

# Análise Comparativa de Modos de Transmissão para Redes Gigabit-DSL

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

**Resumo**—O advento de novas aplicações têm contribuído para o intenso crescimento de tráfego de dados. O modo de transmissão diferencial usado nos sistemas de cobre atuais possui limitações de alcance de taxa de transmissão, pois cada par do cabo é utilizado como um único canal de comunicação. Uma das soluções propostas é a utilização de modos de transmissão alternativos que aumentem o número de canais disponíveis sem a necessidade de pares adicionais, como *split-pair*, *wire-shield* e o modo fantasma. Neste artigo, o desempenho desses modos de transmissão é comparado a partir da taxa de transmissão. É visto que o modo fantasma tem desempenho superior aos modos *split-pair* e *wire-shield* na maioria dos cenários investigados.

**Palavras-Chave**—*split-pair*, *wire-shield*, modo fantasma, taxa de transmissão.

**Abstract**—The advent of new applications has contributed to the intense growth of data traffic. The differential transmission mode used in current copper systems has transmission rate range limitations because each cable pair is used as a single communication channel. One of the proposed solutions is the use of alternative transmission modes that increase the number of channels available without the need for additional pairs, such as *split-pair*, *wire-shield*, and phantom-mode. In this article, the performance of these transmission modes is compared from the transmission rate. It is seen that phantom-mode performs better than *split-pair* and *wire-shield* modes in most scenarios investigated.

**Keywords**—*split-pair*, *wire-shield*, phantom-mode, transmission rate.

## I. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda do tráfego de dados que acompanhou os últimos anos, as aplicações de alto desempenho precisaram se aprimorar e espera-se que na próxima década a demanda de dados apenas em 2021 seja 84% superior a atual [1]. As redes de dados cabeadas atuais que são compostas por uma junção híbrida de fibra e metal, caminham para um cenário que é conhecido como FTTH (*Fiber To The Home*) no qual taxas de até 40 Gbps já estão disponíveis para os usuários finais [2]. No FTTH, as fibras adentram as residências dos usuários, onde as perdas por atenuação no cobre e efeitos de indução são minimizados.

Entretanto, a instalação em grande escala da fibra até usuário ainda é onerosa e por isso, soluções baseadas em canais de cobre nas arquiteturas FTTdp (*Fiber To The Distribution Point*), continuam a evoluir no objetivo de aumentar

a capacidade de transmissão e recepção dos usuários finais. A rede de cobre que complementa de forma estratégica a rede de fibra, vem historicamente da tecnologia conhecida DSL (*Digital Subscriber Line*) [3], [4].

No contexto das tecnologias DSL, sempre foi importante soluções de baixo custo para suprir esse crescente tráfego de dados. Existem dificuldades em se obter esse objetivo e ao mesmo tempo gerar aumento de taxa de forma eficiente. Uma das dificuldades está relacionada a limitações do meio físico para transmissão. Os sistemas DSL atuais utilizam o modo de transmissão diferencial, em que cada par de cobre do cabo é utilizado para transmitir exclusivamente um canal de comunicação.

Uma das soluções é a utilização de modos de transmissão alternativos, que tem como característica principal o aumento do número de canais disponíveis em um cabo, sem a necessidade da aquisição de condutores adicionais. Há basicamente três topologias que permitem isto e estas são chamadas de SP (*split-pair*), WS (*wire-shield*), e MF (modo fantasma). Cada uma delas sob vários aspectos, relacionados a utilização técnicas de mitigação de interferência do tipo diafonia (e.g., *vectoring*) e aterramento do nível de referência, permite que altas taxas de dados sejam obtidas [5], [6], [7].

Objetivando determinar sob quais aspectos cada modo de transmissão pode ser mais benéfico para uma transmissão DSL, neste trabalho compara-se o desempenho desses três modos de transmissão considerando condições típicas de operação (i.e., interferentes externos) e a utilização de cabos CAT5e (*Category 5 Enhanced*) de 150m, muito utilizado em implantações reais de transmissões DSL [8]. Para isto, obtiveram-se a resposta em frequência direta e diafonia (i.e., interferência entre canais) a partir de simulações usando a ferramenta *Cable Studio* do software CST (*Computer Simulation Technology*), bastante utilizado para simular de forma precisa transmissões em cabos em uma ampla gama de frequências [9]. Determinou-se a partir delas a taxa de transmissão agregada considerando o uso de técnicas de mitigação de diafonia, utilizando algoritmo de simulação computacional.

Este trabalho é organizado como segue: a Seção II mostrará algumas características dos sistemas Gigabit-DSL, a Seção III descreverá a configuração dos modos de transmissão analisados neste trabalho, a Seção IV falará sobre o processo de obtenção dos resultados e características das simulações. Os resultados serão apresentados na Seção V e as conclusões finais deste trabalho estão na Seção VI.

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

## II. CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS GIGABIT-DSL

### A. Especificações do padrão DSL G.fast

A atual quarta geração da tecnologia de transmissão DSL chamada de *G.fast*, foi padronizada em dezembro de 2014 pelo ITU (*International Telecommunication Union*) [8] para atender às novas demandas dos usuários de banda larga. O padrão *G.fast* possui duas versões, até 106 MHz padronizada para atingir até 1 Gbps, e a versão até 212 MHz padronizada para alcançar no máximo 2 Gbps, ambos em cabos de até 250m de comprimento. Devido ao aumento de interferência em altas frequências, o padrão *G.fast* recomenda o uso da técnica de mitigação de interferência chamada *vectoring linear zero-forcing* [10].

### B. Crosstalk em Sistemas DSL

A diafonia também conhecida como *crosstalk*, é vazamento de potência do sinal de um canal para o outro. Em sistemas DSL, isso significa acoplamento entre os pares de um mesmo cabo e depende das características construtivas dos mesmos. De acordo com [11], o *crosstalk* é mais intenso entre canais adjacentes e tende a aumentar com a frequência. Em sistemas DSL, existem dois tipos de *crosstalks*, o NEXT (*Near-end crosstalk*) e FEXT (*Far-end crosstalk*) mostrados na Fig. 1.

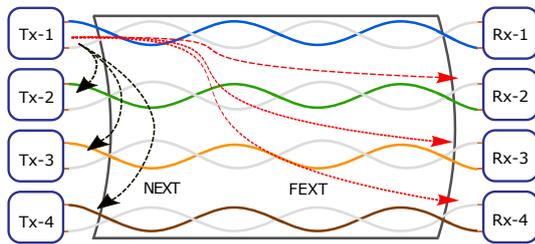


Fig. 1. NEXT e FEXT no modo de transmissão diferencial.

1) *NEXT*: Tipo de *crosstalk* entre transmissores e receptores no mesmo lado da extremidade de um cabo, como mostra as linhas pontilhadas em preto na Fig. 1. O NEXT não será analisado pois o sistema *G.fast* utiliza STDD (*synchronized time-division duplexing*) que pode mitigar seu efeito.

2) *FEXT*: Tipo de *crosstalk* entre transmissores em uma extremidade de um cabo nos receptores situados na outra extremidade, como mostra as linhas pontilhadas em vermelho na Fig. 1. O impacto dessa interferência muitas vezes acaba se tornando um entrave para a transmissão.

3) *AXT* (*Alien crosstalk*): Tipo de *crosstalk* devido a interferentes externos ao sistema, diferentemente do NEXT e FEXT. O AXT representado na Fig.2, é a interferência causada por qualquer outro tipo de sistema que transmite na mesma banda de frequência, operando próximo ao sistema DSL, e sendo assim, esse tipo de interferência geralmente não é mitigada e pode ser bastante prejudicial [12]. Apesar de existirem técnicas de cancelamento de AXT, neste trabalho elas não serão utilizadas. A fonte de interferência do AXT pode ser chamadas de linhas agressoras.

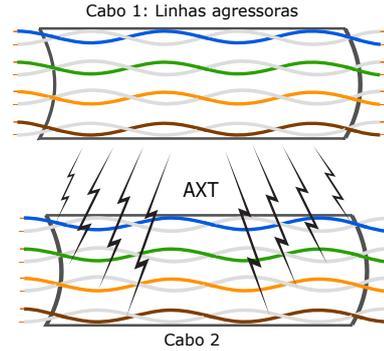


Fig. 2. AXT entre dois sistemas.

## III. MODOS DE TRANSMISSÃO ALTERNATIVOS

### A. Split-Pair (SP) e Wire-Shield (WS)

O modo *split-pair* (SP) mostrado na Fig. 3 é um modo de transmissão alternativo que possui sinalização de modo simples em cada fio. A desvantagem mencionada anteriormente, em relação a diferença de potencial do terra entre as extremidades do cabo, é contornada ao se utilizar um dos fios do cabo como referência a todos os sinais. Assim, se  $N$  for o número de pares do cabo,  $2N - 1$  condutores do cabo são usados como canais individuais e independentes.

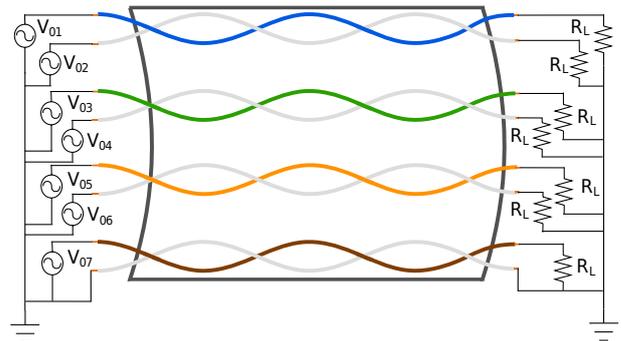


Fig. 3. Configuração para transmissão em sete canais utilizando o modo *split-pair*.

O modo de transmissão *wire-shield* (WS) mostrado na Fig. 4 tem sua construção física similar a do SP. A diferença construtiva se dá pelo fato de que o condutor de referência do WS é a blindagem externa que envolve o cabo, e como consequência disso, ele possui um canal a mais que o SP, isto é,  $2N$  canais.

Esses dois modos de transmissão têm vantagens em relação ao modo diferencial, pois são obtidos (quase, para o SP) o dobro de canais em uma mesma estrutura cabeada. No entanto, como há um forte vazamento de sinal entre os canais, em ambos é necessário o uso de *vectoring* [6].

### B. Modo Fantasma de primeira (MF1) e segunda camada (MF2)

O modo fantasma (MF) [13] utiliza duas formas de sinalização ao mesmo tempo, pois são transmitidos com sinalização em modo diferencial, porém utilizam a derivação central dos transformadores para trafegarem em modo comum através

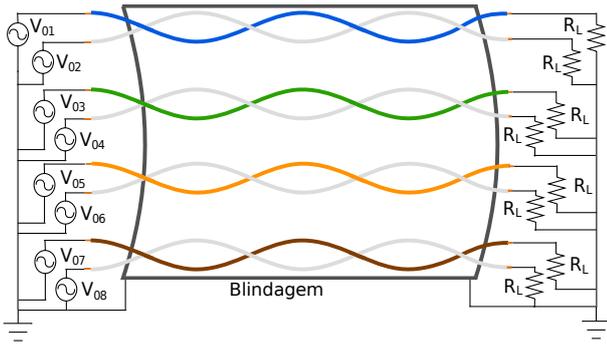


Fig. 4. Configuração para transmissão em oito canais utilizando o modo *wire-shield*.

dos pares trançados. Com isso, o MF além de aumentar o número de canais, tem a vantagem de utilizar transceptores diferenciais (transmissores e receptores) do mesmo tipo usado pelos padrões DSL, diferentemente dos modos SP e WS.

A Fig. 5 representa a configuração de inserção dos canais fantasmas em um cabo de quatro pares. Observe que cada par de transformadores conectados aos canais diferenciais comporta um canal fantasma independente, que propaga pelos contatos centrais desses transformadores através de outro transformador usado para conectar o modo fantasma. Na Fig. 5, apenas fantasmas de primeira camada (FAN) são mostrados, e a transmissão simultânea dos canais diferenciais (DIF) juntamente com os canais fantasmas é chamado de modo fantasma de primeira camada (MF1), que em um cabo de quatro pares, possui um total de seis canais disponíveis - 4 canais diferenciais e dois fantasmas.

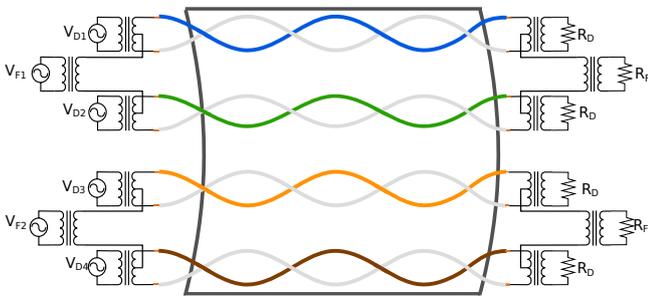


Fig. 5. Configuração para transmissão em seis canais utilizando a primeira camada do modo fantasma, MF1.

Uma forma de implementar o modo fantasma explorando todo o seu potencial pode ser vista na Fig. 6, em que o canal fantasma da segunda camada, se propaga nos canais fantasmas de primeira camada, sendo portanto, um canal fantasma dos fantasmas (FF). 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 de quatro pares mostrado na Fig. 6, são gerados um total de sete canais, no qual quatro são diferenciais, dois são fantasmas e um é fantasma dos fantasmas ou fantasma de segunda camada, denominado de modo de transmissão fantasma de segunda camada (MF2). Tendo assim quase o dobro de canais disponíveis.

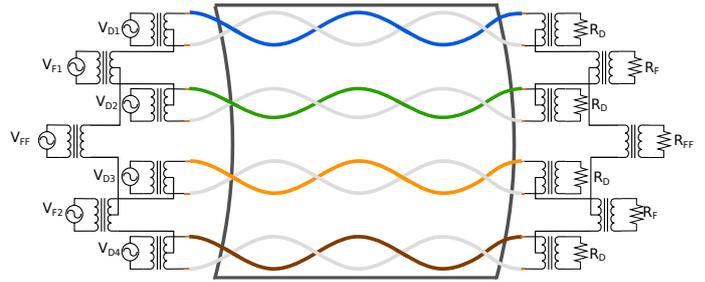


Fig. 6. Configuração para transmissão em sete canais utilizando a segunda camada do modo fantasma, MF2.

Tanto o MF1 quanto o MF2 adicionam canais virtuais a transmissão, o que gera outras fontes de vazamento de sinal entre os canais e intensifica o *crosstalk* em cabos do tipo CAT5e [14].

#### IV. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO E METODOLOGIA

##### A. Características das simulações

As simulações foram realizadas no *software* CST levando em consideração as características físicas do cabo CAT5e, apresentadas na Tabela I, na faixa de frequência até 200 MHz e comprimento de 150 m.

Os *setups* de transmissão de cada modo, apresentados nas Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 e Fig. 6, foram simulados no *software* CST com ou sem um interferente externo, localizado paralelamente a esses sistemas e a uma distância de 10 cm. O interferente é caracterizado por outro CAT5e de 50 m, porém transmitindo em modo diferencial para representar um sistema Ethernet.

Foram utilizadas para os modos SP e WS fontes transmissoras e receptoras de  $50 \Omega$  de acordo com o utilizado em [15]. Já para o MF, em [16] foi visto que a escolha dos pares do cabo para inserção dos canais fantasmas influencia no desempenho do sistema e a melhor escolha se baseia em utilizar pares com a taxa de trançamento parecidas. Dessa forma, um dos canais fantasmas de 1ª camada (FAN) será inserido nos pares azul e verde, e o outro nos pares laranja e marrom. Sendo assim, foram determinadas a impedância característica dos canais FAN de  $60 \Omega$  e  $13 \Omega$  para o canal fantasmas de 2ª camada (FF).

TABELA I. Parâmetros do CAT5e utilizado nas simulações.

Parâmetro	Valor (mm)				Material associado
Diâmetro do condutor	0,51				Cobre puro
Espessura do isolante	0,14				PE
Espessura da capa externa	0,61				PVC
Espessura da blindagem externa	0,1				Alumínio (trançado)
Comprimento do trançado	Azul	Laranja	Marrom	Verde	-x-
	17,87	13,28	12,63	19,21	

### B. Taxa de transmissão

Em sistemas DSL, de forma geral, considera-se que as transmissões são feitas utilizando DMT (*Discrete Multitone Modulation*), em que os dados são transmitidos via um conjunto de subcanais independentes no domínio da frequência, que também são chamados de tons, com largura de banda fixa  $\Delta f$ .

De acordo com [17], a taxa de bits por subcanal para o canal  $l$  pode ser definida por (1):

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

onde  $\Gamma$  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 (2):

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

onde  $H_l(f)$  representa o ganho do canal  $l$ ,  $C_l(f)$  representa a soma de todas as interferências que atingem a transmissão no canal  $l$ ,  $\rho$  é a potência máxima total de transmissão e  $\sigma^2$  denota a densidade espectral de potência do ruído gaussiano branco aditivo.

É possível definir a taxa de transmissão do canal  $l$  por (3):

$$R_l(f) = \Delta f \sum_{f=1}^K R_l \quad (3)$$

onde  $K$  é a quantidade total de sub canais.

Finalmente, podemos determinar a taxa de transmissão do sistema como um todo, ao considerarmos as taxas alcançadas conjuntamente do número de canais utilizados fazendo a somatória de da quantidade  $l$  de canais calculados em (3). Neste trabalho, a taxa de transmissão foi calculada utilizando os parâmetros especificados para o padrão G.fast [8], apresentados na Tabela II.

TABELA II. Parâmetros utilizados para cálculo da taxa e EVM.

Parâmetro	Valor
Espaçamento entre tons ( $\Delta f$ )	51,75 kHz
Gap de SNIR ( $\Gamma$ )	9,75 dB
Potência máxima ( $\rho$ )	4 dBm
Densidade espectral de potência do AWGN ( $\sigma^2$ )	-140 dBm/Hz

## V. RESULTADOS

### A. Análise das Curvas de Resposta em Frequência Direta e FEXT

As Fig. 7 e Fig. 8 mostram a resposta em frequência direta (RFD) de um canal e FEXTs sobre o mesmo, obtidos nas simulações dos modos SP e WS, respectivamente. Já a Fig. 9 mostra as RFD e FEXTs dos canais diferenciais (DIF), fantasmas de 1ª camada (FAN) e fantasma de 2ª camada (FF) do modo de transmissão fantasma.

As Fig. 7 e Fig. 8 mostram que o acoplamento FEXTs entre os canais é bastante elevado, como esperado pelo fato de estarem transmitindo em modo comum, e até ultrapassa

os níveis das RFD nos dois casos. Dessa forma, esses modos de transmissão serão avaliados somente com a utilização de *vectoring* para cancelamento de interferência. Na Fig. 9 vemos que canal possui atenuação diferente, sendo que os fantasmas possuem menor atenuação que os diferenciais e o FEXT acoplado entre os canais também é elevado, porém fica abaixo dos níveis das RFDs em toda faixa de transmissão para este caso.

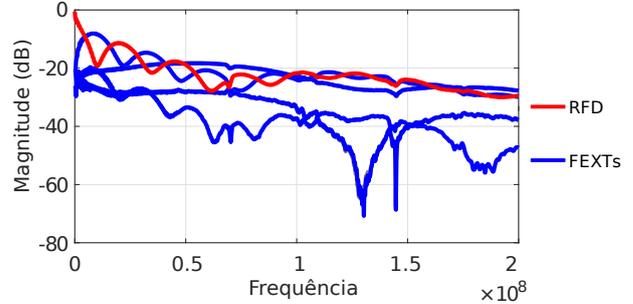


Fig. 7. RFD e FEXTs de um canal do modo SP em cabo sem blindagem para 150 m de comprimento.

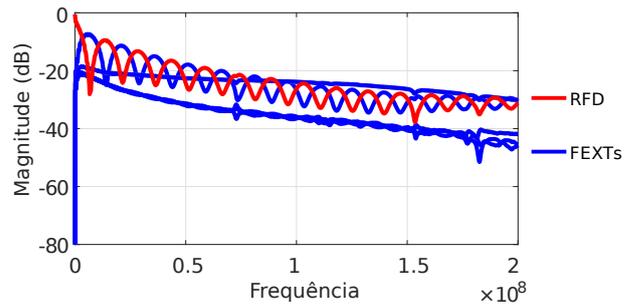


Fig. 8. RFD e FEXTs de um canal do modo WS em cabo com blindagem para 150 m de comprimento.

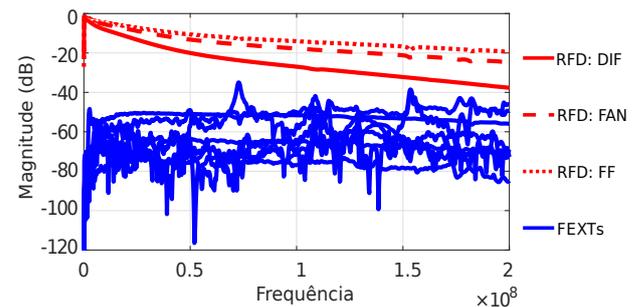


Fig. 9. RFDs e FEXTs dos canais DIF, FAN e FF do MF2 em cabo com blindagem para 150 m de comprimento.

### B. Análise da Taxa de Transmissão

Como no caso do CAT5e sem blindagem não é possível transmitir o modo WS, foram comparados apenas os modos SP, MF1 e MF2, como mostra a Fig. 10. Percebe-se que no cenário sem agressor, o MF2 atinge 6,4 Gbps e possui um desempenho cerca de 20,7% maior que os modos SP e MF1, ambos atingem em torno de 5,3 Gbps. Apesar de os modos SP e MF2 possuírem o mesmo número de canais, o modo

SP agrega menos taxa de transmissão ao sistema, devido cada canal possuir uma atenuação maior em relação aos canais do MF2, como pode ser visto nas Fig. 7 e Fig. 9.

Já no cenário com agressor mostrado na Fig. 10, o sistema com melhor desempenho continua sendo o MF2 atingindo cerca de 4,45 Gbps, porém teve uma redução de quase 1,95 Gbps (30%) devido à essa interferência. Neste mesmo cenário é visto que o modo de transmissão SP é o mais susceptível ao efeito da linha agressora, pois houve uma redução de 34,2% na taxa de transmissão, e ficou abaixo do MF1.

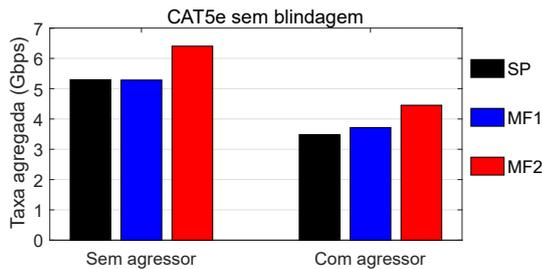


Fig. 10. Taxas agregadas de transmissão quando é utilizada o modo SP e MF2. Cenários com e sem agressor em um cabo sem blindagem para 150 m de comprimento.

A Fig. 11 apresenta a comparação entre os modos WS, MF1 e MF2 no CAT5e com blindagem externa. Nela, é visto que apesar de o modo WS possuir um canal a mais que o MF2, a taxa agregada do MF2 é maior que a do WS, isto é, 6,4 Gbps para o MF2 e 6,08 Gbps para o WS, sendo que a taxa do MF1 é a mais baixa com 5,3 Gbps, no cenário sem AXT (linha Ethernet agressora).

No caso do cenário com agressor da Fig. 11, o MF2 atingiu 5,419 Gbps e ainda é melhor que o WS, porém a diferença entre os dois é maior que no caso anterior, em torno de 1,582 Gbps. Além disso, nesse cenário o desempenho do WS é pior até mesmo que o MF1, que atingiu 4,46 Gbps. Isso ocorre devido ao WS usar a blindagem externa como referência para os canais, assim perde parte da proteção que a utilização de cabos blindados oferece.

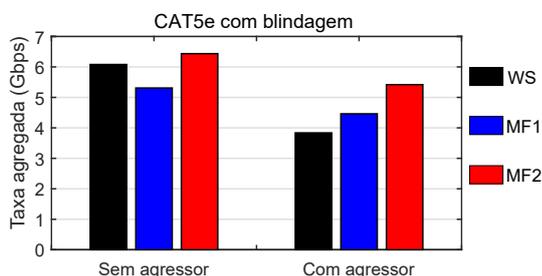


Fig. 11. Taxas agregadas de transmissão quando é utilizada o modo WS e MF2. Cenários com e sem agressor em um cabo com blindagem para 150 m de comprimento.

## VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a comparação através de simulações dos modos de transmissão alternativos, fantasma de 1ª (MF1) e 2ª (MF2) camada, *split-pair* (SP) e *wire-shield* (WS) feitas em um CAT5e de 150m com ou sem blindagem.

Foi constatado que o modo fantasma de 2ª camada é melhor modo de transmissão alternativo nas situações analisadas, apresentando um bom desempenho mesmo na presença de interferentes, alcançando no pior caso 4,45 Gbps e no melhor caso cerca de 6,43 Gbps. Os resultados mostraram que a utilização da 2ª camada (MF2) aumentou em média 20% a taxa de transmissão em relação ao sistema que utiliza apenas canais fantasmas de 1ª camada (MF1).

Foi visto também que quando não havia interferentes externos (AXT), o modo de transmissão SP, apesar de possuir um canal a mais que o MF1, apresentou um desempenho muito próximo deste. Já o modo WS teve um desempenho bem próximo ao MF2, mesmo possuindo um canal a mais que o mesmo. Já quando o sistema está sob influência de AXT, a taxa de transmissão dos modos SP e WS diminui bastante, e se tornam os modos com menores desempenho.

## REFERÊNCIAS

- [1] CISCO, "The zettabyte era: Trends and analysis," 2017.
- [2] W. Coomans, R. B. Moraes, K. Hooghe, A. Duque, J. Galaro, M. Timmers, A. J. van Wijngaarden, M. Guenach, and J. Maes, "Xg-fast: Towards 10 gb/s copper access," in *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 630–635, Dec 2014.
- [3] T. Starr, J. M. Cioffi, and P. J. Silverman, *Understanding digital subscriber line technology*. Prentice Hall PTR, 1999.
- [4] K. T. Chen, S. K. Yang, F. H. Kuo, and R. R. Lee, "The evaluation of next-generation copper-wire technology," in *2015 17th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, pp. 412–415, Aug 2015.
- [5] B. Lee, J. M. Cioffi, S. Jagannathan, and M. Mohseni, "Gigabit dsl," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 55, pp. 1689–1692, Sept 2007.
- [6] M. Jakovljevic, T. Magesacher, P. Odling, P. O. Borjesson, M. Sanchez, and S. Zazo, "Throughput of shielded twisted-pair cables using wire-shield modes in the presence of radio ingress," in *2009 16th International Conference on Digital Signal Processing*, pp. 1–6, July 2009.
- [7] P. Lafata, "Estimations of g.fast transmission performance over phantom modes," in *2015 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, pp. 1–5, July 2015.
- [8] *Recommendation G.9701: Fast Access to Subscriber Terminals (FAST) Physical layer specification*, December 2014.
- [9] CST, "Cst cable studio," 2018.
- [10] G. Ginis and J. M. Cioffi, "Vectored transmission for digital subscriber line systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, pp. 1085–1104, Jun 2002.
- [11] P. Golden, H. Dedieu, and K. Jacobsen, *Fundamentals of DSL Technology*. Auerbach Publications, 2006.
- [12] P. GOLDEN, H. DEDIEU, and K. JACOBSEN, eds., *Implementation and applications of DSL technology*. Auerbach Publications, 2007.
- [13] W. Foubert, C. Neus, L. V. Biesen, and Y. Rolain, "Exploiting the phantom-mode signal in dsl applications," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, pp. 896–902, April 2012.
- [14] D. D. Souza, M. M. M. Freitas, B. P. T. Sousa, C. S. Sales, R. M. Rodrigues, and J. C. W. A. Costa, "Análise do modo fantasma aplicado a sistemas g.fast e xg.fast," *XXXV Simpósio brasileiro de telecomunicações e processamento de sinais - SBrT2017*, pp. 368–372, Setembro 2017.
- [15] M. Jakovljevic, T. Magesacher, K. Ericson, P. Odling, P. O. Borjesson, and S. Zazo, "Common mode characterization and channel model verification for shielded twisted pair (stp) cable," in *2008 IEEE International Conference on Communications*, pp. 447–451, May 2008.
- [16] M. M. M. Freitas, D. D. Souza, B. P. T. Sousa, D. A. Gomes, C. S. Sales, R. M. Rodrigues, and J. C. W. A. Costa, "Utilizando a segunda camada do modo fantasma para aprimoramento de aplicações g.fast," *XXXV Simpósio brasileiro de telecomunicações e processamento de sinais - SBrT2017*, pp. 788–792, Setembro 2017.
- [17] S. Drakulić, D. Statovci, M. Wolkerstorfer, and T. Zemen, "Comparison of interference mitigation techniques for next generation dsl systems," in *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 971–976, June 2015.