

Análise do modo fantasma aplicado a sistemas G.fast e XG.fast

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

Resumo—Nesse artigo é mostrado que cabos com pares blindados como o CAT7 apresentam baixo *crosstalk* mesmo quando o modo fantasma é utilizado, contradizendo a literatura que indica que sistemas com modo fantasma é obrigatório o uso de *vectoring* devido ao *crosstalk* entre os modos de transmissão. Assim, mesmo sem *vectoring*, são alcançadas nas simulações taxas de até 24 Gbps considerando a faixa de transmissão do sistema XG.fast. Além disso, simulações realizadas com cabos CAT5e, que é o cabeamento mais utilizado atualmente, mostram que o modo fantasma pode atingir taxa com *vectoring* de até 12 Gbps na faixa do sistema G.fast.

Palavras-chaves—modo fantasma, taxa de transmissão, G.fast, XG.fast.

Abstract—This paper shows that shielded pairs cables such as CAT7 experience a low *crosstalk* even when phantom mode is used, contradicting the literature that indicates that *vectoring* is mandatory due to *crosstalk* among the differential and phantom modes. In the simulation performed using CST, rates up to 24 Gbps are obtained even without *vectoring* using the frequency band of the XG.fast system. In addition, simulations performed with CAT5e cables, which is the most used cabling currently, shows that phantom mode can reach up to 12 Gbps with *vectoring* in the G.fast system range.

Keywords—Phantom mode, transmission rate, G.fast, XG.fast.

I. INTRODUÇÃO

Décadas atrás, as redes de cobre só conseguiam suportar taxas de alguns kilobits por segundo, enquanto que hoje através da tecnologia linha de assinante digital (DSL) consegue-se alcançar taxas superiores a 100 Megabits por segundo [1]. Os avanços da transmissão por redes de cobre sempre buscaram soluções para conseguir um aumento da taxa com apenas a redução gradativa do comprimento da rede de cobre e assim viabilizar economicamente a implantação de sistema FTTH [1].

A cada geração a taxa de dados maior é alcançada com encurtamento dos cabos e aumento da faixa de frequência. A tecnologia atual de acesso por cobre é o G.fast e a geração seguinte é conhecida por XG.fast, e como todas as tecnologias anteriores, houve a expansão da largura de banda de frequência e diminuição do comprimento do cabo [1]. O G.fast utiliza a faixa de frequência de 212 MHz e atinge taxas de 1 Gbps utilizando comprimentos típicos menores que 250 m, enquanto a nova geração XG.fast consegue aumentar essa taxa para 10 Gbps utilizando uma faixa de frequência de 500 MHz em comprimentos típicos abaixo de 70 m [2].

No entanto, as altas taxas alcançadas nas novas gerações só são possíveis devido a técnicas de pré-codificação de canal utilizadas (*vectoring*, em inglês), uma vez que o aumento da faixa de frequência para transmissão resulta em maior interferência entre os canais [3].

Além das configurações de frequência e comprimento do cabo, o modo de transmissão na rede de cobre também pode influenciar na taxa alcançada. Desde as gerações mais antigas do DSL, o modo diferencial de transmissão é utilizado, no qual é usado um par trançado de fios de cobre para cada canal de transmissão [4]. Entretanto, a limitação de pares trançados de um cabo não possibilitava o aumento da taxa agregada aos usuários. Então, meios alternativos de transmissão foram desenvolvidos visando suprir as necessidades de transmissão [2, 5, 6].

Daynara Souza, Marx Freitas, Brenda Sousa, Claudomiro Sales, Roberto Rodrigues e João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém-PA, Brasil, E-mails: daynara.souza@itec.ufpa.br, marx.freitas@itec.ufpa.br, brenda.souza@itec.ufpa.br, cssj@ufpa.br, menegues@ufpa.br, jweyl@ufpa.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela, Ericsson Telecomunicações S.A., CNPq, CAPES.

Entre esses meios alternativos de transmissão temos o *wire-shield* (WS), que ao invés de utilizar o par trançado ele utiliza cada fio condutor do par trançado como um canal, usando a blindagem como retorno para o sistema [5]. Por outro lado, o *split-pair* é um modo de transmissão que utiliza a mesma construção física do WS mas utiliza como referência um dos fios, tendo por isso um canal a menos [6]. A principal desvantagem desses modos de transmissão é serem muito suscetíveis às interferências externas devido a referência comum a todos os canais e assim a sua efetividade ser bastante dependente das suas blindagens. Outro modo de transmissão alternativo é o modo fantasma (MF), que se apresenta como alternativa para aumentar a taxa de transmissão agregada de um cabo de cobre e tem vantagens como, por exemplo, cada canal ter o seu retorno independente dos outros canais [2].

O princípio de funcionamento do MF se baseia na criação de um novo canal além dos já conseguidos dentro de um cabo [2]. O sinal em modo fantasma é transmitido a partir da diferença de modo comum entre dois pares trançados, tornando possível o aumento do número de canais e por consequência o aumento da taxa agregada. Esse modo de transmissão já é utilizado em diversas aplicações e está se tornando uma das prováveis soluções para a implementação da 5ª geração de banda larga [1].

Nesse artigo serão analisados através de simulações no *software* CST (*Computer Simulation Technology*) o desempenho do modo fantasma de transmissão considerando as tecnologias G.fast e XG.fast. Os níveis de taxa de transmissão alcançados serão comparados com o sistema de transmissão sem a utilização do modo fantasma. Dois tipos de cabos, CAT5e e CAT7, serão usados nas simulações. Também será analisado o efeito de interferências externas, do tipo Ethernet próximas ao sistema transmitindo o MF. Além disso, será investigada a aplicabilidade do modo fantasma em cenários com *vectoring* e sem *vectoring*, uma prerrogativa válida, pois a partir das diferenças construtivas dos cabos analisados, há a possibilidade de redução dos efeitos do *crosstalk* e assim não haver a necessidade de aplicação de *vectoring*.

O restante deste artigo está organizado como segue nas seguintes seções. A Seção II descreverá o funcionamento do modo fantasma e as interferências presentes entre os canais. A Seção III abordará os procedimentos utilizados para determinar a capacidade de transmissão dos sistemas. A Seção IV mostrará as configurações utilizadas nas simulações e cálculo da taxa de transmissão. A Seção V apresentará os resultados e análises deste trabalho e a Seção VI mostrará a conclusão.

II. MODO FANTASMA E CROSSTALK

A. Modo Fantasma

O modo fantasma (MF) é uma tecnologia que tem como objetivo melhorar o desempenho de transmissões em sistemas DSL através da criação de canais virtuais que podem ser usados em conjunto com os canais físicos previamente disponíveis. Em geral N-1 canais fantasmas podem ser agregados a um sistema que utiliza o MF a partir de N pares.

Cada canal virtual é independente entre si, e se origina a partir da inserção de um sinal diferencial, mas com propagação em modo comum dentro dos pares trançados (veja a Figura 1). Esta maneira alternativa de se propagar é possível devido ao fato de que estes sinais são injetados nos pares através dos

contatos centrais dos transformadores acoplados aos modos diferenciais.

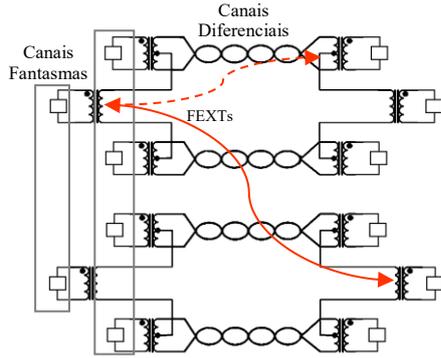


Fig. 1. Circuito esquemático para transmissão simultânea dos canais diferenciais e fantasma em um cabo de quatro pares.

B. Crosstalk

Apesar de a teoria indicar que não há vazamento de potência entre MF e MD, medições de caracterização de sistemas que utilizam canais fantasmas mostram que os níveis de *crosstalk* de um sistema desse tipo podem ser elevados ao ponto de degradar boa parte das transmissões que os utilizam. O *crosstalk* é um dos fatores que mais impacta as taxas de transmissão dos sistemas DSL, principalmente nas versões mais recentes, que utilizam uma banda maior [3,7].

O FEXT é o tipo de *crosstalk* que causa mais problemas a transmissão [3], e é observado por um receptor que está no outro lado do cabo de onde o sinal interferente foi transmitido. Na Figura 1 também podemos ver o FEXT do modo fantasma no modo diferencial, linha tracejada, e o FEXT entre os modos fantasmas, linha contínua.

Os fatores preponderantes para esse aumento de interferência em geral são as não uniformidades dos cabos, a diferença de trançamento entre os pares que contém o MF e o aumento do número de canais dentro do mesmo conjunto de pares.

III. CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO

As simulações foram feitas utilizando o *software* CST, que disponibiliza as funções de transferências de cada canal e os *crosstalks* entre eles, obtidos a partir dos parâmetros de espalhamento S . Esses dados são usados para gerar a matriz de transmissão \mathbf{H} do sistema, a qual contém na diagonal principal as funções de transferência de todos os canais, S_{nm} , e os FEXTs entre os canais nas outras posições da matriz, representados por S_{mn} , i.e.

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{m1} & S_{m2} & \dots & S_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Nos sistemas G.fast e XG.fast, as transmissões são feitas utilizando *Discrete Multitone Modulation* (DMT), onde os dados são transmitidos via um conjunto de subcanais ou tons independentes com largura fixa Δ_f . Assim, de acordo com [3], a taxa de bits por subcanal, expressa em (2), onde Γ representa o *gap* de RSIR, que é um parâmetro definido para o sistema atender as restrições de taxa de erro de bit.

$$R_l(f) = \log_2 \left(1 + \frac{RSIR(f)}{\Gamma} \right) \quad (2)$$

A relação sinal ruído $RSIR(f)$ por tom é definida em (3). A $RSIR(f)$ é dependente de $H_l(f)$, ρ , σ^2 e $C_l(f)$, que são respectivamente, a função de transferência do canal, a máscara espectral, a densidade espectral de potência do ruído Gaussiano

branco aditivo e a soma de todas as interferências que atingem o canal em transmissão, incluindo o FEXT.

$$RSIR(f) = \frac{|H_l(f)|^2 \rho}{\sigma^2 + C_l(f)} \quad (3)$$

A fim de reduzir o impacto de tais interferências, o padrão G.fast e sua nova geração, como já mencionado, consideram que devem ser usadas técnicas de mitigação de *crosstalk*, *vectoring*, entre pares trançados que são coordenados por um mesmo dispositivo [8]. Dessa forma, a técnica de *vectoring* realiza a pré-compensação das interferências que o sinal receberá na transmissão pelo cabo se baseando na aplicação de um pré-codificador aos símbolos que serão transmitidos em L canais como é definido em (4), em que \mathbf{x} é um vetor coluna contendo os símbolos transmitidos em cada canal, \mathbf{P} é uma matriz que representa o pré-codificador, \mathbf{H} é a matriz de transmissão definida em (1), \mathbf{y} é um vetor coluna que contém os símbolos recebidos e \mathbf{n} representa o ruído Gaussiano branco aditivo observado na recepção.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (4)$$

A compensação é realizada no pré-codificador que é definido como $\mathbf{P} = \beta\mathbf{H}^{-1}\mathbf{\Lambda}$, em que $\mathbf{\Lambda}$ é uma matriz diagonal que contém as funções de transferências dos L canais e β é um escalar utilizado para manter a potência de transmissão de acordo com o padrão [9]. Desse modo, a transmissão fim-a-fim fica definida em (5).

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\beta\mathbf{H}^{-1}\mathbf{\Lambda}\mathbf{x} + \mathbf{n} = \frac{1}{\beta}\mathbf{\Lambda}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (5)$$

A $RSIR_v$ de cada canal l , onde a interferência entre os canais foi mitigada, é mostrada em (6), onde $\Lambda(l, l)$ denota o elemento na linha l coluna l da matrix $\mathbf{\Lambda}$.

$$RSIR_v = \frac{|\Lambda(l, l)|^2 \rho}{\beta^2 \sigma^2} \quad (6)$$

A partir da taxa de bits em (2), pode-se definir a taxa de transmissão do canal l por (7), onde N é a quantidade total de subcanais, aplicando a pré-compensação de interferências definida em (6) ou não como define (3).

$$R_l = \Delta_f \sum_{f=1}^N R_l(f) \quad (7)$$

Finalmente, podemos determinar a taxa de transmissão do sistema em bits por segundo conhecida como taxa agregada, que considera as taxas dos vários canais da transmissão como mostrado em (8), em que L é a quantidade total de canais do sistema de transmissão.

$$R = \sum_{l=1}^L R_l \quad (8)$$

IV. CONFIGURAÇÕES DAS SIMULAÇÕES

Foram feitas simulações considerando a implementação do modo fantasma de transmissão nos sistemas G.fast e XG.fast, considerando dois cabos de categorias diferentes, CAT5e e CAT7. As características de cada cabo podem ser vistas na Tabela I. O material do isolante e da capa externa do CAT5e e CAT7 são PE e PVC, respectivamente, a blindagem dos pares no CAT7 é do tipo sólida e a blindagem externa do tipo trançada.

A faixa de frequência simulada foi de 0 a 200 MHz e espaçamento entre os tons Δ_f de 97,7 kHz para o cenário G.fast. No cenário do XG.fast, o modo fantasma foi simulado em uma

faixa de frequência de 0 a 500 MHz e espaçamento entre os tons de 200 kHz. As configurações para o cálculo da taxa de transmissão está mostrada na Tabela II para os cenários G.fast e XG.fast.

TABELA I. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS CABOS CAT5e E CAT7.

CAT5e	Comprimento do trançado (mm) de cada par	Azul	17,87
		Verde	19,21
		Laranja	13,28
		Marrom	12,63
		Diâmetro do condutor (mm)	0,51
Diâmetro do isolante (mm)	0,80		
Espessura da capa externa (mm)	0,61		
CAT7	Comprimento do trançado (mm) de cada par	Azul	17,49
		Verde	16,33
		Laranja	20,36
		Marrom	20,12
	Diâmetro do condutor (mm)	0,40	
	Diâmetro do isolante (mm)	1,00	
Espessura da blindagem dos pares (mm)	0,12		
Espessura da blindagem externa (mm)	0,10		
Espessura da capa externa (mm)	0,40		

TABELA II. CONFIGURAÇÕES PARA O CÁLCULO DA TAXA DE TRANSMISSÃO.

gap de RSIR (Γ)	15,15 dB
Mascara espectral (ρ)	4 dBm
Densidade espectral de potência do ruído Gaussiano branco aditivo (σ^2)	-150 dBm/Hz

V. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nessa secção serão mostrados os resultados dos cenários G.fast e XG.fast para os cabos CAT5e e CAT7. Foram escolhidos os pares com taxa de trançamento mais parecidas para inserir o canal fantasma, visando minimizar o desbalanceamento entre os pares [10]. Dessa forma, um dos canais fantasma é inserido utilizando os pares azul e verde, e o outro canal fantasma, utilizando os pares laranja e marrom, de acordo com a Tabela I.

A. Cenário de simulação: G.fast

Nesse cenário, primeiramente serão verificadas as taxas de transmissão, as funções de transferência e os FEXTs de cada canal quando o modo fantasma está em uso. Para isso, foi escolhido um cabo de 50 m para a análise. Na segunda análise, verifica-se a taxa agregada de transmissão para os comprimentos típicos de 150 m, 200 m e 250 m estabelecidos pelo padrão G.fast. Por último, será verificada a suscetibilidade do modo fantasma a interferências externas, representado por um sistema Ethernet agressor de 50 m de comprimento paralelo e a uma distância de 10 cm do sistema transmitindo o modo fantasma, para comprimentos menores de 30 m, 50 m e 100 m.

• Taxas de transmissão, funções de transferências e FEXTs do modo fantasma:

Na Figura 2 é apresentada a taxa de cada canal quando o modo fantasma de transmissão é implementado em um cabo CAT5e de 50 m, considerando a faixa de frequência do sistema G.fast. A taxa de transmissão sem *vectoring* é baixa devido aos canais fantasmas adicionais aumentarem a interferência que atingem os canais diferenciais como indica a Figura 3, que mostra a função de transferência de um dos canais diferenciais e todos FEXTs que o atingem. Os canais fantasmas têm uma taxa de transmissão sem *vectoring* mais baixa que os diferenciais (Figura 2) devido a interferência causada pelo outro canal fantasma ser maior que a interferência dos canais diferenciais, como indica a Figura 4. Quando o *vectoring* é aplicado, a taxa do canal fantasma é maior do que a do canal diferencial, 1,7

Gbps e 2,1 Gbps, respectivamente, devido ao canal fantasma ter uma menor atenuação do que o diferencial quando devidamente casado. Pode-se ver na Figura 3, que em 200 MHz o canal diferencial casado com 100 ohms apresenta por volta de 15 dB de atenuação enquanto que o canal fantasma casado com 60 ohms apresenta por volta de 5,5 dB, de acordo com a Figura 4. Portanto, a partir das simulações realizadas, para que a utilização do modo fantasma seja vantajosa usando cabos CAT5e há a necessidade aplicar *vectoring*.

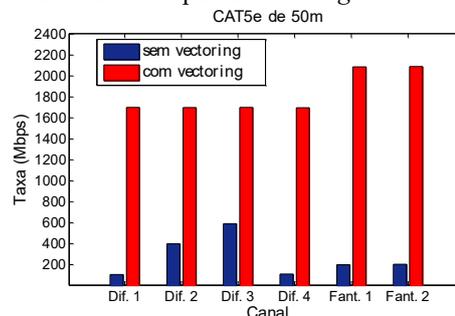


Fig. 2. Taxa de todos os canais do sistema em modo fantasma com e sem *vectoring* no CAT5e.

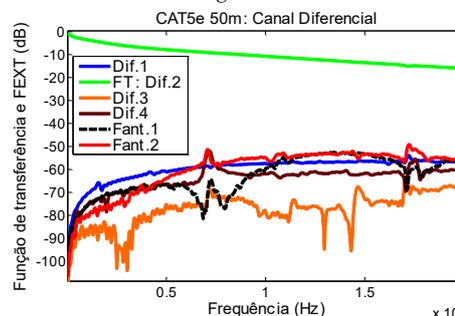


Fig. 3. Função de transferência de um dos canais diferenciais e todos os FEXTs que o atingem na transmissão do Modo Fantasma no CAT5e.

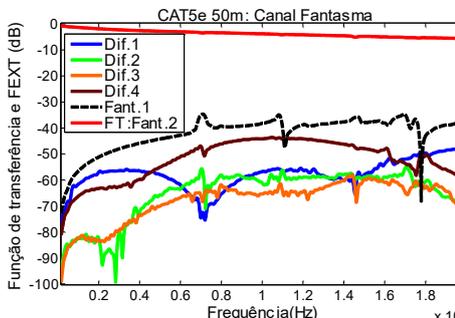


Fig. 4. Função de transferência de um dos canais fantasmas e todos os FEXTs que o atingem na transmissão do Modo Fantasma no CAT5e.

Na Figura 5 temos a taxa com e sem *vectoring* de cada canal quando é utilizado o modo fantasma de transmissão em um cabo CAT7. Pode-se notar que os canais fantasmas e os diferenciais tem o mesmo desempenho em relação à taxa de transmissão obtida, diferentemente do resultado da Figura 2 para CAT5e. Uma explicação para isso é que devido à blindagem entre os pares do CAT7, o acoplamento eletromagnético é menor para o canal fantasma, diminuindo seu desempenho. A partir das Figuras 6 e 7, vemos que a função de transferência do canal diferencial e do canal fantasma tem a mesma atenuação em 200 MHz, que é aproximadamente 15 dB, o que condiz com o resultado de taxa por canal obtida. É importante frisar que cada canal possui impedâncias características diferentes, isto é, 100 ohms e 30 ohms para o canal diferencial e o canal fantasma, respectivamente. Outra diferença entre o resultado obtido para o CAT5e na Figura 2, é que como podemos ver na Figura 5, não é necessário aplicar *vectoring* mesmo utilizando o modo fantasma de transmissão, pois a blindagem entre os pares do CAT7 reduz consideravelmente o FEXT entre os canais

diferenciais e fantasmas. Em 200 MHz de largura de banda, os FEXTs que atingem o canal diferencial mostrados na Figura 6 e os FEXTs que atingem o canal fantasma mostrados na Figura 7 são praticamente desprezíveis.

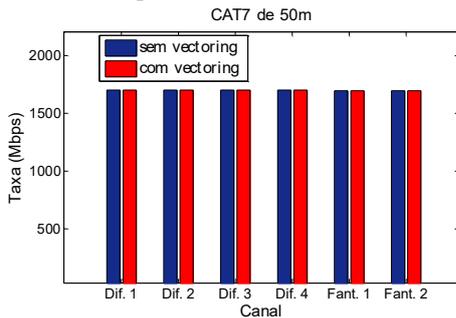


Fig. 5. Taxa de todos os canais do sistema em modo fantasma com e sem *vectoring* no CAT7.

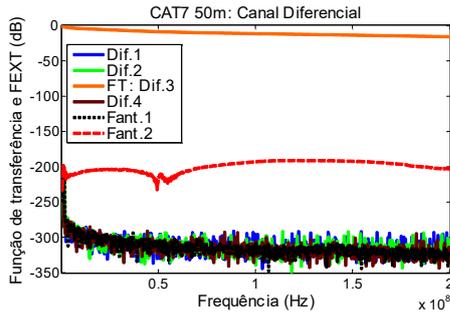


Fig. 6. Função de transferência de um dos canais diferenciais e todos os FEXTs que o atingem na transmissão do Modo Fantasma em um cabo CAT7.

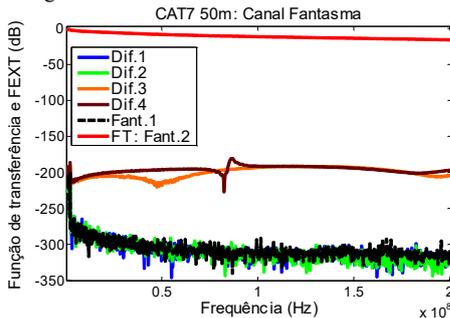


Fig. 7. Função de transferência de um dos canais fantasmas e todos os FEXTs que o atingem na transmissão do Modo Fantasma em um cabo CAT7.

• Taxa agregada de transmissão para os comprimentos longos típicos de 150 m, 200 m e 250 m:

Como o padrão G.fast estabelece que devam ser usados cabos de no máximo 250 m, os próximos resultados tem o objetivo de verificar a taxa agregada de transmissão do modo fantasma e comparar com o modo diferencial para os cabos CAT5e e CAT7 em análise nos comprimentos de 150 m, 200 m e 250 m.

Na Figura 8, podemos ver que ao aplicar *vectoring*, o modo fantasma (MF) aumenta bastante a taxa agregada de transmissão do sistema em comparação com o modo diferencial (MD), que em média representa um ganho de 1,8 Gbps. Já em 250 m, a taxa agregada do modo fantasma de transmissão chega a 2,8 Gbps, maior que o máximo de 2 Gbps designado para o sistema G.fast. Porém, quando não é aplicado *vectoring*, o MF apresenta uma taxa agregada menor que o MD, pois como dito anteriormente, a adição dos canais fantasmas gera mais interferência e diminui a taxa dos canais diferenciais, não compensando a taxa agregada final.

Na Figura 9 temos a comparação entre a taxa agregada obtida com o modo fantasma de transmissão e o modo diferencial para o cabo CAT7. As taxas agregadas de transmissão com e sem *vectoring* são iguais devido à baixa interferência entre os canais no CAT7. A utilização do MF

permite atingir taxas agregadas de transmissão de 3,56 Gbps, 2 Gbps e 1 Gbps para cabos de 150 m, 200 m e 250 m, respectivamente, representando um ganho médio de 700 Mbps.

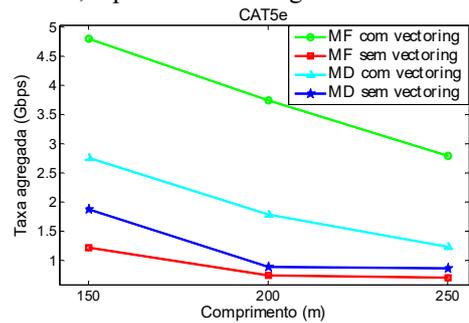


Fig. 8. Taxa agregada com e sem *vectoring* para vários comprimentos em um CAT5e transmitindo o modo fantasma e comparação com o modo diferencial.

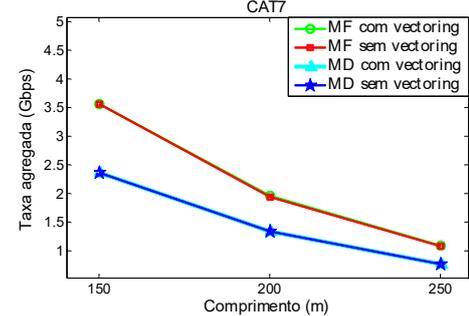


Fig. 9. Taxa agregada com e sem *vectoring* para vários comprimentos em um CAT7 transmitindo o modo fantasma e comparação com o modo diferencial.

É possível notar pelas Figuras 8 e 9, que quanto maior o comprimento do cabo menor é o aumento de taxa proporcionado pelo modo fantasma de transmissão em relação ao modo diferencial. Para o CAT5e, a diferença entre o ganho de taxa com *vectoring* obtido foi de 440 Mbps para 150 m e 250 m. Já para o CAT7 foi de 880 Mbps para os mesmos comprimentos. Dessa forma, é mais vantagem utilizar o MF em comprimentos menores.

• Taxa agregada de transmissão na presença ou ausência de interferências externas para os comprimentos de 30 m, 50 m e 100 m:

O resultado mostrado na Figura 10 analisa a susceptibilidade do sistema transmitindo o modo fantasma à interferências externas, sendo considerados os cabos CAT5e, sem blindagem, e CAT7, com blindagem, para os comprimentos de 30 m, 50 m e 100 m.

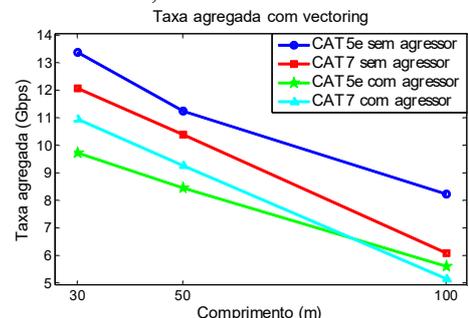


Fig. 10. Taxa agregada do modo fantasma nos cabos CAT5e (com *vectoring*) e CAT7 (com ou sem *vectoring*) na presença ou ausência de interferências externas.

Na Figura 10 temos apenas o resultado de taxa agregada com *vectoring* do cabo CAT5e. O resultado sem *vectoring* não é mostrado, pois como já mostrado anteriormente a forte interferência entre os canais fantasmas e diferenciais faz com que se tenha um desempenho pior do que quando é transmitido apenas o modo diferencial. Na Figura 10 também é mostrada a taxa agregada do cabo CAT7, que nesse caso teve resultados

equivalente de taxa com e sem *vectoring*.

O desempenho do sistema decai bastante na presença de interferências externas, conhecidas como linhas agressoras. Há uma diminuição na taxa agregada de, em média, 3,2 Gbps para o CAT5e e 1 Gbps para o CAT7. Nesse tipo de cenário, o ideal é que o cabo possua blindagem como o CAT7, pois isso o torna mais resistente a essas interferências como podemos ver na Figura 10. Por outro lado, são obtidas altas taxas de transmissão quando não há interferências externas, e o CAT5e apresenta melhor desempenho em relação a taxa obtida que o CAT7 nesse cenário.

B. Cenário de simulação: XG.fast

O objetivo desse cenário de simulação é verificar a capacidade de transmissão alcançada quando o modo fantasma é utilizado em altas frequências como a do próximo padrão de tecnologia de acesso ao usuário XG.fast [1]. Dessa forma, foram realizadas simulações na faixa de frequência de 500 MHz para os comprimentos de 30 m, 50 m e 70 m dos cabos CAT5e e o CAT7.

Na Figura 11 temos a taxa de transmissão com *vectoring* para o CAT5e. Podemos ver que o ganho de taxa ao utilizar o MF com *vectoring* é em média 8,75 Gbps em relação ao modo diferencial.

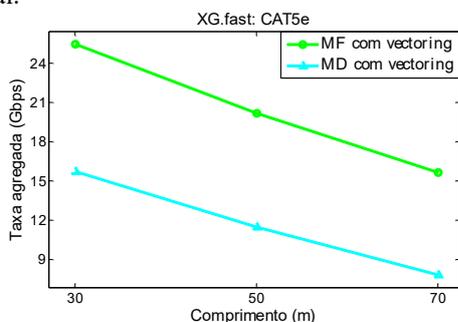


Fig. 11. Taxa agregada de transmissão do cenário XG.fast para vários comprimentos de cabo CAT5e considerando a implantação do modo fantasma e comparação com o modo diferencial.

Na Figura 12 temos a taxa de transmissão com e sem *vectoring* para o CAT7. Como nos resultados do cenário G.fast, a aplicação de *vectoring* se mostrou desnecessária devido à baixa interferência entre os canais mesmo utilizando o modo fantasma em altas frequências de até 500 MHz do XG.fast. O ganho de taxa, ao utilizar o modo fantasma (MF) em comparação com o modo diferencial (MD), para os comprimentos de 30 m, 50 m e 70 m, é 7,9 Gbps, 5,8 Gbps e 3,8 Gbps, respectivamente.

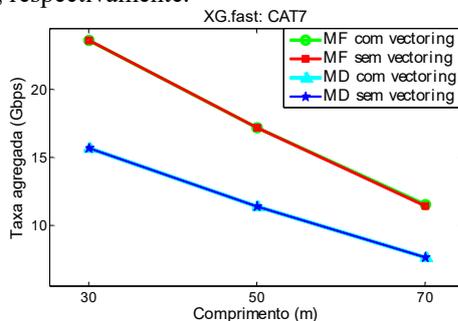


Fig. 12. Taxa agregada de transmissão do cenário XG.fast para vários comprimentos de cabo CAT7 considerando a implantação do modo fantasma e comparação com o modo diferencial.

As Figuras 11 e 12 mostram que a taxa agregada de transmissão para o comprimento de 70 m, que é o comprimento máximo especificado para o sistema XG.fast [1], é de 15,67 Gbps e 11,5 Gbps para o CAT5e e CAT7 respectivamente, que é acima do máximo de 10 Gbps esperado para o sistema XG.fast. Enquanto que o caso com apenas os modos

diferenciais obteve-se taxas abaixo de 8 Gbps para os dois tipos de cabos.

VI. CONCLUSÃO

As investigações propostas nesse trabalho mostraram resultados que podem ser levados em consideração na implantação das tecnologias de acesso ao usuário, G.fast e XG.fast. Primeiro, foi mostrado que o modo fantasma não necessita de nenhuma técnica de cancelamento de interferência em cenários que utilizam cabos do tipo CAT7, pois o mesmo possui seus pares blindados e faz com que a interferência entre os canais diferenciais e fantasmas seja quase desprezível. Esse fato contradiz alguns dos estudos que dizem que a utilização do modo fantasma é essencial a aplicação de *vectoring*. Outra vantagem de usar o CAT7 é a maior robustez à interferência externas, e portanto os canais fantasmas são menos susceptíveis a ingresso nesse tipo de cabo.

Outro ponto importante investigado nesse artigo é o desempenho dos canais fantasmas em relação aos diferenciais. Foi visto que os canais fantasmas não possuem a mesma impedância característica que os pares trançados em que são inseridos, e quando os canais fantasmas estão devidamente casados, possuem um desempenho igual ou superior aos canais diferenciais. As investigações também mostram o grande potencial do modo fantasma em ser aplicado em casos onde a estrutura de cabeamento está consolidada por cabos de mais baixa qualidade, como os de categoria CAT5e. Neste caso, através do uso de *vectoring* obteve-se taxas de transmissão de 3 a 13 Gbps para comprimentos de 30 m a 250 m considerando o sistema G.fast quando não há interferência externa.

A investigação realizada para a próxima geração XG.fast, mostra que o modo fantasma traz benefícios que garantem altas taxas de transmissão de dados para os comprimentos típicos desse novo padrão, sendo obtidas nas simulações taxas de 15 Gbps a 25 Gbps para cabos de 30 m e 70 m.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Ericsson S.A. Brazil, ao CNPQ, a Eduardo Medeiros, a Leonardo Ramalho, ao laboratório de eletromagnetismo aplicado (LEA) e ao laboratório de sistemas embarcados (LASSE).

REFERÊNCIAS

- [1] Werner Coomans, Rodrigo B. Moraes, Michael Timmers, Adriaan De Lind van Wijngaarden, Mamoun Guenach "XG-fast: the 5th generation broadband". IEEE ICC Communications Magazine, 2015.
- [2] 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.
- [3] Sandra Drakulic, Driton Statovci, Martin Wolkerstorfer, and Thomas Zemen, "Comparassion of Interference mitigation techniques for Next Generation DSL Systems". IEEE ICC Access Networks and Systems, 2015.
- [4] P. Golden, K. Jacobsen, and H. Dedieu, "Implementation and Applications of DSL Technology". Auerbach Publications, 2007.
- [5] M. Jakovljevic1, T. Magesacher2, P. Odling2, P. O. Borjesson2, M. Sanches3 and S. Zazo1, "Throughput Of Shield Twisted-Pair Cables Using Wire-Shield Modes In The Presence Of Radio Ingress". IEEE, 2009.
- [6] J. Cioffi et al., "Vectored DSLs with DSM: The road to ubiquitous gigabit DSLs," in Proc. of the World Telecommunications Congress 2006, (invited paper), Budapest, Hungary, 2006.
- [7] Daniel Hincapie, Gerhard Maierbacher, and Mathias Leibiger, 'Rate and Reach Gains of Vectored DSL in the Current Access Network', 9th ITG Symposium. Proceedings Broadband Coverage in Germany, Apr. 2015.
- [8] George Ginisand John M. Cioffi, "Vectored transmission for digital subscriber line systems," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 5, no. 4, pp. 1085–1104, June 2002.
- [9] Itsik Bergel; Amir Leshem, 'The Performance of Zero Forcing DSL Systems', IEEE Signal Processing Letters, vol. 20, pp 527-530, May 2013.
- [10] W. Coomans et al., "XG-FAST: Towards 10 Gb/s copper access," 2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Austin, TX, 2014, pp. 630-635.