

Brenda Penedo Tavares de Sousa

Transmissão em modo fantasma aplicada a sistemas G.fast e XG.fast: Alcançando 24 Gbps com cabos blindados e sem a utilização de *vectoring*

Belém, PA

2018

Brenda Penedo Tavares de Sousa

**Transmissão em modo fantasma aplicada a sistemas
G.fast e XG.fast: Alcançando 24 Gbps com cabos
blindados e sem a utilização de *vectoring***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
para obtenção do título de Bacharel em Enge-
nharia Elétrica. Instituto de Tecnologia. Fa-
culdade de Engenharia Elétrica e Biomédica.
Universidade Federal do Pará.

Universidade Federal do Pará – UFPa

Instituto de Tecnologia – ITEC

Faculdade de Engenharia elétrica e Biomédica – FEEB

Orientador: Prof. Dr. Roberto Menezes Rodrigues

Coorientador: Prof. Dr. Claudomiro de Souza de Sales Junior

Belém, PA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S725t Sousa, Brenda Penedo Tavares de
Transmissão em modo fantasma aplicada a sistemas G.fast e XG.fast: Alcançando 24 Gbps com cabos blindados e sem a utilização de vectoring / Brenda Penedo Tavares de Sousa. - 2018.
60 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Roberto Menezes Rodrigues
Coorientação: Prof. Dr. Claudomiro de Souza de Sales Junior.
1. Modo fantasma. 2. Taxa de transmissão. 3. G.fast. 4. XG.fast. 5. CAT 7. I. Rodrigues, Roberto Menezes, *orient.* II. Título
-

Brenda Penedo Tavares de Sousa

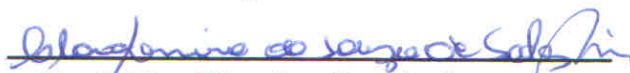
**Transmissão em modo fantasma aplicada a sistemas
G.fast e XG.fast: Alcançando 24 Gbps com cabos
blindados e sem a utilização de *vectoring***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
para obtenção do título de Bacharel em Enge-
nharia Elétrica. Instituto de Tecnologia. Fa-
culdade de Engenharia Elétrica e Biomédica.
Universidade Federal do Pará.

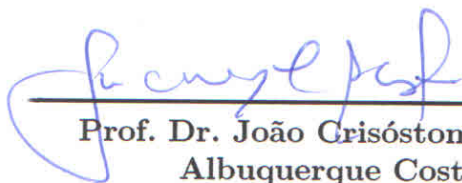
Trabalho aprovado. Belém, PA, 8 de fevereiro de 2018:



Prof. Dr. Roberto Menezes Rodrigues
(Orientador - ITEC/UFPA)



**Prof. Dr. Claudomiro de Souza de
Sales Junior**
(Coorientador - PPGCC/UFPA)



**Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl
Albuquerque Costa**
(Avaliador Interno - PPGEE/UFPA)



Prof. Esp. Wilson Pacheco Ferreira
(Avaliador Interno - ITEC/UFPA)

Belém, PA
2018

Primeiramente, dedico à Deus, por ter me proporcionado viver momentos de grande felicidade e por ter me guiado durante esses cinco, lindos, anos. Aos meus pais e irmã, que me apoiaram em todos os momentos em que esse sonho parecia impossível.

Agradecimentos

Tenho certeza que durante o caminhar desses 5 (cinco) anos, muitas dificuldades foram enfrentadas, porém grandes felicidades foram festejadas da forma mais bonita que eu poderia imaginar. Confesso que chegar até aqui não foi nada fácil, mas quem disse que seria? Se hoje comemoro uma conquista, esta se deve primeiramente a Deus, meu eterno protetor e àqueles que estiveram ao meu lado em todos os momentos e que fizeram de meus sonhos os seus.

Agradeço aos meus pais, Ivan Tarciso Tavares de Sousa e Regina Maria Penedo Tavares de Sousa, aos quais, com certeza, nunca conseguirei retribuir o esforço a mim dispensado. Agradeço o apoio de cada dia, os conselhos, as conversas, o amor, o carinho e todos os momentos em que estiveram comigo e que possibilitaram a realização desse grande sonho, que hoje não é só meu. Vocês são a minha fonte de inspiração e de meu amor!

Agradeço a minha irmã, Beatriz Penedo Tavares de Sousa, pelos momentos em que a sua alegria me fez alegrar e que, com certeza, fizeram a minha caminhada se tornar mais leve, mais feliz e mais inspiradora. Obrigada, maninha!

Agradeço aos meus queridos amigos, que hoje não são apenas amigos, mas sim irmãos, em especial, Letícia Ribeiro, Thais Sena, Larissa Silveira, Tainá Rezende, André Valente, Felipe Brito, Daniel Guerreiro e Marco Aurélio, que me acompanham desde o colégio, pela força nos momentos de fraqueza e por dividirem comigo preciosos momentos que muitas vezes me tiraram da aflição nessa longa caminhada e que ficarão em minha memória eternamente.

Aos meus professores, que durante esses longos anos, compartilharam conhecimentos e me auxiliaram na busca da realização plena de meus ideais profissionais e humanos e, principalmente, aos professores Doutores Roberto Menezes Rodrigues e João Weyl Albuquerque da Costa, que além de cumprir honrosamente com seus deveres institucionais, possibilitando a realização desse sonho, foram grandes amigos e sempre estiveram ao meu lado tentando me passar um pouco de toda a experiência que contemplam.

Agradeço a toda equipe LEA (Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado) que me acolheu desde o início do meu curso, sempre me apoiando e disponibilizando todo o suporte possível para meu crescimento tanto profissional quanto pessoal. Obrigada por toda ética e competência durante esses quase 5 (cinco) anos.

Ao professor Doutor Claudomiro Sales, meu coorientador, que me acompanhou por um longo tempo no laboratório e foi um dos grandes responsáveis de todo o meu sucesso

nessa jornada, me apoiando, elogiando e fazendo de todo o possível para me estimular e fazer com que eu nunca perdesse o foco. Meus sinceros agradecimentos.

Às instituições CNPq, Fapespa e Ericsson pelo suporte financeiro enquanto bolsista e desenvolvimento de todo o projeto.

Obrigada a todos que estiveram comigo durante todos esses anos e que de algum modo contribuíram para a minha conquista: ser Engenheira Eletricista.

*“Se o dinheiro for a sua esperança de independência,
você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste
numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.
(Henry Ford)*

Resumo

Conseguir alcançar altas taxas de transmissão com o maior custo-benefício possível sempre foi o principal objetivo para a transmissão em redes DSL. Dessa forma, o avanço das tecnologias de transmissão sobre cobre proporcionaram sistemas que alcançam taxas de 500 Mbps até 1 Gbps em enlaces de até 200 metros. Porém, o aumento da banda de frequência, que foi o principal fator para a elevação das taxas de transmissão, atrelaram cada vez mais esses sistemas à utilização de técnicas mitigadoras de interferência, pois, sistemas que operam em frequências de 500 MHz, como o XG.fast, são mais suscetíveis a interferências. Apesar disso, neste trabalho é demonstrado que a transmissão do modo fantasma em cabos blindados como o CAT 7, torna possível a transmissão do sinal sem o uso de técnicas de mitigação de ruído, mesmo para sistemas XG.fast. Além disso, os *setups* de transmissão propostos não são apenas conceituais como em outros trabalhos mas podem ser efetivamente implementados na prática. Com este *setup*, os modos diferenciais e fantasmas são transmitidos simultaneamente, obtendo-se uma medida de desempenho mais precisa do sistema. São testados tanto cenários compatíveis com G.fast quanto para XG.fast. Adicionalmente, para ambos os casos, o impacto de agressores externos ao sistema são avaliados. Nos resultados são obtidas taxas de até 24 Gbps para o XG.fast e 12 Gbps para sistemas G.fast, demonstrando, também, a efetividade desses sistemas mesmo para cabos de menor qualidade como o CAT5e, que são os mais usados atualmente.

Palavras-chave: Modo fantasma, Taxa de transmissão, G.fast, XG.fast, CAT 7, CAT 5e, *Vectoring*.

Abstract

Achieving high transmission rates with the lowest possible cost-benefit ratio has always been the primary goal for transmission over DSL networks. Thus, the advancement of transmission technologies over copper have provided systems that reach rates of 500 Mbps up to 1 Gbps in links up to 200 meters. However, the increase in the bandwidth, which was the main factor for the increase in transmission rates, increasingly linked these systems to the use of interference mitigation techniques, since systems operating in 500 MHz frequencies, such as XG.fast, are more susceptible to interference. However, in this work it is demonstrated that the transmission of the phantom mode, in shielded cables like the CAT 7, makes possible the transmission of the signal without the use of techniques of mitigation of noise, even for systems XG.fast. In addition, the proposed transmission setups are not only conceptual as in other works but can be effectively implemented in practice. With this setup, differential modes and phantoms are transmitted simultaneously, resulting in a more accurate performance measurement of the system. In addition to the XG.fast scenarios, G.fast compatible scenarios are also tested. Additionally, for both cases, the impact of external aggressors on the system are evaluated. In the results are obtained rates of up to 24 Gbps for XG.fast and 12 Gbps for G.fast systems. In addition, the effectiveness of these systems is demonstrated even for lower quality cables such as CAT5e, which are the most commonly used today.

Keywords: Phantom mode, Transmission rate, G.fast, XG.fast, CAT 7, CAT 5e, Vectoring.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Evolução das tecnologias e diminuição do comprimento dos cabos. . . .	17
Figura 2 – Cabo de par trançado com seus quatro pares.	24
Figura 3 – Esquemático de transmissão em modo comum entre transmissor e receptor, comparado com um circuito resistivo simples.	26
Figura 4 – Circuito com sinalização em modo diferencial e interferências em modo comum.	27
Figura 5 – Circuito de transmissão para o meio alternativo <i>Split-pair</i>	28
Figura 6 – Circuito de transmissão para o meio alternativo <i>Wire-shield</i>	28
Figura 7 – Circuito esquemático para transmissão simultânea dos canais diferenciais e fantasma em um cabo de quarto pares.	29
Figura 8 – Parâmetros de espalhamento caracterizando um canal de transmissão por meio das porções de tensão V_1 e V_2	30
Figura 9 – Interferência NEXT e FEXT entre dois pares trançados.	31
Figura 10 – Interferência entre os modos de transmissão.	32
Figura 11 – Momento que o <i>crosstalk</i> ultrapassa a magnitude da função de transferência.	32
Figura 12 – Divisão em subcanais (tons) dos dados transmitidos.	33
Figura 13 – Vetor de erro entre um bit ideal e o medido com desvio (em vermelho).	35
Figura 14 – Relação entre os conceitos apresentados.	36
Figura 15 – Passos seguidos para a análise final do modo fantasma.	38
Figura 16 – Um cabo CAT 5e real presente no laboratório. À esquerda um cabo CAT 5e enrolado, e à direita, a ponta deste cabo, evidenciando os pares trançados.	39
Figura 17 – Cabo Cat 5e montado no CST com os parâmetros medidos.	40
Figura 18 – Cabo CAT 7 montado no CST com os parâmetros medidos.	41
Figura 19 – Esquemático criado no CST para simulação.	41
Figura 20 – Configurações vertical e diagonal.	43
Figura 21 – Função de transferência e <i>crosstalks</i> associados ao modo fantasma quando inseridos pelo modo vertical.	44
Figura 22 – Função de transferência e <i>crosstalks</i> associados ao modo fantasma quando inseridos pelo modo diagonal.	44
Figura 23 – Taxa de todos os canais do sistema em modo fantasma com e sem <i>vectoring</i> no CAT 5e.	46
Figura 24 – Função de transferência de um dos canais diferenciais e todos os FEXTs que o atingem na transmissão do modo fantasma no CAT 5e.	47

Figura 25 – Função de transferência de um dos canais fantasmas e todos os FEXTs que o atingem na transmissão do modo fantasma no CAT 5e.	47
Figura 26 – Taxa de todos os canais do sistema em modo fantasma com e sem <i>vectoring</i> no CAT 7.	48
Figura 27 – Função de transferência de um dos canais diferenciais e todos os FEXTs que o atingem na transmissão do modo fantasma em um cabo CAT 7.	48
Figura 28 – Função de transferência de um dos canais fantasmas e todos os FEXTs que o atingem na transmissão do modo fantasma em um cabo CAT 7.	49
Figura 29 – Taxas em cenários além dos 50 metros do CAT 7 com e sem <i>vectoring</i>	49
Figura 30 – Taxa agregada com e sem <i>vectoring</i> para vários comprimentos em um CAT 5e transmitindo o modo fantasma e comparação com o modo diferencial.	50
Figura 31 – Taxa agregada para vários comprimentos em um CAT 7 transmitindo o modo fantasma em comparação com o modo diferencial.	51
Figura 32 – Taxa agregada do modo fantasma nos cabos CAT 5e (com <i>vectoring</i>) e CAT7(com ou sem <i>vectoring</i>) na presença ou ausência de interferências externas.	52
Figura 33 – Taxa agregada de transmissão do cenário XG.fast para vários comprimentos de cabo CAT 5e considerando a implantação do modo fantasma e comparação com o modo diferencial.	54
Figura 34 – Taxa agregada de transmissão do cenário XG.fast para vários comprimentos de cabo CAT 7 considerando a implantação do modo fantasma e comparação com o modo diferencial.	54

Lista de tabelas

Tabela 1 – Síntese dos trabalhos em discussão.	20
Tabela 2 – Limites requeridos de EVM.	36
Tabela 3 – Características coletadas em laboratório dos cabos CAT 5e e CAT 7.	39
Tabela 4 – Configurações dos cenários de transmissão.	40
Tabela 5 – Configurações para cálculo da taxa de transmissão.	42
Tabela 6 – Taxa agregada para cada comprimento dos modos diferenciais e modos fantasma para o CAT 5e.	51
Tabela 7 – Ganho de taxa entre os modos para o aumento de comprimento em um cabo CAT 7.	52
Tabela 8 – Ganhos de taxa proporcionados pelo modo fantasma em relação ao modo diferencial para os comprimentos de 30, 50 e 70 metros, para um cabo CAT 7.	55
Tabela 9 – EVM associados para o cenário G.fast para os dois cabos utilizados.	55
Tabela 10 – EVM associados para o cenário XG.fast para os dois cabos utilizados.	55
Tabela 11 – Comparação do EVM médio entre os canais diferenciais e fantasmas para o cenário G.fast.	56
Tabela 12 – Comparação do EVM médio entre os canais diferenciais e fantasmas para o cenário XG.fast.	56

Lista de abreviaturas e siglas

ADSL	Assymmetric Digital Subscriber Line
BALUN	Balanced/unbalanced
BW	Largura de banda
CST	Computer Simulation Technology
DMT	Discrete Multitone Modulation
DSL	Tecnologia de linha assinante digital
EVM	Magnitude do vetor de erro
FEXT	Far end Crosstalk
FTD	Função de transferência direta
FTP	Foiled Twisted Pair
FTTH	Fiber To The Home
LAN	Local Area Network
MC	Modo Comum
MD	Modo Diferencial
MF	Modo Fantasma
NEXT	Near end Crosstalk
PE	Polietileno
PVC	Cloreto de Polivinila
QAM	Quadrature amplitude modulation
SNR	Relação sinal-ruído
SP	Split-pair
SSTP	Screened Shielded Twisted Pair
VDSL	Very-High-Bit-Rate Digital Subscriber Line
WS	Wire-shield

Lista de símbolos

Γ	Letra grega maiúscula Gama
Λ	Letra grega maiúscula Lambda
ζ	Letra grega minúscula Zeta
σ	Letra grega minúscula Sigma
δ	Letra grega minúscula Delta
β	Letra grega minúscula Beta
ρ	Letra grega minúscula Rho

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contexto	17
1.2	Trabalhos relacionados	18
1.3	Motivação	20
1.4	Justificativa	21
1.5	Objetivos	22
1.6	Organização do trabalho	22
2	PARÂMETROS DE TRANSMISSÃO	24
2.1	Meio de transmissão	24
2.1.1	Par trançado	24
2.1.2	Configurações dos cabos de pares trançados	25
2.2	Modos de propagação no canal de transmissão	25
2.2.1	Modo comum	25
2.2.2	Modo diferencial	26
2.2.3	Modo <i>split-pair</i> e <i>wire-shield</i>	27
2.2.4	Modo Fantasma de primeira camada	29
2.3	Descrição do canal de transmissão	30
2.3.1	Função de transferência e parâmetros de espalhamento	30
2.3.2	Diafonia ou <i>Crosstalk</i>	31
2.3.3	Técnica de mitigação de interferência - <i>Vectoring</i>	32
2.3.4	Métricas de desempenho	33
2.3.4.1	Cálculo da taxa de transmissão	33
2.3.4.2	Magnitude do vetor de erro: EVM	35
2.4	Contexto dos conceitos definidos	36
3	METODOLOGIA	38
3.1	Desenvolvimento dos cenários de simulação	39
3.1.1	Coleta das características dos cabos simulados	39
3.1.2	Configurações de simulação no CST Cable Studio	40
3.1.3	Simulador de desempenho do canal de transmissão	42
4	RESULTADOS	43
4.1	Influência da taxa de trançamento dos pares na capacidade de transmissão do sistema.	43
4.2	Cenário de simulação: G.fast	45

4.2.1	Influência da utilização de <i>vectoring</i> e blindagem na taxa de transmissão, funções de transferência e FEXTs do modo fantasma	45
4.2.2	Avaliação do comportamento da taxa agregada de transmissão a partir do aumento do comprimento do cabo dentro da faixa G.fast	50
4.2.3	Análise da susceptibilidade de interferentes externos na taxa agregada de transmissão do modo fantasma	52
4.3	Cenário de simulação: XG.fast	53
4.4	EVM para os cenários G.fast e XG.fast	55
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
6	ARTIGOS PUBLICADOS	59
	REFERÊNCIAS	60

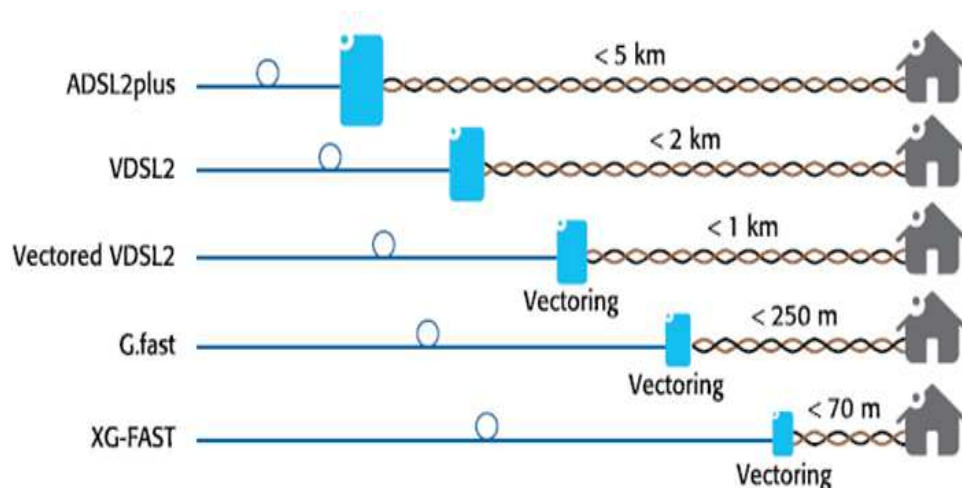
1 Introdução

1.1 Contexto

Décadas atrás, as redes de cobre só conseguiam suportar taxas de alguns kilobits por segundo, enquanto que hoje, através da tecnologia de linha assinante digital (DSL), consegue-se alcançar taxas superiores a 100 Megabits por segundo. 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 *Fiber To The Home* (FTTH) (COOMANS et al., 2015).

Desde as primeiras tecnologias de transmissão de dados até as mais atuais, o aumento da taxa de dados é alcançado a partir do encurtamento dos cabos e aumento da faixa de frequência, de acordo com a Figura 1. A tecnologia atual de acesso por cobre é o G.fast e a geração seguinte é conhecida por XG.fast. Como todas as tecnologias anteriores, houve a expansão da largura de banda de frequência e diminuição do comprimento do cabo (COOMANS et al., 2015). 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 (COOMANS et al., 2014).

Figura 1 – Evolução das tecnologias e diminuição do comprimento dos cabos.



Fonte: Modificada de (MAES; NUZMAN, 2015).

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 (DRAKULIĆ et al., 2015).

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 (GOLDEN HERVÉ DEDIEU, 2007). Entretanto, a limitação de pares trançados de um cabo não possibilitava o aumento da taxa agregada aos usuários. Então, meios alternativos de transmissão, como o *wire-shield* e *split-pair*, foram desenvolvidos visando suprir as demandas de transmissão (FOUBERT et al., 2012), (JAKOVLJEVIC et al., 2009a), (CIOFFI et al., 2006).

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 (JAKOVLJEVIC et al., 2009a). Por outro lado, o *split-pair* (SP) 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 (CIOFFI et al., 2006). 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 (FOUBERT et al., 2012). Dessa forma, esses meios alternativos de transmissão combinados com o aumento da faixa de frequência e diminuição do comprimento do cabo proporcionam taxas em Gbps para o usuário final.

1.2 Trabalhos relacionados

Apesar de ser uma técnica já explorada em alguns trabalhos, a transmissão em modo fantasma ainda não é tão usual como o modo diferencial, no qual cada canal é transmitido em um único par. Dentre os trabalhos que abordam o modo fantasma se destacam os trabalhos de Foubert et al. (2012) no qual eles fazem a modelagem do canal fantasma, discutindo sobre os automodos de um cabo quad. Além de ser um trabalho que segue outra vertente da transmissão já que não utiliza pares trançados, o trabalho agrega resultados para um modelo que utiliza cabo quad e que agrega à transmissão somente um canal de modo fantasma, considerando bandas de frequência muito baixas que chegam somente até 12 MHz, enquanto o sistema G.fast engloba uma faixa de frequência até 212 MHz. Além destes fatores, nesse trabalho é feita mais uma análise teórica do modo de transmissão tendo uma preocupação maior na modelagem do canal fantasma ao invés da transmissão em modo fantasma, de fato.

Já em Ikeda (2015), apesar de realizar uma análise acerca dos efeitos da transmissão em modo fantasma e modo diferencial, considerando a utilização do *vectoring*, foram apresentados resultados a partir das simulações realizadas em cabos de baixa qualidade (CAT 5e), considerando comprimentos de 50 metros e faixa de frequência até 100 MHz, de forma que, por ser uma faixa de frequência reduzida em relação aos padrões G.fast, que consideram enlaces de até 250 metros, o comprimento do cabo utilizado é muito pequeno para a análise. Embora neste trabalho tenham sido feitas simulações de transmissões em modo fantasma, o *setup* utilizado nessa simulação não pode ser considerado realístico, já que para transmissões reais a construção desse *setup* não é viável, pois para a realização das simulações de todos os modos foi necessário ajustar o *setup*, em que dentro de um cabo se transmitia em modo diferencial por um par, dois outros pares transmitiam em modo fantasma e restava um sem nenhuma transmissão.

Em Gomes (2012) aprofunda-se o estudo feito em Ikeda (2015), ao analisar o comprimento do canal fantasma e como as interferências são mitigadas. Diferente das simulações realizadas em Ikeda (2015), são apresentadas medições de função de transferência e *Crosstalk* tanto para as transmissões em modo diferencial como fantasma, para comprimentos de até 50 metros e faixas de frequência de 300 MHz, extrapolando o padrão G.fast. Apesar de propor um *setup* de transmissão para os modos diferencial e fantasma, essa transmissão não ocorre de forma simultânea, de forma que não se tinha um cenário em que todos os modos propagavam ao mesmo tempo. Além dessas considerações, uma das conclusões do trabalho foi a dependência do modo fantasma em relação a utilização de técnicas para mitigação do *Crosstalk* devido o modo fantasma elevar o nível de ruído do sistema.

Dentro dos padrões G.fast, o trabalho de Lafata (2015) estima o desempenho dos canais fantasma para cenários com e sem a utilização de técnicas de mitigação de FEXT. Os resultados foram obtidos a partir de medições realizadas em cabos multi-quad 26 AWG, para comprimento de 100 metros e faixa de frequência de 100 a 212 MHz, modelados a partir da atenuação e FEXTs entre os pares com e sem a presença dos canais fantasmas formados dentro do cabo quad. Portanto, o trabalho é mais focado na comparação de cenários do modo fantasma com e sem a utilização de mitigação do FEXT, afirmando que essa transmissão agrega mais quando o FEXT é totalmente eliminado.

Nos padrões mais atuais de transmissão, o trabalho de Coomans et al. (2014) discorre sobre a transmissão em modo fantasma com a utilização de *bonding* na mais nova tecnologia de acesso, XG.fast. A proposta é que essa tecnologia irá fornecer taxas de até 10 Gbps em comprimentos de até 70 metros. A partir disso, os resultados são obtidos por meio de medições em cabos de baixa qualidade, CAT 5e, para comprimentos de 30, 40 e 50 metros e em outro cenário com cabos telefônicos de 0,6 mm de diâmetro em comprimentos, também no padrão XG.fast, de 30, 60 e 70 metros. Analisando as curvas de atenuação

e as taxas alcançadas para todos os cenários adotados, conclui-se que a transmissão em modo fantasma dependem da qualidade do cabo e comprimento, enfatizando, como nos outros trabalhos, que é um meio alternativo que necessita de uma técnica de mitigação de *crosstalk* para conseguir disponibilizar as altas taxas prometidas.

Tabela 1 – Síntese dos trabalhos em discussão.

Autores, Ano	Contribuições
Foubert, 2012	Modelagem do canal fantasma; Cenários com frequências somente até 12 MHz;
Ikeda, 2015	Análise da transmissão em MF e MD considerando a utilização de vectoring; Comprimentos de 50 m e faixa de frequência até 100 MHz;
Gomes, 2012	Análise do MF considerando vectoring; Cabos de 50 m e frequência de até 300 MHz; Propõe setup de transmissão não simultâneo;
LAFATA, 2015	Desempenho do MF com e sem a utilização de vectoring; Comprimentos de 100 m e frequências de até 212 MHz;
COOMANS, 2014	Medições do MF em frequências até 500 MHz e comprimentos de 30 a 70 metros;

Fonte: Elaborada pela autora.

Dessa forma, como mostrado na Tabela 1, esses trabalhos indicam que o modo de transmissão fantasma só poderia ser usado com vectoring, sem considerar características do cabo que podem propiciar versões mais simples do sistema sem uso de vectoring. Além de que, o modo de transmissão não é comparado com outros meios alternativos que afirmasse que a transmissão em modo fantasma é de fato uma boa opção para a agregação de taxa em transmissão de sinais. Já, neste trabalho é demonstrado que em cabos com blindagem como CAT7, a taxa agregada com fantasma pode chegar a 24 Gbps sem o uso de técnicas de cancelamento de *crosstalk*, mesmo sob a influência de ruídos externos.

1.3 Motivação

A crescente demanda de usuários conectados à internet, faz com que esse serviço seja cada vez mais rigoroso e demande uma transferência de dados muito mais eficiente. Dessa forma, sendo a internet um componente essencial para o desenvolvimento das sociedades modernas em que cada vez mais serviços são agregados, há a necessidade de taxas de dados crescentes com enlaces de última milha com taxas de centenas de Mbps, confiáveis e robustos a ruídos.

Portanto, o principal desafio enfrentado desde a introdução das redes DSL mais simples nos anos 90 é o aumento das taxas de transmissão na rede, que é o fator mais importante para o seu desenvolvimento. Embora a sociedade esteja caminhando na direção dos cabos de fibra ótica, coaxiais e redes *wireless* no lugar das redes DSL, levar em consideração que essas novas redes precisam ser implantadas por completo em substituição de toda a rede DSL já implantada, ainda é inviável tanto logisticamente como economicamente. Dessa forma, a infraestrutura já existente das redes de telefonia tornam o seu desenvolvimento economicamente superior comparado às fibras, coaxiais e *wireless*, já que apresenta custos mais atrativos que enlaces dessas tecnologias mais atuais.

Embora a transmissão em modo diferencial tenha alcançado níveis de transmissão aceitáveis, o modo fantasma é uma alternativa para agregar mais taxa à rede, apenas com a adição de canais extras à um cabo com o mesmo número de pares, ou seja, sem alterar a infraestrutura implantada. Então, investir na transmissão em modo fantasma como um meio para a continuidade da utilização das redes DSL é, de fato, uma alternativa para essas estruturas de telefonia continuarem a atender a demanda dos usuários, já que, esse modo de transmissão consegue agregar altas taxa à rede.

Mas, o benefício do aumento do número de canais vem acompanhado com o aumento do nível de *crosstalk* do sistema e tornando o sistema mais suscetível a interferências externas. No entanto, contradizendo trabalhos anteriores, neste trabalho é demonstrado que usando técnicas de mitigação de *crosstalk* ou cabos blindados de melhor qualidade, o modo fantasma é uma alternativa bastante promissora para atender as crescentes demandas por altas taxas, podendo alcançar taxas de até 24 Gbps.

1.4 Justificativa

Considerando que a literatura já apresenta diversos métodos e cenários de utilização do modo fantasma, novas análises ainda são possíveis para o desenvolvimento e destaque desse meio alternativo de transmissão.

Portanto, apesar desse sistema já possuir diversos estudos e implementações, ele sempre está associado com técnicas de mitigação de interferência, limitando sua utilização para cenários que não utilizam *vectoring*. Dessa forma, o trabalho proposto demonstra que a aplicação do modo fantasma usando cabos blindados, como CAT 7, é possível obter taxas de até 24 Gbps sem o uso de técnicas de mitigação de interferência.

Além disso, é feita a avaliação da transmissão em modo fantasma com a presença de sistemas agressores, que são sistemas como o *Ethernet* que podem interferir com os sistemas XG.fast e G.fast. Essa análise é, de fato, importante considerando que os trabalhos já existentes não se preocupam com esses cenários e não fazem uma análise de qual configuração é mais adequada para cada cenário de transmissão na presença de

agressores. Com essa análise é demonstrado que o sistema fantasma é viável sob a influência de interferências externas, além de indicar qual a melhor configuração do sistema nessas condições.

Destaca-se neste trabalho, diferentemente de trabalhos anteriores que eram utilizados *setups* conceituais em que não era possível a transmissão de todos os modos simultaneamente, a proposta de um *setup* realístico que pode ser efetivamente implementado na prática. Com esse cenário, em um cabo com quatro pares por exemplo, todos os 6 canais podem ser simultaneamente transmitidos - os 4 diferenciais e os 2 canais fantasmas.

1.5 Objetivos

Neste trabalho é realizada a análise da transmissão em modo fantasma, avaliando o quanto o modo fantasma pode agregar de taxa em uma transmissão nas redes DSL. Tendo como objetivo principal realizar a análise do comportamento do modo fantasma usando o *setup* proposto operando para os sistemas G.fast e XG.fast.

Portanto, além dessas avaliações visando demonstrar quais os cenários o modo fantasma apresenta um melhor desempenho, os objetivos específicos desse trabalho estão listados a seguir:

- Mostrar a implementação do modo fantasma no software de simulação CST *Cable Studio*;
- Mostrar como esse modo de transmissão se comporta nas tecnologias de transmissão G.fast e XG.fast, que são as duas mais atuais, considerando suas faixas de frequência e comprimentos de cabos. A análise de desempenho será realizada através da taxa agregada e do EVM;
- Demonstrar que o modo de transmissão apesar de ser fortemente influenciado pelas interferências do tipo *crosstalk* e também interferências de sistemas interferentes próximos, que pode ser desenvolvido mesmo sem a utilização de técnicas de mitigação de interferência, com utilização de cabos blindados;
- Demonstrar através da taxa agregada do sistema que mesmo nos cenários de frequências maiores e na presença de agressores, os cabos que mesmo de baixa qualidade, como o CAT 5e, ainda é possível atingir taxas de até 24 Gbps;

1.6 Organização do trabalho

O trabalho está organizado em cinco capítulos que explicam o modo de transmissão proposto como listado abaixo:

-
- O capítulo 2 apresenta uma breve explicação sobre os modos de transmissão, descrevendo o funcionamento de cada modo, algumas definições do meio de transmissão (par trançado) e conceitos importantes dentro do contexto de transmissão.
 - O capítulo 3 aborda os procedimentos utilizados para determinar a capacidade de transmissão dos sistemas e mostrará as configurações utilizadas nas simulações e cálculo da taxa de transmissão.
 - O capítulo 4 apresenta os resultados e análises deste trabalho.
 - Por fim, o capítulo 5 mostra a conclusão de todo o trabalho destacando as principais contribuições que esse modo de transmissão, nos cenários considerados, alcançou.

2 Parâmetros de transmissão

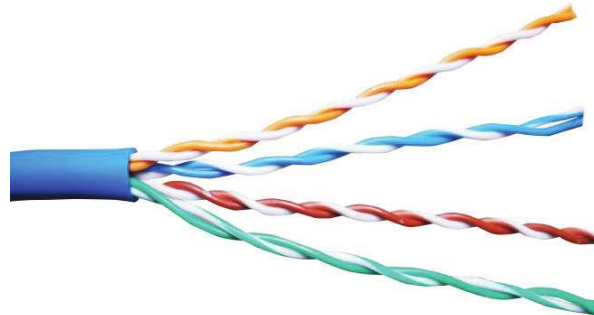
2.1 Meio de transmissão

2.1.1 Par trançado

Os canais de transmissão podem ser classificados em meios guiados e não guiados, onde, guiados são os condutores metálicos ou fibra ótica, e os não-guiados são os meios que permitem o tráfego no formato de ondas eletromagnéticas ou microondas (TANENBAUM, 2011). Os cabos de pares trançados estão classificados como meios guiados já que são condutores metálicos.

O par trançado é uma tecnologia desenvolvida e amplamente utilizada em linhas telefônicas, comunicação entre computadores em uma Local Area Network (LAN) e demais aplicações. Sua constituição é basicamente dois fios de cobre, material usado para minimizar a atenuação do sinal, revestido por um isolante e trançados de tal forma que conseguem cancelar a interferência eletromagnética quando propaga um sinal, que geralmente é usado para transmissão diferencial.

Figura 2 – Cabo de par trançado com seus quatro pares.



Fonte: (IKEDA, 2015).

Dentro de um cabo de pares trançados geralmente encontram-se 4 pares com cor e trançamentos diferentes, como mostrado na Figura 2. Essa diferenciação nos trançados são favoráveis à transmissão, pois é devido a essa diferença que há uma redução ao mínimo do nível de *crossstalk* entre esses pares sem a necessidade de nenhum processamento, somente com a constituição física do próprio cabo (TANENBAUM, 2011).

Além da vantagem de cancelamento das interferências eletromagnéticas, esse tipo de cabo é extremamente utilizado pela facilidade no manuseio, instalação e baixo custo de fabricação, considerando os parâmetros de desempenho.

2.1.2 Configurações dos cabos de pares trançados

Além da constituição básica do par trançado, algumas características que eles possuem dependem da categoria do cabo. Já foram desenvolvidas sete categorias de cabos, ou seja, a tecnologia de cabos evoluiu de acordo com a necessidade de transmissão do momento, em que desde as primeiras desenvolvidas (CAT 1) até as mais atuais (CAT 7) vem sofrendo modificações para melhoria da transmissão, sendo que algumas delas já entraram em desuso.

As duas primeiras categorias não são mais utilizadas e foram substituídas pela terceira categoria, que foi desenvolvida especialmente para o uso em redes e que se diferenciou, basicamente, por ter uma definição de pelo menos 24 tranças por metro. O CAT 4 apesar de ser uma tecnologia posterior a categoria 3, também não é mais utilizada.

No mercado atual o tipo de cabo mais usado é o CAT 5e, que é uma classe dentro da categoria 5 que traz aperfeiçoamentos em relação as interferências e atenuação do sinal. Competindo com essa categoria estão os de categoria 6 e 7, os quais já possuem características melhores para a redução do *crosstalk* e interferências externas. Essas últimas categorias apresentam meios mais eficazes para a redução das interferências dentro do cabo e externas a eles.

O CAT 6 foi desenvolvido com um separador, que tem como objetivo distanciar os pares trançados para a redução do *crosstalk*. Também estão presentes nesses cabos mais recentes a blindagem, podendo ser em cada par, chamada SSTP (*Screened Shielded Twisted Pair*), e externa aos pares, chamada FTP (*Foiled Twisted Pair*), na qual só protege o sinal das interferências externas, não resolvendo o problema do *crosstalk* (TANENBAUM, 2011).

Dessa forma, a utilização de uma categoria ou outra depende de cada sistema desenvolvido, pois apesar dos cabos mais robustos serem mais eficientes e entregarem um sinal de melhor qualidade, o custo pode ser proibitivo para sistemas mais modestos, sendo nesse caso mais indicado o cabo CAT 5e, por exemplo, que apesar do menor desempenho pode ainda ter taxas aceitáveis para muitas aplicações.

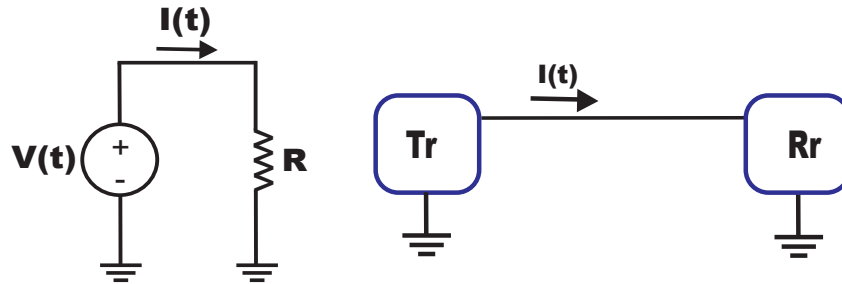
2.2 Modos de propagação no canal de transmissão

2.2.1 Modo comum

O modo comum é o meio mais simples de transmissão de sinais elétricos em redes DSL. A transmissão via modo comum pode ser entendida a partir de um circuito elétrico básico, em que a fonte de tensão é o transmissor e o resistor faz o papel de receptor do sinal emitido, como mostrado na Figura 3. A fonte de tensão que gera uma tensão $V(t)$ faz trafegar um sinal $i(t)$ pelo circuito até o resistor R , com a propagação do sinal em modo

comum entre o transmissor (Tx) e o receptor (Rx) (GOMES, 2012).

Figura 3 – Esquemático de transmissão em modo comum entre transmissor e receptor, comparado com um circuito resistivo simples.



Fonte: Modificada de (GOMES, 2012).

Do transmissor, o sinal é gerado em uma só polaridade e transmitido até o receptor, o qual recebe o sinal gerado mais os ruídos agregados a este sinal, motivo pelo qual essa transmissão não proporciona muitas vantagens, já que os ruídos não podem ser cancelados naturalmente como em outros modos que serão vistos a seguir. O sinal recebido pelo usuário pode ser representado pela Equação 2.1,

$$V_c = V_{gerada} + interf \quad (2.1)$$

onde V_c é a tensão do sinal em modo comum recebido pelo usuário, V_{gerada} é a tensão gerada pelo transmissor e $interf$ são as interferências em modo comum que afetam a qualidade do sinal.

A Equação 2.1 representa o sinal recebido de um só canal de transmissão em modo comum, porém para um cabo trançado comum, o qual possui 4 pares de fio de cobre trançados, resulta em 8 canais para transmissão. O sinal recebido no lado do receptor é a soma de todos os sinais que trafegam pelos pares trançados, como representado na Equação 2.2,

$$V_c = V_{gerada1} + V_{gerada2} + \dots + V_{geradaN} + interf \quad (2.2)$$

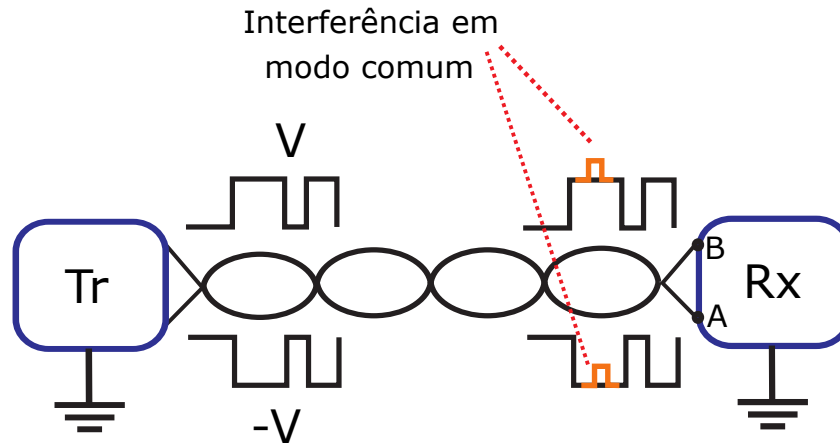
em que $V_{geradaN}$ são os sinais transmitidos de até N canais trafegando em modo comum no cabo.

2.2.2 Modo diferencial

Nas redes de transmissão DSL, o modo diferencial traz como vantagem o cancelamento das interferências, em certa medida, pela forma como o sinal final é obtido. A transmissão em modo diferencial, diferentemente da em comum, necessita de dois fios de cobre para transmitir o sinal, ou seja, um canal de transmissão é composto por um par de

fos de cobre trançados. Como mostra a Figura 4, o sinal recebido no lado do receptor é obtido a partir da diferença entre os dois sinais simétricos gerados pelo transmissor.

Figura 4 – Circuito com sinalização em modo diferencial e interferências em modo comum.



Fonte: Modificada de (GOMES, 2012).

Como nos demais modos de transmissão, as interferências também afetam o sinal quando transmitido em modo diferencial, porém essas interferências agem nos sinais simétricos, gerados no transmissor, de forma comum, ou seja, apesar da polaridade dos sinais transmitidos serem diferentes as interferências agem nos sinais com a mesma polaridade, portanto quando os sinais chegam no lado do receptor as interferências são canceladas de acordo a Equação 2.3,

$$V_d = V_g + interf - (-V_g + interf) = 2V_g \quad (2.3)$$

onde V_d é a tensão em modo diferencial e $interf$ são as interferências que se propagam em modo comum.

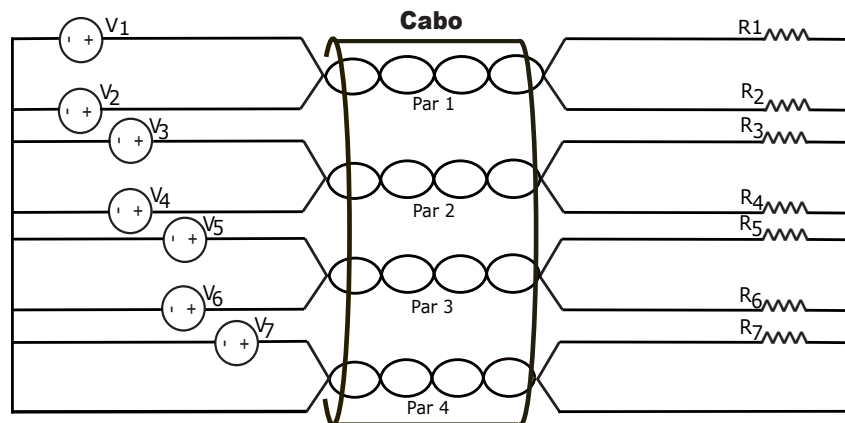
Considerando a Equação 2.3 como sendo a tensão recebida pelo usuário de um canal de transmissão em diferencial, é possível observar que esse tipo de transmissão, considerando cenários ideais, é totalmente imune às agressões das interferências, de modo que a qualidade do sinal entregue é superior à uma transmissão em modo comum (GOMES, 2012).

2.2.3 Modo *split-pair* e *wire-shield*

Embora os sistemas de transmissão DSL ainda explorem somente o modo diferencial de transmissão de sinais, outros modos alternativos já foram desenvolvidos para serem utilizados nas redes de acesso de cobre. Os dois modos de transmissão em questão apresentam funcionamentos que seguem o mesmo padrão de transmissão, tendo como diferença básica a referência utilizada para retorno do sinal. O *split-pair*, como mostrado

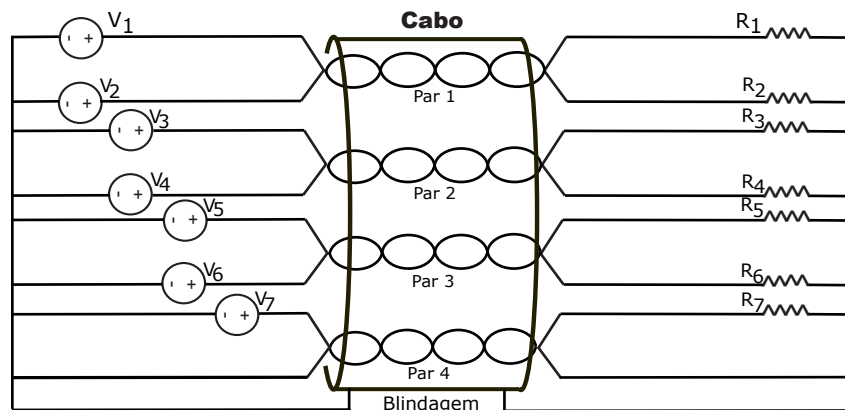
na Figura 5, aplicam as fontes de tensão entre cada fio e a referência, que neste modo é um dos fios do cabo. Já no modo *wire-shield*, como mostrado na Figura 6, a forma de excitação do sinal é a mesma do *split-pair*, mas com a diferença que a referência utilizada é a blindagem do cabo (JAKOVLJEVIC et al., 2009b). Ou seja, nesses modos de transmissão cada fio de cobre é tratado como um canal individual para transmissão (com exceção do fio de referência no caso do *split-pair*), diferentemente da transmissão em diferencial que utiliza um par de fios de cobre como canal para transmissão.

Figura 5 – Circuito de transmissão para o meio alternativo *Split-pair*.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 6 – Circuito de transmissão para o meio alternativo *Wire-shield*.



Fonte: Elaborada pela autora.

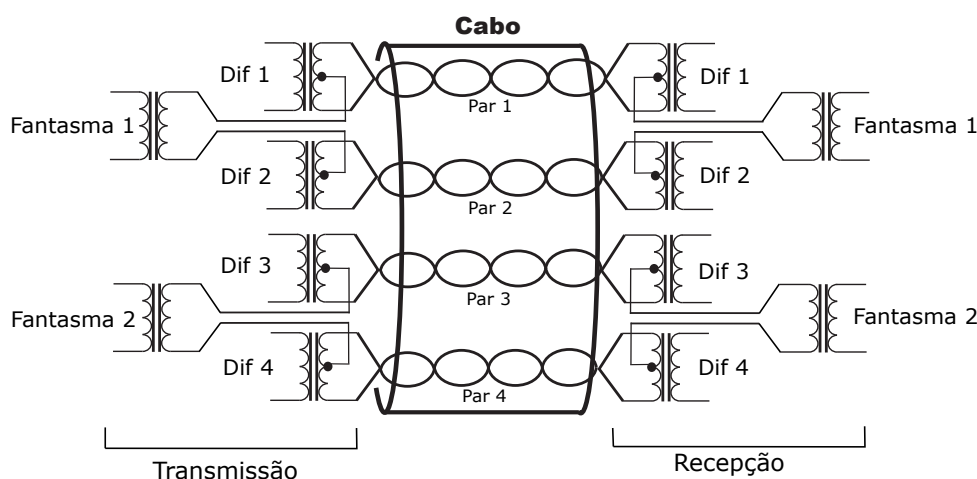
Esses modos apesar de conseguirem aumentar a quantidade de canais para a transmissão dos sinais, apresentam diversos problemas relacionados à qualidade do sinal e imunidade contra interferências quando trabalhados em altas frequências. Como a propagação acontece em modo comum, os problemas resolvidos na transmissão diferencial, de cancelamento de interferências, por exemplo, não ocorrem para esses dois modos de transmissão. Além disso, esses modos são bastante sensíveis a interferências externas, necessitando de cabos blindados de qualidade para poder operar de forma adequada.

2.2.4 Modo Fantasma de primeira camada

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 modo fantasma a partir de N pares trançados.

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 como na Figura 7. 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 de alta frequência acoplados aos modos diferenciais, chamados baluns.

Figura 7 – Circuito esquemático para transmissão simultânea dos canais diferenciais e fantasma em um cabo de quarto pares.



Fonte: Modificada de (GOMES, 2012).

O modo fantasma traz como vantagem o acréscimo de mais canais para transmissão de sinais juntamente com a transmissão em diferencial já existente nas redes DSL. Como esse sinal fantasma é enviado e recebido pelo tap central do transformador de alta frequência os sinais em modo comum e diferencial não se misturam como demonstrado por (GOMES, 2012). Portanto, a utilização do modo fantasma não afeta a transmissão já existente, resultando em uma taxa de dados maior para o usuário.

Porém, esta consideração só é completamente válida para casos ideais em que os transformadores e cabos utilizados estejam perfeitamente balanceados. Portanto em transmissões reais, embora o modo fantasma agregue taxa ao sinal entregue ao usuário, interferências externas, convenção de modo e *crosstalk* que podem afetar mais intensamente o sistema com modo fantasma que sistema apenas com transmissão diferencial por par.

2.3 Descrição do canal de transmissão

2.3.1 Função de transferência e parâmetros de espalhamento

Define-se função de transferência como sendo uma relação entre a tensão de saída, $V_2(f)$, e a tensão de entrada, $V_1(f)$, em um sistema de transmissão, como na Equação 2.4.

$$H(f) = V_2(f)/V_1(f) \quad (2.4)$$

Considerando somente a magnitude da função de transferência, pode-se definir o ganho de tensão do sistema expresso em decibel pela Equação 2.5.

$$G_{V(dB)}(f) = 20 \log |H(f)| \quad (2.5)$$

Além dessas definições básicas, a função de transferência pode ser definida a partir dos parâmetros de espalhamento do sistema envolvido. Os parâmetros de espalhamento são mais utilizados para caracterizar transmissões de altas frequências e são considerados os mais importantes para relacionar entradas e saídas em um sistema. Os parâmetros de espalhamento, também chamados parâmetros S, se baseiam na propagação de ondas para descrever o canal.

Em consequência disso, a tensão do sinal pode ser obtida de três maneiras: através da onda incidente, da porção refletida e da parte restante que é transmitida. O parâmetro S, então, é uma relação dessas três tensões que surgem a partir da onda propagada, podendo ser nomeados de S_{11} , S_{21} , S_{12} e S_{22} de acordo com quais porções da tensão estão relacionando, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Parâmetros de espalhamento caracterizando um canal de transmissão por meio das porções de tensão V_1 e V_2



Fonte: Elaborada pela autora.

O parâmetro que tem relação com a função de transferência é o S_{21} uma vez que ele também relaciona tensões na saída e entrada da transmissão. O S_{21} é definido como a tensão transmitida na saída, ou seja, a tensão que deixa a saída, dividida pela tensão incidente na entrada.

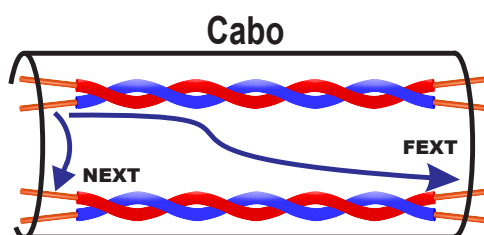
Esse parâmetro não é exatamente a função de transferência, porém pode ser uma boa aproximação e é bastante eficaz para caracterizar os sinais trafegando no canal.

2.3.2 Diafonia ou *Crosstalk*

Os cabos de telefone utilizados nas redes DSL possuem diversos pares trançados próximos uns dos outros e portanto, os sinais elétricos que trafegam através deles geram um pequeno acoplamento eletromagnético entre os pares, induzindo sinais elétricos nos fios próximos. Esse acoplamento eletromagnético é a interferência conhecida como *crosstalk* (STARR JOHN M. CIOFFI, 1999).

O *crosstalk*, ou também diafonia, pode ser entendido como sendo uma interferência que age de duas formas dentro do cabo, sendo chamadas de NEXT (do inglês, *near-end crosstalk*) e FEXT (do inglês, *far-end crosstalk*). Como mostrado na Figura 9, o NEXT é a interferência vista pelo receptor alocado no mesmo lado que o sinal foi transmitido, já o FEXT é quando essa interferência é detectada por um receptor do outro lado de onde o sinal foi transmitido. Segundo Gomes (2012) o FEXT é um dos tipos de *crosstalk* que causa mais problemas a transmissão hoje em dia, pois a interferência do tipo NEXT já é evitada pela duplicação de divisão de frequência em *upstream* e *downstream* (GUENACH et al., 2011). Portanto, os estudos são todos voltados ao FEXT já que em uma transmissão ele pode degradar a maior parte do sinal transmitido.

Figura 9 – Interferência NEXT e FEXT entre dois pares trançados.

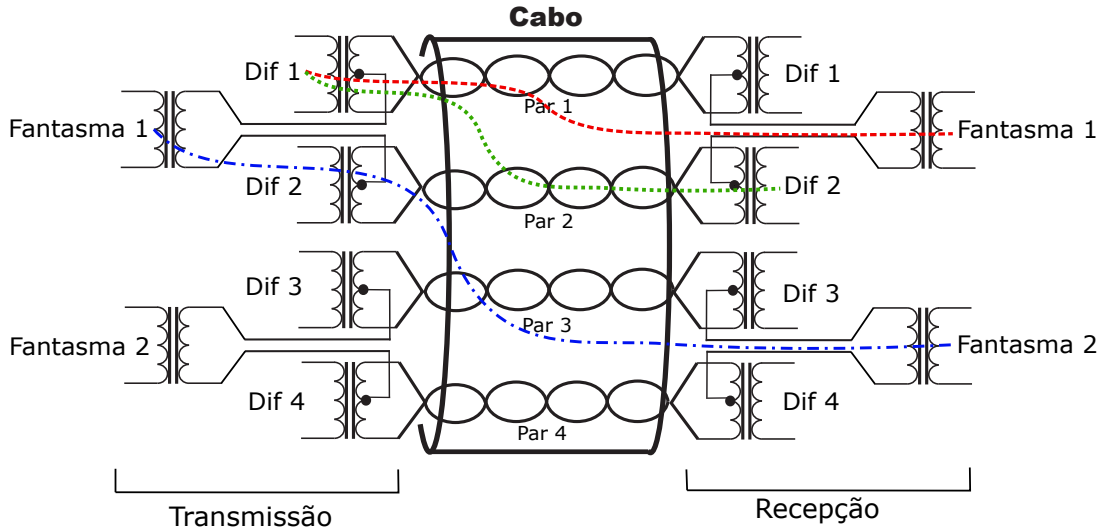


Fonte: Modificada de (GOMES, 2012).

Apesar da teoria indicar que não há vazamento de potência entre o modo fantasma e o modo diferencial, 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. Portanto, considerando uma transmissão que faz a utilização do modo fantasma simultaneamente com o modo diferencial existem *crosstalks* do tipo FEXT entre os sinais diferenciais, entre os sinais fantasma e entre os dois modos. A Figura 10 mostra o FEXT do modo fantasma no modo diferencial, linha tracejada vermelha, o FEXT entre os modos fantasmas, linha ponto tracejada azul, e o FEXT entre os diferenciais, linha pontilhada verde.

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 modo fantasma e o aumento do número de canais dentro do mesmo conjunto de pares, considerando que quanto maior for a banda de transmissão mais intenso é o *crosstalk*, sendo

Figura 10 – Interferência entre os modos de transmissão.



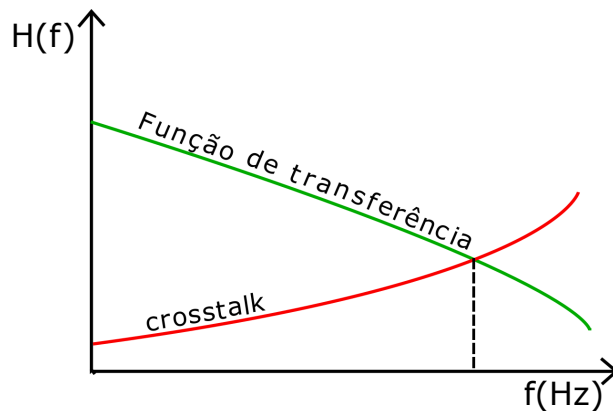
Fonte: Modificada de (GOMES, 2012).

assim, um limitador para o aumento dessas bandas de transmissão e conseqüentemente aumento das taxas de transmissão.

2.3.3 Técnica de mitigação de interferência - *Vectoring*

Desde o início dos sistemas de transmissão de dados, o maior problema enfrentado foi em relação a qualidade do sinal entregue. Nas tecnologias mais antigas a taxa de transmissão e a velocidade que chegavam na casa do cliente eram muito baixas. Então, como o objetivo era alcançar maiores taxas ao sistema a medida que as tecnologias fossem evoluindo, essa taxa foi sendo aumentada a partir do aumento da largura de banda e diminuição do comprimento dos cabos, mostrado na Figura 1.

Figura 11 – Momento que o *crosstalk* ultrapassa a magnitude da função de transferência.



Fonte: Elaborada pela autora.

Porém, o *crosstalk* entre as linhas se tornava o fator de degradação preponderante cada vez que a banda de frequência aumentava. Com isso, técnicas de pré-codificação,

chamadas de *vectoring*, se tornaram essenciais para que o sistema alcançasse maiores taxas e evitasse que o *crosstalk* ficasse acima da função de transferência, como mostrado na Figura 11. Nesse caso, a transmissão só é efetiva até esse ponto, reduzindo assim a banda efetiva de transmissão e conseqüentemente a taxa. Então essa técnica de pré-codificação vem com o objetivo de mitigar as interferências, do tipo *crosstalk*, e viabilizar essa transmissão mesmo em altas frequências.

2.3.4 Métricas de desempenho

2.3.4.1 Cálculo da taxa de transmissão

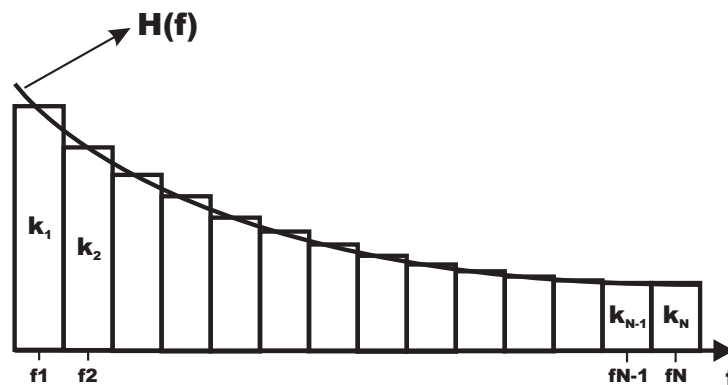
Do mesmo modo em que é definido em Gomes (2012), a taxa de transmissão é uma forma de medir o desempenho de um canal de transmissão. O cálculo da taxa de transmissão, pode ser realizado através da fórmula de *Shannon* definida na Equação 2.6,

$$C = BW \cdot \log_2 \left(1 + \frac{|H|^2 \cdot P_t}{\sigma^2} \right) \quad (2.6)$$

em que a capacidade do canal de transmissão (C) é uma relação entre a largura de banda (BW), a caracterização do canal de transmissão (H), que leva em consideração as funções de transferência, a potência do transmissor (P_t) e as interferências que afetam o canal de transmissão (σ^2).

Dessa forma, a equação de *Shannon* determina a quantidade de bits que pode ser transmitido usando um canal em uma banda de frequência e com uma determinada relação sinal-ruído (SNR). Essa SRN nada mais é do que a fração que relaciona o H , P_t e σ na Equação 2.6.

Figura 12 – Divisão em subcanais (tons) dos dados transmitidos.



Fonte: (GOMES, 2012).

Na transmissão em sistemas DSL, tanto para o G.fast como para o XG.fast, o método de modulação considera que as transmissões são feitas utilizando *Discrete Multitone Modulation* (DMT), onde os dados são transmitidos via um conjunto de subcanais ou tons

independentes k com largura fixa Δf , como na Figura 12. Dessa forma, a capacidade total de transmissão do canal (C) é uma soma entre todas as taxas dos subcanais independentes (C_k), que de acordo com Gomes (2012) é definida por:

$$C = \sum_{k=1}^K C_k = \sum_{k=1}^K \Delta f \log_2 (1 + SNR_k) \quad (2.7)$$

onde K é a quantidade total de tons, e SNR_k é a relação sinal-ruído no tom k .

Como em uma transmissão o sinal pode ser transmitido utilizando mais de um modo de propagação, a capacidade do canal, também, pode ser calculada levando em consideração a transmissão em mais de um modo de propagação e pode ser definida pela Equação 2.8,

$$C = \sum_m \sum_k \Delta f \log_2 (1 + SNR_{k,m}) \quad (2.8)$$

onde m é quantidade total de modos utilizada em uma transmissão.

Considerando que a largura de banda é a mesma para todas os subcanais, pode-se definir a capacidade total de transmissão do canal, levando em consideração os modos de propagação, por:

$$C = \Delta f \sum_m \sum_k \log_2 (1 + SNR_{k,m}). \quad (2.9)$$

Como o cálculo da capacidade de transmissão do canal leva em consideração as interferências que afetam o sinal transmitido, o padrão G.fast e sua nova geração, como já mencionado, pode considerar a utilização de técnicas de mitigação de *crosstalk*, entre pares trançados que são coordenados por um mesmo dispositivo (GINIS; CIOFFI, 2002), como o objetivo de reduzir tais interferências.

Dessa maneira, o *vectoring* realiza a pré-compensação das interferências que o sinal receberá quando estiver sendo transmitido pelo cabo, se baseando na aplicação de um pré-codificador (P) aos símbolos que serão transmitidos em L canais como é definido em 2.10,

$$y = H P x + n \quad (2.10)$$

em que x é um vetor coluna contendo os símbolos transmitidos em cada canal, P é uma matriz que representa o pré-codificador que é definido como $P = \beta H^{-1} \Lambda$, H é a matriz de transmissão definida na Equação 3.1 na seção 3.1, y é um vetor coluna que contém os símbolos recebidos e n representa o ruído Gaussiano branco aditivo observado na recepção.

Assim, para o cálculo da capacidade de transmissão com a utilização de vectoring o vetor de símbolos considerados é definido por:

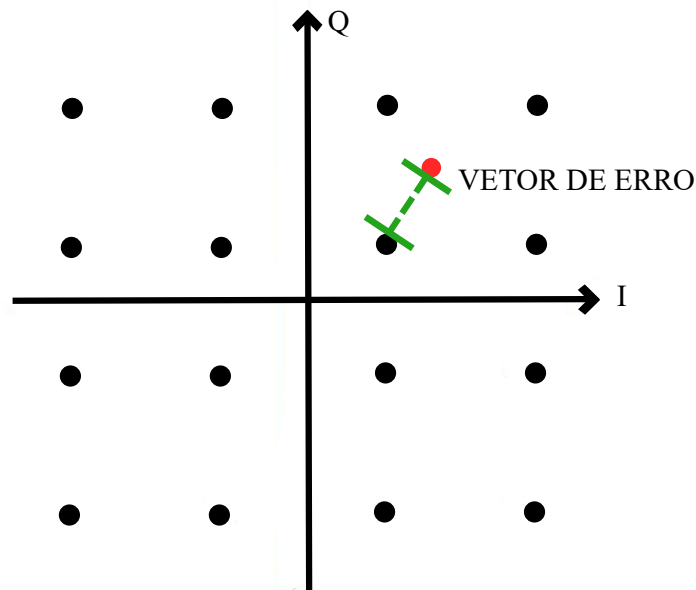
$$y = \frac{1}{\beta} \Lambda x + n \quad (2.11)$$

2.3.4.2 Magnitude do vetor de erro: EVM

Na transmissão de um sinal digital, idealmente, o receptor teria todos os pontos da constelação precisamente nos locais ideais, porém imperfeições na transmissão desses sinais, como os ruídos, causam desvios nos pontos da constelação como na Figura 13.

Dessa forma, a magnitude do vetor de erro (EVM) é uma métrica que expressa as distorções de símbolos em uma transmissão digital nos bits, pontos, de uma constelação (LI; PENG; WANG, 2012). É usado porque a taxa agregada não traz uma explicação completa sobre as perdas de informação ou o desvio de bits. Pode, dessa forma, ser definido como a magnitude do vetor entre o bit real e o medido com desvio, como na Figura 13.

Figura 13 – Vetor de erro entre um bit ideal e o medido com desvio (em vermelho).



Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com Li, Peng e Wang (2012) esse EVM é medido de acordo com a Equação 2.12,

$$EVM = \sqrt{\frac{\int_0^T (z'(t) - i(t))^2 dt}{\int_0^T i(t)^2 dt}} \quad (2.12)$$

onde $z'(t)$ representa o sinal medido no lado do receptor, o $i(t)$ representa o sinal ideal transmitido e T representa o intervalo de medição.

Tabela 2 – Limites requeridos de EVM.

Parametros	Nível de EVM
QPSK or BPSK	17,50%
16 QAM	12,50%
64 QAM	8%

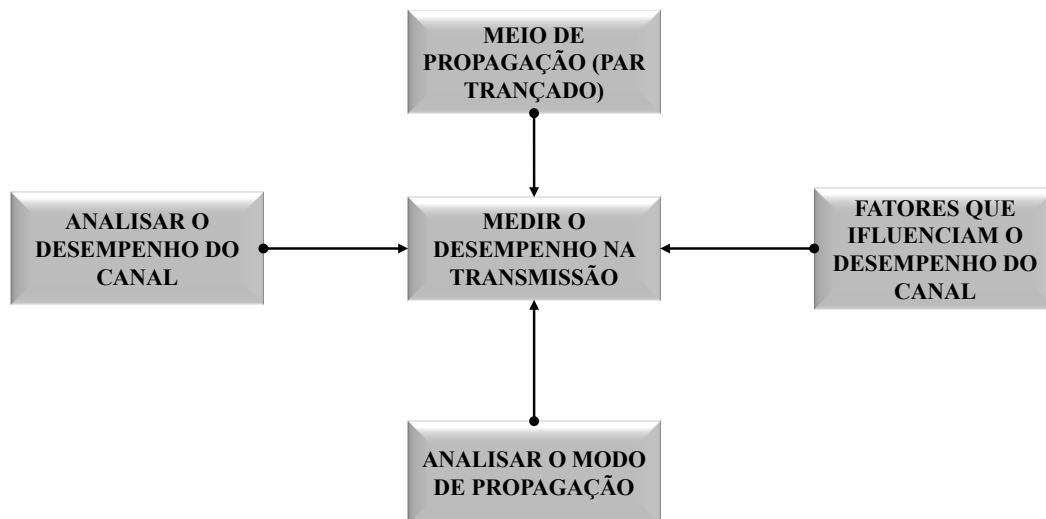
Fonte: (LI; PENG; WANG, 2012).

O EVM é regularmente expresso em termos percentuais e quanto maior é o EVM pior é o canal para transmitir dados. O EVM precisa estar de acordo com limites que dependem da constelação QAM usada no processo e dos documentos de regulação atuais, como mostra a Tabela 2(LI; PENG; WANG, 2012).

2.4 Contexto dos conceitos definidos

Todos os conceitos apresentados tem como objetivo final tornar possível medir o desempenho da transmissão, para que as análises acerca do modo de transmissão proposto sejam realizadas. Dessa forma, o fluxograma da Figura 14 resume a necessidade e contexto de todos os conceitos definidos.

Figura 14 – Relação entre os conceitos apresentados.



Fonte: Elaborada pela autora.

Como o objetivo final era medir o desempenho da transmissão, conhecer o meio de propagação era o primeiro passo para realizar essa análise, sendo este o par trançado. Conhecendo o meio de propagação para o sinal, avaliar como esse meio se comportava e quais fatores influenciavam o desempenho desse canal, ou seja, como era o comportamento

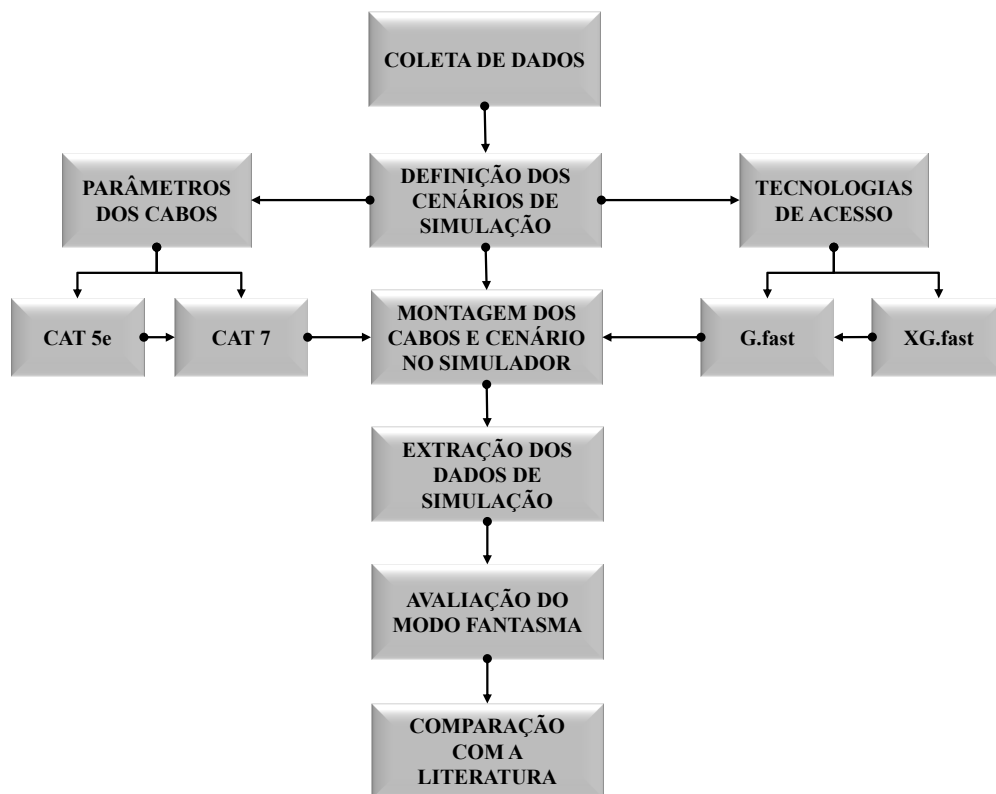
da função de transferência e quais níveis de interferências (*crosstalk*) afetavam esse canal, foram os passos seguintes.

Reunindo todas essas informações, saber qual o modo de propagação que o sinal trafega ao longo desse meio também é um parâmetro que influencia no desempenho da transmissão, de modo que, a proposta de utilização do modo de propagação fantasma, a partir do meio de transmissão escolhido, consegue agregar mudanças quando comparado com os modos diferenciais, comuns e demais modos de transmissão.

3 Metodologia

Para a avaliação do modo fantasma seguiu os passos descritos na Figura 15, de forma que ao final do fluxograma foi possível avaliar o desempenho do modo fantasma nos cenários pré estabelecidos.

Figura 15 – Passos seguidos para a análise final do modo fantasma.



Fonte: Elaborada pela autora.

Essa análise começou com a escolha dos cabos para seleção dos parâmetros necessários a serem usados no CST para construção dos modelos dos cabos CAT 5e e CAT 7. Essa coleta permitiu montar cenários bem semelhantes com os reais, considerando que os parâmetros como, trançamento dos pares, espessura dos condutores e demais características foram medidas para realizar uma simulação mais próxima possível à prática.

A partir da modelagem dos cabos, foram definidos cenários de teste para o G.fast e o XG.fast. Para cada cenário, o *Computer Simulation Technology* (CST) obteve a função de transferência e os respectivos FEXTs, a partir dos quais foram calculadas as taxas de dados e o EVM usando um simulador de canal desenvolvido em Matlab. Por fim, foi realizada a análise de desempenho considerando a presença e ausência de blindagem, configurações diferentes de trançamentos dos pares, para comprimentos de cabos de 30 a 250 m, e na presença de agressores.

3.1 Desenvolvimento dos cenários de simulação

3.1.1 Coleta das características dos cabos simulados

Para fazer a construção dos cabos no simulador, foi necessário coletar as características de cada cabo, disponíveis em laboratório, como por exemplo a amostra do cabo CAT 5e na Figura 16. Dessa forma, foram medidos parâmetros como comprimento do trançado para cada par, diâmetro do condutor e isolante, espessura da capa externa do cabo e espessura das blindagens para o cabo que possui, no caso o CAT 7. As características de cada cabo podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características coletadas em laboratório dos cabos CAT 5e e CAT 7.

Parâmetros dos cabos	CAT 5e	CAT 7
Comprimento do trançado (mm)	Azul	17,87
	Verde	19,21
	Laranja	13,28
	Marrom	12,63
Diâmetro do condutor (mm)	0,51	0,40
Diâmetro do isolante (mm)	0,80	1,00
Espessura da capa externa (mm)	0,61	0,40
Espessura da blindagem dos pares (mm)	Ausente	0,12
Espessura da blindagem externa (mm)	Ausente	0,10

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 16 – Um cabo CAT 5e real presente no laboratório. À esquerda um cabo CAT 5e enrolado, e à direita, a ponta deste cabo, evidenciando os pares trançados.



Fonte: (GOMES, 2012).

Foi importante, também, coletar informações em relação aos materiais constituintes de cada parte do cabo, como o material do isolante e da capa externa do CAT 5e e CAT 7 que são de PE (Polietileno) e PVC (Cloro de Polivinila), respectivamente, a blindagem dos pares no CAT 7 que é do tipo sólida e a blindagem externa que é do tipo trançada.

3.1.2 Configurações de simulação no CST Cable Studio

Primeiramente, o CST é um software de simulação muito usado em engenharia elétrica que tem como objetivo simular cenários de transmissão e recepção de variados tipos de sistemas, oferecendo soluções computacionais precisas e eficientes para o projeto e análise eletromagnética de maneira fácil e permitindo escolher o método mais apropriado para o design e otimização de sistemas em uma ampla gama de frequências (CST, Acessado em 2018). Especificamente neste trabalho, foi utilizado um módulo do software chamado *Cable Studio*, que tem por finalidade simular transmissões em cabos e realizar análises tridimensionais da integridade do sinal, emissão conduzida, emissão irradiada e susceptibilidade eletromagnética de estruturas de cabo complexas nos sistemas simulados (CST, Acessado em 2018). A partir desse módulo, foi possível simular os cenários de transmissão do modo fantasma e obter os parâmetros de espalhamento necessários, função de transferência e *crosstalk*, para as avaliações desejadas.

As simulações realizadas no CST foram feitas considerando a implementação do modo fantasma de transmissão em diversos cenários, listados na Tabela 4. Foram simulados cenários para transmissões em diferentes sistemas, G.fast e XG.fast, diferentes categorias de cabos, CAT 5e e CAT 7, e diferentes comprimentos de cabos de acordo com o padrão de cada sistema.

Tabela 4 – Configurações dos cenários de transmissão.

Cenários de simulação	
Cabos para transmissão	CAT 5e e CAT 7
Frequência de transmissão	G.fast (212 MHz) e XG.fast (500 MHz)
Comprimento dos cabos	G.fast (150, 200 e 250 m) e XG.fast (30, 50 e 70 m)

Fonte: Elaborada pela autora.

Após fazer a construção dos cabos no software CST, com os dados coletados mostrados na Tabela 3, o software disponibiliza os cabos montados com todas as configurações estabelecidas como nas Figuras 17 e 18, representando o CAT 5e e CAT 7, respectivamente.

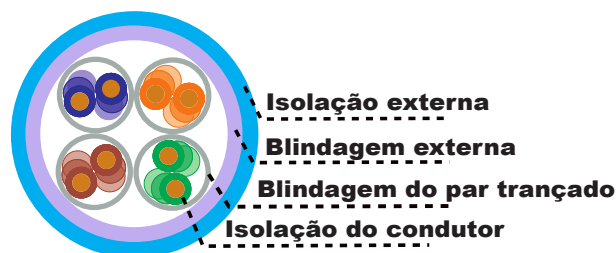
Figura 17 – Cabo Cat 5e montado no CST com os parâmetros medidos.



Fonte: Elaborada pela autora.

Antes da simulação dos cenários, o software necessita da configuração do *setup* de transmissão e recepção, similar ao da Figura 7, o qual representa um *setup* de transmissão

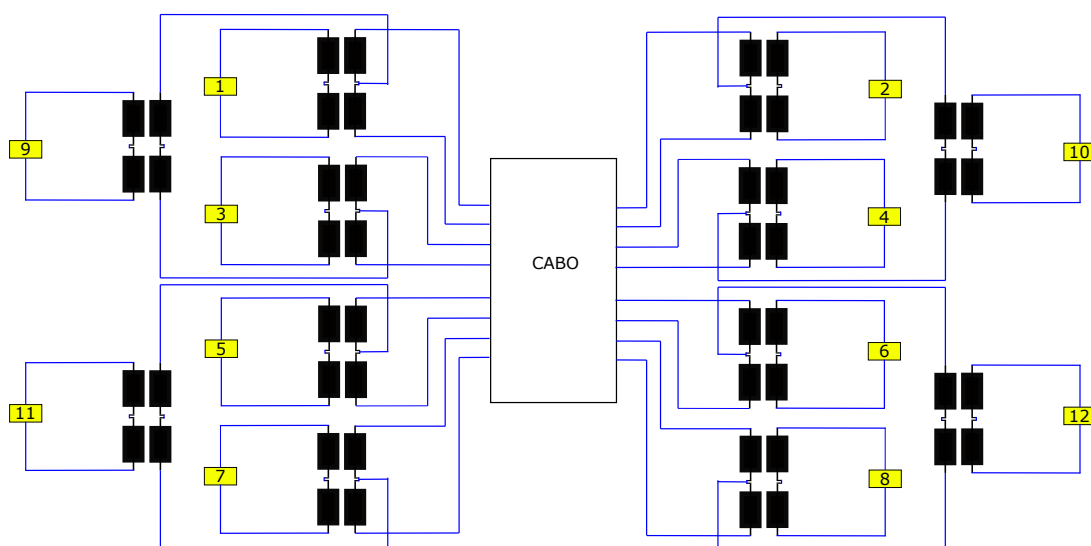
Figura 18 – Cabo CAT 7 montado no CST com os parâmetros medidos.



Fonte: Elaborada pela autora.

em modo fantasma. Esse *setup* de transmissão é modelado no CST pelo esquemático mostrado na Figura 19. Cada bloco amarelo é um porta de entrada ou saída. No lado direito representa uma porta de entrada do sinal no transformador de alta frequência (balun), ou seja, o lado de transmissão. No lado esquerdo, representa os receptores de sinal.

Figura 19 – Esquemático criado no CST para simulação.



Fonte: Elaborada pela autora.

Entre todas essas configurações, o software precisa da informação de casamento de impedância dos modos de transmissão, de forma que em cada porta amarela do esquemático da Figura 19 é configurado um valor para que a quantidade de reflexões sejam reduzidas ao máximo e não prejudiquem as simulações. Dentro do cenário simulado as impedâncias de casamento para cada modo são de 100 e 60 Ohms para o modo diferencial e fantasma, respectivamente.

Foram simulados, basicamente, dois cenários em padrões de frequências diferentes, G.fast e XG.fast, as faixas de frequências simuladas foram de 0 a 200 MHz e espaçamento entre os tons Δf de 97,7 kHz para o cenário G.fast e 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.

Após a montagem, configuração e simulação dos cenários, os resultados gerados pelo software são as funções de transferência direta dos canais (FTD) e *crossstalks* associados à eles. Mais especificamente, o software gera os parâmetros de espalhamento de todo o sistema simulado, mas neste trabalho é utilizado somente o S_{21} , que representa a função de transferência. Ao final do processo, a partir das funções de transferência extraídas, e usando um simulador de canal, desenvolvido no Matlab, são obtidas as taxas individuais de cada canal e as agregadas, além de métricas de desempenho como EVM.

3.1.3 Simulador de desempenho do canal de transmissão

O simulador de canal é uma ferramenta desenvolvida no software Matlab capaz de fazer o cálculo da taxa de transmissão agregada e EVM a partir dos dados gerados no CST. Os dados gerados no CST, como mencionado, são os parâmetros de espalhamento S de cada canal do *setup* montado, os quais, são organizados na matriz de transmissão H :

$$H = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{m1} & S_{m2} & \dots & S_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Essa matriz de transmissão é organizada de tal forma em que na sua diagonal principal são colocadas todas as funções de transferência direta dos canais, e no restante das posições todos os *crossstalks* associados a cada canal de transmissão. Dessa forma, o simulador consegue utilizá-la juntamente com as configurações da Tabela 5 para o cálculo da taxa de transmissão e EVM para os cenários G.fast e XG.fast.

Tabela 5 – Configurações para cálculo da taxa de transmissão.

Dados para o cálculo da taxa	
Gap de RSIR (Γ)	15,15 dB
Máscara espectral (ρ)	4 dBm
Densidade espectral de potência do ruído Gaussiano branco aditivo (σ^2)	-150 dBm/Hz

Fonte: Elaborada pela autora.

Nesse simulador é possível fazer escolhas em relação a utilização ou não das técnicas de mitigação de *crossstalk*, ajustar a quantidade de canais que se deseja utilizar, além de utilizar a mesma sequência de cálculos utilizados em Gomes (2012) para o cálculo da taxa agregada e Gbps e seguinte cálculo do EVM. Além dos dois principais parâmetros gerados, o software gera os gráfico de função de transferência de cada canal com os *crossstalks* associados e gera gráficos de barra com a taxa de cada canal. Obtendo-se assim todas as métricas necessárias para análise de desempenho do sistema.

4 Resultados

Esta seção apresenta os resultados para os dois cenários mais gerais de simulação, o cenário G.fast e XG.fast. Entre esses resultados, todas as análises são feitas a partir dos cálculos das taxas de transmissão usando o simulador de canal, considerando os dados gerados no CST.

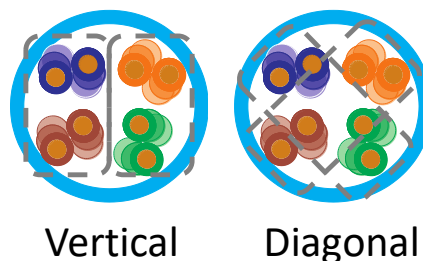
Primeiramente foi avaliada a melhor configuração de trançamento dos pares para a inserção do modo fantasma, de acordo com os resultados da seção 4.1. A partir do trançamento no qual o sistema apresentou melhor desempenho, foram feitas simulações para avaliação dos outros parâmetros como a variação do comprimento e qualidade do cabo (CAT 7 e CAT 5e). Esse procedimento foi adotado pois a inserção do modo fantasma na configuração adequada dentro do cabo influencia no desempenho da transmissão.

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

Como os canais fantasmas são constituídos pelo acoplamento de dois canais diferenciais, a escolha dos pares que farão parte do circuito fantasma é de extrema importância para o desempenho da transmissão dos modos fantasma.

Dentro dos cabos CAT, como já mencionado, existem 4 pares trançados em taxas de trançamento diferentes, dependendo da cor de cada par e da tecnologia do cabo, o trançamento dos fios de cobre tem valores diferentes. Na Tabela 3 temos os valores para os cabos utilizados.

Figura 20 – Configurações vertical e diagonal.



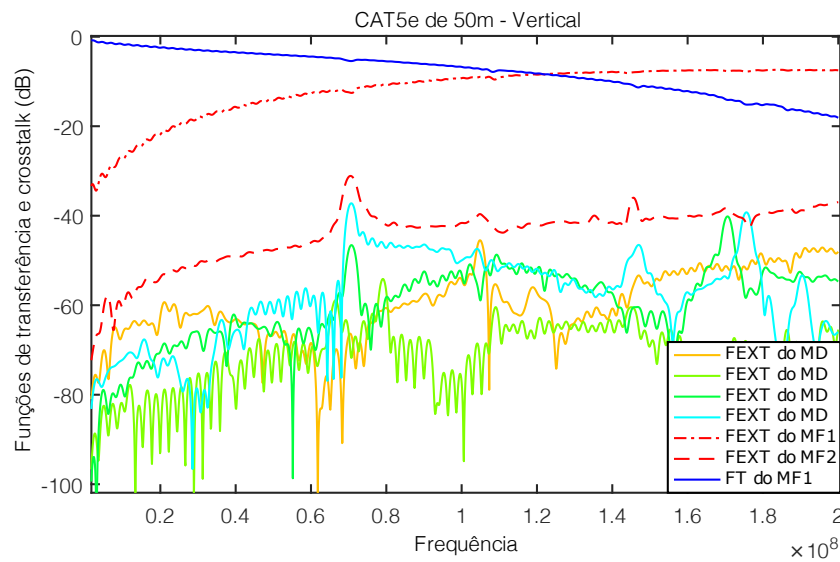
Fonte: Elaborada pela autora.

Assim, os dois canais fantasma poderiam ser inseridos no cabo de duas formas diferentes, nomeadas de modo vertical e modo diagonal como mostra a Figura 20. Essas

configurações foram testadas para avaliar como era o comportamento do modo fantasma em ambas as situações.

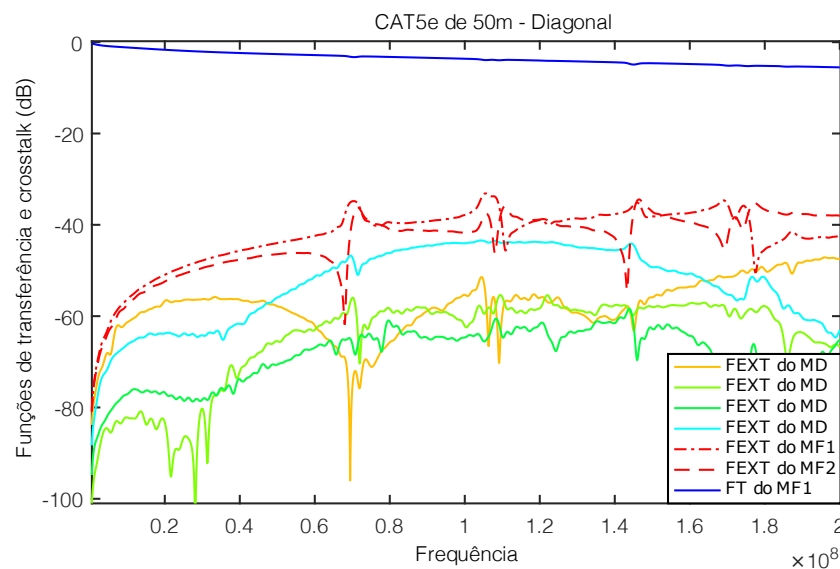
Com base nisso, nas Figuras 21 e 22, percebe-se que a escolha dos arranjos propostos na Figura 20 afeta tanto as curvas de função de transferência e FEXT.

Figura 21 – Função de transferência e *crossstalks* associados ao modo fantasma quando inseridos pelo modo vertical.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 22 – Função de transferência e *crossstalks* associados ao modo fantasma quando inseridos pelo modo diagonal.



Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 22, por exemplo, mostra que a função de transferência na configuração diagonal têm resultados melhores do que os da vertical, Figura 21, porque ao longo de toda a faixa de frequência a função de transferência deste sofre menor atenuação e permanece

acima dos níveis de *crosstalk*, enquanto que no arranjo vertical a atenuação é maior e o FEXT chega até mesmo a ultrapassar a função de transferência em aproximadamente 100 MHz.

A explicação para isto pode ser vista na Tabela 3 da seção 3.1.2. Nela podemos notar que os pares que formam os modos fantasma 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.

Dessa maneira, sabendo que o modo fantasma apresenta melhor comportamento quando inserido de forma diagonal, essa configuração foi definida como configuração padrão para todos os cenários simulados.

4.2 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 somente para a análise da viabilidade do modo fantasma com e sem a utilização de *vectoring* e considerando o efeito da blindagem. 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 três comprimentos próximos ao comprimento do agressor, isto é, 30 m, 50 m e 100 m, de 30 m, 50 m e 100 m, considerando cabos com e sem blindagem.

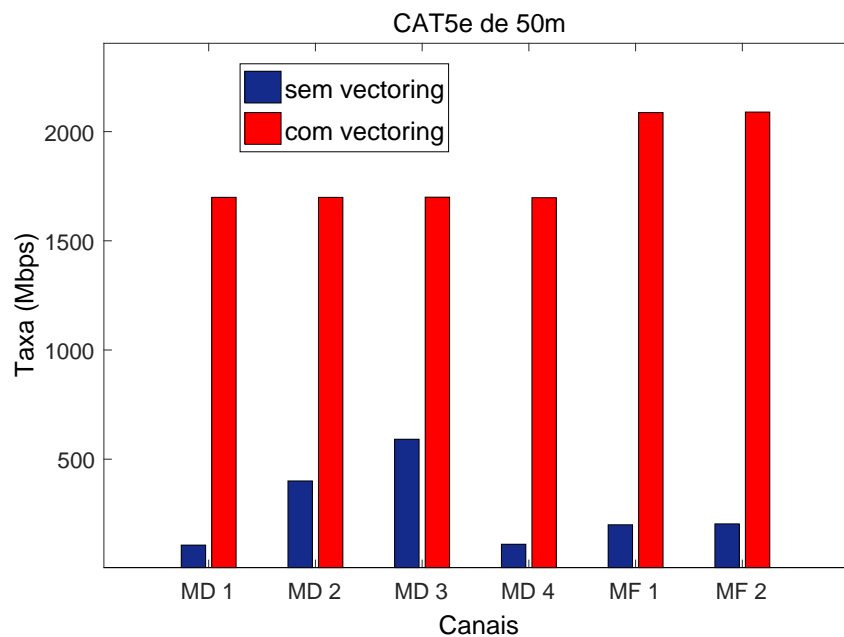
4.2.1 Influência da utilização de *vectoring* e blindagem na taxa de transmissão, funções de transferência e FEXTs do modo fantasma

Na Figura 23 é apresentada a taxa de transmissão de cada canal quando o modo fantasma é implementado em um cabo CAT5e de 50 m, considerando a faixa de frequência do sistema G.fast. Nela é feita a análise de que a taxa de transmissão sem *vectoring* para todos os canais é baixa, devido aos canais fantasmas agregarem mais interferências, atingindo os canais diferenciais com *crosstalks* mais altos, como indica a Figura 24, que mostra a função de transferência de um dos canais diferenciais e todos FEXTs que o atingem.

Mais detalhadamente, os canais fantasmas têm uma taxa de transmissão sem *vectoring* mais baixa que os diferenciais, como mostrado na Figura 23. Embora, comparando

as Figuras 24 e 25 e percebendo que a atenuação da função de transferência do canal fantasma, que em 200 MHz fica em torno de 5,5 dB, seja inferior que a do canal diferencial, que para a mesma frequência apresenta atenuação por volta de 15 dB, as taxas são mais baixas devido aos efeitos das interferências causada pelo outro canal fantasma serem maiores que nos canais diferenciais, como indica a Figura 25, na qual o nível dos ruídos que interferem o modo fantasma estão em um nível de -40 dB enquanto para o canal diferencial esse ruído cai para -60 dB.

Figura 23 – Taxa de todos os canais do sistema em modo fantasma com e sem *vectoring* no CAT 5e.



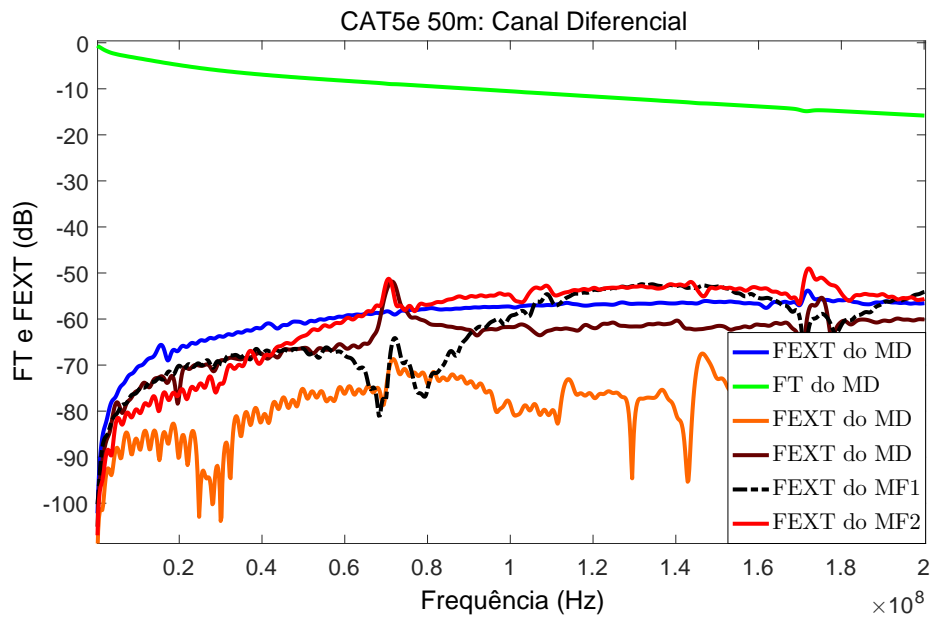
Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 26 temos a taxa com e sem *vectoring* para cada canal quando é utilizado o modo fantasma de transmissão em um cabo CAT 7. 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 23 para CAT 5e. A explicação para isso é que devido à blindagem entre os pares do CAT 7, o acoplamento eletromagnético é menor para o canal fantasma, diminuindo seu desempenho.

A partir das Figuras 27 e 28, 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.

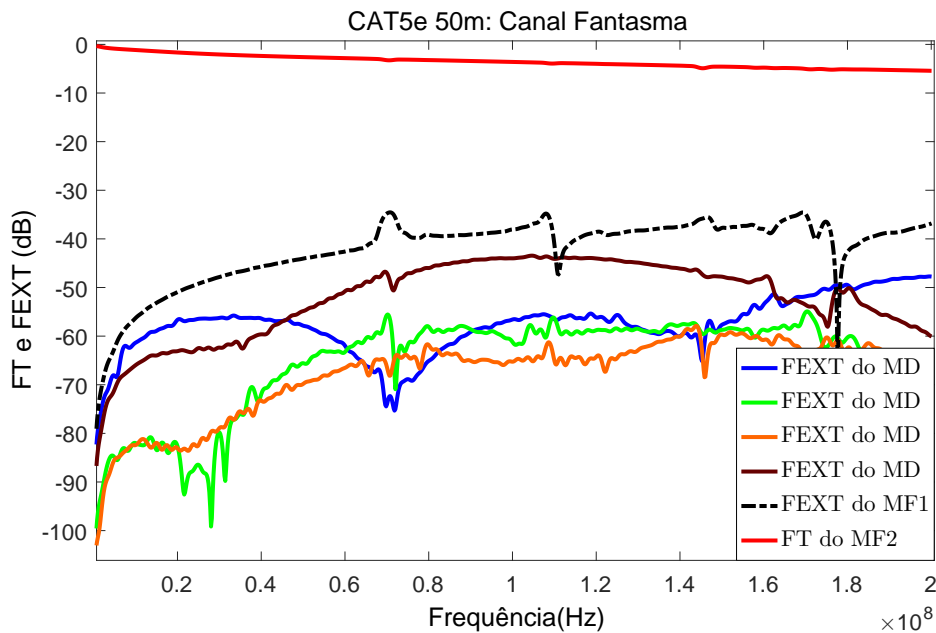
Outra diferença entre o resultado obtido para o CAT 5e na Figura 23, é que como podemos ver na Figura 26 na transmissão por meio do CAT 7, não é necessário aplicar *vectoring* mesmo utilizando o modo fantasma de transmissão, pois a blindagem entre os pares no cabo reduz consideravelmente o FEXT entre os canais diferenciais e fantasmas.

Figura 24 – Função de transferência de um dos canais diferenciais e todos os FEXTs que o atingem na transmissão do modo fantasma no CAT 5e.



Fonte: Elaborada pela autora.

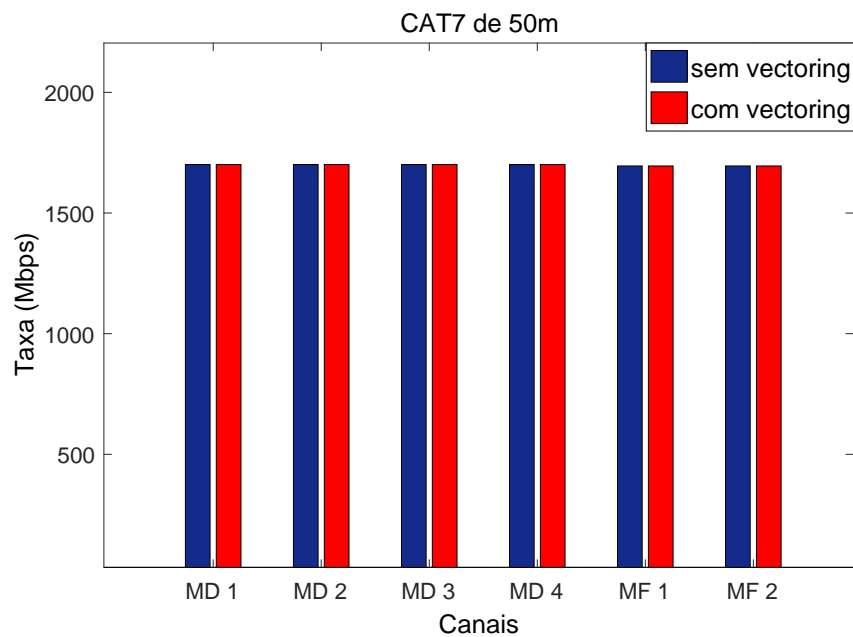
Figura 25 – Função de transferência de um dos canais fantasmas e todos os FEXTs que o atingem na transmissão do modo fantasma no CAT 5e.



Fonte: Elaborada pela autora.

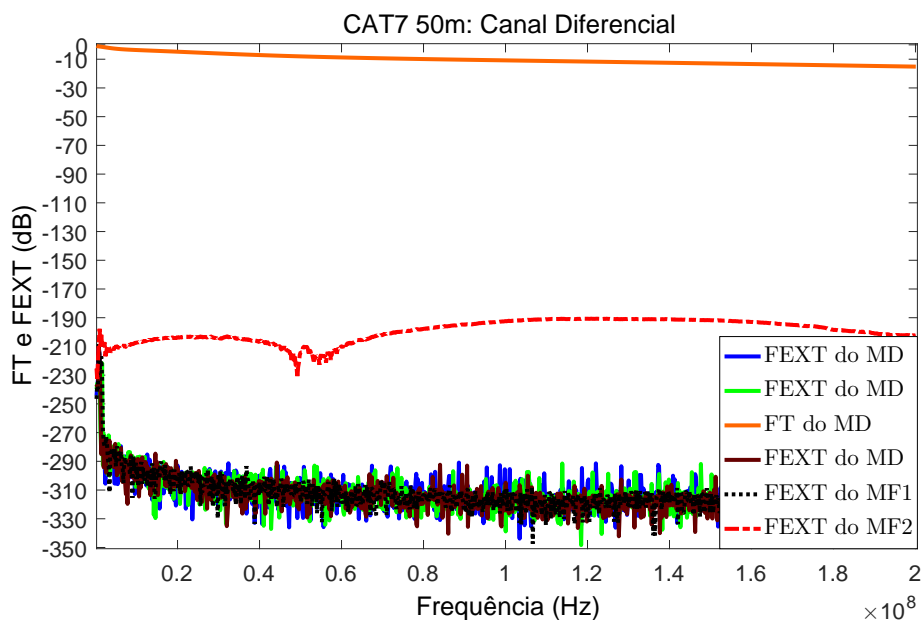
Em 200 MHz de largura de banda, os FEXTs que atingem o canal diferencial mostrados na Figura 27 e os FEXTs que atingem o canal fantasma mostrados na Figura 28 são praticamente desprezíveis. Esse resultado é importante por demonstrar que usando cabos com blindagem pode-se ter versões mais simples do sistema G.fast, sem o processamento

Figura 26 – Taxa de todos os canais do sistema em modo fantasma com e sem *vectoring* no CAT 7.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 27 – Função de transferência de um dos canais diferenciais e todos os FEXTs que o atingem na transmissão do modo fantasma em um cabo CAT 7.

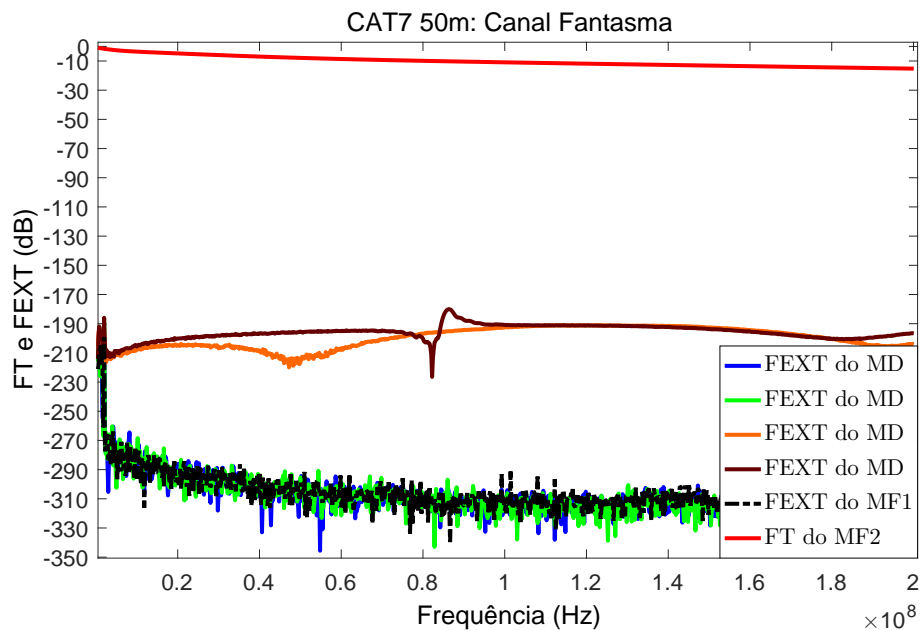


Fonte: Elaborada pela autora.

adicional exigido pelas técnicas de *vectoring*.

Portanto, diferentemente da transmissão com o CAT 5e que apresenta grandes diferenças na agregação de taxa, tendo uma taxa agregada de 1,61 Gbps e 10,94 Gbps, com e sem a utilização de *vectoring* respectivamente, se prendendo à ele para uma boa

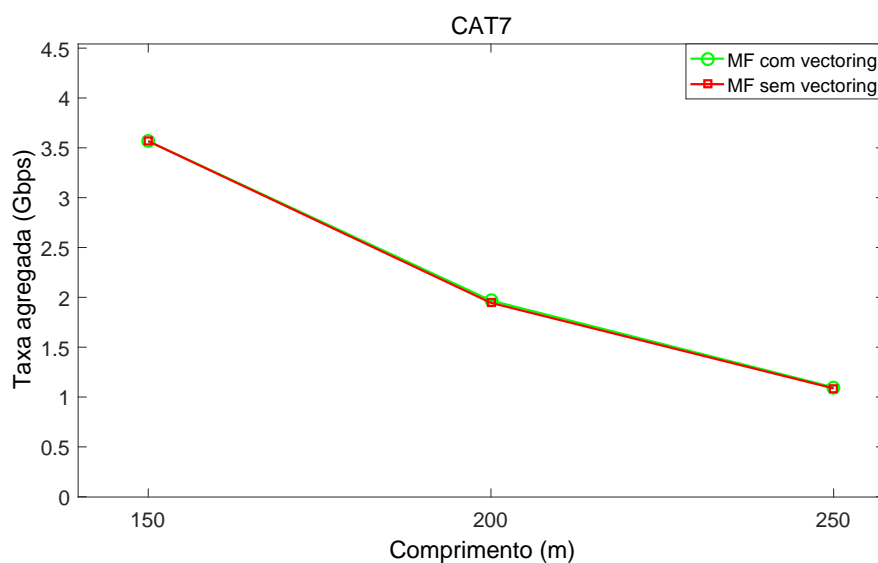
Figura 28 – Função de transferência de um dos canais fantasmas e todos os FEXTs que o atingem na transmissão do modo fantasma em um cabo CAT 7.



Fonte: Elaborada pela autora.

transmissão em altas frequências, a transmissão com a utilização do CAT 7 se mostra indiferente quanto a utilização ou não dessa mitigação, já que como mostra a Figura 29 as taxas de transmissão não variam considerando ou não a utilização da técnica de mitigação, mesmo para cenários além do comprimento utilizado para essa primeira análise. Dessa forma, todos os resultados obtidos, a seguir, para o CAT 7 são sem a utilização de *vectoring*.

Figura 29 – Taxas em cenários além dos 50 metros do CAT 7 com e sem *vectoring*.



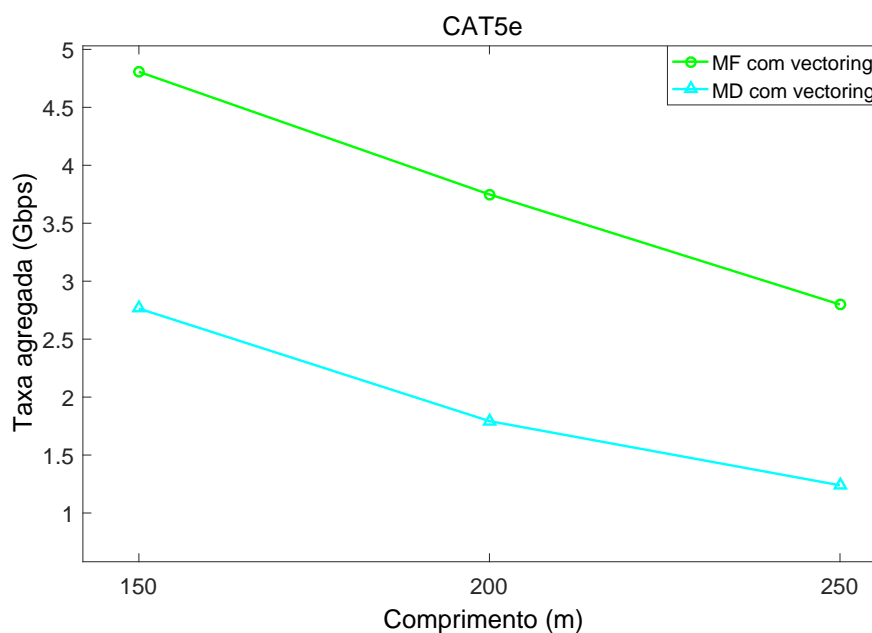
Fonte: Elaborada pela autora.

4.2.2 Avaliação do comportamento da taxa agregada de transmissão a partir do aumento do comprimento do cabo dentro da faixa G.fast

Considerando que os cabos de menor qualidade, CAT 5e, necessitam da utilização de *vectoring* para conseguir transmitir sinais de boa qualidade e que os de maior qualidade, CAT 7, não necessitam dessa técnica, as simulações a seguir são realizadas com *vectoring* para o CAT 5e e para o CAT 7 o *vectoring* é desconsiderado.

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 comparando com o modo diferencial para os cabos CAT 5e e CAT 7 a partir da variação dos comprimentos de 150 m, 200 m e 250 m.

Figura 30 – Taxa agregada com e sem *vectoring* para vários comprimentos em um CAT 5e transmitindo o modo fantasma e comparação com o modo diferencial.



Fonte: Elaborada pela autora.

Essa análise se baseia de como os cabos se comportam com o aumento do comprimento do cabo e o quanto de taxa o modo fantasma consegue agregar em relação ao diferencial ao longo desse comprimento. Portanto, na Figura 30, o modo fantasma aumenta bastante a taxa agregada de transmissão do sistema em comparação com o modo diferencial (MD), para os três comprimentos. O aumento de bits na taxa agregada é mostrado na Tabela 6 para os três comprimentos, destacando que, para o comprimento de 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 padrão do sistema G.fast.

Na Figura 31 temos a comparação entre a taxa agregada obtida com o modo fantasma de transmissão e o modo diferencial para o cabo CAT 7. Embora o aumento de

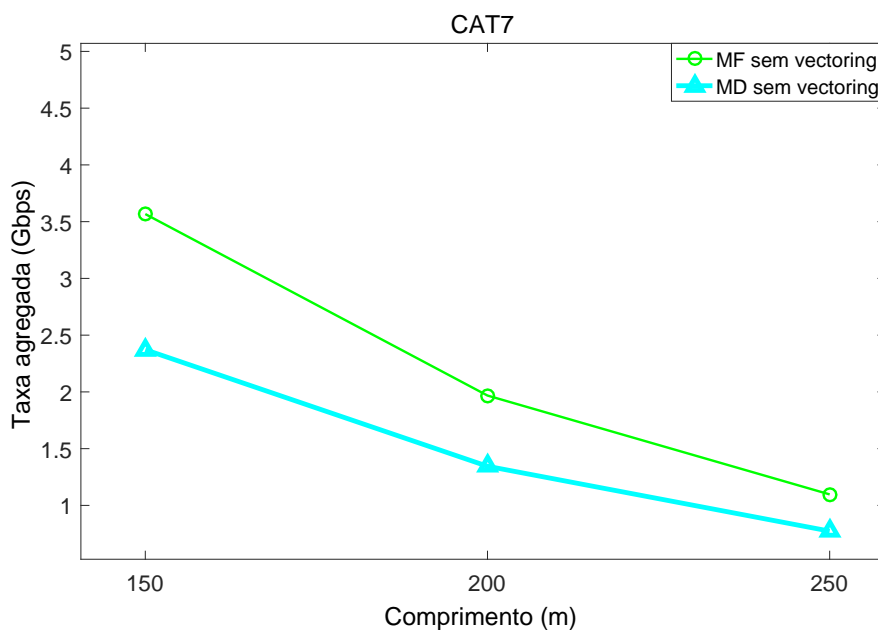
Tabela 6 – Taxa agregada para cada comprimento dos modos diferenciais e modos fantasma para o CAT 5e.

CAT 5e		
Comprimento do cabo (m)	Taxa agregada em Gbps	
	MD	MF
150	2,76	4,80
200	1,79	3,74
250	1,23	2,79

Fonte: Elaborada pela autora.

taxa no CAT 7 seja reduzido devido ao acoplamento entre os pares ser reduzido devido a blindagem, a utilização do modo fantasma 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, de modo que o ganho entre os modos se estabelece de acordo com a Tabela 7, variando entorno de uma média de 700 Mbps em relação à sistemas que só utilizam os canais diferenciais.

Figura 31 – Taxa agregada para vários comprimentos em um CAT 7 transmitindo o modo fantasma em comparação com o modo diferencial.



Fonte: Elaborada pela autora.

Portanto, é possível notar pelas Figuras 30 e 31, 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 CAT 5e, o máximo ganho de taxa obtido foi, aproximadamente 2 Gbps no comprimento de 150 metros. Já para o CAT 7 foi obtida um máximo ganho de 1,19 Gbps para o mesmo comprimento. Dessa forma, é mais vantajoso utilizar o modo fantasma em comprimentos menores e dependendo do enlace considerar a maior atenuação do CAT 7.

Tabela 7 – Ganho de taxa entre os modos para o aumento de comprimento em um cabo CAT 7.

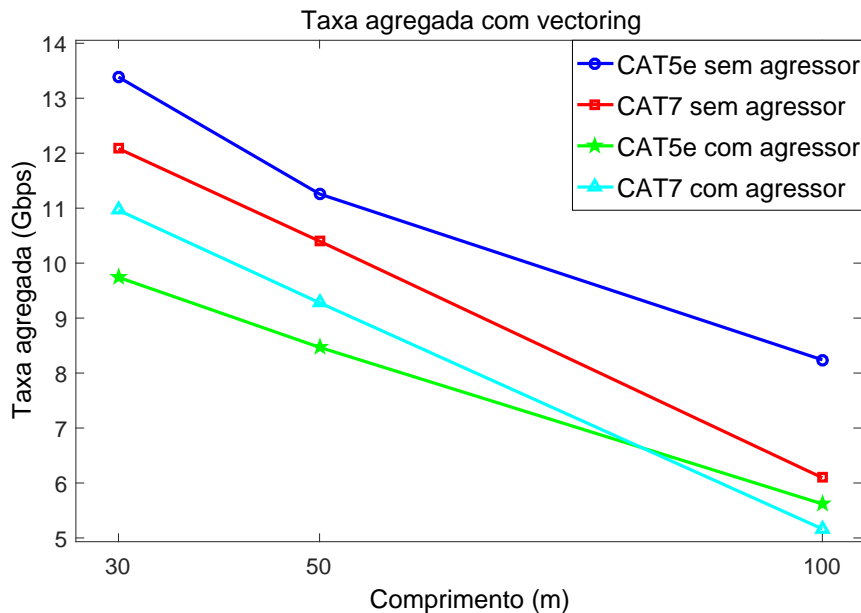
CAT 7	
Comprimento do cabo (m)	Ganho entre o modo fantasma e diferencial em Gbps
150	1,19
200	0,62
250	0,32

Fonte: Elaborada pela autora.

4.2.3 Análise da susceptibilidade de interferentes externos na taxa agregada de transmissão do modo fantasma

O resultado mostrado na Figura 32 analisa a susceptibilidade do sistema transmitindo o modo fantasma à interferências externas, sendo considerados os cabos CAT 5e, sem blindagem, e CAT 7, com blindagem, para os comprimentos de 30 m, 50 m e 100 m.

Figura 32 – Taxa agregada do modo fantasma nos cabos CAT 5e (com *vectoring*) e CAT7 (com ou sem *vectoring*) na presença ou ausência de interferências externas.



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 32 temos apenas o resultado de taxa agregada com *vectoring* para ambos os cabos. O resultado sem *vectoring* não é mostrado, pois como visto anteriormente para os cabos CAT 5e 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.

Analisando o desempenho dos sistemas sem a presença de agressores, notamos

que apesar do CAT 7 ser um cabo de maior qualidade por possuir blindagem externa e entre os pares, a taxa agregada ao longo do comprimento é menor que a do cabo CAT 5e. Como o modo fantasma trafega por meio do acoplamento eletromagnético entre os pares, a blindagem presente no CAT 7 inviabiliza parte desse acoplamento, reduzindo a taxa agregada do cabo, além disso, a atenuação desse cabo é maior que a do CAT 5e, como podemos perceber na Figura 32, que apesar dele ter uma taxa maior nos comprimentos menores essa taxa diminui mais rapidamente, se tornando mais baixa que a do CAT 5e.

O desempenho do sistema decaiu bastante na presença de interferências externas, conhecidas como linhas agressoras. Há uma diminuição na taxa agregada ao longo dos comprimentos, em média, de 3,2 Gbps para o CAT 5e e 1 Gbps para o CAT 7. Nesse tipo de cenário, é importante levar em consideração que apesar das taxas agregadas com modo fantasmas do cabo CAT 5e serem mais elevadas sem a presença de agressores, quando esse sistema é sujeito a interferências desse tipo o ideal é que se utilize cabos que possuam blindagem como o CAT7, pois isso o torna mais resistente a essas interferências como podemos ver na Figura 32, que tem uma variação na taxa em Gbps bem menor que a do CAT 5e.

4.3 Cenário de simulação: XG.fast

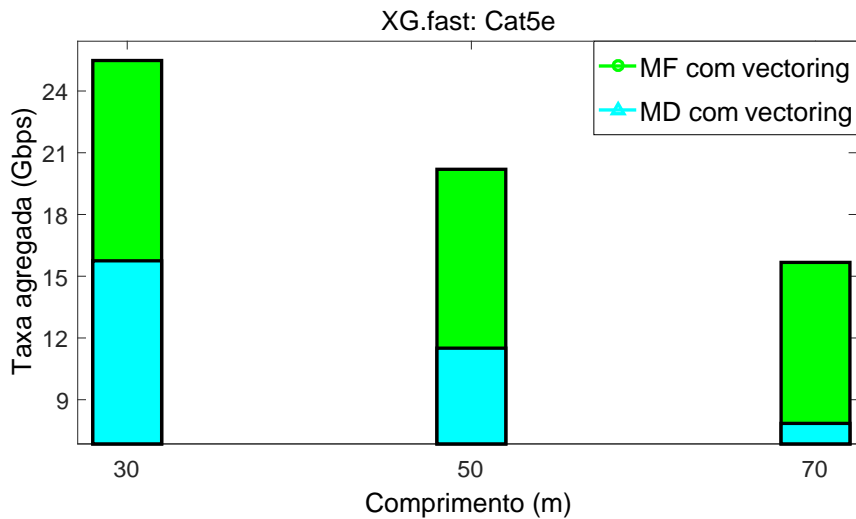
O objetivo desse cenário de simulação é verificar a capacidade de transmissão alcançada quando o modo fantasma é utilizado em altas frequências como a do próximo padrão de tecnologia de acesso ao usuário XG.fast. Dessa forma, foram realizadas simulações na faixa de frequência de 500 MHz para os comprimentos de 30 m, 50 m e 70 m dos cabos CAT 5e e o CAT 7.

Na Figura 33 temos a taxa de transmissão com *vectoring* para o CAT 5e. Podemos ver que foram alcançadas taxas acima de 24 Gbps, superiores às prometidas pelo XG.fast ao utilizar o modo fantasma. Apesar do aumento do comprimento reduzir as taxas agregadas ainda foram obtidos ganhos de 9,7, 8,7 e 7,8 Gbps para os comprimentos de 30, 50 e 70 metros, respectivamente.

Na Figura 34 temos a taxa de transmissão sem *vectoring* para o CAT 7, já que nos resultados do cenário G.fast a aplicação de *vectoring* se mostrou desnecessária devido à baixa interferência entre os canais. Dessa forma, mesmo utilizando o modo fantasma em frequências de até 500 MHz do XG.fast o *vectoring* também não é necessário quando é utilizado o CAT 7. As taxas agregadas ao utilizar o modo fantasma chegaram em níveis de 23,63, 17,21 e 11,56 Gbps para os comprimentos de 30 m, 50 m e 70 m. Considerando a transmissão diferencial, foram obtidos ganhos consideráveis mesmo com o aumento do comprimento dos cabos, mostrados na Tabela 8.

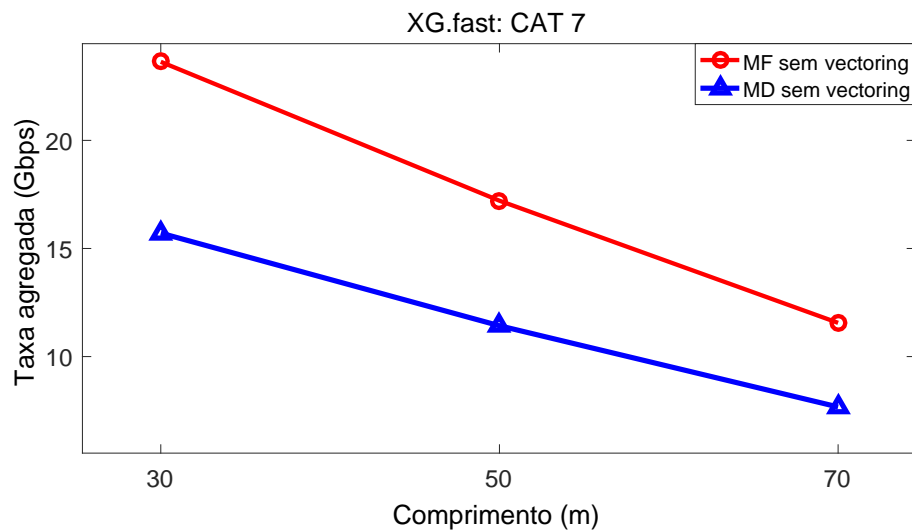
Dessa forma, a taxa agregada de transmissão para o comprimento de 70 m, que é o

Figura 33 – Taxa agregada de transmissão do cenário XG.fast para vários comprimentos de cabo CAT 5e considerando a implantação do modo fantasma e comparação com o modo diferencial.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 34 – Taxa agregada de transmissão do cenário XG.fast para vários comprimentos de cabo CAT 7 considerando a implantação do modo fantasma e comparação com o modo diferencial.



Fonte: Elaborada pela autora.

comprimento máximo especificado para o sistema XG.fast, é de 15,67 Gbps e 11,5 Gbps para o CAT 5e e CAT 7 respectivamente, estando acima do máximo de 10 Gbps esperado para o sistema XG.fast. Enquanto que, utilizando apenas os modos diferenciais obteve-se taxas abaixo de 8 Gbps para os dois tipos de cabos.

Tabela 8 – Ganhos de taxa proporcionados pelo modo fantasma em relação ao modo diferencial para os comprimentos de 30, 50 e 70 metros, para um cabo CAT 7.

Comprimento do cabo (m)	Ganho de taxa entre o MF e MD
30	7,9 Gbps
50	5,8 Gbps
70	3,8 Gbps

Fonte: Elaborada pela autora.

4.4 EVM para os cenários G.fast e XG.fast

Como já explicado na seção 2.3.4.2, o EVM é uma métrica que analisa além da taxa de transmissão. Dessa forma, o EVM calculado para os cenários G.fast e XG.fast garantem que a transmissão nas configurações pre estabelecidas apresentam bom desempenho.

Os resultados mostrados nas Tabelas 9 e 10 são as médias aritméticas calculadas para cada comprimento e tipo de cabo estabelecido para cada cenário de transmissão. Como estabelecido na Tabela 2 da seção 2.3.4.2 o máximo de EVM permitido é de 8 por cento, na configuração utilizada, portanto nenhum cenário utilizado ultrapassou o limite, de modo que em todos os comprimentos as simulações ficaram abaixo de 1 por cento.

Tabela 9 – EVM associados para o cenário G.fast para os dois cabos utilizados.

G.fast			
CAT 5e		CAT 7	
Comprimento (m)	EVM (%)	Comprimento (m)	EVM (%)
150	0,0084	150	0,0136
200	0,0319	200	0,0488
250	0,1511	250	0,1799

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 10 – EVM associados para o cenário XG.fast para os dois cabos utilizados.

XG.fast			
CAT 5e		CAT 7	
Comprimento (m)	EVM (%)	Comprimento (m)	EVM (%)
30	0,0008	30	0,0008
50	0,0018	50	0,0018
70	0,0042	70	0,0041

Fonte: Elaborada pela autora.

Afirmando o bom desempenho da transmissão em modo fantasma, as Tabelas 11 e 12 mostram as média aritméticas entre a transmissão em diferencial e fantasma para os comprimentos de 150 e 30 metros nos cenários G.fast e XG.fast, respectivamente.

Tabela 11 – Comparação do EVM médio entre os canais diferenciais e fantasmas para o cenário G.fast.

G.fast		
Categoria dos cabos	EVM (%)	
	MD	MF
CAT 5e	0,01084	0,00358
CAT 7	0,01362	0,01362

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 12 – Comparação do EVM médio entre os canais diferenciais e fantasmas para o cenário XG.fast.

XG.fast		
Categoria dos cabos	EVM (%)	
	MD	MF
CAT 5e	0,0009	0,0005
CAT 7	0,0008	0,0008

Fonte: Elaborada pela autora.

Apesar dos valores de EVM associados a transmissão em diferencial serem baixos, os resultados de EVM para a transmissão em modo fantasma conseguem ser inferiores, chegando em níveis de no máximo 0,01 por cento. Dessa forma, a partir dos resultados das tabelas vemos que a transmissão em modo fantasma apresenta superioridade na transmissão em relação ao modo diferencial já que não faz com que a transmissão ultrapasse o limite de 8 por cento.

5 Considerações Finais

As investigações propostas neste trabalho mostraram resultados que podem ser levados em consideração na implantação das tecnologias de acesso ao usuário, G.fast e XG.fast. Um resultado importante demonstrado neste trabalho foi que o modo fantasma não necessita de nenhuma técnica de cancelamento de interferência em cenários que utilizam cabos do tipo CAT 7, 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 CAT 7 é a maior robustez à interferências externas, e portanto a blindagem contrabalança a maior suscetibilidade a ruídos externos de sistemas que usam o modo fantasma.

Outro ponto importante investigado nesse trabalho 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 CAT 5e. Neste caso, através do uso de *vectoring* obteve-se taxas de transmissão de 13 e 8 Gbps para os comprimentos de 30 m e 100 m respectivamente, 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.

Seguem sugestões de trabalhos que podem ser desenvolvidos:

- Investigar o efeito de agressores nos dois tipos de cabos utilizados para os padrões XG.fast;
- Investigar da viabilidade do modo fantasma na enésima subcamada de transmissão e desenvolvimento de *setup* de transmissão e recepção do modo fantasma;
- Avaliar o modo fantasma com medições para confirmar os resultados obtidos através das simulações, realizando medições nos mesmos cenários simulados para efeito de comparação entre os resultados;

-
- Fazer a comparação da transmissão em modo fantasma com os outros meios alternativos (*wire-shield* e *split-pair*) para reafirmar que o modo fantasma de fato é uma boa alternativa de investimento para agregar taxa.
 - Investigar o efeito de não uniformidades nos cabos utilizados tanto para os padrões G.fast como XG.fast;
 - Testar a aplicação do modo fantasma em backhaul no cenário de 5G;

6 Artigos publicados

Nessa mesma linha de pesquisa foram publicados os artigos:

- Freitas, M.M.M, Sousa, B.P.T and Souza, D.D.. *Performance analysis for transmission in phantom systems in corporate environments*. In: XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT. SANTARÉM, PA, 2016.
- D. D. Souza, M. M. M. Freitas, B. P. T. Sousa, C. S. Sales, R. M. Rodrigues e J. C. W. A. Costa. Análise do modo fantasma aplicado a sistemas G.fast e XG.fast. In: XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT. São Pedro: [s.n.], 2017
- Marx Freitas, Daynara Souza, Brenda Sousa, Diego Gomes, Claudomiro Sales, R. M. Rodrigues, E. Medeiros e J. C. W. A. Costa. Utilizando a segunda camada do modo fantasma para aprimoramento de aplicações G.fast. In: XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT. São Pedro: [s.n.], 2017

Referências

- CIOFFI, J. et al. Vectored dsls with dsm: The road to ubiquitous gigabit dsls. In: . [S.l.: s.n.], 2006. Citado na página 18.
- COOMANS, W. et al. Xg-fast: Towards 10 gb/s copper access. In: *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 630–635. ISSN 2166-0077. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.
- COOMANS, W. et al. Xg-fast: the 5th generation broadband. *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 12, p. 83–88, Dec 2015. ISSN 0163-6804. Citado na página 17.
- CST. Acessado em 2018. <<https://www.cst.com/>>. Acessado em 19/01/2018. Citado na página 40.
- DRAKULIĆ, S. et al. Comparison of interference mitigation techniques for next generation dsl systems. In: *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 971–976. ISSN 1550-3607. Citado na página 18.
- FOUBERT, W. et al. Exploiting the phantom-mode signal in dsl applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 61, n. 4, p. 896–902, April 2012. ISSN 0018-9456. Citado na página 18.
- GINIS, G.; CIOFFI, J. M. Vectored transmission for digital subscriber line systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 20, n. 5, p. 1085–1104, Jun 2002. ISSN 0733-8716. Citado na página 34.
- GOLDEN HERVÉ DEDIEU, K. S. J. P. *Implementation and Applications of DSL Technology*. [S.l.]: Auerbach Publications, 2007. Citado na página 18.
- GOMES, D. *Transmissão DSL em Phantom Mode: Medições e Avaliação de Desempenho*. Dissertação (Mestrado) — UFPA/ITEC/PPGEE, 2012. Citado 10 vezes nas páginas 19, 26, 27, 29, 31, 32, 33, 34, 39 e 42.
- GUENACH, M. et al. Vectoring in dsl systems: Practices and challenges. In: *2011 IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM 2011*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–6. ISSN 1930-529X. Citado na página 31.
- IKEDA, G. J. X. Avaliação de desempenho na segunda camada de uma transmissão em modo fantasma. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, como requisito final para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista sob orientação do Prof^o. Dr. Claudomiro de Sousa de Sales Junior no ano de 2015. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 24.
- JAKOVLJEVIC, M. et al. 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*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–6. ISSN 1546-1874. Citado na página 18.
- JAKOVLJEVIC, M. et al. 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*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–6. ISSN 1546-1874. Citado na página 28.

- LAFATA, P. Estimations of g.fast transmission performance over phantom modes. In: *2015 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–5. Citado na página 19.
- LI, X.; PENG, D.; WANG, G. A novel measurement of error vector magnitude for td-lte termination. In: *2012 5th International Congress on Image and Signal Processing*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1745–1749. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- MAES, J.; NUZMAN, C. J. The past, present, and future of copper access. *Bell Labs Technical Journal*, v. 20, p. 1–10, 2015. ISSN 1089-7089. Citado na página 17.
- STARR JOHN M. CIOFFI, P. J. S. T. *Undertanding Digital Subscriber Line Technology*. [S.l.]: Library of Congress Catalog-in-Publication Data, 1999. Citado na página 31.
- TANENBAUM, W. *Rede de computadores*. [S.l.]: Pearson Education do Brasil, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.