



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ÍISIS DE ANDRADE LIMA

**SIMULAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA REDES DE ACESSO DE
FAIXA LARGA HÍBRIDAS ÓPTICA-SEM FIO**

Campina Grande, Paraíba
Dezembro de 2011

ÍISIS DE ANDRADE LIMA

SIMULAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA REDES DE ACESSO DE FAIXA LARGA HÍBRIDAS ÓPTICA-SEM FIO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Telecomunicações

Orientador:

Professor José Ewerton Pombo de Farias, Dr.

Campina Grande, Paraíba
Dezembro de 2011

ÍISIS DE ANDRADE LIMA

SIMULAÇÃO DE TECNOLOGIAS REDES DE ACESSO FAIXA LARGA HÍBRIDA ÓPTICA-SEM FIO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor José Ewerton Pombo de Farias, Dr.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a minha mãe, que me presenteia com amor insuperável em todos os momentos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meu pai, por ter possibilitado minhas realizações, a minha mãe, por inúmeras razões e a minha irmã Thaís pelas ótimas ideias.

A todos os professores com quem tive contato durante a vida acadêmica, pelo esforço dedicado à consolidação de minha formação. Em especial, ao professor Dr. José Ewerton, pela orientação neste trabalho e pelas oportunidades oferecidas, e ao professor Dr. Edmar Candeia Gurjão, pelo trabalho de orientação em iniciação científica e por todos os bons conselhos profissionais.

A Camila e Ítalo, pelos inúmeros momentos especiais que compartilhamos. A Rebeca, por me fazer querer ser sempre melhor e pelas ilustrações deste trabalho. A todos os grandes amigos que me acompanharam durante os anos de graduação.

Agradeço a todo o Departamento de Engenharia Elétrica (funcionários, coordenações e professores) pela formação proporcionada a seus alunos.

Por fim, muito obrigada a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para essa realização.

“Não deve prometer andar na escuridão aquele que não viu o anoitecer.”

J. R. R. Tolkien.

RESUMO

A utilização das tecnologias de redes de acesso baseadas em PONs (redes ópticas passivas) é hoje uma realidade em dezenas de países. Por outro lado, as características de eliminação dos custos de cabeamento, facilidade de implantação da infraestrutura e comodidade disponibilizada ao usuário, oferecidas pelas redes sem fio (*wireless*) tornaram a tecnologia bastante popular (destacando-se as tecnologias Wi-Fi, WiMAX e Redes Móveis Celulares). A tecnologia de rádio sobre fibra (*RoF – Radio Over Fiber*), que permite o transporte de sinais de rádio por enlaces de fibra óptica deu origem ao conceito de Redes Banda-Larga Óptico-Sem Fio (*WOBANs*). A proposta dessas redes é criar um *back end* de suporte composto por uma rede óptica, que termina em um ponto relativamente próximo ao usuário, de onde se inicia um *front end* com uma rede sem fio. Existem basicamente três formas de transportar ondas de rádio frequência por guias ópticos: RF sobre fibra, IF sobre fibra ou banda básica sobre fibra. Este trabalho apresenta resultados, por meio da obtenção da BER (taxa de erro de bit), diagrama do olho e constelação de sinais, de simulações de sistemas com quatro canais, para casos de transmissão de banda básica sobre fibra (usando TDM e WDM) e transmissão de RF sobre fibra, utilizando sinais OFDM (*orthogonal frequency-division multiplexing*), conforme explicitado no padrão WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*).

Palavras-chave: Rede Híbrida, WOBANs, RoF.

ABSTRACT

The use of optical access technologies based on PONs (Passive Optical Networks) is now reality for millions of people in several countries. On the other hand, features of wireless technologies such as lower deployment costs and user mobility, made them (Wi-Fi, WiMAX, cellular mobile) extremely successful in the market place. A concept known as wireless optical broadband access network (WOBAN) employs radio over fiber (RoF) to implement hybrid (optical-wireless) access networks. RoF technology enables the transport of radio signals over optical fiber links. The main purpose of the WOBANs is the create a support backend formed by an optical network which extends itself until a place nearby the user. At that place a frontend comprised by a wireless network completes the connection of the telecommunication infrastructure with its users. There are three basic forms to transport radio signals through optical waveguides: RF over fiber, IF over fiber and baseband over fiber (with digital or analog transmission). This report presents simulation results for the performance of digital baseband over fiber transmission (using TDM and WDM) and for RoF transmission using OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing) according to the WiMAX standard. Physical performance parameters obtained through simulations are: BER (bit error rate), eye diagram and received signal constellation.

Keywords: Hybrid Networks, WOBANs, RoF.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Camadas de rede segundo o protocolo TCP/IP.....	5
Figura 2 – Exemplo rede óptica ativa com configuração tipo estrela.....	6
Figura 3 – Exemplo rede óptica passiva com configuração tipo estrela.....	7
Figura 4 - Esquema mostrando as diferenças entre FTTx de acordo com a distância alcançada pela fibra óptica em relação ao usuário final.....	7
Figura 5 - Exemplo de uma estrutura para redes PON usando TDM.....	8
Figura 6 – Separação de canais no tempo (TDM).....	9
Figura 7 – Exemplo de codificação (a) RZ e (b) NRZ.....	9
Figura 8 – Exemplos de codificação de linha aplicados à sequência binária mostrada na parte superior da imagem.....	9
Figura 9 – (a) Esquema de transmissão óptica usando WDM; (b) Acoplamento e desacoplamento de sinais de diferentes comprimentos de onda.....	12
Figura 10 – Exemplo de uma estrutura para redes PON usando WDM com 16 canais.....	12
Figura 12 – Configuração típica de uma rede de acesso sem fio local.....	16
Figura 12 – Descrição dos parâmetros gráficos do Diagrama de Olho.....	19
Figura 13 – Constelação ideal para 16 QAM.....	20
Figura 14 – Alternativas para redes de acesso.....	21
Figura 15 – Exemplo de arquitetura para uma WOBAN.....	23
Figura 16 – Classificação da comunicação na WOBAN.....	24
Figura 17 – Esquemas de transporte de sinais sem fio sobre fibra óptica (LIM, NIRMALATHAS, <i>et al.</i> , 2010).....	26
Figura 18 – Esquema simplificado de simulação para tecnologia TDM com 4 canais.....	28
Figura 19 - Sequência enviada no domínio óptico (em azul à esquerda) e recebida (em vermelho à direita) para o Canal 4, com o sistema operando a 228,85 THz, 75 Mbps e comprimento de 20 km para a fibra.....	30
Figura 20 – Diagrama do olho para o Canal 4, com o sistema operando a 228,85 THz, 75 Mbps e comprimento de 20 km para a fibra.....	30
Figura 21 – Esquema para simulação de rede WDM com quatro canais.....	31
Figura 22 – Espectro para espaçamento de 100 GHz entre canais e comprimento da fibra de 20 km.....	32
Figura 25 – Diagrama do olho para sinal recebido no Canal 1 da simulação WDM com espaçamento de 100 GHz entre canais e comprimento da fibra de 20 km.....	33
Figura 26– Espectro para espaçamento de 50 GHz entre canais e comprimento da fibra de 20 km.....	33

Figura 27 - Diagrama do olho para sinal recebido no Canal 1 da simulação WDM com espaçamento de 50 GHz entre canais e comprimento da fibra de 20 km.	34
Figura 28 – Esquema para simulação de sistema RoF com quatro canais OFDM.....	35
Figura 29 – Espectro para resultado da soma dos sinais originados pelos quatro canais OFDM.	35
Figura 30 – Constelação referente à taxa de 75 Mbps para 20 km de fibra. Os símbolos recebidos (cinza) se espalham bastante em torno da constelação ideal (vermelho).....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Taxas de transmissão para GPON.	11
Tabela 2 – Faixas de frequência de transmissão usadas em WiFi em algumas regiões. 16	
Tabela 3 – Ordem de grandeza da taxa de erro de bit (BER) para as configurações de rede TDM simuladas.	29
Tabela 4 – Valores de ordem de grandeza da BER para rede WDM com 4 canais simulada.	32
Tabela 5- Valores de ordem de grandeza da SER para rede RoF com 4 canais OFDM simulada.	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AON: *Active Optical Network* (Rede Óptica Ativa)
- BER: *Bit Error Rate* (Taxa de Erro de Bit)
- BPON: *Broadband PON*
- CATV: *Community Access TV*
- CWDM: *Coarse WDM*
- duty-cycle*: Razão entre o tempo de representação, t_c e o tempo de bit T_B
- DWDM: *Dense WDM*
- EDFA: *Erbium Doped Fiber Amplifier* (Amplificadores Ópticos de Fibra Dopada a Érbio)
- EPON: *Ethernet PON*
- FTP: *file transfer protocol*
- FTTB: *fiber-to-the-building* (Fibra até o Condomínio)
- FTTC: *fiber-to-the-curb* (Fibra até o meio-fio)
- FTTH: *fiber-to-the-home* (Fibra até a Residência)
- FTTN *fiber-to-the-node* (Fibra até a Vizinhança)
- GEM: *GPON Encapsulation Method*
- GFP PON: *Generic Framing Procedure PON*
- GPON: *Gigabit PON*
- HTTP: *Hipertext Transfer Protocol*
- IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
- IP: *Internet Protocol*
- ITU-T: *International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector*
- WAN: *Wide-Area Networks*
- NRZ: Codificação tipo *Non-Return to Zero*
- OLT: *Optical Line Terminal* (Terminal de Linha Óptica)
- ONT: *Optical Network Terminal* (Terminal de Rede Óptica), em português URA
- ONU: *Optical Network Unit* (Unidade de Rede Óptica), em português URA
- PON: *Passive Optical Network* (Redes Óptica Passiva)
- RoF: *Radio Over Fiber*
- RZ: Codificação tipo *Return to Zero*
- SER: *Symbol Error Rate* (Taxa de Erro de Símbolo)

TCP: *Transport Control Protocol*

TDM: *Time Division Multiplexing* (Multiplexação por Divisão no Tempo)

UDP: *User Data Protocol*

URA: Unidade de Rede de Acesso

MAN: *Metro-Area Network* (Rede Metropolitana)

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Surgimento e Desenvolvimento das Comunicações Ópticas	3
3	Redes Ópticas de Acesso	5
3.1	Multiplexação de Dados com Divisão no Tempo: Redes TDM.....	7
3.2	Padrões para TDM – PON	10
3.2.1	GPON (série ITU-T G.984).....	10
3.2.2	EPON (série IEEE 802.3ah)	11
3.3	Multiplexação de Dados com Divisão por Comprimento de Onda: Redes WDM 11	
3.4	Padrões para WDM.....	13
4	Redes de Acesso Sem Fio	14
4.1	Redes Móveis Celulares.....	14
4.2	Wi-Fi.....	15
4.3	WiMAX.....	17
4.3.1	Características gerais da Modulação OFDM.....	18
5	Análise de Desempenho em Redes.....	18
6	Cenário Atual para Redes de Acesso.....	20
7	Redes de Acesso Híbridas (WOBANs)	22
7.1	Arquitetura Híbrida.....	22
7.2	Problemas Gerais	24
7.2.1	Transporte Óptico de Sinais <i>Wireless</i>	25
8	Sistemas Simulados e Resultados.....	26
8.1	TDM-PON com 4 Canais.....	27
8.2	WDM-PON com 4 Canais.....	31
8.3	RoF Usando OFDM.....	34
9	Conclusão.....	37
	Bibliografia.....	38

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos sistemas de comunicação aumentou significativamente a busca pela expansão da disponibilidade de largas faixas de frequência (ou banda-larga) para transmissão de dados. Assim, as fibras ópticas se tornaram a tecnologia emergente dentre as estruturas guiantes na proposta das novas redes.

Com o surgimento da possibilidade física de transmissão óptica, foram desenvolvidos os padrões de comunicações ópticas, que atualmente estão consolidados para redes ópticas passivas (*Passivel Optical Networks* – PONs) ponto-a-multiponto. A projeção é que essas redes sejam substituídas por redes ponto-a-ponto, possibilitando maior banda dedicada por usuário e suporte de diferentes tipos de serviços em uma mesma rede (SARKAR, DIXIT e BISWANATH, 2007).

Como a largura de banda de uma única fibra é muito grande para usuários de redes de acesso, a utilização de redes ópticas ponto-a-ponto é viável se uma única fibra for usada para diversos usuários. Isso sugere a existência de um terminal óptico a partir do qual o sinal seja multiplexado, reduzindo a quantidade de fibra necessária. Assim, um trecho de comunicação entre o terminal óptico e o usuário final deve ser feito por meio de outra tecnologia (como par trançado, cabo coaxial ou *wireless*).

Por outro lado, a praticidade oferecida pelas redes sem fio fez com que elas se tornassem muito popular. A ideia da criação de uma rede que possibilite as altas taxas de transferência, confiabilidade das redes ópticas e a praticidade da mobilidade oferecida pelas redes sem fio deu origem ao conceito das redes de acesso híbridas (*WOBANS – Wireless-Optical Broadband Access Network*). A proposta dessas redes é criar um *back end* de suporte composto por uma rede óptica, que termina em um ponto relativamente próximo ao usuário, de onde se inicia um *front end* com uma rede sem fio.

O avanço oferecido pelas redes *wireless-fiber* impulsionou as pesquisas em sua direção, buscando-se encontrar propostas para sua operação. Dentre as características críticas dessas redes estão a escolha dos algoritmos de posicionamento do ponto final da rede óptica (URA – Unidade de Rede de Acesso) e de roteamento dos dados na rede *wireless*.

Outras características consideradas objetos de estudo são os padrões de comunicação e as técnicas de transmissão a serem utilizadas na parte óptica da WOBAN. Existem basicamente três formas de transportar ondas de rádio frequência (RF) por guias ópticos: RF sobre fibra (RoF, ou *RF-over-Fiber*), FI sobre fibra (Frequência Intermediária sobre fibra, ou *IF-over-Fiber*) ou banda básica sobre fibra (ou *Baseband-over-Fiber*).

A plataforma de desenvolvimento VPItransmissionMaker 8.6 permite a implementação de sistemas de comunicação contendo segmentos ópticos e sem-fio. Essa plataforma é parte do conjunto VPIsystems, que permite a análise preditiva do comportamento de sistemas e componentes ópticos.

Levando em consideração as possíveis tecnologias de transmissão óptica para sinais sem fio, este trabalho apresenta simulações na plataforma VPITransmissionMaker 8.6 para os cenários: WDM-PON, TDM-PON e RoF baseada tecnologia WiMAX no *front end*. A análise de desempenho é feita por meio do cálculo da taxa de erro de bit e obtenção dos gráficos de diagrama do olho e constelação do sinal recebido.

2 SURGIMENTO E DESENVOLVIMENTO DAS COMUNICAÇÕES ÓPTICAS

No sentido amplo de conceito de sistemas de comunicações, pode-se dizer que as comunicações ópticas surgiram nos primórdios da humanidade, quando civilizações utilizavam espelhos e sinais de fumaça ou de fogo para transmitir pequenas mensagens. A mesma ideia foi empregada na construção de dispositivos como lâmpadas sinalizadoras e bandeiras ao final do século XVIII.

Por volta de 1790-1794 Claude Chappe sugeriu a transmissão de mensagens codificadas mecanicamente (por meio do ligamento e desligamento de luzes) através de estações de repetição. Nesses sistemas de longa distância (~100 km), um operador em cada estação era responsável por observar a mensagem enviada e retransmiti-la. Na década de 1830 essa tecnologia, chamada de “telégrafo óptico” já havia se estendido pela Europa, tendo atingido distâncias de transmissão de até 200 km. Levando em consideração a terminologia atual, a taxa de bit efetiva para esses sistemas era de menos de um bit por segundo ($B < 1bps$) (AGRAWAL, 2002).

Após o surgimento do telégrafo elétrico na década de 1880, os sistemas de comunicações entraram na era do domínio dos sinais elétricos, quando as técnicas de codificação, tais como o código Morse, possibilitaram taxas de transmissão da ordem de 10 bps.

Em 1876 surgiu o telefone, utilizando sinais elétricos contínuos para transmissão de voz. Técnicas baseadas em sinais elétricos contínuos consagraram tecnologia dominante por aproximadamente um século. Durante o século XX, o desenvolvimento de redes telefônicas em todo o mundo proporcionou inúmeros avanços dessa tecnologia, que teve sua capacidade aumentada consideravelmente pela substituição do par de fios pelo cabo coaxial, em 1940.

Em seguida surgiram as comunicações microondas, com onda portadora eletromagnética na faixa de 1-10 GHz, reduzindo as limitações de atenuação em baixa frequência. Esses sistemas utilizavam técnicas de modulação convenientes. O sistema microondas guiado por cabo coaxial mais avançado foi posto em operação em 1975, atingindo taxas de até 274 Mbps.

A utilização de sinal óptico como portador de informação foi proposta como alternativa aos sinais elétricos em busca do aumento da relação do produto entre taxa de informação e distância de transmissão (*BL*). No entanto, até a década de 1950 não havia disponibilidade de fonte óptica coerente ou guia de ondas ópticas. Na década de 1960 o funcionamento do laser foi demonstrado experimentalmente. Em 1966 sugeriu a fibra óptica como meio adequado para confinamento de sinais ópticos. Na década de 1970, os primeiros dispositivos lasers de semicondutores foram construídos.

Os primeiros sistemas ópticos tinham capacidade fortemente limitada pelas altas perdas por atenuação na fibra e pelos grandes efeitos de dispersão inseridos no sinal, devido principalmente ao número excessivo de modos guiados nas fibras e à grande largura espectral dos lasers da época. Os maiores avanços das comunicações ópticas foram obtidos nos primeiros vinte anos após seu surgimento, com o aperfeiçoamento dos dispositivos e fibras, que passaram de perdas da ordem de 1000 dB/km (na década de 1960) a valores em torno de 0.2 dB/km (na década de 1980). O problema da dispersão intermodal foi superado com o advento das fibras monomodo (com um único modo de propagação) seguido do surgimento de lasers monomodo. A dispersão intramodal (do próprio modo), teve os efeitos reduzidos com a construção de fibras com dispersão mínima na faixa de 1500 nm (onde a atenuação também é mínima), em detrimento ao uso de fibras com dispersão mínima em 1300 nm (AGRAWAL, 2002).

No começo da década de 1990, sistemas operando a taxas de 10 Gbps com enlaces em torno de 60-70 km começaram a ser comercializados. Para sistemas de longas distâncias, eram utilizados repetidores, que faziam a recepção do sinal óptico, conversão para o domínio elétrico (recuperação) e novamente conversão para o domínio óptico com novo nível de potência, evitando a atenuação excessiva do sinal. Esses repetidores eram caros e dependentes de métodos e taxas de transmissão, eliminando a flexibilidade da rede.

Uma mudança no paradigma dos sistemas ópticos ocorreu a partir do final da década de 1980, quando foram construídos os primeiros amplificadores ópticos de fibra dopada a Érbio (*EDFA - Erbium Doped Fiber Amplifier*), substituindo os repetidores, tornando o mecanismo de regeneração de potência totalmente óptico.

Hoje, as redes baseadas em tecnologias ópticas constituem o núcleo das Telecomunicações no mundo e são responsáveis pelas altas taxas de transmissão alcançadas pelas redes de acesso.

3 REDES ÓPTICAS DE ACESSO

Para estabelecer comunicação em uma rede, os elementos devem operar segundo protocolos estabelecidos. De acordo com o padrão TCP/IP (bastante utilizado para descrever redes de acesso à internet), os protocolos são divididos em cinco camadas: aplicação, transporte, rede, enlace e física, conforme é ilustrado na Figura 1. As camadas recebem os dados da camada inferior, retiram as informações necessárias, que estão encapsuladas, operam sobre os dados e os fornecem como serviço à camada superior. Esse esquema garante flexibilidade, modularidade e compatibilidade às redes. O estudo dos protocolos para internet envolvendo cada camada foge ao escopo deste trabalho, sendo detalhado por Kurose (2006).

Como estamos interessados nos protocolos de internet, podemos exemplificar o HTTP e o FTP para camada de aplicação, o UDP e o TCP para camada de transporte e, finalmente o IP para camada de rede.

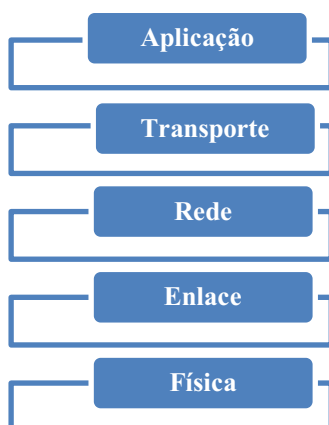


Figura 1 - Camadas de rede segundo o protocolo TCP/IP.

Uma rede óptica é aquela onde a interface usuário-rede é óptica, e informações transmitidas entre interfaces usuário-rede não sofrem conversão eletro-óptica. Assim, a camada física é composta por guias de ondas ópticas e a camada de enlace por enlaces ópticos. Como cada camada superior utiliza os serviços dispostos pela camada inferior, enquanto a camada inferior encapsula cada vez mais a mensagem original (fornecida pela camada de aplicação), fica claro que em uma rede óptica de acesso, o enlace óptico é capaz de transportar os pacotes IP.

De acordo com os tipos de componentes utilizados, as redes ópticas são classificadas em ativas ou passivas. Redes ópticas ativas (*AON – Active Optical Network*) possuem componentes alimentados em potência, chamados de componentes ativos, como roteadores e switches.

Redes ópticas totalmente passivas (*PON – Passive Optical Network*) são constituídas unicamente por elementos passivos, i.e., componentes que não necessitam de alimentação em potência, como *combiners*, *splitters* e *couplers*. Essas redes podem ser definidas como sistemas encarregados do transporte de sinais ópticos da Operadora até um ponto próximo ao usuário final, o ONT (*Optical Network Terminal*, também chamado de ONU – *Optical Network Unit* – em português URA – Unidade de Rede de Acesso), sem utilizar componentes ativos, tornando a rede robusta.

A Figura 2 e a Figura 3 ilustram as diferenças entre redes ópticas passivas e ativas. A rede ativa mostrada utiliza topologia tipo estrela, sendo capaz de realizar multiplexação de dados para diferentes pontos finais (*multicasting*) por meio de um dispositivo roteador (capaz de multiplexar dados para até 500 URAs). A rede passiva, também em topologia tipo estrela, utiliza múltiplos *splitters* (podem ser conectados até no máximo 32 URAs), sendo capaz apenas de reenviar às portas de saída o sinal recebido na porta de entrada.

De acordo com o ponto de terminação da PON, ela pode ser classificada entre: *fiber-to-the-node* (FTTN), *fiber-to-the-curb* (FTTC), *fiber-to-the-building* (FTTB) ou *fiber-to-the-home* (FTTH). Uma ilustração esquemática mostrando como as configurações FTTx se diferenciam de acordo com a distância alcançada pela fibra óptica em relação ao usuário final é mostrada na Figura 4.

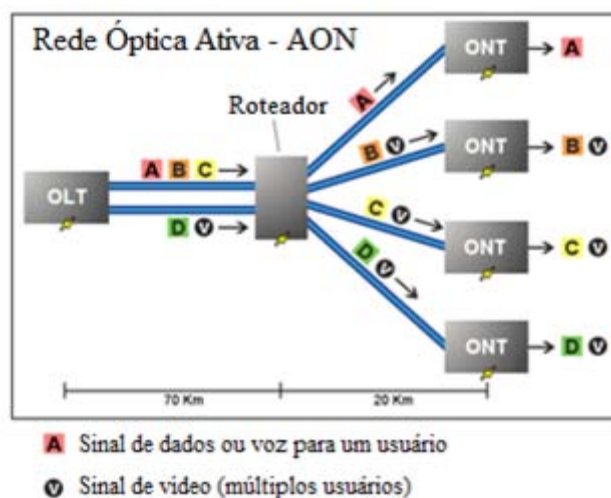


Figura 2 – Exemplo rede óptica ativa com configuração tipo estrela.

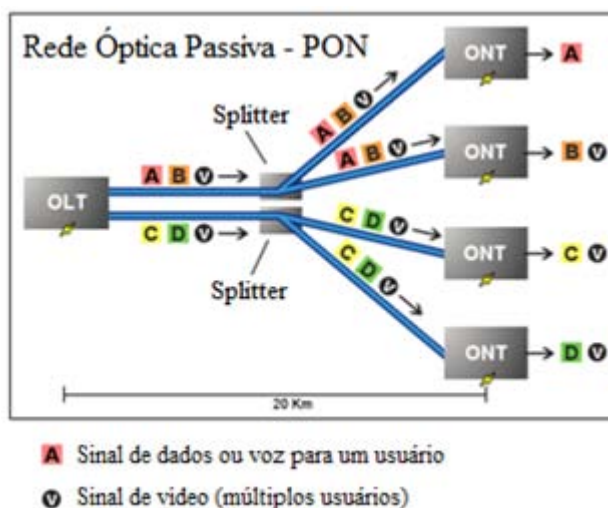


Figura 3 – Exemplo rede óptica passiva com configuração tipo estrela.

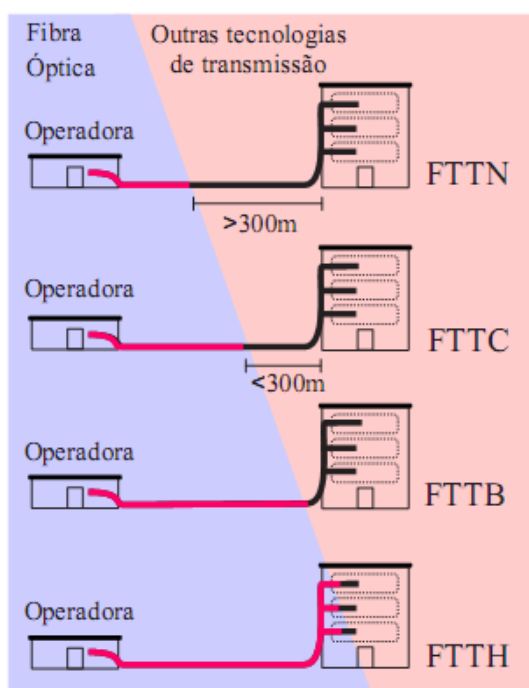


Figura 4 - Esquema mostrando as diferenças entre FTTx de acordo com a distância alcançada pela fibra óptica em relação ao usuário final.

3.1 MULTIPLEXAÇÃO DE DADOS COM DIVISÃO NO TEMPO:

REDES TDM

Quando se deseja transmitir mais de um sinal simultaneamente em uma fibra óptica, é possível optar por duas técnicas de divisão e multiplexação: no tempo (*TDM* –

Time Division Multiplexing) e no comprimento de onda (*WDM – Wavelength Division Multiplexing*).

Em redes com multiplexação por divisão no tempo são utilizados apenas dois canais para a comunicação: um canal para transmissão do Terminal de Linha Óptica (*OLT – Optical Line Terminal*) na Operadora para a URA (Unidade de Rede de Acesso), chamado de canal *downstream*, e um canal da URA para a Operadora, chamado de canal *upstream*. As informações são enviadas em *slots* de tempo correspondentes ao tempo reservado para cada usuário. A comunicação é ponto-a-multiponto, já que todos os usuários recebem um sinal comum.

A Figura 5 ilustra um exemplo para uma estrutura de rede PON utilizando TDM. É possível utilizar uma mesma fibra com um canal *downstream*, e um canal *upstream*, ou utilizar fibras distintas. O sinal de vídeo correspondente ao serviço CATV (*Community Access TV*) é transmitido em 1550 nm, independentemente do padrão utilizado.

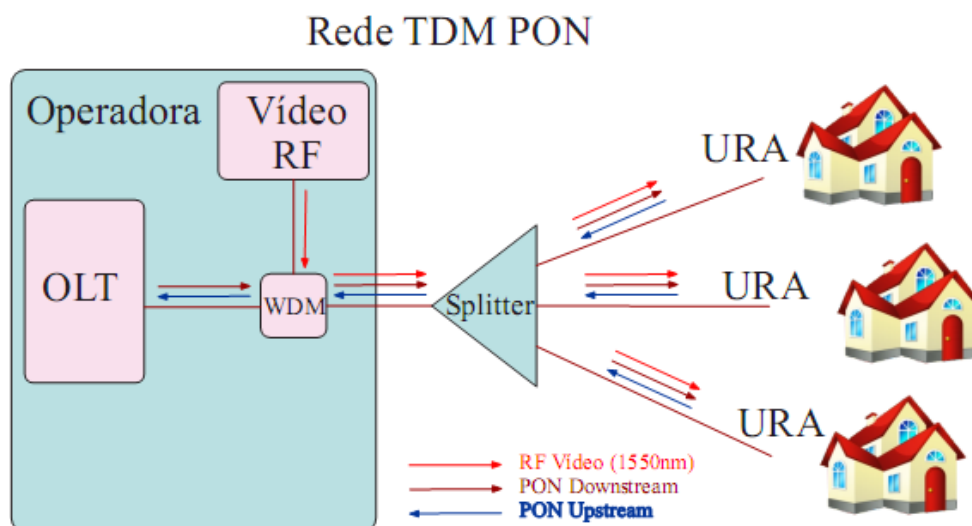


Figura 5 - Exemplo de uma estrutura para redes PON usando TDM.

A separação dos canais no tempo é feita por meio da divisão de um tempo de bit (T_B , que é o tempo necessário para transmissão de um bit) pelo número total de canais, conforme é ilustrado na Figura 6.

Essa separação pode ser obtida pelo uso de um tipo de codificação de linha capaz de representar cada bit transmitido por um sinal que ocupe apenas o tempo dedicado ao canal, como na codificação RZ (*Return to Zero*).

Codificadores de linha são usados para obter sinais convenientes de representação binária de acordo com a aplicação e serão citados ao longo deste trabalho.

Exemplos desses codificadores são o RZ e o NRZ (*Non-Return to Zero*), que são ilustrados na Figura 7. Observa-se que se o *duty-cycle* (razão entre o tempo de representação, t_c e o tempo de bit T_B) for $1/N$ na codificação RZ, a separação de canais é alcançada. Outros exemplos de codificação de linha são mostrados na Figura 8.

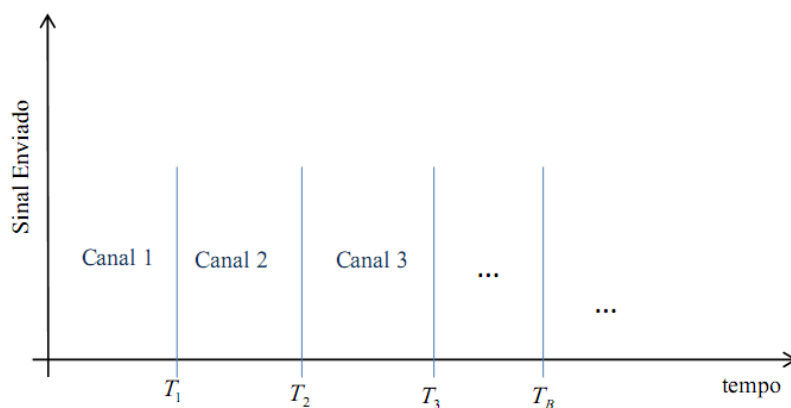


Figura 6 – Separação de canais no tempo (TDM).

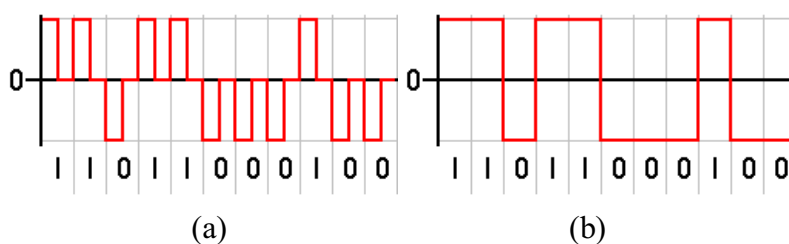


Figura 7 – Exemplo de codificação (a) RZ e (b) NRZ.

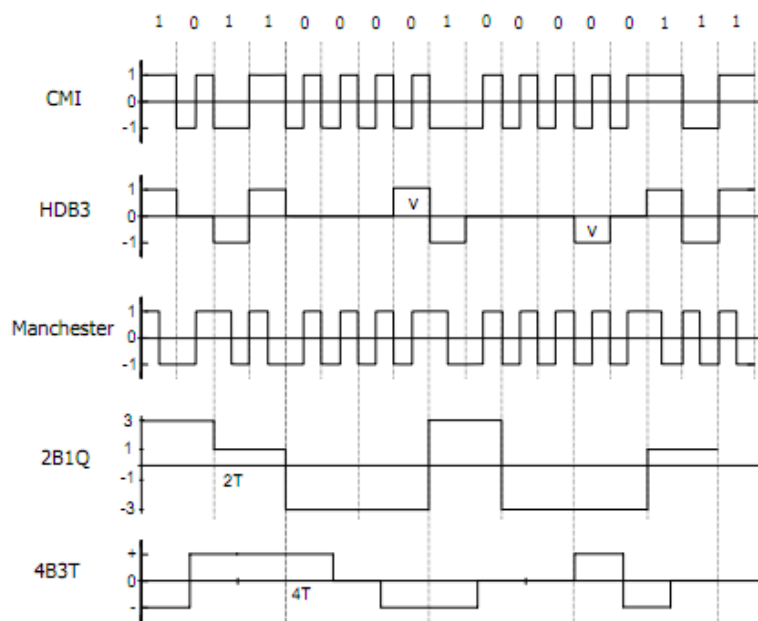


Figura 8 – Exemplos de codificação de linha aplicados à sequência binária mostrada na parte superior da imagem.

3.2 PADRÕES PARA TDM – PON

A utilização de padrões para determinar a comunicação nos enlaces ópticos garante a operação da rede, mantendo a compatibilidade entre sub-redes que utilizem diferentes tecnologias.

Diversas padronizações foram realizadas para descrever redes TDM-PON, buscando-se atingir características desejáveis a diferentes aplicações, em especial pelas organizações IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e ITU-T (*International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector*). Alguns desses padrões são: *Ethernet PON* (EPON), *Broadband PON* (BPON), *Gigabit PON* (GPON) e *Generic Framing Procedure PON* (GFP - PON).

Neste tópico serão descritas as características voltadas ao interesse das simulações apresentadas neste trabalho para os padrões EPON (da série IEEE 802.3ah) e GPON (da série ITU-T G.984), que constituem os dois principais padrões da chamada terceira geração de padrões para sistemas PON. Detalhes para esses padrões e os demais citados são feitos por Gorshe (2006) ou diretamente pelos órgãos de padronização.

3.2.1 GPON (SERIE ITU-T G.984)

Uma das características mais inovadoras incluídas no GPON, com relação ao seu antecessor BPON, é a utilização do método GEM (*GPON Encapsulation Method*). No entanto, essas e outras características são consideradas de alto nível com relação às análises realizadas neste trabalho, que se detêm a considerações acerca da transmissão de sequências binárias genéricas, ignorando o formato de encapsulamento de dados.

O padrão GPON determina a existência de até 64 unidades de rede de acesso, ou URAs, conectadas a um único OLT (razão máxima de 1:64). Existem duas especificações distintas para potência e perdas do enlace, correspondendo à possibilidade de operar a distâncias de 10 ou 20 km.

É possível utilizar uma única fibra para transmissão *downstream* e *upstream*, e acopladores direcionais podem ser usados para separar os dados transmitidos nas duas direções, com lasers operando entre 1260-1360 nm na URA e no OLT. Alternativamente, é possível utilizar uma fibra para transmissão *downstream* (lasers no OLT operando na faixa 1480-1500 nm) e uma fibra para transmissão *upstream* (lasers na URA operando na faixa 1260-1360 nm).

As especificações para taxas de transmissão são mostradas na Tabela 1. A opção mais utilizada é 1,24416 Gbps *upstream* e 2,48832 Gbps *downstream*.

3.2.2 EPON (SÉRIE IEEE 802.3AH)

O padrão EPON determina uma taxa de transmissão de 1,25 Gbps (incluindo os bits inseridos na codificação). Os dados são transmitidos em uma única fibra PON, as janelas de comprimento de onda usadas são centradas em 1490 nm *downstream* e 1310 nm *upstream*.

São especificadas duas opções de distância entre o OLT e a URA: até 10 km e até 20 km, com razão de multiplexação máxima de 1:64.

Tabela 1– Taxas de transmissão para GPON.

<i>Upstream</i>	<i>Downstream</i>
155,52 Mbps	1,24416 Gbps
622,08 Mbps	1,24416 Gbps
1,24416 Gbps	1,24416 Gbps
155,52 Mbps	2,48832 Gbps
622,08 Mbps	2,48832 Gbps
1,24416 Gbps	2,48832 Gbps
2,48832 Gbps	2,48832 Gbps

3.3 MULTIPLEXAÇÃO DE DADOS COM DIVISÃO POR

COMPRIMENTO DE ONDA: REDES WDM

A multiplexação com divisão por comprimento de onda (λ) consiste na transmissão de cada sinal em um λ diferente, dividindo-se a largura de banda total em bandas menores (iguais ou não). Assim, existe uma frequência central de transmissão correspondente a cada sinal, e a transmissão é multicanal.

A transmissão usando WDM se tornou possível com o surgimento de materiais para composição de fibras ópticas capazes de operar em diversos comprimentos de onda, mantendo atenuação e dispersão aceitáveis para o sinal. Essa técnica pode ser mais bem compreendida a partir da análise da Figura 9, que ilustra o esquema de

transmissão de diferentes sinais usando WDM e acoplamento e multiplexação dos sinais por meio da utilização de prismas e anteparos.

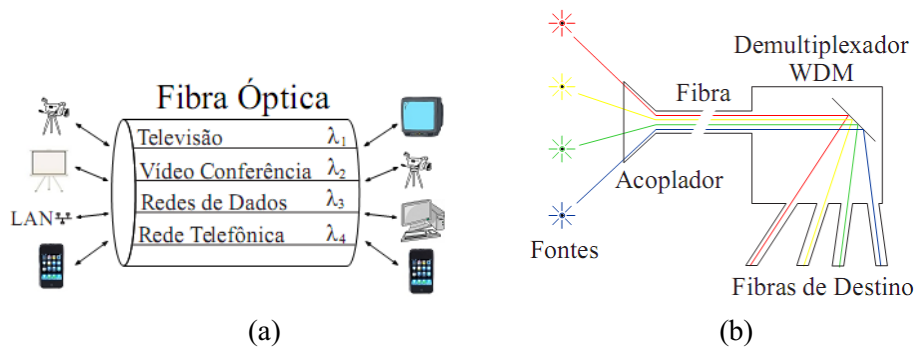


Figura 9 – (a) Esquema de transmissão óptica usando WDM; (b) Acoplamento e desacoplamento de sinais de diferentes comprimentos de onda.

Assim, os sistemas WDM operam em diferentes comprimentos de onda, bastante próximos entre si, graças ao surgimento dos EDFAs (capazes de amplificar sinais em dezenas de canais WDM, na faixa de 1550 nm) e lasers com larguras espectrais bastante reduzidas – de até 1 nm.

A Figura 10 apresenta um exemplo de uma rede de acesso PON utilizando WDM com 16 canais. A comunicação é ponto-a-ponto do ponto de vista de cada par de canais dedicados, e normalmente a comunicação *upstream* e *downstream* se dão em canais separados.

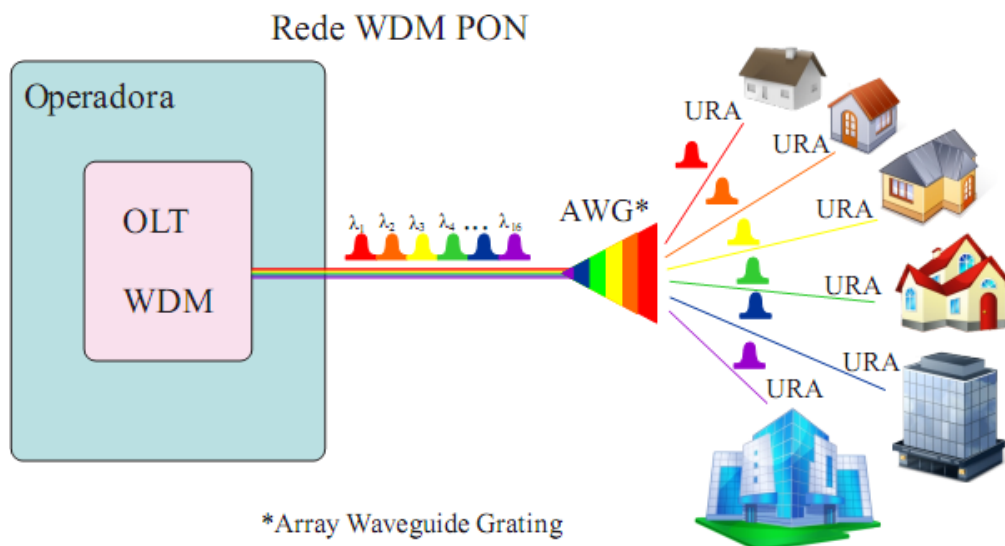


Figura 10 – Exemplo de uma estrutura para redes PON usando WDM com 16 canais.

A chegada do WDM promoveu uma revolução, dobrando a capacidade dos sistemas aproximadamente a cada seis meses e levando-os a transmissões em taxas de 10 Tb/s por volta de 2001 (AGRAWAL, 2002). O uso dessa tecnologia em redes de

transporte a longas distâncias reduz consideravelmente os problemas de capacidade em largura de banda. No Enquanto uma fibra utilizando TDM comporta 1 canal, a fibra sob WDM suporta mais de 30 canais, mantendo a mesma taxa por canal.

Atualmente os sistemas WDM constituem o núcleo da rede global de Telecomunicações, sendo responsável pelo transporte de longa distância e resolvendo o problema de capacidade e com um custo bem menor comparado com as demais alternativas. No entanto, a utilização de sistemas WDM em redes de acesso ainda está limitada pelo sucesso das tecnologias TDM. A explicação para isso é que os padrões e dispositivos TDM foram desenvolvidos antes de se descobrir a possibilidade de multicanal em comunicações ópticas. Tendo em vista a crescente demanda de largura de banda por parte dos usuários em redes de acesso, a necessidade de migração das arquiteturas PON existentes para WDM PON é essencial.

3.4 PADRÕES PARA WDM

A ITU-T normatizou o WDM pela recomendação G.692 (*Optical Interfaces for Multichannel Systems with Optical Amplifiers*), separando os canais numa grade de frequências centrada em 193,100 THz (1552,524 nm) espaçados entre si por 100 GHz (~0,8 nm, em torno de 1550 nm). Como opcionais foram sugeridos espaçamentos de 50 GHz e 200 GHz (0,4 nm e 1,6 nm, respectivamente, em torno de 1550 nm). Em 2002, por meio das recomendações G.694.1 e G.694.2, a ITU definiu o padrão de espaçamento dos canais para sistemas DWDM (*Dense WDM*) e CWDM (*Coarse WDM*), respectivamente. Nenhum desses padrões faz referência a redes de acesso.

Como DWDM foram classificados aqueles operando nas bandas S, C e L, com alto grau de qualidade de serviço em redes de alcance metropolitano (*MAN – Metro-Area Network*) e redes de grande abrangência geográfica (*WAN – Wide-Area Networks*) com espaçamentos na frequência entre os canais variando entre 12,5 GHz, 50 GHz e 100 GHz (ou, entre 0,1 nm e 0,8 nm, em torno de 1550 nm, equivalentemente). A grade de transmissão dos sistemas CWDM é composta de dezoito canais definidos dentro do intervalo de 1270 até 1610 nm, com espaçamento entre si de 20 nm, podendo ter uma variação de 2 nm. A distância alvo para o CWDM é 50 km em fibras monomodo.

A maioria dos sistemas WDM sendo pesquisados possuem espaçamento de 50 GHz entre canais, com canais de 10 Gbps, ocupando uma banda de 20 GHz.

4 REDES DE ACESSO SEM FIO

Uma solução para enlaces de redes que tem aumentado bastante seus investimentos em pesquisa e implantação é a tecnologia de comunicação sem-fio, ou *wireless*. Existem três técnicas que se destacam nas redes de acesso sem fio: Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), Wi-MAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) e redes móveis celulares.

A tecnologia Wi-Fi é utilizada especialmente em redes locais, WLANs (*Wireless Local Area Networks*), enquanto WiMAX é bastante atrativa em redes metropolitanas, WMANs (*Wireless Metropolitan Area Networks*), já que apresenta taxa de bits/segundo alta e maior raio de cobertura. Já a tecnologia celular é usada especialmente para transporte de voz, imagens, e outras aplicações com taxas relativamente modestas. Características mais detalhadas para essas três tecnologias serão descritas nas sessões seguintes.

4.1 REDES MÓVEIS CELULARES

Como a transmissão sem fio é feita por meio de sinais de radiofrequência, que se propagam no meio livre juntamente às ondas provenientes dos diversos serviços que podem utilizar sinais de rádio, é necessário que a transmissão ocorra em frequências compatíveis com as exigências de cada país. No Brasil, o gerenciamento do uso do espectro é feito pela Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações), nos EUA o órgão responsável é a FCC (*Federal Communications Commission*).

Segundo a FCC, além das faixas de frequência regulamentadas (que são de uso restrito ao comprador), existe a faixa livre, chamada de ISM (*Industrial, Scientific and Medic*), composta pelas bandas: 902 MHz - 928 MHz; 2,4 GHz - 2,485 GHz e 5,15 GHz - 5,825 GHz (dependendo do país, esses limites podem sofrer variações).

Tecnologias de redes móveis celulares utilizam faixas de frequência regulamentadas pela FCC, com padrões 3G (*third-generation*), B3G (*beyond-third-generation*) e 4G (*Fourth Generation*).

Essa tecnologia é usada especialmente para transporte de voz, sendo indicada para aplicações com baixa taxa de transferência. A componente de dados para redes celulares, como os pacotes de acesso de alta velocidade *downlink* e *uplink*, conhecido como *high-speed packet access* (HSPA) na evolução do 3G, pode disponibilizar uma banda de até 14 Mb/s para comunicação *downstream* e até 5 Mb/s para comunicação *upstream* (SARKAR, DIXIT e BISWANATH, 2007).

4.2 WI-FI

A criação de redes sem fio é uma idéia antiga, cujo desenvolvimento prático encontrou como principal obstáculo a falta de padronização de normas e especificações, já que vários grupos de pesquisas trabalharam paralelamente com propostas diferentes. Empresas como a 3Com, Nokia, Lucent Technologies (atual Alcatel-Lucent) e Symbol Technologies (adquirida pela Motorola), uniram-se para criar um grupo em busca de solucionar esse problema.

Assim, em 1999 surgiu a *Wireless Ethernet Compability Alliance* (WECA), que passou a se chamar Wi-Fi Alliance em 2003. O número de empresas associadas ao grupo cresceu desde então. A WECA passou a trabalhar com as especificações IEEE 802.11, que se assemelha ao padrão Ethernet (IEEE 802.3) de redes com fio. As modificações feitas foram feitas essencialmente nas características de transmissão: o novo padrão considera utilização de radiofrequência. O aproveitamento do padrão Ethernet evitou a necessidade de criação de protocolos específicos para comunicações de rede sem fio baseados nessa nova tecnologia de comunicação em redes: a tecnologia Wi-Fi (padrões IEEE 802.11a,b,g).

Atualmente, a tecnologia WiFi (padrões IEEE 802.11a,b,g) é bastante popular, sendo utilizada especialmente em redes sem fio LAN (redes locais), que é exemplificada na Figura 11. Existem dois modos de operação: “*Ad Hoc*” e “*Infrastructure*”. No primeiro os próprios usuários gerenciam seu comportamento, enquanto no segundo existe necessidade de um administrador que representa a autoridade central (*access point*) para gerenciar a rede. Essa tecnologia permite a flexibilidade proposta pela utilização de “*multihopping*”, mas apresenta baixa taxa de bits/segundo (picos de 54 Mbps) e raio de cobertura tipicamente de 30 m (ANDREWS, GHOSH e MUHAMED, 2007).



Figura 11 – Configuração típica de uma rede de acesso sem fio local.

A tecnologia WiFi utiliza faixas de frequência da banda ISM e faixas pagas (essa característica pode variar conforme a versão do padrão 802.11). A Tabela 2 mostra as faixas usadas para transmissão WiFi para alguns padrões nas regiões da América do Norte, América do Sul, Japão e Europa.

Tabela 2 – Faixas de frequência de transmissão usadas em WiFi em algumas regiões.

Padrão	Região/País	Frequência	Potência
802.11b & g	América do Norte	2,4 - 2,4835 GHz	1000 mW
802.11b & g	Europa	2,4 - 2,4835 GHz	100 mW
802.11b & g	Japão	2,4 - 2,497 GHz	10 mW
802.11b & g	Espanha	2,4 - 2,4875 GHz	100 mW
802.11b & g	França	2,4 - 2,4835 GHz	100 mW
802.11a	América do Norte	5,15 - 5,25 GHz	40 mW
802.11a	América do Norte	5,25 - 5,35 GHz	200 mW
802.11a	América do Norte	5,725 - 5,825 GHz	800 mW

4.3 WiMAX

A tecnologia WiMAX (padrão IEEE 802.16) que possui variações para redes sem fio fixas (802.16-2004) e redes sem fio móveis (802.16e-2005). A diferença básica em termos de funcionalidade entre esses dois tipos de redes sem fio é que em redes fixas a passagem do usuário de uma célula (raio de cobertura de uma ERB) para outra, a conexão é interrompida. Em redes móveis, a passagem de uma célula para outra não afeta o usuário (NUAYMI, 2007).

Em um ambiente metropolitano realista, 50% a 70% dos clientes tipicamente não têm visada direta (caminho entre transmissor e receptor não apresenta obstáculos), chamados de caminhos NLOS (*Non-Line of Sight*), e aberta ao ponto de acesso da rede sem fio, impossibilitando a operação de protocolos utilizados nas redes locais. No entanto, parte do sinal de rádio é sempre refletida pelos obstáculos, podendo ser utilizada para se alcançar receptores com passagens obstruídas. Essas reflexões causam atenuações aleatórias em algumas faixas de frequência, implicando na necessidade de um protocolo capaz de lidar com as atenuações sofridas.

A solução encontrada pelo IEEE 802.16 para esse problema é a utilização de modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), que emprega diversas portadoras simultaneamente. É necessário que apenas algumas dessas portadoras sejam reconhecidas pelo receptor para que a informação seja recuperada. Equipamentos WiMAX são capazes de se comunicar a distâncias de até 6 km sem visada, utilizando apenas o mecanismo de reflexão (LIMA, SOARES, & ENDLER, 2004).

O padrão WiMAX possui várias versões, das quais uma é destacada a seguir. As demais versões são descritas detalhadamente por Nuaymi (2007). No tópico seguinte, serão descritos alguns aspectos da modulação OFDM, que será utilizada nas simulações apresentadas neste trabalho.

WirelessMAN-OFDM (802.16a REVd) foi projetado para operações NLOS, operando em frequências entre 2-11 GHz, com base em modulação OFDM (256 sub-portadoras). Pode ser aplicada a redes fixas e móveis, com largura de banda entre 1,5-20 MHz. Pode atingir taxa de até 75 Mbps (para canais de 20 MHz e 64 QAM), múltiplos esquemas de codificação e apresenta robustez a multipercurso. O raio típico da célula é

de 8-20 km em ambientes rurais e 2-8 km em ambientes urbanos para transmissão ponto-a-multiponto. Para transmissão ponto-a-ponto o raio pode ser superior a 40 km.

4.3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA MODULAÇÃO OFDM

A modulação OFDM utiliza múltiplas portadoras, dividindo a largura de banda do canal (W) em N bandas relativamente estreitas ($\Delta f = W/N$), levando a taxas de transmissão próximas à capacidade do canal. O sinal em cada “sub-banda” pode ser codificado independentemente e modulado a uma taxa síncrona de símbolos de $1/\Delta f$. Se Δf for suficientemente pequena, a resposta em frequência do canal é essencialmente constante e a interferência entre símbolos pode ser desprezada (PROAKIS e MASOUD, 2008), (ERNESTO e CLÁUDIO, 2002). A associação da existência de diversas portadoras à utilização de técnicas de modulação e codificação a cada sub-banda determina a robustez da modulação OFDM à interferência e atenuação do sinal.

5 ANÁLISE DE DESEMPENHO EM REDES

Algumas figuras de mérito são definidas critérios para analisar o desempenho de sistemas de comunicações. Esses critérios buscam determinar a quantidade de informação passível a perdas, que podem ocorrer devido à atenuação do sinal, dispersão, ruído, interferência, entre outros aspectos degradantes do canal.

O desempenho de sistemas digitais ópticos pode ser analisado pela BER (*Bit Error Rate*, ou Taxa de Erro de Bit), que pode ser definida como a probabilidade média de ocorrer identificação errada de bits. Muitos sistemas ópticos especificam como parâmetro de operação o limite superior de 10^{-9} para a BER, outros especificam 10^{-14} (AGRAWAL, 2002). O parâmetro Q é uma medida obtida diretamente a partir da BER.

Uma medida de desempenho derivada do conceito de BER é a taxa de erro de símbolo *SER* (*Symbol Error Rate*), que descreve a quantidade média de erro de símbolos recebidos. Os símbolos são o mapeamento dos bits em palavras códigos. Como sistemas de codificação/decodificação são capazes de corrigir erros de bits, essa medida se torna mais significativa do que a BER em sistemas que possuem codificação com capacidade de correção.

Uma forma qualitativa para se estimar a taxa de erro de bit é apresentada pelo chamado Diagrama de Olho (*Eye Diagram* ou *Eye Pattern*). O diagrama de olho é obtido pela superposição de várias amostras do sinal no domínio do tempo, e recebe esse nome porque possui um formato similar ao contorno do olho. Alguns parâmetros podem ser determinados graficamente, obtendo-se algumas informações quantitativas de caráter estatístico, de acordo com o espaçamento das faixas do diagrama, conforme é apresentado na Figura 12. O efeito de interferência inter-simbólica causa o “fechamento do olho”, reduzindo a margem de ruído aditivo (PROAKIS e MASOUD, 2008).

Outra figura de mérito gráfica é a constelação de sinais, que consiste no gráfico representativo dos sinais na forma vetorial. Os pontos ditos ideais na constelação são dados pela localização dos representantes (que representam uma região definida por limiares de decisão) para os símbolos transmitidos (que representam um ou mais bits). Isso significa que se o símbolo recebido se encontra dentro da região delimitada pelos limiares de decisão para um dado representante, ele será atribuído a esse representante, e o símbolo correspondente a esse representante é detectado como símbolo transmitido. A constelação ideal para codificação 16 QAM (quatro bits para cada símbolo) é mostrada na Figura 13. O “espalhamento” dos símbolos recebidos na constelação é diretamente proporcional à taxa de erro.

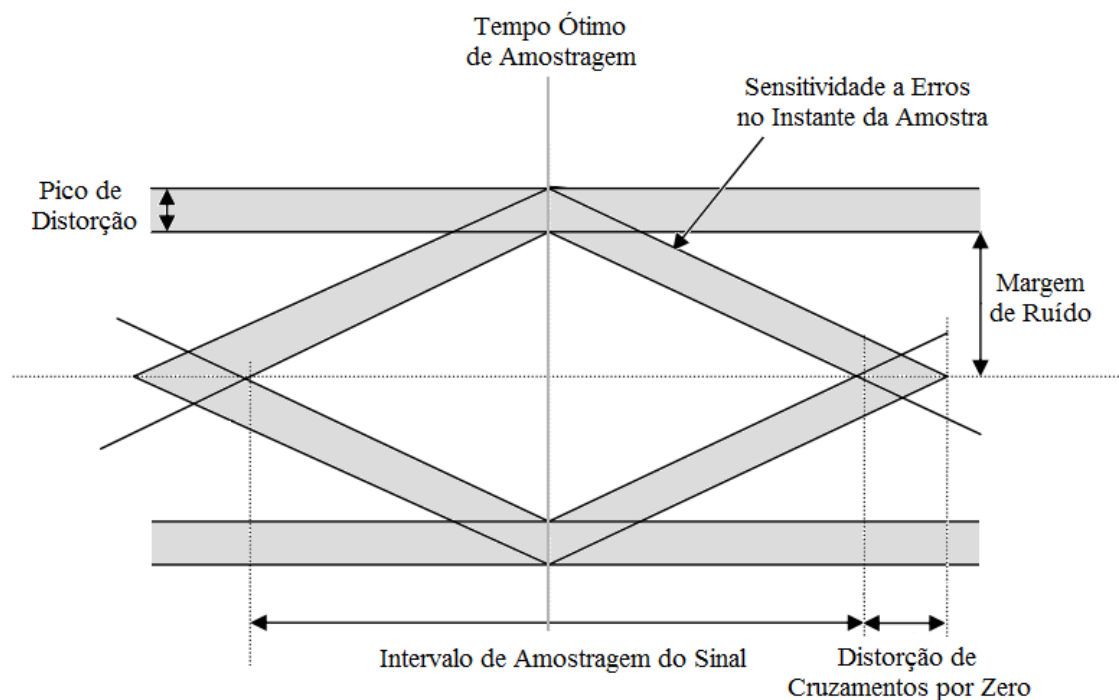


Figura 12 – Descrição dos parâmetros gráficos do Diagrama de Olho.

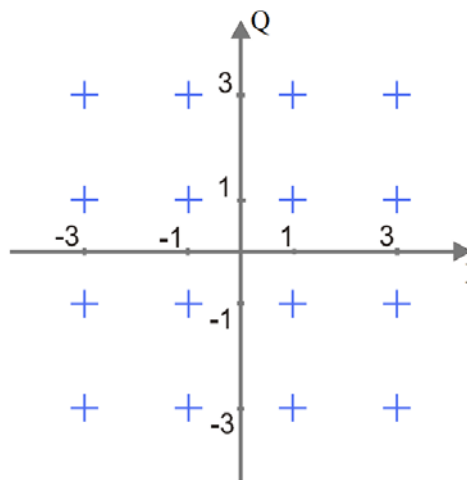


Figura 13 – Constelação ideal para 16 QAM.

Detalhes sobre cálculo de BER e parâmetro Q, SER, construção do diagrama de olho e constelação e diversas outras medidas usadas como critério de desempenho e parâmetro de operação, tais como EVM (*Error Vector Magnitude*), SNR (*Signal-Noise Ratio*) e probabilidades de erro são descritas em “*EVM Calculation for Broadband Modulated Signals*” (MCKINLEY, REMLEY, *et al.*, 2004) e “*Digital Communications*” (PROAKIS e MASOUD, 2008) e não serão apresentadas neste trabalho.

6 CENÁRIO ATUAL PARA REDES DE ACESSO

A utilização das tecnologias de redes de acesso baseadas em PONs é hoje uma realidade em dezenas de países. Em dezembro de 2010, mais de 50 milhões de assinantes FTTH usando PONs estavam conectados: 3,9 milhões na Europa, 45 milhões na região Pacífico e Ásia (Japão, Coreia do Sul, China, Singapura, Malásia e Austrália) e 8,8 milhões na América do Norte. Para 2012, somente na região Pacífico e Ásia, o número de assinantes FTTx, atingirá os 100 milhões, sendo 25% FTTH (fibra até a residência) e 75% FTTB (fibra até o condomínio) (HANATANI, 2011).

A consolidação dos padrões para redes de acesso TDM-PON, com topologia ponto-a-multiponto, e os recentes avanços no campo dos lançamentos comerciais constitui o que se convencionou chamar de primeira geração de redes ópticas de acesso. Prevê-se que essas redes venham, no futuro, a ser substituídas por redes ponto-a-ponto, por meio do uso da tecnologia WDM, possibilitando maior largura de faixa dedicada

por usuário e suporte a diferentes serviços em uma mesma rede (SARKAR, DIXIT e BISWANATH, 2007). Será a chamada segunda geração de redes ópticas de acesso.

Entre a primeira e a segunda gerações, uma alternativa intermediária (TDM-WDM PON) poderá ser adotada (FARIAS, 2009). Como a largura de banda de uma única fibra é muito grande para usuários de redes de acesso, a utilização de redes ópticas ponto-a-ponto é viável se uma única fibra for compartilhada por diversos usuários. Isso sugere a existência de um terminal óptico a partir do qual o sinal seja multiplexado e encaminhado, o que pode ser feito por meio da alternativa apresentada e avaliada em “Rede óptica passiva usando TDM e WDM” (FARIAS, 2009). Assim, um trecho de comunicação entre o terminal óptico e o usuário final deve ser feito por meio de outra tecnologia (como par trançado, cabo coaxial ou sem fio), reduzindo a quantidade de fibra necessária.

A Figura 14 ilustra cinco alternativas para redes de acesso. De cima para baixo, a primeira, chamada de FTTC (fibra até o meio-fio), liga os usuários por meio de cabo metálico a uma URA da PON localizada a algumas dezenas ou centenas de metros das suas dependências. Na segunda alternativa a URA é instalada dentro das dependências do(s) usuário(s). As demais alternativas ilustradas são exemplos de redes de acesso *híbridas*, descritas na seção seguinte.



Figura 14 – Alternativas para redes de acesso.

7 REDES DE ACESSO HÍBRIDAS (WOBANS)

Conforme citado na seção anterior, o uso das tecnologias de comunicações ópticas se consolidou dentro das redes de acesso, aumentando as taxas de transmissão e criando novos paradigmas para serviços oferecidos pela Internet.

Por outro lado, as características de eliminação dos custos de cabeamento, facilidade de implantação da infraestrutura e comodidade disponibilizada ao usuário, oferecidas pelas redes sem fio (*wireless*) tornaram a tecnologia bastante popular.

A tecnologia de radio sobre fibra (*RoF – Radio Over Fiber*), que permite o transporte de sinais de rádio por enlaces de fibra óptica já existentes (eliminando os custos com infraestrutura em última-milha), ganhou bastante destaque nessas pesquisas, dando origem ao conceito de sistemas Híbridos Óptico - Sem Fio (*HFR – Hybrid Fiber Radio*) e Redes Banda-Larga Óptico-Sem Fio (*WOBANs – Wireless-Optical Broadband-Access Networks*). A proposta das redes de acesso híbridas é a implantação de um cenário que permita ao usuário o acesso à rede através uma interface *wireless* com suporte em uma rede PON (que apresenta robustez, confiabilidade e elevadas taxas).

A arquitetura WOBAN é bastante atrativa, já que muitas vezes o custo de trazer a fibra da Operadora até cada usuário é alto. Além disso, disponibilizar acesso sem fio diretamente da Operadora a cada usuário final pode não ser possível devido à limitação física do espectro.

7.1 ARQUITETURA HÍBRIDA

A proposta da arquitetura WOBAN é criar um *back end* de suporte composto por uma rede óptica, que termina em um ponto relativamente próximo ao usuário, de onde se inicia um *front end* com uma rede sem fio (SARKAR, YEN, *et al.*, 2008).

A Figura 15 ilustra uma arquitetura proposta para uma WOBAN. Como a tecnologia dominante em redes de acesso ópticas é PON, diversos segmentos PON são suportados na Operadora, partindo cada um de um OLT e terminando na URA correspondente. Cada URA é conectada a uma Estação Rádio Base (ERB), que serve

como uma porta de saída da rede óptica (*gateway router*, mostrados em vermelho na Figura 15), para dar início à parte wireless da rede. Além de *gateway routers* (ERBs ligadas diretamente a URAs), o *front end* possui outros roteadores/ERBs para gerenciamento eficaz da rede.

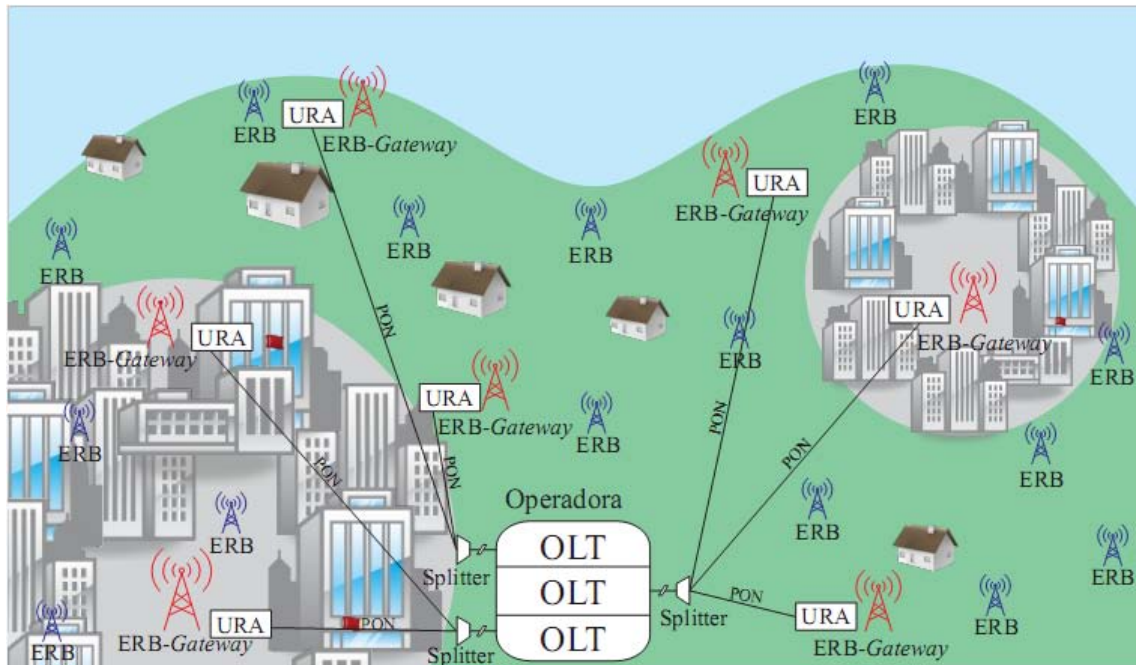


Figura 15 – Exemplo de arquitetura para uma WOBAN.

Podemos então descrever o *front end* de uma WOBAN como uma rede *wireless multihop* em malha, com diversos roteadores/ERBs sem fio e alguns *gateways*. O trecho *wireless* da WOBAN pode empregar tecnologias padrão como Wi-Fi e WiMAX.

Tipicamente, os usuários estão espalhados geograficamente, sendo muitas vezes móveis. O tráfego de dados *upstream* segue os seguintes passos: um usuário final envia um pacote de dados para um roteador sem fio vizinho; o roteador então insere o pacote na malha *wireless*; o pacote trafega através da malha *wireless*, possivelmente por múltiplos caminhos, até chegar a um *gateway*/URA e é finalmente enviado ao enlace óptico até chegar à OLT/Operadora.

Observa-se que na direção *upstream*, a parte sem fio é *anycast* (o usuário pode tentar entregar o pacote a qualquer *gateway*/URA), enquanto na direção *downstream* a rede sem fio é *unicast* (a URA/*gateway* envia o pacote apenas para seu destino específico, que é o usuário final).

A rede óptica, por sua vez, é *broadcast* (o pacote destinado a uma determinada URA é enviada a todas as URAs da árvore, devendo ser processado apenas pela URA

de destino) na direção *downstream* e um acesso *multi-point* na direção *upstream*. Esses protocolos são ilustrados na Figura 16.

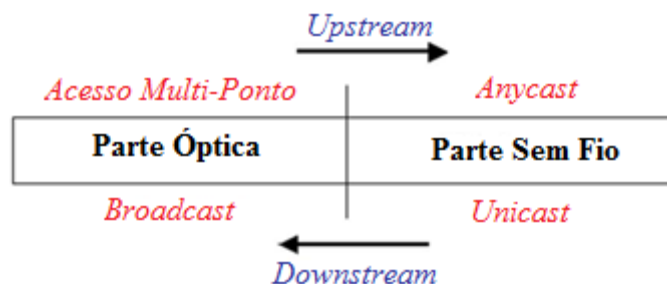


Figura 16 – Classificação da comunicação na WOBAN.

7.2 PROBLEMAS GERAIS

A mobilidade dos usuários finais pode ser solucionada na camada IP por uma das três abordagens dominantes desenvolvidas no *Internet Engineering Task Force* (IETF): *mobile IP*, *migrate* e protocolo *host-identify*. O *mobile IP* funciona bem para redes grandes e já está consolidado. O problema de mobilidade de IP é facilmente resolvido e não impõe obstáculos.

Assim, as características consideradas críticas dessas redes são a escolha dos algoritmos de posicionamento das URAs e de roteamento dos dados na rede *wireless*.

Algoritmos de posicionamento e roteamento são apresentados em “*Hybrid Wireless-Optical Broadband-Access Network (WOBAN): A Review of Relevant Challenges*” (SARKAR, DIXIT e BISWANATH, 2007) e mais detalhadamente em “*Hybrid Wireless-Optical Broadband-Access Network (WOBAN): Network Planning and Setup*” (SARKAR, MUKHERJEE e DIXIT, 2006), juntamente aos resultados comparativos de sua aplicação em implementações práticas de WOBANs experimentais. Os resultados obtidos nesses testes apresentam algoritmos que solucionam o problema de roteamento de dados e de posicionamento das ERBS.

Outras características consideradas objetos de estudo são os padrões de comunicação e as técnicas de transmissão a serem utilizadas na parte óptica da WOBAN. Sendo a última o objeto de estudo deste trabalho. Antes de apresentar as arquiteturas simuladas e os resultados obtidos (próxima sessão), serão feitas algumas considerações acerca das técnicas de transmissão utilizadas.

7.2.1 TRANSPORTE ÓPTICO DE SINAIS *WIRELESS*

Existem basicamente três formas de transportar ondas de rádio frequência (RF) por guias ópticos: RF sobre fibra (RoF, ou *RF-over-Fiber*), FI sobre fibra (Frequência Intermediária sobre fibra, ou *IF-over-Fiber*) ou banda básica sobre fibra (ou *Baseband-over-Fiber*). Esses esquemas são ilustrados na Figura 17 e explicados a seguir (LIM, NIRMALATHAS, *et al.*, 2010).

Em RF sobre fibra, para transmissão *upstream*, o sinal RF recebido é diretamente levado ao modulador óptico (conversão eletro-óptica, E/O) para ser transmitido através da fibra óptica. O sinal óptico recebido no OLT é detectado (conversão óptico-elétrica, O/E), obtendo-se o sinal RF que será operado para banda básica. Para transmissão *downstream*, o sinal a ser enviado do OLT para a ERB passa por um modulador elétrico, originando o sinal RF, que será levado ao modulador óptico (conversão O/E), obtendo-se o sinal RF para ser transmitido.

Nesse caso, a grande vantagem é a simplicidade do sistema que opera nas ERBs tipo *gateway*, já que toda a complexidade é passada para a operadora. Por outro lado, é necessária modulação óptica de alta velocidade.

Para FI sobre fibra, o sinal RF recebido na ERB é convertido para baixo (*down conversion*), ou seja, para frequência intermediária, e em seguida sofre a modulação óptica (conversão E/O) para ser transmitido através da fibra. Ao ser recebido na OLT, o sinal óptico é detectado (conversão O/E) e convertido para a FI. Analogamente, o sinal gerado no OLT deve passar por modulação elétrica e conversão para frequência intermediária antes de ser modulado opticamente. Essa técnica reduz significativamente os efeitos de dispersão cromática. Por outro lado, é inserida complexidade nas ERBs tipo *gateway*, enquanto a complexidade no OLT também é mantida.

A transmissão utilizando banda básica sobre fibra pode fazer uso de tecnologias de transmissão óptica já conhecidas (TDM e WDM). O sinal recebido na ERB é demodulado (levado à banda básica), podendo receber tratamento de erros, e em seguida é modulado opticamente (conversão E/O). Ao ser recebido na OLT, o sinal é detectado (conversão O/E), obtendo-se o sinal na banda básica. Para o OLT, o sistema opera como uma rede óptica normal. Nesse caso, toda a complexidade de processamento é levada para a ERB, o que pode se tornar inviável dependendo da quantidade de ERBs tipo *gateway* que existam na rede.

As simulações apresentadas no próximo tópico correspondem aos casos de transmissão de banda básica sobre fibra (usando TDM e WDM) e transmissão de RF sobre fibra, utilizando sinais OFDM, conforme explicitado no padrão WiMAX.

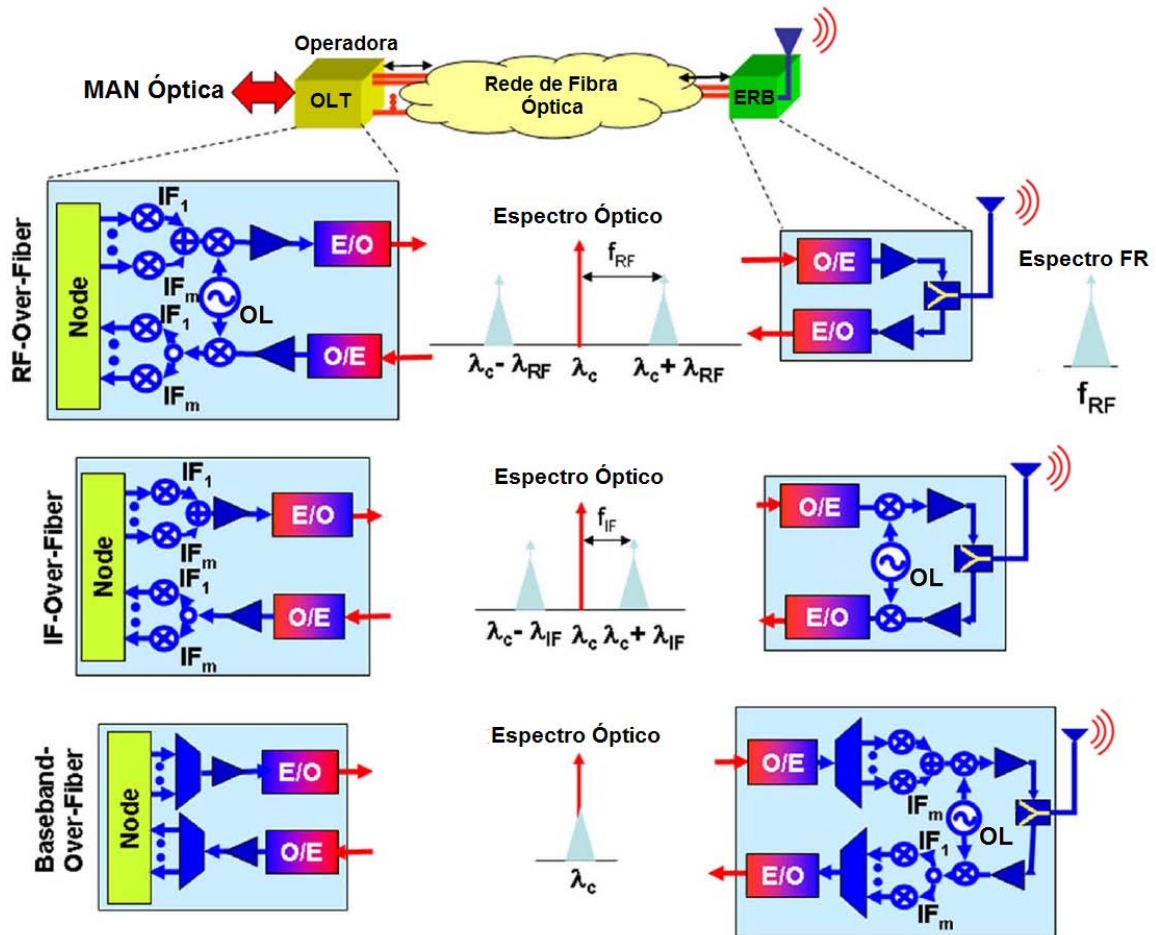


Figura 17 – Esquemas de transporte de sinais sem fio sobre fibra óptica (LIM, NIRMALATHAS, *et al.*, 2010).

8 SISTEMAS SIMULADOS E RESULTADOS

Levando em consideração as possíveis tecnologias de transmissão óptica para sinais sem fio, descritas na sessão anterior, foram realizadas simulações na plataforma ®VPITransmissionMaker 8.6 para os seguintes cenários:

- Tecnologia TDM com quatro canais;
- Tecnologia WDM com quatro canais;
- Tecnologia de rádio sobre fibra com quatro canais OFDM.

Os dois primeiros casos correspondem à escolha de transmissão dos dados em banda básica sobre fibra, enquanto o último corresponde à transmissão RoF. Para os diferentes cenários foram consideradas algumas características em comum:

- Enlaces de fibra óptica tipo DSF (*Dispersion Shifted Fiber*) com perda de inserção 0,2 dB/km);
- Moduladores ópticos de Mach-Zehnder (essencialmente modulador de amplitude);
- Lasers DFB (*Distributed Feedback*) de onda contínua e potência média de 1 mW;
- Fotodiodos tipo PIN;
- Método de análise estocástica de BER (estimativa de Gauss).

8.1 TDM-PON COM 4 CANAIS

As simulações para tecnologia TDM foram realizadas nas seguintes frequências centrais (ou comprimentos de onda) e taxas de transmissão, conforme estabelecido pelos padrões apresentados:

- 228,85 THz (ou 1310 nm): padrão GPON para uma fibra;
 - Taxa de 75 Mbps: leva em conta a possibilidade de modificação da taxa estabelecida pelo padrão;
 - Taxa de 2,48832 Gbps: correspondente à taxa típica do GPON *downstream* para uma fibra;
- 201,20 THz (ou 14900 nm): padrão GPON para duas fibras ou EPON;
 - Taxa de 75 Mbps: leva em conta a possibilidade de modificação da taxa estabelecida pelos dois padrões;
 - Taxa de 2,48832 Gbps: correspondente à taxa típica do GPON *downstream* para duas fibra;
 - Taxa de 1,25 Gbps: taxa típica do EPON *downstream*.

Observa-se que as taxas e frequências escolhidas correspondem à transmissão *downstream*. Esse será o único sentido de transmissão simulado, para efeitos de simplificação da análise dos dados.

O sistema montado é esquematizado de forma simplificada na Figura 18, consistindo em uma fonte de sequência binária aleatória (probabilidade de 0,5 para símbolo 1), um codificador de linha, sistema de modulação óptica, um combinador óptico, enlace de fibra óptica, um *splitter* e sistema de recepção.

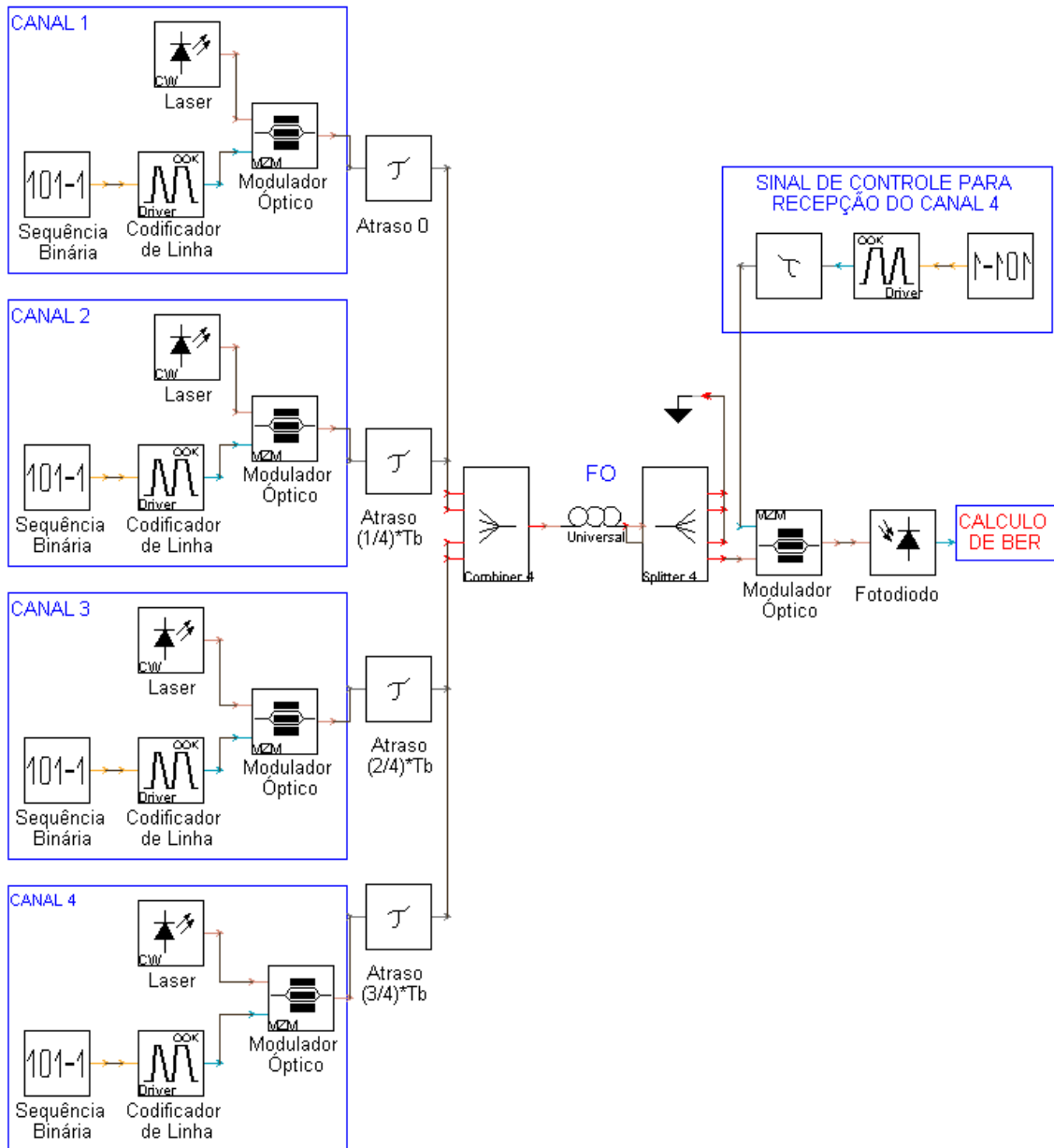


Figura 18 – Esquema simplificado de simulação para tecnologia TDM com 4 canais.

A codificação de linha utilizada é RZ, com *duty-cycle* de $\frac{1}{4}$, para possibilitar a separação dos sinais no domínio do tempo, impedindo superposição, e transição suave.

Os sinais são atrasados de um fator $((k - 1)/N)Tb$, sendo k o número do canal, Tb o tempo de bit (inverso da taxa de bit) e N o número total de canais.

O canal escolhido para recepção é o Canal 4. Assim, a recuperação do sinal pode ser feita utilizando o sinal óptico recebido como portadora do modulador Mach-Zehnder para modulação de um sinal de controle (pulsos unitários com mesmo *duty-cycle* e atraso correspondente ao Canal 4).

O cálculo de BER foi realizado por três diferentes configurações de blocos disponíveis, configuradas para os mesmos parâmetros, para garantir a confiabilidade da medição.

A Tabela 3 contém os valores de BER calculados para diferentes distâncias, que levam em conta a limitação de distância dos padrões TDM.

A taxa de transmissão de 75 MBps foi levada em consideração por ser a taxa máxima alcançada pela tecnologia WiMAX, já que quando sistema TDM opera conjuntamente com WiMAX, a taxa será limitada a 75 Mbps.

Tabela 3 – Ordem de grandeza da taxa de erro de bit (BER) para as configurações de rede TDM simuladas.

Frequência de Emissão	Taxa de Transmissão	5 km	10 km	15 km	20 km	Padrão de Referência
228,85 THz	75 Mbps	10^{-22}	10^{-21}	10^{-21}	10^{-21}	GPON (1 Fibra) com Taxa Modificada
	2,48832 Gbps	10^{-19}	10^{-17}	10^{-14}	10^{-11}	GPON (1 Fibra)
201,20 THz	75 Mbps	10^{-21}	10^{-20}	10^{-20}	10^{-20}	GPON (2 Fibras) / EPON com Taxa Modificada
	1,25 Gbps	10^{-18}	10^{-17}	10^{-16}	10^{-14}	EPON
	2,48832 Gbps	10^{-16}	10^{-14}	10^{-11}	10^{-9}	GPON (2 Fibras)

A Figura 19 ilustra uma amostra de sequência enviada e recebida para o Canal 4 operando a 228,85 THz, 75 Mbps e comprimento de 20 km para a fibra, e a Figura 20 ilustra o diagrama do olho para essas mesmas configurações.

Considerando o limite de operação para BER na ordem de 10^{-9} , os valores obtidos para o sistema implementado indicam que os parâmetros são implementáveis, já que o valor de BER não excedeu o critério de desempenho.

A detecção dos pulsos é ilustrada na Figura 19. Além da forte atenuação do sinal, é interessante observar que o sinal enviado está defasado do sinal recebido, pois ele sofre atraso de $\frac{1}{4} T_b$. Na recepção, o sinal é recuperado pelo controle de sincronismo inserido no sistema.

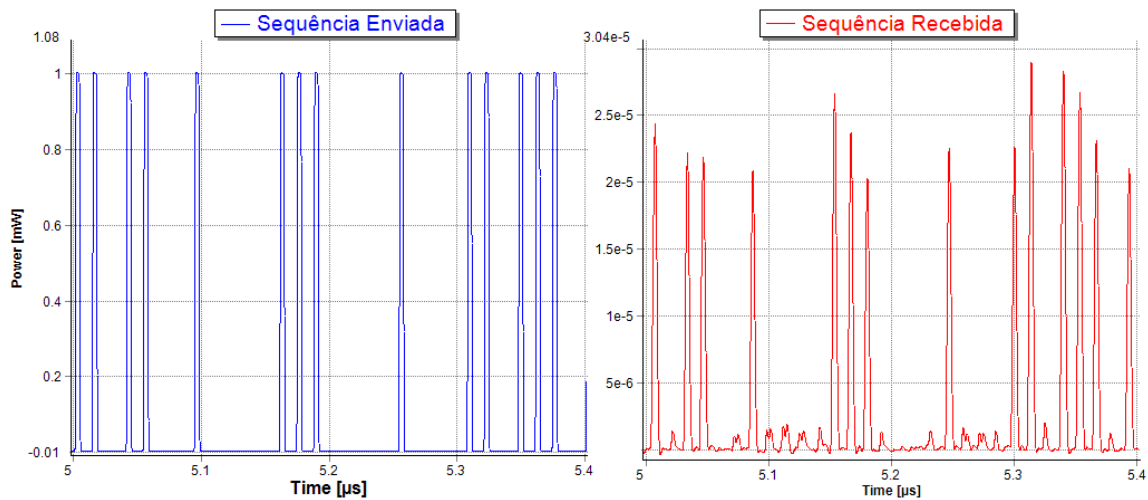


Figura 19 - Sequência enviada no domínio óptico (em azul à esquerda) e recebida (em vermelho à direita) para o Canal 4, com o sistema operando a 228,85 THz, 75 Mbps e comprimento de 20 km para a fibra.

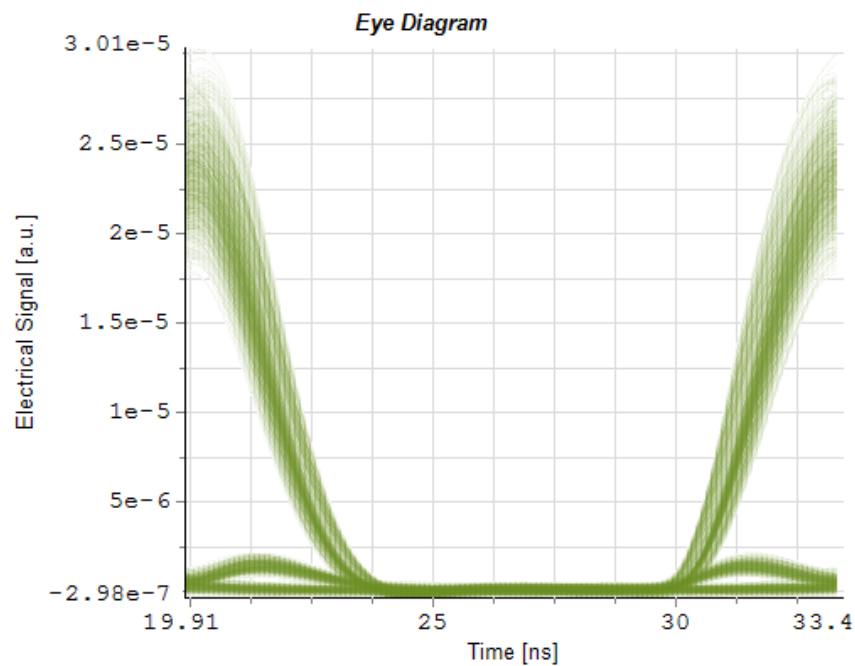


Figura 20 – Diagrama do olho para o Canal 4, com o sistema operando a 228,85 THz, 75 Mbps e comprimento de 20 km para a fibra.

8.2 WDM-PON COM 4 CANAIS

O esquema montado para simulação de transmissão WDM com quatro canais é mostrado na Figura 21.

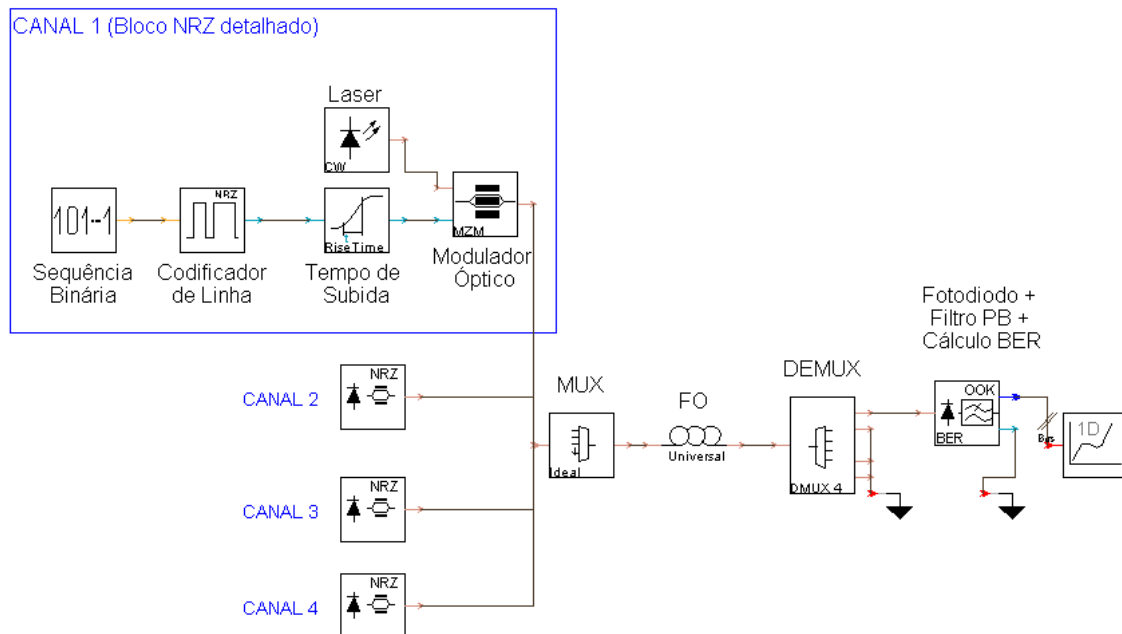


Figura 21 – Esquema para simulação de rede WDM com quatro canais.

O bloco “NRZ” mostrado para os canais 1, 2 e 3 é composto pelos blocos mostrados no Canal 1 e foi compactado para melhorar a visualização. A sequência binária aleatória gerada passa por um codificador de linha NRZ e em seguida por um bloco responsável pela suavização dos pulsos (bloco “Tempo de Subida”). O sinal resultante é então modulado na portadora óptica. As frequências de emissão para os lasers variam de forma a respeitar o espaçamento escolhido entre os canais e a frequência central. Os sinais modulados em portadoras espaçadas em torno da frequência central são multiplexados, passam pela fibra e em seguida são demultiplexados. No demultiplexador (bloco “DEMUX”), o espaçamento e a frequência central são levados em conta para separar os sinais e enviar cada um deles à saída correspondente. O Canal 1 é recebido, detectado pelo fotodiodo e filtrado por um filtro passa baixas (PB) (funções descritas pelo bloco “BER OOK”). Por fim, é realizado o cálculo da BER.

A frequência central escolhida foi 193,1 THz, correspondendo aos padrões WDM para redes ópticas. Foram realizados os cálculos de BER para taxa de

transmissão fixa de 10 Gbps, para diferentes comprimentos de fibra e espaçamento entre canais. Os valores de ordem de grandeza da BER calculada são mostrados na Tabela 4.

Para simulação com espaçamento entre canais de 100 GHz, e comprimento da fibra de 20 km, o espectro multiplexado é mostrado na Figura 22 e o diagrama de olho correspondente ao sinal recebido no Canal 1 é mostrado na Figura 23. A parte azul no espectro indica a banda dedicada ao Canal 1 (20 GHz).

Para espaçamento entre canais de 50 GHz, e comprimento da fibra de 20 km, o espectro multiplexado é mostrado na Figura 24 e o diagrama de olho correspondente ao sinal recebido no Canal 1 é mostrado na Figura 23. Novamente, a parte azul no espectro indica a banda dedicada ao Canal 1 (20 GHz).

Tabela 4 – Valores de ordem de grandeza da BER para rede WDM com 4 canais simulada.

Taxa de transmissão de 10 Gbps e frequência central 193.1 THz				
Espaçamento entre Canais	5 km	10 km	15 km	20 km
100 GHz	10^{-134}	10^{-73}	10^{-37}	10^{-26}
50 GHz	10^{-104}	10^{-59}	10^{-33}	10^{-25}

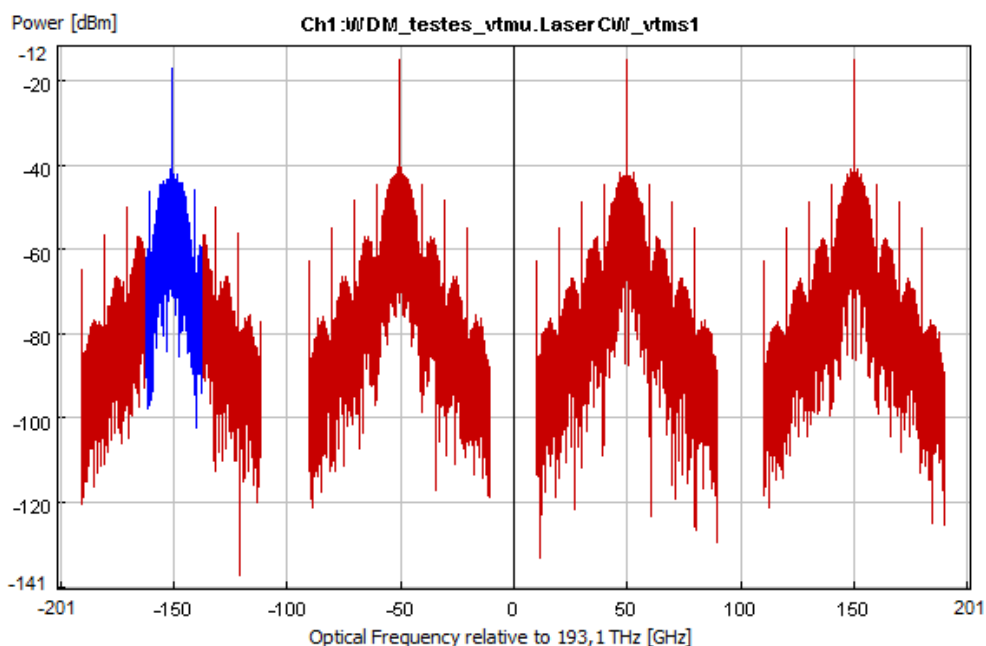


Figura 22 – Espectro para espaçamento de 100 GHz entre canais e comprimento da fibra de 20 km.

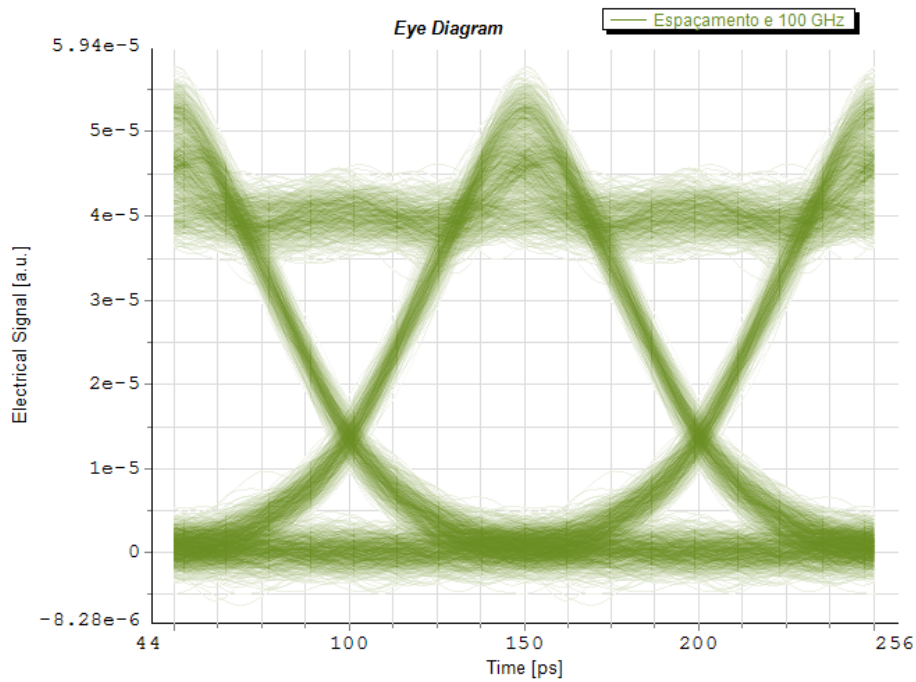


Figura 23 – Diagrama do olho para sinal recebido no Canal 1 da simulação WDM com espaçamento de 100 GHz entre canais e comprimento da fibra de 20 km.

De acordo com os valores de BER, observa-se que o sistema WDM implementado pode ser utilizado para transmitir 10 Gbps até 20 km sem exceder o limite estabelecido para BER (10^{-9}), utilizando espaçamento de 100 ou 50 GHz.

Como essa taxa é muito elevada para um usuário, os canais podem ser subdivididos utilizando TDM ou outra tecnologia (incluindo RoF).

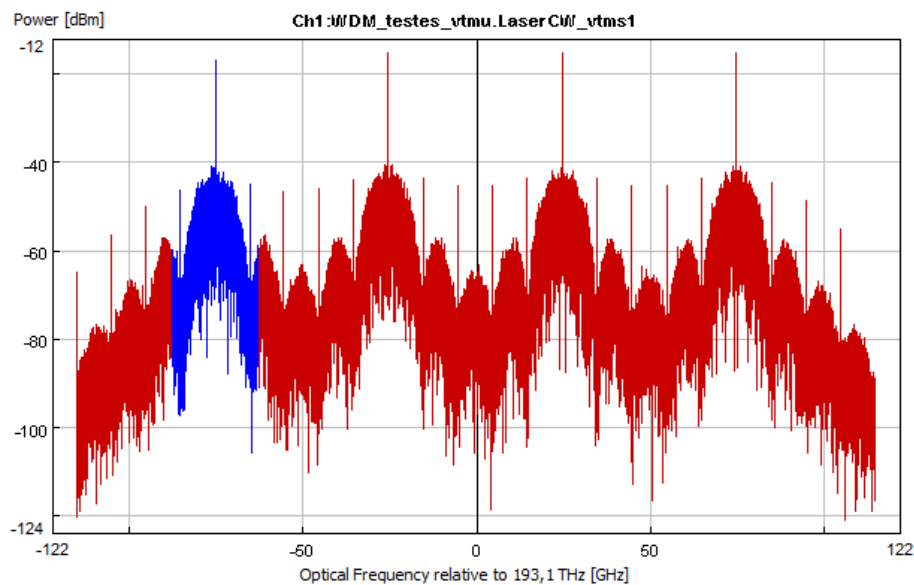


Figura 24– Espectro para espaçamento de 50 GHz entre canais e comprimento da fibra de 20 km.

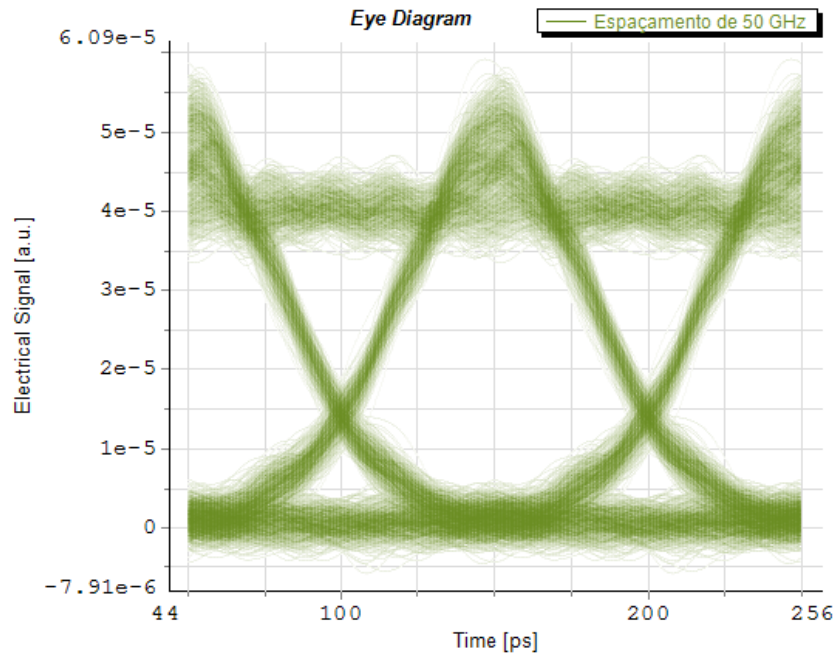


Figura 25 - Diagrama do olho para sinal recebido no Canal 1 da simulação WDM com espaçamento de 50 GHz entre canais e comprimento da fibra de 20 km.

8.3 ROF USANDO OFDM

Para simulação de transmissão RoF, foram utilizados quatro canais OFDM. Cada bloco OFDM gera um sinal diferente, correspondendo à modulação OFDM para uma sequência binária. Foram utilizadas 256 portadoras e codificação de cada portadora com 16 QAM, o que corresponde às características especificadas para WiMAX. A frequência de emissão para a portadora óptica utilizada foi 193,1 THz.

A portadora RF utilizada para o primeiro canal está centrada em 2 GHz, e as demais portadoras são centradas de acordo com o espaçamento de 20 MHz por canal.

Os sinais RF são somados, passam por um bloco responsável pelo controle do nível do sinal, e seguem para o modulador óptico. Após ser transmitido pela fibra, o sinal óptico é detectado pelo fotodiodo, passa pelo filtro PB e é então tratado pelo bloco receptor OFDM, que é responsável pelo cálculo da BER e pela obtenção da Constelação do sinal recebido. Na realidade, o sistema calcula a taxa de erro de símbolos (SER).

Os valores de SER obtidos são mostrados na Tabela 5. A Figura 27 ilustra o espectro resultante da soma dos quatro sinais OFDM e a Figura 28 ilustra a constelação para uma sub-portadora 16 QAM, com sistema operando a 75 Mbps. O espectro mostra claramente a distribuição das sub-portadoras OFDM.

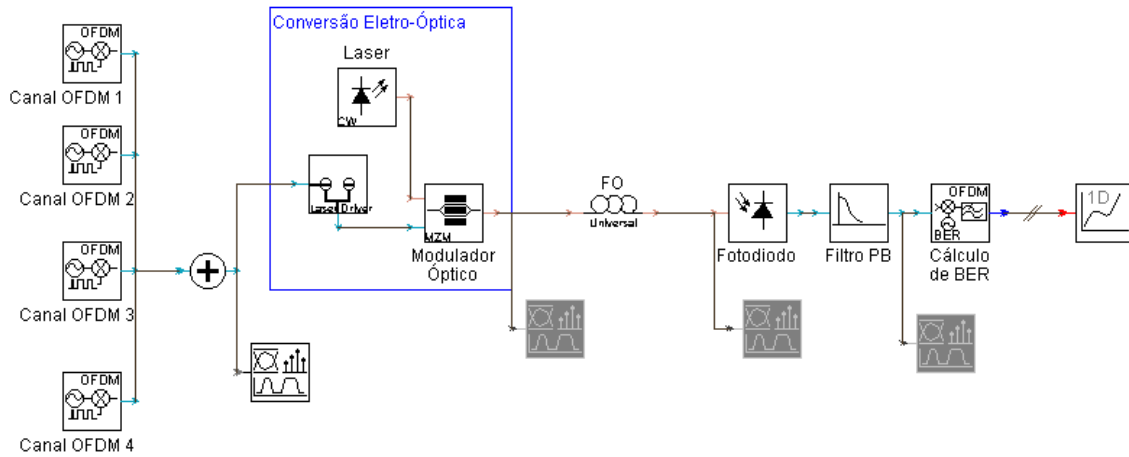


Figura 26 – Esquema para simulação de sistema RoF com quatro canais OFDM.

Tabela 5- Valores de ordem de grandeza da SER para rede RoF com 4 canais OFDM simulada.

Frequência óptica central 193,1 THz				
Taxa	5 km	10 km	15 km	20 km
30 Mbps	10^{-55}	10^{-50}	10^{-46}	10^{-42}
50 Mbps	10^{-53}	10^{-51}	10^{-47}	10^{-43}
70 Mbps	10^{-39}	10^{-38}	10^{-35}	10^{-30}
75 Mbps	10^{-8}	10^{-8}	10^{-8}	10^{-8}

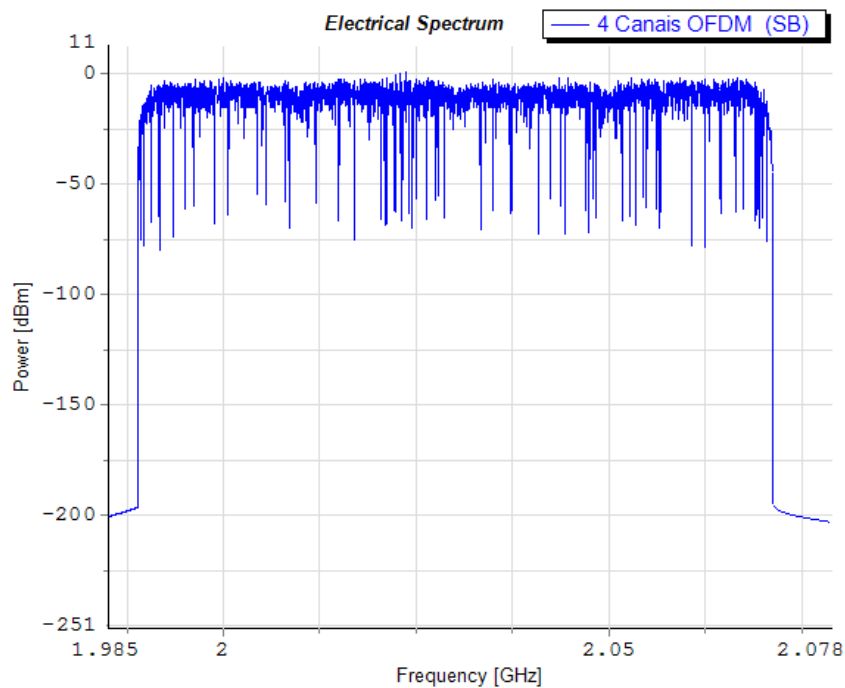


Figura 27 – Espectro para resultado da soma dos sinais originados pelos quatro canais OFDM.

A tabela mostra que ocorre uma queda brusca de desempenho entre 70 e 75 Mbps. Para 72 Mbps, com 20 km de fibra, a ordem de grandeza calculada para BER foi de 10^{-24} . A constelação do sinal também indica queda de desempenho, já que os símbolos recebidos não se concentram em torno dos representantes da constelação ideal.

Como os valores de BER estão bem abaixo do limite de desempenho para taxas menores que 75 Mbps, esse sistema pode ser usado para compor canais WDM da rede simulada no tópico anterior.

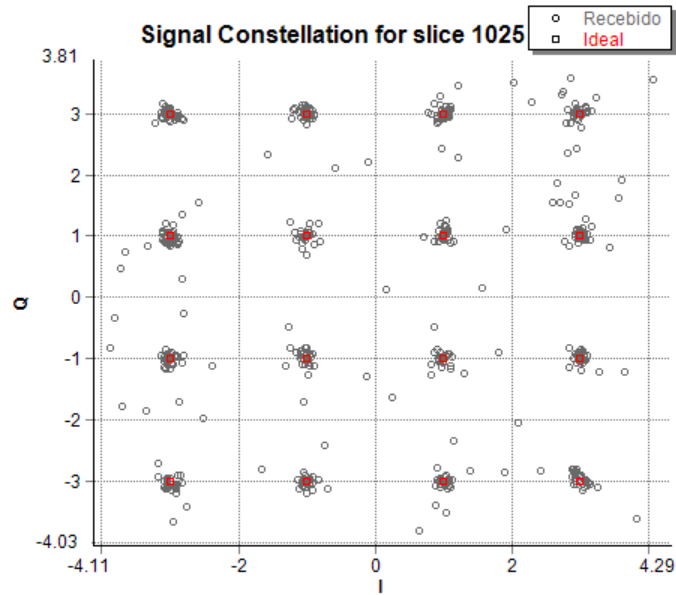


Figura 28 – Constelação referente à taxa de 75 Mbps para 20 km de fibra. Os símbolos recebidos (cinza) se espalham bastante em torno da constelação ideal (vermelho).

9 CONCLUSÃO

Um estudo sobre tecnologias para uma rede de acesso de faixa larga híbrida óptica/sem fio é apresentado. Levando em consideração as possíveis tecnologias de transmissão óptica para sinais sem fio, três alternativas são avaliadas: TDM-PON, WDM-PON e radio sobre fibra. Para os cenários implementados, são apresentados resultados numéricos para o desempenho em nível físico dessas alternativas. Foram escolhidas algumas características em comum nesses dois casos, tais como fibra óptica utilizada (fibra DSF – *Dispersion Shifted Fiber* – com atenuação 0,2 dB/km, padrão ITU-T G.652), moduladores ópticos envolvidos (Mach-Zehnder, que é essencialmente um modulador de amplitude), lasers (DFB, de onda contínua), fotodiodos (tipo PIN) e métodos de análise de BER (estimativa estocástica de Gauss). Para a integração fibra-rádio, foram considerados aspectos da transmissão *downstream* (sentido operadora-usuários) para a escolha dos parâmetros descritos nos padrões (taxa máxima para WiMAX de 75 Mbps, frequências e taxas de transmissão para GPON e EPON).

Os resultados obtidos sugerem a continuação do trabalho com implementação de um cenário contemplando a efetiva integração WDM-PON com RoF e WDM-PON com TDM-PON. Os sistemas simulados permitem implementação desses cenários pela combinação das estruturas já obtidas.

Bibliografia

AGRAWAL, G. P. **Fiber-Optic Communication Systems**. Hoboken, NJ: Wiley, 2002.

ANDREWS, J. G.; GHOSH, A.; MUHAMED, R. **Fundamentals of WiMAX**. Westford, Massachusetts: Pearson, 2007.

FARIAS, J. E. P. **Anais do XXVII SBrT**. Rede óptica passiva usando TDM e WDM. Blumenau: [s.n.]. 2009.

FARIAS, J. E. P. et al. Cidades Inteligentes e Comunicações. **Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação**, p. 28-32, 2011.

GORSHE, S. **Introduction to Passive Networks (PON)**. PCM - Sierra, Inc. [S.l.]. 2006.

HANATANI, S. **Sessão Especial OSA/IEEE OFC/NFOEC 2011**. FTTH around the World: Today and Tomorrow. Los Angeles, CA: [s.n.]. Março 2011.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Redes de Computadores e a Internet**. São Paulo: Pearson, 2006.

LIM, C. et al. Fiber-Wireless Networks and Subsystem Technologies. **Journal of Lightwave Technology**, 15 Fevereiro 2010. 390-405.

LIMA, L. S.; SOARES, L. F. G.; ENDLER, M. **WiMAX: Padrão IEEE 802.16 para Banda Larga Sem Fio**. Rio de Janeiro. 2004.

MCKINLEY, M. D. et al. **EVM Calculation for Broadband Modulated Signals**. 64th ARFTG Conf. Dig. Orlando, FL: [s.n.]. 2004. p. 45-52.

NUAYMI, L. **WiMAX Technology for Broadband Wireless Access**. West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2007.

PINTO, E. L.; PENEDO, C. P. A Técnica de Transmissão OFDM. **Revista do INATEL**, Junho 2002. 1-10.

PROAKIS, J. G.; MASOUD, S. **Digital Communications**. Singapura: McGraw-Hill, 2008.

SARKAR, S. et al. Hybrid Wireless-Optical Broadband-Access Network (WOBAN): Network Planning and Setup. **IEEE/OSA Journal on Selected Areas in Communications**, Agosto 2008. 12-21.

SARKAR, S.; DIXIT, S.; BISWANATH, M. Hybrid Wireless-Optical Broadband-Access Network (WOBAN): A Review of Relevant Challenges. **IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology**, Novembro 2007. 3329-3340.

SARKAR, S.; MUKHERJEE, B.; DIXIT, S. **Optimum placement of multiple optical network units (ONUs) in optical-wireless hybrid access networks**. OFC. Anaheim, CA: [s.n.]. 2006.

THE FIBER OPTIC ASSOCIATION, INC. The Fiber Optic Association - Tech Topics. **The Fiber Optic Association, Inc. the non-profit professional society of fiber optics**, Outubro 2003. Disponível em: <<http://www.thefoa.org>>. Acesso em: 20 Agosto 2011.