

Utilizando a segunda camada do modo fantasma para aprimoramento de aplicações G.fast

M. M. M. Freitas, D. D. Souza, B. P. T. Sousa, D. A. Gomes, C. S. Sales, R. M. Rodrigues e J. C. W. A. Costa.

Resumo—O modo fantasma tem sido proposto como um meio de aprimorar aplicações G.fast. Entretanto, a maioria dos sistemas baseados neste utiliza apenas a primeira camada. Contudo, este artigo analisa a viabilidade de um sistema que utiliza um nível adicional do modo fantasma, chamado de segunda camada fantasma. O sistema como um todo, primeira e segunda camada, e modos diferenciais, podem atingir taxas de bit de até 15 Gbps em comprimentos de 30 m quando *vectoring* é aplicado, assim como apresentar níveis de EVM dentro das especificações do padrão 3GPP mesmo sob a influência de interferentes Ethernets.

Palavras-Chave—Modo fantasma, segunda camada, taxa agregada, *vectoring*, EVM.

Abstract—Phantom mode has been proposed to improve G.fast applications. However, the most of the phantom mode systems deploy the first phantom layer only. Nevertheless, this work analyses the feasibility of a system, which deploys an additional phantom mode level, called second phantom layer. The entire system, first and second layers and differential modes, can reach bit rates up to 15 Gbps in lengths up to 30 m, when *vectoring* is applied. The achieved levels of EVMs are according the 3GPP standard even under Ethernet interfering influence.

Keywords—Phantom mode, second phantom layer, aggregate rate, *vectoring*, EVM.

I. INTRODUÇÃO

Uma das prerrogativas fundamentais para a criação de novos padrões de transmissão e tecnologias de acesso, como o DSL, tem sido a crescente demanda por altas taxas de dados [1]. Recentemente, o ITU estabeleceu o padrão G.fast que atinge taxas agregada de dados superiores a 2 Gbps, utilizando cabos de quatro pares, técnicas de pré-codificação de canal (*vectoring*) e faixa de frequências de até 212 MHz [2][3]. Apesar disso, pesquisas indicam que o tráfego de dados continuará a crescer cada vez mais rapidamente nos próximos anos. Por isso, soluções adicionais de baixo custo são de especial interesse.

Uma proposta que vem sendo analisada é a utilização do modo fantasma (MF) – técnica que aumenta o número de canais de comunicação em um cabo sem a necessidade de pares trançados adicionais – juntamente com o padrão G.fast [4]. Uma característica de especial interesse do MF é a sua capacidade de cascatear os canais adicionais para criar novos. Quando ligado em cascata, o MF se divide em camadas. Cada camada gera outra, e em cada uma delas tem-se uma determinada quantidade de canais fantasma que podem ser plenamente utilizados. De forma geral, $\log_2 N$ camadas podem ser implementadas a partir de N pares trançados (quando N é uma potência de 2), gerando N-1 canais fantasmas de um total de 2N-1 canais, incluindo os diferenciais. Por exemplo, para cabos CAT5e (quatro pares), dois níveis de MF poderiam ser implementados, gerando um total de sete canais, no qual 3 são fantasmas – quase o dobro dos pares disponíveis. Apesar desse potencial, as soluções atuais em cabos de quatro pares usando MF o subutilizam, explorando somente a sua primeira camada (MF1) [1] [4].

Neste sentido, este artigo procura avaliar através de simulações todo o potencial do MF em aplicações G.fast,

utilizando a sua segunda camada (MF2). Este canal, o MF2, é criado a partir da diferença de um sinal diferencial que se propaga em modo comum entre dois canais fantasmas pertencentes à primeira camada. Serão analisadas para o sistema com MF2 as funções de transferência (FT), os *crosstalks* do tipo FEXT e as taxas agregadas de cada modo de transmissão na faixa de transmissão do G.fast. Além destas, outras características que também afetam diretamente o desempenho deste sistema serão vistas. Estas são a configuração do trançamento dos pares, a importância do uso do *vectoring* e a influência de interferências externas. Esta última, será avaliada não somente em termos de taxa de bits, como também em termos da magnitude do vetor de erro, EVM.

O restante deste trabalho está organizado como segue. A seção II descreverá os princípios básicos de funcionamento do modo fantasma de segunda camada, a seção III tratará sobre o *vectoring*. A IV discorrerá a respeito das métricas de desempenho utilizadas para quantificar e qualificar os resultados deste trabalho. A V abordará os cenários de transmissão considerados na problemática em questão. A seção VI apresentará os resultados obtidos a partir das análises consideradas e a seção VII mostrará a conclusão do artigo.

II. MODO FANTASMA DE SEGUNDA CAMADA

O modo fantasma é uma tecnologia de transmissão que vem sendo utilizada desde meados do século XX, para gerar aumento de taxa agregada a partir da criação de canais de comunicação adicionais sob uma mesma infraestrutura cabeada. Esta tecnologia já vem sendo utilizada comercialmente, em sistemas DSL, até a faixa de VDSL 2 [1]. Entretanto, esta configuração explora apenas a primeira camada do MF e por causa disso, o potencial dessa combinação com o G.fast, em cabos de quatro pares, permanece inexplorado. Uma forma de implementar o MF explorando todo o seu potencial pode ser vista na Figura 1.

Nesta, cada par de transformador comporta um canal independente, e os modos fantasmas de primeira camada, MF1, propagam-se pelos contatos centrais dos transformadores acoplados aos modos diferenciais, designados de fantasmas. Já o canal fantasma da segunda camada, MF2, se propaga nos canais fantasmas de primeira camada, sendo portanto, um canal fantasma de fantasmas.

Sabe-se de resultados práticos que há um significativo vazamento de sinal entre os MF e diferenciais devido ao desbalanceamento oriundo entre outros fatores das diferentes taxas de trançamento dos pares [1] [4]. Por esta razão, a adição deste canal gera não somente o aumento de taxa agregada, como também gera mais *crosstalk* entre os canais, ou seja, há um aumento da interferência eletromagnética. Dessa forma, é essencial que seja adicionado ao conjunto MF1 + MF2 + MD, um elemento que cancele de boa parte dessas interferências, e neste artigo será o *vectoring*.

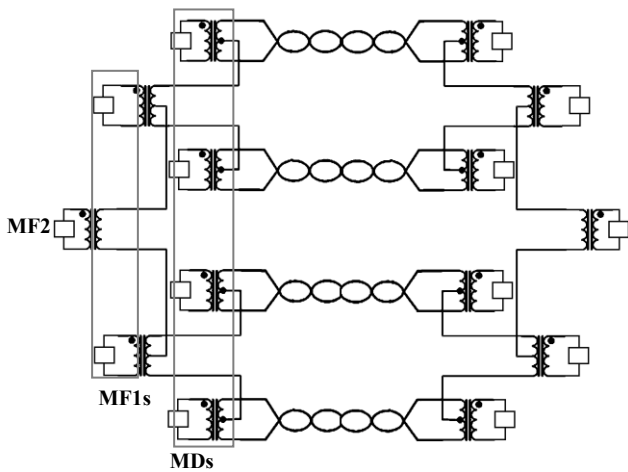


Fig. 1. Configuração para transmissão em sete canais utilizando a segunda camada do modo fantasma.

III. VECTORING

Nos sistemas DSL, a maior fonte de interferência é o *crosstalk* do tipo FEXT (*far end crosstalk*), que é aquele que ocorre entre as extremidades finais e iniciais dos pares [2] [6]. O padrão G.fast exige a aplicação de técnicas para mitigar essas interferências, pois os seus níveis são elevados.

Considera-se que as transmissões são feitas utilizando-se *Discrete Multitone Modulation* (DMT), em que os dados são transmitidos via um conjunto de *subcanais* independentes no domínio da frequência, que também são chamados de *tons*. Em cada subcanal é aplicado um precodificador aos símbolos que serão transmitidos em L canais, como em (1):

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{x} + \mathbf{n} \tag{1}$$

onde \mathbf{x} é um vetor coluna $L \times 1$ que contém os símbolos transmitidos em cada canal, \mathbf{P} é uma matriz $L \times L$ que representa o precodificador, \mathbf{H} é a matriz de canal $L \times L$ em que os elementos da diagonal principal correspondem ao ganho direto (função de transferência) de cada canal e os elementos fora da diagonal representam os canais de *crosstalk* entre os canais coordenados, \mathbf{y} é um vetor coluna $L \times 1$ que contém os símbolos recebidos, e \mathbf{n} de comprimento $L \times 1$ representa o ruído Gaussiano branco aditivo observado na recepção. Note que no cenário tratado neste trabalho são coordenados os sinais de canais em modo diferencial e fantasma, e assim os vetores \mathbf{y} e \mathbf{x} correspondem a símbolos em ambos os canais. A matriz \mathbf{H} contém os ganhos em todos os modos e interferências entre eles, assim como \mathbf{n} representa o ruído observado nos múltiplos modos. O pré-codificador é definido como $\mathbf{P} = (1/\beta)\mathbf{H}^{-1}\mathbf{\Lambda}$, em que $\mathbf{\Lambda}$ é uma matriz diagonal que contém os elementos da diagonal principal de \mathbf{H} , e β é um escalar utilizado para manter a potência de transmissão de acordo com o padrão visto em [7]. Assim, a transmissão fim-a-fim torna-se em (2)

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\beta\mathbf{H}^{-1}\mathbf{\Lambda}\mathbf{x} + \mathbf{n} = \frac{1}{\beta}\mathbf{\Lambda}\mathbf{x} + \mathbf{n} \tag{2}$$

em que a interferência entre os canais coordenados foi mitigada,

ao custo do fator β , que escala a RSIR, *relação sinal ruído mais interferência*, de cada canal l , como na Equação 3

$$RSIR = \frac{[\Lambda(l,l)]^2 \rho}{\beta^2 \sigma^2} \tag{3}$$

em que $\Lambda(l,l)$ denota o elemento na linha l coluna l da matriz $\mathbf{\Lambda}$, ρ é a máscara espectral utilizada pelo sistema DSL e σ^2 denota a densidade espectral de potência do ruído Gaussiano branco aditivo.

IV. MÉTRICAS DE DESEMPENHO

Para avaliar o desempenho do sistema de comunicação proposto é necessário estimar a capacidade de transmissão dos canais que ele utiliza. Para este fim, serão utilizadas as métricas taxa agregada de transmissão e magnitude de vetor de erro (EVM). Deste modo, considera-se que as transmissões são feitas utilizando-se DMT, com subcanais de largura fixa Δ_f e taxa de bits por subcanal, para o canal l , de acordo com [2], conforme (4).

$$R_l(f) = \log_2 \left(1 + \frac{RSIR(f)}{\Gamma} \right) \tag{4}$$

onde Γ representa o *gap* de RSIR, que é um parâmetro definido para o sistema atender as restrições de taxa de erro de bit, e $RSIR(f)$ denota a relação sinal ruído mais interferência por tom f , definida por (5):

$$RSIR = \frac{[H_l(f)]^2 \rho}{\sigma^2 + C_l(f)} \tag{5}$$

onde $H_l(f)$ representa o ganho do canal l e $C_l(f)$ representa a soma de todas as interferências que atingem a transmissão no canal l , incluindo o acoplamento eletromagnético entre os modos de transmissão, também conhecido como *crosstalk*. A partir da taxa de bits podemos definir a taxa de transmissão do canal l de acordo com (6):

$$R_l = \Delta_f \sum_{f=1}^K R_l(f) \tag{6}$$

onde K é a quantidade total de subcanais. Finalmente, podemos determinar a taxa de transmissão do sistema como um todo, ao considerarmos as taxas alcançadas conjuntamente pelos vários canais (incluindo os múltiplos modos de transmissão), em uma métrica que chamamos *taxa agregada*, que é definida por (7)

$$R = \sum_{l=1}^L R_l \tag{7}$$

em que L é quantidade total de canais utilizados para transmissão de sinais no sistema. A taxa agregada informa a quantidade de dados que podem ser transmitidos em um segundo pelo sistema.

Já o EVM é uma figura de mérito que indica à robustez do sistema, ou susceptibilidade a interferência. Esta medida avalia, para cada subcanal, a magnitude do vetor de diferença entre o símbolo recebido e o símbolo de referência da constelação [8]-[9]. Como o efeito das interferências varia com o tempo, e assim o vetor de erro também é modificado, avalia-se o erro quadrático médio do EVM, como visto em (8)

$$EVM(f) = \sqrt{\frac{\sum_{v \in T_m} |z'(v) - i(v)|^2}{|T_m| \rho}} \quad (8)$$

onde $z'(v)$ é o símbolo medido no receptor, $i(v)$ é o símbolo de referência, e T_m é a quantidade de símbolos avaliado [9]. Quanto maior o EVM, maior é a intensidade da interferência naquele tom. Esta métrica serve como medida de qualidade para sistemas de comunicação digitais, e possui valores de referência de acordo com o tipo de transmissão em questão.

V. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

O circuito esquemático visto na Figura 1 foi simulado utilizando o *software* CST (*Computer Simulation Technology*), uma ferramenta de simulação eletromagnética conhecida capaz de obter da função de transferência (FT) de cada canal e o *crosstalk* (FEXT) entre eles.

As simulações foram realizadas em cabos CAT5e com e sem blindagem, para comprimentos de 30, 50 e 100 m, na presença e na ausência de um sistema ethernet interferente (agressor). O agressor foi configurado para ter 50 m de comprimento e para ficar a uma distância de 10 cm, paralelo aos sete canais.

Nos cabos CAT5e, cada condutor tem o diâmetro de 0,5106 mm para o cobre e o diâmetro de 0,8 mm para o isolante de Polietileno. A espessura da capa externa de PVC foi ajustada para 0,61 mm e no caso específico dos cabos com blindagem, uma blindagem externa de 0,1 mm do tipo trançada de alumínio foi adicionada. Na Tabela I são exibidas as taxas de trançamento de cada par.

TABELA I. TAXAS DE TRANÇAMENTO DOS PARES DO CAT5e.

Cor do par	Comprimento do trançado (mm)
Azul	17,87
Laranja	13,28
Marrom	12,63
Verde	19,21

As simulações foram realizadas considerando a faixa de frequência de 0 a 200 MHz, com espaçamento entre tons $\Delta f = 97,7 \text{ KHz}$, e os cálculos do EVM foram realizados utilizando constelação de 64 QAM, gap de RSIR (Γ) de 15,15 dB, máscara espectral (ρ) de 4dBm e densidade espectral de potência do ruído Gaussiano branco aditivo (σ^2) de -140 dBm/Hz. As impedâncias características dos modos fantasmas foram calculadas de acordo com os métodos vistos em [10] e [11].

VI. RESULTADOS

As características de desempenho da combinação MF1, MF2 e canais diferenciais foram divididas nesta seção em três testes de casos, a saber:

- A. Influência da taxa de trançamento dos pares na capacidade de transmissão do sistema;
- B. Taxas (agregada e por canal) de transmissão com e sem vectoring;
- C. Taxa agregada e EVM, com vectoring, sob a influência de um interferente externo;

A. Influência da taxa de trançamento dos pares na capacidade de transmissão do sistema.

Na Figura 2 há duas configurações de trançamento que foram utilizadas para verificação da diferença da capacidade de transmissão do sistema com MFs + MD de acordo com a escolha dos pares trançados utilizados para formar esse conjunto.

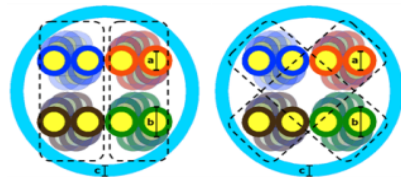


Fig. 2. Configurações vertical e diagonal.

Nas Figuras 3 e 4, percebe-se que a escolha dos arranjos propostos na Figura 2 afeta tanto as curvas de FT e FEXT, quanto à impedância característica dos MFs. A Figura 4, por exemplo, mostra que as suas características de transferência (configuração diagonal) têm resultados melhores do que os da vertical, Figura 3, porque ao longo de toda a faixa de frequência as FTs deste sofrem menor atenuação e permanecem abaixo dos níveis de *crosstalk*, enquanto que no arranjo vertical a atenuação é maior e o FEXT chega até mesmo a cruzar a FT em aproximadamente 85 MHz.

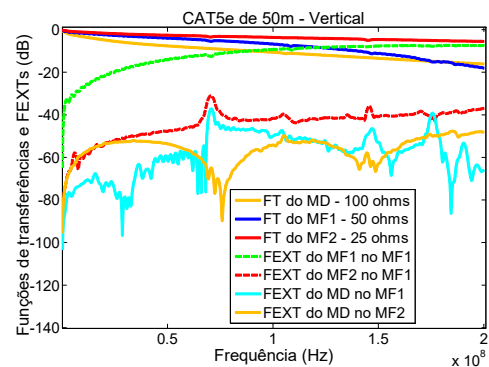


Fig. 3. Funções de transferências e FEXTs do modo diferencial e modo fantasma devidamente casados na configuração vertical.

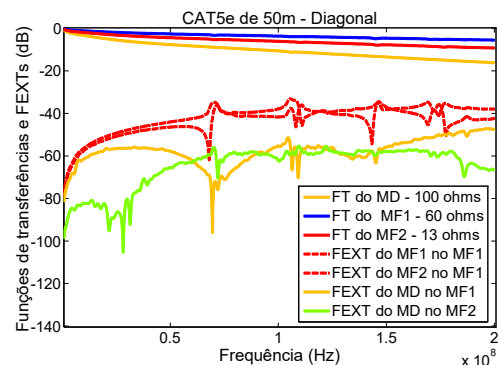


Fig. 4. Funções de transferências e FEXTs do modo diferencial e modo fantasma devidamente casados na configuração diagonal.

A explicação para isto pode ser vista na Tabela II. Nela percebe-se que os pares que formam os MF1s na configuração diagonal têm taxas de trançamento similares e, portanto, dão origem a canais fantasmas mais balanceados, enquanto que na configuração vertical, as taxas de trançamento não são muito parecidas, o que gera canais mais desbalanceados e, portanto, com maior atenuação e maior susceptibilidade a efeitos de interferência.

TABELA II. TAXAS DE TRANÇAMENTO (mm) DOS PARES ESCOLHIDOS PARA CRIAR OS MF1S NAS CONFIGURAÇÕES DIAGONAL E VERTICAL

Taxas de trançamento			
Vertical	1º MF1	Azul	17,87
		Marrom	12,63
	2º MF1	Laranja	13,28
		Verde	19,21
Diagonal	1º MF1	Azul	17,87
		Verde	19,21
	2º MF1	Laranja	13,28
		Marrom	12,63

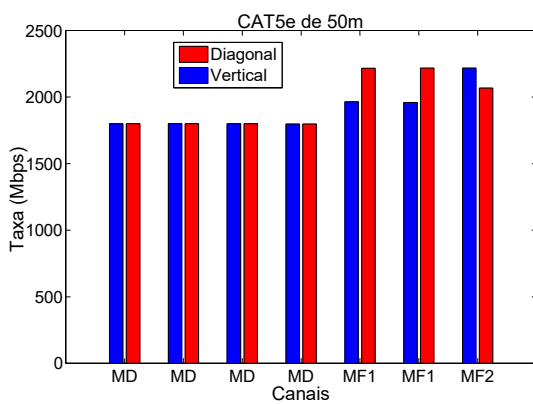


Fig. 5. Taxas de transmissão para MF1s e MF2 nos modos verticais e diagonais.

Além disso, na Figura 5, são mostradas as taxas obtidas com *vectoring* para os modos fantasmas (MFs) e diferenciais (MD) nas configurações vertical e diagonal. Dela percebe-se que apesar das taxas dos modos diferenciais não se alterarem com a escolha da configuração, o aumento de taxa agregada considerando os três canais (dois MF1 e um MF2) na configuração vertical é 6,14 Gbps, enquanto que no arranjo diagonal é 6,51 Gbps. Portanto, as análises dos próximos testes de caso serão feitas na configuração diagonal.

B. Taxas (agregada e por canal) de transmissão com e sem *vectoring*.

Dentro do arranjo diagonal, nos comprimentos 30, 50 e 100 m citados anteriormente, foram verificadas a taxa de bits da junção MFs e MD com e sem *vectoring*. Da Figura 6 percebe-se que a taxa agregada com *vectoring* obtida pelos canais é da ordem 15 Gbps para comprimentos de até 30 m, 13,76 Gbps para 50 m e permanece superior a 10,3 Gbps para comprimentos de até 100 m, o que demonstra que este sistema é útil tanto para cabos longos, quanto para curtos.

Entretanto também foi possível perceber que sem *vectoring* esse sistema torna-se inviável, pois o melhor resultado, em um cabo de 30 m, foi de 2,539 Gbps de taxa agregada, uma diferença de ordem de 12 Gbps em relação ao resultado com *vectoring* de acordo com a Figura 6. As taxas por canal com e

sem *vectoring* para o cabo de 30 m são mostradas na Tabela III, dela é possível perceber que sem *vectoring* as taxas decaem em torno de 75 a 90 %.

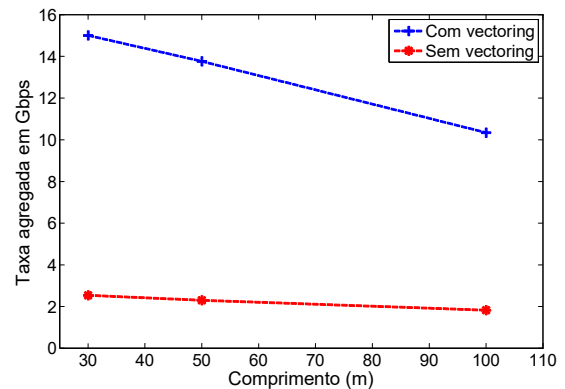


Fig. 6. Taxas de transmissão com *vectoring* e sem *vectoring* para os modos diferenciais.

TABELA III. TAXA POR CANAL COM *VECTORING* E SEM *VECTORING* PARA O COMPRIMENTO DE 30 m.

Modo de transmissão	Taxa (Gbps)	
	Com <i>vectoring</i>	Sem <i>vectoring</i>
MD	2,07	0,50
MD	2,07	0,51
MD	2,07	0,31
MD	2,07	0,39
MF1	2,26	0,31
MF1	2,26	0,27
MF2	2,22	0,22

C. Taxas agregada e EVM, com *vectoring*, sob a influência de um interferente externo.

Os resultados obtidos até o momento mostram que o sistema de sete canais, MF de 2ª camada, possui um grande ganho de taxa quando *vectoring* é aplicado. No entanto estes resultados consideram que o MF sempre está isolado e em cenários de transmissões reais podem haver linhas que gerem interferências externas (*alien crosstalk*) para esse sistema. Essas linhas são conhecidas como *agressores* ou *aliens* e possuem esse efeito degradante pelo fato de não sofrerem vetorização, ou seja, interferência que geram sobre os canais do MF não é cancelada.

Nas Figuras 7 e 8, são mostrados o desempenho do sistema MF de 2ª camada e comparação com a 1ª camada, na presença ou na ausência de uma linha agressora.

Da Figura 7 é possível notar que os sete canais, MF de 2ª camada, apresentam baixa imunidade ao ruído, já que na presença de uma linha agressora seu desempenho se torna pior até mesmo que o sistema que explora somente 1ª camada do MF e possui seis canais.

Entretanto, na Figura 8 é visto que para um cabo da mesma categoria, mas com blindagem externa, o efeito da linha agressora é consideravelmente reduzido, porém impacta mais a o MF de 2ª camada do que o MF de 1ª camada. Contudo, o sistema que explora a 2ª camada do MF é mais vantajoso, por possuir maior taxa agregada, do que utilizar apenas a 1ª camada em qualquer das situações representadas na figura.

O efeito dessa linha *alien* também pode ser analisado a partir do grau de distorção que ela aplica nos bits transmitidos pelo canal. Da Tabela IV percebe-se que na ausência do sistema

Ethernet agressor todos os EVMs ficam abaixo do limite de 8 % especificado pelo padrão 3GPP para 64 QAM [12]. Já com a linha agressora, os níveis do EVM ficam de acordo com o especificado pelo 3GPP apenas até 30m, enquanto que nos demais comprimentos ele chega a ser até mesmo 5,4 vezes maior.

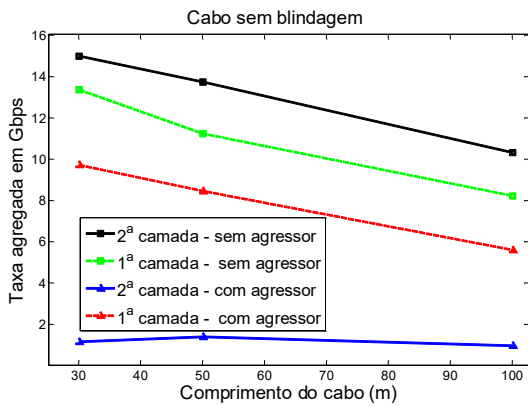


Fig. 7. Taxas agregadas de transmissão quando é utilizada a 2ª camada do modo fantasma e comparação com a 1ª camada. Cenários com e sem agressor em um cabo sem blindagem para diferentes comprimentos.

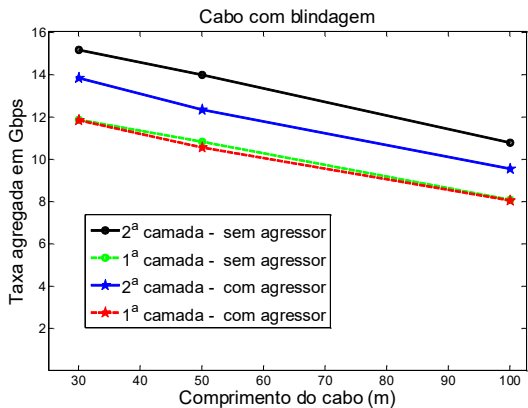


Fig. 8. Taxas agregadas de transmissão quando é utilizada a 2ª camada do modo fantasma e comparação com a 1ª camada. Cenários com e sem agressor em um cabo com blindagem para diferentes comprimentos.

TABELA IV. EVM POR CANAL NA PRESENÇA E NA AUSÊNCIA DE ALIEN CROSSTALK (AGRESSOR)

EVM médio dos canais com <i>vectoring</i> (%)					
Comprimento (m)	Canal	Sem blindagem		Com blindagem	
		Com agressor	Sem agressor	Com agressor	Sem agressor
30	MD	2,968	0,063	0,053	0,053
	MF1	4,058	0,038	0,042	0,041
	MF2	4,104	0,047	0,043	0,043
50	MD	20,59	0,101	0,074	0,074
	MF1	18,59	0,046	0,052	0,052
	MF2	20,10	0,061	0,055	0,055
100	MD	43,54	0,317	0,211	0,2111
	MF1	17,15	0,067	0,079	0,079
	MF2	26,29	0,118	0,103	0,1103

VII. CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho mostraram que a combinação completa de MF e MD apresenta ótimos resultados para redes de alto desempenho, uma vez que atinge níveis de taxa agregada, de até 15 Gbps, com *vectoring*, em comprimentos de até 30 m.

Além disso, em cabos maiores, tais como o de 100 m o decaimento da taxa não foi tão expressivo, pois esta ficou em torno de 10 Gbps. Também foi visto que na presença de interferentes externos a taxa agregada e o EVM foram seriamente afetados, e neste caso foi recomendado que o cabo utilizasse blindagem externa, para que os ganhos permanecessem elevados e o EVM inferior a 0,31 %. No entanto, é importante ressaltar que as únicas situações em que o EVM ficou acima dos limites do 3GPP foram para os cabos de 50 e 100 m sem blindagem, com a linha agressora. Foi visto também que a configuração dos pares utilizados para geração dos modos fantasmas influi diretamente nos níveis das funções de transferências, dos *crosstalks*, das taxas agregadas e no valor da impedância característica. Diante disso, foi esclarecido que o mais recomendado é que os pares tenham taxas de trançamento parecidas. Além disso, como já era esperado, o uso do *vectoring* mostrou-se obrigatório no uso desse sistema em cabos do tipo CAT5e.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Ericsson S.A. Brazil, ao CNPQ, ao laboratório de eletromagnetismo aplicado (LEA), a Leonardo Ramalho, a Reginaldo Santos, a Gilvan Borges, a Dércio Mathe e ao laboratório de sistemas embarcados (LASSE).

REFERÊNCIAS

- [1] WimFoubert, Carine Neus, Leo Van Biesen, and Yves Rolain, "Exploiting the Phantom-Mode Signal in DSL Applications". IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 61, no. 4, April 2012.
- [2] Sandra Drakulic, DritonStatovci, Martin Wolkerstorfer, and ThomasZemen, "Comparasion of Interference mitigation techniques for Next Ggeneration DSL Systems". IEEE ICC Access Networks and Systems, 2015.
- [3] Rainer Strobel, Michael Joham, Wolfgang Utschick, "Achievable Rates with Implementation Limitations for G.fast-based Hybrid Copper/Fiber Networks". IEEE ICC Access Networks and Systems, 2015.
- [4] Pavel Lafata, "Estimations of G.fast Transmission Performance over Phantom Modes". 2015 IEEE.
- [5] Rodrigo B. Moraes, Michael Timmers, Adriaan De Lind van Wijngaarden, MamounGuenach"XG-fast: the 5th generation broadband". IEEE ICC Communications Magazine, 2015.
- [6] D. A. Gomes, G. Guedes, A. Klautau, E. Pelaes and Chenguang Lu, 'DSL Phantom Mode Transmission: Cable Measurements and Performance Evaluation', 4th IEEE Latin-American Conference on Communications, Nov. 2012.
- [7] Itsik Bergel ; Amir Leshem, 'The Performance of Zero Forcing DSL Systems', IEEE Signal Processing Letters, vol. 20, pp 527-530, May 2013.
- [8] Xiaowen Li, Deyi Peng and Guozhong Wang, "A Novel Measurement of Error Vector Magnitude for TD-LTE Termination". 5th International Congress on Image and Signal Processing, 2012.
- [9] Fatang Chen, Xiaoxian Zheng, and Xian Ji, "EVM Measurement Method of PUSCH in TD-LTE Systems", 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, pp 1 – 4, 2011.
- [10] Jingjing Zhang and Thomas Y. Hsiang, "Extraction of Subterahertz Transmission-line Parameters of Coplanar Waveguides", piers online, vol. 3, no. 7, 2007.
- [11] Roberto M. Rodrigues, Claudomiro Sales, Aldebaro Klautau, Senior Member, IEEE, Klas Ericson, and João Costa, Member, IEEE, "Transfer Function Estimation of Telephone Lines from Input Impedance Measurements", IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 61, no. 1, january 2012
- [12] 3GPP TS 36.104 version 12.8.0 Release 12, ETSI TS 136 104 V12.8.0 (2015-07), "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception", 2015.