

# Transporte óptico de sinais WiMAX

Ísis de A. Lima, Raphael T. de Alencar e José Ewerton P. de Farias

**Resumo**— Este artigo contém uma rápida revisão sobre o atual estágio da implantação de redes de acesso ópticas em várias regiões. É feita uma discussão sobre o conceito de redes de acesso híbridas, isto é, redes de acesso com parte óptica e parte via rádio, enfatizando o transporte físico de sinais em RF via fibras ópticas. Resultados numéricos de simulações para a camada física de redes ópticas de acesso e de enlaces RoF (rádio sobre fibra) são também apresentados e discutidos.

**Palavras-Chave**—redes de acesso híbridas, WOBAN, RoF.

**Abstract**— A short review on the current status of the deployment of optical access networks for several regions is presented. The concept of hybrid (optical-wireless) access networks, focusing on the physical transport of RF signals over optical fibers is introduced. Numerical results obtained through simulations for the physical layer of optical access networks and for RoF links are included and discussed.

**Keywords**—hybrid access networks, WOBAN, RoF.

## I. INTRODUÇÃO

As redes ópticas de acesso passivas (PONs) permitem que seus usuários possam desfrutar de diversos serviços de faixa larga. A primeira geração de PONs, conhecida por TDM-PON, utiliza uma arquitetura ponto-a-multiponto, e usa multiplexação por divisão do tempo para compartilhar recursos de transmissão. A segunda geração de PONs utilizará WDM (multiplexação por divisão em comprimento de onda), o que possibilita aumento significativo na oferta de largura de faixa para os usuários [1]. Por outro lado, características das redes sem fio (*wireless*) tais como: eliminação dos custos de cabeamento, facilidade de implantação, e mobilidade tornaram a tecnologia *wireless* extremamente popular.

A ideia da criação de uma rede que agregue as altas taxas de transferência e a confiabilidade das redes ópticas passivas à mobilidade oferecida pelas redes sem fio originou o conceito de Redes de Acesso de Faixa Larga Híbrida Óptico-Sem Fio (WOBAN – *Wireless-Optical Broadband Access Network*). A proposta dessas redes é a implantação de um cenário que permita ao usuário o acesso à rede por intermédio de interface sem fio com suporte em uma rede PON (*Passive Optical Network*). Nessa arquitetura, os TLOs (Terminais de Linha tica, em inglês OLT) localizados em instalações da operadora de telecomunicações são conectados a diversas URAs (Unidades de Rede de Acesso, em inglês ONU/ONT) por segmentos PON, assim como na arquitetura TDM-PON. A diferença é que cada URA é associada a uma ERB (Estação Rádio Base) que serve como porta de acesso entre a malha sem fio e a rede óptica [2].

Dentre as características críticas dessas redes estão 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 radiofrequência (RF) por guias ópticos: RF sobre fibra (RoF – *Radio over Fiber*), frequência intermediária (FI) sobre fibra e banda básica sobre fibra [3]. A tecnologia RoF permite reduzir consideravelmente os custos de implementação da arquitetura WOBAN, inserindo toda a complexidade de circuito nos TLOs e simplificando o processamento nas ERBs/URAs, que estão presentes em maior número. No entanto, a utilização de banda básica sobre fibra oferece a possibilidade de se utilizar padrões já estabelecidos para TDM.

Neste artigo são apresentados resultados de uma investigação sobre a aplicação da arquitetura WOBAN, com foco nas técnicas de transporte óptico de sinais RF, levando em consideração o estado atual das redes de acesso ópticas e sem fio, bem como suas tendências. Uma análise comparativa entre a transmissão RoF e em banda básica para WOBANs para transporte de sinais WiMAX é apresentada por meio da obtenção dos valores de taxa de erro de *bit* (BER) em sistemas simulados.

## II. REDES DE ACESSO: CENÁRIO ATUAL E ALTERNATIVAS EM FOCO

A consolidação dos padrões para redes de acesso TDM-PON, e os recentes avanços no campo dos lançamentos comerciais constitui o que se convencionou chamar de primeira geração de redes ópticas de acesso. A utilização das tecnologias de redes de acesso baseadas em PONs (redes ópticas passivas) 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. Em dezembro de 2011 o ranking do percentual de penetração das tecnologias FTTH e FTTC (fibra até o meio-fio) mostra a Coreia do Sul como líder com cerca de 58% das residências conectadas, seguida por Japão (40%), Hong Kong (39%), Emirados Árabes Unidos (32%) e Taiwan (27%) [4]. Este ano, 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% FTTC/FTTB (fibra até o meio-fio ou até o condomínio) [1]. Entre as iniciativas nacionais para dotar os cidadãos e as organizações de infraestruturas de redes de acesso baseadas em FTTH, destaque-se aqui a National Broadband Network (NBN) ora em implantação na Austrália. A NBN conectará com fibra óptica 93% das residências, escolas e negócios a taxas de até 1 *Gbit/s*. E conectará os restantes 7% com tecnologias sem fio terrestres ou via satélite a taxas de até 12 *Mbit/s* [5].

A evolução histórica sugere que até 2015 a demanda por usuário residencial deverá ser de 1 *Gbit/s*, atingindo 10 *Gbit/s* até 2020/2021 [6]. Considerando a possibilidade de suporte a

Ísis de A. Lima, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG (COPELE), Raphael T. de Alencar e José Ewerton P. de Farias, Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, Brasil. E-mails: isis.lima@ee.ufcg.br, raphael.tavares@ee.ufcg.br, ewerton@ieee.org. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CTIC-RNP (Contrato RNP-PaqTc/PB-Iecom 2011-2013).

diversos canais ópticos, cada um com capacidade de 10 Gbit/s, separados pelo comprimento de onda, a fibra operando com TDM (que utiliza apenas uma portadora óptica) se revela como uma solução ineficiente e incapaz de suprir as necessidades do mercado crescente. Assim, prevê-se que essas redes venham 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 [7].

Entre a primeira e a segunda gerações, uma alternativa intermediária (TDM-WDM PON) poderá ser adotada [8]. Como a largura de banda de uma única fibra ainda é considerada excessiva para usuários de redes de acesso, a utilização de redes ópticas ponto-a-ponto é economicamente atrativa 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 [8]. 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.

Uma solução para enlaces de redes de acesso é a tecnologia de comunicação sem fio. Existem três técnicas que se destacam nesse sentido: Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), WiMAX (*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.

A tecnologia de rádio sobre fibra, RoF (*Radio Over Fiber*), que permite o transporte de sinais de rádio por enlaces de fibra óptica já existentes com consequente diminuição de custos dá origem aos conceitos de: sistemas Híbridos Óptico - Sem Fio, HFR (*Hybrid Fiber Radio*) e de Redes de Acesso de Faixa Larga Óptico-Sem Fio, WOBANs (*Wireless-Optical Broadband-Access Networks*).

### III. REDES DE ACESSO DE FAIXA LARGA HÍBRIDAS ÓPTICO - SEM FIO

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 [2]. Essa arquitetura 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 para todos os usuários é inviável devido à limitação física do espectro.

Na Figura 1 é ilustrada uma arquitetura proposta para uma WOBAN. Diversos segmentos 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 1).

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 por meio 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) [7].

#### A. Problemas Gerais

Tipicamente, os usuários estão 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* [7]. O *mobile IP* funciona bem para redes grandes e já está consolidado.

Podemos descrever o *front end* de uma WOBAN como uma rede sem fio em malha, com diversos roteadores/ERBs sem fio e alguns *gateways*. Esse trecho pode empregar tecnologias sem fio padrão como Wi-Fi e WiMAX, sendo a tecnologia WiMAX especialmente indicada, por se aplicar melhor a redes metropolitanas (reduzindo a quantidade de ERBs necessárias).

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. Algoritmos de posicionamento e roteamento são apresentados em [7] e mais detalhadamente em [2], [9], [10] e [11], juntamente aos resultados comparativos de sua aplicação em WOBANs experimentais. Tais resultados atestam que os algoritmos sugeridos solucionam o problema de roteamento de dados e de posicionamento das ERBs. Além disso, a proposta de integração de nuvem sobre WOBAN, fornecendo diferentes serviços da nuvem a partir da rede de acesso, é feita em [12] e [13]. O estudo de arquiteturas WOBAN na eficiência energética de redes (*green networks*) é feito em [14] e [15].

Características consideradas críticas são a escolha dos padrões de comunicação e da técnica de transmissão a ser utilizada na parte óptica da WOBAN. Como a escolha dos padrões de comunicação depende diretamente da técnica de transmissão, é necessário o estudo comparativo das tecnologias de transporte de sinais em radiofrequência sobre fibra óptica, que é apresentado na Seção IV.

#### IV. TRANSPORTE ÓPTICO DE SINAIS EM RADIOFREQUÊNCIA

Existem basicamente três formas de transportar ondas de radiofrequência (RF) por guias ópticos: RF sobre fibra (RoF – *Radio over Fiber*), FI sobre fibra (frequência intermediária sobre fibra) e banda básica sobre fibra [3].

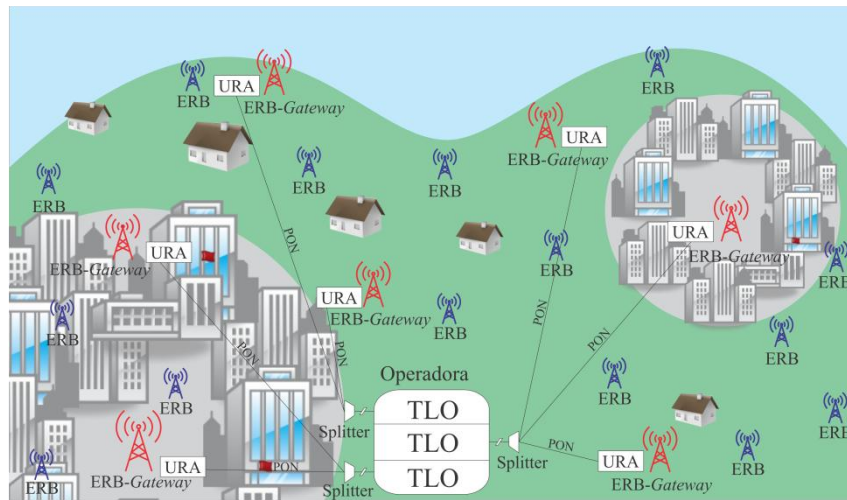


Fig. 1. Arquitetura WOBAN com tecnologia PON.

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 pela fibra óptica. O sinal recebido no TLO é detectado (conversão óptico-elétrica, O/E), obtendo-se o sinal RF. Para transmissão *downstream*, o sinal a ser enviado do TLO para a ERB passa por um modulador elétrico, originando o sinal RF, que será levado ao modulador óptico (O/E), gerando o sinal RF para ser transmitido. 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 frequência intermediária, e em seguida sofre a modulação óptica (E/O) para ser transmitido pela fibra. Ao ser recebido no TLO, o sinal é detectado (O/E). Analogamente, o sinal gerado no TLO deve sofrer modulação elétrica e conversão para frequência intermediária antes de ser modulado opticamente. Essa técnica reduz os efeitos de dispersão cromática. Por outro lado, é inserida complexidade nas ERBs */gateway* e a complexidade no TLO é mantida.

A transmissão utilizando banda básica sobre fibra pode fazer uso das tecnologias conhecidas de transmissão óptica (TDM e WDM). O sinal recebido pela ERB é demodulado (levado à banda básica), podendo receber tratamento de erros, e em seguida é modulado opticamente (E/O). Ao ser recebido no TLO, o sinal é detectado (O/E). Para o TLO, o sistema opera como uma rede óptica convencional. 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 arquiteturas RF sobre fibra e banda básica sobre fibra foram simuladas para comparação de desempenho, por serem soluções mais prováveis. Os sistemas implementados e resultados obtidos são descritos na Seção V.

#### V. ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO DAS TÉCNICAS DE TRANSPORTE ÓPTICO DE SINAIS RF

Os seguintes cenários foram simulados: (i) tecnologia OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para quatro e oito canais; (ii) tecnologia TDM para quatro e oito canais; (iii) tecnologia WDM para quatro e oito canais. O primeiro caso corresponde à transmissão RoF e os últimos correspondem à transmissão em banda básica. Em todos os casos, consideramos o tráfego em apenas uma direção.

A análise de desempenho das arquiteturas é feita pela taxa de erro de *bit*, ou BER (para as arquiteturas WDM e TDM) e taxa de erro de símbolo, ou SER (para RoF) obtidas pelo método estocástico segundo estimativa de Gauss, apropriado para o caso [16].

A fibra utilizada em todas as arquiteturas é uma fibra óptica 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 da fibra óptica, todos os sistemas compartilham das 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*), potência média 1.5 mW e largura espectral 10 MHz;
- Fotodiodos tipo PIN;
- Portadora óptica em 1550 nm, ou seja, 193.1 THz (para WDM foi usada a janela de 1550 nm);
- Multiplexadores e demultiplexadores AWG (*Arrayed Wavelength Grating*), quando presentes, com perda de inserção de 5.0 dB.

A arquitetura utilizada na simulação RoF é ilustrada na Figura 2. A saída de cada bloco OFDM corresponde à modulação OFDM (com 256 subportadoras e modulação 16 - QAM), para uma sequência binária, sendo os canais 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 e em seguida toda a banda RF é modulada opticamente. O sinal óptico se propaga ao longo da fibra, é detectado e o canal RF desejado é demodulado. O sistema implementado para simulação de arquitetura TDM é mostrado na Figura 3. Cada canal TDM é constituído por uma fonte de dados (gerador de sequências binárias pseudo aleatórias) com taxa variável, codificador de linha RZ (*Return to Zero*) e modulador óptico com fonte externa.

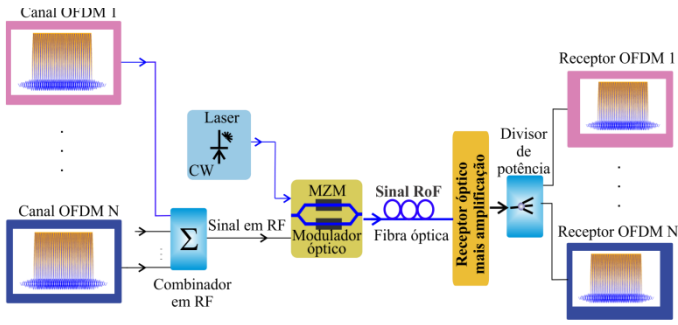


Fig. 2. Sistema RoF para transporte óptico de sinais OFDM com N canais OFDM e um canal óptico.

A separação dos canais no domínio do tempo é feita da seguinte forma: o *duty-cycle* do sinal codificado (RZ) é  $1/N$  (para um sistema com  $N$  canais), e o  $k$ -ésimo canal sofre uma defasagem de  $((k - 1)/N)T_b$ , sendo  $T_b$  o tempo de *bit*. Os sinais ópticos são combinados por um combinador óptico e separados por um divisor de potência após propagação. O sinal óptico recebido é usado como portadora em um modulador Mach-Zehnder e o sinal elétrico do canal desejado é recuperado introduzindo um sinal modulante de controle apropriado.

Para a tecnologia WDM, a arquitetura implementada é mostrada na Figura 4. Cada canal WDM é constituído por uma fonte de dados como a do sistema TDM, um codificador de linha NRZ (*Non Return to Zero*), 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).

Os sistemas RoF e TDM foram simulados para taxas de transmissão por canal variando entre 30 e 75 Mbit/s, limite superior para o padrão proposto para malha sem fio (WiMAX), já que as taxas em uma rede são limitadas pela menor taxa dos canais envolvidos na transmissão do sinal. Para o sistema WDM essa taxa não faz sentido, devido à capacidade do canal.

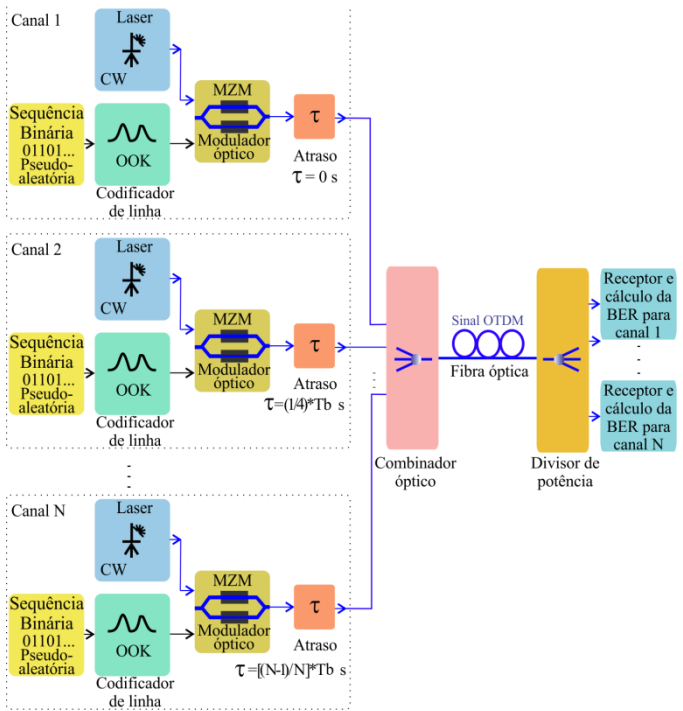


Fig. 3. Sistema TDM com N canais TDM e um canal óptico.

Os valores de BER e SER para diferentes taxas e comprimentos de fibra simulados são mostrados na Tabela I.

O espectro de potência RF para o sistema RoF (saída do combinador RF) é mostrado na Figura 5. Para o espaçamento indicado para WiMAX (20 MHz), a taxa máxima possível é 75 Mbit/s, para a qual já não existe banda de guarda entre os canais. Assim, para taxas muito próximas ou iguais a 75 Mbit/s, o sistema RoF apresenta queda de desempenho, conforme comprovado pelos resultados da Tabela I, inerente a redes WiMAX.

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.

## VI. CONCLUSÕES

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, já que se impõe logo na camada física.

Considerando o transporte óptico pelas tecnologias TDM e RoF e supondo a escolha do padrão WiMAX na malha sem fio, as medidas empíricas de desempenho obtidas sugerem que a tecnologia RoF é competitiva com a TDM, já que apresenta  $BER > 10^{-9}$ . A exceção ocorre em 75 Mbit/s, quando a própria malha sem fio degrada o desempenho da rede. Além disso, quando consideramos 8 canais, o sistema TDM apresenta crescimento na BER, apresentando desempenho 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. 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.

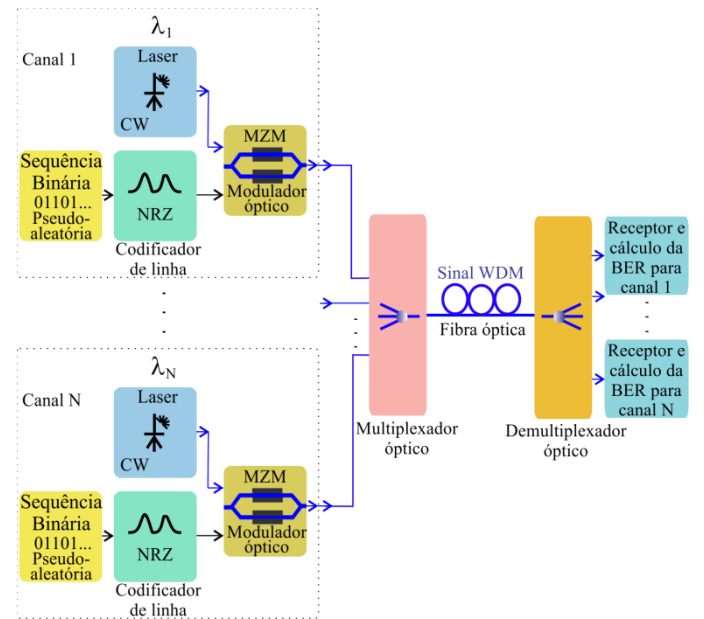


Fig. 4. Sistema WDM com N canais ópticos.

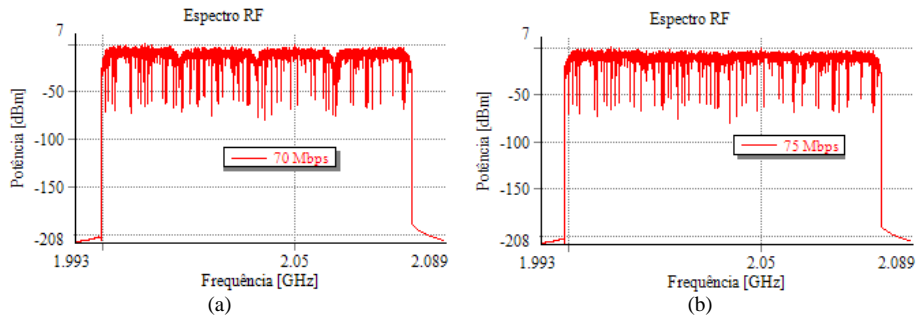


Fig. 5. Espectro de potência para o sinal RF com taxa de transmissão de (a) 70 Mbps e (b) 75 Mbps.

TABELA I. Ordem de grandeza para BER/SER obtidas.

|     | 4 Canais            |            |            |            |            | 8 Canais   |            |            |            |
|-----|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|     | Taxa de Transmissão | 5 km       | 10 km      | 15 km      | 20 km      | 5 km       | 10 km      | 15 km      | 20 km      |
| TDM | 30 Mbit/s           | $10^{-28}$ | $10^{-24}$ | $10^{-20}$ | $10^{-16}$ | $10^{-10}$ | $10^{-8}$  | $10^{-7}$  | $10^{-5}$  |
|     | 50 Mbit/s           | $10^{-26}$ | $10^{-23}$ | $10^{-19}$ | $10^{-15}$ | $10^{-10}$ | $10^{-8}$  | $10^{-6}$  | $10^{-5}$  |
|     | 70 Mbit/s           | $10^{-26}$ | $10^{-23}$ | $10^{-19}$ | $10^{-15}$ | $10^{-10}$ | $10^{-8}$  | $10^{-6}$  | $10^{-5}$  |
|     | 72 Mbit/s           | $10^{-26}$ | $10^{-22}$ | $10^{-19}$ | $10^{-15}$ | $10^{-10}$ | $10^{-8}$  | $10^{-6}$  | $10^{-5}$  |
|     | 75 Mbit/s           | $10^{-25}$ | $10^{-22}$ | $10^{-19}$ | $10^{-15}$ | $10^{-9}$  | $10^{-8}$  | $10^{-6}$  | $10^{-5}$  |
| RoF | 30 Mbit/s           | $10^{-61}$ | $10^{-54}$ | $10^{-45}$ | $10^{-33}$ | $10^{-21}$ | $10^{-20}$ | $10^{-18}$ | $10^{-16}$ |
|     | 50 Mbit/s           | $10^{-55}$ | $10^{-44}$ | $10^{-33}$ | $10^{-22}$ | $10^{-21}$ | $10^{-20}$ | $10^{-18}$ | $10^{-15}$ |
|     | 70 Mbit/s           | $10^{-43}$ | $10^{-33}$ | $10^{-24}$ | $10^{-16}$ | $10^{-15}$ | $10^{-16}$ | $10^{-15}$ | $10^{-13}$ |
|     | 72 Mbit/s           | $10^{-28}$ | $10^{-24}$ | $10^{-22}$ | $10^{-14}$ | $10^{-14}$ | $10^{-15}$ | $10^{-14}$ | $10^{-11}$ |
|     | 75 Mbit/s           | $10^{-7}$  | $10^{-7}$  | $10^{-6}$  | $10^{-5}$  | $10^{-6}$  | $10^{-6}$  | $10^{-6}$  | $10^{-5}$  |
| WDM | 10 Gbit/s           | $10^{-72}$ | $10^{-40}$ | $10^{-22}$ | $10^{-12}$ | $10^{-72}$ | $10^{-40}$ | $10^{-22}$ | $10^{-12}$ |

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da RNP, através do Projeto (CIA)<sup>2</sup> Construindo Cidades Inteligentes: da Instrumentação dos Ambientes ao desenvolvimento de Aplicações, e o apoio do Iecom e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG - COPELE.

REFERÊNCIAS

[1] S. Sarkar, S. Dixit e M. Biswanath, "Hybrid wireless-optical broadband-access network (WOBAN): a review of relevant challenges," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, pp. 3329-3340, Novembro 2007.

[2] S. Sarkar, H. Yen, S. Dixit e B. Mukherjee, "Hybrid wireless-optical broadband-access network (WOBAN): network planning and setup," IEEE/OSA Journal on Selected Areas in Communications, pp. 12-21, Agosto 2008.

[3] C. Lim, A. Nirmalathas, M. Bakaul, P. Gamage, K.-L. Lee, Y. Yang, D. Novak e R. Waterhouse, "Fiber-Wireless Networks and Subsystem Technologies," Journal of Lightwave Technology, pp. 390-405, 15 Fevereiro 2010.

[4] FTTH Fact Sheet 2011, disponível em <http://www.ftthcouncil.org/>

[5] NBN, Australia, disponível em <http://www.nbn.gov.au/>

[6] L. K. Vanston e R. L. Hodges, "Forecasts for the US telecommunications network". Telektronnik, 104 (3/4), 2008.

[7] S. Sarkar, S. Dixit e M. Biswanath, "Hybrid wireless-optical broadband-access network (WOBAN): a review of relevant challenges," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, pp. 3329-3340, Novembro 2007.

[8] J. E. P. Farias, "Rede óptica passiva usando TDM e WDM," em XXVII SBrT, Blumenau, 2009.

[9] S. Sarkar, B. Mukherjee e S. Dixit, "Optimum placement of multiple optical network units (ONUs) in optical-wireless hybrid access networks," em OFC, Anaheim, CA, 2006.

[10] V. Ramamurthi, S. Sarkar, D. Ghosal, S. Dixit e B. Mukherjee, "CaDAR: An Efficient Routing Algorithm for a Wireless-Optical Broadband Access Network (WOBAN)", IEEE/OSA Journal of

Optical Communications and Networking, pp. 392-403, Outubro de 2009.

[11] X. Chen, A. Reaz, P. Lei Shi, P. Chowdhury, Yi Zhang, Rui Wang e B. Mukherjee, "Delay-Differentiated Routing Algorithm to enhance delay performance of WOBAN". 9<sup>th</sup> International Conference on Optical Internet (COIN), 2010.

[12] A. Reaz, V. Ramamurthi e M. Tornatore, "Cloud-over-WOBAN (CoW): An Offloading-Enabled Access Network Design", IEEE International Conference on Communications (ICC), 2011.

[13] A. Reaz, V. Ramamurthi, M. Tornatore e B. Mukherjee, "Green Provisioning of Cloud Services over Wireless-Optical Broadband Access Networks", Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), 2011.

[14] P. Chowdhury, M. Tornatore, S. Sarkar e B. Mukherjee, "B. Building a Green Wireless-Optical Broadband Access Network (WOBAN)", Journal of Lightwave Technology, vol. 28, pp. 2219-2229, Agosto de 2010

[15] P. Chowdhury, M. Tornatore, S. Sarkar e B. Mukherjee, "Towards Green Broadband Access Networks", Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), 2009.

[16] VPItransmissionMaker™ Optical Systems User's Manual, pp. 33-44, 2008, disponível em <http://www.vpiphotonics.com/>

[17] E. L. Pinto e C. P. Penedo, "A técnica de transmissão OFDM," Revista do INATEL, pp. 1-10, Junho 2002.

[18] L. Nuaymi, WiMAX Technology for Broadband Wireless Access, West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2007.

[19] J. E. P. Farias, M. S. Alencar, Í. A. Lima e R. T. Alencar, "Cidades inteligentes e comunicações," Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação, pp. 28-32, 2011.