

# Validação experimental da geração de sinais de micro-ondas multi-nível no domínio óptico

T. P. Villena A.<sup>1,2</sup>, Arismar Cerqueira S. Jr.<sup>3,2</sup>, M. L. F. Abbade<sup>4</sup>, H. E. Hernandez-Figueroa<sup>1,2</sup> e H. L. Fragnito<sup>2,5</sup>

**Resumo**— Este artigo apresenta os resultados experimentais que validam o nosso método para geração de sinais de micro-ondas multi-nível a partir do uso da técnica de heterodinagem de sinais ópticos. Para tal, é considerada a geração de sinais de micro-ondas quaternários (4-ASK) a partir de duas portadoras ópticas moduladas em amplitude de forma binária (2-ASK). Os experimentos foram realizados utilizando enlaces de até 40 km da Rede Kyatera, que é uma rede óptica real geograficamente distribuída no Estado de São Paulo. Desta maneira, pôde-se analisar a técnica proposta sob condições reais de temperatura, umidade, pressão e vento.

**Palavras-Chave**— Geração óptica heteródina, sinais quaternários, sinais multi-amplitude e micro-ondas.

**Abstract**— This paper presents experimental results to validate our method for generation of multilevel microwave signals based on the use of the optical heterodyne technique. As an application example, it is presented the generation of quaternary microwave signals, obtained from two amplitude-modulated optical binary signals. The experiments have been carried out through optical links up to 40 km from Kyatera network, which is a geographically distributed optical network in the State of São Paulo. In this way, it was possible to analyze the proposed technique under real conditions of temperature, humidity, pressure and wind.

**Keywords**— Optical heterodyne generation, quaternary-amplitude, multi-amplitude signals and microwave.

## I. INTRODUÇÃO

A mobilidade tornou-se uma questão essencial e nos últimos anos as aplicações sem fio têm apresentado um significativo aumento no número de usuários. Ao mesmo tempo, as novas aplicações de redes sem fio que demandam altas taxas de transmissão estão se difundindo, como por exemplos: transmissão de vídeo em alta definição, videoconferências, jogos 3D com jogadores remotamente interagindo e as incontáveis aplicações envolvendo realidade virtual. Por tanto, é evidente que técnicas robustas e espectralmente eficientes sejam necessárias para suportar tais serviços móveis de alta qualidade [1].

Do ponto de vista de infraestrutura, a internet é o meio atual de interconectividade e tráfego de dados, logo uma central de dados (*Central Office* ou *CO*) precisa receber dados da Internet e enviá-los para uma estação remota (*Remote Station* ou *RS*), onde uma ou mais antenas fornecerão acesso sem fio aos usuários móveis. A tecnologia Radio-sobre-fibra (*Radio over Fiber* ou *RoF*) [2] representa uma solução chave para suprir estas novas demandas de mercado. Nesta tecnologia, os dados que chegam através da internet até a *CO*, são convertidos ao

domínio da radiofrequência (RF) e logo usados para modular uma portadora óptica. Este sinal é transmitido ao longo de uma fibra óptica até a *RS*, onde é foto-detectado e retornado para o domínio de RF. Em seguida o sinal de RF é transmitido por uma antena até os usuários móveis. A tecnologia RoF permite a centralização de diversos equipamentos de RF, chamadas de estações radio-base, em um único *CO*. Nesta *CO*, portanto, concentra-se toda a parte de gestão e inteligência da rede [3,4]. Além disso, as *RS* podem também atuar como receptoras de informação, viabilizando a transmissão de dados bidirecional [5].

Dado o congestionamento do espectro de RF, torna-se necessário utilizar portadoras com frequências na faixa de micro-ondas ou mesmo em ondas milimétricas. O deslocamento para regiões de alta frequência tem a vantagem de ter uma maior largura de banda e assim poder alocar serviços que requerem de maior tráfego de dados. No entanto, com o aumento da frequência, a dispersão da fibra associada à resposta não linear dos fotodetectores pode causar o desvanecimento do sinal de RF, ocasionado uma diminuição significativa da potência do sinal nos pontos de nulo de desvanecimento. Esta é obviamente uma desvantagem da tecnologia RoF operando em altas faixas de frequências.

Uma alternativa para manter as vantagens dos sistemas RoF e evitar suas desvantagens consiste em gerar a portadora de RF, micro-ondas ou milimétricas, usando técnicas fotônicas na *RS*. Como por exemplo, a técnica de OHG (*Optical Heterodyne Generation*) para geração de sinais de micro-ondas [6-9].

Este trabalho apresenta a validação experimental da geração de sinais quaternários (4-ASK) gerados a partir da técnica fotônica OHG. Para tal, serão utilizados dois sinais ópticos previamente modulados em amplitude (2-ASK), para obter um só sinal de RF 4-ASK em micro-ondas. Esta técnica é interessante porque consegue dobrar a eficiência espectral proporcionada pelo método OHG, e assim estar em conformidade com os requisitos para suportar serviços sem fio de banda larga. O desempenho da técnica foi testado utilizando uma configuração experimental ponto a ponto pertencente a uma rede óptica geograficamente distribuída, chamada Rede KyaTera [10], com a finalidade de avaliar o desempenho sob condições ambientais reais. Embora tenhamos recentemente relatado alguns resultados muito preliminares [11], esta é a primeira vez que a técnica proposta é sistematicamente investigada na literatura.

O artigo está organizado em cinco seções. A Seção II apresenta uma revisão sobre a geração de sinais de RF via heterodinagem de sinais ópticos (OHG); esta seção aborda também o uso da técnica para converter dois sinais ópticos 2-ASK em um sinal de micro-ondas 4-ASK. Na Seção III

descrevemos a nosso setup experimental, enquanto que na Seção IV os resultados experimentais são mostrados. Por fim, nossas conclusões e considerações finais são apresentadas na seção V.

## II. TEORIA

A abordagem analítica foi realizada considerando duas portadoras ópticas co-polarizadas, nas frequências  $f_1$  e  $f_2$ , propagando-se ao longo de uma fibra óptica. Neste contexto, a magnitude instantânea de campo elétrico associado é dada por:

$$E(t) = E_1 \cos[2\pi f_1 t + \phi_1] + E_2 \cos[2\pi f_2 t + \phi_2] \quad (1)$$

onde  $E_i$  e  $\phi_i$  ( $i=1, 2$ ) são, respectivamente, a amplitude e fase da  $i$ -ésima onda. Quando tais sinais ópticos são detectados por um fotodiodo, temos que:

$$i(t) \propto |E(t)|^2 \quad (2a)$$

$$i(t) \propto E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos(2\pi f_{MW} t + \Delta\phi) \quad (2b)$$

onde  $f_{MW} = |f_2 - f_1|$  e  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ . Se filtrarmos apenas a parte que contem  $f_{MW}$ , com um filtro passa-faixa centrado nesta frequência, então os termos DC serão bloqueados e só ficaríamos com o sinal de RF cuja portadora é de frequência  $f_{MW}$ . Este é o princípio de geração de sinais de RF por heterodinagem de sinais ópticos, que para nosso caso particular são sinais de micro-ondas. Vale ressaltar que este princípio também válido para gerar ondas milimétricas e outras de RF dependendo da magnitude de  $|f_2 - f_1|$ .

Note que se os sinais ópticos são de tipo contínuo (CW - *continuous wave*), por consequência o sinal de RF gerado também é de tipo CW. Por outro lado, quando um dos sinais ópticos é CW e o outro é modulado, tal modulação é reproduzida sobre o sinal de RF gerado. Ambas as abordagens já tem sido consideradas [8,12].

O próximo passo é demonstrar o uso da heterodinagem óptica para a multiplexação de informação oriunda de dois sinais ópticos modulados. Em particular, nos focaremos na situação onde tais sinais são do tipo 2-ASK binário. Designaremos mediante  $P_{iz}$  a potência óptica do  $i$ -ésimo ( $i=1, 2$ ) sinal óptico quando este transmite um bit  $z$  ( $z=0$  ou  $1$ ); similarmente,  $E_{iz}$  é a magnitude de campo elétrico associado com  $P_{iz}$ . Sabendo que  $P_{iz} \propto |E_{iz}|^2$  e (2b), temos que:

$$i_{00}(t) \propto 2\sqrt{P_{10}P_{20}} \cos[2\pi f_{MW} t + \Delta\phi] \quad (3a)$$

$$i_{01}(t) \propto 2\sqrt{P_{10}P_{21}} \cos[2\pi f_{MW} t + \Delta\phi] \quad (3b)$$

$$i_{10}(t) \propto 2\sqrt{P_{11}P_{20}} \cos[2\pi f_{MW} t + \Delta\phi] \quad (3c)$$

$$i_{11}(t) \propto 2\sqrt{P_{11}P_{21}} \cos[2\pi f_{MW} t + \Delta\phi] \quad (3d)$$

onde  $i_{xy}(t)$  é a corrente elétrica na saída do filtro de micro-ondas quando o sinal óptico em  $f_1$  envia o bit  $x$  ( $x=0$  ou  $1$ ) e do outro em  $f_2$  transmite o bit  $y$  ( $y=0$  ou  $1$ ). Tipicamente os sinais ópticos binários utilizam modulação por chaveamento

on-off (OOK), onde  $P_{10} = P_{20} = 0$ ; neste caso  $i_{xy}(t) = 0$  e pelo tanto não há sinal de micro-ondas na saída do filtro passa banda. Por outro lado, se nos adicionamos um *offset* de potência óptica aos bits 0, então  $i_{xy}(t)$  já não seria nulo, e a sinal de micro-ondas torna-se quaternário tipo 4-ASK, contendo informação dos dois sinais ópticos. De fato, os níveis de potencia deste sinal,  $W_{ix}$ , são proporcionais ao valor quadrático médio de  $i_{xy}(t)$  e pode ser escrito como:

$$W_{00} \propto P_{10}P_{20} \quad (4a)$$

$$W_{01} \propto P_{10}P_{21} \quad (4b)$$

$$W_{10} \propto P_{11}P_{20} \quad (4c)$$

$$W_{11} \propto P_{11}P_{21} \quad (4d)$$

Em particular, no caso onde  $P_{11}P_{20} > P_{10}P_{21}$  ilustrado na Fig. 1, as relativas razões de extinção entre níveis consecutivos de potencia do sinal 4-ASK são:

$$\Gamma_1 = W_{00}/W_{01} = r_2 \quad (5a)$$

$$\Gamma_2 = W_{01}/W_{10} = r_1/r_2 \quad (5b)$$

$$\Gamma_3 = W_{10}/W_{11} = r_2 \quad (5c)$$

onde  $r_i = P_{10}/P_{11}$  denota as razões de extinção (*Extinction Ratio* ou ERs) do  $i$ -ésimo sinal óptico. As equações (5) indicam que a distribuição dos níveis de potencia do sinal 4-ASK de micro-ondas, depende somente das razões de extinção dos sinais ópticos de entrada e não dos valores absolutos das potencias ópticas.

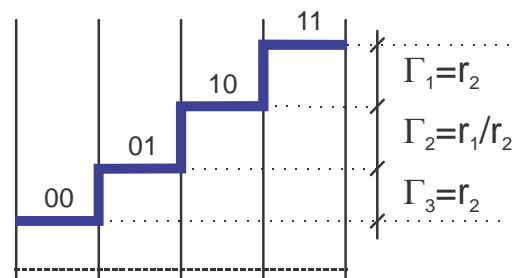


Fig. 1. Distribuições de níveis de potencia para o sinal quaternário gerado.

## III. SETUP EXPERIMENTAL

Para investigar experimentalmente a técnica apresentada na seção II utilizaremos os setups ilustrados nas Fig. 2 e Fig. 3. Basicamente o transmissor é nosso gerador de micro-ondas, o qual fornece o sinal multi-nível, e o receptor (Fig. 3) que foi implementado para avaliar o desempenho do sinal de RF gerado no domínio óptico. Dois lasers do tipo DFB fornecem as portadoras ópticas em  $f_1=193,21$  THz e  $f_2=193,23$  THz, modulados em intensidade com 10 Mb/s cada um deles; as razões de extinção destes sinais são regulados tanto pela bias do modulador externo, quanto pelas ERs dos sinais digitais

que modulam as portadoras ópticas. Estes sinais são acoplados e propagados ao longo do enlace óptico. Os ensaios foram feitos para enlaces ópticos com os seguintes comprimentos:  $L \sim 1$  m (*back to back*) e 30 km. Num segundo ensaio, os sinais foram propagados ao longo de um link óptico da rede KyaTera. Neste caso o comprimento foi variado entre 10 e 40 km e um pré-amplificador óptico foi usado para compensar a atenuação óptica. Após a propagação no enlace de fibra óptica (ponto a ponto ou rede KyaTera), os sinais são foto-detectados, filtrados em banda em  $f_{MW} = 193,23-193,21$  THz = 20,0 GHz. Já no receptor o sinal é amplificado eletronicamente (EA). O filtro passa banda é centrado em 21 GHz apresentando uma banda de 3,0 GHz. Para otimizar o ganho na amplificação é necessário que os lasers tenham controladores de polarização em suas saídas, com isso fornecer máxima potencia à entrada do EA. O sinal amplificado é transmitido ao *mixer* que converte a portadora de micro-ondas em uma frequência intermediária (IF) de aproximadamente 330 MHz. Finalmente, este sinal novamente é filtrado pelo detector de envoltória (ED) e recebe o sinal multi-nível (4-ASK).

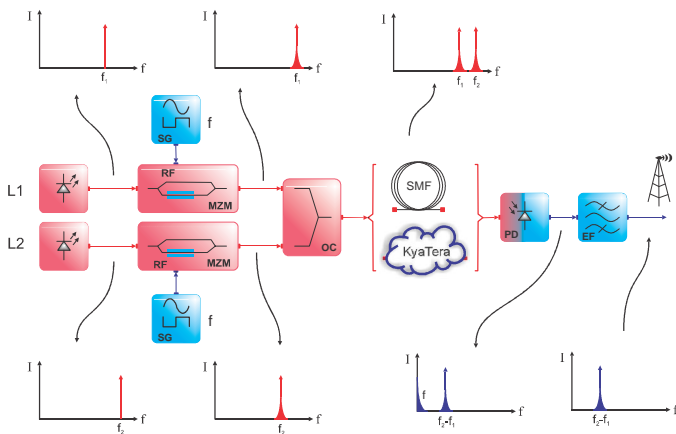


Fig. 2. Setup experimental do transmissor. L1 e L2: laser, MZM: modulador externo Mach Zehnder, SG: gerador de sinal, OC: acoplador óptico, SMF: fibra monomodo, PD: fotodetector, EF: filtro elétrico.

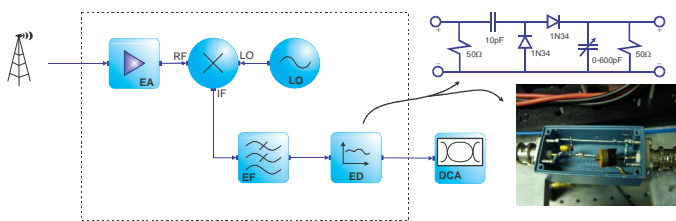


Fig. 3. Setup do receptor. EA: amplificador elétrico, LO: oscilador local, EF: filtro elétrico, ED: detector de envelope, DCA: analisador de comunicações digitais.

IV. RESULTADOS

A Fig.4 apresenta os espectros nos seguintes pontos: (a) entrada da fibra; (b) saída do fotodiodo. O espectro óptico dos sinais em  $f_1$  e  $f_2$ , mostrados na Fig.4a, estão distorcidos do perfil típico de um sinal OOK devido às reduzidas ERs dos sinais binários de entrada. Uma relação sinal/ruído óptica (OSNR) maior que 55dB é observada e os picos estão separados de aproximadamente 20 GHz. Fig.4b apresenta a

componente em 20 GHz obtida na saída do fotodiodo; o sinal de micro-ondas 4ASK é gerado nesta frequência.

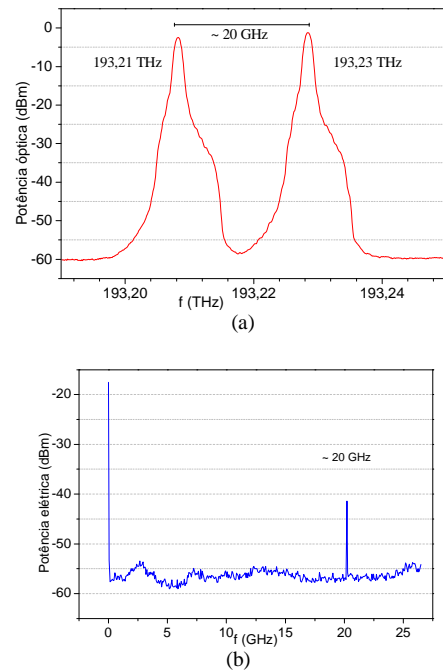


Fig. 4. Espectros (a) óptico, na entrada da fibra e (b) elétrico, na saída do fotodiodo.

A Fig.5 mostra o espectro obtido na saída do *mixer*; nela podemos notar outra vez à componente de frequência gerada em 20 GHz, assim como os outros sinais de RF com frequência próxima à do oscilador local (LO). A componente IF, cujo envelope é detectado, apresenta uma SNR de cerca de 30 dB.

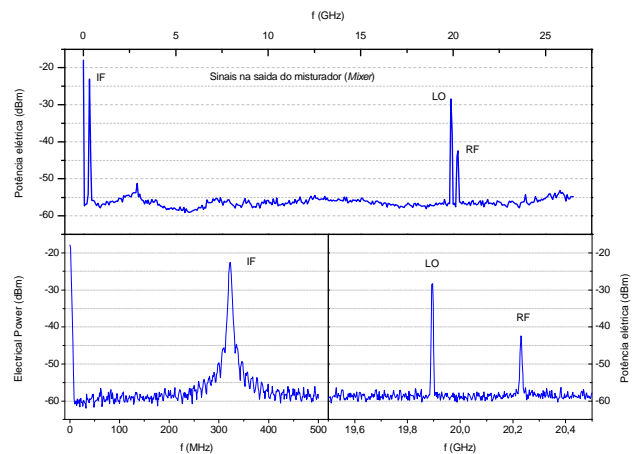
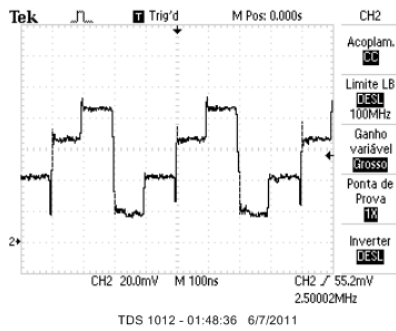
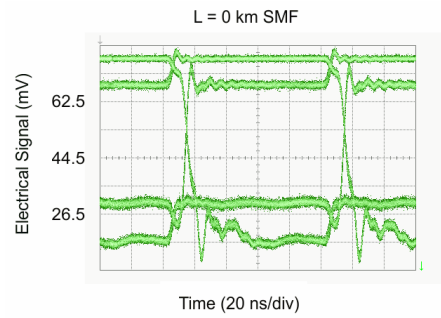


Fig. 5. Espectro típico na saída do misturador elétrico (*mixer*).

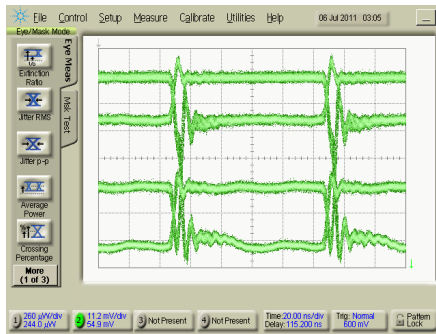
A Fig. 6 relata os resultados obtidos para uma configuração ponto a ponto, na qual se pode observar o formato do sinal quaternário já detectado depois do detector de envelope. O formato do perfil observado no lado esquerdo da Fig. 6 foi obtido a partir das sequências de bits enviados pelos sinais de entrada em  $f_1$  e  $f_2$ , respectivamente, como 0011 e 0101. Os quatro níveis de potência bem definidos indicam a alta eficiência e viabilidade prática da técnica proposta.



(a) Osciloscópio.



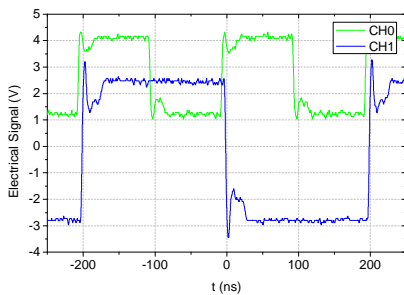
(b) Sinal quaternário com distribuição de níveis



(b) O diagrama de olho obtido por um analisador de comunicações digitais.

Fig. 6. Sinais elétricos obtido em diferentes pontos.

Para verificar a teoria apresentada na secção II, avaliamos como o sinal quaternário foi afetado por mudanças na ER dos sinais de entrada binaria. A Fig. 7 exibe os sinais binários elétricos e a saída do sinal quaternário para os parâmetros onde  $r_1 = 10,5 \text{ dB} \approx 0,3$  e  $r_2 = 3,1 \text{ dB} \approx 0,7$ . Da Fig. 7 podemos inferir que as ER dos consecutivos níveis de potência são:  $\Gamma_1 = 0,66$ ,  $\Gamma_2 = 0,44$ , e  $\Gamma_3 = 0,86$ . Segundo o equacionamento (5) estes valores deveriam ser  $\Gamma_1 = \Gamma_3 = 0,70$ , e  $\Gamma_2 = 0,42$ . Como pode se notar, isto mostra que os valores teóricos de  $\Gamma_1$  e  $\Gamma_2$  estão em boa concordância com os experimentais. A diferença entre os valores teórico e experimental para a  $\Gamma_3$  é explicado pelo fato que a sensibilidade do fotodetector usado foi só de  $-4 \text{ dBm}$ , com isso os sinais com maiores níveis de potência foram saturaram o fotodetector.



(a) Sinais elétricos de entrada para os moduladores.

Fig. 7. Resultados para distribuição de níveis:  $r_1 = 10,5 \text{ dB}$  e  $r_2 = 3,1 \text{ dB}$ .

A técnica proposta foi então verificada na Rede KyaTera sob condições reais de temperatura, pressão, umidade e vento. Foram feitos enlaces com comprimentos de 10, 20, 30 e 40 km; para o enlace de 10 km o sistema não precisou de amplificação óptica para trafegar ao longo da rede; em todos os outros casos o setup teve que ser modificado para incorporar um pré-amplificador óptico. Com isso conseguiu-se transportar nosso sinal sem muita distorção. A Fig.8 mostra os resultados obtidos para estes links.

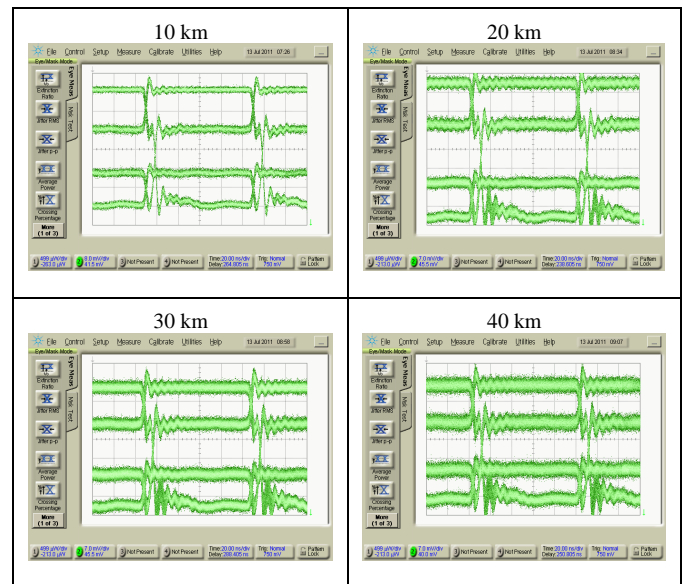


Fig. 8. Diagramas de olho obtidos com distintos comprimentos de enlace na rede KyaTera: 10 km sem utilizar pré-amplificador óptico, e com pré-amplificador óptico para enlaces de 20, 30 e 40 km.

Por fim, substituímos os enlaces ópticos por um atenuador variável, com a finalidade de caracterizar o sinal quaternário em função da potência óptica na entrada do fotodetector e as consequências no desempenho do sistema. Assim, se obtiveram os dados para cada um dos olhos com as suas respectivas razões de extinção  $\Gamma$ , apresentados na Fig. 9. Nesta figura pode se observar claramente o fechamento dos olhos à medida que aumenta a potência na entrada do fotodetector.

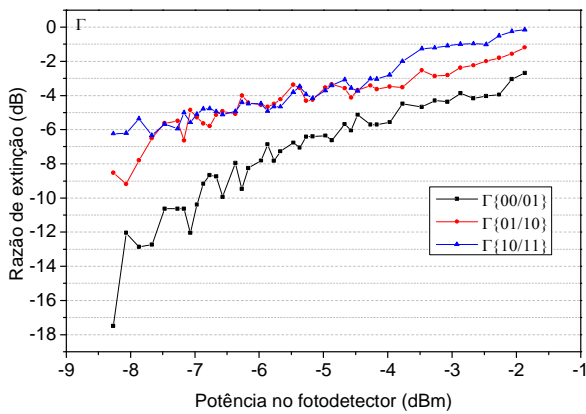


Fig. 9. Razões de extinção dos olhos versus potência recebida no fotodetector

A Fig. 10 apresenta o cálculo do fator Q, que é relacionado com o BER (*Bit Error Rate*), para cada diagrama de olho, e que nos remete a uma medida direta do desempenho do sistema. Neste gráfico constata-se um melhor desempenho para a faixa entre -4 e -3 dBm, que apresenta melhores valores de Q.

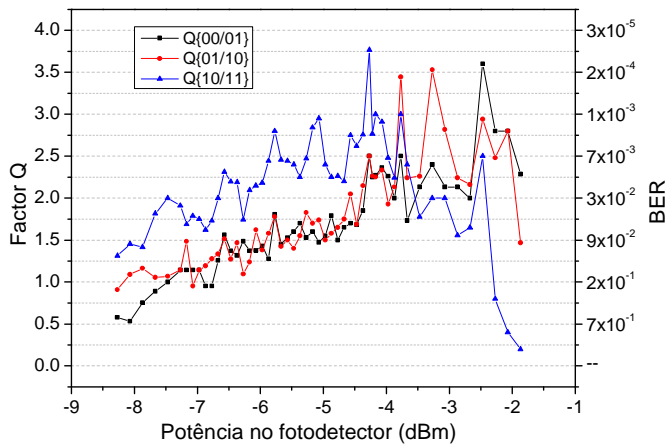


Fig. 10. Fator Q para cada um dos olhos no sistema versus a potência recebida pelo fotodetector

### V. CONCLUSÕES

Os trabalhos experimentais obtidos em laboratório e na Rede Kyatera comprovaram a eficiência e robustez da

técnica proposta para a geração de sinais multi-nível de RF na faixa de micro-ondas. Um das suas principais vantagens é a possibilidade de gerar portadoras de RF para sistemas rádio sobre fibra sem problemas de desvanecimento de RF devido à dispersão cromática das fibras. Os resultados concernentes à geração de sinais micro-ondas quaternários em 20 GHz demonstraram a factibilidade da técnica para gerar sinais multi-nível e a possibilidade de geração remota em enlaces ópticos de até 40 km. Este alcance pode ser facilmente aumentado para centenas de quilômetros utilizando amplificadores ópticos. A implementação da técnica utilizando outros tipos de modulação óptica, como por exemplos QAM e FSK, será objetivo de trabalhos futuros.

### REFERÊNCIAS

- [1] Andrea Goldsmith, "Wireless Communications". Cambridge University Press, 2005. Chapter 1, pp. 1-5.
- [2] D.Opatic, GSDC Croatia, "Radio over Fiber Technology for Wireless Access", Ericsson Nikola Tesla d.d., Krapinska 45, HR-10001 Zagreb.
- [3] Hong Bong Kim, "Radio over Fiber based Network Architecture", doctoral dissertation thesis, Berlin 2005.
- [4] Anthony Ng'oma, "Radio-over-fibre technology for broadband wireless communication systems", Technische Universiteit Eindhoven, 2005.
- [5] Arismar Cerqueira S. Jr., D. C. Valente e Silva, M. A. Q. R. Fortes, L. F. da Silva, O. C. Branquinho and M. L. F. Abbade, "Performance analysis of a Radio over Fiber system based on IEEE 802.15.4 standard in a real optical network", Microwave and Optical Technology Letters, v. 51, pp. 1876-1879, 2009.
- [6] Govind P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", 3rd ed. USA: Jhon Wiley & Sons, 2002. Chapter 10, pp. 478-481.
- [7] William S. C. Chang, "RF photonic technology in optical fibers", Cambridge University Press, 2002. Chapter 10, pp. 298-315.
- [8] X. Wang, W. Mao, M. Al-Mumin, S. A. Pappert, J. Hong, and G. Li, "Optical generation of microwave/milimeterwav-wave signals using two-section gain coupled DFB lasers", IEEE Photon. Technol. Lett .11, 1292-1294, 1999.
- [9] Gerd Keiser, *Optical Fiber Communications*, 2nd ed. Singapore: McGraw-Hill, 1991
- [10] www.kyatera.fapesp.br.
- [11] T. P. Villena A., Arismar Cerqueira S. Jr., Marcelo L. F. Abbade, H. E. Hernandez Figueroa, and H. L. Fragnito, "A New Optical Heterodyne Technique for Generating Multi-amplitude Microwave Signals" In: IQEC/CLEO Pacific Rim 2011, 2011, Sydney. Proceedings of IQEC/CLEO Pacific Rim 2011, 2011.
- [12] Sambaraju, R.; Zibar, D.; Caballero, A.; Monroy, I.T.; Alemany, R.; Herrera, J.; , "100-GHz Wireless-Over-Fiber Links With Up to 16-Gb/s QPSK Modulation Using Optical Heterodyne Generation and Digital Coherent Detection," Photonics Technology Letters, IEEE , vol.22, no.22, pp.1650-1652, Nov.15, 2010.

T. P. Villena A., e-mail: [pwll@dmo.fee.unicamp.br](mailto:pwll@dmo.fee.unicamp.br). Arismar Cerqueira S. Jr., e-mail: [arismar@inatel.br](mailto:arismar@inatel.br). Este trabalho foi realizado no âmbito dos programas do CEPOF e do Fotonicom. Os autores agradecem o financiamento por parte da FAPESP, CNPq e CAPES, nas bolsas 574017/2008-9, 309031/2008-7 e 301627/2009-6.

(1) Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Campinas-SP, Brasil. (2) Optics and Photonics Research Center, UNICAMP, Campinas-SP, Brasil. (3) Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), Santa Rita do Sapucaí-MG, Brasil. (4) Faculdade de Engenharia Elétrica, PUC-Campinas, Campinas-SP, Brasil. (5) Instituto de Física Gleb Wataghin, UNICAMP, Campinas-SP, Brasil.