# Arquiteturas e Aplicações de Rádio sobre Fibra

Thyago Monteiro S. Pinto, Ísis de A. Lima e José Ewerton P. de Farias

***Resumo*— Este artigo apresenta uma discussão sobre sistemas rádio sobre fibra óptica (RoF). Algumas aplicações, algumas arquiteturas e resultados numéricos para o desempenho da camada física de um sistema RoF com 8 canais OFDM sobre fibra são incluídos.**

***Palavras-Chave*— RoF, redes híbridas, OFDM.**

***Abstract*— This paper presents a discussion on radio over fiber systems (RoF). Some applications and architectures and numerical results for the physical layer performance of a 8-channel OFDM over fiber system are included.**

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

## I. Introdução

A demanda por acesso à Internet e aos serviços relacionados cresceu a taxas superiores a 100 % ao ano entre os anos 1995 e 2000. Tal crescimento estabilizou em torno dos 38% ao ano desde 2010 [1]. Com a finalidade de evitar o esgotamento de capacidade das redes-núcleo (*backbones* ), novas tecnologias de transmissão óptica têm chegado ao mercado ano após ano. Redes ópticas passivas (PON) constituídas de elementos que não necessitam de alimentação elétrica no trecho fora das dependências da operadora ou do usuário, se apresentam como ótimas candidatas para o segmento acesso. PONs oferecem a confiabilidade, robustez e elevadas taxas de transmissão a distâncias de até dezenas de quilômetros. Outra alternativa que vem ganhando destaque para substituir (ou conviver) com TDM-PON é o uso de redes de acesso híbridas, também denominadas por WOBANs constituídas de uma retaguarda (*back-end* ) óptica e um *front-end* (porta de entrada) formado por uma rede sem fio (*wireless* ) que oferece mobilidade, comodidade aos usuários, além de diminuir os custos de cabeamento e instalação da infra-estrutura necessária para a capilarização de uma malha óptica. Um dos elementos dessa infraestrutura é a tecnologia de rádio sobre fibra (RoF) que permite transportar um sinal de rádio frequência por uma fibra óptica através de modulação. Este trabalho apresenta uma análise da convergência dessas tecnologias, detalhando algumas arquiteturas e aplicações. Na segunda seção é detalhado o modo de transmissão com rádio sobre fibra. A seção três apresenta algumas arquiteturas propostas na literatura. A quarta seção destaca algumas aplicações dessa tecnologia. Resultados de simulações de um sistema com 8 canais OFDM(*Orthogonal frequency-division multiplexing* ) são apresentados na quinta seção. Comentários adicionais compõem a sexta seção.

Thyago Monteiro S. Pinto, Ísis de A. Lima e José Ewerton P. de Farias¸ Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, E-mails:thyago.pinto@ee.ufcg.edu.br, isis.lima@ee.ufcg.edu.br, ewerton@ieee.org. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CTIC-RNP, Projeto RNP-PaqTc/PB-Iecom 2011-2013.

## II. Rádio sobre fibra (RoF)

A tecnologia de radio sobre fibra (*Radio over Fiber*) permite a transmissão de sinais de rádio frequência (RF) em fibra óptica, e como o sinal elétrico modulante está em RF, algumas considerações devem ser feitas acerca desses sinais.

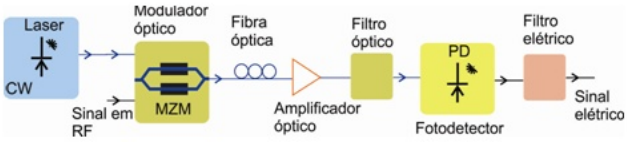


Fig. 1. Esquema de modulação RoF

O esquema básico de transmissão RoF é apresentado na Figura 1. Um sinal em RF modula uma portadora óptica no transmissor composto por uma fonte óptica (laser) e um modulador óptico. A saída deste é propagada através da fibra. No outro extremo do enlace, um receptor óptico converte o sinal óptico recebido de volta para o domínio elétrico. Dependendo da distância de transmissão, amplificadores ópticos podem ser necessários para compensar a atenuação do sinal imposta pela fibra óptica. Entre as vantagens dessa integração, estão o baixo consumo de potência do sinal, aproveitamento da grande largura de faixa do meio fibra óptica, imunidade à interferência de rádio frequência e baixa atenuação na fibra [2].

O uso da tecnologia RoF é atrativo para diversas aplicações, já que elimina os custos de cabeamento no trecho final de uma rede de acesso e permite utilizar a estrutura física de fibra óptica. Combina as altas taxas e a robustez dos sistemas ópticos com a mobilidade oferecida pelos sistemas sem fio. Além disso, a tecnologia reduz os custos na implementação de circuitos em estações rádio base (BS), já que o sinal em RF não precisa ser demodulado antes de modular uma portadora óptica.

A tecnologia RoF deu origem ao conceito de sistemas Híbridos Óptico – Sem Fio (HFR – *Hybrid Fiber Radio* ) e Redes de Acesso de Faixa Larga Óptico-Sem Fio, (WOBANs).

O uso de HFR se aplica a sistemas de comunicação sem fio que necessitem de suporte em fibra óptica, seja devido à demanda por taxas muito elevadas em um canal em RF ou no agrupamento de vários canais em RF. Já o conceito de WOBAN é menos abrangente e propõe a utilização de RoF na interface de uma rede de acesso composta por uma malha sem fio com suporte em uma rede PON [3].

## III. ARQUITURAS ROF

### A. Arquitetura RoF WDM-PON

O diagrama de blocos de uma arquitetura RoF WDM-PON é apresentado na Figura 2. No ponto de presença da operadora de telecomunicações (CO), cada sinal RF a ser transmitido modula uma fonte óptica. As portadoras moduladas são conectadas a um multiplexador e em seguida o sinal composto por diversos comprimentos de onda é transmitido pelo enlace de fibra.

No ponto final da fibra, o sinal chega a um nó-remoto (RN) responsável pela demultiplexação e encaminhamento do sinal desejado até a Unidade de Rede de Acesso(URA), um ponto relativamente próximo ao usuário. O sinal é então detectado (conversão óptico-elétrica), amplificado e filtrado. O sinal elétrico RF é enviado para uma BS diretamente conectada à URA, e repassado para o usuário localizado em uma determinada célula.

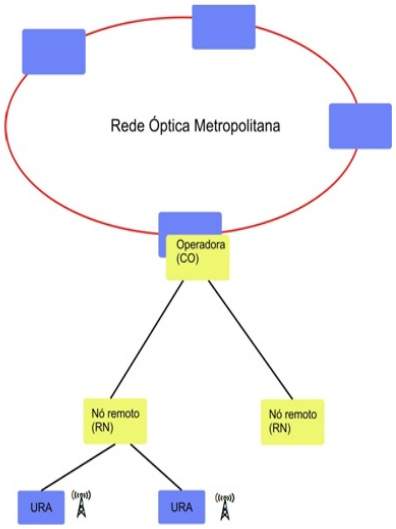


Fig. 2. Arquitetura Rof WDM

### B. Arquitetura WOBAN com transporte RoF

Essa arquitetura representa uma aplicação específica do transporte RoF em redes de acesso. A Figura 3 ilustra uma arquitetura para uma WOBAN. Diversos segmentos PON são suportados na operadora, partindo cada um de um Terminal de Linha Óptico (OLT) e terminando numa URA. Cada URA é conectada a uma estação rádio base (ERB), que serve como uma porta de saída da rede óptica, para dar início à parte sem fio da rede. Além de ERBs ligadas diretamente às URAs, existem outras ERBs para gerenciamento da rede.

Assim, nessa arquitetura, o sinal RF corresponde a um sinal de rede de acesso sem fio, como Wi-Fi, UMTS, WiMAX ou 4G.

### C. Sistema MIMO com RoF-DAS e WDM-PON

A arquitetura MIMO (*Multilple Input Multiple Output*) é apresentada na figura 4. Em cada CS, muitos sinais RF MIMO

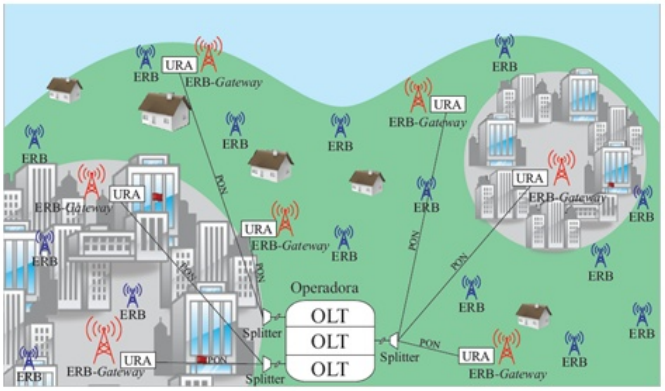


Fig. 3. Arquitetura WOBAN com transporte RoF.

podem ser multiplexados em um único canal, e múltiplos comprimentos de onda são atribuídos a diferentes BSs. Usa-se um AWG (*Arrayed Waveguide Grating*) como um roteador de comprimentos de onda. Isto permite a acomodação de um grande número de BSs. Em cada uma destas é utilizado um circulador óptico sem seletividade que facilita a adição de sinais *upstream* e *dowstream*. A seleção é realizada por filtros ópticos na entrada das BS.

Resultados experimentais [4] demonstram situações em que o sistema MIMO aumenta em 2.3 vezes a capacidade de transmissão em comparação ao SISO (*Single Input Single Output*) equivalente. Essa capacidade melhora em 7.4% com o uso de antenas linearmente distribuídas com 2m de separação em relação ao arranjo convencional de antenas MIMO. Para 4m em torno da borda de célula o aumento sobe para 11.3%. Além disso, verificou-se que o modelo promove uma melhora do desempenho da transferência de dados e amplia a cobertura, aumentando a potência recebida no receptor.

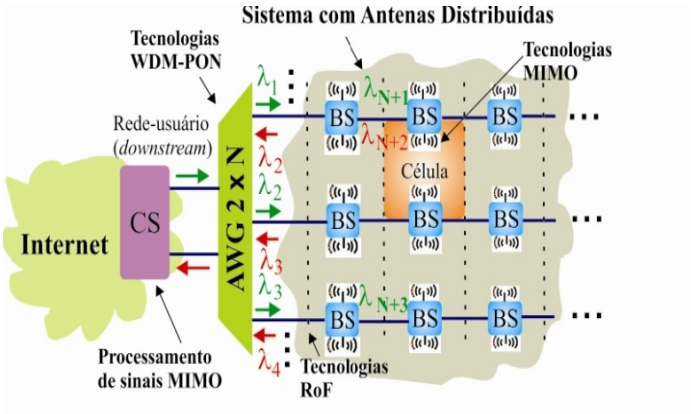


Fig. 4. Sistema MIMO com RoF-DAS e WDM-PON

### D. Arquiteturas WDM -RoF Anel

A arquitura WDM tipo Anel, apresentada na figura 5 faz com que cada ponto de presença da operadora de telecomunicações esteja conectado a múltiplas BSs por meio de um arranjo cíclico, e não ramificado. Os comprimentos

de onda são multiplexados em torno de um anel em uma única direção. Para isso, vários OADM (*optical add-drop multiplexer*) são necessários para relacionar comprimentos de onda às BS, sendo este dispositivo também utilizado na transmissão *upstream*.

Uma das principais vantagens dessa arquitetura é que o modelo circular permite o uso de um sistema de proteção caso ocorra falha em algum ponto da estrutura. Porém, essa estrutura requer um maior número de componentes ópticos o que encarece o sistema.

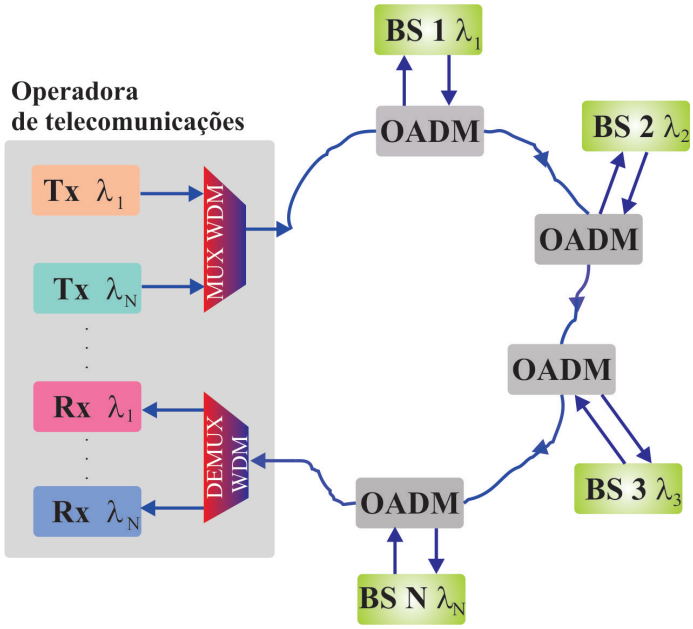


Fig. 5. Arquiteturas WDM -RoF Anel

## IV. Aplicações RoF

- **Redes sem fio**. RoF é uma alternativa na implementação de redes sem fio (WiMAX, WiFi) e de sinais da interface aérea do padrão UMTS oferecendo dinamismo e flexibilidade aos usuários. Além disso, essa tecnologia também é empregada para prover o serviço *wireless* em áreas de difícil acesso como túneis e regiões montanhosas.
- **Redes Celulares**. RoF pode ser utilizada em redes celulares (GSM, UMTS, LTE) para realizar a conexão entre a estação central e a estação base, pois permite a transferência de dados em largura de faixa desejada além de proteger a transmissão de interferências eletromagnéticas.
- **Comunicações via satélite**. Estações base de satélites podem se conectadas através de enlaces ópticos usando a tecnologia RoF [5].
- **Conectividade intra-hospitalar**. A conectividade entre unidades médicas requer troca de informação em altas taxas, alta resolução de imagens assim como alta definição dos vídeos que podem ocupar tamanhos da ordem de Tera ou Gygabytes. A tecnologia RoF pode ser usada na obtenção desses aspectos em comunicação intra-hospitalar conforme proposto e verificado por [6].

## V. Simulação da transmissão RoF utilizando OFDM

Em um ambiente metropolitano, o que se verifica na transmissão de sinais RF é que o grande número de obstáculos entre o transmissor e o receptor tende a causar atenuações em algumas faixas de frequência, diminuindo a qualidade do sinal recebido. Uma alternativa para conviver com esse fato é a utilização da técnica de transmissão OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*) que utiliza sobreposição espectral entre múltiplas sub-portadoras ortogonais entre si ao longo da transmissão. Esse modelo apresenta as vantagens de lidar com as condições adversas do canal, trazer alta eficiência espectral comparada a modulação convencional e minimizar os problemas de interferência e distorção. Além disso, quando se trabalha com canais mais estreitos, consegue-se uma maior seletividade em frequência [7].

Para demonstrar parte das propriedades de um sistema RoF com vistas a aplicação em redes sem fio, como as utilizadas no *front end* de uma arquitetura WOBAN, é apresentada na figura 6 a simulação da transmissão RoF utilizando oito canais OFDM.

O sistema simulado pode ser posto em analogia com um sistema RoF genérico. Nesse caso, cada canal OFDM representa um módulo responsável pela recepção do sinal em RF enviado por um transmissor. Cada receptor OFDM representa um transmissor RF, que recebe o sinal elétrico obtido da detecção óptica e o envia para a atmosfera.

Cada sinal OFDM utiliza 256 sub-portadoras moduladas em 16QAM, correspondendo à modulação OFDM de uma sequência binária aleatória, com taxa de 1 Gbps. O espaçamento entre canais RF é de 350 MHz, sendo 10 GHz a frequência inferior da banda total utilizada.

O sinal RF obtido a partir da soma dos oito canais OFDM passa por um bloco que realiza o controle do nível do sinal e após esse por um modulador óptico do tipo Mach-Zehnder (perda de inserção de 3 dB). A portadora óptica utilizada é gerada por um laser DFB (*Distributed Feedback* ), com largura espectral de 10 MHz e potência de saída de 2.5 mW.

A fibra utilizada em todas as arquiteturas é uma fibra óptica monomodo do tipo DSF (*Dispersion Shifted Fiber*) com dispersão cromática $3.5 \times ps/nm.km$, 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. O sinal é transmitido pela fibra até alcançar o receptor e desse para um filtro passa baixa. Neste ponto calcula-se o valor da taxa de erro de símbolo (SER) para diferentes valores da taxa de transmissão e comprimentos de fibra. O cálculo desse parâmetro é realizado por meio da multiplicação entre a taxa de erro de bit(BER) e a quantidade de bits que cada símbolo representa, no caso 4 bits (modulação em 16-QAM). Para efeito de resultado, considerou-se apenas as ordens de grandeza da SER, cujos valores são apresentados na figura 9. Na figura 7 é mostrado o espectro do sinal RF para comprimento da fibra de 5 km, enquanto a figura 8 ilustra o digrama de constelação (recebida) do sinal nas mesmas condições.

A figura 9 mostra que o desempenho da transmissão sofre uma queda significativa para distâncias superiores a 35 km,

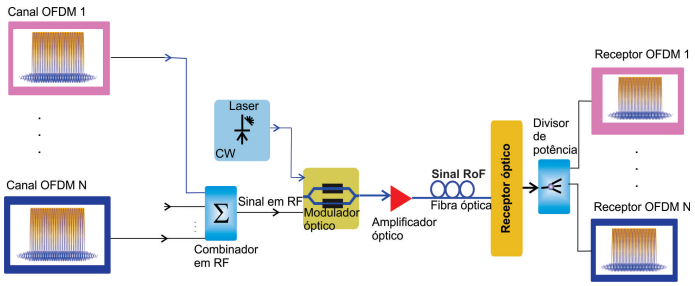


Fig. 6. Sistema RoF com 8 canais OFDM.

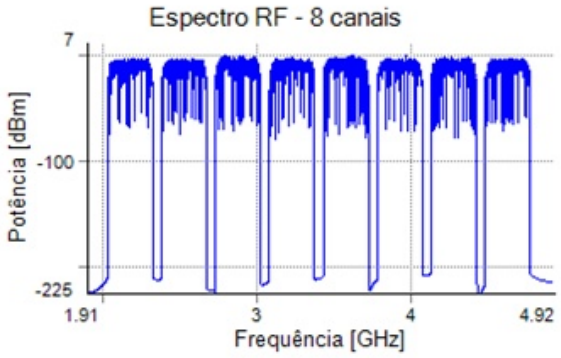


Fig. 7. Espectro RF 1Gbps, 5km.

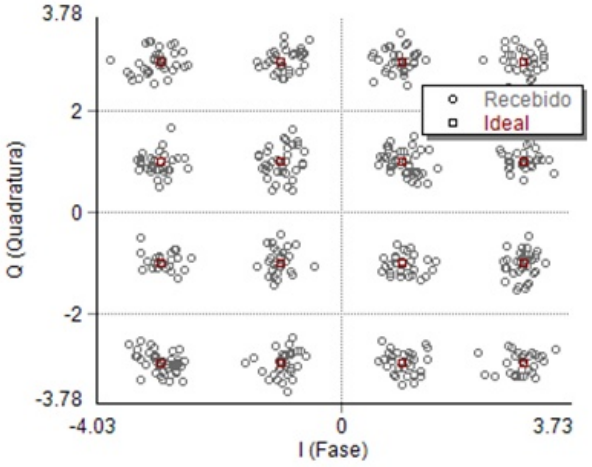


Fig. 8. Constelação (slice 1025) RF 1 Gbps, 5 km

aumentando o valor da SER para ordens de grandeza em torno de $10^{-8}$, sendo este um fator importante na construção do sistema. Para a transmissão à taxa de 1 Gps, a SER apresenta valores ainda maiores do que este, e podemos observar no diagrama de constelação da figura 8 que os símbolos recebidos se encontram ligeiramente espaçados do valor ideal de transmissão, considerando uma distância de 5km.

Esses resultados demonstram a aplicação da tecnologia RoF em sistemas de redes sem fio. Padrões WiFi como 802.11a/b/g são especificados para alcançar capacidades de 54 Mbps, 72 Mbps a 108 Mbps, enquanto a rede WirelessMAN-OFDM (padrão 802.16a) pode atingir taxas de até 75 Mbps, com raio

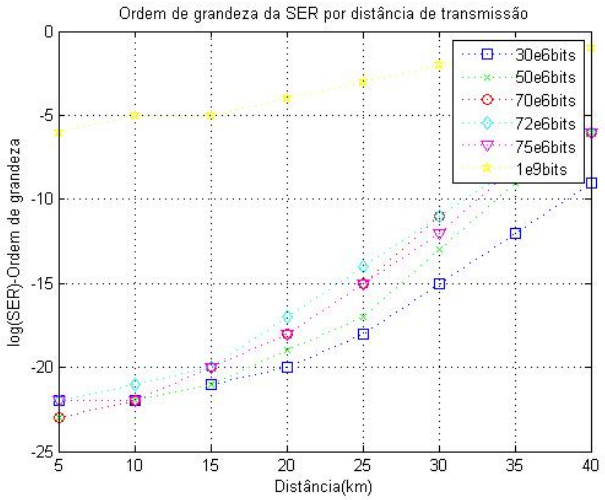


Fig. 9. Valores da Ordem de grandeza da SER por distância de transmissão

de cobertura de célula em torno de 2-8km em ambientes urbanos para transmissão ponto-a-multiponto. Valores coerentes com os apresentados e simulados.

Na simulação apresentada, utilizou-se a fibra DSF, devido a otimização proporcionada por esta para transmissão na segunda janela (regiões do espectro localizadas entre os picos de atenuação por íons hidroxila). Caso se utilize a fibra padrão single mode fiber(SMF), possivelmente a eficiência desse sistema estaria comprometida, visto que esta modalidade de fibra é otimizada para trabalhar na janela de 1310nm e possui alta dipersão na região de 1550nm, que foi a utilizada na simulação. Sendo assim, ajustes precisariam ser feitos para compensar essa dispersão e viabilizar o uso da arquitetura proposta em uma rede sem fio.

## VI. Conclusões

A utilização da transmissão RoF permite a construção de redes de acesso confiáveis propiciando elevadas taxas, bem como excelentes QoS (qualidades de serviço). A parte óptica oferece um aumento na taxa de transmissão de dados a dezenas de quilômetros além de proteger a informação de EMI (interferência eletro-magnética). Como o *front-end* da rede é composto por um sub-sistema *wireless*, isso implica em redução de custos de cabeamento no final da linha, promovendo uma simplificação na operação e manutenção das malhas. Com áreas de coberturas menores, obtêm-se uma melhor gerência entre a conexão da central de dados . A transmissão RoF permite um baixo consumo de potência, traz flexibilidade e mobilidade do serviço para os usuários.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da RNP (Rede Nacional de Pesquisa e Educação), através do Projeto $(CIA)^2$ Construindo Cidades Inteligentes: da Instrumentação dos Ambientes ao desenvolvimento de Aplicações, Contrato RNP-Iecom-PaqTc/PB, 2011-2013, e o apoio do Iecom e da UFCG.

## REFERÊNCIAS


[1] S. K. Korotky, "Traffic Trends: Drivers and Measures of Cost-Effective and Energy-Efficient Technologies and Architectures for Backbone Optical Networks", IEEE/OSA OFC/NFOEC 2012, Los Angeles, CA, Março 2012, paper OM2G.1.

[2] J.S. Tavares, "Rádio sobre Fibra Digitalizado", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Fevereiro 2012.

[3] J. E. P. de Farias et al. "Cidades Inteligentes e Comunicações", Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação (ISSN: 2237-5104), Vol. 1, No. 1, pp. 28-32, 2011.

[4] T. Tashiro, K. Miyamoto et al. "Broadband Ubiquitous Network Based on RoF-DAS over WDM-PON", IEEE/OSA OFC/NFOEC, Paper OWT2, Los Angeles, 2011.

[5] P. Kaur, R.D. Kaler, "Radio over Fiber Networks", Conference on Challenges & Opportunities in Information Technology (COIT-2007) , Março 2007.

[6] A. Chowdhury, H.C. Chien et al. "Radio over Fiber Technology for Next-Generation E-Health in Converged Optical and Wireless Access Network", IEEE/OSA OFC/NFOEC, Paper OTuF1, Los Angeles, 2011.

[7] E.L.Pinto e C.P. de Albuquerque. "A Técnica de Transmissão OFDM", Revista do Inatel, vol. 5, No. 1, Junho 2002.

[8] M.S. Rahman, J. H. Lee, Y. Park, K. Kim, "Radio over Fiber as a Cost Effective Technology for Transmission of WiMAX Signals", in Word Academy of Science and Technology, vol 56, pp. 424-428, 2009.

[9] S. Sarkar, et al. "Hybrid Wireless-Optical Broadband-Access Network (WOBAN): A Review of Relevant Challenges", IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 25, No. 11, pp. 3329-3340, Novembro 2007.

[10] I. A. Lima, "Simulações de Tecnologias para Rede de Acesso de Faixa Larga Híbrida Óptica/Sem Fio", Dezembro 2011.

[11] D. Opatic, "Radio over Fiber Tecnology for Wireless Access", (unreferenced)

[12] D.C.V. Silva, "Análise Experimental da aplicação da tecnologia de Rádio sobre Fibra em Redes IEEE 802.15.4", PUC Campinas 2008.

[13] K. Zhu, M. J. Crisp et al."MIMO System Capacity Improvements Using Radio-over-Fibre Distributed Antenna System Technology", IEEE/OSA OFC/NFOEC, Paper OTuO2., Los Angeles, 2011.