



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

RAPHAEL TAVARES DE ALENCAR

**SIMULAÇÃO DE REDES DE ACESSO HÍBRIDAS PARA  
CIDADES INTELIGENTES**

Campina Grande, Paraíba  
Julho de 2012

RAPHAEL TAVARES DE ALENCAR

# SIMULAÇÃO DE REDES DE ACESSO HÍBRIDAS PARA CIDADES INTELIGENTES

*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: Processamento de Informação

Orientador:

Professor José Ewerton P. de Farias, Dr.

Campina Grande, Paraíba  
Julho de 2012

RAPHAEL TAVARES DE ALENCAR

# SIMULAÇÃO DE REDES DE ACESSO HÍBRIDAS PARA CIDADES INTELIGENTES

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: Processamento de Informação

Aprovado em \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

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

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores que me ensinaram muito mais que as ementas de seus cursos. Agradeço a meus pais pela mesma coisa.

Sou grato ao professor Dr. José Ewerton pela atenção e empenho durante a orientação desse trabalho.

Agradeço a Ísis, Pedro, Leonardo e Tyago pelo apoio e amizade durante todo o projeto. A minhas amigas Yonatha, Mariana e Daphne. Também exprimo minha gratidão a Ranayana, pela ajuda.

Agradeço também ao pessoal do DEE pela exímia dedicação aos alunos.

“O degrau da escada não foi inventado para repousar, mas apenas para sustentar o pé o tempo necessário para que o homem coloque o outro pé um pouco mais alto”

Aldous Huxley.

## RESUMO

O conceito de Cidades Inteligentes é relacionado ao desenvolvimento inteligente, usando infraestruturas baseadas em tecnologias da informação e da comunicação avançadas. A comunicação é um dos pilares dentro desse conceito, pois permite prover diversos serviços aos cidadãos, como: controle de trânsito, vigilância, saúde, educação etc. Dentro do tema de comunicações, as três principais exigências quanto à banda em serviços de internet tendem para: a convergência de serviços de voz, dados, vídeos, multimídia interativa na mesma rede; convergência de Redes metropolitanas DWDM com redes de longa distância; e a convergência de redes sem fio com redes ópticas em redes de acesso. Dentre as problemáticas, a que motiva esse trabalho é a necessidade de uma estrutura para comunicações robusta e flexível. Assim, o desenvolvimento de redes de acesso híbridas de faixa larga (WOBANs) é importante por ser uma estrutura capaz de garantir ampla cobertura e penetração de acesso a altas taxas. Uma WOBAN consiste de uma associação de dois meios de transmissão de dados óptica e sem fio, em que há um *back end* composto de uma rede óptica passiva que termina em um ponto relativamente próximo do usuário, onde se inicia um *front end* com rede sem fio. Para a parte sem fio, um maior detalhamento é dado à tecnologia WiMAX (*Wireless Interoperability for Microwave Access*) por garantir distâncias de até 50 km entre usuários e taxas de até 75 Mbps. Relativo à parte óptica, o estudo de formas de multiplexação distintas, TDM, WDM e a composição de ambas para melhor aproveitar a capacidade das fibras é desenvolvido. Há três formas de transporte dos sinais de radiofrequência nas fibras: RF sobre fibra (RoF); Frequência Intermediária sobre fibra e banda básica sobre fibra. São mostrados resultados de simulações de redes híbridas para as diferentes multiplexações e tecnologias envolvidas de forma a caracterizar as distâncias, capacidades e números de usuários e de canais máximos atingíveis nesse tipo de rede de acesso voltado para a utilização em cidades inteligentes.

**Palavras-chave:** Redes Híbridas, WOBAN, RoF, WiMAX.

## ABSTRACT

The concept of Intelligent Cities is related to intelligent development, using infrastructures based on advanced information and communication technologies. Communication is one of the pillars associated to this concept, for it allows to provide many services to the citizens, such as: traffic control, health, education etc. Concerning the subject of communications, the three principal demands related to the band in internet services are: the convergence of voice, data, video and interactive multimedia services in the same network; convergence of DWDM Metropolitan Access Networks with long-haul networks; and the convergence of wireless and optical networks. The issue that motivates this work is the necessity of a structure for robust and flexible communications. Therefore, the development of hybrid Wireless Optical Broadband Access Networks (WOBANs) is important since it is a structure capable of guaranteeing an ample coverage and access penetration, at high transmission rates. A WOBAN consists of an association of two data transmission mediums, optical and wireless, in which there is a back end composed of a passive optical network that ends at a point relatively close to the user, where a wireless front end begins. For the wireless part, more importance is given to WiMAX technology, which allows distances between users up to 50 km and rates up to 65 Mbps. As for the optical portion, a study is conducted considering distinct multiplexing forms, TDM, WDM and a composition of both to better take advantage fiber capacity. There are three forms of transport of RF signals: RF over Fiber; Intermediate Frequency over Fiber; and Baseband over Fiber. Results and simulations of hybrid networks for different multiplexing schemes and technologies involved are shown in order to characterize the maximum attainable distances, capacity and number of users and channels in this kind of access network directed to utilization in intelligent cities.

**Keywords:** Hybrid Network, WOBAN, RoF, WiMAX.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema da proposta do projeto.....	2
Figura 2 – Exemplo de arquitetura para uma rede híbrida.....	4
Figura 3 – Diferentes esquemas FTTx .....	6
Figura 4 – Rede Óptica Ativa com configuração em estrela .....	7
Figura 5 – Rede Óptica Passiva com configuração em estrela .....	8
Figura 6 – Separação de canais no tempo: cada canal corresponde a uma janela de $T_B/4$ .....	9
Figura 7 – Arquitetura TDM-PON .....	10
Figura 8 – (a): Codificação RZ da sequência binária. (b): Codificação NRZ da sequência binária .....	10
Figura 9 – Janelamento para esquema TDM de 4 usuários, com uso da codificação de linha RZ .....	11
Figura 10 – Diferentes tipos de codificação de linha .....	12
Figura 11 – Sistema WDM .....	17
Figura 12 – Esquema de um AWG .....	18
Figura 13 – Esquema de transmissão WDM. Nesse caso a fibra comporta 16 canais .....	18
Figura 14 – Espaçamento entre canais num sistema DWDM .....	21
Figura 15 – Exemplo de arquitetura para uma rede híbrida .....	23
Figura 16 - Custos médios de posicionamento de URAs em Wildhorse .....	25
Figura 17 - Atraso médio de pacotes em função do tráfego na SFNet .....	27
Figura 18 - Perda de pacotes na ocorrência de falha em URA na SFNet .....	27
Figura 19 – Funcionamento da Conexão WiMAX .....	30
Figura 20 – Modulação FDM .....	33
Figura 21 – Constelações 8QAM e 16QAM .....	34
Figura 22 – Modulação OFDM .....	34
Figura 23 – Modulação OFDMA .....	35
Figura 24 – Comparação entre as modulações OFDM e OFDMA .....	36
Figura 25 – Esquemas de transporte do sinal RF na fibra óptica .....	37
Figura 26 – Descrição dos parâmetros gráficos do Diagrama de Olho.....	39
Figura 27 – Constelação ideal para 16 QAM.....	40
Figura 28 – Esquema da simulação TDM, em que há $N$ canais TDM e um canal óptico.....	42
Figura 29 – Sistema RoF com $N$ canais OFDM e um canal óptico.....	44
Figura 30 – Constelação recebida para canal 1, 20 km e taxa de transmissão de (a) 70 Mbps e (b) 75 Mbps.....	45
Figura 31 – Espectro de potência para o sinal RF com taxa de transmissão de (a) 70 Mbps e (b) 75 Mbps.....	46
Figura 32 - Sistema WDM com $N$ canais ópticos.....	47
Figura 33 – Espectro para espaçamento de 100 GHz entre canais e comprimento da fibra de 20 km. ....	48
Figura 34 – Diagrama do olho para sinal recebido no sistema WDM de 4 canais e comprimento da fibra de 20 km.....	49



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas de Frequência para WiMAX no Brasil.....	31
Tabela 2 – Comparação entre os protocolos IEEE 802.16d e 802.16e.....	32
Tabela 3 – Ordem de grandeza da BER obtidas na simulação TDM (4 e 8 canais).....	43
Tabela 4 – Ordem de grandeza da BER obtidas na simulação RoF (4 e 8 canais).....	45
Tabela 5 – Ordem de grandeza para BER na simulação WDM (4 e 8 canais).....	48

## 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, *tc* e o tempo de bit *TB*
- 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 Vizinhaça)
- 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

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	vi
Abstract .....	vii
Lista de Ilustrações.....	vii
Lista de Tabelas.....	<b>iErro! Indicador não definido.</b>
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	x
1 Cidades Inteligentes .....	1
2 Redes Ópticas de Acesso .....	5
2.1 TDM-PON .....	9
2.1.1 BPON (SERIE ITU-T G.983).....	13
2.1.2 GPON (SERIE ITU-T G.984) .....	13
2.1.3 EPON (SERIE IEEE 802.3ah).....	15
2.1.4 10 G-PON (SERIE ITU-T G.987) .....	15
2.1.5 10G-EPON (SERIE IEEE 802.3av).....	16
2.2 WDM-PON.....	16
2.2.1 WDM (SÉRIE ITU-T G.692).....	19
2.2.2 CDWM (SÉRIE ITU-T G.694.2).....	20
2.2.3 DWDM (SÉRIE ITU-T G.694.1).....	20
3 Redes Híbridas .....	22
4 WiMAX sobre Fibra .....	29
4.1 Características da Modulação OFDM .....	33
4.1.1 Modulação FDM.....	33
4.1.2 Modulação OFDM.....	33
4.1.3 Modulação OFDMA .....	35
4.2 WiMAX Sobre Fibra .....	36
5 Análise de Simulações .....	39
5.1 Simulações e Resultados .....	40
5.1.1 TDM-PON .....	41
5.1.2 RoF-PON .....	42
5.1.3 WDM-PON.....	47
6 Conclusões .....	50
Bibliografia .....	52

# 1 CIDADES INTELIGENTES

Cidades Inteligentes pode ter vários significados, como um equivalente de cidade digital, cidade da informação, cidade conectada, telecidade, cidade baseada no conhecimento ou comunidade eletrônica.

O conceito de cidades inteligentes é relacionado ao desenvolvimento social baseado nas tecnologias da informação e da comunicação. Comunidade Inteligente é aquela que faz um esforço consciente para usar a tecnologia da informação para transformar a vida e o trabalho dentro de seu território de forma significativa e fundamental, em vez de seguir uma forma incremental.

O objetivo principal é a qualidade de vida dos cidadãos – o que envolve diversos domínios, como a medicina, educação, mobilidade humana, comunicação, sustentabilidade etc. Nesse âmbito, a tecnologia tem um papel fundamental, servindo para interconectar em tempo real sistemas como energia, transporte e segurança, aumentando a eficiência dos sistemas, como por exemplo: a abertura de todos os sinais de trânsito para que se facilite o deslocamento de uma ambulância em emergências (TAURION C., 2011).

Em 2011, mais da metade da população mundial já vivia em cidades e mais 5 milhões de pessoas passam a viver em cidades todo mês. Estima-se que em 2050, no mínimo 70% da população estará concentrada em cidades. Então a implantação de cidades inteligentes não é um processo que ocorre naturalmente, mas deve ser planejado, levando em conta a otimização de capacidade das infraestruturas urbanas.

Utilizando infraestruturas de TIC (Tecnologia da Informação e Comunicação) avançadas, já existem cidades inteligentes hoje que disponibilizam serviços em áreas metropolitanas de dezenas de países, como no Canadá, onde a província de Quebec iniciou em 1997 uma política de Centros de Desenvolvimento de Tecnologias e Informações (CDTI).

Na Figura 1 é ilustrado o encadeamento dos principais elementos da proposta de construção de cidades inteligentes.



Figura 1 – Esquema da proposta do projeto. ([CIA]<sup>2</sup>, 2012)

Uma arquitetura possível de cidade inteligente voltada para serviços inteligentes tem as camadas (FARIAS, J. E. *et al*, 2011):

- 1- **Camada de fornecedores e usuários de serviços** – Compreende os usuários finais, grupos de usuários finais, funcionários.
- 2- **Camada de serviços** – Contém aplicações em software que entregam serviços e informação para cidadãos e empresas. Interage com a camada 1 por meio de uma interface-padrão que coleta os serviços da cidade inteligente e evita replicação de informação.
- 3- **Camada de Gerência** – Define arquitetura, políticas e regras operacionais da cidade inteligente.
- 4- **Camada de Infra-estrutura** – Inclui redes de faixa larga (óptica metropolitana, redes ópticas passivas de acesso, WiMax e WiFi), sistema de transportes inteligente, locais de acesso público à cidade inteligente.
- 5- **Camada de Informação** – Refere-se aos dados públicos e privados criados e armazenados, centros de armazenagem, armazenagem móveis, e demais repositórios de informação.

Dentre as diversas problemáticas a serem solucionadas objetivando cidades inteligentes, a que motiva esse trabalho é a necessidade de uma estrutura para comunicações robusta e flexível. A comunicação é um dos pilares dentro do conceito de cidades inteligentes, pois permite prover diversos outros serviços aos cidadãos, tais como trânsito, vigilância, atendimento de emergência, monitoramento ambiental, saúde, educação e inclusão digital, bem como permitir uma maior eficiência e transparência na gestão pública.

Dentro do tema de comunicações, três tendências nas exigências com relação às taxas de transmissão em serviços de internet são:

- Convergência de serviços de voz, dados, vídeos, multimídia interativa numa mesma rede.
- Convergência de Redes metropolitanas DWDM com redes WAN(longas distâncias).
- Convergência de redes sem fio com redes ópticas, no âmbito das redes de acesso. Essa tendência é o objeto principal da pesquisa.

O papel de redes híbridas – parte óptica/parte sem-fio, detalhadas na Seção 2 – em cidades inteligentes é o de garantir ampla cobertura e penetração de acesso a altas taxas, o que é de extrema importância para os serviços previstos em ambientes de cidades inteligentes.

As redes híbridas se baseiam na combinação de um *back end* composto de uma rede óptica que termina em um ponto relativamente próximo do usuário, onde se inicia um *front end* com rede sem fio. Isso é, na transmissão de dados a taxas de Giga ou Tera bps em redes ópticas passivas (PON) até estações-base (BS) em pontos da cidade e na subsequente transmissão sem fio partindo das BSs, o que resulta em uma flexibilidade de acesso dos usuários dentro das cidades.

Na Figura 2 vê-se um exemplo de arquitetura para uma rede híbrida, compondo a infraestrutura de cidades inteligentes. Em que vê-se estações base e unidades de rede de acesso (em vermelho e azul), interligadas em uma rede sem fio enquanto a operadora (OLT) faz a comunicação através de redes ópticas passivas.

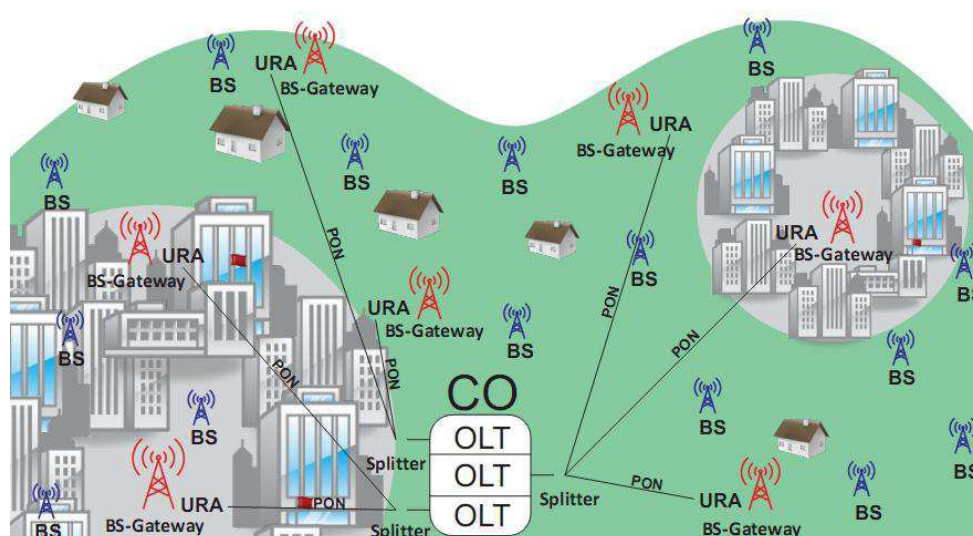


Figura 2 – Exemplo de arquitetura para uma rede híbrida  
(FARIAS, J. E. *et al*, 2011).

## 2 REDES ÓPTICAS DE ACESSO

Uma rede de acesso é a rede local em cidades que faz a conexão entre diferentes usuários e a operadora, que é ligada ao núcleo da rede. Interessa-nos particularmente as características da camada física da rede. As redes de acesso são mais comumente compostas de cabos coaxiais (usando tecnologia do modem a cabo), fios de cobre (tecnologia DSL), linhas de energia (PLC), fibras ópticas ou conexão sem fio.

Com o crescimento exponencial do tráfego na internet, tornou-se necessário trocar as tecnologias mais comuns – de DSL e cabos coaxiais por uma tecnologia mais robusta. As limitações físicas dessas tecnologias tornam a rede de acesso um gargalo nas redes de comunicação e as aplicações emergentes como Vídeo sob Demanda (VoD), HDTV, cinema digital, Educação sob Demanda (EoD), esquemas de vigilância *on line*, jogos interativos e transmissão de áudio com alta qualidade tornam inviável a continuação do uso dos cabos e fios de cobre.

Nesse contexto, a alternativa mais viável atualmente é a de substituição dessas tecnologias pelas redes ópticas de acesso, que possuem maiores taxas de transmissão bidirecional (tanto *upstream*, direção usuário-operadora quanto *downstream*, direção operadora-usuário) e menores taxas de erro. Além disso, as redes ópticas permitem maiores distâncias entre os usuários e a operadora (5,5 km do DSL comparados a 20 km para redes ópticas passivas) e é torna mais fácil fazer ampliações para taxas mais elevadas ou implantação de canais adicionais.

Na rede óptica de acesso, a camada física é composta por guias de onda ópticos e a camada de enlace por enlaces ópticos. As fibras ópticas são transparentes e por isso têm taxas de transmissão simétricas. A capacidade das fibras ópticas permite prover o chamado serviço *triple-play*, de voz, vídeo e dados em um mesmo canal.

As redes ópticas são organizadas no modelo FTTx (*fiber to the – Node, Home, Curbe, Bulding, Cabinet etc*), de acordo com o ponto de terminação da rede, associado à distância alcançada pela fibra óptica com relação ao usuário final, como indicado na Figura 3.

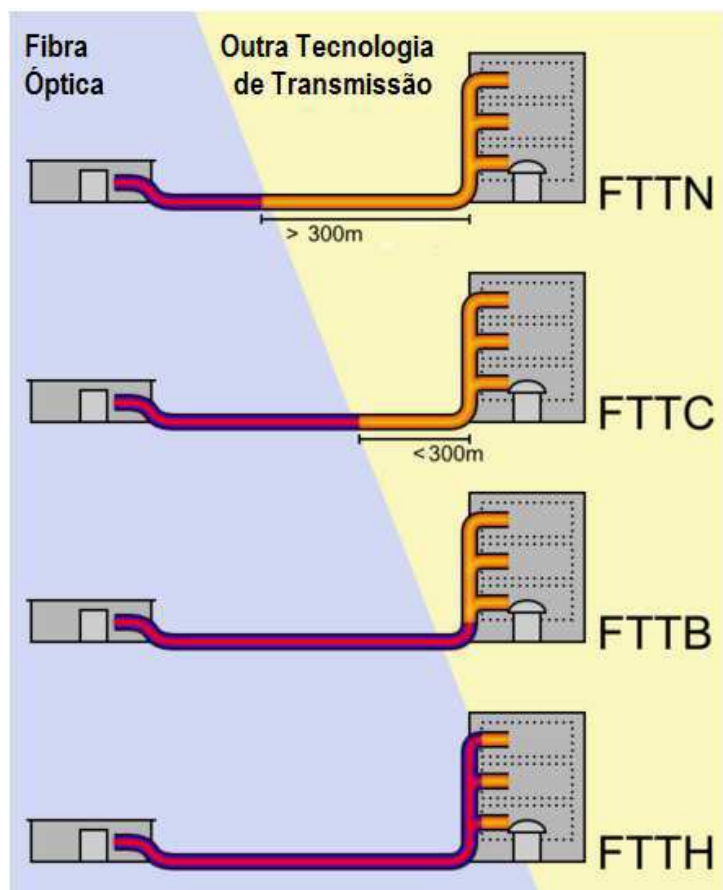


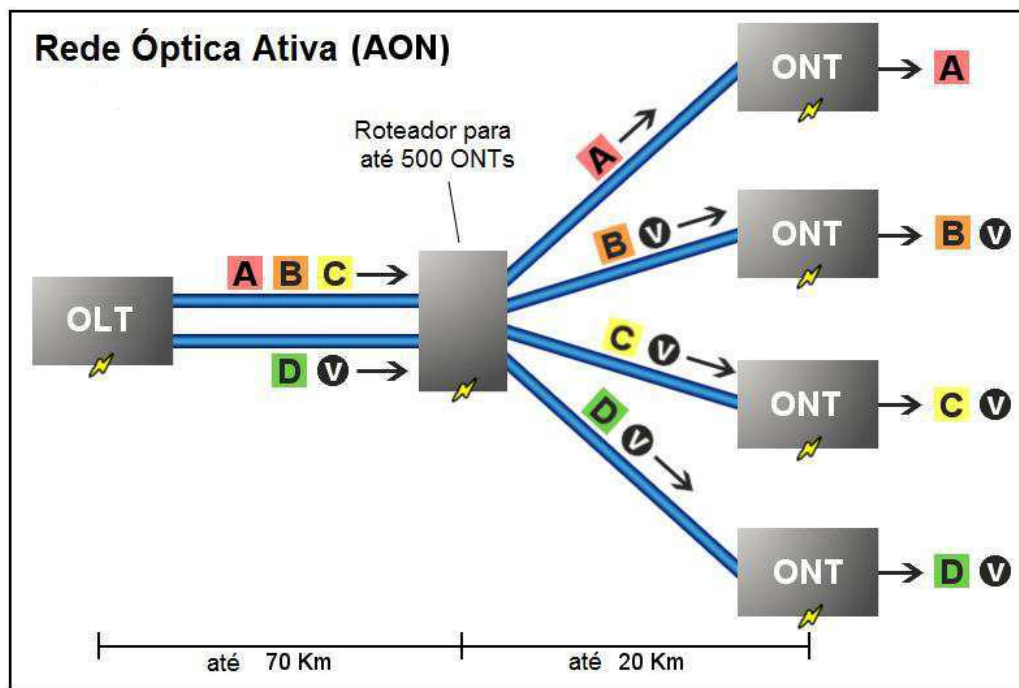
Figura 3 – Diferentes esquemas FTTx. (WIKIPEDIA, 2007)

Os sinais ópticos são transportados da operadora até um ponto próximo do usuário final, o terminal da rede óptica (ONT – *Optical Network Unit*), ou ONU (*Optical Network Unit*), em português URA (*Unidade de Rede de Acesso*). Em esquemas utilizando fibra óptica na topologia ponto-multiponto, diversos usuários compartilham uma fibra até um determinado nó remoto (NR). A partir desse NR cada usuário dispõe de um enlace óptico próprio.

As redes ópticas podem ser ativas ou passivas, de acordo com os componentes usados nos NRs, dependendo se eles são eletricamente alimentados ou não. A arquitetura que requer componentes alimentados em potência é chamada Rede Óptica Ativa (AON – *Active Optical Network*). Os elementos ativos podem ser roteadores ou *switches*, além de amplificadores ativos. Uma AON em configuração tipo estrela pode ser vista na Figura 4. Nessa topologia, a rede faz a multiplexação dos dados para até 500 URAs (*multicasting*) mediante o uso de um roteador ativo, de forma que cada enlace a partir do roteador contém apenas as informações associadas aos respectivos usuários.



Observa-se também que os comprimentos das fibras podem ser maiores (até 90 km da operadora às URAs).



**A** - Sinal de Dados ou Voz para um usuário      **V** - Sinal de Vídeo para múltiplos usuários

Figura 4 – Rede Óptica Ativa com configuração em estrela.

Por outro lado, a Rede Óptica Passiva (PON – *Passive Optical Network*), em vez de usar um *switch* ativo, usa um separador (*splitter*) passivo. A PON é constituída apenas de componentes passivos como, além do separador, combinadores, *couplers*. Uma PON em configuração tipo estrela pode ser vista na Figura 5. Na topologia mostrada, o uso de múltiplos *splitters* (que podem ser conectados até 32 URAs cada) permite replicar os dados vindos da operadora para todas as URAs associadas, nessa caso, cabe à URA filtrar quais dados devem ser enviados aos usuários associados. Nesse caso, o comprimento da fibra é necessariamente menor que no para a rede ativa, devido à ausência de elementos ativos, podendo a distância ser de até 20 km.

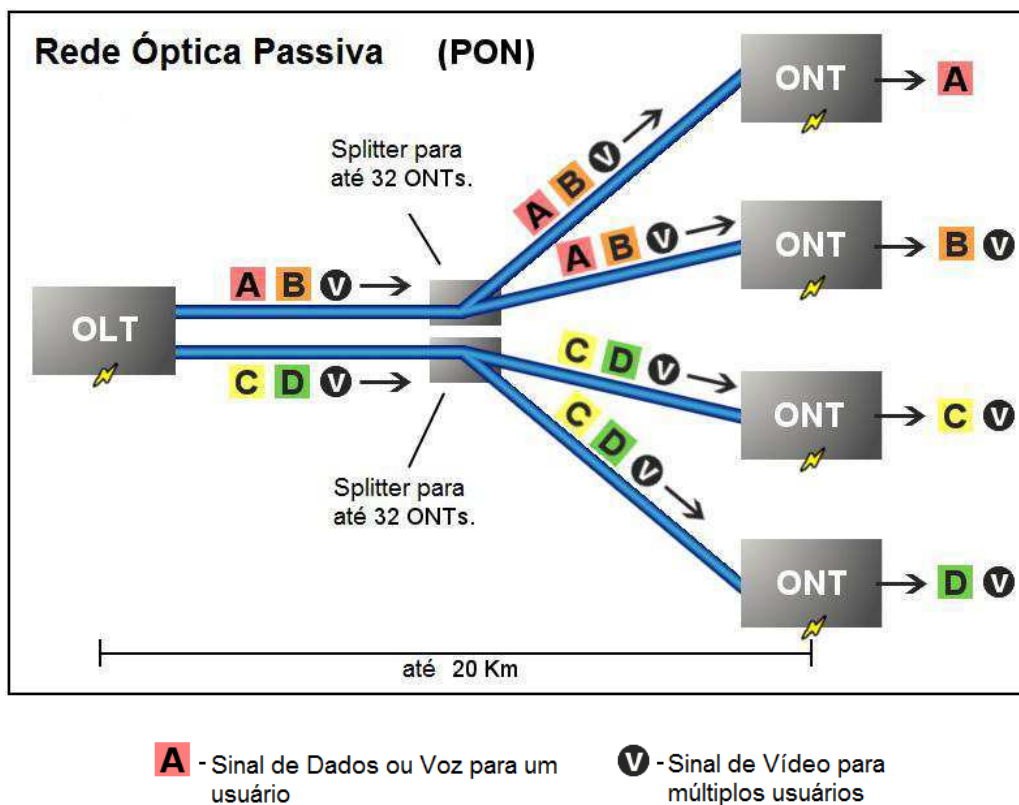


Figura 5 – Rede Óptica Passiva com configuração em estrela.

A vantagem em utilizar PONs é que a implantação de uma rede óptica passiva é relativamente simples, sem haver a necessidade da instalação de multiplexadores e demultiplexadores nos pontos de separação, de forma a também reduzir os esforços de manutenção e alimentação dos circuitos, e os componentes ativos podem ser enterrados no solo durante a instalação. Além disso, operação e ampliações do sistema são mais fáceis e econômicas.

A solução de acesso óptico mais difundida é a multiplexação por divisão no tempo (TDM – *Time Division Multiplexing*). E, alternativamente, a PON baseada em multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) explora de forma mais eficiente a capacidade da fibra óptica, sem necessariamente fazer grandes alterações na infraestrutura da rede.

O detalhamento de ambas as soluções de acesso em redes ópticas (TDM- e WDM-PON) são abordadas nas Seções 2.1 e 2.2.

## 2.1 TDM-PON

Muitos países têm adotado a primeira geração de TDM-PONs, que fornece taxas de dados para *downstream* de até 1,25Gbps. Nesse esquema, o envio simultâneo de diversos sinais é feito basicamente a partir da divisão de canais no tempo. Como mostrado na Figura 6, o tempo de transmissão de um *bit*,  $T_B$ , é dividido em janelas temporais.

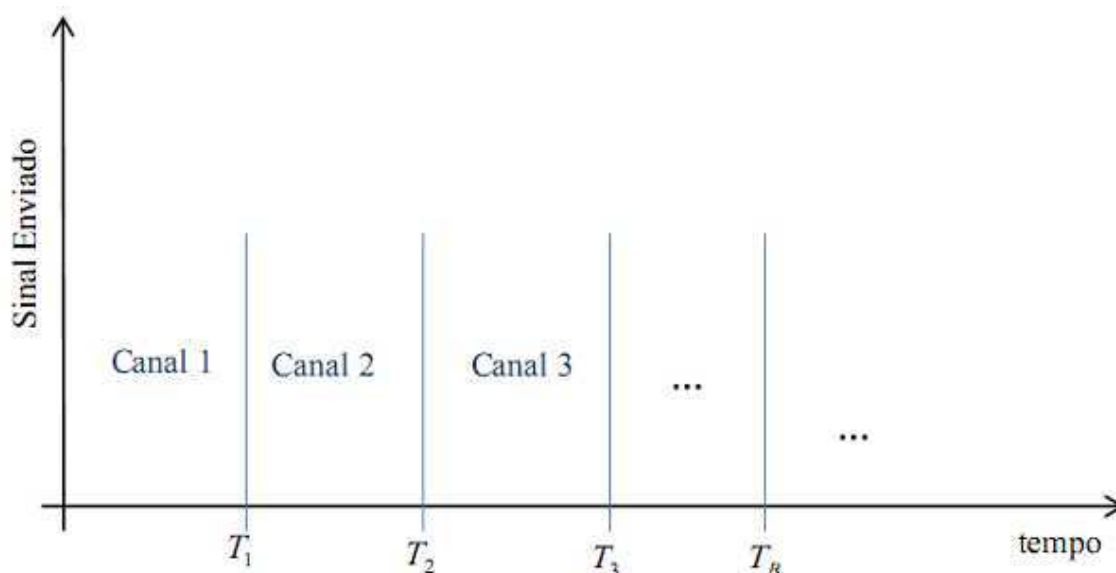


Figura 6 – Separação de canais no tempo: cada canal corresponde a uma janela de  $T_B/4$ .

A cada tempo  $T_B$ , os canais são somados e transmitidos. Na recepção, cada receptor associado a um canal recupera o sinal apenas durante o tempo reservado ao seu canal.

A comunicação *downstream* é feita ponto-a-multiponto, em que cada usuário (ONU) recebe toda a informação provida pela operadora (OLT) e seleciona apenas os dados que lhes são destinados, como pode ser observado na Figura 7. A faixa de comprimento de onda utilizada nesse sentido de tráfego varia entre 1480nm a 1500nm. E sinais de vídeo correspondentes ao serviço CATV (Community Access TV) é transmitido sempre em 1550 nm, independente do padrão utilizado.

No sentido *upstream*, cada ONU tem uma janela temporal pré-determinada e, durante esse intervalo, pode usar toda a largura de banda provida pelo canal óptico. O *splitter*, nesse caso, funciona combinando as sequências de dados e mandar as informações de todos os usuários à operadora. A faixa de comprimento de onda utilizada no upstream varia entre 1260nm e 1360nm.

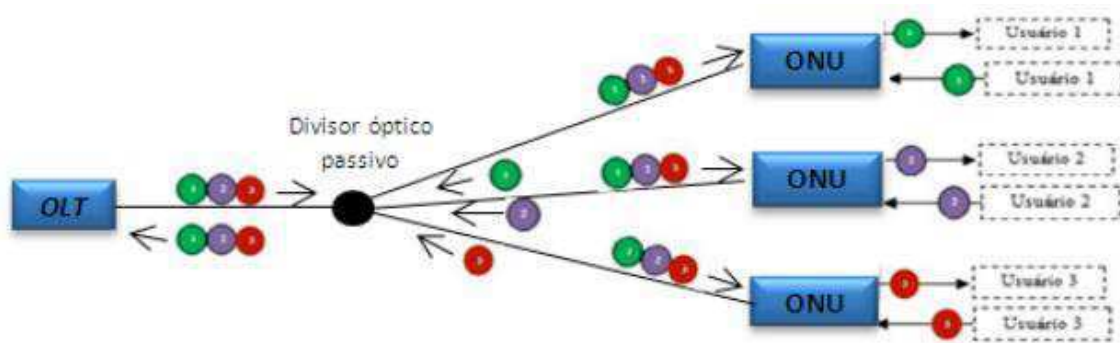


Figura 7 – Arquitetura TDM-PON.

A separação dos canais pode ser feita mediante o uso de uma codificação de linha que ocupe apenas o tempo da janela representando o canal. Os codificadores de linha são responsáveis para obter a transformação de uma sequência binária na sua representação elétrica, de acordo com a aplicação. Exemplos desses codificadores são o RZ (*Return-to-Zero*) e NRZ (*Non-Return-to-Zero*), ilustrados na Figura 8.

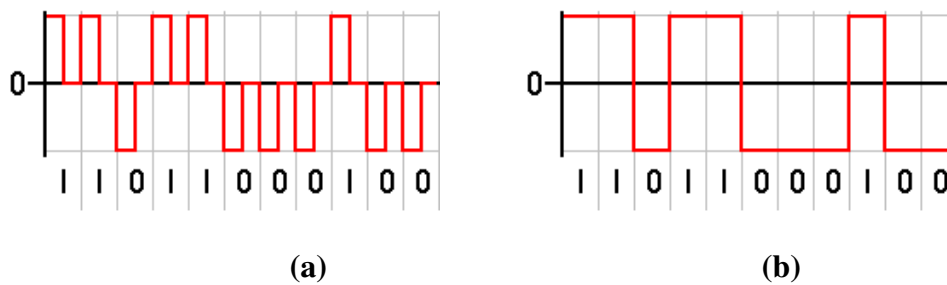


Figura 8 – (a): Codificação RZ da sequência binária. (b): Codificação NRZ da sequência binária.

Observa-se que se o *duty-cycle* (razão entre o tempo de representação,  $t_c$  e o tempo de bit  $T_B$ ) for  $1/(N^\circ \text{ de usuários})$  na codificação RZ, estabelece-se um tempo de início e fim para a representação dos *bits* de cada usuário e a separação de canais temporais pode ser feita contanto que cada janela seja determinada a um usuário específico. Esse esquema de janelamento pode ser visto na Figura 9, em que é mostrada a multiplexação de 4 usuários TDM, em que os *bits* de mesma cor fazem parte da mesma sequência binária e correspondem ao mesmo usuário.

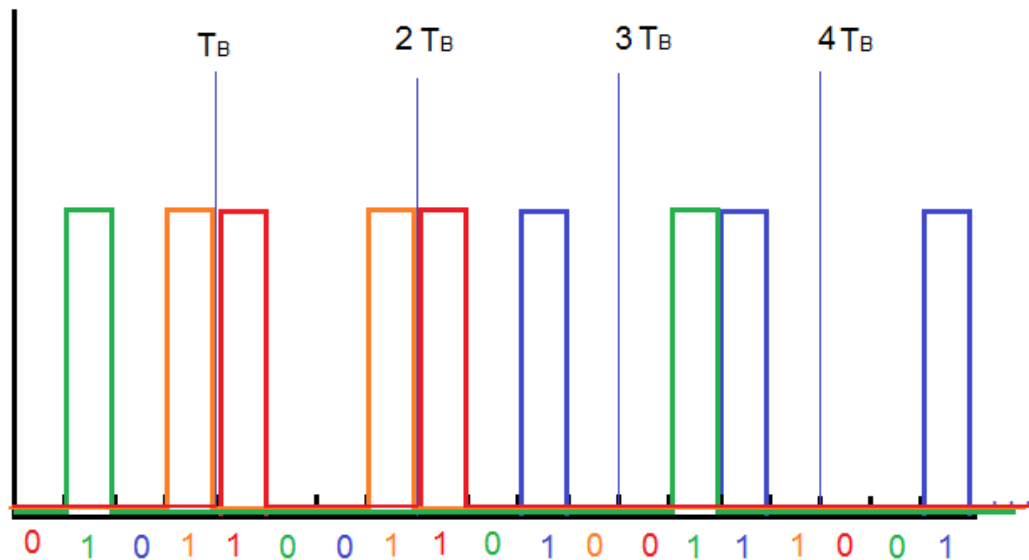


Figura 9 – Janelamento para esquema TDM de 4 usuários, com uso da codificação de linha RZ.

A operadora é responsável por alocar as janelas temporais de cada usuário. E de maneira complementar, os usuários devem negociar com a operadora quando elas podem transmitir seus dados, levando-se em consideração as diferentes distâncias que pode haver entre eles. Outros exemplos de codificação de linha são mostrados na Figura 10.

Os padrões regulam as comunicações nos enlaces ópticos de forma a garantir a operação na rede, mantendo a compatibilidade entre sub-redes que utilizem diferentes tecnologias.

As organizações reguladoras principais em telecomunicações são o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e a ITU-T (*International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector*).

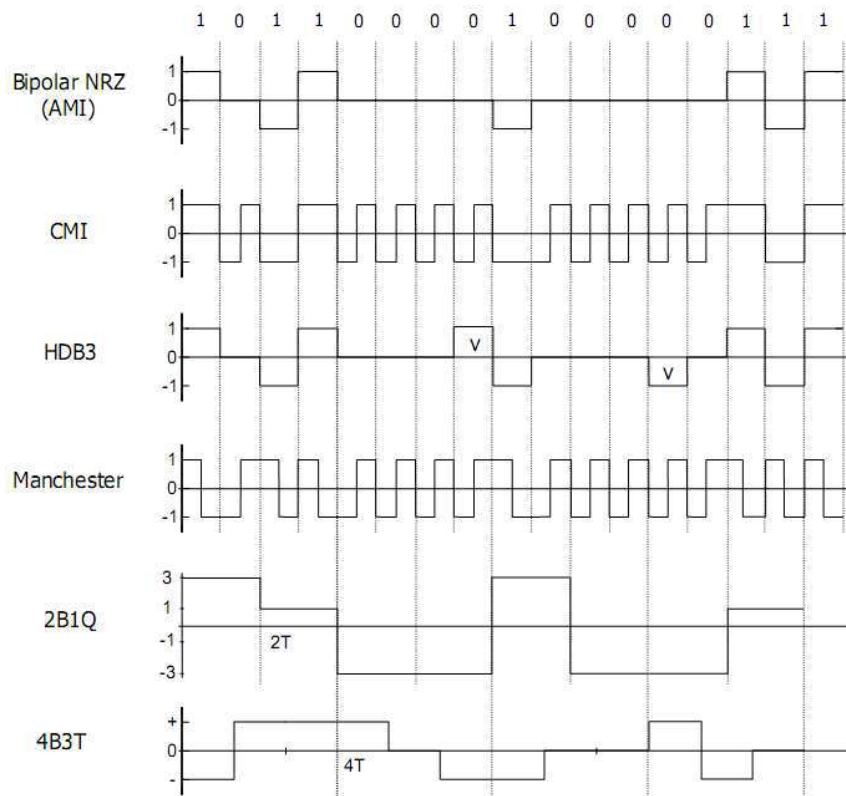


Figura 10 – Diferentes tipos de codificação de linha (para sequência binária mostrada no topo da imagem).

As tecnologias TDM-PON mais utilizadas são:

- *Broadband* PON (**BPON**). Regulado pela norma ITU G.983 (conhecida anteriormente como ATM-PON);
- *Ethernet* PON (**EPON**). Regulado pela norma IEEE 802.3ah;
- *Gigabit* PON (**GPON**). Regulada pela norma ITU G.984;

Devido à crescente demanda para redes de acesso com taxas maiores, para que novas e mais rápidas tecnologias possam se expandir em utilização, as próximas gerações de padrões são:

- 10 *Gigabit* PON (**10G-PON**). Regulada pela ITU-T G.987.
- 10 *Gigabit* EPON (**10G-EPON**). Regulada pela IEEE 802.3av.

Essas tecnologias são detalhadas nas subseções seguintes.

### 2.1.1 BPON (SERIE ITU-T G.983)

A BPON é regulada pela especificação ITU-T G.983.1, que é caracterizado pela capacidade de transmissão de 622 Mbps na direção *downstream* e 155 Mbps para *upstream*. Cada fibra BPON é dividida em 16 ou 32 canais mediante o uso de um divisor de potência óptico.

Tanto a BPON quanto a GPON são otimizadas para tráfego TDM nas fibras, e se apóiam em estruturas de janelamento com requerimentos de temporização e sincronização bastante estritos.

Em BPON, para *upload*, cada quadro (bloco de informações na camada de rede) compreende 53 janelas de tempo, em que cada janela é composta de uma célula ATM<sup>1</sup> e 3 bytes de cabeçalho. Quando duas janelas de tempo consecutivas são dadas a diferentes usuários, esses 3 bytes são suficientes para desligar o laser no primeiro usuário e ligá-lo no segundo, desempenhar um ajuste de ganho e relógio de sincronização na operadora.

### 2.1.2 GPON (SERIE ITU-T G.984)

A BPON foi o padrão para as primeiras implantações de redes ópticas de distribuição. Porém, as redes BPON não poderiam passar por atualizações gradativas para nenhuma das gerações de tecnologias posteriores. A logística de atualização de toda uma rede PON simultaneamente era impraticável e as despesas de instalação de uma rede óptica mais atual paralela eram proibitivas. Por esse motivo, quando nos estágios iniciais do desenvolvimento do padrão GPON, uma exigência importante foi que as atualizações das próximas gerações da tecnologia pudessem ser feitas gradativamente na mesma rede (TELECO, 2011).

O GPON segue a regulação da ITU-T G984.1 e implicou em um avanço grande comparado ao BPON, tanto em largura de faixa quanto em eficiência de banda, mediante o uso de pacotes maiores e de comprimentos variáveis. GPON também implicou no uso de lasers mais custosos e de alta velocidade nas Unidades de Rede de Acesso (URAs).

Nessa especificação permite-se o uso de variadas taxas de transmissão (havendo uma conversão da indústria para a taca de 2,488 Gbps *upstream* e 1,244 Gbps

---

<sup>1</sup> *Asynchronous Transfer Mode Cell* – célula correspondente a unidade básica de transferência de dados na tecnologia ATM que é baseada no chaveamento de células que garante capacidade e atrasos de transmissão constantes. A célula é composta de 53 bytes, em que 4 bytes são de cabeçalho, o que permite altas velocidades de chaveamento.

*downstream*) e é proposta a utilização do método GEM (GPON *Encapsulation Method*), que consiste no empacotamento eficiente dos dados dos usuários a partir de segmentações em *frames*.

O padrão GPON permite até 64 unidades de rede de acesso (URAs) para cada OLT. Todavia, considerando-se a evolução dos módulos ópticos, a camada de convergência de transmissão deve considerar razões de 1:128 para a divisão. Basicamente, quanto maior essa razão, mais atrativo é para as Operadoras, contudo isso implica em maiores orçamentos de potência.

Os valores típicos de alcance da fibra são de 10 e 20 km, havendo duas especificações distintas da norma para a potência e perdas do enlace, correspondentes às duas distâncias. É assumido que 10 km é a distância máxima na qual um Laser Fabry-Pérot pode ser usado na URA para altas taxas, como 1,25 Gbps. O alcance lógico para o padrão é de 60 km, representando o alcance máximo, atingível com o uso de potências maiores.

Pode-se usar uma fibra para transmissão bidirecional, com auxílio de acopladores direcionais para separar as informações transmitidas nas duas direções. Nesse caso, lasers ópticos atuam entre 1290 e 1330 nm, na URA e no OLT.

Alternativamente, é possível utilizar uma fibra para transmissão *downstream* (em que os lasers no OLT operam na faixa 1480-1500 nm) e uma fibra para transmissão *upstream* (com lasers na URA operando na faixa 1290-1330 nm).

O padrão foca em taxas acima de 1,2 Gbps e identifica duas combinações de transmissão *upstream* e *downstream*: 1,2/2,4 Gbps e 2,4/2,4 Gbps. (ITU-T, 2008)

### **2.1.3 EPON (SERIE IEEE 802.3ah)**

O padrão EPON refere-se à utilização da família de protocolos de redes de computadores *Ethernet* para determinar a forma de comunicação entre a operadora e os usuários, sendo o meio de comunicação a rede de fibras ópticas. O grupo de trabalho IEEE teve como principal ênfase no desenvolvimento do padrão EPON, a preservação da arquitetura da *Ethernet* e das estruturas de formatação dos dados.

Com relação à camada física, a EPON determina taxas de 1,25 Gbps, em que 250 Mbps são reservados à codificação (como para o *Fast Ethernet*, que também usa 25% da taxa para codificação). A comunicação é *full duplex* e simétrica – significando



que os dados são transmitidos em ambas as direções em uma mesma fibra, e que a taxa máxima nas duas direções é a mesma. Todavia, a transmissão na direção *downstream* é feita com lasers centrados em 1490 nm e na direção *upstream* em 1310 nm.

Os alcances estabelecidos para o EPON são equivalentes aos GPON, sendo as distâncias entre a operadora e a URA de até 10 e até 20 km. E o padrão EPON permite, tipicamente, até 32 URAs para cada OLT. Tendo uma razão 1:64 se houver correção de erros (FEC – *Forward Error Correction*). Além do fato de que os equipamentos nas URAs e os algoritmos de fragmentação para EPON são mais simples que no caso GPON, o que influi num custo dos aparelhos EPON com cerca de 10% do valor dos GPON.

#### **2.1.4 10G-PON (SERIE ITU-T G.987)**

A próxima geração de padrões da ITU prevê a utilização do 10G-PON (também conhecida como XG-PON), da série de recomendações ITU-T G.987 – que foi aprovada em junho de 2012.

Essa série tem como característica o acesso a taxas de até 10Gbps, *downstream* e até 2,5 Gbps *upstream*, sobre redes ópticas passivas já existentes.

Caracteriza uma razão de até 1:256 para as OLTs e URAs na rede, com lasers operando entre 1260 e 1280 nm para *upstream* e 1575 a 1580 nm (1575 a 1581 para aplicações externas) para *downstream*.

A regulamentação já prevê a coexistência e subsequente transição da geração 10G-PON para a próxima, 10G-PON 2. (ITU-T, 2011)

#### **2.1.5 10G-EPON (SERIE IEEE 802.3av)**

O 10G-EPON foi aprovado em setembro de 2009 como a série de recomendações IEEE 802.3av e prevê a coexistência com a série anterior, aqui descrita na Seção 2.1.3 como EPON.

Quanto às taxas de transferência, o 10G-EPON prevê arquiteturas simétricas de 10Gbps/10Gbps e assimétricas, de 1Gbps(*upstream*)/10Gbps(*downstream*). A razão entre OLTs e URAs é definida como até 128:1.

O comprimento de onda no qual é centrado o laser na direção *downstream* é 1565 nm e para *upstream* é 1530 ou 1310 nm. Havendo uma faixa de comprimento reservado apenas para vídeo no sentido *downstream*: 1550 nm. (IEEE 802.3av, 2009)

## 2.2 WDM-PON

Embora a TDM-PON seja uma boa alternativa para prover acesso banda larga ao usuário final, ela tem a desvantagem de não ser escalável devido à perda por divisão de potência nos divisores ópticos (o que limita o número de URAs). Para resolver esse empecilho tem-se a opção de utilizar multiplexação por divisão de comprimento de onda, dividindo-se a largura de banda total em bandas menores (iguais ou não), aumentando a largura de banda de uma PON e melhorando o orçamento de potência. Essas redes recebem o nome de WDM-PONs, em que a transmissão é multicanal, havendo uma frequência central de operação para cada canal.

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 em valores aceitáveis para o sistema. Redes WDM-PON tem sido alvo de grande interesse tanto para comunidade acadêmica quanto para empresas atualmente, destacando-se principalmente os países asiáticos (LEE, 2007).

Na Figura 11 pode-se ver um sistema WDM, em que os canais de informação são carregados sobre uma mesma fibra, cada um usando um comprimento de onda individual.

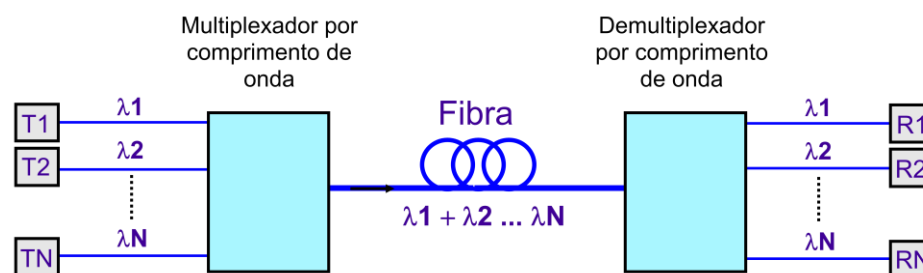


Figura 11 – Sistema WDM.

O equipamento principal de uma rede WDM-PON é o *Arrayed Waveguide Grating* (AWG), que é um elemento passivo (similar a um prisma) que faz a multiplexação e demultiplexação dos canais ópticos de uma dada porta de entrada para uma saída, baseado nos diferentes comprimentos de onda do sinal. Na Figura 12 pode ser vista a ilustração de um AWG: A luz em (1) atravessa um espaço livre em (2) e entra em diversas fibras em (3), as fibras possuem comprimentos distintos e, logo, fases

distintas. Em (4) a luz atravessa outro espaço livre e adentra as fibras em (5) de tal forma que cada fibra recebe apenas a luz de certo comprimento de onda.

A técnica de multiplexação WDM está ilustrada na Figura 13. Pode-se ver o esquema de transmissão de diferentes sinais usando WDM. Uma fonte de múltiplos comprimentos de onda na operadora é usada para transmitir os comprimentos de onda que são roteados para as diversas URAs (*downstream*). Na direção *upstream*, a operadora é equipada com um demultiplexador WDM para receber os comprimentos de onda das URAs. Uma fibra com WDM pode suportar até mais de 30 canais, podendo manter a mesma taxa por canal.

O sistema WDM opera com comprimentos de onda bastante próximos entre si devido a lasers com larguras espectrais bastante curtas, de até 1 nm, e da aplicação de EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), que é um trecho de fibra cujo núcleo é uniformemente dopado com íons de Érbio que é “bombeado” por fótons com comprimento de onda de usualmente 1480 nm de forma que funcionam como amplificadores para dezenas de canais WDM.

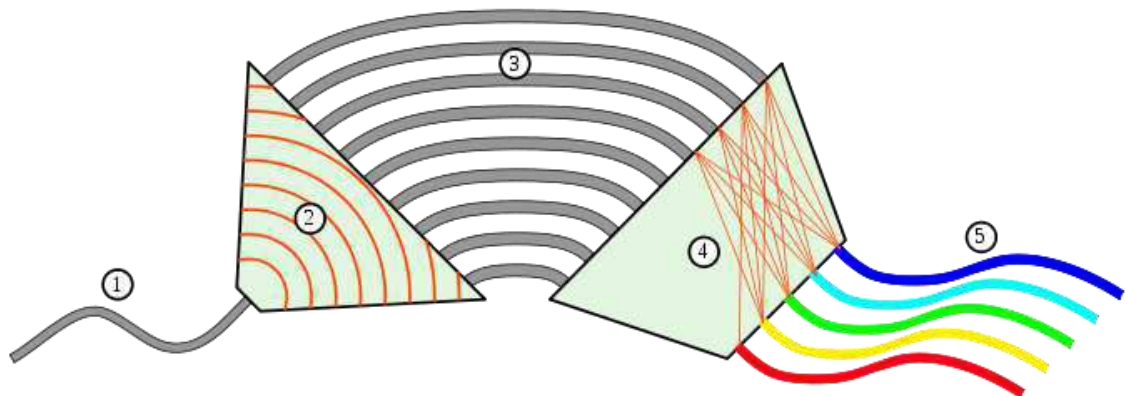


Figura 12 – Esquema de um AWG. Na direção (1) para (5) ele realiza uma demultiplexação e na direção (5) para (1), uma multiplexação. (WIKIPEDIA, 2012)

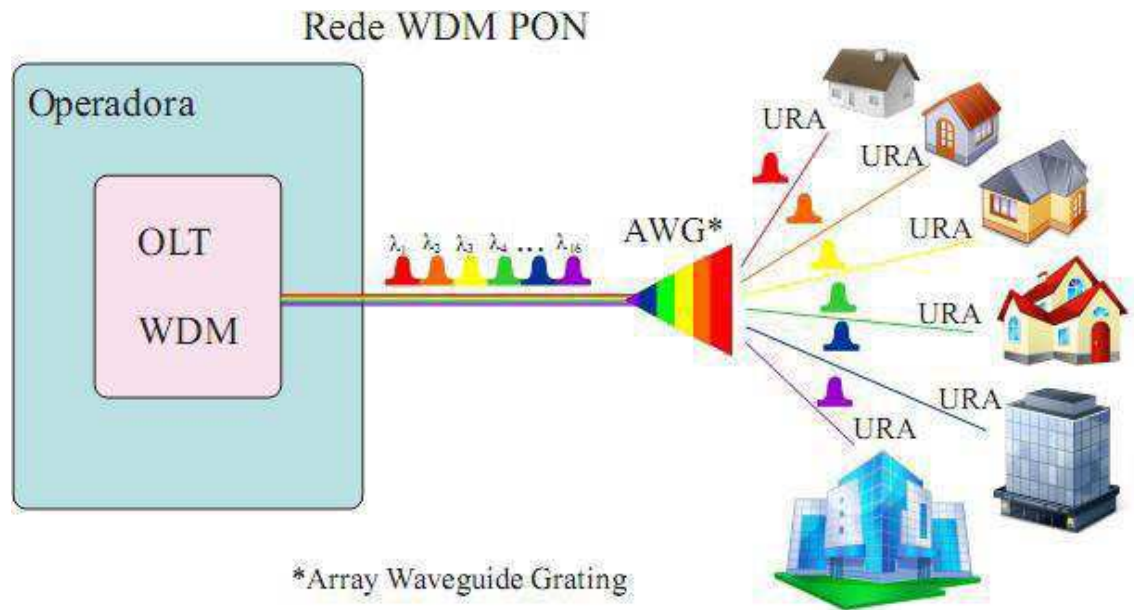


Figura 13 – Esquema de transmissão WDM. Nesse caso a fibra comporta 16 canais, associados a 16 comprimentos de onda distintos.

A topologia lógica do esquema WDM mostrado na Figura 12 é ponto-a-ponto (diferente do esquema ponto-multiponto do TDM-PON) e o sistema reúne múltiplos comprimentos de onda tanto na direção *downstream* como na direção *upstream*, normalmente a comunicação em cada direção se dá por canais separados. Diferentes URAs podem operar em diferentes taxas de bits, daí uma variedade de serviços pode ser oferecida em uma mesma rede.

O uso de WDM em redes de transporte a longas distâncias reduz consideravelmente os problemas de capacidade em largura de banda e, atualmente os sistemas WDM são o núcleo da rede global de Telecomunicações, responsável pelo transporte em longa distância e resolvendo o problema de capacidade e com um custo relativamente baixo. A implantação de redes de acesso WDM ainda é limitada pelo sucesso das tecnologias TDM, todavia, a demanda por maiores taxas torna essencial a migração para um sistema suportado por WDM.

A ITU-T desenvolveu as recomendações para a aplicação de WDM-PON em comunicações:

- Normatizou em 1998 (com atualizações até 2005) o WDM pela série G.692: *Optical Interfaces for Multichannel Systems with Optical Amplifiers*.
- Em 2003 a versão final da norma para CWDM foi publicada, na série G.694.2: *Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid*.

- E em 2012 foi publicada a versão final das normas para DWDM, na série G.694.1: *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*.

Essas tecnologias são detalhadas nas subseções seguintes.

### **2.2.1. WDM (SÉRIE ITU-T G.692)**

Segundo a recomendação G.692, a frequência central de laser é estabelecida em 193.1 THz (equivalente a 1552,52 nm), pois se aproxima da Frequência de Referência Absoluta (AFR) de diversas substâncias.

A separação dos canais é feita com um espaçamento de 100 GHz (equivalente a ~0,8 nm em torno de 1550 nm) ou de 50 GHz (0,4 nm) e múltiplos desses. Esses valores mínimos de espaçamento proveem a flexibilidade necessária para ir ao encontro de várias outras exigências da norma. Os espaçamentos entre canais podem ser iguais ou diferentes.

A quantidade de canais é determinada como 16 e 32 ou mais canais de transmissão, podendo a transmissão ser unidirecional ou bidirecional. A sugestão da norma é de que se aplique a utilização de 16 canais com espaçamento de 100 GHz ou 200 GHz, ou o uso de 32 canais com espaçamento de 100 GHz.

As taxas de transmissão estabelecidas são 2,5 Gbps e 10 Gbps por canal. Lembrando que cada canal ocupa uma banda de aproximadamente duas vezes a taxa de transmissão aplicada, pois a transmissão é feita OOK (*On-Off Keying*).

Para ampliar o número de canais em um sistema é necessário que o operador tenha previsto o funcionamento dos sistema ampliado, o que significa que a ampliação deve ser projetada desde a fase inicial e os parâmetros do sistema inicial devem ser equivalentes ao do sistema na próxima fase. (ITU-T, 1998)

### **2.2.2 CDWM (SÉRIE ITU-T G.694.2)**

A recomendação G.694.2 surgiu em 2002, foi atualizada pela última vez em 2003 e tem o propósito de suportar aplicações com multiplexação com espaçamento entre canais maior, permitindo a transmissão simultânea de vários comprimentos de onda com separação suficiente para o uso de fontes não refrigeradas, tolerâncias de seleção de comprimento de onda de laser relaxadas e filtros passa-faixa larga.

A distância alvo para o CWDM é 50 km em fibras monomodo, sistemas CWDM podem ser usados em redes de transporte em áreas metropolitanas para uma variedade de usuários, serviços e protocolos. A recomendação determina uma quantidade de

canais estabelecida de 17 ou 18 canais definidos dentro do intervalo de 1271 nm a 1611 nm, com um espaçamento de no mínimo 20 nm entre canais. (ITU-T, 2003)

### 2.2.3 DWDM (SÉRIE ITU-T G.694.1)

A recomendação G.694.1 tem a função de definir uma grade de frequências para suportar aplicações para multiplexação densa de comprimentos de onda. É caracterizada por espaçamentos mais estreitos que para WDM e CWDM. Geralmente, os transmissores usados em aplicações DWDM requerem um mecanismo de controle de estabilidade de frequência. Sistemas DWDM têm alto grau de qualidade de serviço e são propícios para aplicações em redes de alcance metropolitano (MAN – *Metro-Area Network*) e redes de grande abrangência geográfica (WAN – *Wide-Area Networks*).

O espaçamento entre canais são estabelecidos variando entre 12,5 GHz (0,1 nm) a 100 GHz (0,8 nm) e para espaçamentos múltiplos de 100 GHz. Também, uma grade flexível, com espaçamentos variados, é permitida. Dessa forma, a quantidade de canais por fibra é da ordem de centenas (ITU-T, 2012).

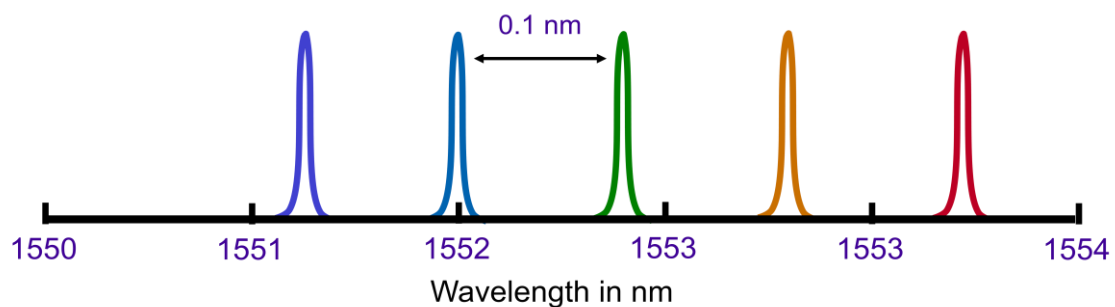


Figura 14 – Espaçamento entre canais num sistema DWDM.

### 3 REDES HÍBRIDAS

Uma rede híbrida de faixa larga, também conhecida como WOBAN (*Wireless-Optical Broadband-Access Networks*) consiste de uma associação de dois meios de transmissão de dados, óptica e sem fio.

As redes de acesso de faixa larga híbridas óptico-sem fio (WOBAN) se baseiam na combinação de um *back end* composto de uma PON que termina em um ponto relativamente próximo do usuário, onde se inicia um *front end* com rede sem fio (*Wireless*). A proposta por trás do uso das redes híbridas é oferecer aos usuários uma rede com maior penetração e flexibilidade de acesso a altas taxas. Além disso, essa arquitetura é bastante atrativa, visto 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 para todos os usuários é inviável devido à limitação física do espectro.

Na Figura 15 é ilustrada uma arquitetura proposta para uma WOBAN. Diversos segmentos de fibra óptica (*Passive Optical Network*, PON) são suportados no ponto de presença da operadora, partindo cada um de um terminal de linha óptica (TLO) e terminando na unidade de rede de acesso (URA) correspondente. Cada URA é conectada diretamente a uma estação rádio base (ERB), que serve como uma porta de saída da rede óptica (*gateways*, mostrados em vermelho na Figura 1), para dar início à parte *wireless* da rede. Além de *gateways* (ERBs ligadas diretamente às URAs), o *front end* possui outros roteadores/ERBs para gerenciamento eficaz da rede (mostrados em azul na Figura 15).

No tráfego de dados *upstream* (do usuário para a operadora) um usuário final envia um pacote de dados para um roteador sem fio vizinho; o roteador insere o pacote na malha sem fio; o pacote trafega pela malha, possivelmente por múltiplos caminhos, até um *gateway*/URA e é finalmente enviado para o TLO/operadora através do enlace óptico.

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* (da operadora para o usuário) 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* na direção *downstream* (o pacote destinado a uma determinada URA é enviado a todas as URAs da árvore, devendo ser processado apenas pela URA de destino) e um acesso multiponto na direção *upstream* (o pacote pode ser inserido na rede óptica por múltiplos *gateways*/URAs e encaminhado até seu destino) (SARKAR *et al*, 2007).

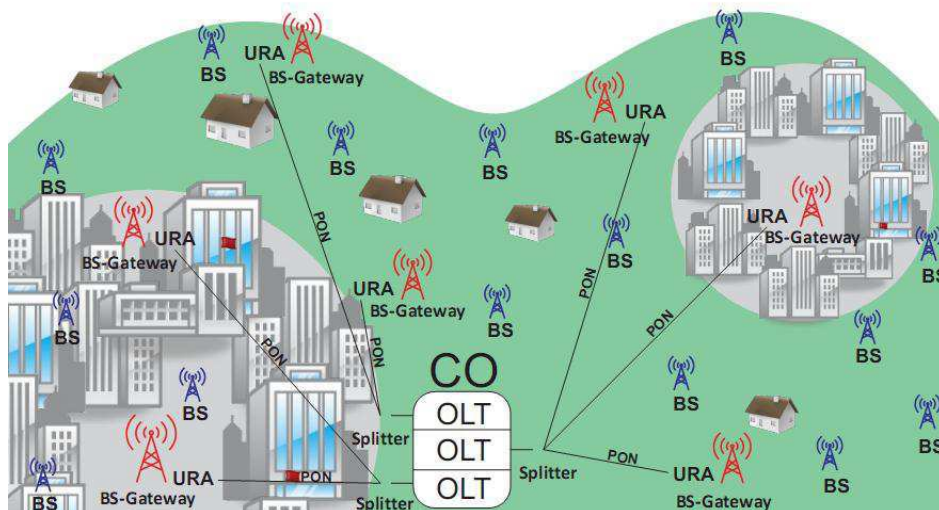


Figura 15 – Exemplo de arquitetura para uma rede híbrida

(FARIAS, J. E. *et al*, 2011).

Apontam-se diversas vantagens associadas ao uso das redes híbridas:

- A arquitetura WOBAN permite redução considerável de custos em comparação com redes cabeadas, tendo em vista que o *front end* necessita apenas de roteadores sem fio. Além disso, os usuários sem fio experimentam maior flexibilidade, prevista pela mobilidade e disponibilidade de acesso à sua rede em toda a área de cobertura da malha sem fio. As taxas disponibilizadas aos usuários também são maiores que as taxas convencionais em redes sem fio, devido à capacidade do *back end* óptico.
- Além dos custos de cabeamento até o usuário, a WOBAN pode apresentar baixo custo de implantação na infraestrutura óptica, dado que diversas regiões no mundo já possuem enlaces de fibra implantados, inclusive em áreas rurais.
- A robustez da rede híbrida é maior que a de uma PON comum, pois para ocorrência de falhas em ERBs (Estações Rádio Base), URAs (Unidades de



Rede de Acesso) ou TLOs (Terminais de Linha Óptica), os usuários podem se conectar a quaisquer roteadores ativos. Para a parte sem fio, a confiabilidade é maior que em redes sem fio, reduzindo o problema de congestionamento de dados e perda de informação. A possibilidade do usuário se comunicar com outras URAs caso sua URA primária falhe ou esteja congestionada, aumenta a capacidade de balanceamento de carga da WOBAN.

Numa WOBAN, os usuários estão normalmente espalhados geograficamente e são muitas vezes móveis, podendo sua mobilidade ser solucionada na camada IP por uma das três abordagens dominantes desenvolvidas no *Internet Engineering Task: mobile IP*, *migrate* e protocolo *host-identify*. O *mobile IP* funciona bem para redes grandes e já está consolidado.

A escolha dos algoritmos de posicionamento das URAs e de roteamento dos dados na rede sem fio são aspectos determinantes em redes de acesso híbridas óptico-sem fio, pois o desempenho da rede depende da disposição das URAs/*gateways* dentro da área geográfica de operação. Alguns algoritmos são usados para indicar pontos ótimos para alocação dos *gateways* na WOBAN a partir do conhecimento da localização dos usuários. Alguns desses algoritmos são brevemente explicados a seguir (SARKAR, 2007):

- *Aleatório*: É a forma mais rápida de estruturar a rede, constituindo um método por tentativa e erro. A região total é dividida em regiões não sobrepostas e as URAs são espalhadas aleatoriamente em cada região.
- *Determinístico*: A região total é dividida em regiões não sobrepostas e as URAs são colocadas no centro de cada região, sendo indicado para distribuição uniforme de usuários.
- *Greedy*: Partindo de uma distribuição conhecida de usuários e considerando pouca ou nenhuma mobilidade, são escolhidos pontos na região como candidatos iniciais para posicionar as URAs. Calculam-se as distâncias de todas as URAs com relação a um usuário com coordenadas conhecidas. Para todos os usuários, o algoritmo forma uma lista contendo as distâncias das URAs. Em seguida, identifica a URA mais próxima (primária). Finalmente, é feita uma lista de usuários para URAs primárias e o posicionamento de cada

uma delas é otimizado em relação a um usuário “*Premium*”. O custo médio de todos os usuários com relação a uma URA vizinha é ótimo.

- *Simulated Annealing* (SA): O posicionamento inicial das URAs é obtido a partir da aplicação do algoritmo Greedy. As URAs são realocadas com um pequeno fator aleatório e o novo custo de posicionamento é calculado. Caso o novo custo seja mais baixo que o anterior, a realocação é aceita, caso contrário, a realocação é aceita com uma certa probabilidade. O processo iterativo é repetido até que não seja mais observado melhoramento de custo.

Um estudo do comportamento dos algoritmos de posicionamento em rede experimental, na vizinhança Wildhorse, Califórnia, é apresentado por Sarkar *et al* (2006, 2007). A vizinhança é bastante densa e possui 310 usuários residenciais (posições conhecidas) espalhados em uma área de 1150 m x 950 m. Foram posicionadas três URAs, suficientes para suprir à demanda durante horários de pico no futuro. Os custos médios (distância em metros entre os usuários e a URA mais próxima) para os algoritmos testados são mostrados na Figura 16.

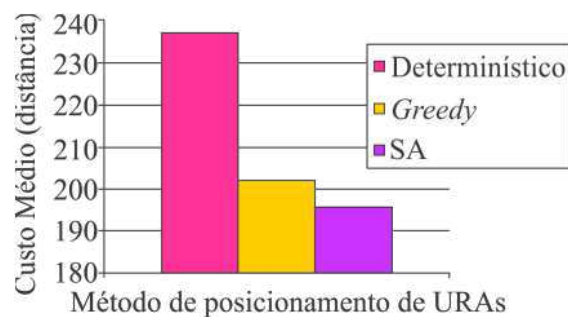


Figura 16. Custos médios de posicionamento de URAs em Wildhorse (SARKAR *et al*, 2007).

Outro aspecto importante é o esquema de roteamento dos pacotes de dados. A seguir são descritos alguns algoritmos de roteamento propostos (SARKAR, 2008).

- *Minimum-Hop and Shortest Path Routing Algorithms* (MHRA e SPRA): Esses algoritmos trabalham segundo o princípio do caminho mais curto, geralmente não levando em consideração as demandas de tráfego na rede.

Assim, MHRA e SPRA sofrem atraso elevado, balanceamento de carga ineficiente e grande congestionamento.

- *Predictive-Throughput Routing Algorithm* (PTRA): O algoritmo recolhe periodicamente amostras de medidas das taxas ao longo dos links sem fio. Dado um par usuário-gateway, são computados os caminhos possíveis para estabelecimento de comunicação. Baseando-se no conjunto de medidas amostrais recolhidas, a condição do link é prevista dinamicamente e a taxa de transferência para cada caminho é estimada, sendo o caminho com maior taxa escolhido. O maior problema envolvido é que o pacote pode acabar trafegando pela malha por um tempo maior que o esperado, já que o atraso não é levado em conta.
- *Delay-Aware Routing Algorithm* (DARA): Esse algoritmo prioriza o atraso do pacote de dados na malha sem fio, já que o pacote pode trafegar ao longo de vários roteadores dentro da malha antes de chegar ao destino final. Cada roteador sem fio é modelado como uma fila padrão e o estado do link sem fio é estimado periodicamente. É atribuído um peso a cada caminho, proporcional ao atraso previsto. O pacote só será atribuído à malha se o menor peso calculado for menor que um limite pré-determinado.
- *Risk-and-Delay-Aware Routing Algorithm* (RADAR): Esse algoritmo pode gerenciar cenários de múltiplas-falhas. Cada gateway recebe um identificador que contém um indexador para URA e TLO (também identificados) aos quais ele se conecta. Cada roteador mantém uma lista de risco. Quando o sistema não possui falhas, os caminhos são marcados como “live”. Quando ocorre uma falha, a lista é atualizada e os caminhos que levam aos gateways com falhas são marcados como “stale”. Assim, ao encaminhar os pacotes, o roteador escolherá apenas caminhos “live”.

A análise de desempenho desses algoritmos para uma WOBAN localizada em São Francisco (SFNet) é apresentada em por Sarkar *et al* (2007). Na Figura 17 é ilustrado o comportamento do atraso de pacotes, ou latência, em função do valor da carga normalizada na SFNet para MHRA, SPRA, PTRA e DARA.

Falhas em WOBANs podem ocorrer em *gateways*, URAs ou TLOs. Se um *gateway* falha, o tráfego pode ser facilmente redirecionado a outros gateways próximos. Se uma URA falha, o tráfego também pode ser redirecionado a *gateways* ligados a outras

URAs. Uma falha em um TLO é mais severa, impedindo a operação das URAs e dos *gateways* conectados ao TLO. Nesse caso, uma grande quantidade de pacotes precisa ser redirecionada. Na Figura 18 é mostrada a perda percentual de pacotes em função do tempo de processamento para ocorrência de falha em uma URA na SFNet, considerando uso de MHRA, SPRA, PTRA e RADAR.

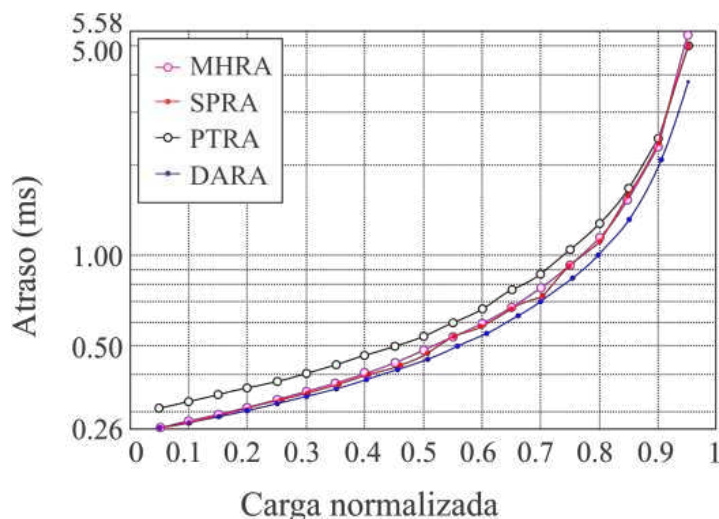


Figura 17. Atraso médio de pacotes em função do tráfego na SFNet (SARKAR, 2007).

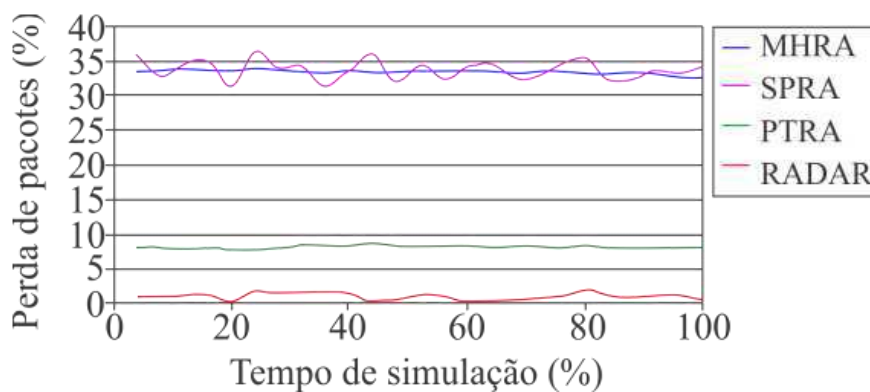


Figura 18. Perda de pacotes na ocorrência de falha em URA na SFNet (SARKAR, 2007).

Outras características consideradas são a escolha dos padrões de comunicações e técnicas de transmissão associados à rede híbrida.

Quanto às técnicas de transmissão, existem basicamente três formas de transportar ondas RF por guias ópticos: RF sobre fibra (RoF – *Radio over Fiber*); FI sobre fibra (frequência intermediária sobre fibra); e banda básica sobre fibra. E quanto ao padrão de redes sem-fio associado ao *front end* da rede híbrida. Esse trecho pode empregar

tecnologias sem fio padrão como Wi-Fi, WiMAX ou Celular. As três técnicas de transporte por guias ópticos e as tecnologias sem fio são detalhadas na Seção 4 – WiMAX sobre Fibra. E ainda há um estudo das técnicas de multiplexação abordadas na Seção 2.

## 4 WiMAX SOBRE FIBRA

WiMAX refere-se ao termo *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (Interoperabilidade Mundial para Acesso por Microondas). A relativamente recente tecnologia é também conhecida como o padrão IEEE 802.16 e se refere às WMANs (*Wireless Metropolitan Area Network*). Os padrões de acesso sem fio WiMAX fornecem conexão para a “última milha” em redes metropolitanas, em que DSL, cabeamento e outros métodos não são disponíveis, ou muito caros. A tecnologia vem a complementar os outros serviços sem fio (ex.: WiFi e Bluetooth), tendo como características principais:

- Alta taxa de transmissão do serviço banda larga (Transmitindo até 75Mbps por canal – valores médios em torno de 40 Mbps. Comparados ao máximo de 54 Mbps para WiFi e 3 Mbps para Bluetooth);
- Ampla cobertura do acesso sem fio (máximo de 50 km, comparados a no máximo 100 m do serviço WiFi e 10 m para Bluetooth)
- Grande número de usuários (Milhares de usuários simultâneos, comparado a dezenas para WiFi e Bluetooth).
- As faixas de frequência utilizadas são de 2 – 11 GHz e 10 a 66 GHz; Bandas licenciadas e não-licenciadas.

Basicamente, um sistema WiMAX consiste de duas partes: uma torre WiMAX, e um receptor WiMAX. A torre é similar a uma torre de telefonia celular - uma única torre WiMAX podendo ter uma cobertura ampla, de cerca de 8.000 km<sup>2</sup>. O receptor tem uma antena e pode ser conectados diretamente ao usuário, a um roteador, ou ser integrado ao laptop como para o WiFi. O acesso similar ao WiFi é limitado a um raio de 10 km, parecido em termos de alcance à cobertura da telefonia celular.

A Figura 19 é uma ilustração de como funciona a conexão WiMAX.



Figura 19 – Funcionamento da Conexão WiMAX (BRAIN; GRABIANOWSKI, 2012).

Para uma Rede WiMAX, podem ser considerados dois tipos de bandas: simétricas, com a mesma taxa de upload e download com aplicações em serviços de voz, vídeo e dados críticos; e assimétricas, com taxas diferentes. A duplexação TDD utilizada pelo WiMAX permite bandas simétricas e assimétricas na mesma rede, de forma bastante otimizada.

As faixas de frequência mais utilizadas são as mais baixas, entre 2 e 5 GHz, variando para diferentes países. O uso de frequências menores serve para melhorar o aproveitamento do sistema com comprimentos de onda maiores, usando também a modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para consequente ampliação da cobertura.

Na Tabela 1 são indicadas as frequências para WiMax usadas no Brasil, com as características práticas, de alcance, Linha de Visada e tipos de usuários.

TABELA 2– FAIXAS DE FREQUÊNCIA PARA WIMAX NO BRASIL.

Faixa de Frequência	Características
<b>2,5 GHz</b>	Frequência licenciada. Essa é a melhor frequência disponível para WiMAX no Brasil. É a mais baixa, logo tem-se os melhores alcances, exigindo uma menor quantidade de estações rádio-base (ERBs) para cobrir uma determinada área. Hoje é utilizada para serviços de rádio de banda larga. Alcance com linha de visada (LOS): 18 a 20 km Alcance sem linha de visada (NLOS): 9 a 10 km
<b>3,5 GHz</b>	Frequência licenciada. Essa é a frequência disponível para WiMAX no Brasil que é utilizada pelas operadoras e pressadoras de serviço de telecomunicações; Alcance com linha de visada (LOS): 12 a 14 km Alcance sem linha de visada (NLOS): 6 a 7 km
<b>5,8 GHz</b>	Frequência não licenciada. Ela é livre no Brasil, podendo ser usada por qualquer empresa pressadora de serviços. Por não ser licenciada, há a possibilidade de interferências e congestionamento em áreas de grande densidade. Nesse caso, não há gastos com aquisição de licenças, o que pode viabilizar o plano de negócio de muitas áreas no Brasil. Alcance com linha de visada (LOS): 7 a 8 km Alcance sem linha de visada (NLOS): 3 a 4 km
<b>10,5 GHz</b>	Frequência licenciada. Não cobre grandes distâncias, sendo necessária a implantação de microcélulas. Ainda não é vastamente utilizada.  (LIMA e PRADO, 2007)

A tecnologia WiMAX, devido à modulação OFDM – que otimiza as reflexões do sinal na transmissão, empregando diversas portadoras ao mesmo tempo – tende a funcionar bem em cidades pois aproveita as construções e árvores para refletir a onda até o destino. Com devidas limitações, a reflexão auxilia na cobertura do WiMax. A modulação OFDM é detalhada na Seção 4.1.

O protocolo 802.16 inclui dois conjuntos de padrões. O padrão 802.16-2004 (802.16 emenda “d”) para WiMAX fixo, é caracterizado pela conexão de banda larga ponto-a-multiponto sem fio e uso do sistema OFDM 256-FFT, suportando ambos os serviços TDD (*Time Division Duplex*) e FDD (*Frequency Division Duplex* – podendo entregar serviços de transmissão *Full Duplex* no mesmo sinal, se desejado). O padrão 802.16-2005 (802.16 emenda “e”) inclui suporte para redes sem fio móveis, na faixa de



frequência entre 2 e 11 GHz. A diferença básica entre as redes fixas e móveis é que na passagem do usuário de uma célula (raio de cobertura de uma ERB – Estação Rádio-Base) para outra, a conexão não é interrompida, dentro do protocolo de redes móveis.

A emenda 802.16e é conhecida também como IEEE 802.16-2005 devido a sua data de conclusão, e além dessa característica da inclusão da mobilidade, permite também a utilização de aplicações fixas e móveis fora da linha de visada (NLOS), graças à adoção do método de multiplexação denominado *Scalable OFDMA* (S-OFDMA), e citam-se melhorias como: o aumento do ganho do sinal, melhorando a penetração em ambientes indoor; o aumento da área de cobertura, com a introdução das tecnologias *Adaptative Antenna Systems* (AAS) e *Multiple Input Multiple Output* (MIMO); e o aumento da performance e da segurança, com a introdução das técnicas de codificação *Turbo Coding* e *Low-Density Parity Check* (LDPC); e propicia uma performance semelhante com qualquer espaçamento de canais RF entre 1.25 e 14 MHz, pois elimina as dependências em relação ao comprimento do canal. (ESPOSITO e ZUQUIM, 2006)

Na Tabela 2 são mostradas comparações entre os protocolos 802.16d e 802.16e.

TABELA 3 – COMPARAÇÃO ENTRE OS PROTOCOLOS IEEE 802.16D E 802.16E

	802.16d (fixo)	802.16e (móvel)
Método de múltiplo acesso	OFDM/OFDMA	S-OFDMA
Banda suportada (MHz)	1.75 / 3 / 3.5 / 5.5 / 7 (OFDM) 1.25 / 3.5 / 7 / 14 / 28 (OFDMA)	1.25 / 2.5 / 5 / 0/ 20/ 1.75 / 3 / 3.5 / 5.5 / 7
Número de subportadoras	256 (OFDM) 2048 (OFDMA)	128 / 256 / 512 / 1024 / 2048
Duplexação	FDD / TDD / Half Duplex FDD	FDD / TDD / Half Duplex FDD
Mobilidade / Suporte para <i>Handoff</i>	Não	Sim
<i>Multicast</i> / Suporte <i>Broadcast</i>	Não	Sim
Cobertura	50 km	50 km

## 4.1 CARACTERÍSTICAS DA MODULAÇÃO OFDM

A modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) foi determinada para o protocolo 802.16d (WiMax fixo) enquanto a modulação OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) é determinada para o 802.16e (WiMax móvel).

A distinção das duas formas de modulação é feita, inicialmente caracterizando a modulação FDM.

### 4.1.1 Modulação FDM

Em um sistema FDM (*Frequency Division Modulation*), ou WDM (*Wavelength Division Modulation*), múltiplos sinais de diferentes transmissores são transmitidos simultaneamente em múltiplas frequências. Cada banda de frequência é uma subportadora, modulada separadamente por diferentes sinais de dados e há um espaçamento entre cada subportadora para evitar a sobreposição do sinal.

Na Figura 20 pode-se verificar uma representação da modulação FDM, em que há subportadoras representadas por lóbulos separados por uma distância espectral (banda de guarda).



Figura 20 – Modulação FDM.

### 4.1.2 Modulação OFDM

No sistema OFDM um grande número de subportadoras é modulado de forma que cada sequência de dados é então mapeada em uma subportadora individual e modulada mediante algum esquema de PSK ou QAM (BPSB, QPSK, 4QAM, 16 QAM, 64QAM etc).

A modulação QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) é um método de combinação de dois sinais modulados em amplitude (AM) em um só canal, aumentando assim a eficiência de banda. Há duas portadoras com a mesma frequência mas defasadas em 90°. Um dos sinais é chamado sinal em fase, enquanto o outro é o sinal

em quadratura. Os dois sinais são combinados na fonte de transmissão e no receptor as portadoras são separadas e os dados são extraídos de cada um. Além do QAM com  $90^\circ$ , há ainda casos em que, mudando tanto a amplitude quanto a fase dos sinais, obtém-se modulações com a soma de mais sinais. Na Figura 21 pode-se ver exemplos de constelações 8QAM e 16QAM.

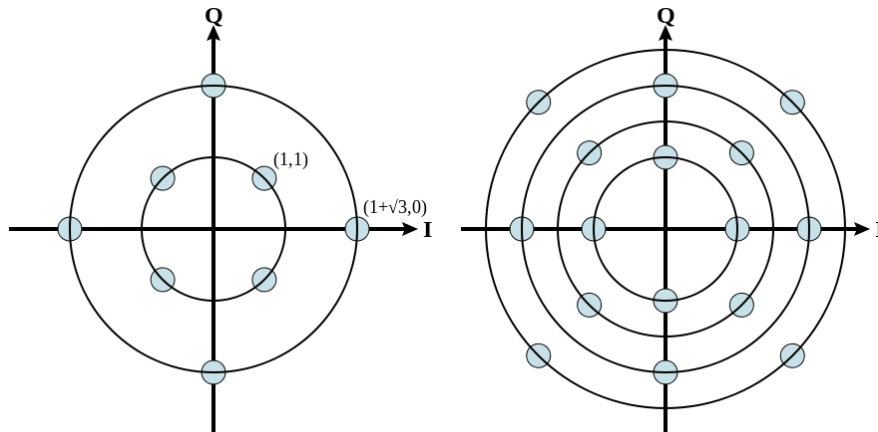


Figura 21 – Constelações 8QAM e 16QAM.

Na modulação OFDM usa-se mais subportadoras que na modulação FDM, sendo as subportadoras mais densamente espaçadas. Isso é devido à ortogonalidade das subportadoras, significando que o pico de uma subportadora coincide com o zero da subportadora adjacente. Pode-se ver na Figura 22 uma representação do espectro na frequência de um sinal modulado OFDM, em que há subportadoras mais condensadas que para o caso FDM.

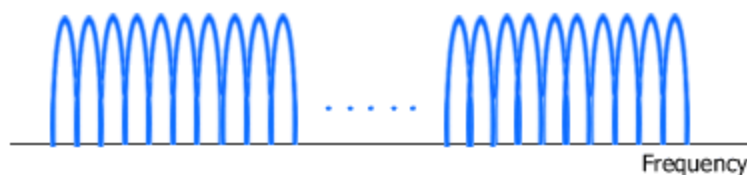


Figura 22 – Modulação OFDM.

Além do aumento de eficiência espectral na comunicação de dados mediante o aumento da taxa, problemas de cancelamento de sinais devido a múltiplos caminhos (*multi-path*) e interferência espectral são fortemente reduzidos à partir da modulação seletiva de portadoras mais “limpas” e ignorando as portadoras com altas taxas de erros de bit. Isso melhora a eficiência do sistema WiMax para ambientes NLOS.

A modulação OFDM pode, de forma eficiente, contribuir para minimizar a interferência e o *fading* seletivo em frequência causado pela propagação por múltiplos percursos, pois uma equalização é feita em subconjuntos de subportadoras em vez de em apenas uma portadora de banda larga. O efeito de ISI (*Inter Symbol Interference*) é suprimido em virtude de um maior período entre símbolos nas subportadoras OFDM, e com o uso de um prefixo cíclico.

#### 4.1.3 Modulação OFDMA

Na modulação OFDMA, como na OFDM, usa-se múltiplas portadoras densamente espaçadas. Porém as subportadoras são divididas em grupos, cada grupo sendo denominado um subcanal. As subportadoras que formam cada subcanal não precisam ser adjacentes. Na direção Base-usuário (*Downstream*) um subcanal pode ser mandado para diferentes receptores. Enquanto na direção usuário-Base (*Upstream*) um transmissor pode ser designado para mais de um subcanal.

Na Figura 23 há uma representação do espectro na frequência de um sinal modulado OFDMA, em que subportadoras forma subcanais.

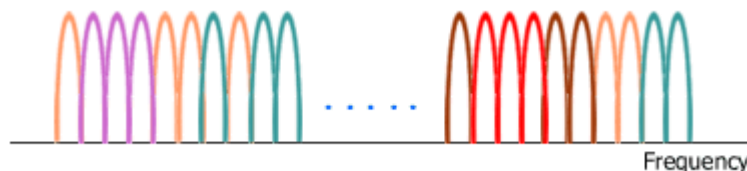


Figura 23 – Modulação OFDMA.

A subcanalização define subcanais que podem ser alocados aos clientes de acordo com as condições do canal e a demanda de dados. Usando a subcanalização, dentro de um mesmo espaço de tempo uma Base Móvel WiMax pode alocar mais potência transmitida aos dispositivos (usuários) com uma razão Sinal-Ruído (SNR) menor e enviar menos potência aos dispositivos com maiores razões Sinal-Ruído.

Uma comparação entre as modulações OFDM e OFDMA é esboçada visualmente na Figura 24, em que pode-se ver que as subportadoras no tempo para o caso OFDM e os subcanais no tempo para o caso OFDMA.

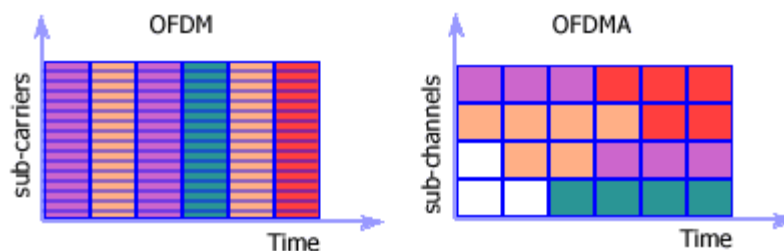


Figura 24 – Comparação entre as modulações OFDM e OFDMA.

A divisão em subcanais na direção usuário-Base pode economizar na transmissão de potência, concentrando a potência somente em certos subcanais. Essa economia de potência é particularmente útil para dispositivos alimentados por baterias – mais provável para o sistema WiMax móvel.

O fórum WiMax estabeleceu, inicialmente, que a modulação OFDM-256 será usado para o serviço fixo (802.16d). Isso significa que há 256 subportadoras disponíveis para uso em um único canal. Acesso múltiplo em um canal é obtido usando-se TDMA ou, de maneira alternativa, FDMA. Para os serviços WiMax móveis (802.16e) a modulação empregada é OFDMA-2048/4096.

## 4.2 WiMAX Sobre Fibra

Sendo estabelecida a tecnologia sem fio WiMAX como a mais propícia para ser usada em redes híbridas, considera-se a problemática de qual método aplicar quanto ao transporte dos sinais RF na fibra óptica. Há três formas de transporte, que se diferem quanto ao esquema de modulação aplicado ao sinal e à frequência em que ele está sendo transmitido no guia óptico:

- RF sobre fibra (RoF, ou *RF-over-Fiber*);
- FI sobre fibra (Frequência Intermediária sobre fibra, ou *IF-over-Fiber*)
- Banda básica sobre fibra (ou *Baseband-over-Fiber*).

Os três esquemas estão ilustrados na Figura 25, juntamente com a posição do espectro óptico do sinal transmitido para cada situação.

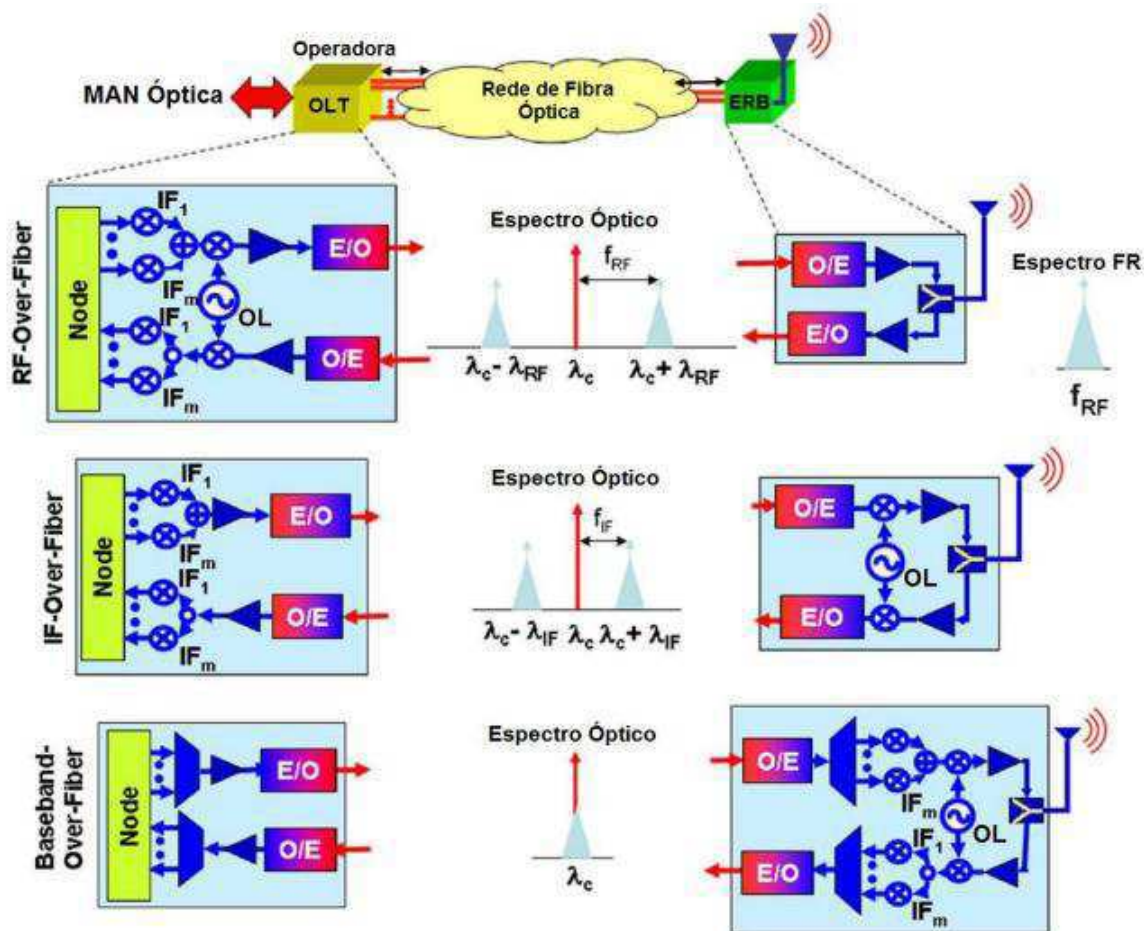


Figura 25 – Esquemas de transporte do sinal RF na fibra óptica.  
(LIM et al. 2010).

Para RoF, na 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 TLO é detectado (conversão óptico-elétrica, O/E), obtendo-se o sinal RF. Para transmissão *downstream*, o sinal passa por um modulador elétrico, originando o sinal RF, que é levado ao modulador óptico (conversão O/E), obtendo-se o sinal RF para ser transmitido. A vantagem desse esquema reside na simplicidade do sistema que opera nas ERBs tipo *gateway*, visto que toda a complexidade é passada para a operadora. Por outro lado, é necessário que haja modulação óptica de alta velocidade.

Para FI sobre fibra, o sinal RF recebido na ERB passa por um processo de *down conversion*, em que ele é modulado para uma frequência intermediária. Após esse processo, o sinal é modulado opticamente (conversão E/O) e transmitido através da

fibra. Ao ser recebido no TLO, o sinal óptico é detectado (conversão O/E) e convertido para a FI. No sentido *downstream*, o sinal gerado no TLO passa por modulação elétrica e conversão para FI antes de ser modulado opticamente. O uso dessa técnica apresenta a vantagem de reduzir significativamente os efeitos de dispersão cromática. Porém, as ERBs tipo *gateway* se tornam mais complexas, mantendo-se a complexidade nos TLOs.

Para banda básica sobre fibra, há a vantagem de se poder usar 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 passa por uma conversão E/O. Ao ser recebido no TLO, o sinal é detectado (conversão O/E), obtendo-se o sinal na banda básica. Do ponto de vista do TLO, o sistema opera como uma rede óptica normal. Nesse caso, toda a complexidade de processamento é levada para a URA, o que pode se tornar inviável dependendo da quantidade de unidades presentes na rede.

## 5 ANÁLISE DE SIMULAÇÕES

Crítérios usados na análise qualitativa do desempenho dos sistemas de comunicação são o Diagrama de Olho e o Diagrama de Constelação. Esses servem para obter uma ideia visual da probabilidade de erro no sistema.

O Diagrama de Olho tem esse nome por ter um formato similar ao contorno de um olho. Ele é obtido pela superposição de várias amostras do sinal no domínio do tempo. Alguns parâmetros podem ser determinados graficamente, obtendo-se informações estatísticas da transmissão, de acordo com o espaçamento das faixas do diagrama, visto na Figura 26. O efeito de interferência interssimbólica causa o “fechamento do olho”, reduzindo a margem de ruído aditivo

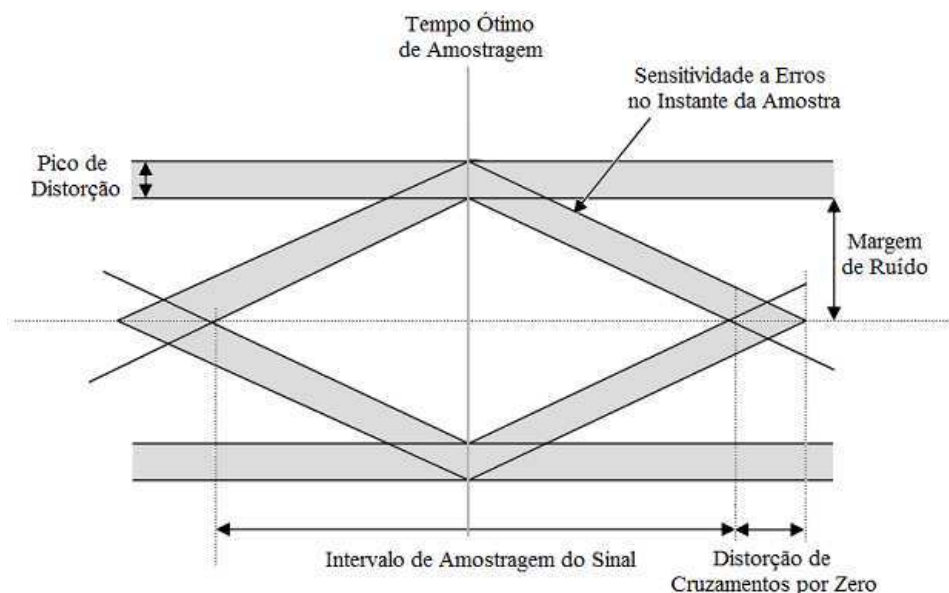


Figura 26 – Descrição dos parâmetros gráficos do Diagrama de Olho.

O Diagrama de Constelação consiste no gráfico dos sinais digitais em forma vetorial. Os pontos ditos ideais na constelação são dados pela localização dos representantes dos símbolos transmitidos, que determinam uma região definida por limiares de decisão. A constelação ideal para codificação 16 QAM é mostrada na Figura 27. O espalhamento dos símbolos recebidos na constelação é devido ao ruído, atenuação e não-linearidades na transmissão, assim atenuação do sinal, dispersão, ruído, interferência e é proporcional à taxa de erro.



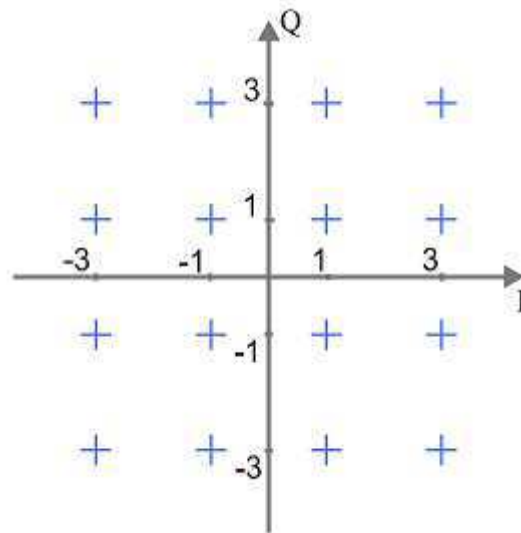


Figura 27 – Constelação ideal para 16 QAM.

Uma análise quantitativa é feita mediante a obtenção da Taxa de Erro de *Bit* (Bit Error Rate) ou BER. A probabilidade de erro é diretamente afetada por fatores como atenuação, dispersão, ruído, interferência e não-linearidade do meio. No caso, a BER é dada como a probabilidade média de ocorrer erro na identificação de *bits* dada a comparação da sequência de *bits* transmitida com a recebido.

Muitos sistemas ópticos especificam como parâmetro de operação o limite superior de  $10^{-9}$  para a BER, outros especificam  $10^{-14}$  (AGRAWAL, 2002).

Da mesma forma, uma medida derivada do conceito de BER é a Taxa de Erro de Símbolo, ou SER (*Symbol Error Rate*). A SER 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.

Os valores de BER e SER, assim como os Diagramas de Olho e Constelação, são os parâmetros de medida de desempenho utilizados na análise das simulações, descritas nas subseções seguintes.

## 5.1 Simulações e Resultados

Foram realizadas simulações na plataforma VPITransmissionMaker 8.6 para os sistemas: TDM, RoF (OFDM) e WDM. As simulações foram realizadas para o uso de 4

e 8 canais nas referidas tecnologias. Faz-se a análise dos sistemas variando os comprimentos da fibra, de 5 km a 20 km. E as taxas de transmissão vão de 30 a 75 Mbps para os sistemas TDM e RoF, pois o padrão WiMAX determina um limiar máximo de 75 Mbps.

Em todos os casos, considerou-se o tráfego em apenas uma direção, a fibra utilizada nas arquiteturas é monomodo do tipo DSF (*Dispersion Shifted Fiber*) com dispersão cromática 3.5 ps/(nm·km), perda de 0.28 dB/km na região de comprimentos de onda em torno de 1550 nm e demais especificações segundo a norma ITU-T G.653. Além disso, os sistemas compartilham as seguintes características:

- Moduladores ópticos externos do tipo Mach-Zehnder, com perda de inserção de 3.0 dB, operando em regime linear;
- Lasers de onda contínua do tipo DFB (*Distributed Feedback*), com potência média 1.5 mW e largura espectral 10 MHz;
- Fotodiodos de tipo PIN (estrutura de junção p-n);

### 5.1.1 TDM-PON

Para a simulação, utilizou-se a portadora óptica em 1550 nm (193.1 THz). O sistema TDM é mostrado na Figura 28, ele é composto por:

- Uma fonte de binária aleatória (com probabilidades iguais de “0” e “1”);
- Codificador de linha OOK *Return-to-zero*, com *duty-cycle* estabelecido em 1/4 para o sistema de quatro canais e em 1/8 para o sistema de oito canais. Dessa forma é feita a separação dos sinais no domínio do tempo, sem haver superposição;
- Modulador Óptico Mach-Zehnder (MZM), operando com um laser na frequência 193.1 THz;
- Um atraso, que pode ser devido a um enlace óptico de comprimento equivalente ao tempo de atraso desejado. O atraso para cada canal corresponde a um  $Tb \cdot (k - 1)/N$ , em que  $k$  é o número do canal,  $Tb$  é o tempo de bit (inverso da taxa de transmissão) e  $N$  é o número de canais (nesse caso, 4 ou 8);
- Combinador óptico, que soma todos os sinais;
- Enlace de fibra óptica;

- Splitter;
- Sistema de recepção, em que é calculado a BER e obtidos os Diagramas de olho e de constelação. A BER é obtida pelo método estocástico segundo estimativa de Gauss (VPITransmissionMaker, 2008).

Cada canal corresponde a uma fonte de sequência binária. Os sinais ópticos são combinados por um combinador óptico e separados por um divisor de potência após a propagação. O sinal óptico recebido é usado como portadora em um modulador Mach-Zehnder e o sinal elétrico do canal desejado é recuperado a partir da introdução de um sinal modulante de controle apropriado.

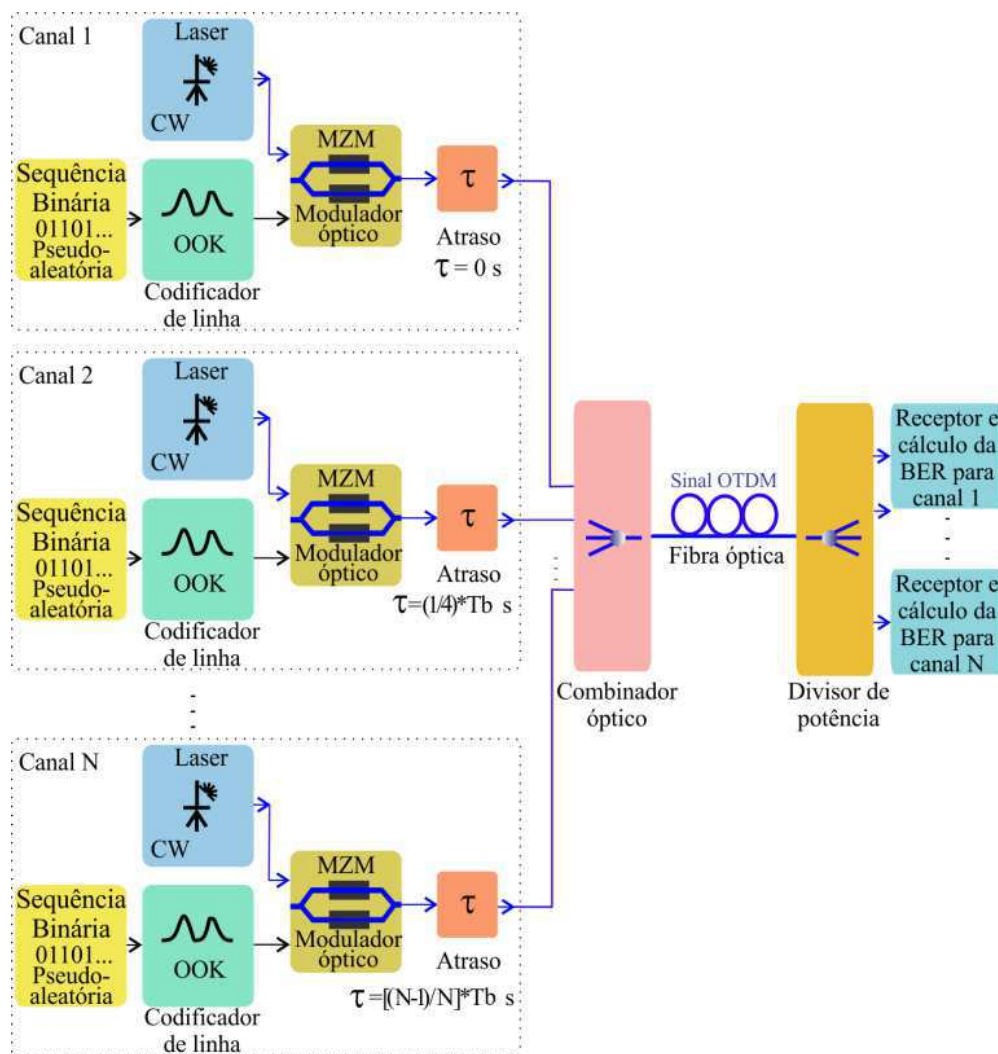


Figura 28 – Esquema da simulação TDM, em que há  $N$  canais TDM e um canal óptico.

Pode-se ver na Tabela 3 os valores de BER para as distâncias variando de 5 a 20 km, juntamente com as taxas de transmissão variando de 30 a 75 Mbps, para a aplicação de quatro e de oito canais TDM.

TABELA 3 – Ordem de grandeza da BER obtidas na simulação TDM (4 e 8 canais).

	4 Canais				8 Canais				
	Taxa	5 km	10 km	15 km	20 km	5 km	10 km	15 km	20 km
TDM	<b>30 Mbps</b>	$10^{-28}$	$10^{-24}$	$10^{-20}$	$10^{-16}$	$10^{-10}$	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-5}$
	<b>50 Mbps</b>	$10^{-26}$	$10^{-23}$	$10^{-19}$	$10^{-15}$	$10^{-10}$	$10^{-8}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$
	<b>70 Mbps</b>	$10^{-25}$	$10^{-22}$	$10^{-19}$	$10^{-15}$	$10^{-10}$	$10^{-8}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$
	<b>72 Mbps</b>	$10^{-27}$	$10^{-23}$	$10^{-20}$	$10^{-15}$	$10^{-10}$	$10^{-8}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$
	<b>75 Mbps</b>	$10^{-26}$	$10^{-22}$	$10^{-19}$	$10^{-15}$	$10^{-9}$	$10^{-8}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$

Pode-se ver que a taxa de erros aumenta com a distância, pois o efeito da atenuação e dispersão da fibra se tornam maiores, e com o aumento da taxa de transmissão, pois para taxas de transmissão maiores uma banda de frequência maior é ocupada de forma que o efeito da distorção da fibra óptica – que age como um filtro - é mais evidente.

E considerando o limite de operação para a BER na ordem de  $10^{-9}$  (LIMA *et al*, 2012) averiguou-se desta forma, para o sistema TDM com quatro canais, a distância máxima respeitando o limite de BER aceitável foi de 29 km. Para oito canais TDM, a distância máxima é de 5 km

### 5.1.2 RoF-PON

A tecnologia TDM insere maior complexidade nas URAs, aumentando significativamente o custo em infraestrutura das WOBANs. O uso de RoF permite reduzir esses custos ao introduzir sistemas complexos na operadora, reduzindo a complexidade dos sistemas nas URAs, que estão presentes em maior número.

Foram simulados os sistemas RoF para quatro e oito canais OFDM. A arquitetura utilizada na simulação RoF é ilustrada na Figura 29. A saída de cada bloco OFDM corresponde à modulação OFDM (com 256 subportadoras e modulação 16-QAM), para uma sequência binária.

Os canais são espaçados de 20 MHz com frequência da portadora  $\geq 2$  GHz, conforme especificações para o padrão WiMAX (IEEE 802.16a REVd). Os canais OFDM podem representar as saídas dos moduladores RF na operadora (*downstream*) ou os sinais se propagando no meio sem fio (*upstream*).

Os sinais OFDM são somados ainda no domínio elétrico, passam por um bloco responsável pelo controle do nível do sinal, e em seguida toda a banda RF é modulada opticamente. Da mesma forma que para TDM, a frequência de emissão do laser para a portadora óptica utilizada foi 193,1 THz.

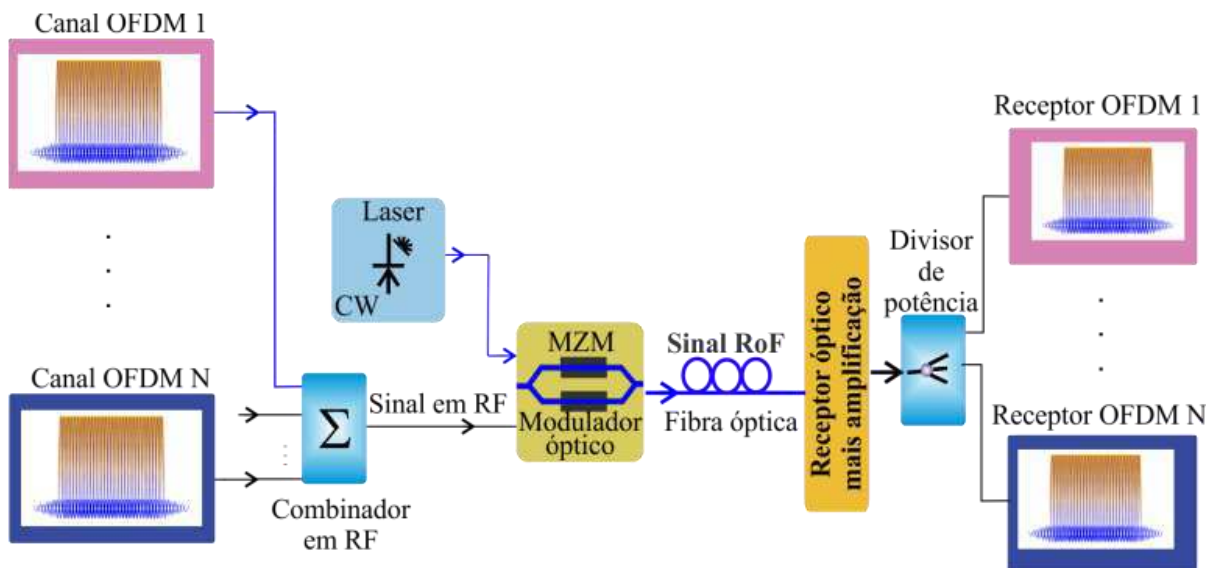


Figura 29 – Sistema RoF com  $N$  canais OFDM e um canal óptico.

A largura espectral influencia no efeito de dispersão cromática da transmissão. Considerando que a largura de faixa utilizada (10 MHz) como estreita, os efeitos de ruído de fase não foram levados em consideração.

O sinal óptico se propaga ao longo da fibra, e em sequência é detectado pelo fotodiodo PIN e o canal RF desejado é demodulado. Na Tabela 4 podem-se ver os valores de BER para as distâncias variando de 5 a 20 km, juntamente com as taxas de transmissão variando de 30 a 75 Mbps, para a aplicação de quatro e de oito canais OFDM.

TABELA 4 – Ordem de grandeza da BER obtidas na simulação RoF (4 e 8 canais).

	4 Canais				8 Canais				
	Taxa	5 km	10 km	15 km	20 km	5 km	10 km	15 km	20 km
RoF	30 Mbps	$10^{-61}$	$10^{-54}$	$10^{-45}$	$10^{-33}$	$10^{-21}$	$10^{-20}$	$10^{-18}$	$10^{-16}$
	50 Mbps	$10^{-55}$	$10^{-44}$	$10^{-33}$	$10^{-22}$	$10^{-21}$	$10^{-20}$	$10^{-18}$	$10^{-15}$
	70 Mbps	$10^{-43}$	$10^{-33}$	$10^{-24}$	$10^{-16}$	$10^{-15}$	$10^{-16}$	$10^{-15}$	$10^{-13}$
	72 Mbps	$10^{-28}$	$10^{-24}$	$10^{-22}$	$10^{-14}$	$10^{-14}$	$10^{-15}$	$10^{-14}$	$10^{-11}$
	75 Mbps	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$

Para o sistema RoF de quatro canais, a distância máxima (BER na ordem de  $10^{-9}$ ) é de 24 km (taxa até 72 Mbps) ou 32 km (até 30 Mbps). Para oito canais, a distância máxima é de 23 km.

Os resultados apresentados indicam que a utilização dessa técnica apresenta melhor desempenho com relação à tecnologia TDM, podendo ser empregada na arquitetura WOBAN, viabilizando sua implantação. Os valores de taxa de erro de *bit* obtidos sugerem a ponderação entre número de canais, taxa máxima e comprimento máximo do enlace de fibra.

Os gráficos de constelações recebidas para o sistema RoF-PON, para taxas de 70 e 75 Mbps são mostrados na Figura 30. Vê-se que o aumento da taxa aumenta o espalhamento dos pontos na constelação.

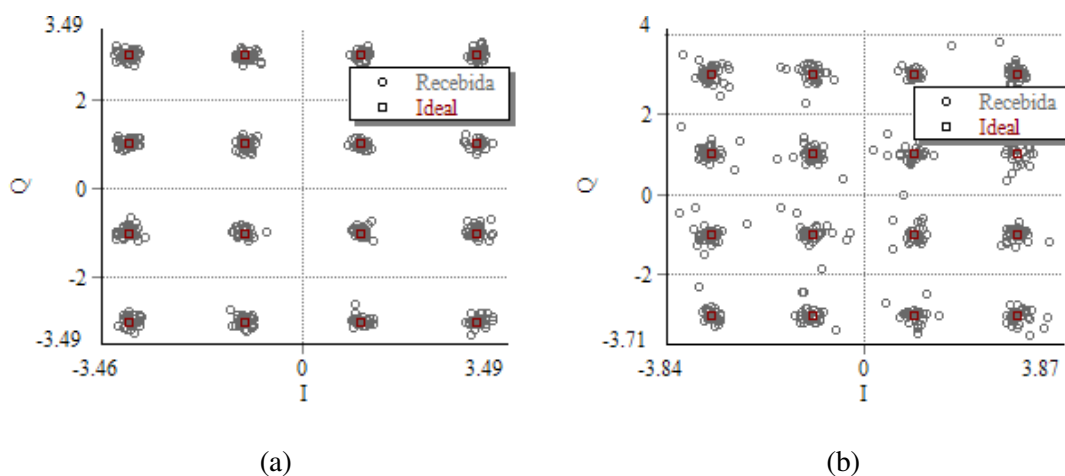


Figura 30 – Constelação recebida para canal 1, 20 km e taxa de transmissão de (a) 70 Mbps e (b) 75 Mbps.

O espectro de potência RF para o sistema RoF (saída do combinador RF) é mostrado na Figura 31. Para o espaçamento indicado para WiMAX, correspondente a 20 MHz, a taxa máxima possível é 75 Mbit/s. Essa é a taxa limite, quando já não existe banda de guarda entre os canais, como pode ser visto na figura. Assim, para taxas muito próximas ou iguais a 75 Mbit/s, o sistema RoF apresenta queda de desempenho, inerente a redes WiMAX.

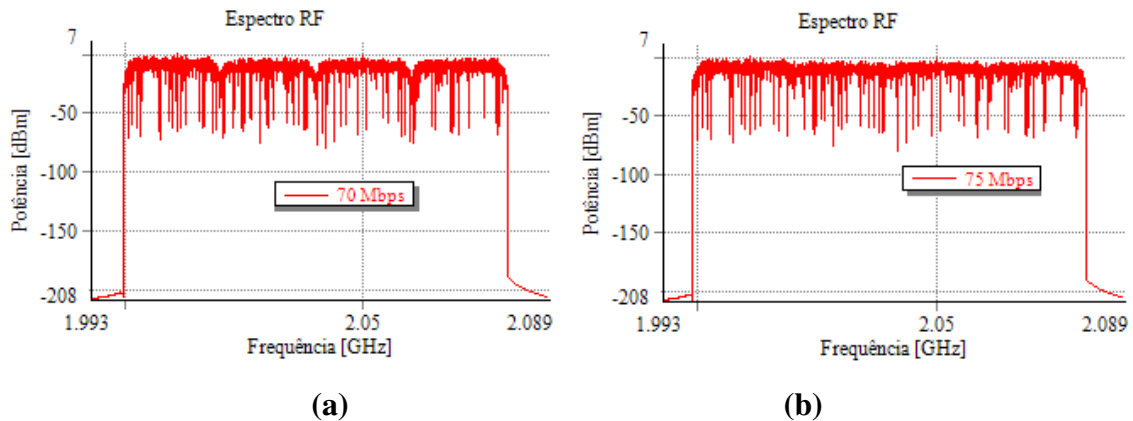


Figura 31 – Espectro de potência para o sinal RF com taxa de transmissão de (a) 70 Mbps e (b) 75 Mbps.

Como a tecnologia RoF reduz consideravelmente os custos de implantação da arquitetura WOBAN, os resultados obtidos mostram que ela pode ser escolhida em detrimento à tecnologia TDM, sem redução de desempenho da rede. (LIMA *et al*, 2012)

### 5.1.3 WDM-PON

Foram simulados os sistemas WDM para quatro e oito canais. A arquitetura implementada para esse sistema é mostrada na Figura 32.

Cada canal WDM é constituído por uma fonte de dados como a do sistema TDM, um codificador de linha NRZ e um modulador óptico com portadora externa. O espaçamento entre canais utilizado é de 100 GHz.

Como cada canal WDM transmite dados referentes a apenas uma fonte de dados, a taxa de transmissão para cada fonte corresponde à taxa suportada pelo canal óptico (10 Gbit/s).

As frequências de emissão para os lasers variam de forma a respeitar o espaçamento escolhido entre os canais e a frequência central. A frequência central escolhida foi 193,1 THz, correspondendo aos padrões WDM para redes ópticas. Os

sinais modulados em portadoras espaçadas em torno da frequência central são multiplexados, passam pela fibra e em seguida são demultiplexados. No demultiplexador, o espaçamento e a frequência central são levados em conta para separar os sinais e enviar cada um deles à saída correspondente, onde é feita a detecção pelo fotodiodo PIN (conversão óptico-elétrica).

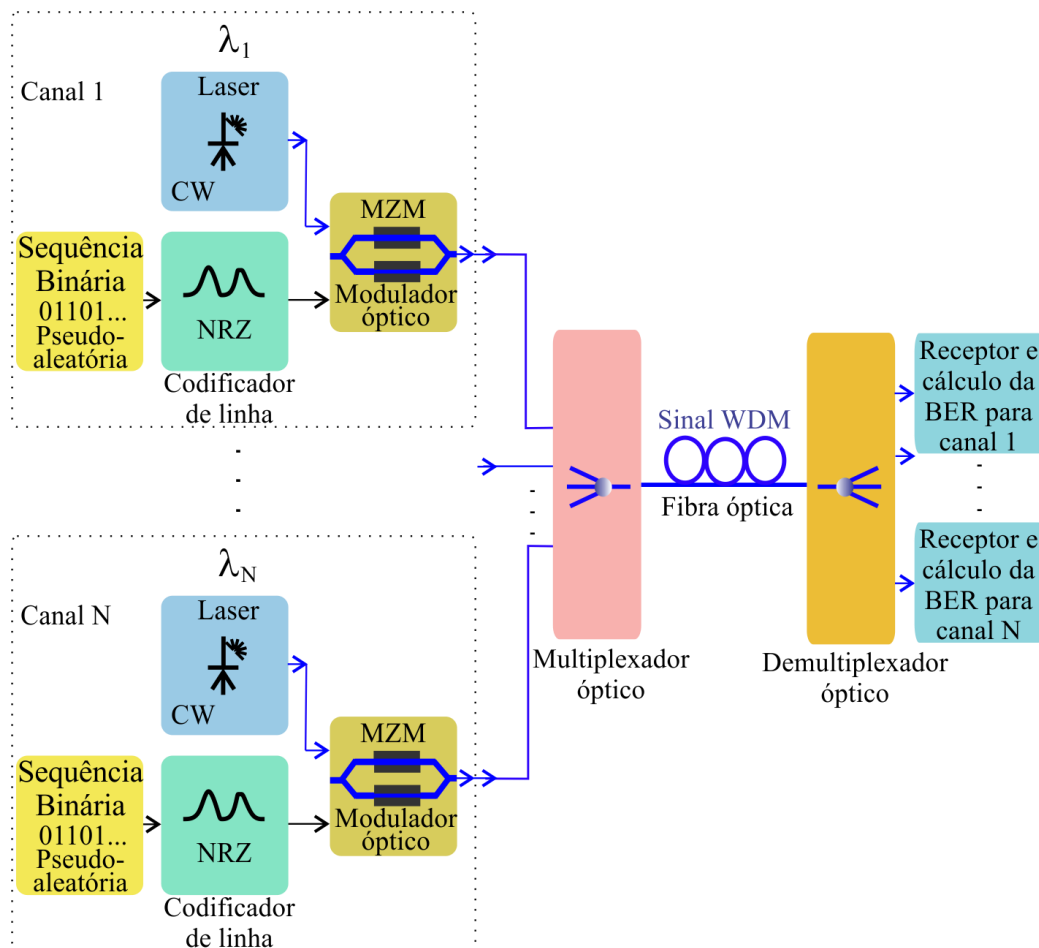


Figura 32 - Sistema WDM com N canais ópticos.

Foram realizados os cálculos de BER para taxa de transmissão fixa de 10 Gbps, para diferentes comprimentos de fibra e com espaçamento entre canais fixo em 100 GHz. Os valores de ordem de grandeza da BER simulados são mostrados na Tabela 5.

TABELA 5 - Ordem de grandeza para BER na simulação WDM (4 e 8 canais).

4 Canais					8 Canais			
Taxa	5 km	10 km	15 km	20 km	5 km	10 km	15 km	20 km
<b>10 Gbit/s</b>	$10^{-72}$	$10^{-40}$	$10^{-22}$	$10^{-12}$	$10^{-72}$	$10^{-40}$	$10^{-22}$	$10^{-12}$



Para simulação com quatro canais WDM e comprimento da fibra de 20 km, o espectro multiplexado é mostrado na Figura 33 e o diagrama de olho correspondente ao sinal na recepção é mostrado na Figura 34. A parte azul no espectro indica a banda dedicada a um canal WDM (20 GHz).

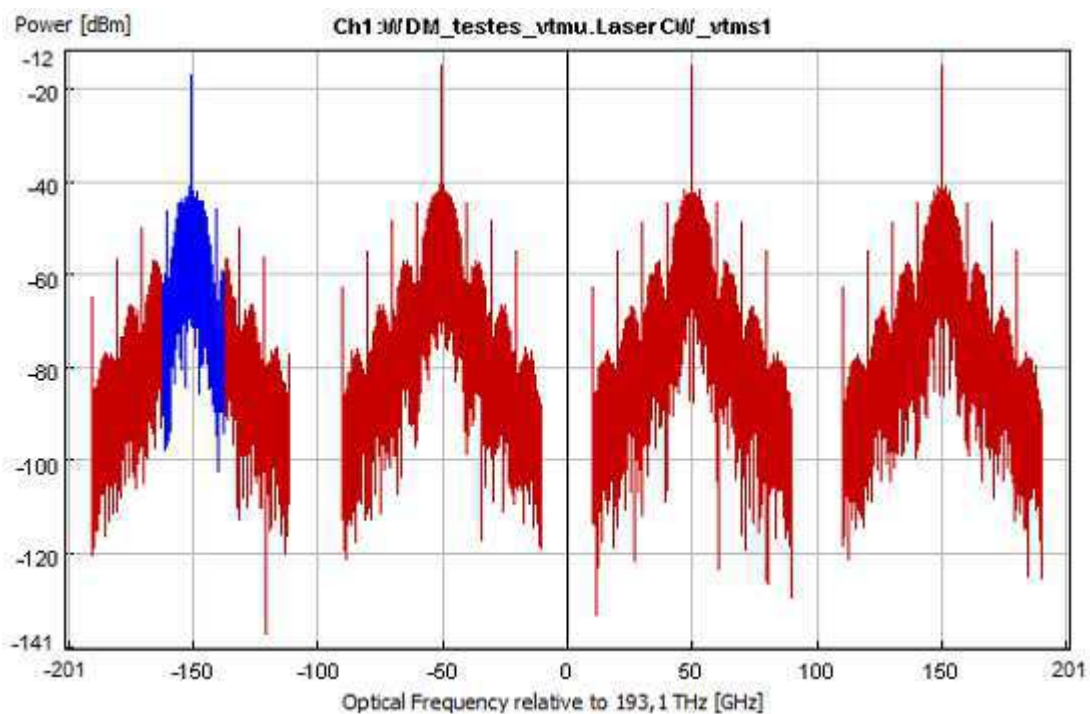


Figura 33 – Espectro para espaçamento de 100 GHz entre canais e comprimento da fibra de 20 km.

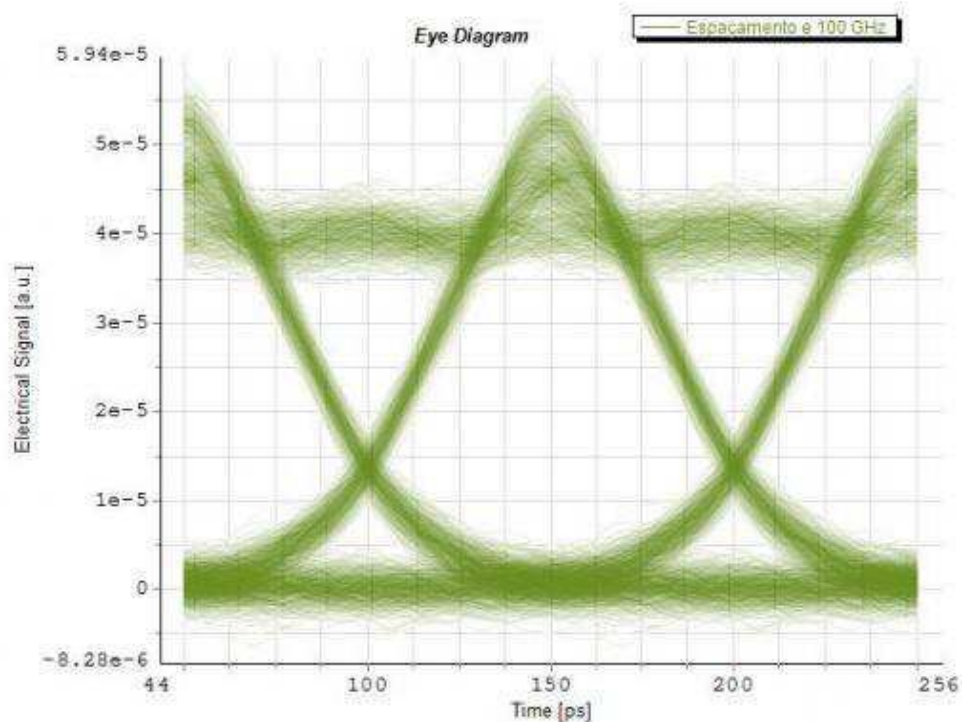


Figura 34 – Diagrama do olho para sinal recebido no sistema WDM de 4 canais e comprimento da fibra de 20 km.

Observou-se que o sistema WDM implementado pode ser utilizado para transmitir 10 Gbps até além de 20 km sem exceder o limite estabelecido para a BER.

A capacidade dos sistemas WDM e seu desempenho para 4 e 8 canais sugerem a utilização dessa tecnologia em conjunto com RoF ou TDM. Nesse caso, cada canal WDM poderia transportar diversos canais RoF ou TDM.

## 6 CONCLUSÕES

As redes híbridas são uma solução para a flexibilidade de acesso a altas taxas, sendo feitas no trabalho, análises quanto às características determinantes ao seu desempenho, como a escolha da tecnologia de transmissão na WOBAN, o padrão sem fio a ser utilizado, o posicionamento das URAs e roteamento dos dados na malha sem fio.

Quanto às características de posicionamento e roteamento, foram descritos os resultados de pesquisas apontando que o processo iterativo do tipo SA estabelece a menor distância média entre as URAs no sistema. E que, quanto ao roteamento, o algoritmo que apresenta a menor latência dos dados é o DARA, enquanto o RADAR resolve simultaneamente o problema de latência e desempenho mediante falhas, apesar de requerer maior esforço computacional.

Com relação ao padrão sem fio, é dada maior ênfase ao WiMAX, pois esse é atrativo para redes metropolitanas, apresentando áreas de cobertura quilométricas e maiores taxas de transmissão, devido à aplicação de OFDM, que é detalhada na Seção 3.

A escolha da tecnologia de transmissão em redes de acesso híbridas óptico-sem fio é uma característica crítica, responsável pela determinação do desempenho geral da rede, pois se impõe logo na camada física. Nesse âmbito, são mostrados os resultados de análises feitas para três cenários de simulação no VPItransmissionMaker, levando em consideração as possíveis tecnologias de transmissão óptica para sinais sem fio: TDM-PON, WDM-PON e RoF.

Para os cenários implementados, são apresentados resultados numéricos para o desempenho em nível físico dessas alternativas. Para a integração fibra-rádio, foram considerados aspectos da transmissão *downstream* (sentido operadora-usuários) para a escolha dos parâmetros descritos nos padrões.

Considerando o transporte óptico pelas tecnologias TDM e RoF levando em conta o uso do padrão WiMAX na malha sem fio, as medidas empíricas de desempenho obtidas sugerem que a tecnologia RoF é competitiva com a TDM, tendo em vista que apresenta BER superior a  $10^{-9}$ . Além disso, quando consideramos 8 canais, o sistema TDM

apresenta crescimento na BER, apresentando desempenho bastante inferior ao sistema RoF.

A capacidade dos sistemas WDM e seu desempenho para 4 e 8 canais sugerem a utilização dessa tecnologia em conjunto com RoF ou TDM. Nesse caso, cada canal WDM poderia transportar diversos canais RoF ou TDM.

E, como a tecnologia RoF reduz consideravelmente os custos de implantação da arquitetura WOBAN, os resultados obtidos mostram que ela pode ser escolhida em detrimento da tecnologia TDM, sem redução de desempenho da rede.

## BIBLIOGRAFIA

TAURION, C. (2011). *Cidades Inteligentes em Cinco Passos*. Acesso em 25 de 05 de 2012, disponível em Portal 2014: <http://www.portal2014.org.br/noticias/8489/>.

[CIA]2. *Construindo Cidades Inteligentes – da Instrumentação dos Ambientes ao Desenvolvimento de Aplicações*. Acesso em 25 de 05 de 2012, disponível em CIA2: <http://www.nr2.ufpr.br/~cia2/>

FARIAS J. E.; ALENCAR M.; LIMA. I.; ALENCAR, R. Cidades Inteligentes e Comunicações. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*. Campina Grande, v. 1, n. 1, p. 28-32, 2011.

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.

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.

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.

BRAIN, M.; GRABIANOWSKI, E. *How WiMAX Works*. Acesso em 25 de 05 de 2012, disponível em HSW: <http://computer.howstuffworks.com/wimax1.htm>.

LIMA, E.; PRADO, F. *Redes WiMAX: Bandas e Coberturas*. Acesso em 25 de 05 de 2012, disponível em Teleco: [http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswimax/pagina\\_3.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswimax/pagina_3.asp).

ESPOSITO, P.; ZUQUIM, R. *WiMAX, IEEE 802.16 - Camadas Física e MAC*. Acesso em 25 de 05 de 2012, disponível em WiMAX: [http://www.gta.ufrj.br/grad/06\\_1/wimax/phy.html](http://www.gta.ufrj.br/grad/06_1/wimax/phy.html).

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

WIKIPEDIA (2007), *File:FTTX.png*. Acesso em 28 de 05 de 2012, disponível em WIKIPEDIA: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:FTTX.png>

TELECO. *Serviços Banda Larga: O uso de Rede Óptica Passiva GPON*. Acesso em 26 de 05 de 2012, disponível em Teleco: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialblgpon/default.asp>.

ITU-T G.984.1-7 (2008). *Gigabit-capable passive optical networks (GPON)*. Acesso em 26 de 05 de 2012, disponível em ITU-T G.984.1: <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=9379>.

ITU-T G.987 (2011), *10 Gigabit-capable passive optical networks (10G-PON)*. Acesso em 26 de 05 de 2012, disponível em ITU-T G.987: <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=9379>

IEEE 802.3av (2011). *IEEE 802.3av 10GEPON PHY Summary*. Acesso em 28 de 05 de 2012, disponível em IEEE 802.3av: [http://www.ieee802.org/3/av/public/2007\\_01/3av\\_0701\\_ben-amram\\_1.pdf](http://www.ieee802.org/3/av/public/2007_01/3av_0701_ben-amram_1.pdf).

LEE, C. H. et al. WDM-PON experiences in Korea. *Journal Of Optical Networking* 6, No 5, 2007.

WIKIPEDIA (2012). *Arrayed waveguide grating*. Acesso em 28 de 05 de 2012, disponível em WIKIPEDIA: [http://en.wikipedia.org/wiki/Arrayed\\_waveguide\\_grating](http://en.wikipedia.org/wiki/Arrayed_waveguide_grating).

ITU-T G.692 (1998). *Optical Interfaces for Multichannel Systems with Optical Amplifiers*. Acesso em 28 de 05 de 2012, disponível em ITU-T G.692: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.692-199810-I>.

ITU-T G.694.2 (2003): *Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid*. Acesso em 28 de 05 de 2012, disponível em ITU-T G.694.2: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I>.

ITU-T G.694.1 (2012): *Spectral grids for WDM applications: DWDM wavelength grid*. Acesso em 28 de 05 de 2012, disponível em ITU-T G.694.1: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-I>.

VPITransmissionMaker (2008). *VPITransmissionMaker™ Optical Systems User's Manual*. Acesso em 2 de 06 de 2012, disponível em VPITransmissionMaker: <http://www.vpiphotonics.com>

LIMA, I.; ALENCAR, R.; FARIAS, J. Transporte óptico de sinais WiMAX. *XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT'12*. Novembro, 2012.



