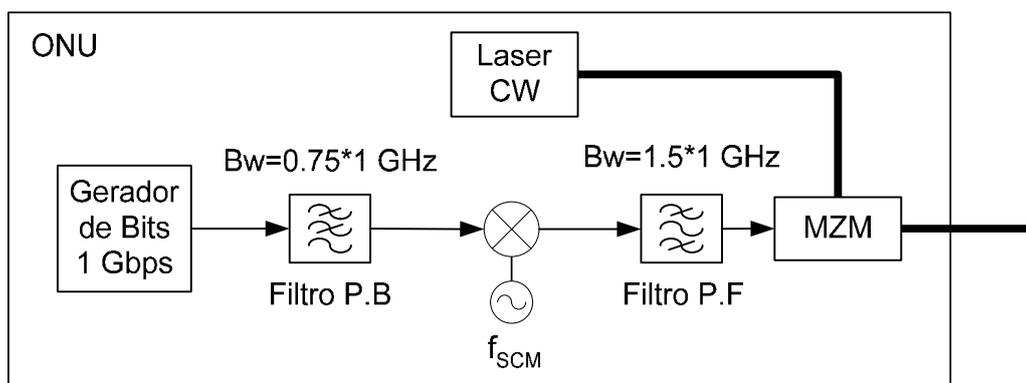


Figura 2.17 - Esquema básico para a ONU.

Então, todos os sinais ópticos que deixam as ONUs são somados pelo acoplador de potência antes de trafegar por uma fibra monomodo padrão de 20 km. Após a fibra óptica o sinal FDMA-SCM óptico retorna ao domínio elétrico através de um fotodetector PIN.

A recepção e separação dos canais SCM são feitas através dos receptores de canais localizados na OLT. O esquema genérico é mostrado na Fig. 2.18. O sinal elétrico após o fotodiodo é filtrado por um filtro passa-faixa retangular sintonizado na frequência da subportadora SCM de forma a separar os canais SCM. Na sequência esse sinal filtrado retorna a banda básica através da multiplicação por uma portadora senoidal na frequência $f_{scm1,2,3,4}$. E antes de ser avaliada a qualidade do sinal recebido através do diagrama de olho e fator Q (Agrawal, 2002) o sinal é novamente filtrado por um filtro passa-baixa retangular com largura de banda de 750 MHz.

As frequências das subportadoras elétricas SCM para ONUs 1, 2, 3 e 4 são respectivamente, 1,5, 3,5, 5,5, 7,5 GHz. E ao escolher os comprimentos de ondas para que não se tenha uma sobreposição no domínio óptico, tem se: $\lambda_1=1550,00$ nm, $\lambda_2=1550,10$ nm, $\lambda_3=1550,20$ nm e $\lambda_4=1549,90$ nm. A Fig. 2.19 apresenta o espectro do sinal óptico com as quatro portadoras ópticas e suas subportadoras.

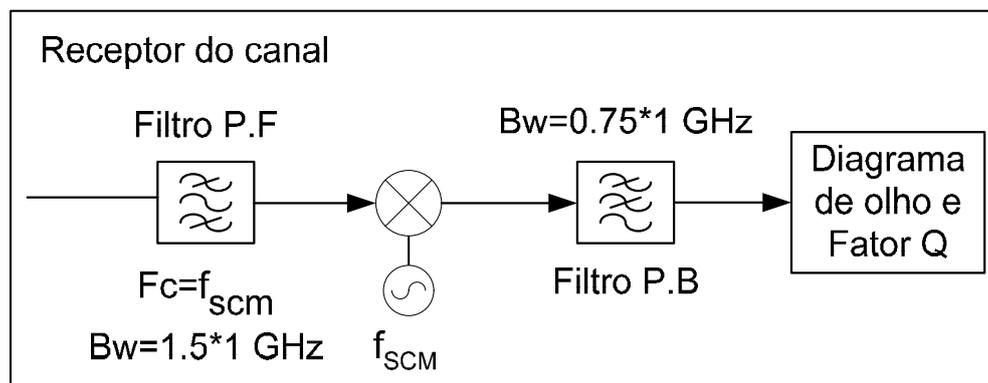


Figura 2.18 – Esquema básico para o receptor do canal.

Na primeira simulação somente as ONUs 1 e 2 são ativadas e o espectro elétrico após o fotodiodo pode ser visto na Fig. 2.20. A diferença entre os comprimentos de onda é de 0,1 nm aproximadamente 12,5 GHz.

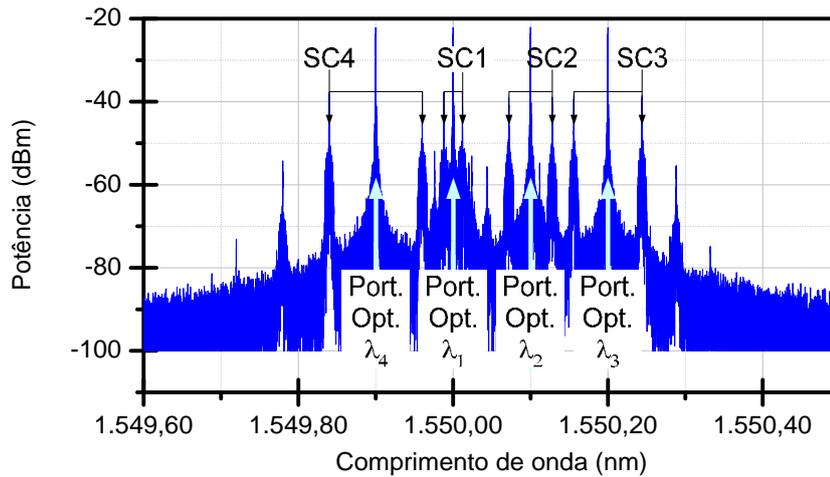


Figura 2.19 – Espectro óptico com 4 lasers de comprimentos de ondas diferentes ($\lambda_1 = 1550,00$ nm, $\lambda_2 = 1550,10$ nm, $\lambda_3 = 1550,20$ nm, $\lambda_4 = 1549,90$ nm) com suas respectivas subportadoras ($SC1 = 1,5$ GHz, $SC2 = 3,5$ GHz, $SC3 = 5,5$ GHz, $SC4 = 7,5$ GHz).

Note a quantidade de produtos de intermodulação gerados pelo fotodiodo para apenas duas portadoras ópticas, praticamente qualquer subportadora que ficar posicionada no intervalo 6 GHz a 18 GHz sofrerá uma grande queda na relação SNR.

Mesmo se os dois canais $SC1$ e $SC2$ não sofrem sobreposição o espectro elétrico demonstra que a inclusão de novas ONUs é muito difícil. Além de que o número de produtos de intermodulação é exponencial ao número de portadoras ópticas com comprimentos de onda diferentes.

E para demonstrar este fato a Fig. 2.21 mostra o espectro elétrico após o fotodiodo da simulação anterior, porém com as quatro ONUs ativadas. Note a enorme quantidade produtos de intermodulação gerados pelo fotodiodo com um sinal óptico com apenas quatro subportadora. Pode ser também observado a presença de dois picos com potência relativamente alta praticamente em cima dos canais 3 e 4.

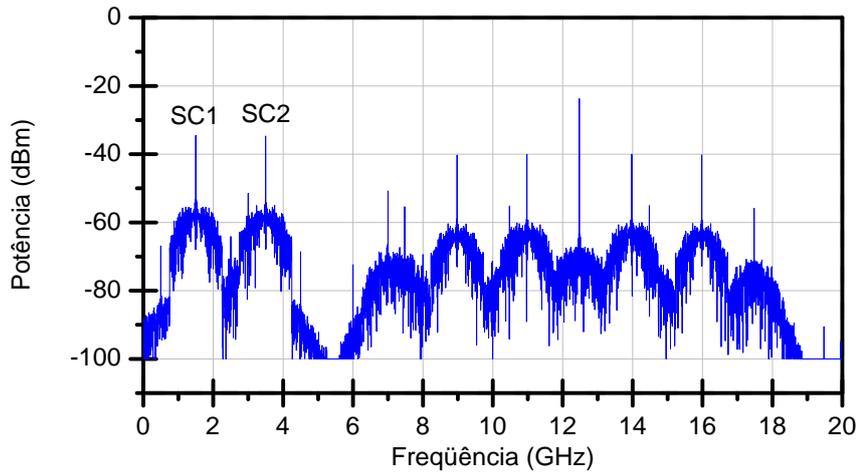


Figura 2.20 – Espectro elétrico do sinal com dois comprimentos de onda diferentes.

O resultado dessa sobreposição pode ser sentido no fechamento completo dos diagramas de olho normalizados desses canais, mostrado na Fig. 2.22 (c) e (d). O que pode ser observado também dos diagramas de olho é que mesmo os canais 1 e 2 sofrem com alguma sobreposição, porém em um grau menos elevado que os canais 3 e 4.

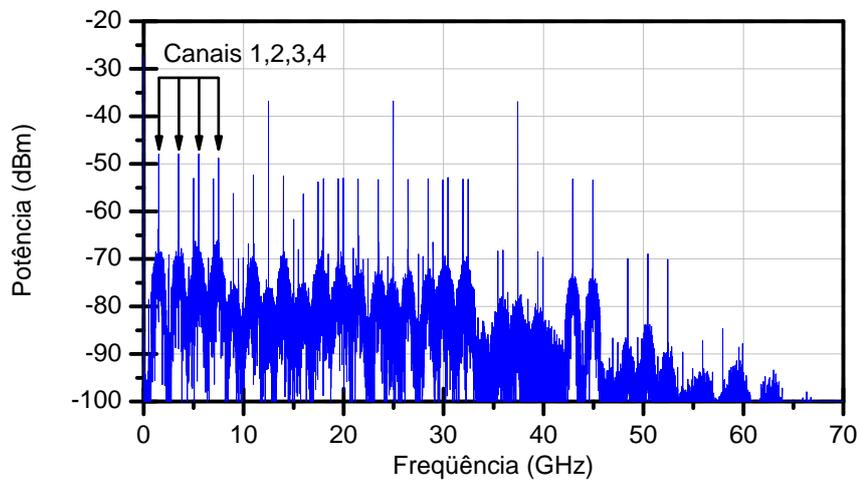


Figura 2.21 - Espectro elétrico do sinal com 4 comprimentos de onda diferentes.

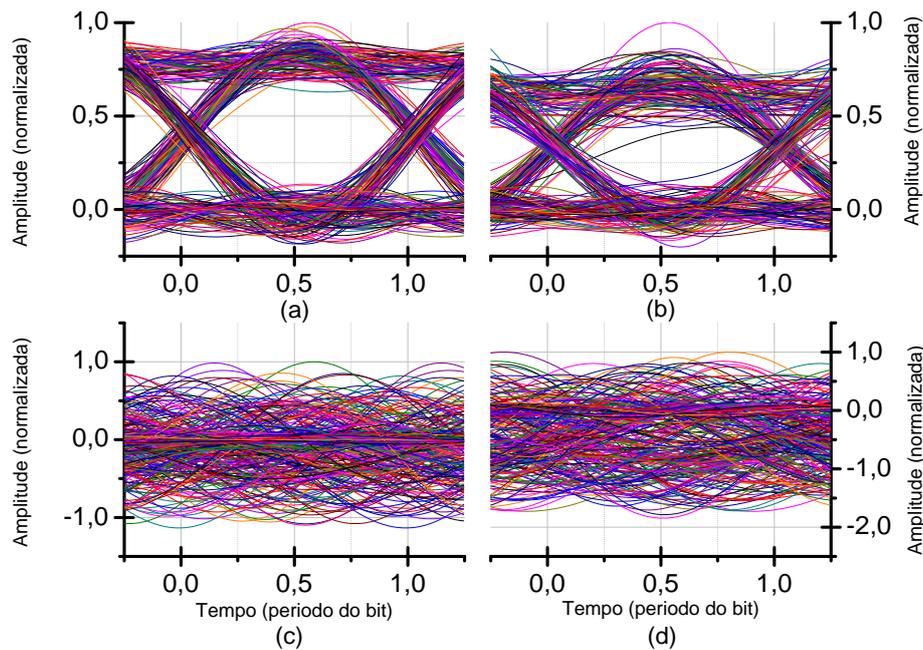


Figura 2.22 - Diagrama de olho dos sinais recebidos (a) canal 1 - $\lambda_1 = 1550,00$ nm, (b) canal 2 - $\lambda_2 = 1550,10$ nm, (c) canal 3 - $\lambda_3 = 1550,20$ nm, (d) canal 4 - $\lambda_4 = 1549,90$ nm.

O que pode ser mais bem observado pela Fig. 2.23, no qual um gráfico compara a curva de fator Q dos canais 1 e 2 com a curva de um canal de referência. Obteve-se a curva do fator Q de referência através de uma simulação com apenas uma ONU a transmitir e assim sem a possibilidade de surgimento de produtos de intermodulação. Note que o gráfico da Fig. 2.23 confirma que os canais 1 e 2 sofrem também sobreposição pelos produtos de intermodulação.

A quantidade e a posição desses produtos de intermodulação estão diretamente em função da quantidade de feixes laser com comprimentos de ondas diferentes e suas posições relativas entre si.

Essa simulação apresenta um caso crítico no qual se tem muitos produtos de intermodulação devido à grande proximidade dos comprimentos de onda. Mas, mesmo em casos onde as distâncias entre os comprimentos de onda são maiores, os produtos de intermodulação atrapalham em demasia o funcionamento da rede.

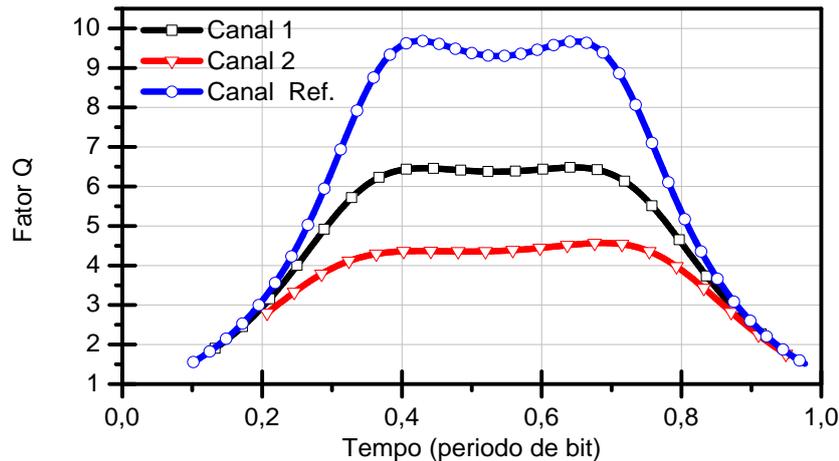


Figura 2.23 – Curva de Fator Q, para o caso de fontes ópticas com comprimento de ondas separados por uma distância superior a 6 GHz ~ 0,05 nm.

É válido ressaltar que uma rede de acesso dificilmente terá somente 4 assinantes. E o cálculo das posições dos produtos de intermodulação no espectro para muitos comprimentos de ondas é uma tarefa ingrata e inútil. Devido à característica dos lasers variarem seus comprimentos de onda em função do seu envelhecimento e da variação de temperatura.

2.4.3.2 - FONTES ÓPTICAS DAS ONUs COM COMPRIMENTOS DE ONDAS COM DIFERENÇAS INFERIORES A 6 GHz

Quando a diferença entre os comprimentos de onda é menor que 6 GHz os problemas dominantes são a sobreposição no domínio óptico e a OBI. E para demonstrar o efeito dessas pequenas diferenças na FDMA-SCM PON a simulação apresentada na Fig. 2.16 é alterada para que os comprimentos de ondas sejam diferentes por apenas 0,01 nm.

Na simulação os comprimentos de onda das fontes ópticas das ONUs 1, 3 e 4 são exatamente o valor de 1550,00 nm e o comprimento de onda da fonte óptica da ONU 2 tem o valor de 1550,01 nm, e produz uma diferença de 1,25 GHz.

A Fig. 2.24 apresenta o espectro óptico do sinal após a fibra óptica. Note que o canal 1 é sobreposto tanto pela banda inferior do canal 2 como pela portadora óptica da ONU 2. Outro canal prejudicado é o canal 3 que tem sua banda superior sobreposta pela banda superior do canal 2.

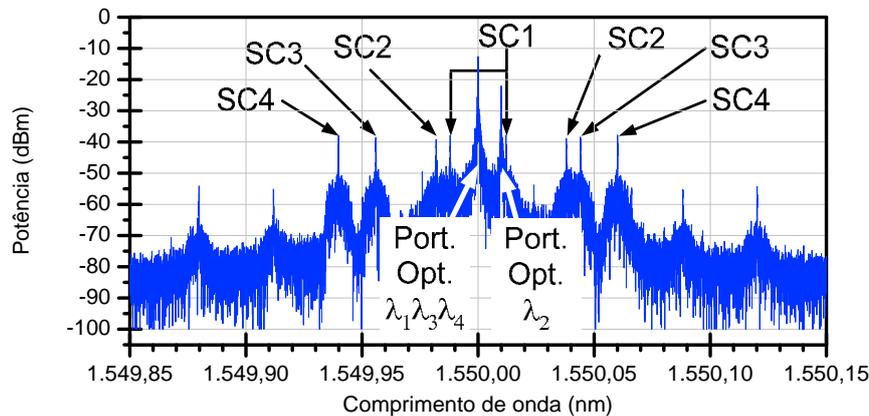


Figura 2.24 - Espectro óptico com 4 lasers ($\lambda_1 = \lambda_3 = \lambda_4 = 1550,00$ nm, $\lambda_2 = 1550,01$ nm) com suas respectivas subportadoras (SC1 = 1,5 GHz, SC2 = 3,5 GHz, SC3 = 5,5 GHz, SC4 = 7,5 GHz).

No espectro elétrico da saída do fotodiodo mostrado na Fig. 2.25 surge como consequência da OBI um sinal de potência relativamente alta na posição igual à diferença entre as portadoras ópticas, que na simulação cai parcialmente em cima do canal 1 na frequência de 1,25 GHz. Podem também ser observados no espectro da Fig. 2.25 os produtos gerados pela sobreposição óptica do canal 2 sobre os canais 1 e 3. Note que estes produtos atingem parcialmente os canais 1 e 3.

A Fig. 2.26 apresenta o diagrama de olho normalizado dos canais. Ao analisar em conjunto as figuras 2.25 e 2.26 percebe-se que o diagrama de olho fechado do canal 1 é devido à sobreposição pela OBI e pela sobreposição pelo canal 2. O canal 2 ao sobrepor tanto os canais 1 e 3 também apresenta um diagrama de olho bem fechado. O canal 3 sofre também pela sobreposição do canal 2, porém isso só ocorre parcialmente, fato que provoca um pequeno fechamento no seu diagrama de olho.

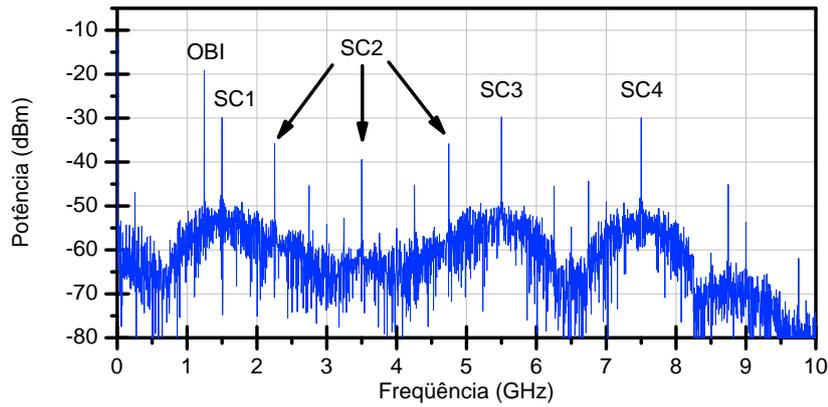


Figura 2.25 - Espectro elétrico recebido pelo fotodetector na simulação da OBI.

Tem-se uma melhor percepção de quanto o canal 3 sofre pela sobreposição do canal 2 pela curva de fator Q mostrada na Fig. 2.27. Pode se perceber também que o canal 4 também sofre uma diminuição na qualidade, mas é devido à sobreposição de intermodulação entre os canais.

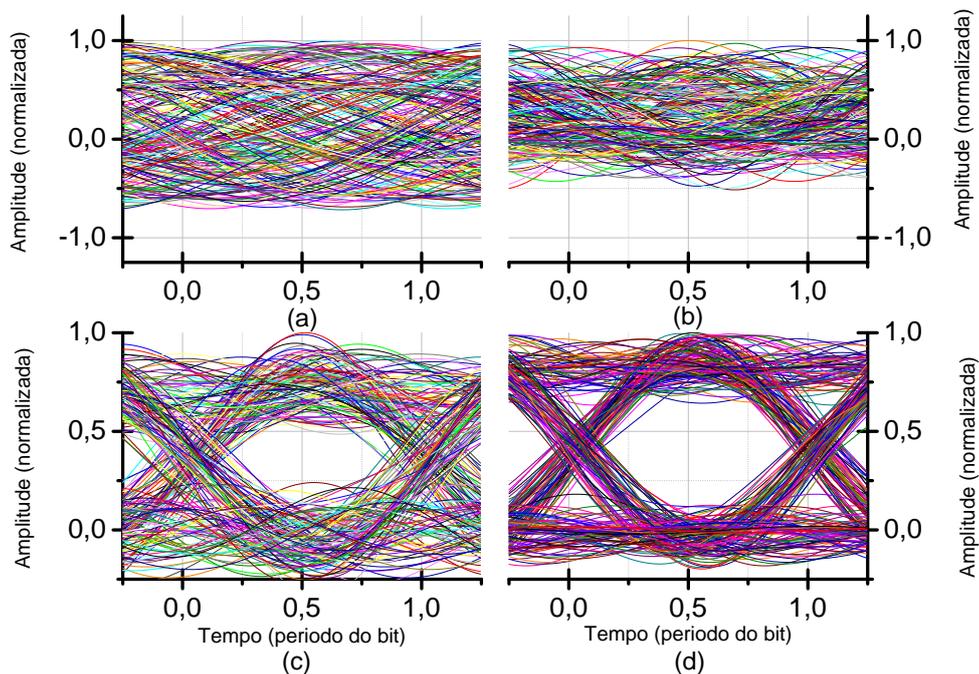


Figura 2.26 - Diagrama de olho normalizado dos sinais recebidos (a) canal 1 - $\lambda_1 = 1550,00$ nm, (b) canal 2 - $\lambda_2 = 1550,01$ nm, (c) canal 3 - $\lambda_3 = 1550,00$ nm, (d) canal 4 - $\lambda_4 = 1550,00$ nm.

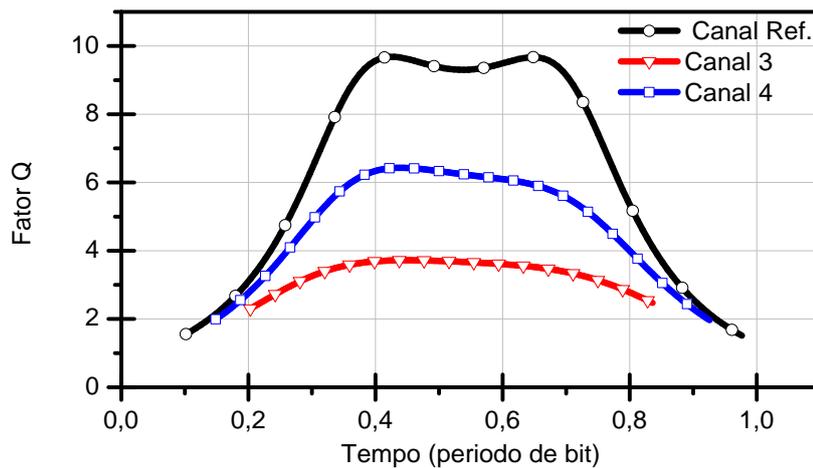


Figura 2.27 – Curva de Fator Q, para o caso de OBI e sobreposição.

2.4.3.3 - FONTES ÓPTICAS DAS ONUs COM COMPRIMENTOS DE ONDAS IDÊNTICOS

Ao fazer todas as fontes ópticas da simulação idênticas ao comprimento de onda de 1550,00 nm tem-se o espectro óptico mostrado pela Fig. 2.28. O primeiro fato a ser notado é que não parece haver OBI ou sobreposição óptica em nenhum canal.

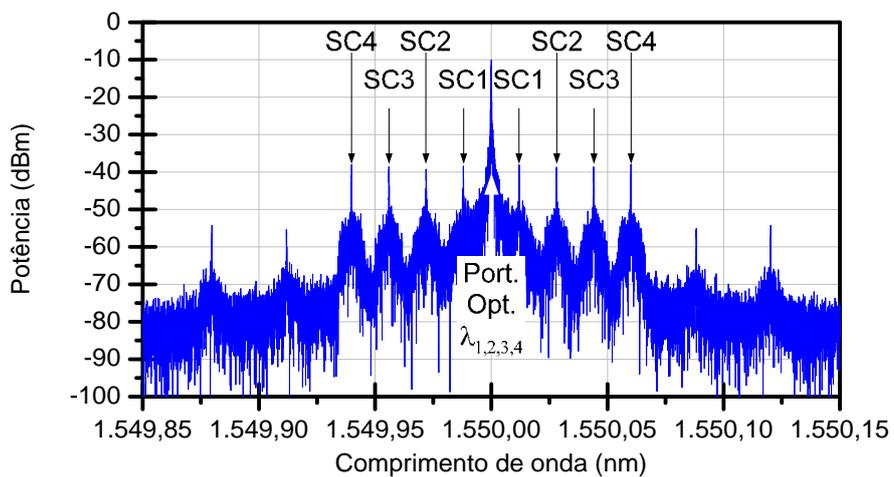


Figura 2.28 – Espectro óptico da simulação com fontes ópticas exatamente iguais.

Porém ao examinar o espectro elétrico mostrado na Fig. 2.29, note que os canais estão bem definidos, separados e que também continuam aparecendo os produtos de intermodulação. Como esses produtos são gerados somente pelas subportadoras, eles possuem uma potência relativamente baixa em função da potência do canal SCM. Ao contrário das outras simulações que os produtos de intermodulação são gerados pelas interações das portadoras ópticas que possuem muito mais potência que as subportadoras SCM.

Outro detalhe a ser observado no espectro elétrico é o surgimento de um sinal de potência ao lado esquerdo do primeiro canal. Ele surgiu pela soma das potências das portadoras ópticas das diferentes ONUs. E como se a OBI ocorresse na frequência zero. Na simulação ela interfere muito pouco no primeiro canal, porém em uma FDMA-SCM PON ela obriga que a distribuição das frequências para as subportadoras inicie com um afastamento maior entre o primeiro canal e a portadora óptica.

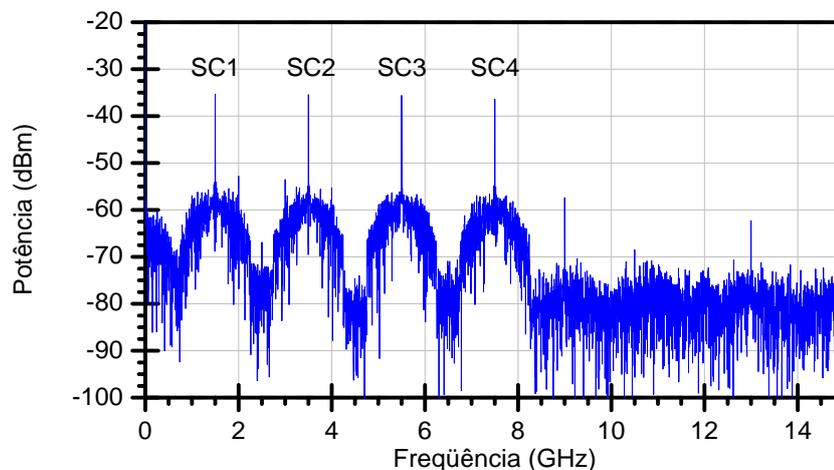


Figura 2.29 - Espectro elétrico para fontes de comprimento de onda exatamente iguais.

Os gráficos de diagrama de olho e curva de fator Q das Fig. 2.30 e a Fig. 2.31 corroboram com espectro elétrico recebido.

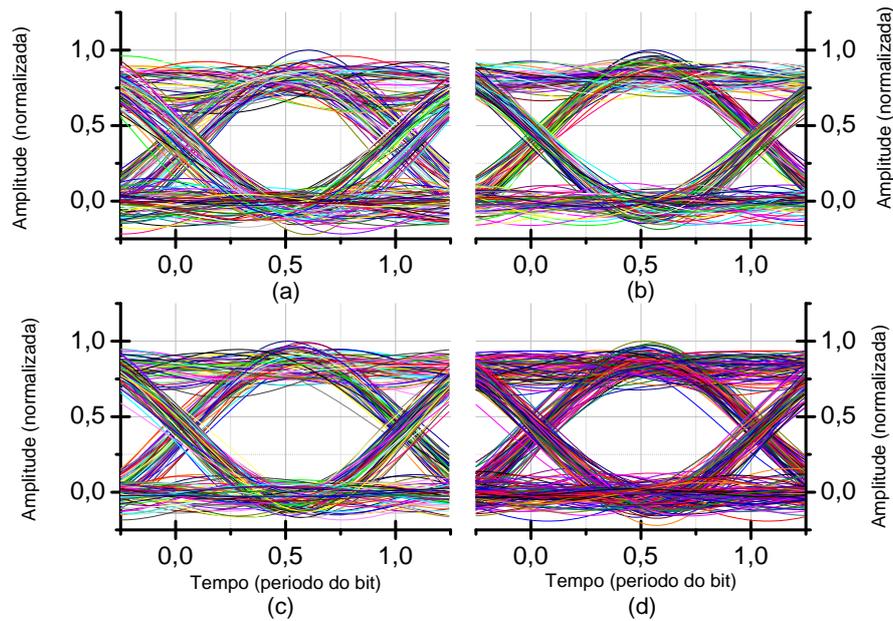


Figura 2.30 - Diagrama de olho normalizado dos sinais recebidos com os comprimentos de ondas iguais (a) canal 1 (b) canal 2 (c) canal 3 (d) canal 4.

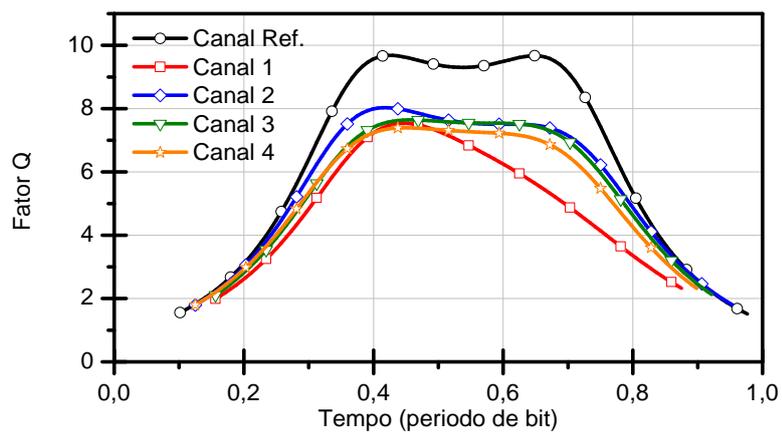


Figura 2.31 – Curvas dos Fatores Q dos canais da simulação com as fontes ópticas com exatamente iguais.

Note que o diagrama de olho de pior aspecto é o do canal 1, porém conclui-se que com os comprimentos de onda exatamente iguais os problemas de sobreposição e OBI desaparecem e os produtos de intermodulação gerados pela interação entre os canais

SCM diminuem um pouco a qualidade do sinal, mas em um nível que não atrapalha o funcionamento da rede.

2.5 - COMPARAÇÕES ENTRE OS TIPOS DE ACESSO AO MEIO DAS REDES PON

Para comparar os diferentes métodos de acesso das PONs deve-se antes considerar que em uma rede de acesso totalmente óptica, todas as ONUs representam um assinante comercial ou residencial. Apesar de apenas alguns deles serem capazes de pagar por enlaces com altas taxas de transmissão, a rede de acesso deve atender tanto as ONUs de pequeno como as de grande tráfego.

Os custos de implantação e manutenção das PONs podem ser comparados através da quantização dos dispositivos ópticos empregados, porque eles são o fator que mais pesa nessa questão. Outro detalhe importante no cálculo dos custos de uma rede de acesso é o número de tipos de ONUs que ela precisa empregar. Mais tipos de ONUs implicam em um nível maior de complexidade da rede o que reflete em um nível de gerenciamento maior e mais tipos de peças de reposição para a rede.

O tipo de ONU se refere aqui à alteração da parte óptica das ONUs. Por exemplo, excetuando-se as ONUs com lasers sintonizáveis, cada vez que há a necessidade de troca no valor do comprimento de onda da ONU a parte óptica deve ser obrigatoriamente trocada.

Pela Tabela 2.2 pode se notar que o sistema WDMA-PON é claramente o que mais emprega transceptores ópticos, além disso, necessita de vários tipos de ONUs. Enquanto as TDMA-PONs e FDMA-PONs são superiores na questão de custos ao necessitarem de muito menos transceptores ópticos e tipos de ONUs.

Tabela 2.2 – Comparação de tipos de PON, onde N é o número de ONUs.

Método de acesso	Configuração	$\lambda /$ ONU	Tipos de ONUs	N. Lasers	N. Receptores	Modulador externo na ONU	Disp. ópticos
WDMA	Básica (com um comprimento de onda para o sentido OLT-ONUS e um para ONUS-OLT)	2/1	2xN	2xN	2xN	0	4xN
	Básica utilizando lasers sintonizáveis	2/1	1	2xN	2xN	0	4xN
	Básica utilizando RSOA	2/1	1	2xN	2xN	N	5xN
	Reaproveitamento de comprimento de onda do sentido OLT-ONUS	1/1	N	N	2xN	N	4xN
TDMA	EPON	2/N	1	N+1	N+1	0	2xN+2
FDMA	SCM PON OFDM PON	2/N	1	N+1	N+1	0	2xN+2

A WDMA-PON é a que apresenta a melhor capacidade de taxa de transmissão, porque todas as ONUs têm a banda total do comprimento de onda para transmitir. Porém, como se nota na Tabela 2.2 o sistema necessita de mais dispositivos ópticos para operar. Quando a ONU WDMA apresenta um tráfego muito alto, entre 2.5 e 10 Gbps, o fator de custo-benefício do sistema óptico de transmissão é favorável. Mas como os

assinantes de pequeno porte não podem pagar por toda essa banda de transmissão, ocorre uma subutilização da banda de transmissão. Esta subutilização dificulta o emprego desse tipo de rede em redes de acesso, pois limita a WDMA-PON a grandes usuários.

Ao examinar a Tabela 2.2 percebe-se que há um empate entre as TDMA-PON e FDMA-PON. Estas duas redes são superiores à rede WDMA PON na questão de custo, porque suas operações de multiplexação e demultiplexação ocorrem no domínio elétrico, no qual essas operações podem ser realizadas a um custo muito baixo. Todavia tanto as TDMA-PONs como as FDMA-PONs apresentam algumas dificuldades.

Nas TDMA-PONs as taxas de transmissão individuais das ONUs são definida pela taxa de transmissão total do sistema óptico dividida pelo número de ONUs. Mas antes de calcular a taxa de transmissão real deve-se subtrair da taxa global os tempos necessários para o aumento do tamanho do cabeçalho, o tempo de guarda para o realinhamento dos receptores e o intervalo de tempo para a entrada de novas ONUs.

Outro detalhe importante é a questão da tecnologia envolvida nas ONUs. Por exemplo, uma rede EPON tem como taxa global de 1,25 Gbps e pode ter até 32 ONUs, de forma que se desconsiderar o tempo de guarda, cabeçalhos e tempo para a entrada das novas ONUs, a taxa individual será 39 Mbps ($1,25 \text{ Gbps} / 32 \text{ ONUs}$). Para aumentar essa taxa individual há duas maneiras, a primeira é diminuir o número de ONUs, e a segunda é aumentar a taxa de transmissão global. Diminuir assinantes não é nunca uma boa opção para uma rede de acesso. E aumentar a taxa de transmissão global implica em ter ONUs cada vez mais complexas com um nível tecnológico maior, o que aumenta os custos relacionados às ONUs. Então, ao avaliar estes fatores conclui-se que o nível tecnológico das ONUs limita a taxa de transmissão da rede.

Enquanto nas FDMA-PONs o que limita a taxa de transmissão é o número de ONUs que podem ser atendidas pela resposta em frequência do sistema no comprimento de

onda. O número de ONUs é determinado pela largura de banda do comprimento de onda dividida pela largura do canal de transmissão das ONUs. Na questão de capacidade a resposta em frequência da fibra óptica mesmo sendo limitada é grande o suficiente para superar as taxas de transmissão da rede TDMA com o mesmo nível de complexidade de ONUs. E mesmo esta grande capacidade de transmissão pode ser ampliada com a utilização de esquemas de modulação avançados, que melhoram em muito a capacidade dos canais e não aumentam muita a complexidade das ONUs.

Na questão da complexidade e transparência, na TDMA-PON existe a necessidade de alocação pela OLT dos intervalos de tempo de transmissão as ONUs, implicando em aumento de cabeçalho e em encapsulamento do fluxo de dados. Na FDMA-PON, a única coisa que a OLT tem que passar para a ONU é a frequência do seu canal e a largura de banda do canal, a partir daí a rede se torna transparente ao fluxo de dados. E toda tecnologia eletrônica envolvida na geração e tratamento dos canais de frequência para a rede FDMA-PON está disponível no mercado com uma enorme maturidade.

Em comparação com a rede TDMA, a rede FDMA-PON é superior na capacidade de transmissão e na complexidade da OLT e das ONUs. Porém o grande problema da rede FDMA-PON está nos tráfegos no sentido ONUs-OLT, pois as diferenças entre os comprimentos de ondas das fontes ópticas separadas fisicamente impedem o funcionamento deste tipo de rede. E enquanto este problema não for resolvido, este tipo de rede não pode ser utilizado com toda a sua capacidade.

Capítulo 3 - FDMA-SCM PON COM FONTE ÓPTICA CENTRAL DE ALIMENTAÇÃO

3.1 - INTRODUÇÃO

No capítulo anterior ficou demonstrado que para as FDMA-PONs funcionem sem OBI e sobreposição dos canais de frequência as fontes ópticas utilizadas nas ONUs devem manter seus comprimentos de ondas exatamente iguais, durante todo o tempo útil da rede.

Note que além do custo de instalar inúmeras fontes ópticas com comprimentos de onda exatamente iguais, a rede também deve monitorar e tratar as variações nos comprimentos de onda gerados por efeitos como temperatura e envelhecimento (Woodward, et al., 1998) (Yamamoto, et al., 1999). Essa necessidade por fontes ópticas com comprimentos de onda exatamente iguais nas ONUs tem impedido a utilização prática das FDMA-PONs (Lee, et al., 2006).

Como uma das contribuições deste trabalho propõe-se trocar as fontes ópticas individuais das ONUs por uma única fonte óptica central de alimentação. Assim as ONUs dividem o mesmo feixe laser e qualquer variação na potência ou no comprimento de onda será sentido ao mesmo tempo por todas as ONUs. E porque não há ONUs com comprimentos de onda diferentes na rede não ocorre à sobreposição dos canais ou a OBI, viabilizando as FDMA-PONs. Nas PONs as fontes ópticas centrais são utilizadas em WDMA-PONs (Kang, et al., 2006) (Takesue, et al., 2003), visando redução de custos das

fontes ópticas das ONUs. Mas não há referencia na literatura que as utilizem para resolver o problema de OBI em FDMA-PONs.

Pelo formato da PON a fonte óptica central deve ser posicionada na OLT, o que permite outros benefícios em questões como proteção física, manutenção e controle ambiental. A Fig. 3.1 apresenta um esquema de uma PON utilizando uma fonte óptica central. Note que na OLT uma fonte óptica gera um sinal óptico, o qual é transportado pela fibra óptica até o divisor de potência. No divisor o sinal óptico é dividido e são entregues as ONUs. Para as ONUs enviarem seus tráfegos a OLT são necessários dispositivos ópticos que modulem seus tráfegos nos feixes ópticos.

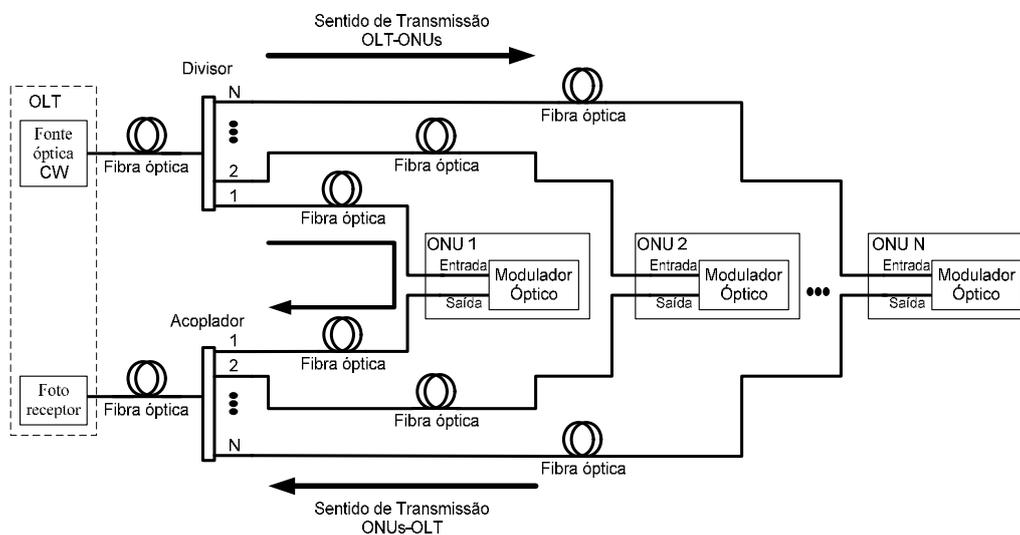


Figura 3.1 - Esquema básico para rede PON com fonte óptica central de alimentação.

Entre os dispositivos capazes de modular o feixe óptico as opções de menor custo são o amplificador óptico semicondutor reflexivo - RSOA (*Reflective semiconductor optical amplifier*) (Kwon, et al., 2006) (Kim, et al., 2006) (Kang, et al., 2006) ou o modulador de eletro absorção - EAM (*Electro absorption modulator*) (Hullin, et al., 2001) (Wilson, et al., 2002) (Genay, et al., 2005). Enquanto o EAM apresenta uma modulação menos ruidosa o RSOA acrescenta um ganho de potência óptica.

Como contribuição as próximas seções apresentam soluções para as FDMA-SCM PONs com alimentação óptica central que utilizam esses dois dispositivos moduladores nas ONUs.

3.2 - RSOA FDMA-SCM PON

A fim de evitar problemas de interferência e efeitos não-lineares, devido a um alto nível de potência óptica, a FDMA-SCM PON utiliza duas fibras ópticas. Uma fibra óptica é utilizada para transportar os dados no sentido OLT-ONUs e outra para o sentido ONUs-OLT. A fibra óptica do sentido OLT-ONUs transporta além do comprimento de onda de descida (λ_d) o comprimento de onda que alimenta o RSOA nas ONUs, denominado de comprimento de onda de subida (λ_u). Enquanto que a fibra óptica do sentido ONUs-OLT transporta apenas o comprimento de onda de subida (λ_u).

A Fig. 3.2 apresenta o esquema básico para rede proposta. Repare que os dois comprimentos de onda λ_u e λ_d , são gerados por dois lasers na OLT e depois são acoplados a fibra óptica do sentido OLT-ONUs. O λ_u é somente um feixe laser CW enquanto que λ_d transporta o sinal FDMA-SCM com os dados destinados as ONUs.

Para uma melhor eficiência na utilização do espectro dos comprimentos de onda os sinais FDMA-SCM são montados com sinais modulados em QAM. Após os moduladores QAM o sinal FDMA-SCM de descida é gerado por um multiplex em frequência, que translada os sinais QAMs aos seus respectivos canais.

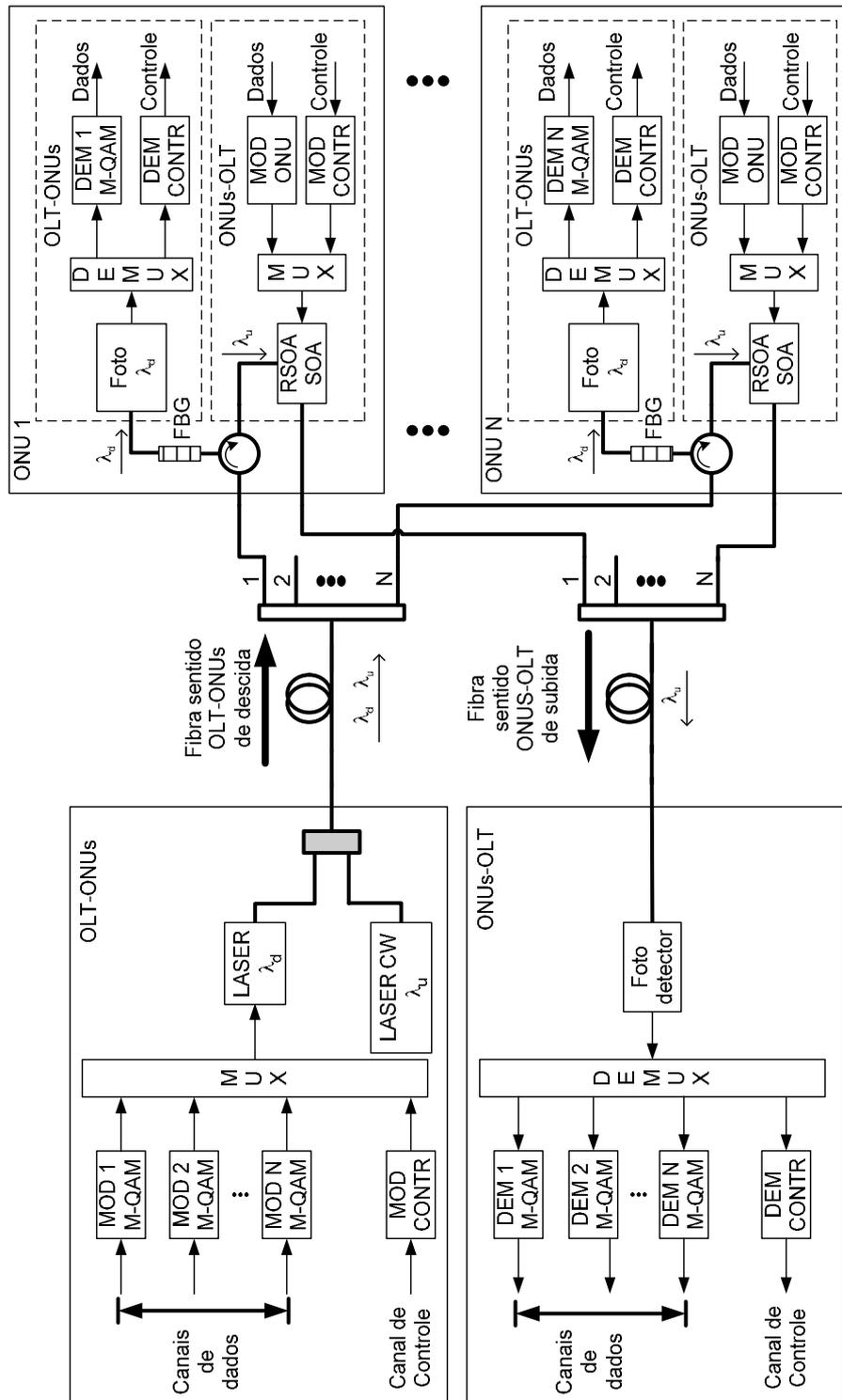


Figura 3.2 – Esquema básico para FDMA-SCM PON que utiliza o dispositivo RSOA (FBG é fibra de grade de Bragg).

A Fig. 3.3 mostra uma representação do sinal SCM gerado pelo multiplex, no qual $SC1$, $SC2$ e SCN representam os canais de transmissão determinado as ONUS 1, 2 e a N -ésima. Pode-se perceber que todas as ONUs terão seu canal em frequência e a largura de banda desses canais está diretamente ligada à escolha do tipo de modulação e taxa de transmissão escolhida para a rede.

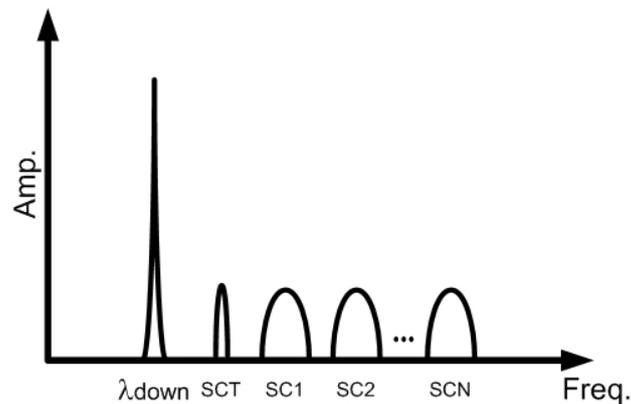


Figura 3.3 - Esquema de frequência do comprimento de onda de descida.

Ao aproveitar a capacidade FDMA-SCM é acrescentado um canal de controle, representado por SCT na Fig. 3.3, que é partilhado por todas as ONUs. Esse canal de controle não precisa de uma grande largura de banda para transmissão e está em uma frequência igual para todas as ONUs. O canal de controle habilita o monitoramento remoto e a capacidade da OLT passar instruções remotas para as ONUs.

O monitoramento remoto em conjunto com as instruções remotas aumenta a robustez da rede ao melhorar as manutenções preventivas e por permitir que canais problemáticos ou mesmo ONUs defeituosas sejam desligados.

Ao chegar à ONU os comprimentos de onda λ_d e λ_u , são separados por um circulador trabalhando em conjunto com um dispositivo de Bragg reflexivo sintonizado para que reflita somente λ_u . Enquanto λ_d é entregue ao fotodetector, λ_u é direcionado para o RSOA, onde será amplificado e modulado com o tráfego de subida. Lembrando que o

sinal portador do tráfego estará transladado para a frequência do canal de transmissão destinada para aquela ONU.

No sentido ONUs-OLT as ONUs irão modular o comprimento de onda de subida através do RSOA, o qual também apresenta um ganho óptico. Este ganho óptico pode ser de 20 dB (Genay, et al., 2005). Para evitar efeitos não lineares na fibra óptica do sentido OLT-ONUs a potência óptica do comprimento de onda de subida que entra na fibra óptica do sentido OLT-ONUs deve ser limitada e dessa forma o ganho óptico do RSOA será importante para o retorno do comprimento de onda de subida.

O maior fator de perda de potência da rede é a perda pela divisão de potência no acoplador, é pode ser calculado por

$$Perda_{dB} = 10 * LOG_{10} (N) \quad (3.1)$$

onde N é o número de ONUs. A tabela 3.1 apresenta a perda por número de ONUs.

Tabela 3.1 – Perda por divisão do acoplador.

Número de ONUs	Perda por Divisão (dB)
2	3,01
4	6,02
8	9,03
16	12,04
32	15,05
64	18,06
128	21,07

Pode-se reparar que o ganho do RSOA quase consegue compensar a perda de 128 ONUs, porém o ganho do RSOA é somente utilizado no retorno para a OLT do comprimento de onda de subida. E o que realmente determina o alcance máximo da

distância da rede é o número de ONUs versus a máxima potência óptica que a fibra do sentido OLT-ONUS pode receber sem provocar efeitos não lineares.

E como a potência óptica deve superar também outras perdas como perda por inserção do circulador, perda por inserção de conector, atenuação da fibra, margem de transmissão e sensibilidade do fotodetector. Este detalhe restringe em muito a distância máxima da FDMA-SCM PON.

3.3 - EAM FDMA-SCM PON

A Fig. 3.4 apresenta o esquema básico para a rede que utiliza o dispositivo EAM. Note que a rede possui as mesmas características da rede da seção anterior e o seu funcionamento ocorre quase da mesma forma.

A diferença é que, ao contrário do RSOA que apresenta um ganho, o EAM consome potência do comprimento de onda. Então para usar o EAM como dispositivo de modulação é necessário introduzir um nível de potência maior na fibra do sentido OLT-ONUs.

Isso implicaria em efeitos não lineares no comprimento de onda que transporta o tráfego de descida. Pode se evitar esse acréscimo de potência na fibra óptica através da separação do comprimento de onda que alimenta os EAMs, que é transportado sozinho por uma fibra óptica até às ONUs.

E para não aumentar o número de fibras da rede o tráfego do sentido ONUS-OLT pode ser transportado na mesma fibra do sentido OLT-ONUS. Assim, tem-se uma fibra óptica que transporta o feixe óptico de alimentação dos EAMs, denominada fibra de alimentação e outra que transporta, simultaneamente, os comprimentos de onda de descida e subida com seus respectivos tráfegos, denominada de fibra de dados.

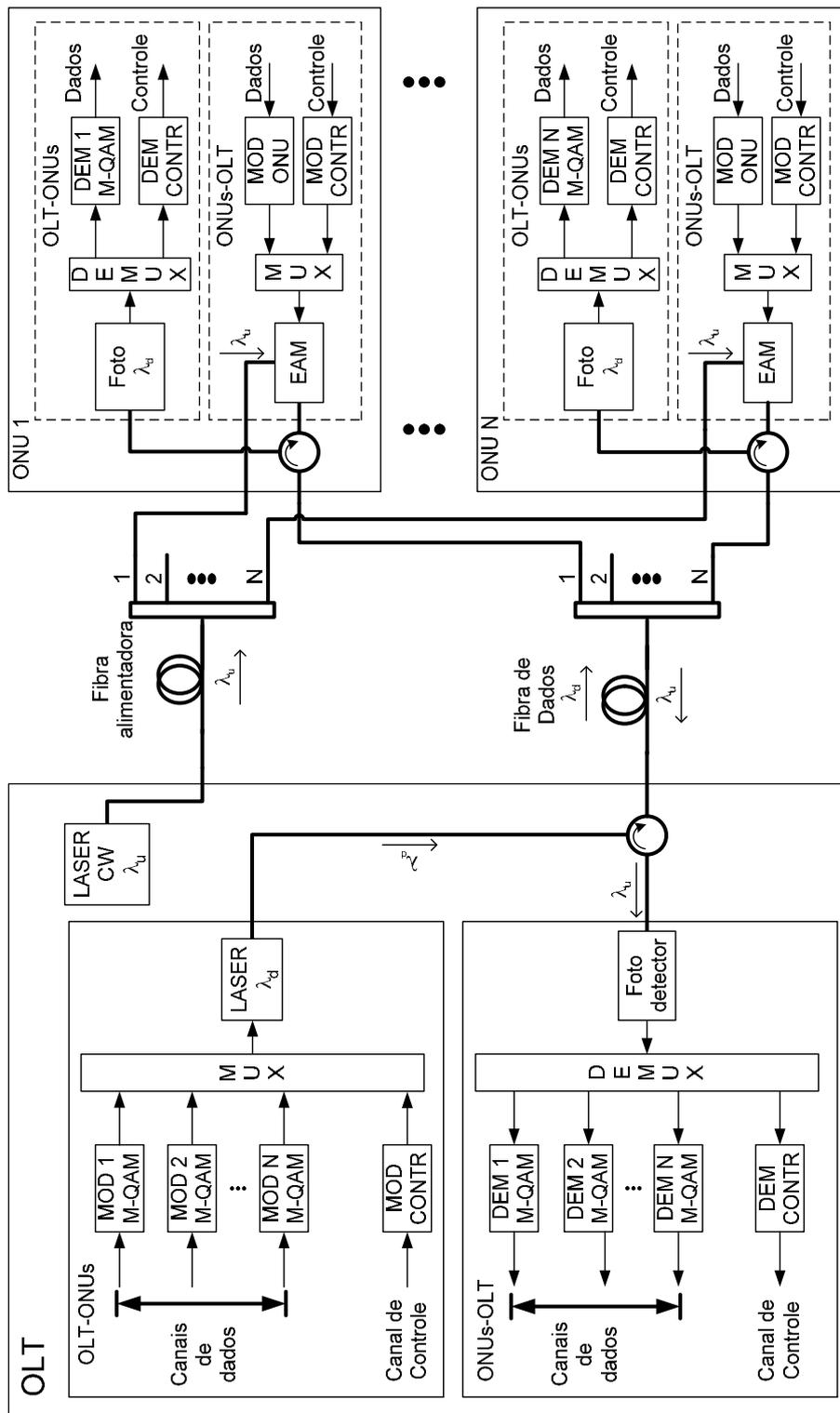


Figura 3.4 - Esquema básico para a FDMA-SCM PON que utiliza o dispositivo EAM.

3.4 - SIMULAÇÕES DA FDMA-SCM PON

Foram realizadas simulações para comprovar que a FDMA-SCM PON pode ser uma opção de rede de acesso totalmente óptico. As primeiras simulações executadas totalmente no domínio elétrico, primeiramente, validam o programa simulador e em seguida estabelecem um método para avaliar os sinais recebidos.

Ainda no domínio elétrico estabelecemos a largura de banda dos filtros empregados nas simulações para depois determinarmos a separação mínima entre as subportadoras. Isso também cria uma base de informação que é utilizada na comparação entre as simulações no domínio óptico.

E finalmente as simulações no domínio óptico demonstram os principais problemas envolvidos nos dois sentidos da transmissão da FDMA-SCM PON. No sentido de transmissão OLT-ONUs como na OLT todos os tráfegos se reúnem o sinal FDMA-SCM destinado às ONUs é gerado no domínio elétrico. Isto determina que os principais problemas envolvidos na transmissão sejam a sensibilidade devido à compressão do sinal eletrônico e a potência óptica na saída do modulador óptico.

No sentido de transmissão ONUs-OLT as ONUs possuem acesso apenas ao seu tráfego e devido a isso o sinal FDMA-SCM deve ser gerado no domínio óptico, mais precisamente na soma realizada pelo acoplador de potência óptico. Assim os principais problemas envolvem a não linearidade dos moduladores ópticos e do fotoreceptor e a falta de filtros ópticos nas ONUs. Todas as avaliações dos canais são feitas através da figura de mérito EVM (*Error Vector Magnitude*) descrito no apêndice A.

As simulações realizadas foram implementadas através das plataformas comerciais Matlab da empresa The Mathworks (Mat08) e Optisystem da Optiwave (Opt08). A parte da simulação no domínio elétrico como gerador de bits aleatórios, filtros, modulador e demodulador QAM é realizado no Matlab. Enquanto o Optisystem é utilizado para

simular os componentes do domínio óptico como laser CW, fibra óptica, moduladores externos, MZM, EAM, RSOA e fotodiodo PIN.

3.4.1 - CANAL AWGN - EVM x BER x SNR

Para certificar que o simulador responde corretamente à variação na taxa de SNR foi criada uma simulação ‘fim a fim’ apresentada na Fig. 3.5.

Os seus principais componentes são:

- Gerador de bits: Gera a seqüência de bits aleatórios;
- Modulador 16QAM: Transforma a seqüência de bits em dois sinais vetoriais denominados I e Q, os quais serão multiplicados por portadoras senoidais defasadas em 90 graus;
- Filtro passa-baixa: Foi escolhida uma largura de banda muito maior que a largura de banda do sinal transmitido para evitar que surgisse algum efeito devido à limitação na largura de banda;
- AWGN: Adiciona uma determinada quantidade de ruído, de forma a ser ter um sinal com uma determinada SNR;
- Demodulador 16QAM: recebe, sincroniza e decodifica os vetores I e Q;
- Comparador de bit: compara os bits recebidos com os bits transmitidos e conta o número de bits errados.

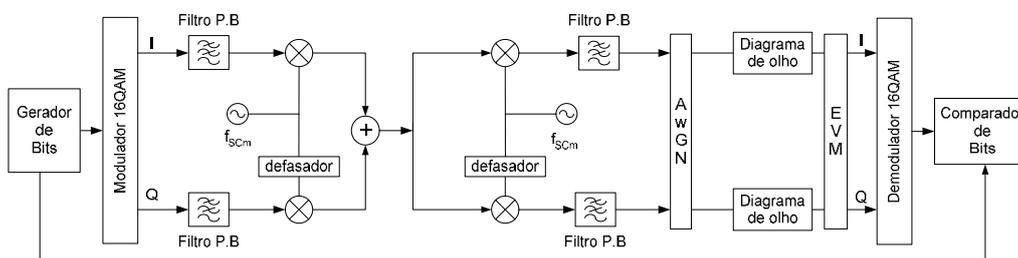


Figura 3.5 - Esquema da simulação fim a fim EVM x BER x SNR.

É simulado um canal de dados de 1 Gbps que transmite na frequência de 3 GHz. O valor de SNR é variado de 6 dB até 20 dB com passos de 2 dB. Para se ter uma medida de BER aceitável, a cada valor de SNR as simulações transmitem pelo menos 408800 bits ou até que se tenha no mínimo 10 erros de bit.

O gráfico BER x SNR da Fig. 3.6 apresenta uma comparação entre uma curva teórica e a obtida pela simulação. Note que a curva simulada acompanha a curva teórica e demonstra que o simulador possui uma boa resposta. A curva teórica é descrita por Proakis em (Proakis, et al., 2007).

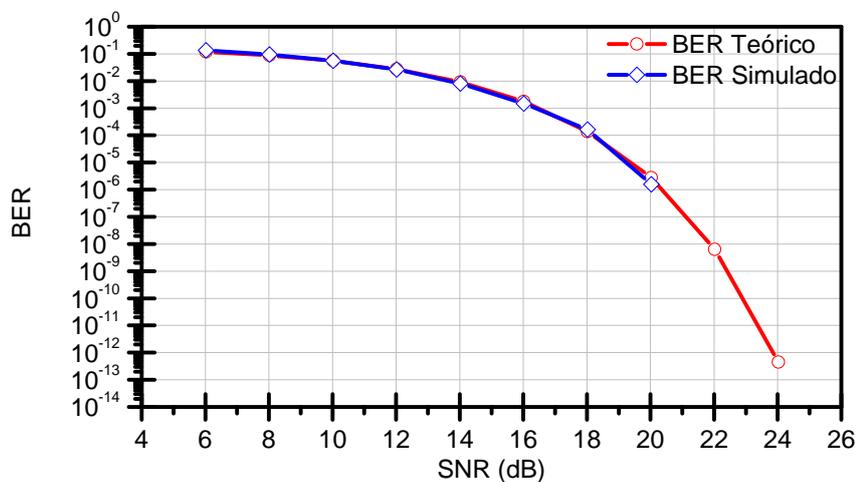


Figura 3.6 – Gráfico de BER x SNR para um sistema ‘fim a fim’.

Os desempenhos dos enlaces de dados digitais são avaliados geralmente pela medida de BER a qual pode ser calculada pela divisão do número de bits recebidos com erros pelo número de bits transmitidos. Porém quando o valor de SNR se torna muito alto a medida de BER se torna muito demorada devido à necessidade da transmissão de muitos bits para a obtenção de um valor estável de BER.

O problema aumenta quando se trabalha com enlaces ópticos nos quais as taxas de SNR podem chegar a valores de 35 a 40 dB. Mas um sinal QAM também pode ser avaliado através do EVM com a vantagem sobre a BER de que a medida de EVM

converge rapidamente para o resultado final independente do nível de SNR e permite uma medida confiável com um número menor de bits transmitidos.

Para criar o gráfico EVM x SNR na Fig. 3.7, na simulação ‘fim a fim’ o valor de SNR é variado de 6 dB até 30 dB com passos de 2 dB. E para cada valor de SNR são transmitidos 1008000 bits.

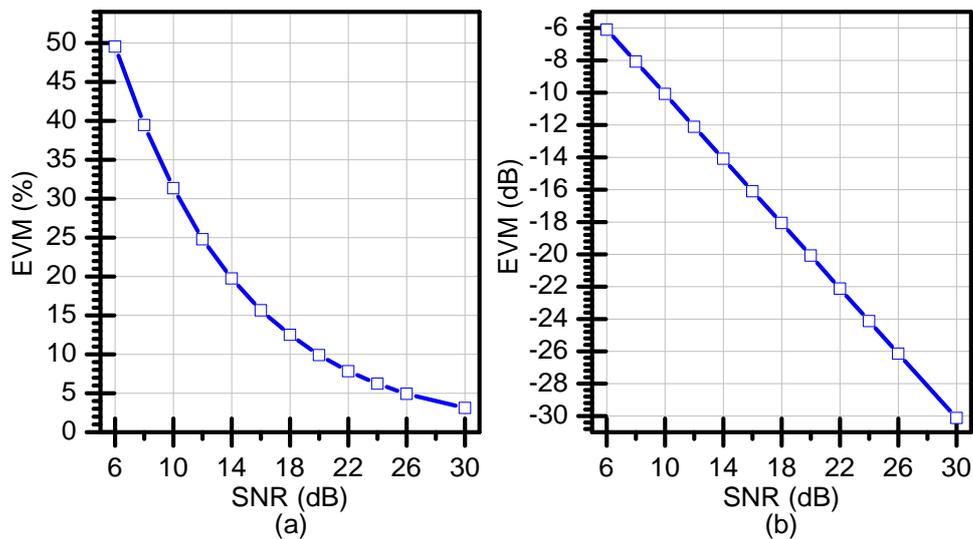


Figura 3.7 – EVM x SNR para simulação ‘fim a fim’ (a) EVM(%) x SNR e (b) EVM(dB) x SNR.

O gráfico BER x EVM da Fig. 3.8 ilustra o relacionamento da BER com o EVM para um enlace que utilize uma modulação 16QAM. A curva da Fig. 3.8 combinou os valores obtidos nas Figs. 3.6 e 3.7. Note que valores de EVM menores que 7% implicam em uma BER inferior a 10^{-10} , o que é um ótimo valor para a maioria dos sistemas de transmissão de dados.

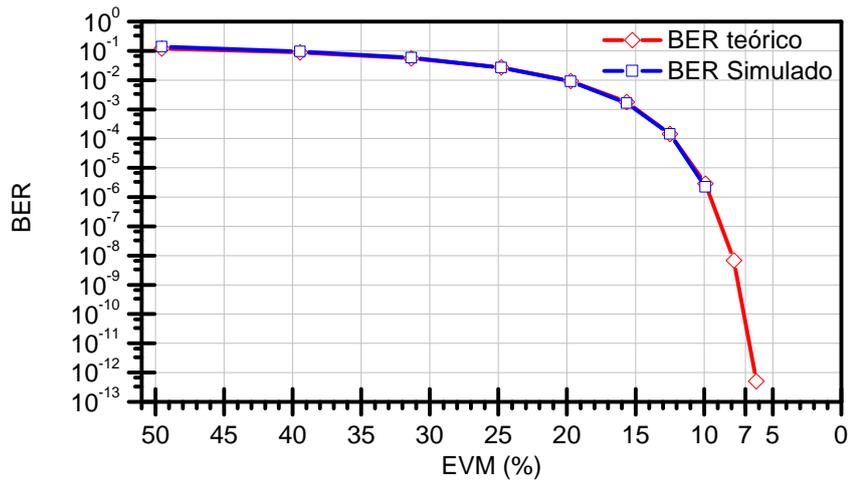


Figura 3.8 – BER x EVM.

Para melhor ilustrar a influência da relação sinal ruído no desempenho do sistema fim a fim, a Fig. 3.9 apresenta o diagrama de constelação e os diagramas de olho dos componentes I e Q do sinal recebido para (a) SNR = 16 dB, (b) SNR = 20,52 dB, (c) SNR = 26 dB e (d) SNR = 30 dB. Onde os valores medidos de EVM são respectivamente 30%, 10%, 5% e 3%.

Os diagramas de olho das componentes I e Q são quadrados devido à grande largura de banda dos filtros passa-baixa da simulação. E deve ser notado que nos diagrama de constelação, à medida que o valor de SNR aumenta, a nuvem de pontos se concentra em uma área menor.

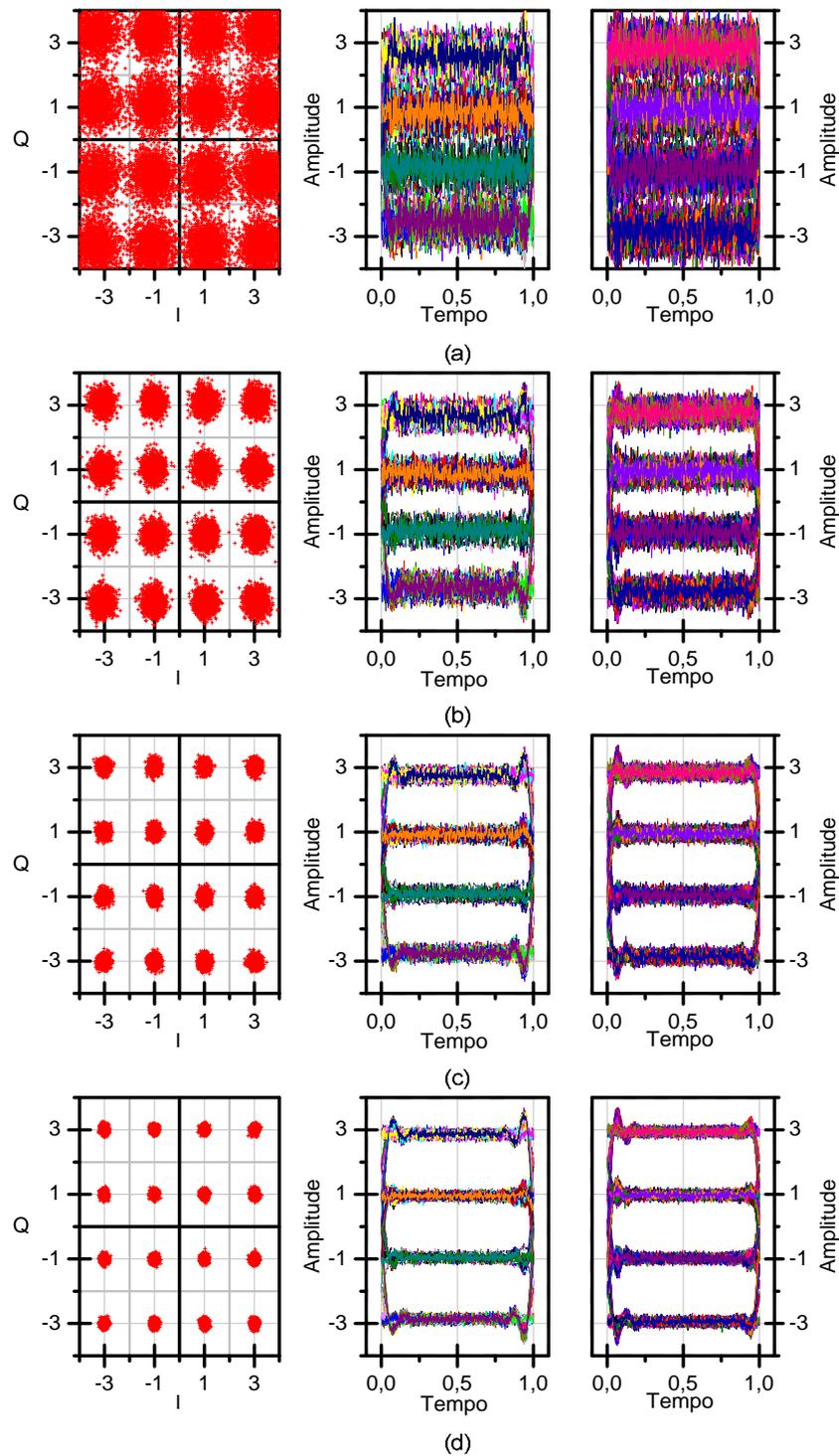


Figura 3.9 – Diagrama de constelação e diagrama de olho dos componentes I e Q para (a) SNR=16 dB e EVM= 30%, (b) SNR=20,52 dB e EVM=10%, (c) SNR= 26 dB e EVM=5% e (d) SNR=30 dB e EVM=3%.

3.4.2 - EVM x FATOR *ROLL-OFF* DO FILTRO

As simulações utilizam filtros FIR (*Finite impulse response*) coseno levantado criados com janela do tipo Chebyshev de ordem 500 e atenuação de lóbulo lateral de 100 dB. Estes filtros são empregados para filtrar os sinais I e Q, que respectivamente saem e entram no modulador e demodulador 16QAM, como mostrado no esquema apresentado pela Fig. 3.10.

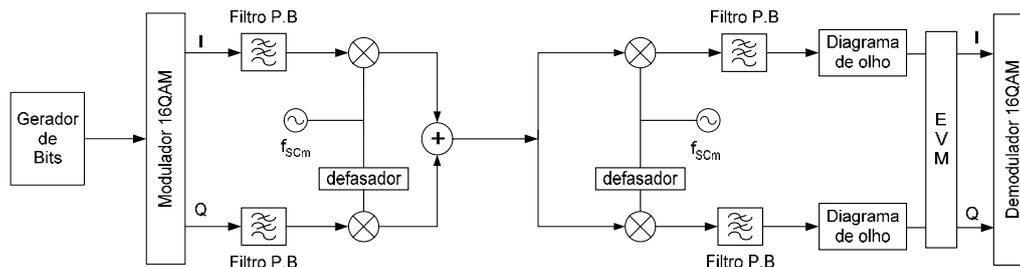


Figura 3.10 - Diagrama da simulação fim a fim elétrico.

Para caracterizar como a variação da largura de banda do filtro atua na qualidade do sinal 16-QAM, o esquema acima é simulado variando o fator *roll-off* do filtro. A Fig. 3.11 apresenta a resposta em frequência dos filtros empregados para as simulações. Note que quanto menor é o fator de *roll-off*, menor é a banda de passagem do filtro.

A simulação é executada com a taxa de transmissão de 1 Gbps, variando o valor do fator de *roll-off* de 0 a 1 com passos de 0,25. Para cada valor de *roll-off* é transmitido 252000 símbolos 16QAM totalizando 1008000 bits. Com cada símbolo 16QAM amostrado por 512 pontos.

O resultado é apresentado na Fig. 3.12, através do gráfico EVM por fator *roll-off* do filtro. Além de ilustrar que uma pequena variação na largura de banda do sinal pode provocar um efeito significativo no valor de EVM, os resultados destas simulações servem também ao propósito de caracterizar o simulador e estabeleceu uma base de comparação do sinal 16QAM para as próximas simulações.

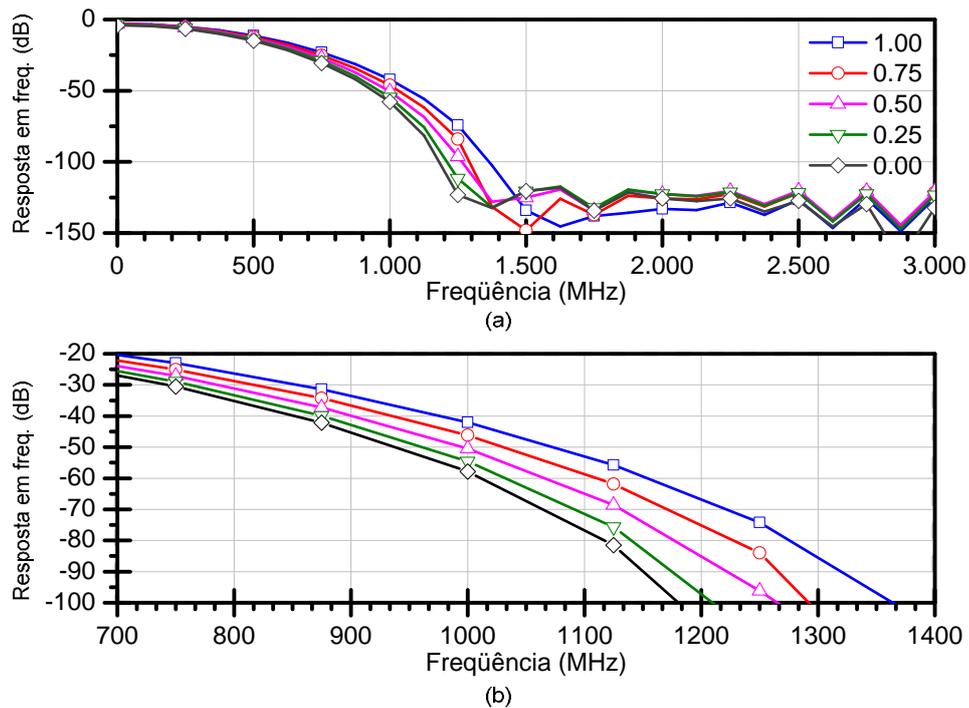


Figura 3.11 – (a) Respostas em frequência dos filtros para fatores *roll-off* de 0,00, 0,25, 0,50, 0,75 e 1,00 e (b) detalhamento.

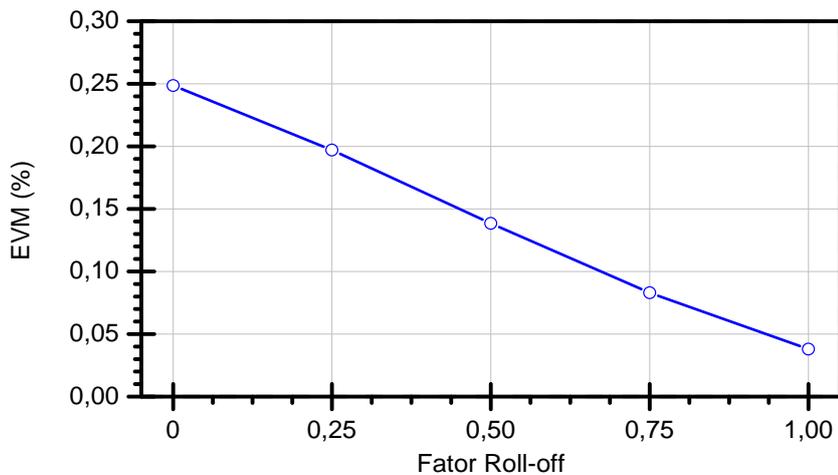


Figura 3.12 - EVM x fator de *roll-off* do filtro passa-baixa.

3.4.3 - EVM X SEPARAÇÃO ENTRE AS SUBPORTADORAS

Nessa seção realizaremos estudos com o objetivos de definir a melhor separação entre as subportadoras. É claro que este tipo de medida está diretamente relacionado com a

largura de banda dos filtros empregados. Porém como o objetivo deste estudo não é analisar filtros e sim a transmissão de canais SCM no domínio óptico, os filtros a serem utilizados nas futuras simulações devem ser fixados. E por escolha são iguais aos do item anterior deste capítulo com um fator de *roll-off* de 0,25. Esta simulação também serve ao propósito de estabelecer uma base para comparação. O esquema desta simulação é apresentado na Fig. 3.13.

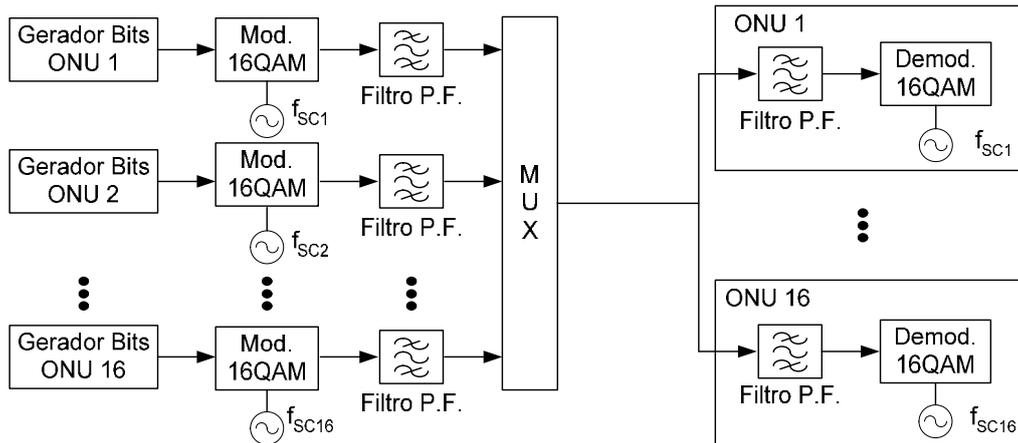


Figura 3.13 - Esquema da simulação EVM x Separação entre as portadoras.

Nesta simulação são transmitidos 16 canais na taxa de transmissão de 1 Gbps, na qual é variada a separação entre as subportadoras. Não há a introdução de nenhum tipo de ruído ou interferência, de modo que possa ser estabelecido em valor EVM o quanto cada canal sofreu de interferência devido a seus canais adjacentes.

A Tabela 3.2 apresenta as frequências das subportadoras para as separações de 750, 850, 950 e 1050 MHz.

Tabela 3.2 – Posição das frequências das subportadoras.

Separação Subportadoras (MHz)	Canais							
	1	2	3	4	5	6	7	8
750	1000	1750	2500	3250	4000	4750	5500	6250
850	1000	1850	2700	3550	4400	5250	6100	6950
950	1000	1950	2900	3850	4800	5750	6700	7650
1050	1000	2050	3100	4150	5200	6250	7300	8350

Separação Subportadoras (MHz)	Canais							
	9	10	11	12	13	14	15	16
750	7000	7750	8500	9250	10000	10750	11500	12250
850	7800	8650	9500	10350	11200	12050	12900	13750
950	8600	9550	10500	11450	12400	13350	14300	15250
1050	9400	10450	11500	12550	13600	14650	15700	16750

A Tabela 3.3 e as Figs. 3.14 e 3.15 apresentam os resultados das simulações. Note que os canais 1 e 16 apresentam um valor menor de EVM, o que se deve ao fato destes possuírem apenas um canal adjacente. Como esperado, quanto maior for a separação entre as subportadoras menor é o EVM dos canais, que significa uma menor interferência entre eles.

Tabela 3.3 - EVM (%) em função da separação entre as subportadoras.

Separação Subportadoras (MHz)	Canais							
	1	2	3	4	5	6	7	8
750	5,365	7,996	8,000	7,948	7,983	7,960	8,000	7,937
850	1,926	2,718	2,722	2,706	2,714	2,729	2,728	2,710
950	0,548	0,748	0,752	0,747	0,753	0,757	0,754	0,754
1050	0,218	0,239	0,239	0,239	0,238	0,241	0,240	0,239

Separação Subportadoras (MHz)	Canais							
	9	10	11	12	13	14	15	16
750	7,931	8,010	7,948	7,977	8,052	7,925	7,970	5,383
850	2,727	2,714	2,720	2,725	2,729	2,719	2,721	1,928
950	0,751	0,749	0,751	0,750	0,750	0,752	0,750	0,550
1050	0,239	0,239	0,239	0,239	0,238	0,240	0,239	0,219

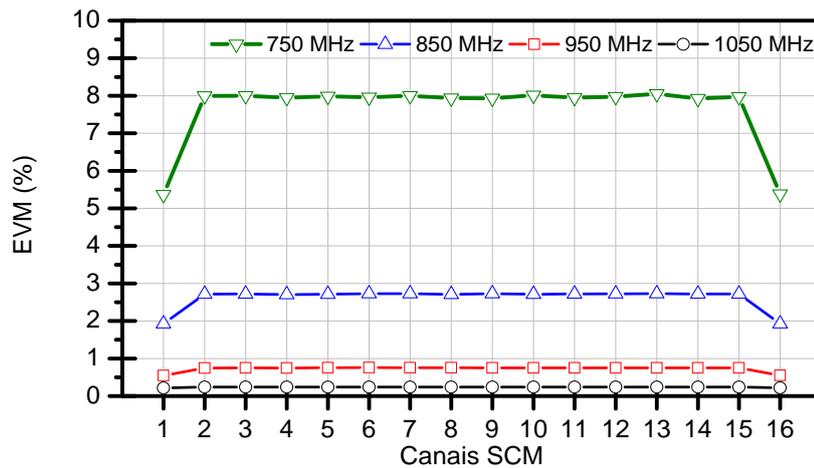


Figura 3.14 – EVM por canais SCM da simulação fim a fim separação de canais.

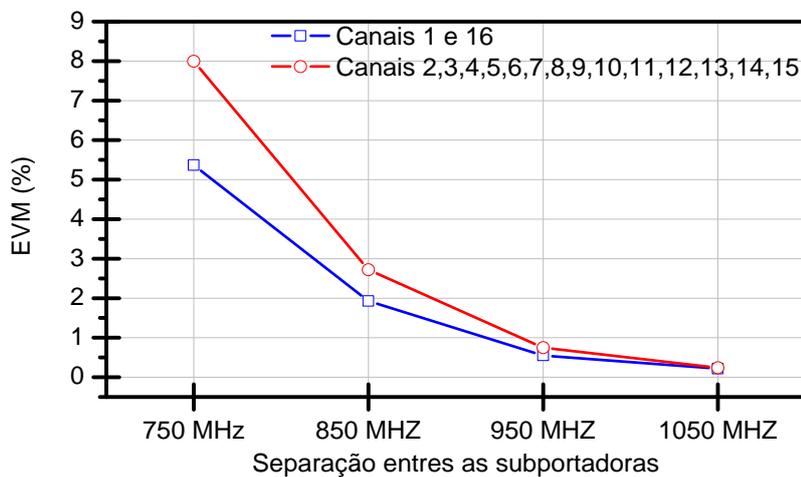


Figura 3.15 - EVM x Separação entre portadoras da simulação fim a fim separação de canais.

A partir do gráfico da Fig. 3.15 pode-se concluir que para uma transmissão com uma mínima interferência entre canais a separação entre os canais deve ser de pelo menos 1050 MHz. Vale lembrar, novamente, que este valor de separação é válido somente para o filtro apresentado na Seção 3.4.2 - . Em caso de filtros mais estreitos este valor de separação pode diminuir e no caso contrário de filtros mais largos a separação deve aumentar.

3.4.4 - TRANSMISSÃO OLT-ONUs

Em uma FDMA-SCM PON os tráfegos destinados às ONUs se concentram na OLT o que permite que o sinal FDMA-SCM a ser transmitido pela rede PON seja montado diretamente no domínio elétrico para posteriormente ser modulado e portanto convertido para o domínio óptico. Isto permite que os sinais envolvidos sejam tratados ainda no domínio elétrico no qual o custo dos filtros, equalizadores e amplificadores são ínfimos quando comparados aos seus pares no domínio óptico.

Mas certos detalhes devem ser observados como o número de ONUs, a relação entre valor médio e valor de pico do sinal FDMA-SCM do sinal de entrada no modulador óptico e a potência óptica na saída do modulador óptico.

Para determinar o número de ONUs da rede primeiro deve se escolher os parâmetros como frequência da primeira subportadora e a separação entre elas. Através da seção anterior a separação entre as subportadoras foi fixada em 1050 MHz para que não ocorra interferência entre os canais. E ao escolher a frequência da primeira subportadora igual a 600 MHz, a tabela 3.4 pode ser montada com a distribuição de frequência da rede.

Tabela 3.4 - Distribuição de frequência das subportadoras para 16 canais.

Canais	1	2	3	4	5	6	7	8
Frequência Portadora (MHz)	600	1650	2700	3750	4800	5850	6900	7950

Canais	9	10	11	12	13	14	15	16
Frequência Portadora (MHz)	9000	10050	11100	12150	13200	14250	15300	16350

Na simulação é utilizada uma fibra padrão monomodo de 20 km, com dispersão de 16,75 ps/nm/km e atenuação de 0,2 dB/km. O gráfico da resposta em frequência da fibra em cima da distribuição de frequência dos canais pode ser vista na Fig. 3.16. Os canais

estão especificados como C1, C2,..., C16 e note que a partir do canal 10 a atenuação será maior que 3 dB.

Como uma PON possui um divisor/acoplador no percurso, a potência que chega às ONUs é muito atenuada e os canais que sejam muito afetados também pela propagação pela fibra óptica devem ser descartados. Desta forma, a escolha para o número de ONUs para a simulação é de 10 ONUs.

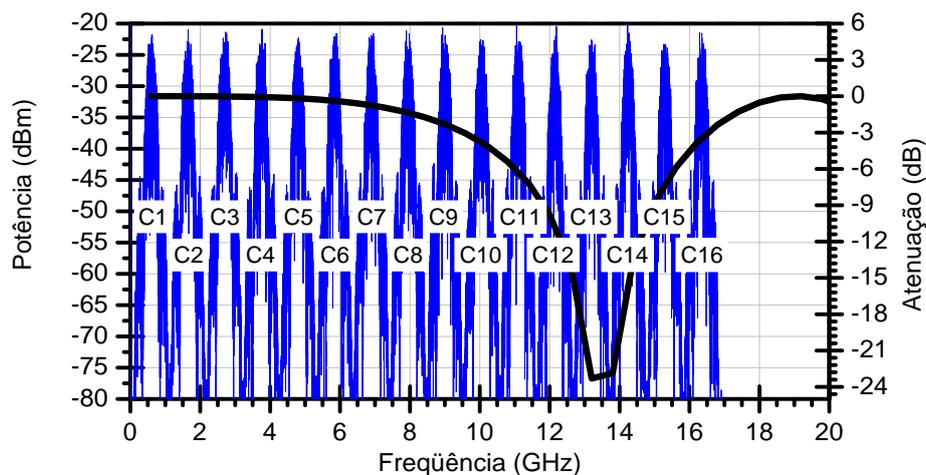


Figura 3.16 - Resposta em frequência da fibra óptica em cima da distribuição de frequência.

A Fig. 3.17 apresenta o esquema da simulação para o sentido OLT-ONUs. Nas simulações foram transmitidos 10 canais com a taxa de transmissão de 1 Gbps, modulados em 16-QAM. Nos moduladores/demoduladores 16-QAM são utilizados os filtros passa-baixa demonstrados nas seções anteriores.

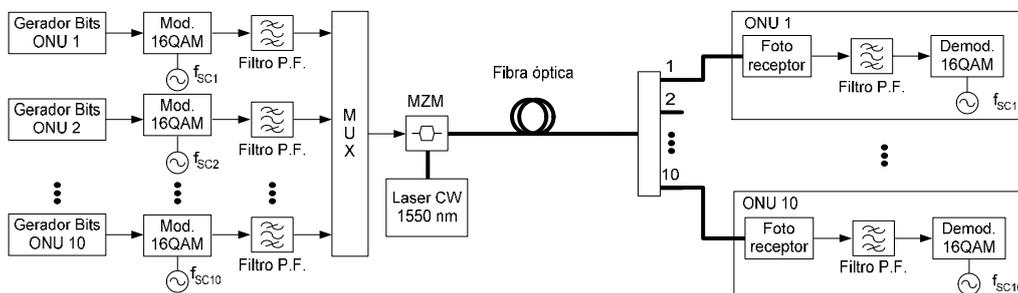


Figura 3.17 - Esquema da simulação no sentido de transmissão OLT-ONUs.

Os dados destinados a cada ONUs depois de serem modulados em 16-QAM e filtrados pelos filtros de canal chegam ao mux. No mux eles são somados para formar o sinal FDMA-SCM como mostrado na Fig. 3.18, onde se tem o sinal no tempo e o seu espectro elétrico. Note que o sinal temporal está entre os valores 0 e 1, isto se tornou necessário devido às restrições do simulador para o bloco do modulador.

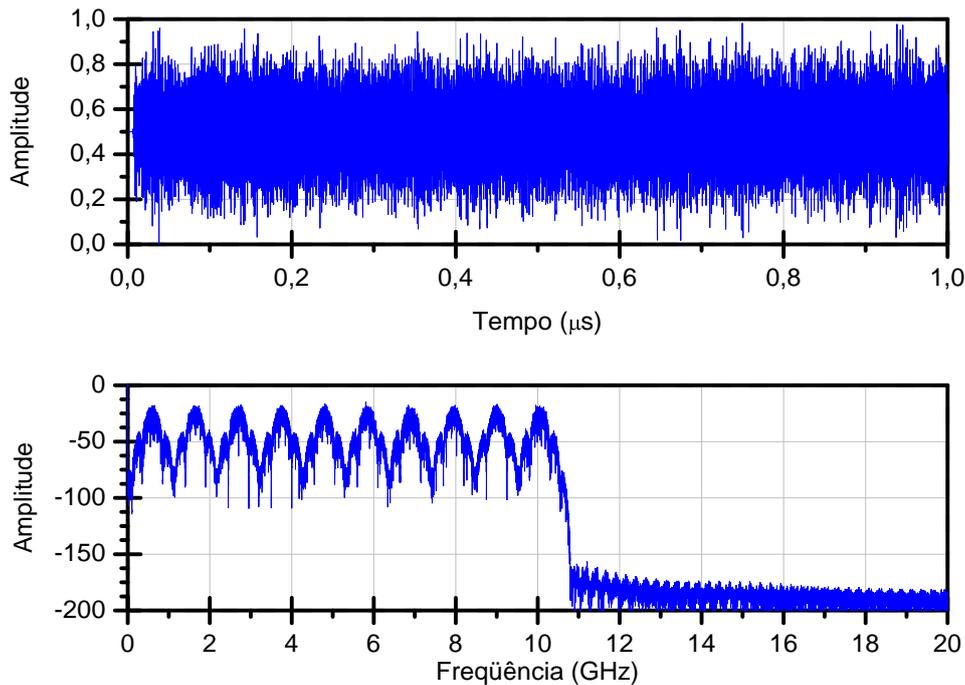


Figura 3.18 – Sinal no tempo e o espectro elétrico do sinal FDMA-SCM na entrada do modulador mach-zehnder.

O modulador Mach-Zehnder (MZM) é alimentado por um laser CW DFB de comprimento de onda de 1550 nm com uma potência de 6 dBm. O espectro óptico do sinal logo após o modulador apresenta muitos espúrios e deve ser filtrado para ser enviado para a fibra óptica. O espectro óptico antes e depois do filtro pode ser visto na Fig. 3.19.

Após a fibra óptica o sinal no acoplador/divisor de potência é dividido por 10, de forma que cada fração do sinal óptico que chega às ONUs é uma cópia do sinal atenuado

em 10 dB. Os espectros ópticos antes e depois do acoplador/divisor podem ser visualizados na Fig. 3.20

Já nas ONUs o sinal óptico é convertido para o domínio elétrico através de um fotodiodo PIN com uma responsividade de 1 A/W. A curva de EVM (%) por canal pode ser vista na Fig. 3.21.

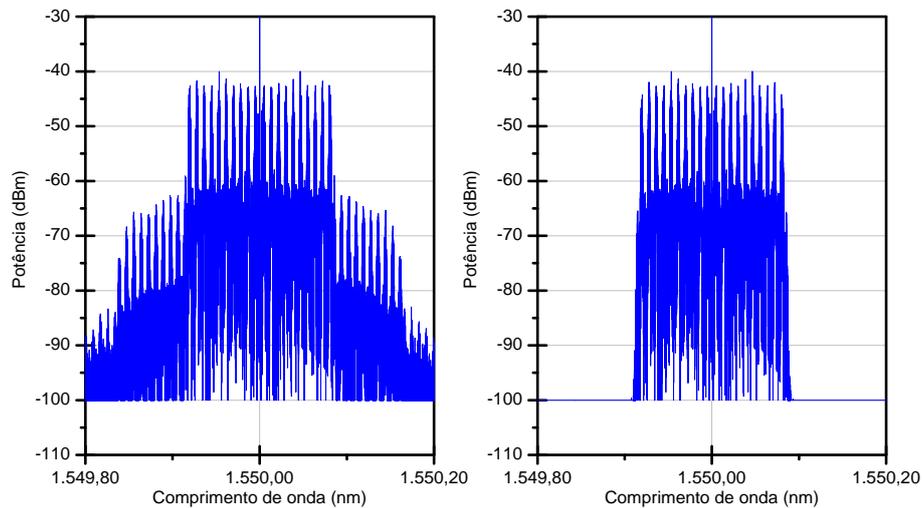


Figura 3.19 - Espectro óptico na saída do Mach-Zehnder e após o filtro óptico.

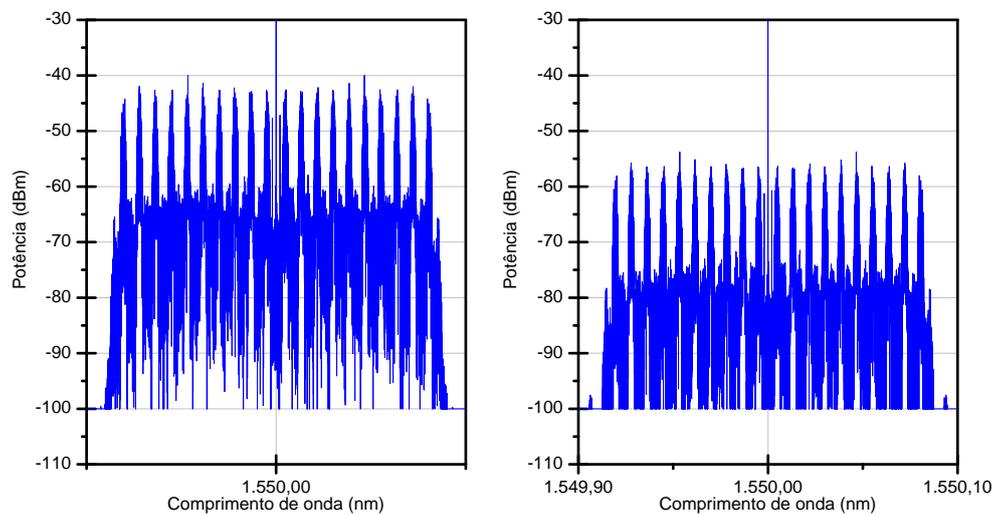


Figura 3.20 - Espectro óptico após a fibra óptica e após o divisor de potência.

Na escolha da potência do laser o divisor de potência desempenha um fator muito determinante. Pois é responsável pela maior atenuação que o sinal óptico sofre no

sentido OLT-ONUs. Na simulação o divisor impõe uma atenuação de 10 dB em todos os sinais ópticos antes deles chegarem às ONUs. E como não se pode simplesmente aumentar a potência do laser, pois provocaria efeitos não-lineares na fibra óptica, deve achar um equilíbrio entre número de ONUs (atenuação no divisor) e potência de entrada na fibra óptica. De forma que a potência óptica das subportadoras no fotoreceptor esteja dentro da sensibilidade do sistema.

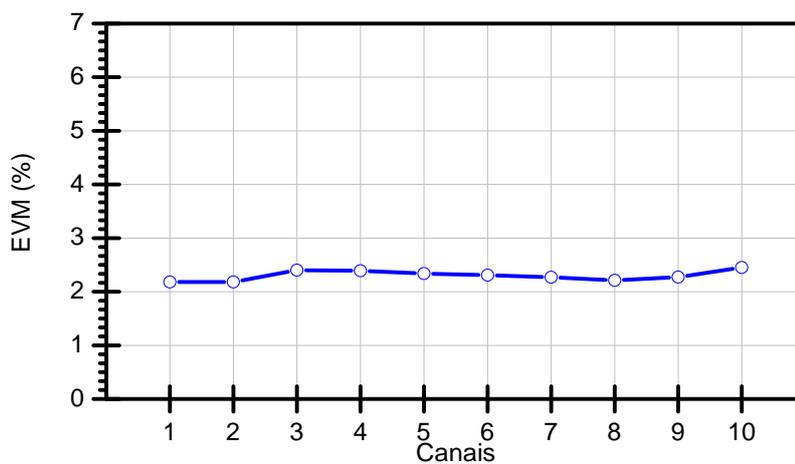


Figura 3.21 – EVM (%) x Canais da simulação no sentido OLT-ONUs.

3.4.5 - TRANSMISSÃO ONUS-OLT

Na transmissão das ONUs para a OLT o sinal FDMA-SCM é construído no domínio óptico. Isto implica que na entrada do modulador óptico da ONU há apenas um sinal 16QAM e desta forma não surge o problema de sensibilidade devido à compressão do sinal.

Outro detalhe importante é que como o sinal óptico de saída da ONU não sofre atenuação no divisor de potência, a potência óptica da ONU é menor em relação da potência óptica necessária para a OLT.

Como visto no capítulo 2 o custo das ONUs é um fator muito importante para uma rede de acesso. E devido a isso a escolha para o modulador óptico das ONUs das simulações é o EAM por apresentar um custo relativamente baixo. O sinal de saída óptico $E_{out}(t)$ do modelo do EAM utilizado nas simulações é calculado por (Opt08):

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \times \sqrt{mod(t)} \times \exp \left[j \frac{a}{2} \ln(mod(t)) \right] \quad (3.2)$$

onde, $E_{in}(t)$ é o sinal de entrada óptico, a é o fator de chirp e $mod(t)$ pode ser calculado por

$$mod(t) = (1 - MI) + MI - modula(t) \quad (3.3)$$

sendo MI o índice de modulação e $modula(t)$ o sinal de entrada elétrico normalizado entre 0 e 1. Note que devido ao termo raiz quadrada de (3.2) o dispositivo é não-linear.

A Fig. 3.22 apresenta o esquema para uma simulação no qual é possível estudar a operação do EAM em uma PON. Como pode ser visto de (3.2) e (3.3) a potência óptica do sinal de saída do modulador está em função do índice de modulação, desde que o sinal elétrico $modula(t)$ está fixado entre os valores 0 e 1. A modulação realizada através do EAM apresentou, além do sinal em torno da subportadora, um sinal óptico com uma potência relativamente alta, localizado na posição da primeira harmônica das subportadoras. A potência deste sinal óptico na primeira harmônica também variou em função do índice de modulação.

Na simulação os parâmetros de índice de modulação e separação entre subportadoras são variados para demonstrar como a qualidade do sinal recebido no fotoreceptor está em função da posição das subportadoras.

A Fig. 3.23 apresenta o resultado em EVM por canal. O aumento do índice de modulação provocou um aumento no sinal modulado e também em suas harmônicas. A qualidade dos sinais recebidos é muito prejudicada quando as posições das subportadoras

coincidem com das harmônicas dos sinais de frequência menores ou com as posições dos produtos de intermodulação entre as subportadoras.

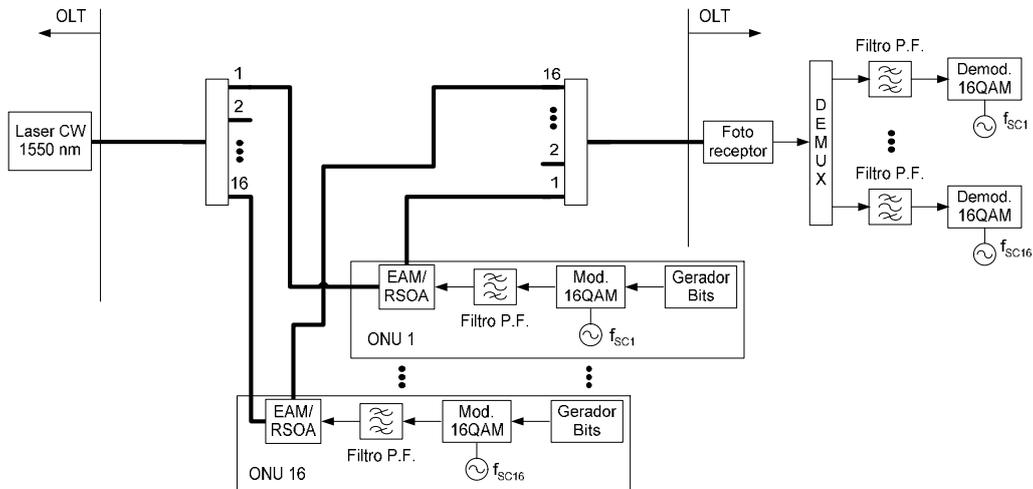


Figura 3.22 - Esquema simulação ONUs-OLT com 16 canais.

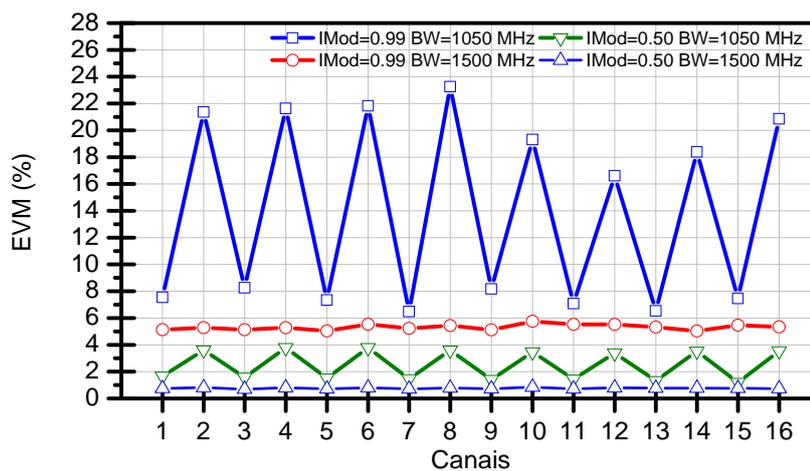


Figura 3.23 – EVM x Canal para simulação sem fibra óptica. (Imod é o índice de modulação)

Com a ajuda da tabela 3.5 percebe-se que as subportadoras que tiveram o pior desempenho são que sofreram com as harmônicas dos outros canais. Note também que quando se utiliza a separação de 1500 MHz não há mais a coincidência entre as posições das subportadoras e as harmônicas levando o EVM a valores aceitáveis.

Pelos resultados apresentados pela Fig. 3.23 a separação 1050 MHz deve ser descartada em favor da separação de 1500 MHz. Com essa separação ainda ocorre interferência, principalmente devido a produto de intermodulação, porém em um nível menor. A Fig. 3.24 imprime a nova distribuição das frequências das subportadoras sobre a resposta em frequência da fibra óptica para o comprimento de onda 1550 nm.

Tabela 3.5 – Distribuição de frequência das subportadoras e a posição de suas harmônicas.

1050 MHz					
Canal	Posição da subportadora (MHz)	1º Harmônica (MHz)	Canal	Posição da subportadora (MHz)	1º Harmônica (MHz)
1	1000	2000	9	9400	18800
2	2050	4100	10	10450	20900
3	3100	6200	11	11500	23000
4	4150	8300	12	12550	25100
5	5200	10400	13	13600	27200
6	6250	12500	14	14650	29300
7	7300	14600	15	15700	31400
8	8350	16700	16	16750	33500

1500 MHz					
Canal	Posição da subportadora (MHz)	1º Harmônica (MHz)	Canal	Posição da subportadora (MHz)	1º Harmônica (MHz)
1	1000	2000	9	13000	26000
2	2500	5000	10	14500	29000
3	4000	8000	11	16000	32000
4	5500	11000	12	17500	35000
5	7000	14000	13	19000	38000
6	8500	17000	14	20500	41000
7	10000	20000	15	22000	44000
8	11500	23000	16	23500	47000

Para manter a distribuição de frequência das subportadoras das ONUs o mais simples possível, a simulação é realizada no intervalo de frequência antes do primeiro nulo da resposta em frequência da fibra óptica. Para a fibra óptica padrão de 20 km este intervalo pode conter 8 subportadoras.

Na Fig. 3.25 tem se o esquema para a simulação do sentido ONUs-OLT completo. Com fonte óptica CW é escolhido o laser DFB 1550 nm de potência 12 dBm. E após os 20 km de fibra óptica e o divisor de potência todas as ONUs recebem um feixe laser com uma potência óptica de -1,031 dBm. Cada feixe óptico que chega às ONUs é modulado

por um EAM que trabalha com um índice de modulação de 0,5 e desta forma o sinal óptico de saída do EAM tem a potência de -2,279 dBm.

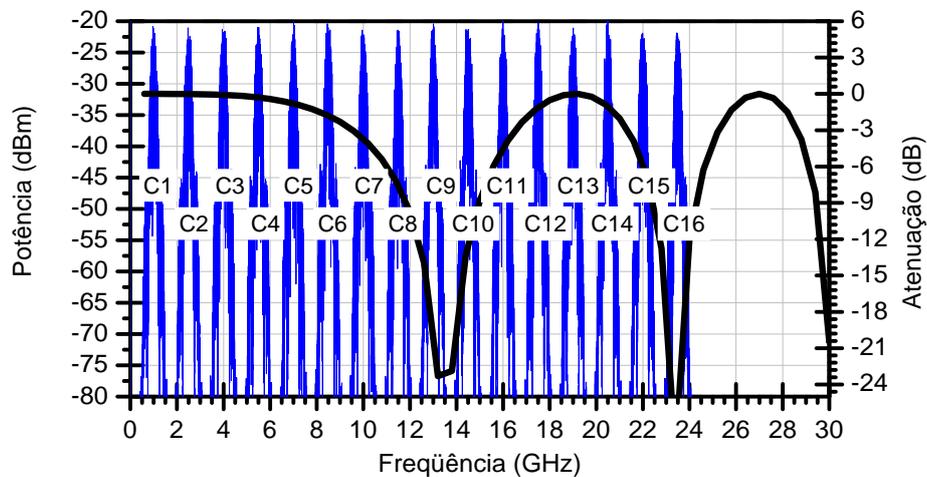


Figura 3.24 – Espectro elétrico (eixo esquerdo em dBm) das portadoras em cima da resposta (eixo direito em dB) em frequência da fibra óptica de 20 km para um comprimento de onda de 1550 nm.

Se os 8 sinais ópticos de -2,279 dBm forem somados no acoplador a potência óptica resultante que chegaria à fibra óptica seria de 6 dBm. Isto poderia produzir a geração de efeitos não lineares na propagação do feixe pela fibra óptica, o que prejudicaria tanto o tráfego no sentido OLT-ONUS, como no ONUS-OLT.

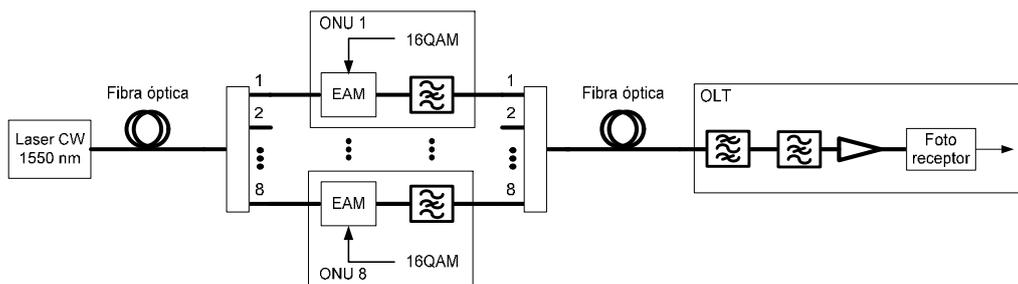


Figura 3.25 - Esquema da simulação ONUs-OLT completa.

Como em um sinal FDMA-SCM óptico a portadora óptica não transporta dados diretamente ela pode ser ligeiramente atenuada a fim de diminuir a potência total no

acoplador. Então, após cada EAM foi adicionado um filtro gaussiano invertido atenuando a portadora óptica em 4 dB. Na saída do filtro a potência óptica cai para -6,243 dBm e após o acoplador a potência óptica somada chega 2,733 dBm. O valor de 2,733 dBm de potência óptica não gera efeitos não lineares na fibra.

Após a fibra óptica a potência cai para -1,267 dBm e antes do sinal óptico pode ser recebido pelo fotodetector, ele deve ser tratado para melhorar a relação de potência entre a portadora óptica e as subportadoras. Então, para retirar os componentes de frequência não desejados o sinal óptico passa por um filtro gaussiano passa faixa óptico. E depois a portadora óptica é novamente reduzida em 6 dB através de um filtro gaussiano invertido. Isso melhora a relação de potência entre portadora e as subportadoras. E a fim de melhorar a sensibilidade do fotoreceptor o sinal óptico é amplificado por ganho de 10 dB.

O sinal recebido pelo fotoreceptor pode ser visto na Fig. 3.26, há produtos de intermodulação, porém eles não caem diretamente sobre as subportadoras o que permite a sua retirada por filtragem.

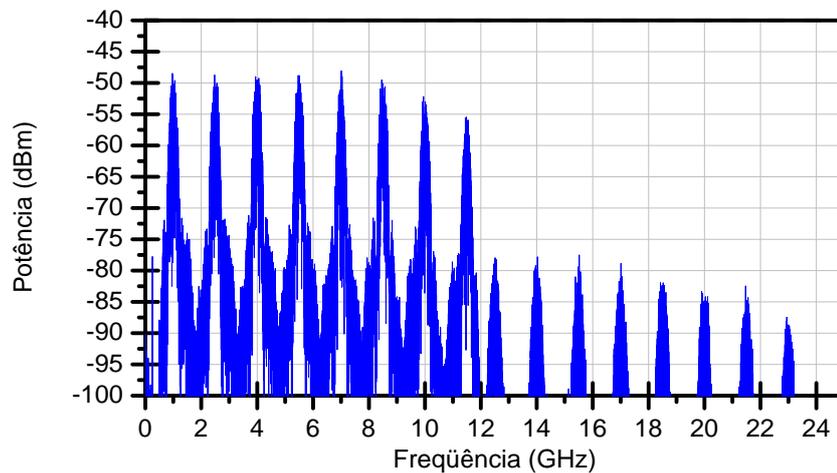


Figura 3.26 – Espectro elétrico recebido da simulação ONUs-OLT completa.

A qualidade do sinal pode ser avaliada pelo resultado da curva EVM x Canais mostrada na Fig. 3.27. O EVM entre 0,85% e 1% indica que a FDMA-SCM PON pode operar tranqüilamente uma alta taxa de dados.

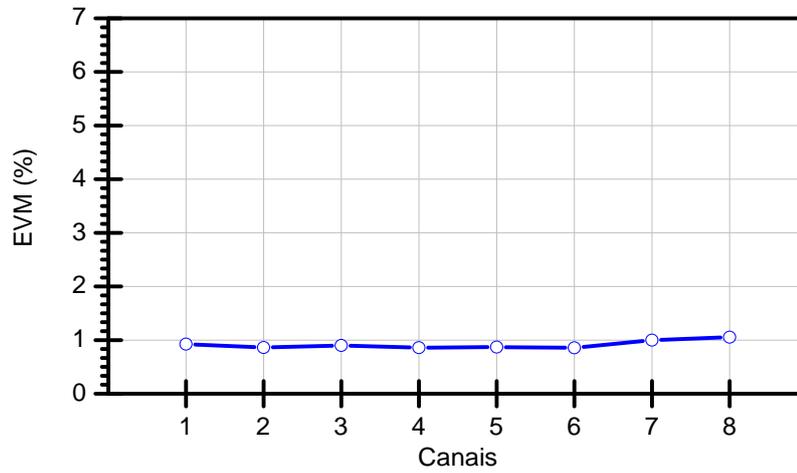


Figura 3.27 – EVM x Canais da simulação ONUs-OLT completa.

Capítulo 4 - ARQUITETURA BS OFDMA-PON

4.1 - INTRODUÇÃO

As FDMA-SCM PONs são uma boa solução de baixo custo com alta taxa de transmissão para as redes de acesso ópticas. Mas como visto, no capítulo anterior, os filtros analógicos de RF empregados para separar os canais de frequência e as bandas de guarda podem limitar o número de ONUs por comprimento de onda.

A proposta final deste trabalho é a arquitetura BS OFDMA-PON que será baseada em uma topologia em árvore utilizando dois comprimentos de onda, um para cada sentido de transmissão da rede. E em ambos os comprimentos de onda a rede dividirá a largura de banda total de transmissão em N sub-bandas, onde cada sub-banda receberá uma quantidade de subportadoras requisitadas pelas ONUs.

A BS OFDMA-PON apresenta as seguintes vantagens sobre a FDMA-SCM PON:

- Número maior de ONUs por comprimento de onda, uma melhor eficiência espectral;
- Permitir alocação dinâmica de banda de transmissão das ONUs, natural ao OFDMA;
- Um maior alcance da rede, sendo possível atender uma parte das ONUs em distâncias superiores a 20 km.

A técnica que irá promover um aumento considerável no número de ONUs por comprimento de onda nas FDMA-PONs é o OFDMA. Ela tem uma eficiência espectral

superior a da SCM ao não utilizar os filtros analógicos para separar os canais de frequência das ONUs e assim não há a necessidade das bandas de guarda entre os canais.

No SCM o canal de frequência da ONU é formado por uma única subportadora separada por uma banda de guarda, mas no OFDM ele é formado por um conjunto de subportadoras ortogonais e a quantidade de subportadoras dentro destes conjuntos pode ser alterada a qualquer instante. Essa característica do OFDMA habilita a alocação dinâmica de banda de transmissão entre as ONUs. Assim pode-se aumentar ou diminuir a taxa de transmissão de uma ONU em função de parâmetros pré-estabelecidos, como por exemplo, tamanho de fila e tipo de tráfego.

E a rede BS OFDMA-PON consegue atender ONUs mais distantes quando controla os esquemas de distribuição das subportadoras para as ONUs em função da distância desta com a OLT. O que permite encaixar os canais de frequência destas ONUs dentro da resposta em frequência da fibra óptica em distâncias superiores.

A próxima seção apresenta a proposta da arquitetura, detalha o seu funcionamento e em seqüência faz uma análise do desempenho da rede, utilizando simulações.

4.2 - PROPOSTA DA ARQUITETURA BS OFDMA-PON

A técnica que utiliza o OFDM para múltiplo acesso é denominada de OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*). Ela basicamente divide as subportadoras ortogonais que formam o símbolo OFDM entre as ONUs. O número de subportadoras dadas as ONUs determina a taxa de transmissão individual da ONU e não precisam ser necessariamente iguais. Note que quanto maior o número de subportadoras destinada a uma ONU maior será sua taxa de transmissão. A Fig. 4.1 demonstra a forma de uma possível distribuição de subportadoras entre N ONUs e mais um canal de controle.

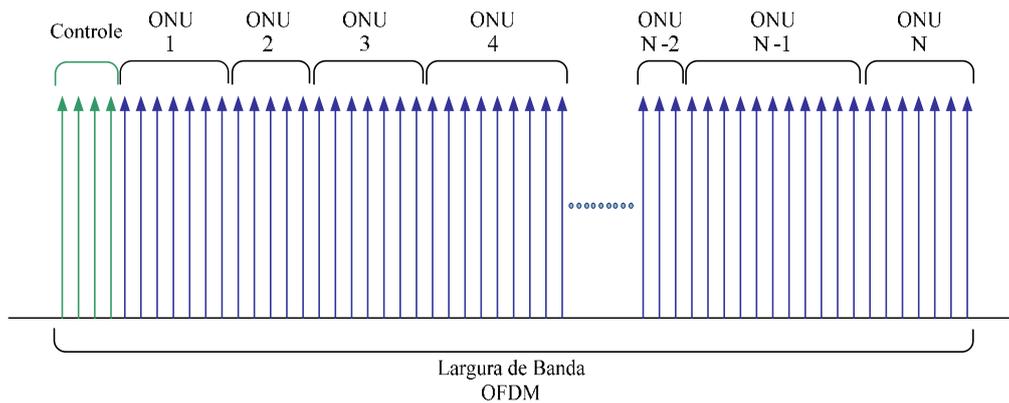


Figura 4.1 – Distribuição das subportadoras do símbolo OFDM entre as ONUs e o canal de controle.

A parte óptica da BS OFDMA-PON será exatamente igual a FDMA-SCM PON, com duas fibras ópticas transportando dois comprimentos de onda diferente. E igualmente como feito no capítulo anterior será apresentada o esquema da rede para os dois moduladores ópticos utilizados neste estudo. A Fig. 4.2 apresenta a versão com o modulador EAM enquanto a Fig. 4.3 com o RSOA. E como as diferenças entre a utilização dos dois tipos de moduladores ópticos já foram mostradas no capítulo anterior, aqui será discutido os esquemas da OLT e das ONUs.

No sentido de transmissão OLT-ONUs, na OLT há a união dos tráfegos destinados as ONUs. Então os símbolos OFDM a serem transmitidos pela PON serão montados no domínio elétrico, igual à FDMA-SCM PON. Assim os dados destinados as ONU passam por um conversor série/paralelo com o tamanho de acordo com a taxa de transmissão designado a aquela ONU. O tamanho do conversor série/paralelo determina diretamente quantas subportadoras serão ocupadas pelo trafego daquela ONU. De forma que uma ONU com uma taxa de transmissão maior possua seu conversor série/paralelo com um tamanho maior do que uma ONU com uma taxa de transmissão inferior.

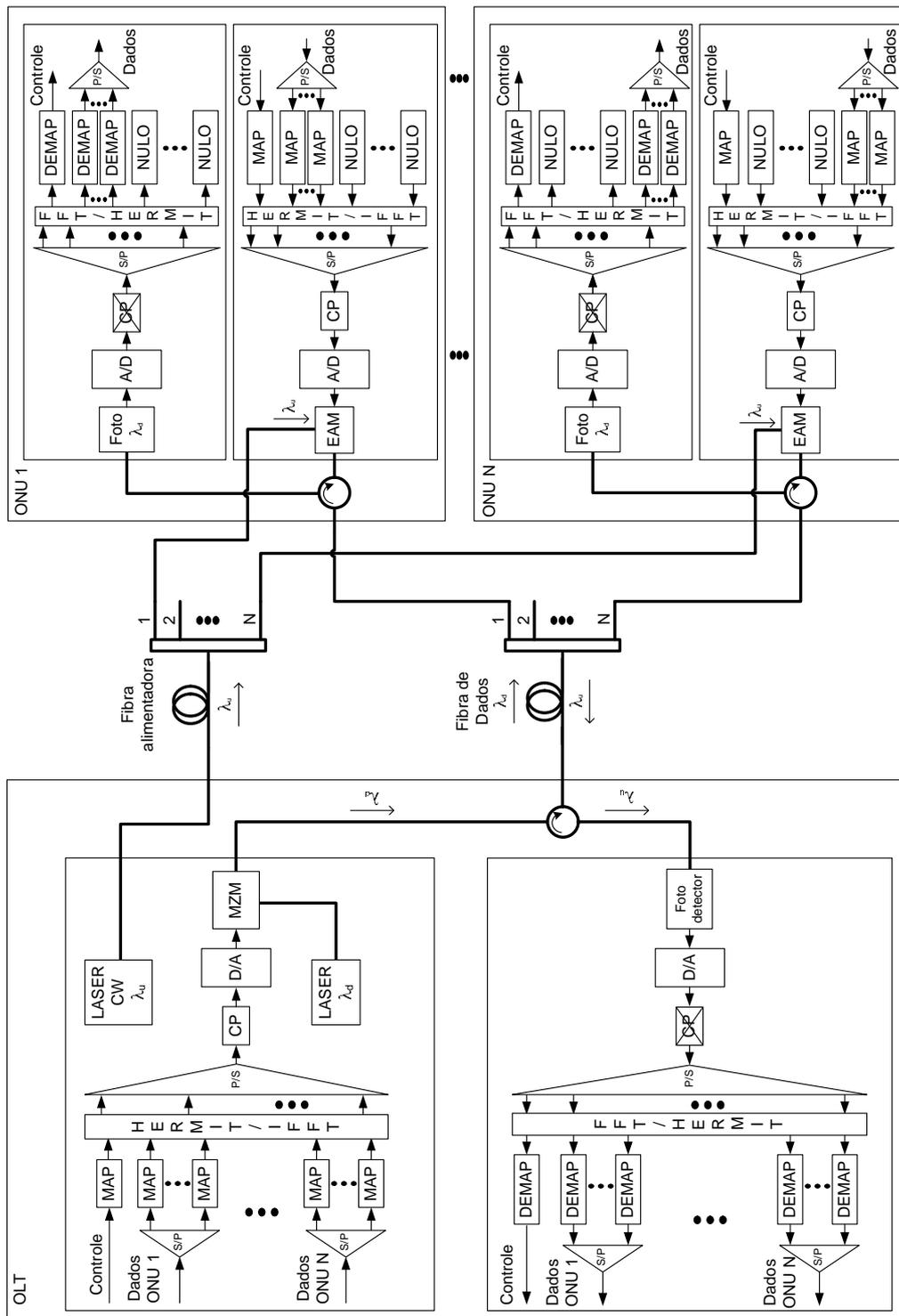


Figura 4.2- Esquema EAM BS OFDMA PON.

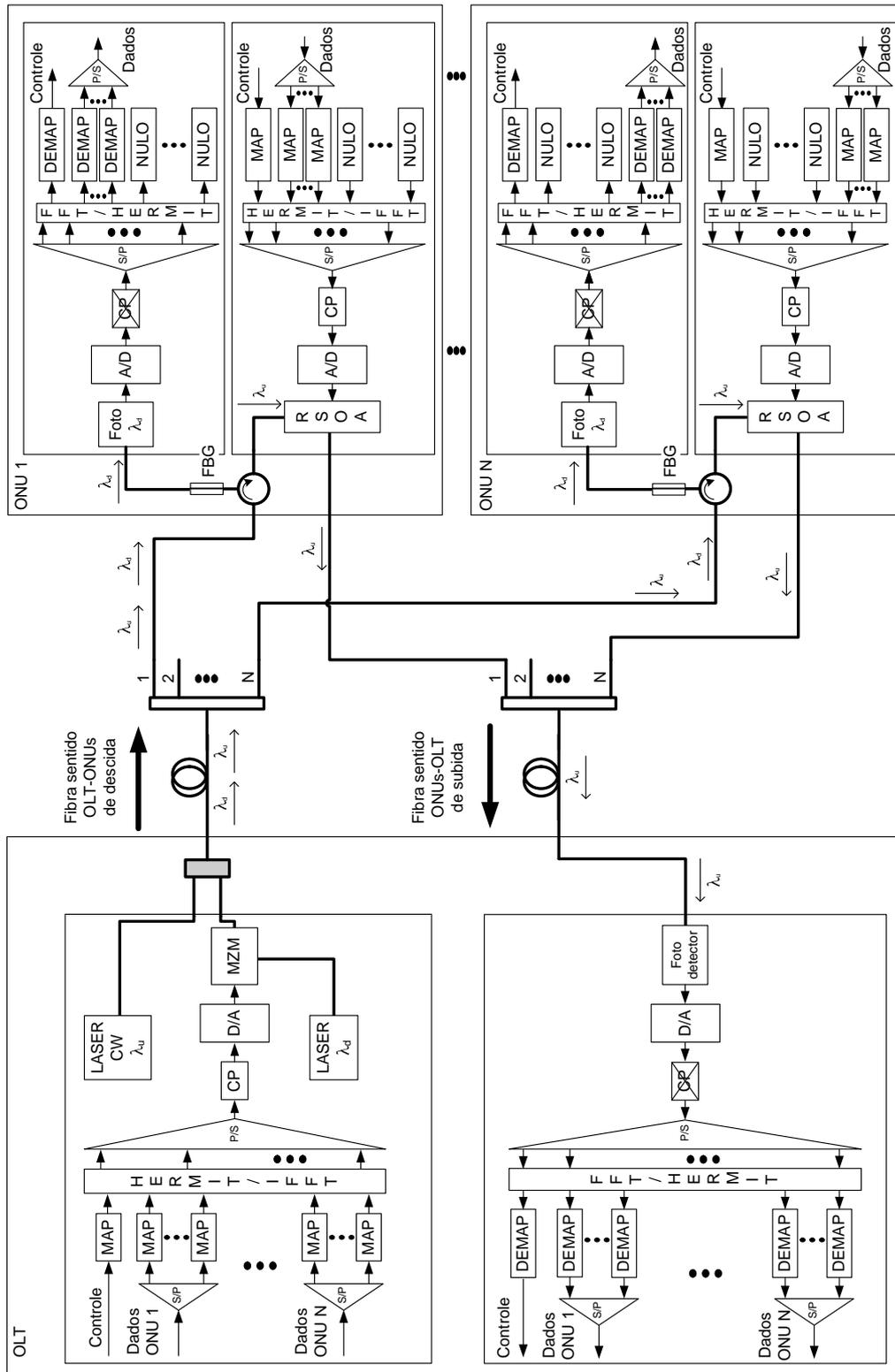


Figura 4.3 – Esquema RSOA BS OFDM PON.

Após o conversor série/paralelo os dados das ONUs e mais os dados do controle são mapeados em símbolos 16QAM, para melhorar um pouco mais a eficiência espectral.

O canal de controle passará para as ONU instruções sobre o funcionamento e controle da rede. Informando todas as ONUs quais as subportadoras devem ser lidas e no sentido ONUs-OLT quais subportadoras serão utilizadas para enviar seus dados para a OLT.

E depois da modulação realizada pelo bloco HERMIT/IFFT o sinal passa por um conversor paralelo/série para depois receber o CP (*Cycle Prefix*). O conversor Digital/Analógico (D/A) termina a operação do domínio digital na OLT e o sinal modula um laser no comprimento de onda λ_d através de um modulador MZM.

Da mesma forma que a FDMA-SCM PON todas as ONUs da BS OFDMA-PON recebem os sinais óptico exatamente com a mesma forma com uma diferença na potência de cada sinal, devido a diferenças nas distâncias das ONUs com as OLT.

Nas ONUs o sinal é recebido por um fotoreceptor na forma analógica e então é amplificado e convertido ao meio digital através de um conversor analógico/digital. E após a operação de demodulação do símbolo OFDM no bloco FFT/HERMIT a ONU separa o tráfego destinado a si ignorando as subportadoras que não lhe pertence. Os dados recebidos são convertidos de símbolos 16QAM para bits através do bloco DEMAP e então serializados em um conversor paralelo/série.

A Fig. 4.4 apresenta o espectro de um símbolo OFDM, note as divisões no espectro. Por exemplo, para a ONU k receber os seus dados ela deverá ignorar todo o espectro fora da sua faixa. Outro detalhe da figura a ser notado é a presença de uma banda de guarda no início do espectro elétrico a qual é obrigatória devido à utilização da modulação DD-OOFDM (Schmidt, et al., 2007) (Lowery, et al., 2007).

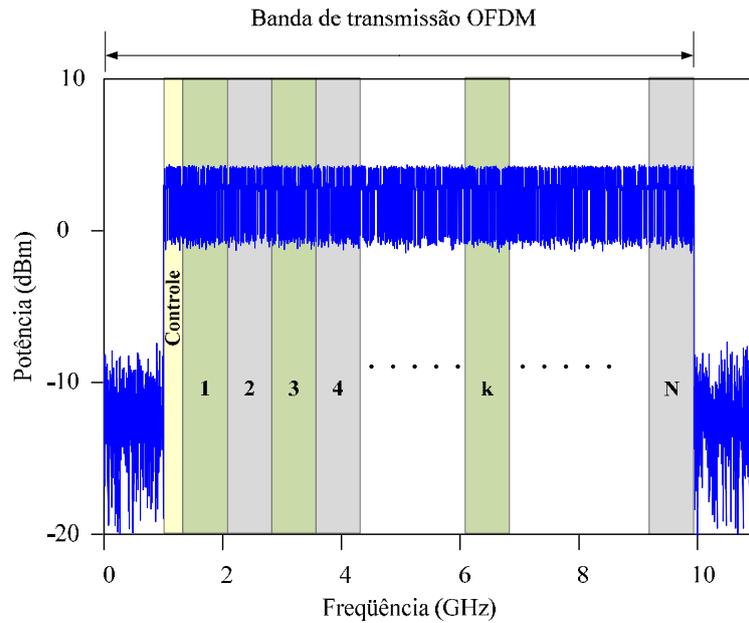


Figura 4.4 - Espectro digital do símbolo OFDM, demonstrando a divisão do símbolo entre as ONUs e o canal de controle.

Para o sentido ONUs-OLT a OLT também informa as ONUs quais são as subportadoras que cada uma irá utilizar para enviar seus tráfegos. Então todas as ONUs montam um símbolo OFDM com somente suas subportadoras e envia para o acoplador onde os símbolos são somados opticamente. A Fig. 4.5 apresenta os espectros dos símbolos antes e depois da soma no acoplador, note que após o acoplador surge um único símbolo OFDM que agora possui todas as subportadoras enviadas. O símbolo OFDM então é recebido no fotodetector na OLT e após ser digitalizado e demodulado a OLT separa os tráfegos de todas as ONU.

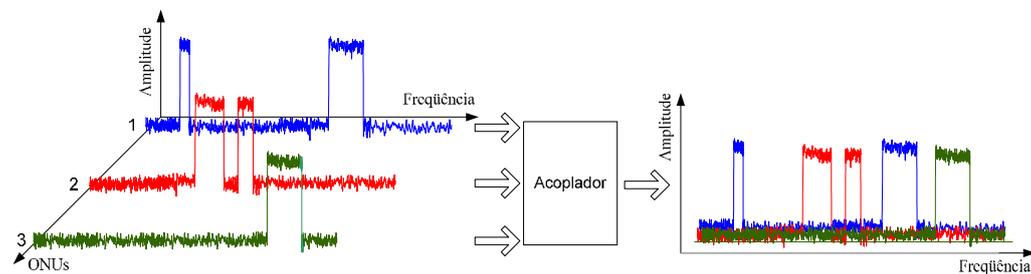


Figura 4.5 – Soma dos símbolos OFDM das ONUs 1, 2 e 3 no acoplador.

4.2.1 - ALOCAÇÃO DINÂMICA DE BANDA

A alocação dinâmica de largura de banda é a habilidade de repartir rapidamente a largura de banda da PON baseada nos requerimentos correntes do trafego (Devadhar, et al., 2000). E é uma das grandes vantagens das TDMA-PON, pois ela aumenta a eficiência de transmissão da rede ao alocar banda de transmissão de um ONU para outra em função de parâmetros como prioridade de tráfego e tamanho de fila. Nas TDMA-PONs isso é feito através da distribuição diferenciada dos intervalos de tempo de transmissão.

A BS OFDMA-PON também terá essa característica, porém ela é realizada através de uma distribuição diferenciadas das quantidades de subportadoras para as ONUs. Assim ONUs com uma maior prioridade ou maior quantidade de tráfego serão atendidas com um número superior de subportadoras.

Ao contrario da FDMA-SCM PON onde a alocação dinâmica de banda não é pratica. Pois a FDMA-SCM PON utiliza filtros para separar os canais de frequência das ONUs e estes canais devem estar sempre colados uns nos outros para não haver um grande desperdício da banda de transmissão. Então ao se aumentar ou diminuir a largura de banda de somente um canal implica em alterar a posição ou a largura de todos os filtros dos canais.

Mas na BS OFDMA-PON a operação de aumentar ou diminuir a banda de transmissão de uma ONU é simples. Porque é realizado ao se aumentar ou diminuir os conversores série/paralelos e paralelos/série da OLT e das ONUs, de uma maneira que inclua ou exclua subportadoras que já foram digitalizadas e demoduladas. E Isto é feito através de programação no dispositivo que trata digitalmente o sinal OFDM, não provocando nenhuma mudança na parte física dos transceptores.

Os fatores importantes na alocação dinâmica de banda para a BS OFDM-PON são;

- Tamanho da FFT/IFFT, pois determina a granularidade das alterações da largura de banda, quanto maior a FFT menor será menor porção de banda que pode ser passada de uma ONU para outra;
- Quantidade de subportadoras úteis, que são as subportadoras que podem carregar os tráfegos das ONUs, excluindo-se as que são utilizadas para envio de pilotos, banda de guarda no início e fim do símbolo OFDM;
- Intervalo de tempo em que as distribuições são realizadas, quanto menor o intervalo maior será a agilidade da rede em atuar nos aumento por demanda das ONUs;
- Distância entre a OLT e a ONU, pois quanto maior a distância menor a banda de transmissão que a ONU pode utilizar para enviar seus tráfegos.

Para demonstrar como a distância limita a banda de transmissão das ONUs mais afastadas da OLT, foi proposta na Fig. 4.6 (a) um diagrama em blocos de uma rede com três ONUs numeradas 1, 2 e 3 propositalmente posicionadas nas distâncias de 20, 30 e 50 km. As figuras 4.6 (b), (c) e (d) apresentam respectivamente as respostas em frequência das fibras ópticas que chegam às ONUs 1, 2 e 3 e em cada figura foram posicionadas setas para indicar as posições de um conjunto de 9 subportadoras ortogonais.

Deve ser notado que considerando um limite máximo de atenuação de 3 dB, enquanto a ONU 1 pode utilizar todo o conjunto das subportadoras as ONUs 2 e 3 terão seus conjuntos limitados de forma que para a ONU 2 as subportadoras 8 e 9 serão retiradas e para a ONU 3 sai as subportadoras 6, 7, 8 e 9. Então a OLT para fazer a distribuição das subportadoras deve conhecer os limites de todas as ONUs, para que não se tenha qualquer ONU transmitindo fora da banda de transmissão de 3 dB da fibra.

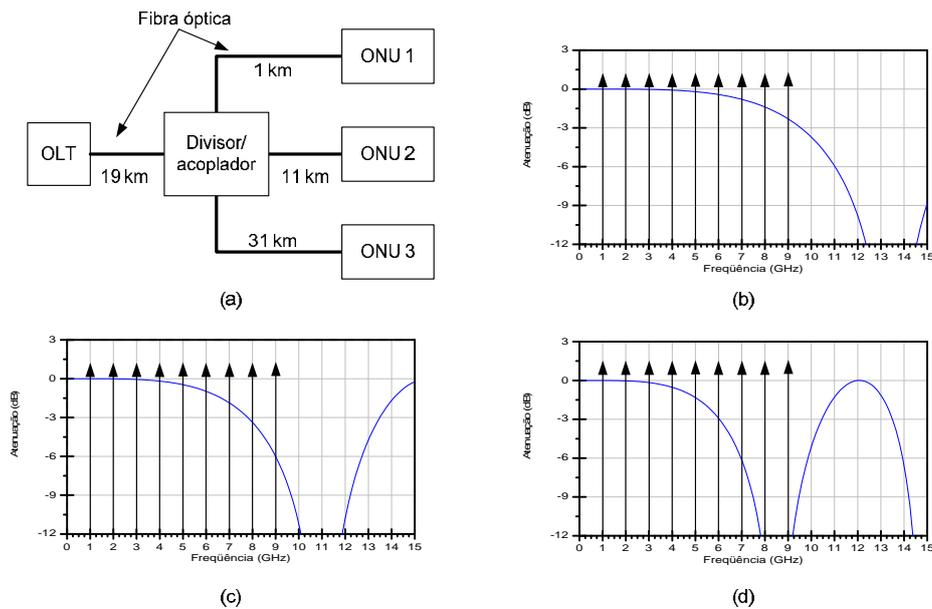


Figura 4.6 – (a) Exemplo de FDMA-PON com ONUs com distâncias de 20 [19+1] km, 30 [19+11] km e 50 [19+31] km, (b) subportadoras sobre a resposta em frequência da fibra da ONU 1, (c) subportadoras sobre a resposta em frequência da fibra da ONU 2 e (d) subportadoras sobre a resposta em frequência da fibra da ONU 3.

4.3 - ANÁLISE DE DESEMPENHO DA BS OFDMA-PON

A análise de desempenho será realizada através de simulações utilizando a linguagem Matlab e o programa de redes ópticas comercial OptSystem. Em todas as simulações, no mínimo 1000 seqüência (frames) de 10 símbolos OFDM serão transmitidos, recuperados e comparados para que as curvas de EVM tenham um valor confiável.

Para as simulações os símbolos OFDM terão a largura de banda de $B_w=10$ GHz, a qual é igual à largura de banda efetiva para um feixe óptico no comprimento de onda 1550 nm em uma fibra óptica monomodo padrão com 20 km de comprimento. E o número de ONUs da rede será de 32 ONUs que é o valor comum das redes TDMA-PONs comerciais.

Para explorar a granularidade do sistema OFDM o tamanho da FFT escolhida será de $N_{FFT}=8192$. Para calcular o número de subportadoras úteis N_u deve se diminuir de N_{FFT} as subportadoras posicionadas na frequência de Nyquist e da corrente contínua, e devido à operação Hemitiana o número resultante deve ser dividido por 2, ficando

$$N_u = \frac{N_{FFT} - 2}{2} \quad (4.1)$$

Para as simulações $N_u=(8192-2)/2=4095$ esse valor é utilizado para determinar a separação das subportadoras calculado por

$$\Delta_f = \frac{Bw}{N_u} \quad (4.2)$$

Calculando para as simulações $\Delta_f = 10 \text{ GHz}/4095 \approx 2,442 \text{ MHz}$ e o tempo de período do símbolo utilizável (sem CP) $T_u=1/\Delta_f \approx 409,5 \text{ ns}$. Foi escolhida a taxa do CP $G=T_{cp}/T_s=1/64$, onde T_{cp} é o tempo do CP e T_s é o tempo do período do símbolo com CP, e $T_s=T_u/1-G \approx 415,8 \text{ ns}$ e $T_{cp}=G.T_s \approx 6397 \text{ ps}$ que é muito maior que o máximo atraso por espalhamento de um canal óptico $\tau_{max} = 270 \text{ ps}$. E desde que (2.2) seja satisfeita a dispersão da fibra óptica é compensada.

O calculo da taxa de bits total da rede pode ser feito com

$$R_b = \frac{Bw}{N_u} \cdot \frac{N_s \cdot \log_2(M)}{1 + G} \quad (4.3)$$

Onde M é o nível da modulação QAM ($M=16$ para 16QAM) e N_s é o número de subportadoras utilizadas para dados, o valor máximo de N_s é N_u , porém para minimizar a distorção de intermodulação da portadora óptica com o sinal OFDM as subportadoras próximas da portadora óptica serão zeradas para formarem uma banda de guarda (Ali, et al., 2008) (Sauer, et al., 1999).

Também serão zeradas algumas subportadoras no final do símbolo para formar também uma banda de guarda no final do símbolo, de forma que nas simulações serão utilizadas $N_s=3686$ subportadoras para dados. Então de (4.3) a taxa total de bit $R_b \approx 35,5$ Gbps e se houver uma distribuição com mesmo número de subportadoras entre as ONUs a taxa de dados por ONU será $R_{bONU} \approx 1.10$ Gbps.

Serão utilizados os comprimentos de onda $\lambda_d = 1550$ nm para o sentido de transmissão OLT-ONUs e $\lambda_u = 1552$ nm para o sentido de transmissão ONUs-OLT. E outros parâmetros importantes para as simulações são coeficiente de dispersão, $D = 17$ ps/nm/km e coeficiente de atenuação da fibra, $a = 0,2$ dB/km em 1550 nm.

A primeira simulação será utilizada para apresentar os sinais envolvidos na transmissão OFDM em uma rede PON e a segunda apresenta o sistema de uma forma mais real.

4.3.1 - SIMULAÇÃO COM DISTÂNCIAS FIXA ENTRE OLT E ONUs E DISTRIBUIÇÃO FIXA DE SUBPORTADORAS

Nesta simulação as distâncias das ONUs com a OLT serão iguais entre si, variando nos valores de 10 e 20 km. Todas as ONUs receberam a mesma quantidade de subportadoras e em seqüência. Por exemplo, a ONU 1 recebe 115 subportadoras numeradas de 213 ate 328. O canal de controle será transmitido na subportadora 212 pela OLT no sentido de transmissão OLT-ONUs e pela ONU 32 no sentido de transmissão ONUs-OLT. Subtraindo o canal de controle das subportadoras que transmitem dados sobram 3685 subportadoras a serem divididas entre as 32 ONUs, assim todas recebem 115 subportadoras e as 5 restantes são zeradas.

O esquema da simulação para o sentido de transmissão OLT-ONUs está na Fig. 4.7. Os dados gerados pelos blocos ‘Gerador Bits’ são aleatórios e após serem paralelizados e

mapeados em 16QAM passam pela operação Hermitiana e são modulados pelo bloco IFFT.

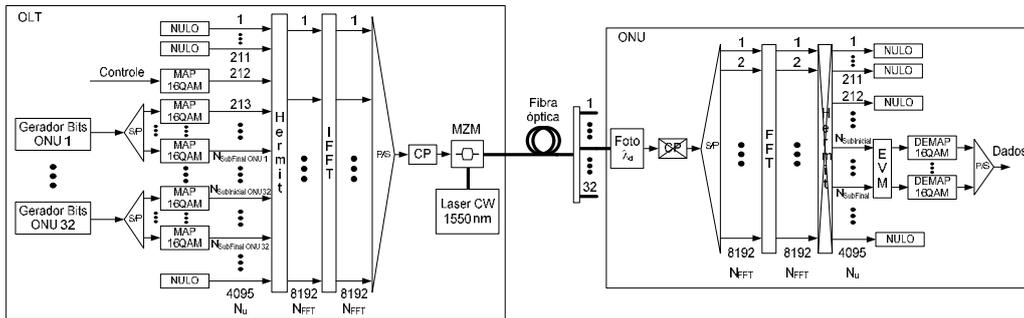


Figura 4.7 – Simulação – Sentido de Transmissão OLT-ONUs

O espectro elétrico do sinal logo após o bloco CP e antes do modulador MZM pode ser visto na Fig. 4.8, note a presença das duas bandas de guarda uma no começo e outra no final do símbolo. Estas duas bandas foram criadas zerando as subportadoras iniciais e finais do símbolo OFDM. E após a modulação do sinal pelo MZM surge o espectro óptico da Fig. 4.9 e devido à grande potência da portadora óptica em 1550,00 nm, não é possível notar a presença da banda de guarda inicial.

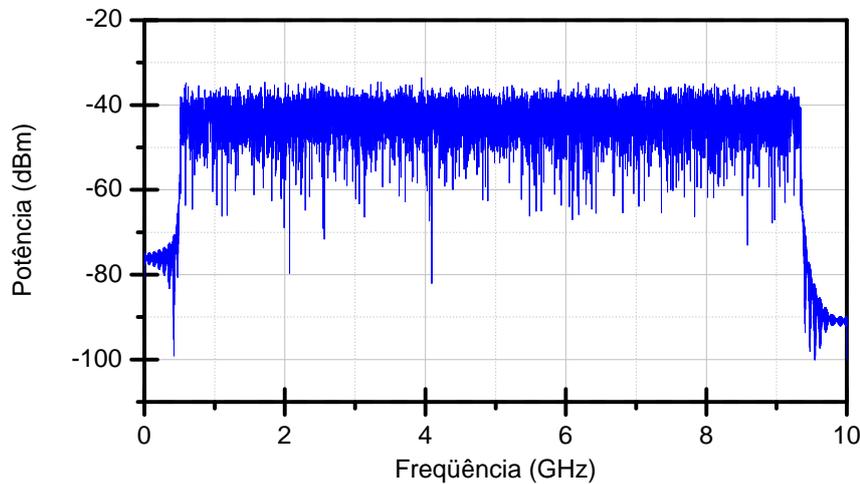


Figura 4.8 - Espectro elétrico do sinal OFDM na OLT (sentido de transmissão OLT-ONUs).

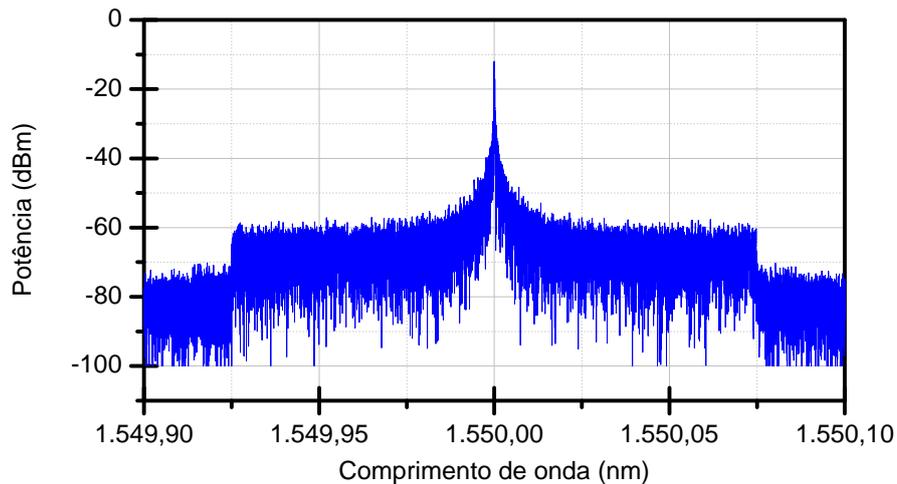


Figura 4.9 - Espectro óptico do sinal na saída do MZM.

O sinal óptico após ser transportado pela PON chega ao bloco de recepção da ONU, onde ele é recebido pelo fotoreceptor e entregue ao bloco CP onde o tempo de guarda é retirado. O sinal é novamente paralelizado por um conversor série/paralelo e demodulado digitalmente pelo bloco FFT. Para simular todas as ONUs os valores de $N_{subInicial}$ e $N_{subFinal}$ são variados de modo que as subportadoras entregues ao bloco EVM sejam todas de uma única ONU. O bloco EVM compara os sinais enviados com os recebidos e calcula o valor de EVM.

O esquema da simulação no sentido de transmissão ONUs-OLT é mostrado na Fig. 4.10. A geração do símbolo OFDM nas ONUs é semelhante a da OLT, ocorre todos os processos já descritos porém os símbolos que chegam aos moduladores ópticos das ONUs são parciais, isto é, formados por apenas algumas subportadoras. Na simulação esses símbolos OFDM parciais são modulados opticamente e transmitidos até o acoplador de potência para serem somados e formar o símbolo OFDM completo. A seleção de qual ONU será simulada é feita novamente através da variação dos valores $N_{subInicial}$ e $N_{subFinal}$.

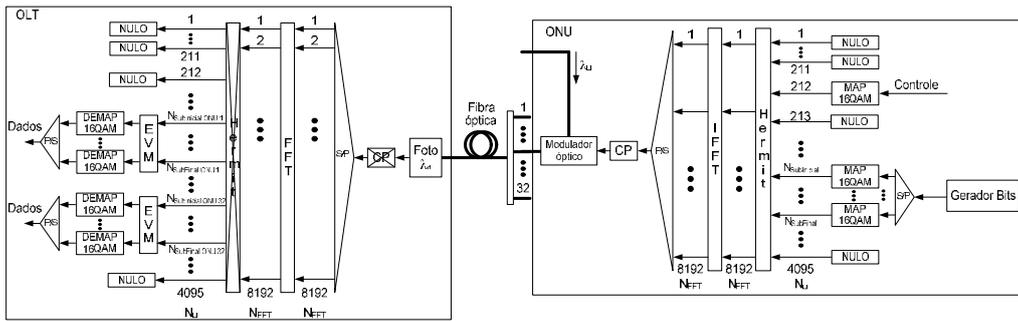


Figura 4.10 - Simulação – Sentido de transmissão ONUs-OLT.

A Fig. 4.11 demonstra o espectro elétrico do sinal da ONU 32 após o bloco CP, note a presença do canal de controle no começo do espectro elétrico. O mesmo sinal após o modulador óptico pode ser visto na Fig. 4.12, porém a fim de demonstrar à presença do canal de controle no espectro óptico a portadora óptica foi filtrada através de um filtro óptico retangular ideal.

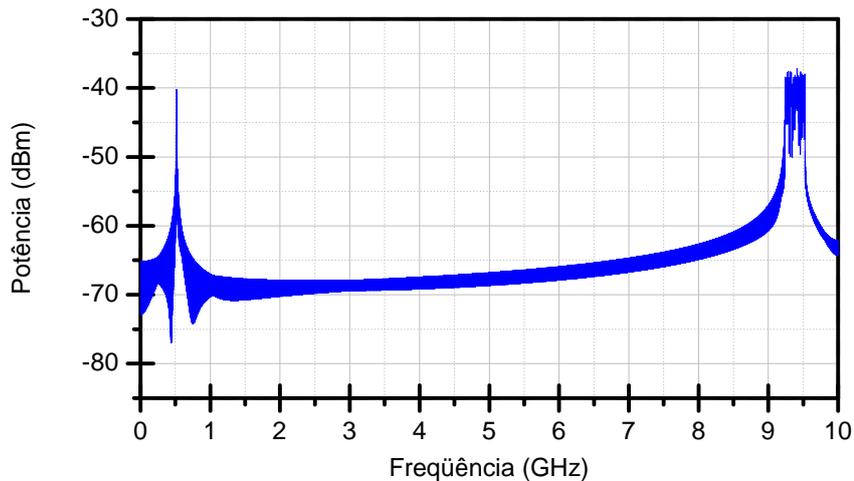


Figura 4.11 - Espectro elétrico da ONU 32 com canal de controle.

A Fig. 4.13 foi criada com os valores médios de EVM por ONU de simulações nos dois sentidos de transmissão para estabelecer a influencia do comprimento da fibra óptica na BS OFDM-PON. Foram utilizados quatro valores de $SNR = 20, 24, 28$ e 32 dB e os comprimentos das fibras de 10 e 20 km são representados por círculos e triângulos

vazios respectivamente. Observe que o aumento de SNR diminui proporcionalmente o EVM e que a maioria das ONUs não sofrem uma variação significativa exceto as posicionadas nas maiores frequências. Onde, por exemplo, a ONU 32 cai para um EVM de -27 quando o $SNR = 28$ dB para a fibra de 20 km.

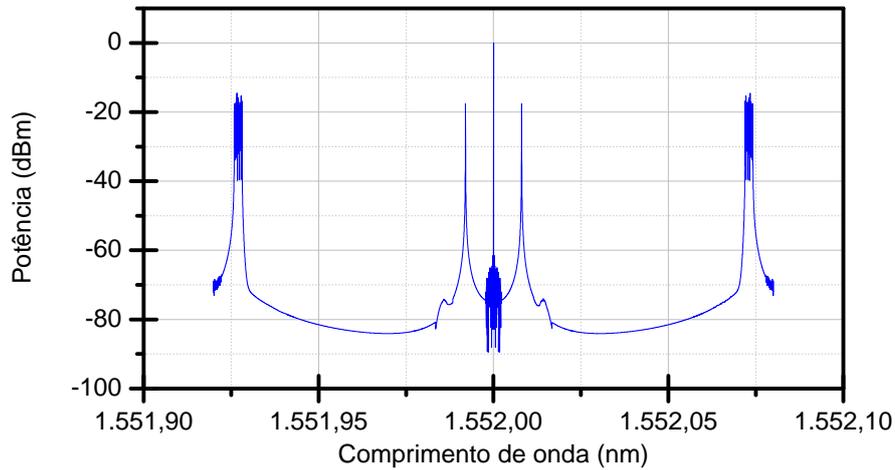


Figura 4.12 - Espectro óptico da ONU 32 com canal de controle.

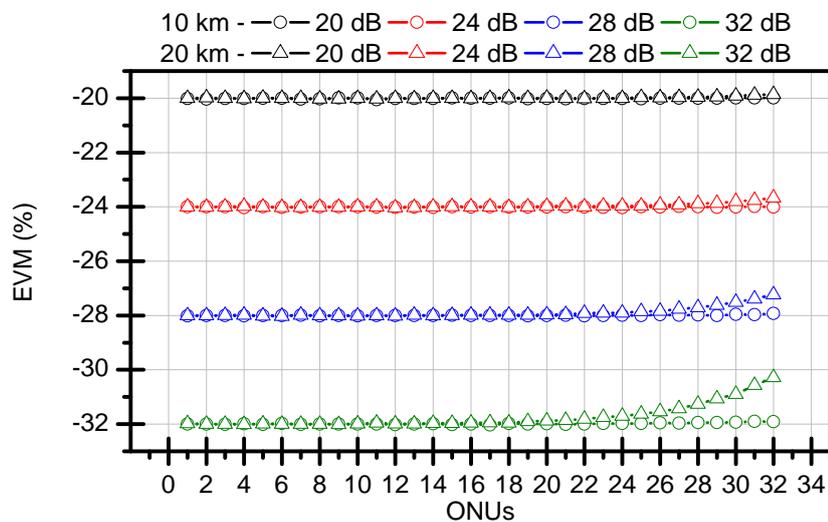


Figura 4.13 - Valor médio de EVMxONUs para simulações com distâncias e larguras de banda iguais entre as ONUs.

4.3.2 - SIMULAÇÃO COM VARIAÇÃO NAS DISTÂNCIAS ENTRE OLT E ONUs E VARIAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO DE SUBPORTADORAS

Nesta simulação para que se tenha uma situação mais real as distâncias entre as ONUs e a OLT serão independentes e aleatórias com valores variando na faixa de 20 a 30 km. E o número de subportadoras dado as ONUs para transmitirem seus tráfegos também será independente e aleatório com valores variando de no mínimo de 20 e no máximo de 200 subportadoras.

A simulação terá uma fibra óptica entre a OLT e o divisor/acoplador passivo fixa na distância de 19 km, e as fibras ópticas entre o divisor/acoplador e as ONUs variando na faixa de 1 a 11 km. Sendo que a atenuação da fibra óptica escolhida é de 0,2 dB/km poderá existir uma diferença na potência de até 2 dB entre os sinais de duas ou mais ONUs.

A Fig. 4.14 apresenta um espectro elétrico recebido na OLT, nele os canais das ONUs são mostrados, note a diferença de potência entre os canais das ONUs, a diferença entre as larguras de banda destinadas para as ONUs e a maior atenuação dos canais com maior frequência. Outro detalhe é que agora a largura de banda do sinal está em função dos tráfegos das ONUs e assim o sinal não é obrigado a ocupar todas as 3686 subportadoras do símbolo OFDM.

A Fig. 4.15 apresenta dois gráficos de EVM x ONU onde foram simuladas 100 configurações de rede com uma $SNR = 20$ dB. No item (a) não houve nenhum controle na distribuição da largura de banda e distância das ONUs. Assim a distribuição das subportadoras para as ONUs ocorre seqüencialmente. Por exemplo, a ONU 1 recebe 140 subportadoras, numeradas de 213 a 353, a ONU 2 recebe 50 subportadoras, numeradas de 354 a 504 e assim sucessivamente até a ONU 32.

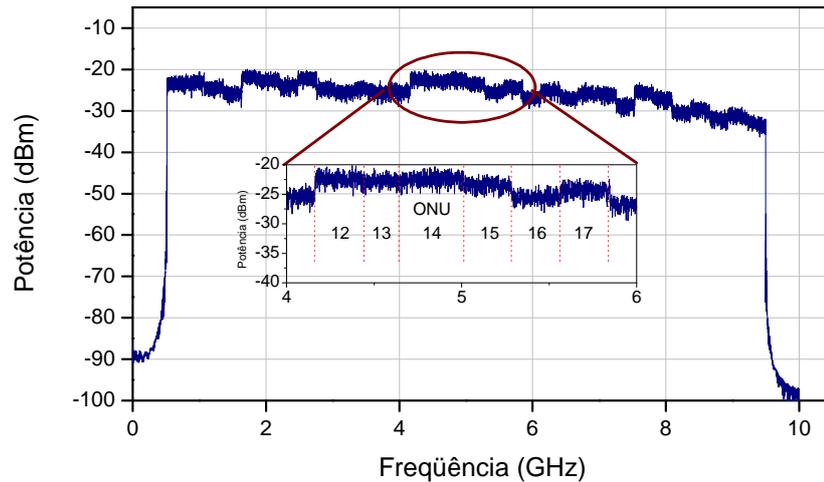


Figura 4.14 – Espectro elétrico recebido na OLT com larguras de banda e distâncias das ONUs diferentes entre si.

Note que as ONUs posicionadas nas maiores freqüências podem apresentar uma degradação de 2.5 dB (pior caso no gráfico) no EVM. Isto ocorre ao alocar as ONUs mais afastadas da OLT nos canais de freqüências maiores. A largura de banda da fibra varia em função da distância, por exemplo, se tem o total de 20 km a largura de banda de 3 dB é 9.5 GHz mais cai para 7.8 GHz se a distância aumenta para 30 km.

Essa degradação é evitada se houver um controle na distribuição das subportadoras em função das distâncias das ONUs. Ao se posicionar as ONUs com as distâncias maiores nas subportadoras inferiores evita-se que as larguras de banda destinadas as aquelas ONUs caiam fora da largura de banda de 3 dB da fibra. A Fig. 4.15 (b) mostra o gráfico EVM x ONU para as mesmas configurações do item anterior, mas agora com um controle no processo de alocação das subportadoras. Note que não há a degradação e que a BS OFDM-PON pode fornecer acesso para ONUs com 30 km de distância.

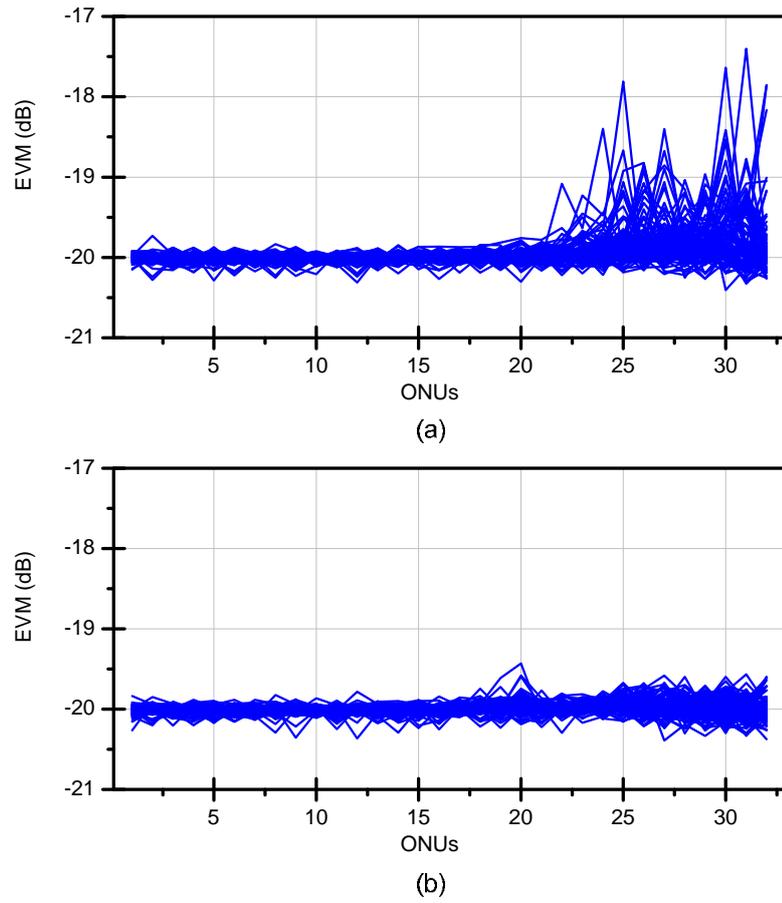


Figura 4.15 – EVM x ONU para as simulações (a) sem controle de distância e largura de banda, (b) com controle de distancia e largura de banda.

Capítulo 5 - CONCLUSÕES

As FDMA-PON podem prover uma grande taxa de transmissão para as redes de acesso de um modo economicamente viável. Mas há um menor interesse nestas redes por causa do problema de OBI e sobreposição, criadas pelas diferenças nos comprimentos de onda das fontes ópticas das ONUs.

O presente trabalho apresentou as seguintes contribuições:

- Uma solução para o problema de fonte ópticas da FDMA-PON. E assim habilitando o emprego da FDMA-PON em redes de acesso de última milha. A solução utiliza o esquema de fonte óptica central posicionada na OLT para alimentar os moduladores ópticos das ONUs. De forma que todas as ONUs sofram ao mesmo tempo qualquer alteração no feixe laser e assim garantindo que não surja a OBI e a sobreposição dos canais de frequência adjacentes.
 - Proposta da arquitetura FDMA-SCM PON, que utiliza tecnologia maduras amplamente utilizadas de RF, o que a torna uma rede com um custo muito baixo. Porém apresentando como a limitação o pequeno número de ONUs por comprimento de onda e por não conseguir utilizar alocação dinâmica de banda de transmissão.
 - Proposta da arquitetura BS OFDMA-PON baseada em OFDM e na utilização de dispositivos digitais. Apresentando um melhor rendimento espectral e alcance no comprimento dos enlaces das ONUs que a FDMA-SCM PON.
-

Através de simulações foram apresentados resultados das redes operando em distâncias na faixa de 20 e 30 km com banda de transmissão variável.

A BS OFDMA-PON quando é comparada com a 10G-EPON, as duas arquiteturas utilizam a mesma largura de banda de transmissão, mas a BS OFDMA-PON tem uma taxa de transmissão global superior e consegue alcançar ONUs a uma distância superior. E assim a arquitetura BS OFDMA-PON deve ser considerada com uma tecnologia a ser empregada nas futuras redes de acesso.

5.1 - TRABALHOS FUTUROS

A partir do trabalho aqui exposto pretendemos desenvolver :

- Implementação em hardware das duas arquiteturas de redes propostas;
 - Projeto e desenvolvimento de protótipos para as ONUs e OLT para as duas arquiteturas propostas;
 - Análise da influência dos parâmetros dos lasers no desempenho das redes (nível de potência, largura de linha, RIM,...);
 - Análise da influência dos efeitos não lineares no desempenho da FDMA-PON;
 - Estudo da influência do índice de modulação dos moduladores ópticos das ONUs no desempenho da FDMA-PON;
 - Estudo e desenvolvimento de um protocolo para a sincronização do símbolo OFDM transmitido pelas ONUs;
 - Estudo de protocolos de distribuição de subportadoras em função do tráfego e das distâncias das ONUs;
 - Estudo de emprego de técnicas de WDM para expansão das redes;
 - Estudo do emprego de amplificadores ópticos para aumentar o alcance das redes;
-

- Estudo das camadas superiores de rede das arquiteturas.

.

Apêndice A - EVM – ERROR VECTOR MAGNITUDE

O EVM é considerado uma boa figura de mérito para sistemas de comunicações digitais (Agilent Technologies) (McKinley, et al., 2004). Isto porque permite a avaliação do sinal transmitido, tanto na questão de amplitude, como em fase. Se utilizado em conjunto de um diagrama de constelação, permite determinar efeitos com desbalanceamento de IQ, erro de quadratura, interferência de canal adjacente, distorção de filtros e problemas relacionados com SNR.

O valor do EVM é a magnitude do vetor erro que pode ser obtido como mostrado na Fig. A.1 Note que o vetor erro é a diferença entre o vetor recebido (medido) e o vetor de referência (ideal) e o erro de fase é o ângulo entre estes dois vetores.

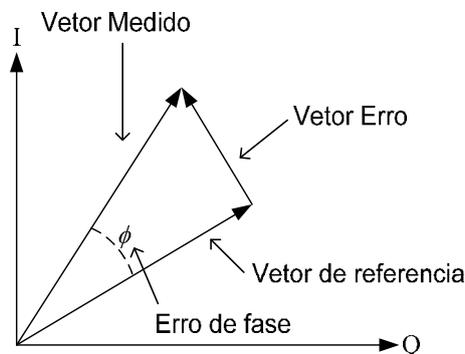


Figura A.1 - Definição de EVM.

Matematicamente utiliza-se a equação:

$$EVM_{RMS}(\%) = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{r=1}^n |S_{ref,r} - S_{med,r}|^2}{\frac{1}{N} \sum_{r=1}^n |S_{ref,r}|^2}} \times 100 \quad (A.1)$$

Na qual N é o número possível de símbolos da constelação, $S_{ref,r}$ é o vetor r-ésimo de referência (ideal) e $S_{med,r}$ é o vetor r-ésimo medido (recebido). O EVM também pode ser representado em dB sendo calculado por

$$EVM(dB) = 20 \times \log_{10} \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{r=1}^n |S_{ref,r} - S_{med,r}|^2}{\frac{1}{N} \sum_{r=1}^n |S_{ref,r}|^2}} \quad (A.2)$$

BIBLIOGRAFIA

Agilent Technologies Modulation Accuracy-EVM [Online]. - 02 de setembro de 2008. - <http://www.home.agilent.com/agilent/editorial.jsp?cc=US&lc=eng&ckey=332561&nid=11143.0.00&id=332561>.

Agrawal Govind P. Fiber-Optic Communication Systems [Livro]. - [s.l.] : Wiley-Interscience, 2002. - 3.

Ali A., Leibrich J. e Rosenkranz W. Spectrally efficient OFDM-transmission over single-mode fiber using direct detection [Conferência]// Proceedings of the 13th International OFDM-Workshop (InOWo08). - Hamburg, Germany : [s.n.], 2008. - pp. 1-5.

Armstrong, J OFDM for Optical Communications [Artigo]// Journal of lightwave technology. - 1 de Fevereiro de 2009. - 3 : Vol. 27. - pp. 189-204.

Azadet Kamran e Saibi Fadi A Mixed-Signal Implementation of a Multi-Carrier QAM Transceiver for Optical Communications [Conferência]// 2005 IEEE VLSI-TSA International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-TSA-DAT). - 2005. - pp. 145-148.

Bahai Ahmad R.S., Saltzberg Burton R. e Ergen Mustafa Multi-carrier Digital Communications: Theory And Applications Of OFDM [Livro]. - [s.l.] : Springer, 2004. - ISBN: (HB) 0-387-22575-7.

Banerjee Amitabha, Kramer Glen e Mukherjee Biswanath Fair Sharing Using Service-Level Agreements (SLAs) for Open Access in EPON [Conferência]// Proceedings of Optical Fiber Communications 2004 Conference. - Los Angeles : [s.n.], 2005. - Vol. 3. - pp. 1858- 1862.

Banerjee Amitabha, Mukherjee Biswanath e Kramer Glen Achieving Open Access in Ethernet PON (EPON) [Conferência]// Optical Fiber Communication Conference, 2005. Technical Digest. OFC/NFOEC. - 2005. - Vol. 3. - p. 3.

Chen Wenfeng, Montuno Delfin Y. e Felske Kent Enhanced EPON Auto-discovery For Fast Network and Service Recovery [Conferência] // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. - Niagara Falls : IEEE, 2004. - Vol. 3. - pp. 1683 - 1687. - ISBN: 0-7803-8253-6.

Chow C. [et al.] WDM extended reach passive optical networks using OFDM-QAM [Periódico] // Optics Express. - 2008. - 16 : Vol. 16. - pp. 12096-12101.

CIP WDM-PON Technologies [Online] // Site da CIP Technologies. - 02 de setembro de 2008. - <http://www.ciphotonics.com/>.

Connelly Michael J. Wideband Semiconductor Optical Amplifier Steady-State Numerical Model [Artigo] // IEEE Journal of Quantum Electronics. - março de 2001. - pp. 439-447.

Devadhar S. e Ryan K. Dynamic bandwidth allocation over passive optical [Online] // Lightwave. - PennWell, 2000. - 2009. - <http://lw.pennnet.com>.

Full Services Access Networks [Online]. - 12 de junho de 2007. - <http://www.fsanweb.org/>.

Genay N. [et al.] Colourless ONU Modules in TDM-PON and WDM-PON Architectures for Optical Carrier Remote Modulation [Conferência] // Optical Communication, 2005. ECOC 2005. 31st European Conference on. - 2005. - Vol. 2. - pp. 147- 148.

Hadjiantonis A. [et al.] A novel decentralized ethernet-based passive optical network architecture [Conferência] // IEEE International Conference on Communications. - 2004. - Vol. 3. - pp. 1781-1785.

Hajduczenia M., da Silva H.J.A. e Monteiro P.P. 10G EPON Development Process [Conferência] // 9th International Conference on Transparent Optical Networks, ICTON '07. - [s.l.] : IEEE, 2007. - pp. 276-282. - ISBN: 1-4244-1249-8.

Hui R. [et al.] 10-Gb/s SCM Fiber System Using Optical SSB Modulation [Artigo] // IEEE Photonics Technology Letters. - Agosto de 2001. - Vol. 13. - pp. 896 - 898. - 8.

Hullin Cyril [et al.] DWDM/SCM bi-directional interleaved transmission of 64-QAM using electro absorption modulated laser transmitters [Conferência] // Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2001. OFC 2001. - 2001. - Vol. 3. - pp. WDD35-1-WDD35-3.

IEEE 802.3 Ethernet in the First Mile Study Group [Online]. - maio de 2001. - 02 de setembro de 2008. - <http://www.ieee802.org/3/efm/public/may01/index.html>.

IEEE P802.3av Task Force 10Gb/s Ethernet Passive Optical Network [Online] // IEEE P802.3av Task Force. - IEEE, 2009 de Abril de 06. - 2009 de 02 de 10. - <http://www.ieee802.org/3/av/>.

Jansen S.L. [et al.] 20-Gb/s OFDM transmission over 4160-km SSMF enabled by RF-pilot tone phase noise compensation [Conferência] // Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference. - [s.l.] : OSA Technical Digest Series, 2007. - p. PDP15.

Jung Hyun-Do, Won Yong-Yuk e Han Sang-Kook Optical Beat Noise Reduction in WDM-SCM Access Networks Using Modulated Optical Pulse Train [Artigo] // IEEE Photonics Technology Letters. - outubro de 2005. - 10 : Vol. 17. - pp. 2215- 2217.

Kang Jeung-Mo [et al.] A Novel Hybrid WDM/SCM-PON using Reflective Semiconductor Optical Amplifier [Conferência] // Microwave Photonics, 2005. MWP 2005. International Topical Meeting on. - [s.l.] : IEEE, 2005. - pp. 181-184.

Kang Jeung-Mo e Han Sang-Kook A Novel Hybrid WDM/SCM-PON Sharing Wavelength for Up- and Down-Link Using Reflective Semiconductor Optical Amplifier [Artigo] // IEEE Photonics Technology Letters. - fevereiro de 2006. - 3 : Vol. 18. - pp. 502 - 504.

Kani Jun-ichi e Iwatsuki Katsumi A Wavelength-Tunable Optical Transmitter Using Semiconductor Optical Amplifiers and an Optical Tunable Filter for Metro/Access DWDM Applications [Artigo] // IEEE Journal of Lightwave Technology. - março de 2005. - 3 : Vol. 23. - pp. 1164-1169.

Kani Jun-ichi, Iwatsuki Katsumi e Imai Takamasa Optical Multiplexing Technologies for Access-Area Applications [Artigo] // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. - julho/agosto de 2006. - 4 : Vol. 12. - pp. 661-668.

Kelsey Mark e Pesavento Senior Gerry Alloptic [Online] // white paper. - 16 de junho de 2007. - <http://www.alloptic.com/>.

Kim Tae-Young e Han Sang-Kook Reflective SOA-Based Bidirectional WDM-PON Sharing Optical Source for Up/Downlink Data and Broadcasting Transmission [Artigo] // IEEE Photonics Technology Letters. - novembro de 2006. - 22 : Vol. 18. - pp. 2350 - 2352.

Kramer G. Ethernet Passive Optical Networks [Livro]. - New York : McGraw-Hill, 2005.

Kramer Glen [et al.] Supporting differentiated classes of service in Ethernet passive optical networks [Artigo] // Journal of Optical Networking. - agosto/setembro de 2002. - Vol. 1. - pp. 280-298.

Kramer Glen e Pesavento Gerry Ethernet Passive Optical Network (EPON): Building a Next-Generation Optical Access Network [Periódico] // IEEE Communications Magazine. - fevereiro de 2002. - 2 : Vol. 40. - pp. 66-73.

Kramer Glen, Mukherjee Biswanath e Pesavento Gerry Ethernet PON (ePON): Design and Analysis of an Optical Access Network [Artigo] // Photonic Network Communications. - [s.l.] : Springer Netherlands, Julho de 2001. - 3 : Vol. 3.

Kramer Glen, Mukherjee Biswanath e Pesavento Gerry Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time (IPACT): A Dynamic Bandwidth Distribution Scheme in an Optical Access Network [Artigo] // Photonic Network Communications. - janeiro de 2002. - Vol. 4. - pp. 89-107.

Kramer Glen, Mukherjee Biswanath e Pesavento Gerry IPACT: A Dynamic Protocol for an Ethernet PON (EPON,) [Periódico] // IEEE Communications Magazine. - Fevereiro de 2002. - pp. 74-80.

Kwon Hyuk-Choon, Won Yong-Yuk e Han Sang-Kook A Self-Seeded Reflective SOA-Based Optical Network Unit for Optical Beat Interference Robust WDM/SCM-PON Link [Artigo] // IEEE Photonics Technology Letters. - Setembro de 2006. - 17 : Vol. 18. - pp. 1852-1854.

Kwon, Hyuk-Choon; Won, Yong-Yuk; Han, Sang-Kook Bidirectional SCM Transmission Using a Noise-Suppressed Fabry-Pérot Laser Diode and a Reflective Semiconductor Optical Amplifier in a WDM/SCM-PON Link [Artigo] // IEEE Photonics Technology Letters, vol. 19, no. 11, junho 2007. - Junho de 2007. - 11 : Vol. 19. - pp. 858 - 860.

Lee C.-H, Sorin W. V. e Kim B. Y Fiber to the Home Using a PON Infrastructure [Artigo] // Journal of Lightwave Technology. - Houston, TX, USA : [s.n.], Dezembro de 2006. - 12 : Vol. 24. - pp. 4568-4583. - ISSN: 0733-8724.

Lee Chang-Hee, Sorin Wayne V. e Byoung Yoon Kim Byoung Yoon Fiber to the Home Using a PON Infrastructure [Artigo] // Journal of Lightwave Technology. - dezembro de 2006. - 12 : Vol. 24. - pp. 4568-4583.

Leick L. [et al.] Athermal AWGs for colourless WDM-PON with -40°C to $+70^{\circ}\text{C}$ and underwater operation [Conferência] // Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference. - Anaheim, California : Optical Society of America, 2006. - p. PDP31.

Lowery A. J. Fiber nonlinearity pre- and post-compensation for long-haul optical links using OFDM [Periódico] // Optics Express. - 2007. - Vol. 15. - pp. 12965-12970.

Lowery A.J. e Armstrong J. Orthogonal-Frequency-Division Multiplexing for Optical Dispersion Compensation [Conferência] // Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, OFC/NFOEC. - 2007. - pp. 1-3. - ISBN: 1-55752-831-4.

MathWorks [Online]. - 2008. - <http://www.mathworks.com/>.

McGarry Michael P., Maier Martin e Reisslein Martin An evolutionary WDM Upgrade for EPONs [Relatório] / Dept of Electrical Engineering ; Arizona State University. - 2004.

McKinley Michael D. [et al.] EVM Calculation for Broadband Modulated Signals [Conferência] // 64th ARFTG Conf. Dig.. - Orlando, FL : [s.n.], 2004. - pp. 45-52.

Metro Ethernet Forum (MEF) Ethernet Passive Optical Network (EPON) Tutorial [Online] // <http://metroethernetforum.org>. - 2005. - 1 de setembro de 2007. - <http://metroethernetforum.org>.

Nadarajah Nishaanthan, Wong Elaine e Nirmalathas Ampalavanapillai Multiple Virtual Private Networks Over Passive Optical Networks Using RF Subcarrier Multiplexing and Fabry-Pérot Laser Diodes [Artigo] // IEEE Photonics Technology Letters. - 1 de outubro de 2006. - 19 : Vol. 18. - pp. 2044-2046.

Nakamura Hiroataka [et al.] Reliable Wide-Area Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network Accommodating Gigabit Ethernet and 10-Gb Ethernet Services [Artigo] // Journal of Lightwave Technology. - maio de 2006. - 5 : Vol. 24. - pp. 2045- 2051.

Penty R. V. [et al.] The Applications of SCM in Optical Datacommunications [Conferência] // International Topical Meeting on Microwave Photonics. - 2002. - pp. 363- 366.

Prasad Ramjee OFDM for wireless communications systems [Livro]. - Boston : Artech House Publishers, 2004. - ISBN 1-58053-796-0.

Proakis John G. e Salehi Massoud Digital Communications [Livro]. - [s.l.] : McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2007. - 5.

Riishoj J., Nielsen T. N. e Gliese U. A 4 Gb/s 2-Level to 2 Gsymbol/s 4-Level Converter GaAs IC for Semiconductor Optical Amplifier QPSK Modulators [Artigo] // IEEE Journal of Solid-State Circuits. - outubro de 1994. - 10 : Vol. 29. - pp. 1277-1281.

Rossi Giammarco [et al.] Optical SCM Data Extraction using a Fiber Loop Mirror for WDM Network Systems [Conferência] // Optical Fiber Communication Conference, 2000. - Baltimore, MD, USA : [s.n.], 2000. - Vol. 4. - pp. 74-76.

Sales Salvador [et al.] Two Stage Integrated SOA Modulators as Efficient Photonic Mixers for Microwave Signals [Conferência] // International Topical Meeting on Microwave Photonics. - 2002. - pp. 209-212.

Sargis Paul D., Henderer Bruce D. e Lowry Mark E. 10-Gb/s Subcarrier Multiplexed Transmission Over 490 km of Ordinary Single-Mode Fiber Without Dispersion Compensation [Artigo] // IEEE Photonics Technology Letters. - Dezembro de 1997. - 12 : Vol. 9. - pp. 1658 - 1660.

Sauer M. [et al.] Impact of laser chirp on carrier and IMD power in electro-optical upconverted millimetre-wave fibre optic links [Artigo] // Electronics Letters. - 1999. - 10 : Vol. 35. - pp. 834-836.

Schmidt B. J. C., Lowery A. J. e Armstrong J. Experimental demonstrations of 20 Gbit/s direct-detection optical OFDM and 12 Gbit/s with a colorless transmitter [Conferência] // Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference. - [s.l.] : OSA Technical Digest Series (CD), 2007. - p. paper PDP18.

Segatto Marcelo E. V. All Optical Bit Parallel WDM Systems // Tese de doutorado. - Londres : Imperial College, Universidade de Londres, fevereiro de 2001.

Seto Ichiro, Tomioka Tazuko e Ohshima Shigeru Error-Free Transmission of Radio QPSK Signals in an Optical Subcarrier Multiple Access System Suppressing Optical Beat Interference with Over-Modulation [Conferência] // International Topical Meeting on Microwave Photonics, MWP 2000. - Oxford, UK : [s.n.], 2000. - pp. 43-46.

Shan Tang, Yang Ji e Sheng Cheng EPON Upstream Multiple Access Scheme [Conferência] // Info-tech and Info-net, 2001. Proceedings. ICII 2001 - Beijing. 2001 International Conferences on. - Beijing : IEEE, 2001. - pp. 273-278.

Shieh W. e Athaudage C. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing [Artigo] // Electronics Letters. - [s.l.] : Institution of Engineering and Technology, 11 de maio de 2006. - 10 : Vol. 42. - pp. 587- 589.

Shraga Eyal GPON and EPON (GE-PON) Economical Comparison [Online] // Flexlight Networks. - 02 de agosto de 2007. - <http://www.flexlight-networks.com>.

Smith G. H., Novak D. e Lim C. A Millimeter-Wave Full-Duplex Fiber-Radio Star-Tree Architecture Incorporating WDM and SCM [Artigo] // IEEE Photonics Technology Letters. - novembro de 1998. - 11 : Vol. 10. - pp. 1650-1652.

Sobre a empresa Optiwave [Online]. - 2006-2008. - <http://www.optiwave.com/>.

Takesue Hiroki e Sugie Toshihiko Data Rewrite of Wavelength Channel Using Saturated SOA Modulator for WDM Metro/Access Networks with Centralized Light Sources [Conferência] // 28th European Conference on Optical Communication, ECOC 2002. - 2002. - Vol. 3. - pp. 1-2.

Takesue Hiroki e Sugie Toshihiko Wavelength Channel Data Rewrite Using Saturated SOA Modulator for WDM Networks With Centralized Light Sources [Artigo] // Journal of Lightwave Technology. - novembro de 2003. - 11 : Vol. 21. - pp. 2546-2556.

Tran An V., Chae Chang-Joon e Tucker Rodney S. Bandwidth-Efficient PON System for Broad-Band Access and Local Customer Internetworking [Artigo] // IEEE Photonics Technology Letters. - março de 2006. - 5 : Vol. 18. - pp. 670 - 672.

Wilson G.C. [et al.] Long-Haul DWDM/SCM Transmission of 64- and 256-QAM Using Electroabsorption Modulated Laser Transmitters [Artigo] // IEEE Photonics Technology Letters. - agosto de 2002. - 8 : Vol. 14. - pp. 1184 - 1186.

Wood T. H. e Shankaranarayanan N. K. Operation of a Passive Optical Network with Subcarrier Multiplexing in the Presence of Optical Beat Interference [Artigo] // Journal of Lightwave Technology. - outubro de 1993. - 10 : Vol. 11. - pp. 1632 - 1640.

Woodward S. L. [et al.] A Study of Optical Beat Interference Between Fabry-Perot Lasers [Artigo] // Photonics Technology Letters, IEEE. - maio de 1998. - 5 : Vol. 10. - pp. 731-733.

Yamamoto Hiroaki [et al.] Increasing Acceptable Number of Signals in Subcarrier Multiple Access Optical Networks in the Presence of High Optical Beat Interference [Artigo] // Journal of Lightwave Technology. - setembro de 1999. - 9 : Vol. 17. - pp. 1525-1531.

Yamamoto Hiroaki [et al.] Increasing Acceptable Number of Signals in Subcarrier Multiple Access Optical Networks in the Presence of High Optical Beat Interference [Artigo] // IEEE Journal of Lightwave Technology. - Setembro de 1999. - 9 : Vol. 17. - pp. 1525 - 1531.

Yao Jian [et al.] Multiwavelength Erbium-Doped Fiber Ring Laser Incorporating an SOA-Based Phase Modulator [Artigo] // IEEE Photonics Technology Letters. - abril de 2005. - 4 : Vol. 17. - pp. 756-758.

Yoneda Etsugo [et al.] All-Fiber Video Distribution (AFVD) Systems Using SCM and EDFA Techniques [Artigo] // Journal of Lightwave Technology. - janeiro de 1993. - 1 : Vol. 11. - pp. 128-137.

Yoo Jeong-Ju [et al.] A WDM-Ethernet hybrid Passive Optical Network Architecture [Conferência] // Advanced Communication Technology, 2006. ICACT 2006.. - Phoenix Park : [s.n.], 2006. - p. 1755.

Yoshida Tomoaki [et al.] A New Single-Fiber 10-Gb/s Optical Loopback Method Using Phase Modulation for WDM Optical Access Networks [Artigo] // Journal of Lightwave Technology. - fevereiro de 2006. - 2 : Vol. 24. - pp. 786-.

Zhu Zuqing, Pan Zhong e Yoo S. J. B. A Compact All-Optical Subcarrier Label Swapping System using an Integrated EML for 10 Gb/s Optical-Label Switching Networks [Artigo] // IEEE Photonics Technology Letters. - fevereiro de 2005. - 2 : Vol. 17. - pp. 426-428.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)