



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA

**Daynara Dias Souza**

# **Análise do modo de transmissão fantasma de segunda camada aplicado a sistemas G.fast**

Belém – Pará

2018

Daynara Dias Souza

# **Análise do modo de transmissão fantasma de segunda camada aplicado a sistemas G.fast**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do título de Engenheiro Eletricista. Instituto de Tecnologia. Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica. Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Menezes Rodrigues

Coorientador: Prof. Dr. Gilvan Soares Borges

Belém – Pará

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)

---

S719a Souza, Daynara

Análise do modo de transmissão fantasma de segunda camada aplicado a sistemas G.fast /  
Daynara Souza. - 2018.  
72 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 Rodrigues

Coorientação: Prof. Dr. Gilvan Soares.

1. Modo fantasma. 2. Segunda camada. 3. Taxa agregada. 4. Vectoring. 5. EVM. I.  
Rodrigues, Roberto , *orient.* II. Título

---

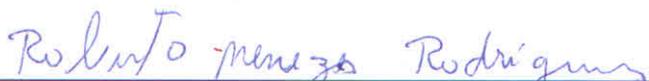
Daynara Dias Souza

## **Análise do modo de transmissão fantasma de segunda camada aplicado a sistemas G.fast**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do título de Engenheiro Eletricista. Instituto de Tecnologia. Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica. Universidade Federal do Pará.

Trabalho aprovado. Belém – Pará, 15 de fevereiro de 2018.

Conceito: *EXC*



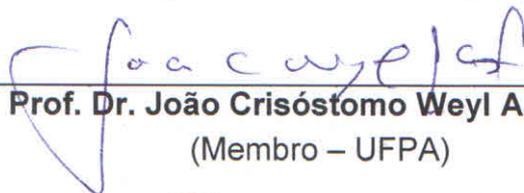
**Prof. Dr. Roberto Menezes Rodrigues**

(Orientador – UFPA)



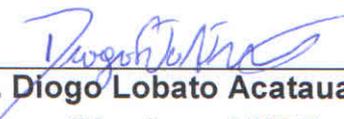
**Prof. Dr. Gilvan Soares Borges**

(Coorientador – UFPA)



**Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl A. Costa**

(Membro – UFPA)



**Prof. Dr. Diogo Lobato Acatuassú Nunes**

(Membro – UFPA)

Belém – Pará

2018

*Este trabalho é dedicado à minha mãe Francinete Dias dos Santos,  
que sempre trabalhou para proporcionar um bom futuro aos seus filhos.*

# Agradecimentos

Agradeço à minha mãe, Francinete dos Santos, por todo o esforço, pela educação que me passou e por sempre acreditar em mim. À minha irmã Deysi Souza e irmão Deyverson Souza, por me incentivarem e apoiarem.

Ao Professor Dr. João Weyl por todo incentivo e apoio no laboratório de eletromagnetismo aplicado (LEA). Ao meu orientador Professor Dr. Roberto Menezes pela dedicação e paciência. Ao Professor Dr. Claudomiro Sales, que me selecionou para participar do LEA.

Aos amigos e colegas de trabalho em especial Marx Miguel, André Fernandes, Aline Ohashi, Waldeir Brito, Wederson Medeiros, Kárytha Nascimento, Daniel Levy, Moisés Felipe, Reginaldo Santos e Leonardo Ramalho. Ao Professor Dr. Gilvan Borges e ao Professor Dr. Diogo Acatauassú, pelo conhecimento passado e também por participarem como membros da banca.

Agradeço aos meus colegas e amigos de profissão que fiz durante este período da graduação Alisson Ribeiro, Raphael Saldanha e Jéssica Newar.

Às instituições CNPq e Ericsson pelo suporte financeiro enquanto bolsista.

*“Sonhos determinam o que você quer.  
Ação determina o que você conquista.”  
(Aldo Novak)*

# Resumo

O chamado modo fantasma é um dos modos de transmissão alternativos que utilizam a sinalização em modo comum para aumentar a taxa de transmissão de sistema tradicional em modo diferencial. Em especial, ele permite a formação de camadas de transmissão fantasma, onde novos canais fantasmas podem ser obtidos a partir do cascadeamento de canais anteriormente realizados. Por exemplo, quando são utilizadas todas as camadas do modo fantasma em um cabo de 4 pares, haverá 3 canais virtuais adicionais, dois de primeira camada e um de segunda camada, além dos diferenciais, obtendo-se assim um total de 7 canais de transmissão a partir dos mesmos 4 pares. Apesar disso, os diversos trabalhos encontrados na literatura que exploram o modo fantasma como um meio de aprimorar as aplicações da nova tecnologia de transmissão cabeada de banda larga chamada G.fast abordam somente a primeira camada nos seus estudos. Assim sendo, neste trabalho será analisado a viabilidade de utilizar uma camada adicional do modo fantasma em transmissões G.fast. Demonstra-se através de simulações que o sistema em modo fantasma como um todo (i.e., canais diferenciais, fantasmas de primeira e segunda camada) pode atingir taxas de bit de até 15 Gbps em comprimentos de 30 m quando técnicas de supressão de diafonia são aplicadas. É também mostrado que o modo fantasma tem desempenho superior a outros modos de transmissão alternativos (i.e., *split-pair* e *wire-shield*) na maioria dos cenários investigados. Por fim, este trabalho também investiga a segunda camada através de medições em CAT5e de 48 m e compara com os resultados obtidos de simulações para 50 m. O resultado da taxa agregada de transmissão com *vectoring* da simulação foi em torno de 3,17 Gbps a mais que o da medição.

**Palavras-chaves:** Modo fantasma. Segunda camada. Taxa agregada. Vectoring. EVM.

# Abstract

The so-called phantom mode is one of the alternative transmission modes that uses common mode signaling to increase the transmission rate of traditional systems that use differential mode. In particular, it allows the formation of phantom transmission layers, where new phantom channels can be obtained from the cascading of previously realized channels. For example, when all the phantom mode layers are used on a 4-pair cable, there will be 3 additional virtual channels, two first layer and one second layer, in addition to the differentials, thus obtaining a total of 7 transmission channels from the same 4 pairs. In spite of this, the various works found in the literature that explore phantom mode as a means of improving the applications of the new broadband cabling technology called G.fast approach only the first layer in their studies. Thus, in this work the feasibility of using an additional layer of phantom mode in G.fast transmissions will be analyzed. It is demonstrated through simulations that the whole phantom mode system (ie, differential channels, first and second layer phantoms) can achieve bit rates up to 15 Gbps in lengths of 30 m when crosstalk suppression techniques (vectoring) are applied. It is also shown that the phantom mode performs better than other alternative transmission modes (i.e., split-pair and wire-shield) in most scenarios investigated. Finally, this work also investigates the second layer through measurements in CAT5e of 48 m and compares with the results obtained from simulations for 50 m. The result of the aggregate transmission rate with vectoring of the simulation was around 3.17 Gbps more than that of the measurement.

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

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Rede de acesso híbrida: Evolução das tecnologias de cobre. . . . .	20
Figura 2 – Cabo de pares trançados. . . . .	25
Figura 3 – Modo de transmissão diferencial. . . . .	26
Figura 4 – Parâmetros primários de uma linha de comprimento $dx$ . . . . .	26
Figura 5 – Configuração de transmissão de rede de duas portas. . . . .	27
Figura 6 – NEXT e FEXT no modo de transmissão diferencial. . . . .	28
Figura 7 – Faixas de utilizadas <i>upstream</i> e <i>downstream</i> em cada evolução do sistema DSL. . . . .	28
Figura 8 – Representação das correntes e tensões que acoplam nos dois lados da segunda linha devido indução da primeira linha. . . . .	29
Figura 9 – Conversão de modo diferencial para o modo comum caso $Z1 \neq Z2$ e $Ic \neq 0$ . . . . .	29
Figura 10 – Tipos de <i>crosstalk</i> em sistemas DSL. . . . .	30
Figura 11 – Rede de duas portas descrita por matriz de espalhamento. . . . .	31
Figura 12 – Rede de quatro portas descrita por matriz de espalhamento. . . . .	32
Figura 13 – Formas de sinalização: a) Modo Simples. b) Modo comum. c) Modo diferencial. . . . .	33
Figura 14 – Cancelamento da interferência ao utilizar a sinalização em modo diferencial. . . . .	33
Figura 15 – Configuração para transmissão em sete canais utilizando o modo <i>split-pair</i> . . . . .	34
Figura 16 – Configuração para transmissão em oito canais utilizando o modo <i>wire-shield</i> . . . . .	34
Figura 17 – Configuração para transmissão em seis canais utilizando a primeira camada do modo fantasma, MF1. . . . .	35
Figura 18 – Configuração para transmissão em sete canais utilizando a segunda camada do modo fantasma, MF2. . . . .	36
Figura 19 – Modelo de um sistema de comunicação geral. . . . .	36
Figura 20 – Particionamento da banda de um canal em vários subcanais. . . . .	37
Figura 21 – (a) Diagrama de constelação para 16-QAM. (b) Definição do EVM. . . . .	39
Figura 22 – Nomenclatura das portas transmissoras e receptoras. . . . .	40
Figura 23 – Metodologia para obtenção das métricas de desempenho. . . . .	41
Figura 24 – Metodologia de simulação no <i>software</i> CST . . . . .	42
Figura 25 – (a) Modelo equivalente do cabo criado no <i>software</i> CST; (b) Configuração de dois transformadores para criar um transformador com <i>center-tap</i> no <i>software</i> CST. . . . .	42

Figura 26 – <i>Setup</i> de simulação do modo fantasma de primeira camada no <i>software</i> CST. . . . .	43
Figura 27 – <i>Setup</i> de simulação do modo fantasma de segunda camada na presença de AXT no <i>software</i> CST. . . . .	43
Figura 28 – <i>Setup</i> de simulação do modo <i>split-pair</i> na presença de AXT no <i>software</i> CST. . . . .	44
Figura 29 – <i>Setup</i> de simulação do modo <i>wire-shield</i> no <i>software</i> CST. . . . .	44
Figura 30 – <i>Setup</i> de medição dos canais diferenciais e fantasma de 1ª camada. . . . .	45
Figura 31 – (a) O <i>setup</i> esquemático medição dos canais diferenciais e fantasma de 1ª camada; (b) O <i>setup</i> esquemático de medição do canal fantasma de 2ª camada . . . . .	45
Figura 32 – Configuração para medição de FT dos canais. . . . .	46
Figura 33 – (a) Configuração para medição de FEXT entre dois canais diferenciais. (b) Configuração para medição de FEXT entre o canal fantasma de 1ª camada e o canal diferencial. (c) Configuração para medição de FEXT entre os canais fantasmas de 1ª camada. . . . .	47
Figura 34 – (a) Configuração para medição de CM entre o canal fantasma de 1ª camada e o canal diferencial. (b) Configuração para medição de CM entre o canal fantasma de 2ª camada e o canal diferencial. (c) Configuração para medição de CM entre o canal fantasma de 2ª camada e o fantasma de 1ª camada. . . . .	48
Figura 35 – (a) Conectores de calibração para os canais diferenciais (Dif) e fantasmas de 1ª camada (Fant): T - <i>through</i> ; S - <i>short</i> ; O - <i>open</i> ; L - <i>load</i> (100 Ω). (b) Conectores de calibração para o canal fantasma de 2ª camada (FF): T - <i>through</i> ; O - <i>open</i> ; L - <i>load</i> (100 Ω); S - <i>short</i> . (c) Plano de calibração; . . . . .	49
Figura 36 – Visão transversal da configuração do sistema Ethernet agressor produzindo interferência ( <i>alien crosstalk</i> ). . . . .	51
Figura 37 – Diferentes impedâncias de carga e fonte dos canais fantasmas: . . . . .	52
Figura 38 – Configurações vertical e diagonal. . . . .	53
Figura 39 – Função de transferência dos canais diferencial, e fantasma de 1ª e fantasma 2ª camada casados nas configurações vertical e diagonal. . . . .	53
Figura 40 – Funções de transferência e FEXTs na configuração vertical dos canais fantasmas: . . . . .	54
Figura 41 – Funções de transferência e FEXTs na configuração diagonal dos canais fantasmas: . . . . .	55
Figura 42 – Taxas de todos os canais do MF2 nas configurações verticais e diagonais: . . . . .	56
Figura 43 – Taxas agregada para os modos de transmissão diferencial(MD), fantasma de 1ª camada (MF1) e fantasma de 2ª camada (MF2): . . . . .	57

Figura 44 – Ganho de taxa de transmissão percentual entre os modos MF2, MF1 e MD. . . . .	58
Figura 45 – Taxas agregadas de transmissão quando é utilizada a 2ª camada do modo fantasma e comparação com a 1ª camada. Cenários com e sem agressor em um cabo sem blindagem para diferentes comprimentos. . .	59
Figura 46 – Taxas agregadas de transmissão quando é utilizada a 2ª camada do modo fantasma e comparação com a 1ª camada. Cenários com e sem agressor em um cabo com blindagem para diferentes comprimentos. . .	59
Figura 47 – FT e FEXTs de um canal do modo SP em cabo de 150 m sem blindagem.	61
Figura 48 – FT e FEXTs de um canal do modo WS em cabo de 150 m com blindagem.	61
Figura 49 – Taxas agregadas de transmissão quando é utilizada o modo SP e MF2. Cenários com e sem agressor em um cabo de 150 m sem blindagem. . .	62
Figura 50 – Taxas agregadas de transmissão quando é utilizada o modo WS e MF2. Cenários com e sem agressor em um cabo de 150 m com blindagem. . .	62
Figura 51 – Medições de FT e FEXTs do canal diferencial. . . . .	64
Figura 52 – Medições de FT e FEXTs do canal fantasma de 2ª camada. . . . .	64
Figura 53 – Medições de FT e FEXTs do canal fantasma de 2ª camada. . . . .	64
Figura 54 – Taxas agregadas por canal do MF2 no cenário de medição. . . . .	65
Figura 55 – Taxas agregadas de transmissão no cenário de medição do MD, MF1 e MF2. . . . .	66

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Crescimento de tráfego de internet ao longo dos anos e expectativa para 2021. . . . .	19
Tabela 2 – Parâmetros utilizados para cálculo da taxa e EVM. . . . .	50
Tabela 3 – Comprimento do trançado dos pares do CAT5e. . . . .	50
Tabela 4 – Comprimento do trançado (mm) dos pares escolhidos para criar os MF1s nas configurações diagonal e vertical . . . . .	56
Tabela 5 – EVM(%) médio por canal na presença ou na ausência de <i>alien crosstalk</i>	60
Tabela 6 – EVM(%) médio na presença ou na ausência de <i>alien crosstalk</i> em CAT5e de 150 m sem blindagem. . . . .	63
Tabela 7 – EVM(%) médio na presença ou na ausência de <i>alien crosstalk</i> em CAT5e de 150 m com blindagem. . . . .	63
Tabela 8 – EVM(%) médio do modo fantasma de 2 <sup>a</sup> camada de medições em CAT5e de 48 m. . . . .	65

# Lista de abreviaturas e siglas

AWG	<i>American Wire Gauge</i>
AWGN	<i>Additive white Gaussian noise</i>
AXT	<i>Alien crosstalk</i>
BBU	<i>Baseband Unit</i>
CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate</i>
CM	Conversão de modo
CST	<i>Computer Simulation Technology</i>
DMT	<i>Discrete Multitone</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
DUT	<i>Device under test</i>
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i>
FEXT	<i>Far-End Crosstalk</i>
FT	Função de transferência
FTTH	<i>Fiber-to-the-Home</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
MD	Modo diferencial
MF1	Modo fantasma de 1ª camada
MF2	Modo fantasma de 2ª camada
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
NEXT	<i>Near-End Crosstalk</i>
SNIR	<i>Signal-to-Noise-plus-Interference Ratio</i>
SP	Modo <i>split-pair</i>

STP	<i>Shielded Twisted Pair</i>
UTP	<i>Unshielded Twisted Pair</i>
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i>
WS	<i>Modo wire-shield</i>

# Lista de símbolos

$L$	Indutância por unidade de comprimento
$G$	Condutância por unidade de comprimento
$C$	Capacitância por unidade de comprimento
$R$	Resistência por unidade de comprimento
$N$	Número de pares trançados
$\omega$	Frequência angular
$f$	Frequência
$Z_0$	Impedância característica
$Z_S$	Impedância interna de fonte
$Z_L$	Impedância de carga
$V_s$	Tensão da fonte
$V_s$	Tensão da fonte
$\alpha$	Constante de atenuação
$\beta$	Constante de fase
$\gamma$	Constante de propagação
$a$	Onda incidente
$b$	Onda refletida
$S_{11}$	Parâmetro de espalhamento na porta 1
$S_{12}$	Parâmetro de espalhamento da porta 2 na porta 1
$S_{21}$	Parâmetro de espalhamento da porta 1 na porta 2
$S_{22}$	Parâmetro de espalhamento na porta 2
$H(f)$	Função de transferência
$\delta$	Constante da restrição de potência transmissão

$\Delta_f$	Subcanais ou tons em Hz
$\Gamma$	Gap de <i>SNIR</i>
$\Lambda$	Matriz que contém os elementos da diagonal principal de $\mathbf{H}$
$\rho$	Potência máxima utilizada a transmissão
$\sigma^2$	Densidade espectral de potência ruído Gaussiano branco aditivo
kHz	Quilohertz
MHz	Megahertz
dB	Decibel
%	Por cento
Gbps	Gigabits por segundo
Mbps	Megabits por segundo
m	Metro
mm	Milímetro
$\Omega$	Ohm
$j$	Unidade imaginária ( $\sqrt{-1}$ )

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>1.1</b>	<b>Contexto</b>	<b>19</b>
<b>1.2</b>	<b>Trabalhos relacionados</b>	<b>21</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>23</b>
<b>1.4</b>	<b>Organização do Trabalho</b>	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Características do meio de transmissão em sistemas DSL</b>	<b>25</b>
2.1.1	Características elétricas do par trançado	26
2.1.2	Função de transferência e <i>Crosstalk</i>	27
2.1.2.1	<i>Alien crosstalk</i> - AXT	30
2.1.3	Parâmetros de espalhamento	30
<b>2.2</b>	<b>Modos de transmissão alternativos</b>	<b>32</b>
2.2.1	Formas de sinalização	32
2.2.2	Modos <i>Split-Pair</i> (SP) e <i>Wire-Shield</i> (WS)	33
2.2.3	Modo fantasma de primeira (MF1) e segunda camada (MF2)	35
<b>2.3</b>	<b>Métricas de desempenho</b>	<b>36</b>
2.3.1	Taxa de Transmissão	37
2.3.1.1	Técnicas de mitigação de interferência – <i>Vectoring</i>	38
2.3.2	Magnitude do vetor de erro	39
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>40</b>
<b>3.1</b>	<b>Cenário de simulação</b>	<b>41</b>
<b>3.2</b>	<b>Cenário de medição</b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>50</b>
<b>4.1</b>	<b>Resultados do cenário de simulação</b>	<b>51</b>
4.1.1	CT 1: Análise da impedância característica dos canais fantasmas de primeira e segunda camada	51
4.1.2	CT 2: Influência do comprimento do trançado dos pares na capacidade de transmissão do MF2	52
4.1.3	CT 3: Comparação dos modos MF2, MF1 e MD com ou sem <i>vectoring</i>	56
4.1.4	CT 4: Comparação dos modos MF2 e MF1 sob a influência ou não de sistema agressor	58
4.1.5	CT 5: Comparação dos modos MF2, MF1, SP e WS sob a influência ou não de sistema agressor.	60

4.2	Resultados do cenário de medição . . . . .	63
5	CONCLUSÃO . . . . .	67
5.1	Artigos publicados . . . . .	68
	REFERÊNCIAS . . . . .	70

# 1 Introdução

## 1.1 Contexto

O aumento de dispositivos conectadas à internet tem ocorrido a taxas superiores ao crescimento da população e ao número de usuários, respectivamente 10 %, 1.1 % e 7 % de taxa de crescimento anual composta (CAGR) (CISCO, 2017). O advento de novos serviços e aplicações como vídeo *online* e conceitos como “Internet das Coisas” - IoT (*Internet of Things*) têm contribuído para o intenso crescimento de tráfego nos últimos anos. A Tabela 1 resume o histórico de tráfego de internet de 1992 até 2016, bem como o tráfego esperado para 2021 (CISCO, 2017).

Tabela 1 – Crescimento de tráfego de internet ao longo dos anos e expectativa para 2021.

Ano	Tráfego global de internet
1992	100 GB por dia
1997	100 GB por hora
2002	100 GB por segundo
2007	2.000 GB por segundo
2016	26.600 GB por segundo
2021	105.800 GB por segundo

Fonte – (CISCO, 2017).

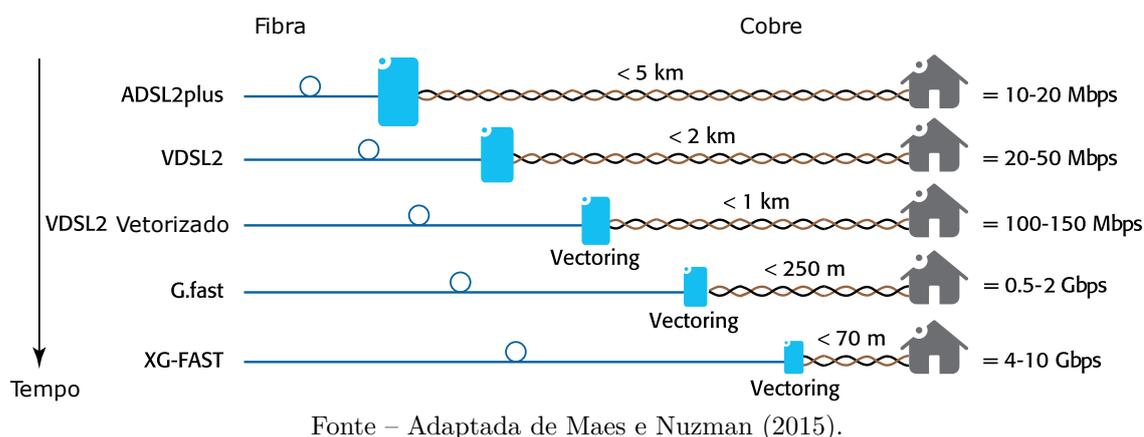
Essa crescente demanda por altas taxas de dados é a motivação principal para a criação de soluções e novos padrões que permitam dar vazão de forma satisfatória a essa demanda. A tecnologia que está em desenvolvimento atualmente é a 5<sup>a</sup> geração de banda larga (5GBB) de fibra e cobre, capaz entregar taxas de até 10 Gbps. Tradicionalmente, a rede de cobre complementa de forma estratégica a rede de fibra, conhecida como sistemas híbridos de fibra-cobre, em que a fibra gradualmente se aproxima do consumidor final, até um momento no futuro em que a fibra chegará diretamente a casa do usuário - cuja sigla em inglês é FTTH (*Fiber-To-The-Home*). As versões parciais do FTTH, são chamadas de FTTx, onde x é substituído por uma letra que indica o ponto a partir do qual a rede fibra é substituída pela de cobre. A parte de cobre da rede vem historicamente da tecnologia conhecida como “linha de acesso digital do assinante” - DSL (*Digital subscriber line*) e hoje suas versões mais recentes recebem o nome de G.fast e XG.fast (COOMANS et al., 2015).

Dados recentes indicam que houve um crescimento global de 34,3 % de 2016 a 2017 do número de assinantes que usam FTTx em contraposição a redes exclusivamente

de cobre (TOPIC, 2017). Essa tendência de aumento de usuários de redes híbridas deve se manter nos próximos anos, com a conseqüente redução do número de usuários das tecnologias baseadas somente em cobre. A Figura 1 mostra a evolução esperada das tecnologias das redes FTTx, culminando no sistema XG.fast no qual os comprimentos da rede de cobre serão menores que 70 metros, com bandas de frequências de 500 MHz, chegando a taxas de até 10 Gbps.

A tecnologia atual de cobre, G.fast, corresponde à 4ª geração de banda larga (4GBB). O padrão G.fast estabelecido pelo ITU tem duas versões, uma padronizada para faixas de frequências de até 106 MHz, a qual atinge taxas agregada de dados de até 1 Gbps, e outra na faixa de frequência de 212 MHz padronizada para atingir até 2 Gbps, ambas utilizando cabos de cobre de até 250 m e técnicas de pré-codificação de canal como o *vectoring* (DRAKULIĆ et al., 2015) (STROBEL; JOHAM; UTSCHICK, 2015).

Figura 1 – Rede de acesso híbrida: Evolução das tecnologias de cobre.



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

Com o objetivo de continuar a utilizar a rede de cobre já instalada, uma proposta que vem sendo pesquisada é a utilização de modos de transmissão alternativos, que tem como característica principal o aumento do número de canais disponíveis em um cabo, sem a necessidade de pares físicos adicionais. Desses modos de transmissão, três são amplamente conhecidos, sendo eles o modo *split-pair*, modo *wire-shield* e o modo fantasma.

No modo *split-pair* (SP) e *wire-shield* (WS), cada fio do par é usado como um canal em modo comum, com a diferença que o modo SP usa um dos fios do cabo como referência para os outros canais, enquanto no modo WS a blindagem externa do cabo

é usada como referência. Assim o modo WS tem um canal a mais que o modo SP. Em ambos, um maior número de canais em modo comum é obtido em comparação com o modo diferencial, obtendo-se assim taxas de dados maiores que a transmissão diferencial por par. No entanto, para o SP e WS é obrigatório o uso de *vectoring*, devido ao aumento da interferência entre os canais.

Outra proposta que vem sendo analisada é a utilização do modo fantasma (LAFATA, 2015). É uma técnica que adiciona canais diferenciais virtuais à transmissão através de sinalização em modo comum, aumentando o número de canais disponíveis em um cabo sem a necessidade de pares trançados adicionais, essa tecnologia de transmissão é analisada desde meados do século XX (GABARA, 2001). Uma característica interessante do modo fantasma é a sua capacidade de cascatear os canais adicionais para criar novos. Por exemplo, para cabos CAT5e (quatro pares), duas camadas de fantasmas podem ser implementadas, gerando um total de sete canais, no qual 3 são fantasmas – dois de primeira camada e um de segunda camada.

## 1.2 Trabalhos relacionados

Nesta seção são mostrados os principais trabalhos encontrados que investigam os modos de transmissão alternativos que serão objeto de estudo deste trabalho citados anteriormente: o *split-pair*, o *wire-shield* e o modo fantasma.

No artigo publicado por Lee et al. (2007) é proposto o modo *split-pair* (SP). Nele é comparado através de simulações o desempenho da transmissão com excitação em modo comum em relação ao modo de transmissão diferencial utilizado atualmente em sistemas DSL. O artigo conclui que em transmissões MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), que consideram o uso de técnicas de mitigação de interferência, transmissões em modo comum atingem taxas superiores ao modo diferencial, estimando até 1 Gbps para o modo SP em comparação com 0.68 Gbps do modo diferencial ao longo de quatro pares trançados de um cabo categoria 3 de 300 m até 35 MHz. No entanto, não foi avaliado o seu desempenho em cenários com interferências externas, uma investigação interessante a ser feita devido a utilização de sinais em modo comum.

Já Jakovljevic et al. (2009) faz a comparação do modo *wire-shield* (WS), que possui um canal a mais que o modo SP e só pode ser implementado em cabos blindados, com o modo diferencial através de dados medidos e modelados publicados por Jakovljevic et al. (2008). É realizado o cálculo de taxas de transmissão considerando cenários com ou sem interferências externas. O artigo conclui dizendo que sem interferências externas, transmissões MIMO usando o modo WS atingem aproximadamente o dobro de taxa agregada em comparação com o modo diferencial. Porém na presença de interferências externas, o WS tem a desvantagem de que sua taxa agregada está diretamente associada

à efetividade da sua blindagem, apresentando taxas menores que o modo diferencial se a blindagem externa não for de qualidade suficiente.

O trabalho de Foubert et al. (2012) analisa a transmissão em modo fantasma como um modo próprio do cabo quad, assim como o modo diferencial. O artigo mostra através de simulações que o canal fantasma adicional é ortogonal aos canais diferenciais, o que teoricamente implicaria em nenhuma interferência entre ele e os canais diferenciais existentes. Porém através de medições até 12 MHz, é mostrado que o *crosstalk* entre os modos é pequeno mas não desprezível, constando que a diferença entre a função de transferência e o *crosstalk* passa de 45 dB em 1 MHz para 23 dB em 12 MHz. Este artigo conclui que transmissão simultânea dos modos diferenciais e fantasma aumentaria bastante a taxa de transmissão do sistema, entretanto nenhuma estimativa de taxa foi realizada que comprovasse isso.

Já Lafata (2015) analisa o potencial do modo fantasma em ser utilizado em aplicações G.fast, considerando suas duas versões, até 106 MHz e até 212 MHz, para cabos de 26 AWG do tipo quad com 100 m de comprimento. O artigo investiga cenários com ou sem mitigação de interferência e conclui que ao ser transmitido o modo fantasma, a interferência causada pelo canal fantasma nos canais diferenciais faz a taxa dos canais diferenciais diminuírem em relação ao sistema convencional, sem o modo fantasma. Dessa forma, o ganho de taxa agregada de transmissão é reduzido, o que não compensaria os custos adicionais com o *setup* do modo fantasma. A conclusão final do artigo, dessa forma, é que não há grande vantagem em utilizar esse modo de transmissão sem técnicas de cancelamento de *crosstalk*.

A Alcatel-Lucent propôs as primeiras aplicações comerciais do uso do modo fantasma de transmissão para taxa de dados de 300 Mbps utilizando 2 pares e 1 canal fantasma, e 910 Mbps utilizando 4 pares, 2 canais fantasmas de primeira camada e 1 canal fantasma de segunda camada. Entretanto, foram feitas apenas demonstrações, sem grandes informações de implementação e utilização prática do modo fantasma de transmissão pela Alcatel-Lucent. Além disso, essas taxas são inferiores ao esperado para os sistemas G.fast e XG.fast.

Na dissertação de Gomes (2012) foi proposto um *setup* de medição de função de transferência, conversão de modo e FEXT dos canais diferenciais e fantasmas de primeira camada na faixa de frequência de até 300 MHz. Foram feitas medidas em um cabo CAT5e de 50 m, analisando qual a melhor escolha de pares para inserir os canais fantasmas de primeira camada e também a taxa de transmissão agregada no cenário G.fast de 200 MHz considerando ou não *vectoring*. Entretanto, esse trabalho não utilizou todo o potencial do modo fantasma em um cabo de 4 pares, já que não investigou a segunda camada.

A dissertação de Ohashi (2017) analisa o modo fantasma de transmissão em aplicações 5G, como uma alternativa de baixo custo para aumento de taxa agregada no *fronthaul* de cobre. O diferencial desse trabalho é que além de investigar o desempenho do

sistema usando o modo fantasma em altas frequências, até 500 MHz, o mesmo investiga o impacto de não uniformidades do cabo no aumento do FEXT entre os canais diferenciais e o fantasma. São analisadas três tipos de não uniformidades, a variação na distância entre o centro dos pares, o *pigtail* e o trançado não-uniforme em cabos de 10 m a 100 m. Dentre as conclusões do trabalho ressalta-se que variações no centro do par teve impacto dominante para redução da taxa agregada e que é importante considerar a presença de não-uniformidades a fim de obter uma estimativa mais realística da taxa agregada de transmissão do sistema. Entretanto, o trabalho não investigou o efeito de não uniformidades para outras camadas do modo fantasma, pois foram utilizados apenas dois pares trançados nas análises, obtendo-se assim dois canais diferenciais e um canal fantasma de primeira camada.

O trabalho de conclusão de curso de Ikeda (2015), que fazia parte do grupo de pesquisa no qual este trabalho pertence, investigou através de simulação no *software* CST (*Computer Simulation Technology*) o ganho de taxa de transmissão do modo fantasma de transmissão em relação ao modo diferencial em um cabo de 4 pares do tipo CAT5e com 100 m no cenário G.fast de 100 MHz, com e sem *vectoring*. Contudo, o *setup* de simulação do modo fantasma neste trabalho não é implementável porque não pode transmitir simultaneamente os canais diferenciais e os modos fantasmas de primeira e fantasma e segunda camada. É utilizado o artifício no qual para a transmissão do modo fantasma, os pares de cada lado do circuito fantasma eram curto-circuitados para obtenção separadamente das funções de transferência e FEXTs.

Dos vários trabalhos descritos anteriormente, percebe-se que a segunda camada do modo fantasma ainda é pouco explorada, apenas Ikeda (2015) e Alcatel-Lucent mostraram resultados sobre a utilização da mesma. No entanto, no primeiro caso com um *setup* que apenas mostrava o potencial da utilização da segunda camada e no segundo para taxas bem inferiores ao padrão G.fast e XG.fast. Além disso, não há trabalhos que analisem o desempenho do modo fantasma na presença de interferências externas e o comparem com outros modos de transmissão alternativos, SP e WS, também propostos como soluções para o aumento da taxa de dados ao usuário.

### 1.3 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo analisar a taxa de transmissão e distorção do sinal no cenário G.fast do modo de transmissão alternativo fantasma de segunda camada, utilizando um *setup* de simulação que permita a transmissão simultânea dos canais diferenciais e fantasmas. Bem como comparar o seu desempenho com o modo de transmissão diferencial atualmente utilizado e com os modos *split-pair* e *wire-shield*. Os objetivos específicos incluem:

- Definir um *setup* de simulação no *software* CST para os modos *split-pair*, *wire-shield* e fantasma de primeira e segunda camada.
- Definir um *setup* de medição do modo fantasma de segunda camada.
- Analisar o impacto da utilização de uma nova camada do modo fantasma.
- Analisar o desempenho do modo fantasma de segunda camada na presença de interferências externas.
- Comparar o modo fantasma de segunda camada com os modos de transmissão *split-pair* e *wire-shield* considerando ou não interferências externas.

## 1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado como listado a seguir:

O capítulo 2 falará sobre o funcionamento dos modos de transmissão fantasma, *split-pair* e *wire-shield* assim como a caracterização por parâmetros de espalhamento. Além de descrever as métricas de desempenho que serão utilizadas, taxa de transmissão e EVM.

O capítulo 3 descreverá os procedimentos utilizados para gerar os resultados de funções de transferência, conversão de modo e FEXTs simulados no *software* CST e medidos em laboratório. Além de descrever os procedimentos realizados com esses resultados para calcular a taxa de transmissão e EVM utilizando um simulador de canal implementado no *software* MATLAB.

O capítulo 4 apresentará os resultados obtidos das medições e simulações nos cenários G.fast e as análises realizadas.

Por fim o capítulo 5 mostrará a conclusão do trabalho.

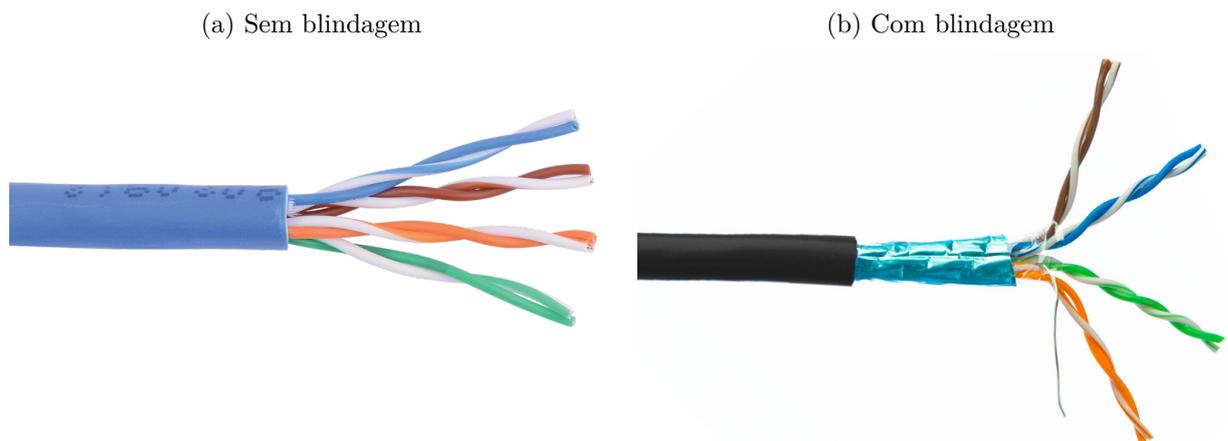
## 2 Referencial teórico

Este capítulo tem por objetivo apresentar como os modos de transmissão alternativos, *split-pair*, *wire-shield*, e o modo fantasma de 1ª e 2ª camada são configurados. No entanto, é necessário abordar primeiramente alguns aspectos da tecnologia DSL, como a caracterização desse meio de transmissão, função de transferência e *crosstalk*.

### 2.1 Características do meio de transmissão em sistemas DSL

O meio físico usado pelo sistema DSL são cabos de pares trançados. Nesse trabalho serão utilizados dois tipos de cabo de pares trançados: o CAT5e sem blindagem e com blindagem, mostrados na Figura 2. Os cabos sem blindagem (UTP - *Unshielded Twisted Pair*), como mostra a Figura 2a, não possuem blindagem metálica, são mais baratos e consequentemente esse tipo de cabo é muito popular. Já os cabos com blindagem (STP - *Shield Twisted Pair*) possuem uma blindagem metálica que envolve todos os pares, como ilustra na Figura 2b. Existem também os que possuem blindagem em cada par, que proporciona maior proteção e por isso esses cabos são usados em ambientes com fortes interferências eletromagnéticas. Porém, eles têm a desvantagem de serem mais caros e necessitarem de aterramento.

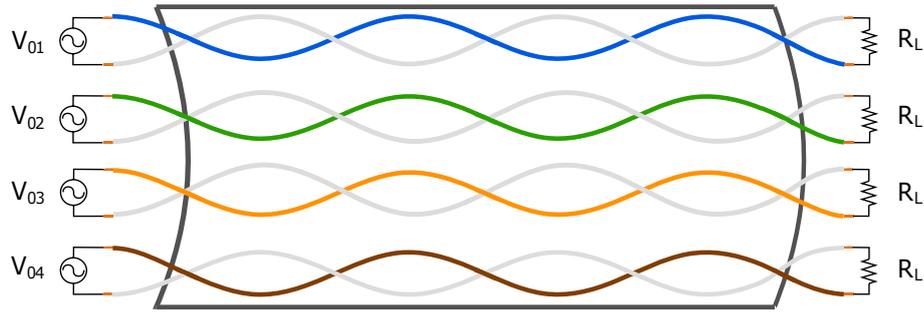
Figura 2 – Cabo de pares trançados.



Fonte – (a) (WANG, 2017). (b) (CABLEWHOLESALE, 2017).

Em sistemas DSL, é utilizado o modo de transmissão diferencial (MD), em que cada par trançado do cabo é usado para transmitir um canal de comunicação independente. A Figura 3 representa a transmissão MD em um cabo com quatro pares.

Figura 3 – Modo de transmissão diferencial.

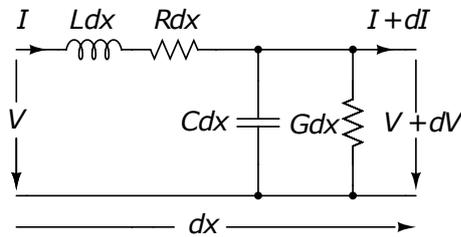


Fonte – Elaborada pela autora.

### 2.1.1 Características elétricas do par trançado

Os parâmetros primários de um par trançado podem ser descritas ao considerar um pequeno comprimento uniforme da linha como um filtro passa-baixas como mostra a Figura 4, que é composto pela concatenação de uma impedância em série, resistência  $Rdx$  e indutância  $Ldx$ , e uma impedância em paralelo, capacitância  $Cdx$  e admitância  $Gdx$ . Cada parâmetro  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $G$  é definido por unidade de comprimento e chamados de parâmetros primários (veja Figura 4).

Figura 4 – Parâmetros primários de uma linha de comprimento  $dx$ .



Fonte – (GOLDEN; DEDIEU; JACOBSEN, 2006).

Da Figura 4, temos:

$$\begin{aligned} dV &= -(R + jL\omega)Idx \\ dI &= -(G + jC\omega)Vdx \end{aligned} \quad (2.1)$$

A partir dos parâmetros primários, é possível deduzir os parâmetros secundários da linha,  $\gamma$  e  $Z_0$ . A constante de propagação  $\gamma$  é definida por:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + jL\omega)(G + jC\omega)} \quad (2.2)$$

onde  $\alpha$  representa a constante de atenuação e  $\beta$  é a constante de fase, sendo  $\gamma$  uma variável no domínio da frequência. Já a impedância característica  $Z_0$  do meio é definida por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}}. \quad (2.3)$$

Este parâmetro indica a oposição do canal ao fluxo de corrente alternada. Em sistemas DSL, como são utilizadas altas frequências,  $L\omega$  se torna dominante em relação a  $R$ , e  $G$  pode ser desconsiderado em relação a  $C\omega$ , sendo assim, (2.3) pode ser aproximada por (2.4), indicando que para altas frequências a impedância característica da linha é resistiva (GOLDEN; DEDIEU; JACOBSEN, 2006).

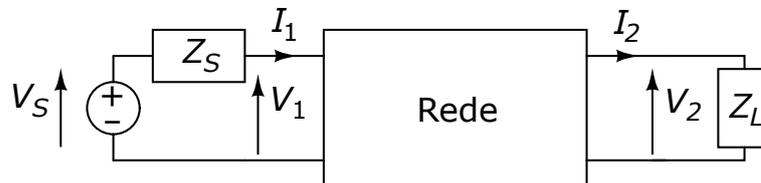
$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.4)$$

### 2.1.2 Função de transferência e *Crosstalk*

Uma importante característica do meio de transmissão é a função de transferência (FT) do canal, que representa como os sinais são afetados pelo canal ao se propagarem através dele. Considerando o sistema DSL de duas portas com impedâncias de fonte  $Z_S$  e de carga  $Z_L$  mostrado na Figura 5, a FT entre a entrada  $V_s$  e a saída na carga  $Z_L$  é definida de acordo com (2.5).

$$H(f) = \frac{V_2(f)}{V_s(f)} \quad (2.5)$$

Figura 5 – Configuração de transmissão de rede de duas portas.



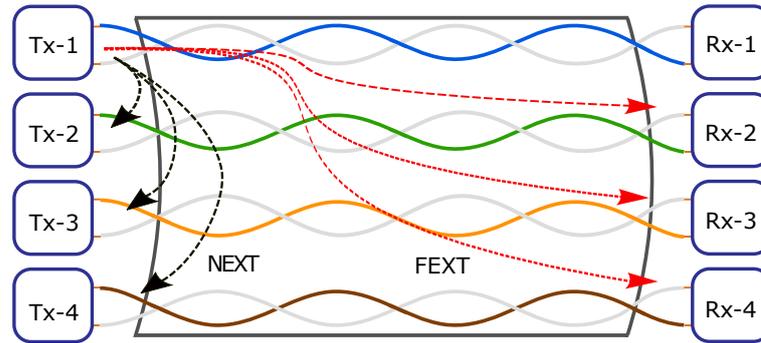
Fonte – Adaptada de Golden, Dedieu e Jacobsen (2006).

Quando o sistema está devidamente casado, ou seja,  $Z_S$  e  $Z_L$  iguais à  $Z_0$  do canal, a FT pode ser obtida em função da constante de propagação  $\gamma$  e do comprimento  $l$  do canal conforme (2.6):

$$H(f) = e^{-\gamma l} \quad (2.6)$$

Já o *crosstalk* é vazamento de potência do sinal de um canal para o outro. Em sistemas DSL, isso significa acoplamento entre os pares de um mesmo cabo e depende das características construtivas dos mesmos. De acordo com Golden, Dedieu e Jacobsen (2006), o *crosstalk* é mais intenso entre canais adjacentes e tende a aumentar com a frequência. Em sistemas DSL, existem dois tipos de *crosstalks*, o NEXT (*Near-end crosstalk*, em inglês) e FEXT (*Far-end crosstalk*, em inglês) mostrados na Figura 6.

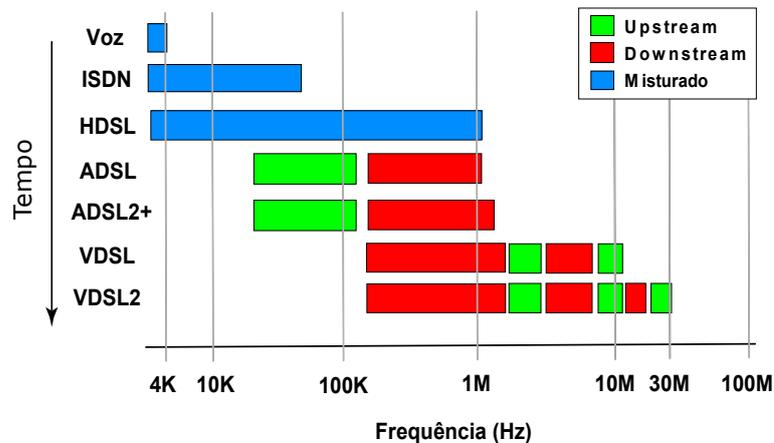
Figura 6 – NEXT e FEXT no modo de transmissão diferencial.



Fonte – Elaborada pela autora.

O NEXT é o *crosstalk* entre transmissores e receptores no mesmo lado da extremidade de um cabo, como mostra as linhas pontilhadas em preto na Figura 6. Uma estratégia utilizada por sistemas DSL para evitar o NEXT é a utilização de diferentes bandas de frequência para *upstream* e *downstream* como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Faixas de utilizadas *upstream* e *downstream* em cada evolução do sistema DSL.



Fonte – (PALM., 2004).

O FEXT é o *crosstalk* entre transmissores em uma extremidade de um cabo nos receptores situados na outra extremidade, como mostra as linhas pontilhadas em vermelho na Figura 6. O FEXT sofre atenuação ao atravessar totalmente o comprimento do cabo, porém como as novas tecnologias DSL utilizam enlaces muito curtos o impacto desse ruído acaba se tornando um entrave para a transmissão (GOLDEN; DEDIEU; JACOBSEN, 2006).

O mesmo raciocínio utilizado para determinar a FT pode ser estendido para o sistema com duas linhas da Figura 8, onde podemos definir o NEXT e FEXT causados

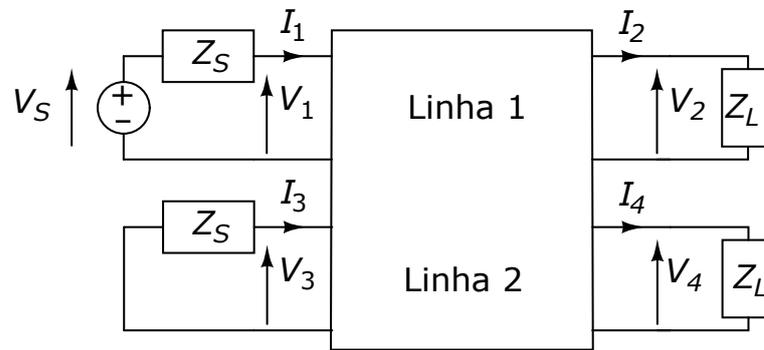
pela Linha 1 na Linha 2 pelas equações (2.7) e (2.8), respectivamente.

$$H_{NEXT}(f) = \frac{V_3(f)}{V_S(f)} \quad (2.7)$$

$$H_{FEXT}(f) = \frac{V_4(f)}{V_S(f)} \quad (2.8)$$

onde  $V_3$  e  $V_4$  são as tensões do sinal que acoplou da linha 1, respectivamente, na entrada e saída da linha 2.

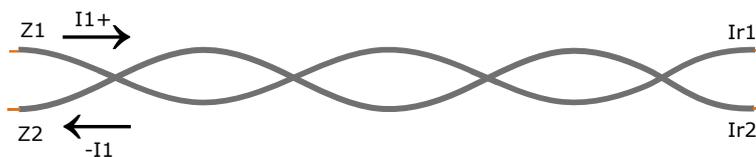
Figura 8 – Representação das correntes e tensões que acoplam nos dois lados da segunda linha devido indução da primeira linha.



Fonte – Adaptada de Golden, Dedieu e Jacobsen (2006).

Além do *crosstalk*, o desempenho do sistema também pode ser afetado por conversão de modo (CM). Este fenômeno pode ser entendido de forma simples como a indução de sinal em modo comum para o modo diferencial em um par, causado pelo desbalanceamento do par. Fatores que podem causar conversão de modo, por exemplo, são diferenças de diâmetro e alteração na distância entre os fios ao longo do cabo. Para ilustrar esse tipo de interferência, considere a Figura 9, em que uma corrente diferencial é transmitida pelo par trançado composto por fios de impedâncias  $Z1$  e  $Z2$ , se houver desbalanceamento no par,  $Z1 \neq Z2$ , conseqüentemente uma corrente em modo comum será recebida, de tal forma que  $I_c = I_{r1} + I_{r2} \neq 0$ , indicando a conversão de modo comum para o modo diferencial. No artigo de Nir e Moonen (2007) mostra-se outros tipos de CM e como medi-los.

Figura 9 – Conversão de modo diferencial para o modo comum caso  $Z1 \neq Z2$  e  $I_c \neq 0$ .



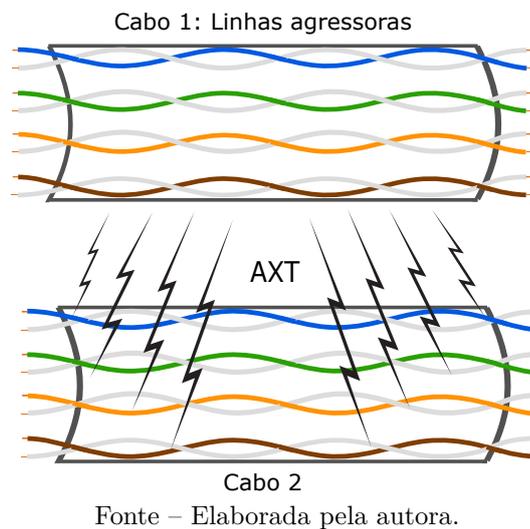
Fonte – Elaborada pela autora.

### 2.1.2.1 Alien crosstalk - AXT

AXT é um tipo de interferência devido a interferentes externos ao sistema, diferentemente do NEXT e FEXT. De acordo com Makharashvili et al. (2016), AXT é definido como a interferência que ocorre entre dois ou mais sistemas diferentes, ou no caso da Figura 10, entre dois cabos diferentes.

O AXT é causado por qualquer outro tipo de sistema que transmitem na mesma banda de frequência, operando próximo ao sistema DSL, e sendo assim, esse tipo de interferência geralmente não é mitigada e pode ser bastante prejudicial (GOLDEN; DEDIEU; JACOBSEN, 2007). Apesar de existirem técnicas de cancelamento de AXT, neste trabalho elas não serão utilizadas. A fonte de interferência do AXT pode ser chamadas de linhas agressoras.

Figura 10 – Tipos de *crosstalk* em sistemas DSL.



### 2.1.3 Parâmetros de espalhamento

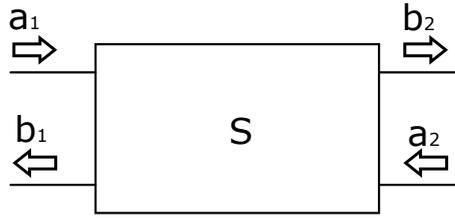
Uma forma de analisar e caracterizar o sistema de transmissão é através dos parâmetros de espalhamento. A matriz de parâmetros de espalhamento de uma determinada rede relaciona as ondas incidentes  $a$  com as ondas refletidas  $b$  da seguinte maneira:

$$b = [S]a \quad (2.9)$$

Para uma rede de duas portas como mostra a Figura 11, aplicando ( 2.9), temos:

$$\begin{aligned} b_1 &= S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 &= S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Figura 11 – Rede de duas portas descrita por matriz de espalhamento.



Fonte – Elaborada pela autora.

Após o rearranjo de (2.10), temos o conjunto de equações para calcular cada um dos parâmetros de espalhamento:

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0} \\
 S_{12} &= \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0} \\
 S_{21} &= \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0} \\
 S_{22} &= \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0}
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Os parâmetros de espalhamento  $S_{21}$  e  $S_{12}$  representam o ganho de transmissão na direção direta e reversa respectivamente, enquanto que  $S_{11}$  e  $S_{22}$  representam a razão entre a onda refletida e incidente, visto respectivamente na entrada e na saída.

É possível também determinar a impedância característica  $Z_0$  através dos parâmetros de espalhamento de acordo com Zhang e Hsiang (2007) da seguinte forma:

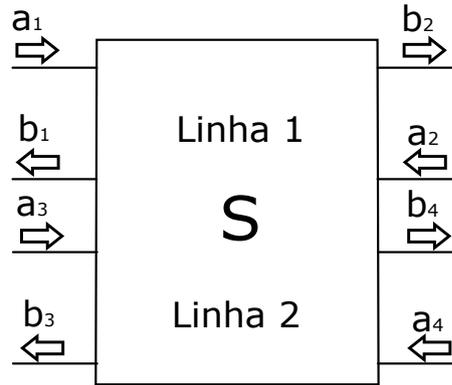
$$Z_0 = Z_{ref} \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \tag{2.12}$$

Como dito anteriormente, o parâmetro  $S_{21}$  é a relação entre a onda refletida na saída pela onda incidente na entrada. Dessa forma, pode-se relacionar a FT com o parâmetro de espalhamento  $S_{21}$  de acordo com (2.13).

$$H(f)_{dB} = 10 \log_{10} |S_{21}|^2 \tag{2.13}$$

Da mesma forma que a FT foi relacionada com o parâmetro de espalhamento  $S_{21}$ , as funções de transferência do NEXT e FEXT também podem ser relacionadas tomando com referência a Figura 12.

Figura 12 – Rede de quatro portas descrita por matriz de espalhamento.



Fonte – Elaborada pela autora.

Dessa forma, as equações do NEXT e FEXT causados pela Linha 1 na Linha 2 são:

$$H_{NEXT}(f)_{dB} = 10\log_{10}|S_{31}|^2 \quad (2.14)$$

$$H_{FEXT}(f)_{dB} = 10\log_{10}|S_{41}|^2 \quad (2.15)$$

## 2.2 Modos de transmissão alternativos

### 2.2.1 Formas de sinalização

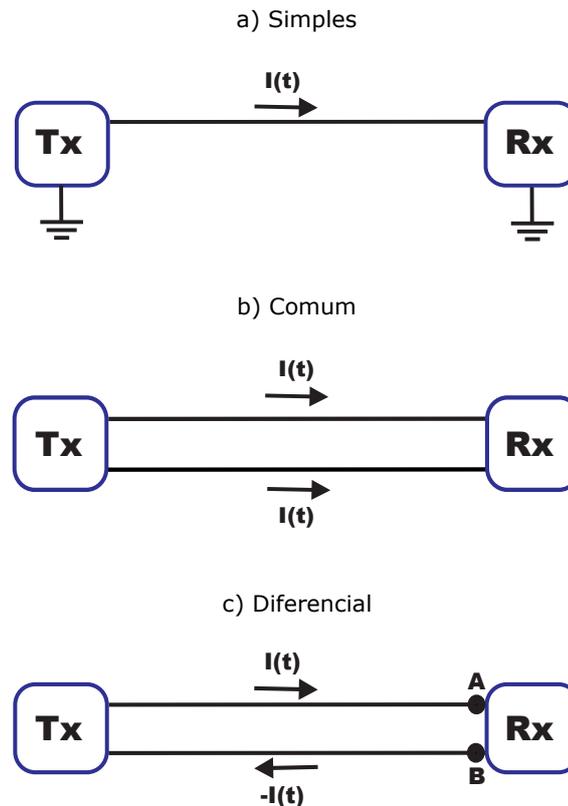
O modo de transmissão utilizado em sistemas DSL de cabos de pares trançados atualmente é o modo diferencial, em que cada par é usado como um canal independente, sendo assim o número de canais para transmissão é limitado pelo número de pares do cabo. A investigação de outros modos de transmissão alternativos tais como o *split-pair* (SP), *wire-shield* (WS) e fantasma de primeira (MF1) ou segunda (MF2) camada envolvem as diferentes formas de sinalização que podem ser usadas.

O modo de sinalização é a forma pelo qual o sinal elétrico trafega pelo canal de transmissão e os modos de sinalização mais utilizados em sistemas de comunicação são os modos simples, comum e diferencial mostrados na Figura 13.

Na sinalização em modo simples, cada condutor é visto como um canal de comunicação independente e o retorno se dá pelo terra. Porém a diferença de potencial do terra entre transmissor e receptor é um problema nesse modo de sinalização. Já a sinalização em modo comum é quando um sinal elétrico de mesma polaridade é transmitido por um ou mais fios e o sinal recebido é obtido através da média aritmética dos mesmos. No modo de sinalização diferencial são utilizados dois fios nos quais são transmitidos sinais simétricos em cada um e o sinal recebido é a diferença entre os dois.

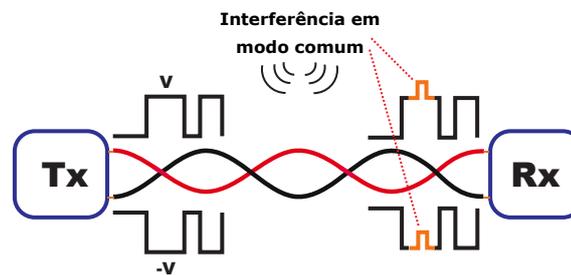
A grande vantagem do modo de sinalização diferencial em relação ao modo simples e comum, que está evidenciada na Figura 14, é a sua maior imunidade a interferências. Isso

Figura 13 – Formas de sinalização: a) Modo Simples. b) Modo comum. c) Modo diferencial.



Fonte – (GOMES, 2012).

decorre do fato de que estas interferências geralmente são induzidas em modo comum nos canais e com isso podem ser anuladas pelo receptor diferencial através da diferença entre os sinais recebidos, o que não ocorre nos modos de sinalização simples e comum. Como



Fonte – Adaptada de Gomes (2012).

explicado antes, essas interferências podem ser causadas por  *Crosstalk* ou  *alien Crosstalk*.

### 2.2.2 Modos *Split-Pair* (SP) e *Wire-Shield* (WS)

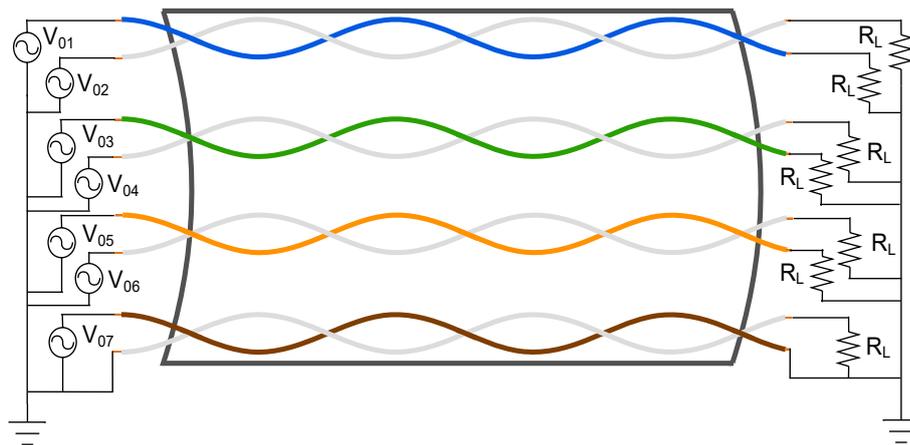
O modo *split-pair* (SP) mostrado na Figura 15 é um modo de transmissão alternativo que possui sinalização de modo simples em cada fio. A desvantagem mencionada

anteriormente, em relação a diferença de potencial do terra entre as extremidades do cabo, é contornada ao se utilizar um dos fios do cabo como referência a todos os sinais. Assim, se  $N$  for o número de pares do cabo,  $2N - 1$  condutores do cabo são usados como canais individuais e independentes.

O modo de transmissão *wire-shield* (WS) mostrado na Figura 16 tem sua construção física similar a do SP. A diferença construtiva se dá pelo fato de que o condutor de referência do WS é a blindagem externa que envolve o cabo, e como consequência disso, ele possui um canal a mais que o SP, isto é,  $2N$  canais.

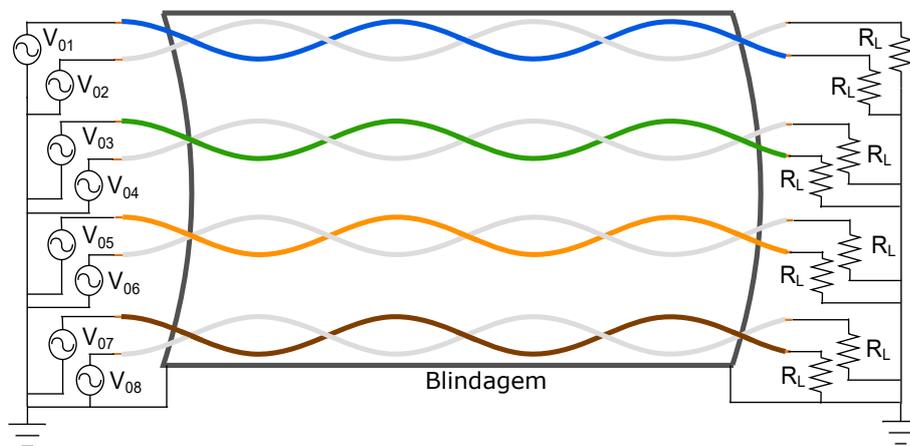
Esses dois modos de transmissão têm vantagens em relação ao modo diferencial, pois são obtidos (quase, para o *split-pair*) o dobro de canais em uma mesma estrutura cabeada. No entanto, como há um forte vazamento de sinal entre os canais, em ambos é necessário o uso de *vectoring*.

Figura 15 – Configuração para transmissão em sete canais utilizando o modo *split-pair*.



Fonte – Elaborada pela autora.

Figura 16 – Configuração para transmissão em oito canais utilizando o modo *wire-shield*.



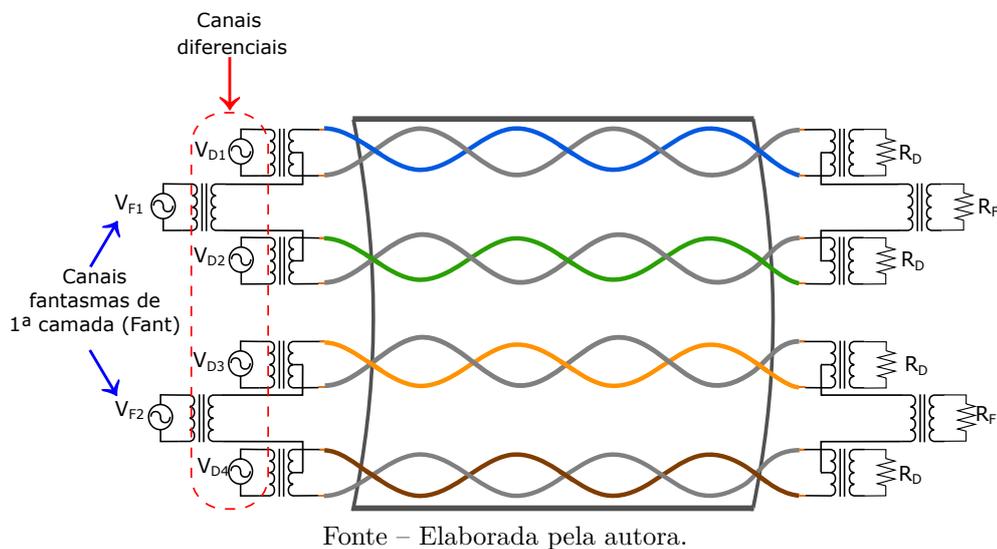
Fonte – Elaborada pela autora.

### 2.2.3 Modo fantasma de primeira (MF1) e segunda camada (MF2)

O modo fantasma de transmissão utiliza duas formas de sinalização ao mesmo tempo, pois são transmitidos com sinalização em modo diferencial, porém utilizam os taps centrais dos transformadores para trafegarem em modo comum através dos pares trançados. Com isso, o modo fantasma além de aumentar o número de canais, tem a vantagem de utilizar transeptores diferenciais (transmissores e receptores) do mesmo tipo usado pelos padrões DSL, diferentemente dos modos SP e WS.

A Figura 17 representa a configuração de inserção dos canais fantasmas em um cabo de quatro pares. Note que cada par de transformadores conectados aos canais diferenciais comporta um canal fantasma independente, que propaga pelos contatos centrais desses transformadores através de outro transformador usado para conectar o modo fantasma. Na Figura 17, apenas fantasmas de primeira camada são mostrados, e a transmissão simultânea dos canais diferenciais juntamente com os canais fantasmas é chamado de modo fantasma de primeira camada (MF1), que em um cabo de quatro pares, possui um total de seis canais disponíveis - 4 canais diferenciais e dois fantasmas.

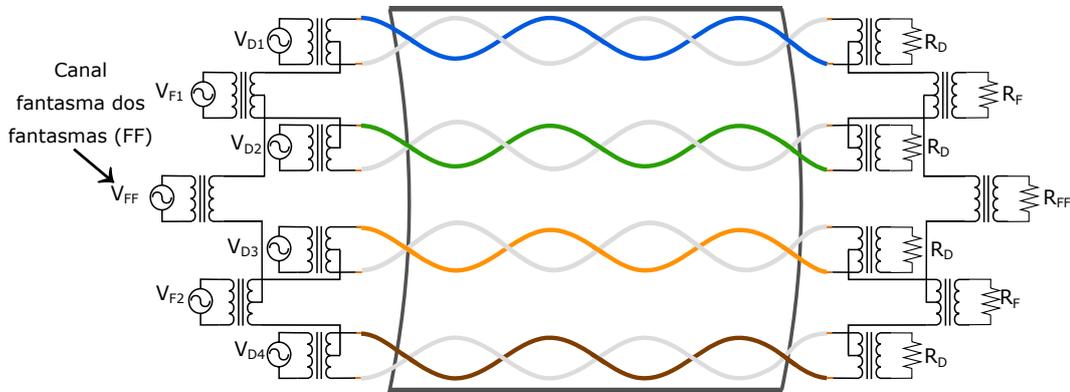
Figura 17 – Configuração para transmissão em seis canais utilizando a primeira camada do modo fantasma, MF1.



Uma forma de implementar modo fantasma explorando todo o seu potencial pode ser vista na Figura 18, em que o canal fantasma da segunda camada, se propaga nos canais fantasmas de primeira camada, sendo portanto, um canal fantasma dos fantasmas. De forma geral,  $\log_2 N$  camadas podem ser implementadas a partir de  $N$  pares trançados (quando  $N$  é uma potência de 2), gerando  $N-1$  canais fantasmas de um total de  $2N - 1$  canais, incluindo os diferenciais. Por exemplo, para cabos de quatro pares, são gerados um total de sete canais, no qual quatro são diferenciais, dois são fantasmas e um é fantasma dos fantasmas ou fantasma de segunda camada. Tendo assim quase o dobro de canais

disponíveis.

Figura 18 – Configuração para transmissão em sete canais utilizando a segunda camada do modo fantasma, MF2.



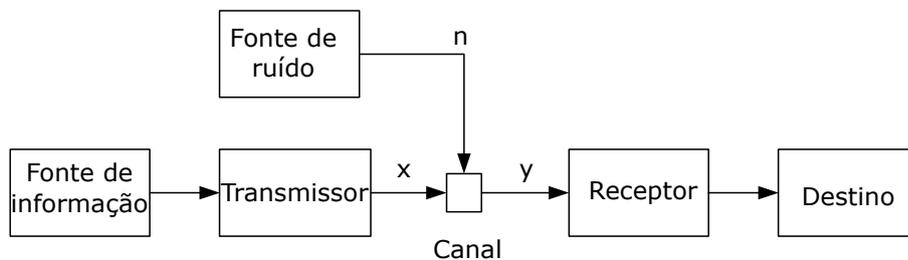
Fonte – Elaborada pela autora.

Tanto o MF1 quanto o MF2 adicionam canais virtuais a transmissão, o que gera outras fontes de vazamento de sinal entre os canais, e podem ser intensificadas devido ao desbalanceamento entre os pares, causados por exemplo pelos diferentes comprimentos dos trançados dos pares. Por esta razão, a adição deste canal gera mais *crosstalk* entre os canais, e deve ser cuidadosamente considerado na implementação, como será visto na seção de resultados deste trabalho.

### 2.3 Métricas de desempenho

Para avaliar o desempenho do sistema de comunicação proposto é necessário estimar a capacidade de transmissão dos canais que ele utiliza. Para este fim, são utilizadas as métricas taxa agregada de transmissão e magnitude de vetor de erro (EVM). A máxima

Figura 19 – Modelo de um sistema de comunicação geral.



Fonte – Adaptada de Golden, Dedieu e Jacobsen (2006).

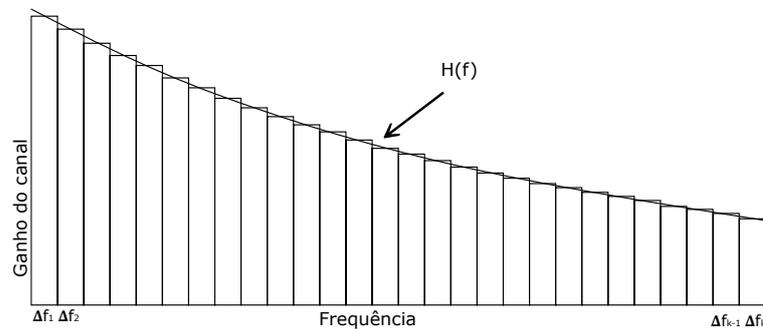
capacidade de transmissão de um canal é determinada de acordo com Shannon (1948). O modelo de um sistema de comunicação geral proposto por Shannon pode ser visto na Figura 19, em que o canal é o meio usado para transmitir o sinal da informação gerado

na fonte para o receptor. O canal pode distorcer ou adicionar ruído ao sinal, e o receptor tenta reconstruir e recuperar a informação e levar ao destino.

### 2.3.1 Taxa de Transmissão

Em sistemas DSL considera-se que as transmissões são feitas utilizando *Discrete Multitone Modulation* (DMT), em que os dados são transmitidos via um conjunto de subcanais independentes no domínio da frequência, que também são chamados de tons, com largura de banda fixa  $\Delta_f$ , como mostra a Figura 20.

Figura 20 – Particionamento da banda de um canal em vários subcanais.



Fonte – Adaptada de Golden, Dedieu e Jacobsen (2006).

De acordo com Drakulić et al. (2015), a taxa de bits por subcanal para o canal  $l$  pode ser definida de acordo com (2.16):

$$R_l(f) = \log_2 \left( 1 + \frac{SNIR(f)}{\Gamma} \right) \quad (2.16)$$

onde  $\Gamma$  representa o gap de  $SNIR$ , que é um parâmetro definido para o sistema atender as restrições de taxa de erro de bit e  $SNIR(f)$  denota a relação sinal ruído mais interferência por tom  $f$ , definida em (2.17):

$$SNIR(f) = \frac{|H_l(f)|^2 \rho}{\sigma^2 + C_l(f)} \quad (2.17)$$

onde  $H_l(f)$  representa o ganho do canal  $l$  e  $C_l(f)$  representa a soma de todas as interferências que atingem a transmissão no canal  $l$ , incluindo o acoplamento eletromagnético entre os modos de transmissão,  $\rho$  é a potência máxima total de transmissão e  $\sigma^2$  denota a densidade espectral de potência do ruído gaussiano branco aditivo (AWGN). A partir da taxa de bits podemos definir a taxa de transmissão do canal  $l$  de acordo com (2.18):

$$R_l = \Delta_f \sum_{f=1}^K R_l(f) \quad (2.18)$$

onde  $K$  é a quantidade total de subcanais. Finalmente, podemos determinar a taxa de transmissão do sistema como um todo, ao considerarmos as taxas alcançadas conjuntamente

pelos vários canais (incluindo os múltiplos modos de transmissão), em uma métrica que chamamos taxa agregada, que é definida em (2.19):

$$R = \sum_{l=1}^U R_l \quad (2.19)$$

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

### 2.3.1.1 Técnicas de mitigação de interferência – *Vectoring*

O padrão G.fast opera em cabos de comprimentos menores, o que possibilitou o uso de altas frequências para transmissão, entretanto, em frequência mais altas o efeito de interferências como o *crosstalk* é intensificado (DRAKULIĆ et al., 2015). Dessa forma a *SNIR* é baixa e pode limitar bastante o alcance de alta taxas de dados. O G.fast exige a aplicação de técnicas para mitigar essas interferências e solucionar este problema.

Sendo assim, neste trabalho será utilizado o *vectoring linear zero forcing* (GINIS; CIOFFI, 2002). Em que, para cada subcanal é aplicado um precodificador aos símbolos que serão transmitidos, dado por (2.20):

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2.20)$$

onde  $\mathbf{x}$  é um vetor coluna  $U \times 1$  que contém os símbolos transmitidos em cada canal,  $\mathbf{P}$  é uma matriz  $U \times U$  que representa o precodificador,  $\mathbf{H}$  é a matriz  $U \times U$  de canal em que os elementos da diagonal principal correspondem ao ganho direto (função de transferência) de cada canal e os elementos fora da diagonal representam o *crosstalk* entre os canais coordenados,  $\mathbf{y}$  é um vetor coluna  $U \times 1$  que contém os símbolos recebidos, e  $\mathbf{n}$  de comprimento  $U \times 1$  representa o ruído Gaussiano branco aditivo observado na recepção. Note que no cenário tratado neste trabalho são coordenados os sinais de canais em modo diferencial e fantasma, e assim os vetores correspondem aos símbolos de ambos. A matriz  $\mathbf{H}$  contém os ganhos em todos os modos e interferências entre eles, assim como  $\mathbf{n}$  representa o ruído observado nos múltiplos modos.

O pré-codificador é definido como  $\mathbf{P} = (1/\delta)\mathbf{H}^{-1}\mathbf{\Lambda}$ , em que  $\mathbf{\Lambda}$  é uma matriz diagonal que contém os elementos da diagonal principal de  $\mathbf{H}$ , e  $\delta$  é um escalar utilizado para manter a potência de transmissão de acordo com o padrão (BERGEL; LESHEM, 2013). Assim, a transmissão fim-a-fim é definido por (2.21):

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}(1/\delta)\mathbf{H}^{-1}\mathbf{\Lambda}\mathbf{x} + \mathbf{n} = \frac{1}{\delta}\mathbf{\Lambda}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2.21)$$

em que a interferência entre os canais coordenados foi mitigada, ao custo do fator  $\delta$ , que escala a *SNIR* de cada canal  $l$ , conforme (2.22):

$$SNIR = \frac{|\Lambda(l, l)|^2 \rho}{\sigma^2 \delta^2} \quad (2.22)$$

em que  $\Lambda(l, l)$  denota o elemento na linha  $l$  coluna  $l$  da matriz  $\Lambda$ .

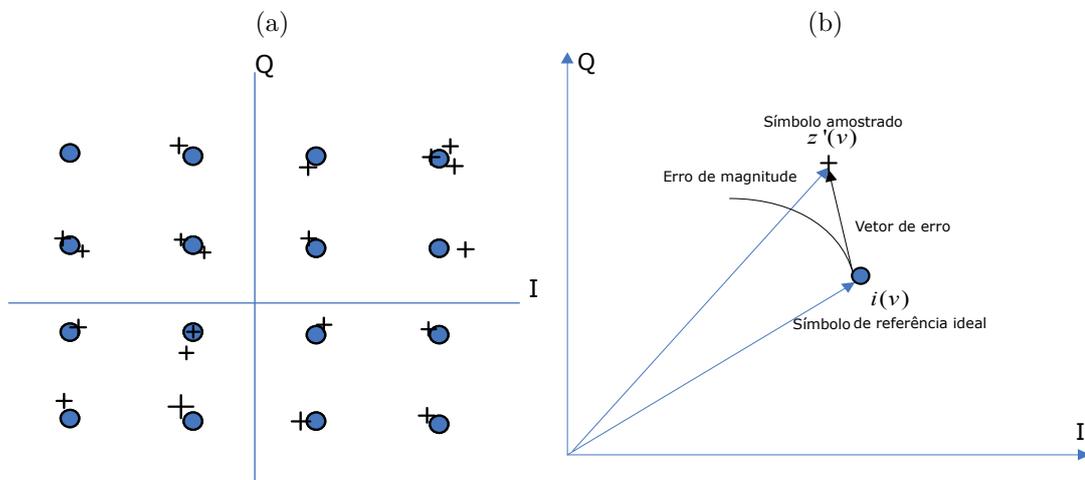
### 2.3.2 Magnitude do vetor de erro

Já o EVM (*Error Vector Magnitude*, em inglês) é uma figura de mérito que indica à robustez do sistema, ou susceptibilidade a interferência (LI; PENG; WANG, 2012). Esta medida avalia, para cada subcanal, a magnitude do vetor de diferença entre o símbolo recebido e o símbolo de referência da constelação, como ilustra a Figura 21. Como o efeito das interferências varia com o tempo, por consequência também o vetor de erro. De acordo com Chen, Zheng e Ji (2011), calcula-se o erro quadrático médio do EVM, conforme (2.23):

$$EVM = \sqrt{\frac{\sum_{v \in T_m} |Z'(v) - i(v)|^2}{|T_m| \rho}} \quad (2.23)$$

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

Figura 21 – (a) Diagrama de constelação para 16-QAM. (b) Definição do EVM.



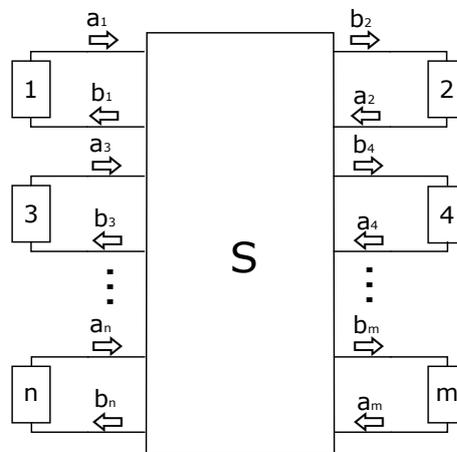
Fonte – Adaptada de Li, Peng e Wang (2012) e Chen, Zheng e Ji (2011)

### 3 Metodologia

A metodologia aplicada neste trabalho consiste em utilizar parâmetros de espalhamento correspondentes as FTs e FEXTs dos modos de transmissão analisados, tanto de simulações quanto medições, para criar uma matriz de transmissão  $H$  como mostra (3.1). Nela estão as FTs na diagonal principal e nas outras posições da matriz estão os FEXTs entre os canais. A terminologia usada está de acordo com a teoria de parâmetros de espalhamento aplicada a um sistema nomeado da forma mostrada na Figura 22, em que as portas transmissoras são 1, 3, 5, ..., n e as portas receptoras são 2, 4, 6, ..., m.

$$H = \begin{bmatrix} S_{21} & S_{23} & \cdots & S_{2n} \\ S_{41} & S_{43} & \cdots & S_{4n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{m1} & S_{m3} & \cdots & S_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

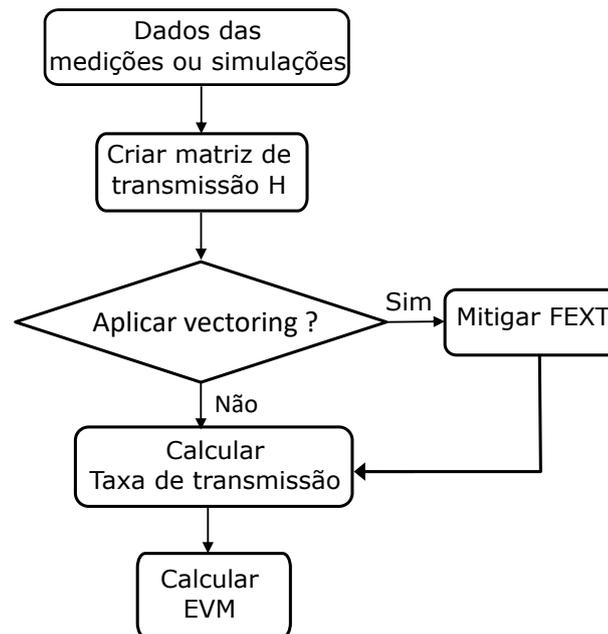
Figura 22 – Nomenclatura das portas transmissoras e receptoras.



Fonte – Elaborada pela autora.

A matriz de transmissão  $H$  é usada para calcular a taxa de dados e o EVM de cada canal, utilizando um simulador de canal desenvolvido em MATLAB, que implementa as métricas de desempenho descritas na Seção 2.3, inclusive o *vectoring*. A Figura 23 resume esquematicamente a metodologia aplicada para o cálculo das métricas de desempenho. As Seções 3.1 e 3.2 a seguir explicam, respectivamente, a metodologia aplicada para obtenção das FTs e FEXTs através de simulações e medições.

Figura 23 – Metodologia para obtenção das métricas de desempenho.



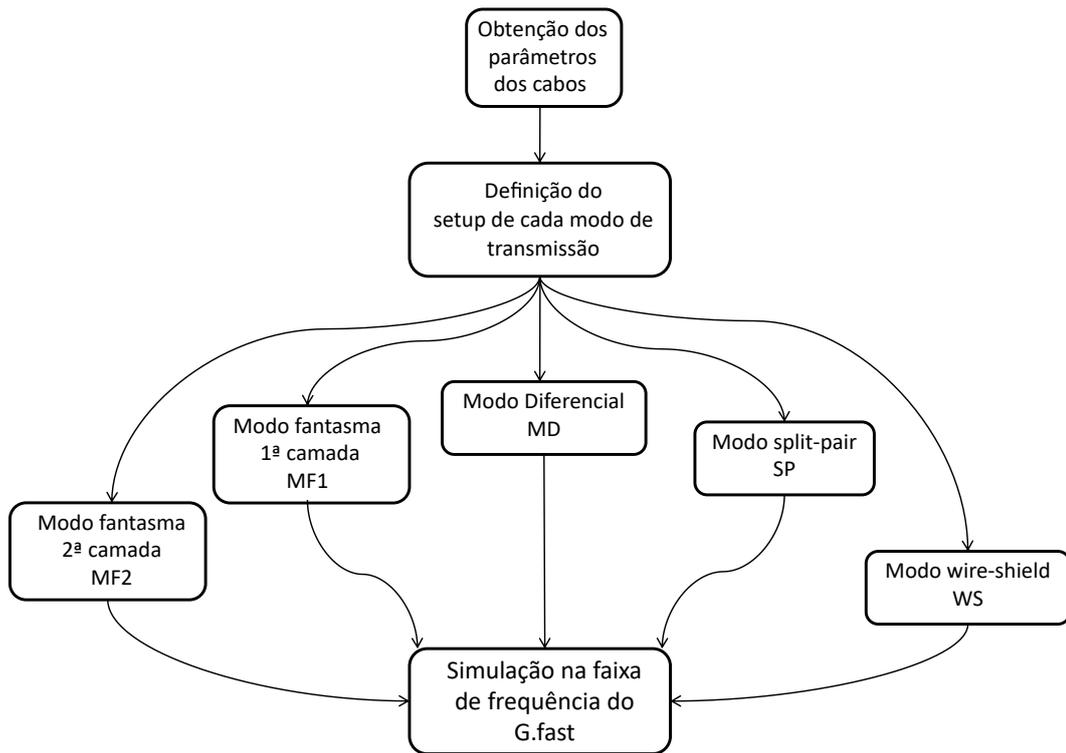
### 3.1 Cenário de simulação

A ferramenta de simulação numérica utilizada para gerar as simulações das funções de transferências e FEXTs dos modos de transmissão analisados é o *software* CST (*Computer Simulation Technology*), mais especificamente o módulo CST CABLE STUDIO. A partir dele, é possível realizar simulações nas faixas de frequências requeridas e todas as características do canal simulado. A Figura 24 resume as etapas realizadas para obtenção dos resultados através das simulações no CST.

Primeiramente, para realizar a simulação, foi preciso determinar todas as especificações do cabo, tais como o comprimento de cabo, o tipo material do condutor e isolante, o seu diâmetro ou espessura, o comprimento de trançado dos pares e disposição dos pares no cabo. A maioria dessas informações foram obtidas no *datasheet* do cabo ou através de medidas realizadas em laboratório. Após isso, foi determinado a frequência máxima para a simulação no qual o modelo é válido, gerando no CST um bloco com todas as propriedades do cabo criado como mostra a Figura 25a, que nesse caso representa um cabo de 4 pares.

Em seguida foi criado o *setup* de transmissão para cada modo. Como o *software* CST não possui transformador com *center-tap*, necessário para implementação do modo fantasma, foram utilizados dois transformadores na configuração mostrada na Figura 25b. O circuito esquemático visto na Figura 26 mostra o *setup* de simulação do modo fantasma de primeira camada (MF1). Já a Figura 27 mostra o *setup* do modo fantasma de segunda camada com destaque para presença do sistema agressor, como fonte de *alien crosstalk*

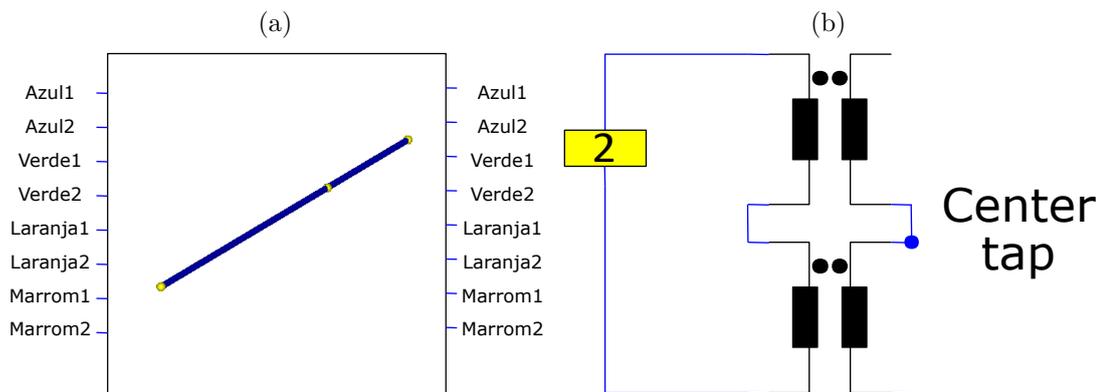
Figura 24 – Metodologia de simulação no *software* CST .



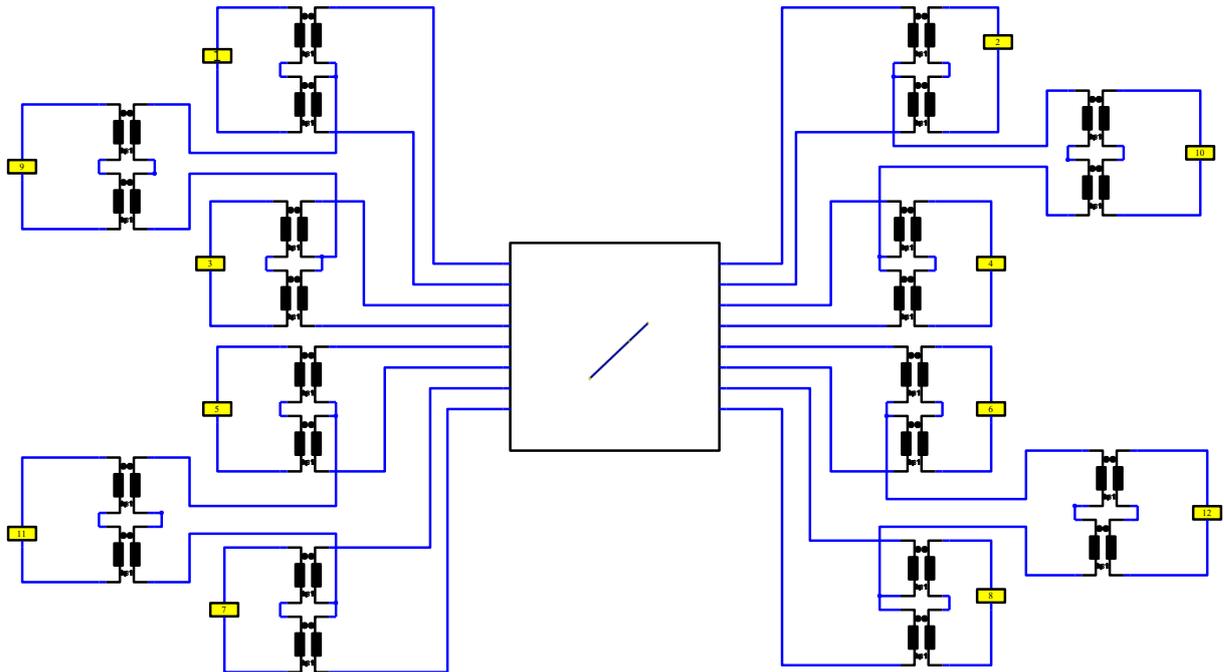
Fonte – Elaborada pela autora.

(AXT), configurado para transmissão em modo diferencial, com parâmetros do sistema Ethernet.

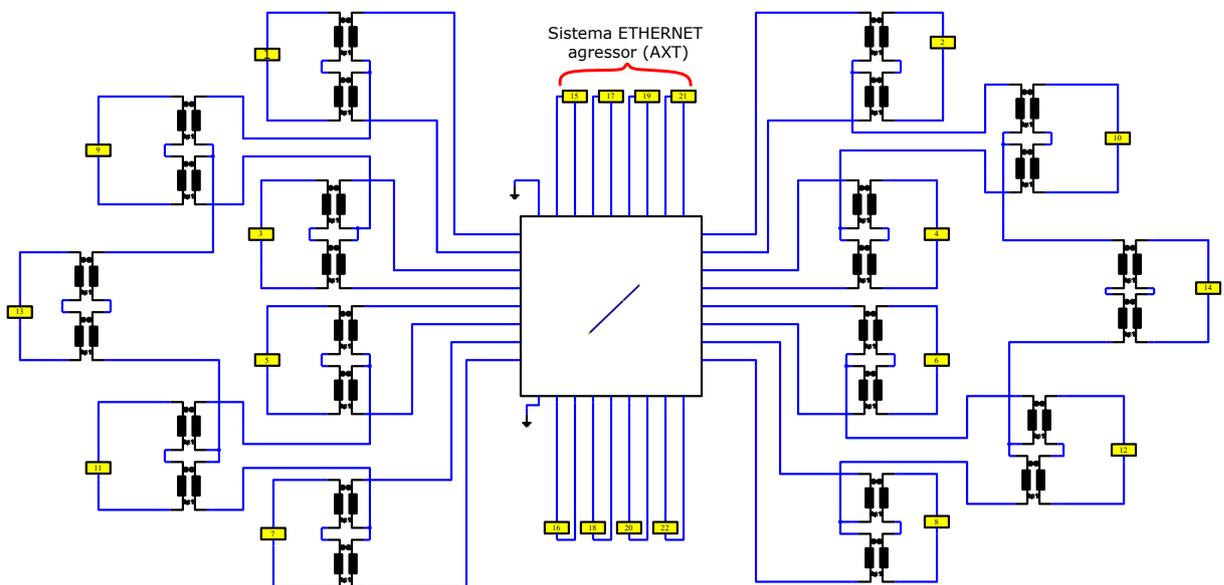
Figura 25 – (a) Modelo equivalente do cabo criado no *software* CST; (b) Configuração de dois transformadores para criar um transformador com *center-tap* no *software* CST.



Fonte – Elaborada pela autora.

Figura 26 – *Setup* de simulação do modo fantasma de primeira camada no *software* CST.

Fonte – Elaborada pela autora.

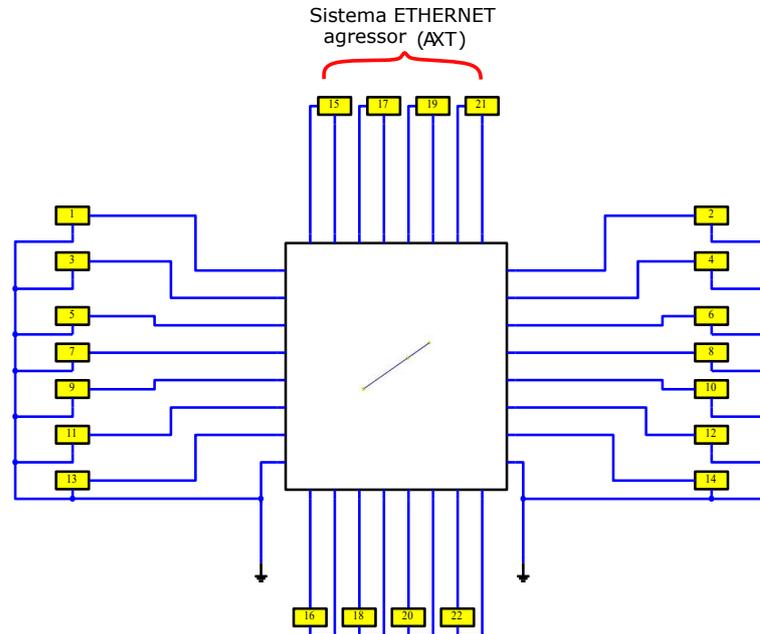
Figura 27 – *Setup* de simulação do modo fantasma de segunda camada na presença de AXT no *software* CST.

Fonte – Elaborada pela autora.

A Figura 28 mostra o *setup* de simulação do modo *split-pair* também na presença de AXT. O *setup* do modo *wire-shield* é bem similar ao *setup* do *split-pair*, com a diferença de que a referência passa a ser a blindagem externa do cabo, como mostra a Figura 29. Todos os modos de transmissão foram simulados com o sem o sistema agressor, e a omissão

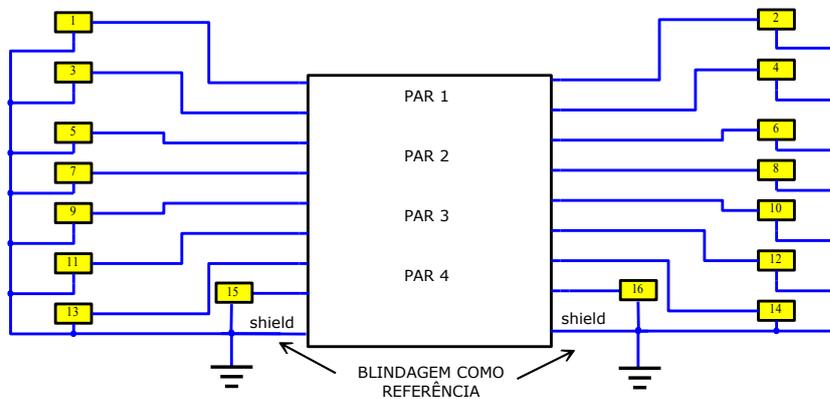
desse sistema nas Figuras 27 e 28 foi apenas representativo.

Figura 28 – *Setup* de simulação do modo *split-pair* na presença de AXT no *software* CST.



Fonte – Elaborada pela autora.

Figura 29 – *Setup* de simulação do modo *wire-shield* no *software* CST.



Fonte – Elaborada pela autora.

Após isso são configurados o tipo de porta, diferencial ou não, de acordo com cada modo de transmissão, sendo que *split-pair* e *wire-shield* utilizam portas comum e o modo fantasma utiliza portas em modo diferencial. Além disso, deve ser configurado a impedância da porta de acordo com a impedância característica de cada canal, que foi calculada de acordo com a equação (2.12).

Por último, deve ser configurada a faixa de frequência e o número de tons para a simulação de parâmetros de espalhamento. Como resultado dessa simulação, temos as funções de transferência (FTs) de cada canal e todos os *crosstalks* entre os mesmos.

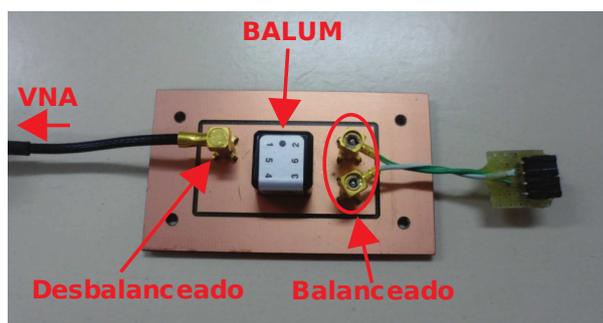
## 3.2 Cenário de medição

Nesta seção estão especificados os procedimentos realizados para medir as FTs dos canais diferenciais (Dif), fantasmas de 1ª camada (Fant) e fantasma de 2ª camada, chamado também aqui de fantasma dos fantasmas (FF); além do procedimento para determinar a interferências entre os canais, isto é, FEXTs e CM.

As medições são realizadas utilizando um analisador de rede do tipo VNA (*Vector Network Analyzer*), que é um equipamento capaz de medir as características eletromagnéticas de componentes eletrônicos, através do envio de um pulso e análise da amplitude e fase do sinal recebido ou refletido, a partir do qual é possível obter os parâmetros de espalhamento usados neste trabalho.

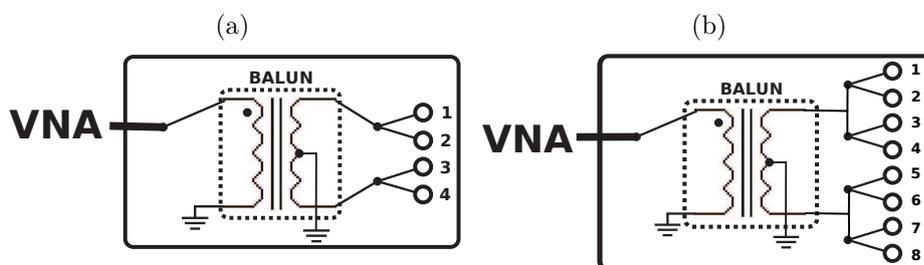
Na Figura 30, o BALUN em destaque é responsável por transformar o sinal vindo no VNA (lado desbalanceado) em um sinal em modo diferencial (lado balanceado). O *setup* usado para realizar as medições dos canais diferenciais, fantasmas de 1ª e 2ª camada está mostrado esquematicamente na Figura 31.

Figura 30 – *Setup* de medição dos canais diferenciais e fantasma de 1ª camada.



Fonte – Elaborada pela autora.

Figura 31 – (a) O *setup* esquemático medição dos canais diferenciais e fantasma de 1ª camada; (b) O *setup* esquemático de medição do canal fantasma de 2ª camada



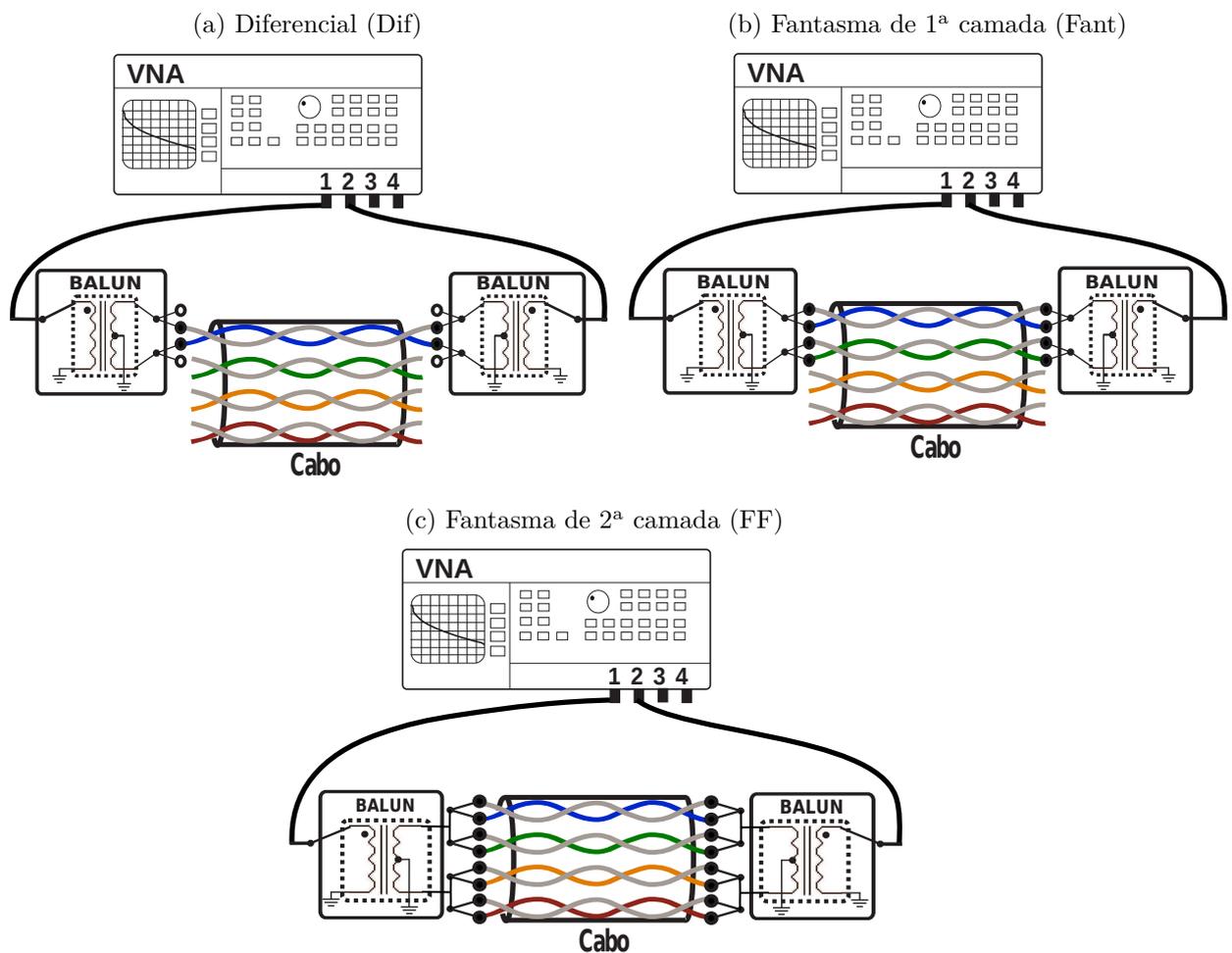
Fonte – Adaptada de Gomes (2012).

Para medir o canal diferencial, o par é inserido entre os pinos 2 e 3 do esquemático mostrado na Figura 31a. De acordo com o que foi explicado na Seção 2.2.3, o canal fantasma de 1ª camada se propaga através de dois pares do cabo, estando em modo comum

em cada par e diferencialmente entre os dois pares. Sendo assim, uma forma de obter seus parâmetros, sem de fato implementar a transmissão simultânea com os outros canais, é simplesmente conectar o primeiro par nos pinos 1 e 2, e o segundo par nos pinos 3 e 4 da Figura 31a.

De forma análoga, já que o canal fantasma de 2ª camada trafega através de quatro pares do cabo, o mesmo pode ser obtido ao conectar os dois primeiros pares nos pinos 1, 2, 3 e 4, e os dois últimos nos pinos 4, 5, 6 e 7 da Figura 31b. Dessa forma, a Figura 32 ilustra o procedimento realizado para medir a função de transferência (FT) de cada canal conforme o que foi dito anteriormente.

Figura 32 – Configuração para medição de FT dos canais.

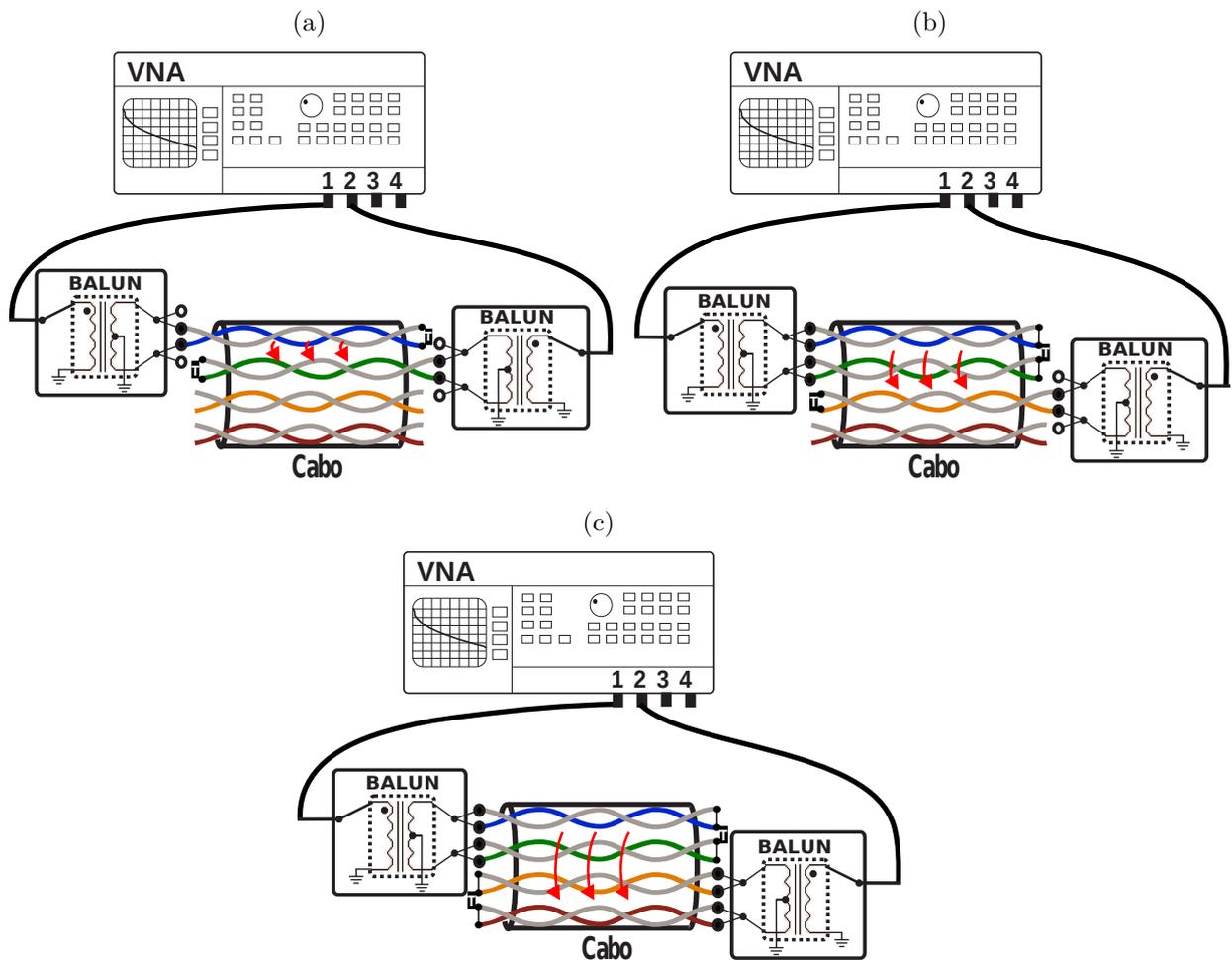


Fonte – Adaptada de Gomes (2012).

O procedimento usado para medir a interferência do tipo FEXT entre os canais está ilustrado na Figura 33. Devido às limitações desse *setup* de medição que curto-circuita os pares para medir os canais Fant e FF, apenas algumas medidas de FEXTs podem ser realizadas, por exemplo, o FEXT entre quaisquer dois canais diferenciais como ilustra a Figura 33a, o FEXT entre o canal fantasma de 1ª camada e o canal diferencial como

mostra a Figura 33b e o FEXT entre os canais fantasmas de 1ª camada como mostra a Figura 33c.

Figura 33 – (a) Configuração para medição de FEXT entre dois canais diferenciais. (b) Configuração para medição de FEXT entre o canal fantasma de 1ª camada e o canal diferencial. (c) Configuração para medição de FEXT entre os canais fantasmas de 1ª camada.

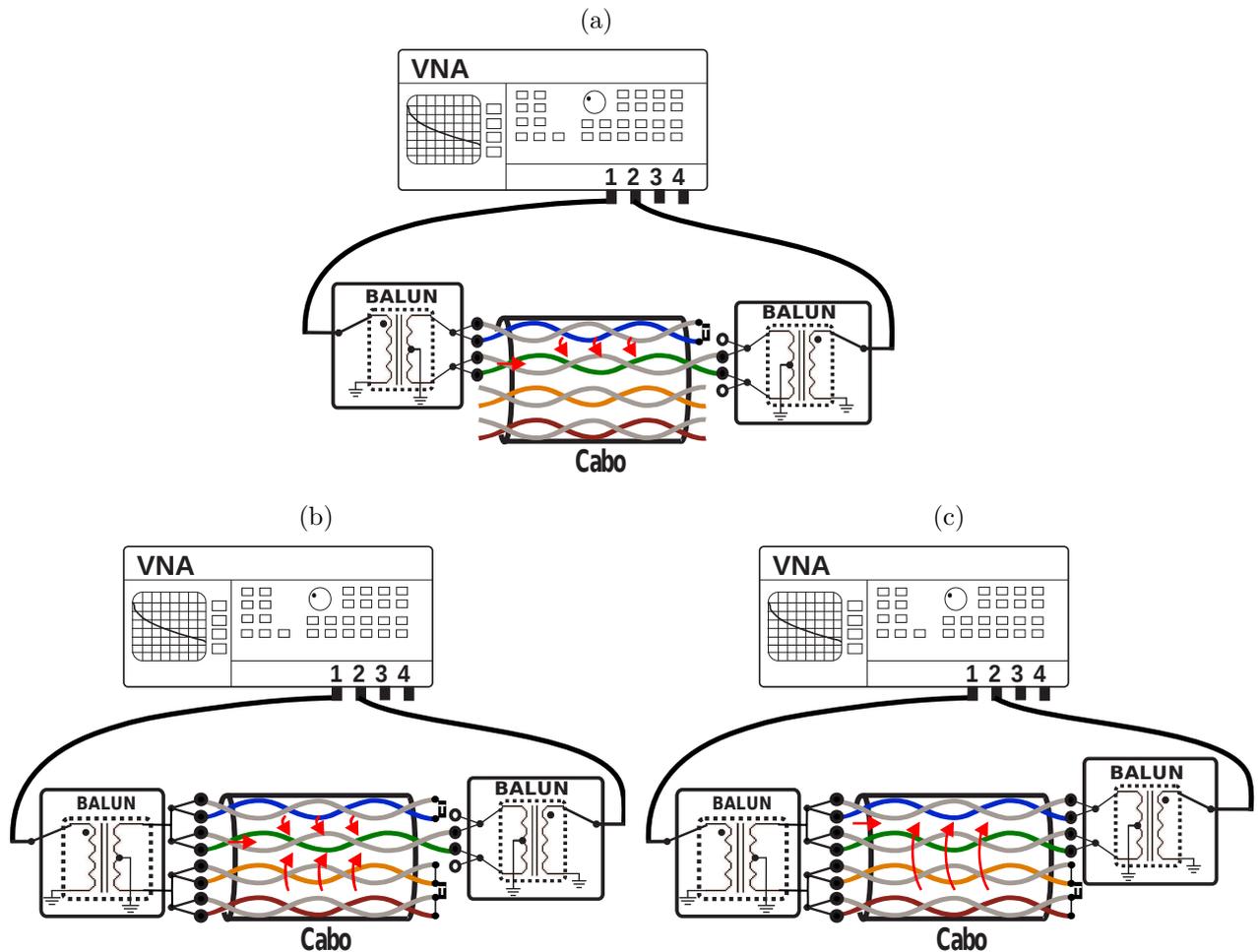


Fonte – Adaptada de Gomes (2012).

A conversão de modo (CM) definida na Seção 2.1.2, indica a parte do sinal diferencial que se converteu para comum, ou vice-versa, em um mesmo par, devido a configuração do modo fantasma, também pode haver CM entre os canais fantasmas de 1ª camada e os diferenciais que o compõe, como mostra a Figura 34a, pois o canal fantasma de 1ª camada transmite um sinal em modo comum e a leitura é feita em modo diferencial, no caso ideal não deveria chegar sinal no canal diferencial, porém parte do sinal em modo comum se converte para modo diferencial, além disso, o segundo par que compõe o canal fantasma de 1ª camada também contribui para o sinal recebido no canal diferencial, através do FEXT. O mesmo raciocínio é estendido entre os canais fantasmas de 2ª camada e os canais diferenciais, como mostra a Figura 34b, e entre os canais fantasmas de 2ª camada e os

canais fantasmas de 1ª camada, como mostra a Figura 34c. Neste trabalho, a análise das medições de CM da Figura 34 também serão analisadas como FEXTs pois não é possível determinar qual o tipo de interferência dominante.

Figura 34 – (a) Configuração para medição de CM entre o canal fantasma de 1ª camada e o canal diferencial. (b) Configuração para medição de CM entre o canal fantasma de 2ª camada e o canal diferencial. (c) Configuração para medição de CM entre o canal fantasma de 2ª camada e o fantasma de 1ª camada.



Fonte – Adaptada de Gomes (2012).

Foram usados nas medições os seguintes equipamentos e dispositivos:

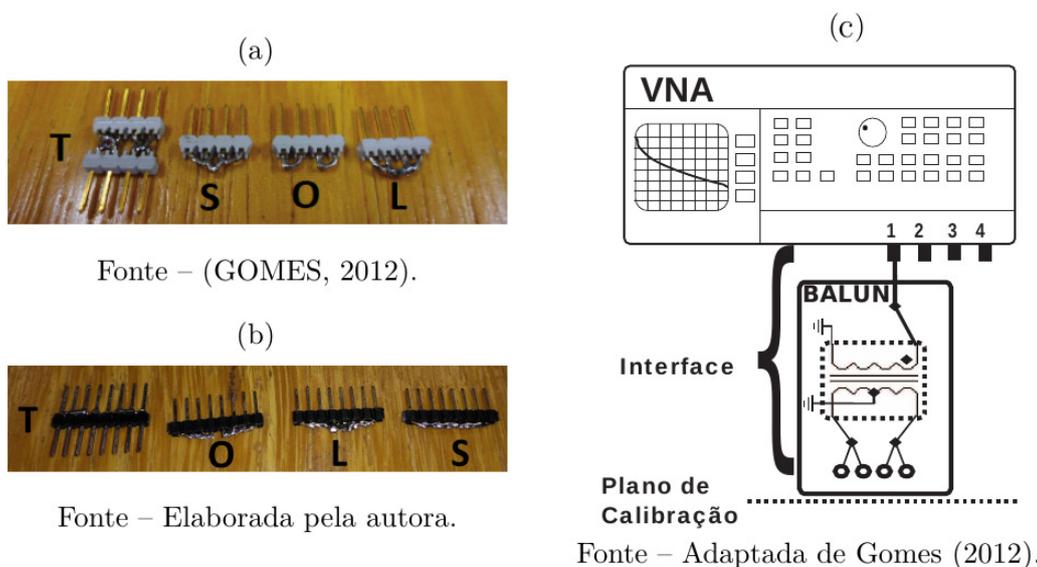
- Analisador de rede (VNA) Agilent E5071C;
- BALUN da North Hills de 50 - 100  $\Omega$  , 100 kHz - 300 MHz;
- Conectores adaptados para realizar as calibrações dos canais Dif, Fant e FF;
- Cabo MULTILAN CAT5e U/UTP 24AWGx4P de 48 m.

Antes de realizar as medições, é necessário fazer a calibração, pois o *setup* de medição ou interface conectada ao VNA possui características que podem causar interferências

indesejáveis, como desbalanceamento e atenuação. Dessa forma, pela calibração é possível caracterizar e mitigar a interferência causada pelo *setup*. Nestas medições foram usados conectores para calibração dos tipos *through*, *short*, *open* e *load* mostrados na Figuras 35a e 35b. Os conectores da Figura 35a foram desenvolvidos para permitir a calibração dos canais Dif e Fant e os conectores mostrados na Figura 35b foram usados para permitir a calibração do canal FF.

Por fim, após o procedimento de calibração, o chamado plano de calibração mostrado na Figura 35c apresenta-se como um plano de medição ideal onde o DUT (*Device under test*), neste caso o cabo CAT5e, é conectado para medir FT, FEXT e CM de cada canal sem interferências causadas pelo *setup*.

Figura 35 – (a) Conectores de calibração para os canais diferenciais (Dif) e fantasmas de 1ª camada (Fant): T - *through*; S - *short*; O - *open*; L - *load* ( $100\ \Omega$ ). (b) Conectores de calibração para o canal fantasma de 2ª camada (FF): T - *through*; O - *open*; L - *load* ( $100\ \Omega$ ); S - *short*. (c) Plano de calibração;



## 4 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através de simulações para os modos de transmissão fantasma (MF1 e MF2), *split-pair* (SP) e *wire-shield* (WS). Também são apresentados resultados de medições, mas apenas para os modos fantasmas devido a restrições no *setup* de medição.

O objetivo é comparar o desempenho destes modos de transmissão tomando como parâmetro a taxa de transmissão agregada alcançada e o EVM (ver seção 2.3). Para o cálculo de tais métricas foram utilizados os parâmetros da Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados para cálculo da taxa e EVM.

Parâmetro	Valor
Faixa de frequência	200 MHz
Modulação	64 QAM
Espaçamento entre tons ( $\Delta_f$ )	97,7 kHz
Gap de SNIR ( $\Gamma$ )	15,15 dB
Potência máxima ( $\rho$ )	4 dBm
Densidade espectral de potência do AWGN ( $\sigma^2$ )	-140 dBm/Hz

Foram utilizados cabos CAT5e tanto nas medições quanto nas simulações. O valor do diâmetro do condutor de cobre usado nas simulações para esse cabo foi 0,5106 mm (24 AWG) e o diâmetro incluindo o isolante de polietileno foi de 0,8 mm. A espessura da capa externa de PVC que envolve o cabo é de 0,61 mm. Para os cabos CAT5e que possuem blindagem, e que foram usados apenas nas simulações, os valores usados para configurar o cabo dentro do CST foram 0,1 mm para a espessura da blindagem externa considerada do tipo trançada de alumínio. Na Tabela 3 é apresentado uma síntese desses parâmetros. Os valores do diâmetro, espessura e o comprimento do trançado foram obtidos através de medições em laboratório utilizando paquímetro enquanto que o tipo de material usado na construção do cabo foi obtido em catálogos de cabos.

Tabela 3 – Comprimento do trançado dos pares do CAT5e.

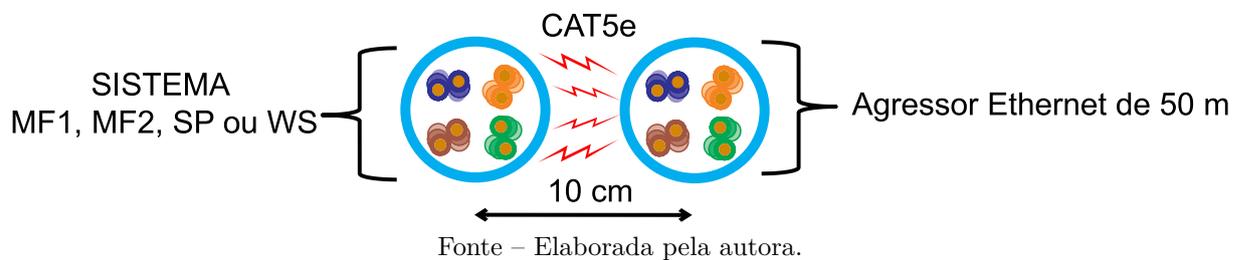
Cor do par	Comprimento do trançado (mm)
Azul	17,87
Laranja	13,28
Marrom	12,63
Verde	19,21

Fonte – Elaborada pela autora.

## 4.1 Resultados do cenário de simulação

Nesta seção são analisados e comparados o desempenho do modo fantasma de segunda camada – MF2 (4 Dif + 2 Fant + 1 FF), modo fantasma de primeira camada – MF1 (4 Dif + 2 Fant), modo diferencial – MD (4 Dif), modo *split-pair* (SP) e modo *wire-shield* (WS) em cenários com ou sem *alien crosstalk* (AXT). As simulações foram realizadas em cabos CAT5e com e sem blindagem externa, para comprimentos de 30, 50, 100 e 150 m, na presença ou na ausência de um sistema Ethernet interferente (agressor). O sistema agressor foi configurado com 50 m de comprimento e paralelo a uma distância de 10 cm do sistema principal como mostra a Figura 36.

Figura 36 – Visão transversal da configuração do sistema Ethernet agressor produzindo interferência (*alien crosstalk*).



Esses resultados foram organizados nos seguintes casos de teste (CT):

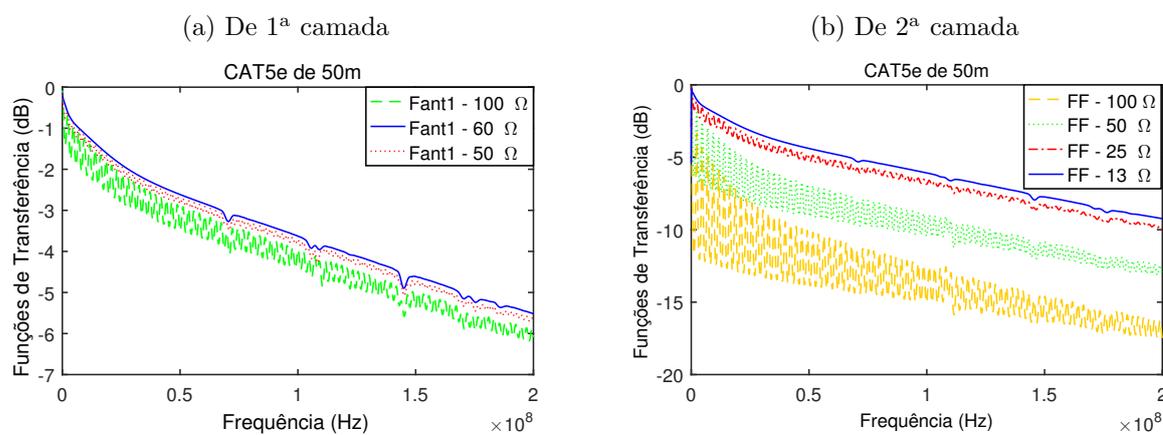
- CT 1: Análise da impedância característica dos canais fantasmas de primeira e segunda camada.
- CT 2: Influência do comprimento do trançado dos pares na capacidade de transmissão do MF2.
- CT 3: Comparação dos modos MF2, MF1 e MD com ou sem *vectoring*.
- CT 4: Comparação dos modos MF2 e MF1 sob a influência ou não de sistema agressor.
- CT 5: Comparação dos modos MF2, MF1, SP e WS sob a influência ou não de sistema agressor.

### 4.1.1 CT 1: Análise da impedância característica dos canais fantasmas de primeira e segunda camada

Antes de realizar as medições e simulações, é vital que seja feito o correto casamento de impedância com as fontes de transmissão e recepção, evitando assim a perda por reflexão do sinal. Para isso, é necessário determinar com precisão a impedância característica dos

canais fantasmas virtuais A impedância característica do par trançado do CAT5e fornecido pelo fabricante é por volta de  $100\ \Omega$ , diferentemente das impedâncias características dos canais fantasmas, como mostra a Figura 37, em que foram testadas diferentes impedâncias de fonte e carga para o canal fantasmas de 1ª e 2ª camada. Obtendo-se, assim, diferentes níveis de descasamento de impedância nas funções de transferência dos mesmos. Sendo assim, pode-se constatar por inspeção visual da Figura 37a que a impedância característica mais apropriada do canal fantasma de 1ª camada é  $60\ \Omega$  e para o canal fantasma de 2ª camada,  $13\ \Omega$ , conforme a Figura 37b.

Figura 37 – Diferentes impedâncias de carga e fonte dos canais fantasmas:



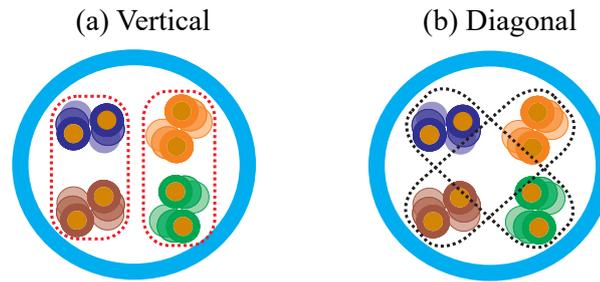
Fonte – Elaborada pela autora.

#### 4.1.2 CT 2: Influência do comprimento do trançado dos pares na capacidade de transmissão do MF2

Sabendo que a cada 2 pares é possível inserir um canal fantasma de 1ª camada, a Figura 38 mostra as duas escolhas de pares em um cabo CAT5e, vertical ou diagonal. Conforme a escolha, são obtidas diferentes capacidades de transmissão do sistema como um todo (canais diferenciais e todos os fantasmas), chamado de modo fantasma de 2ª camada (MF2).

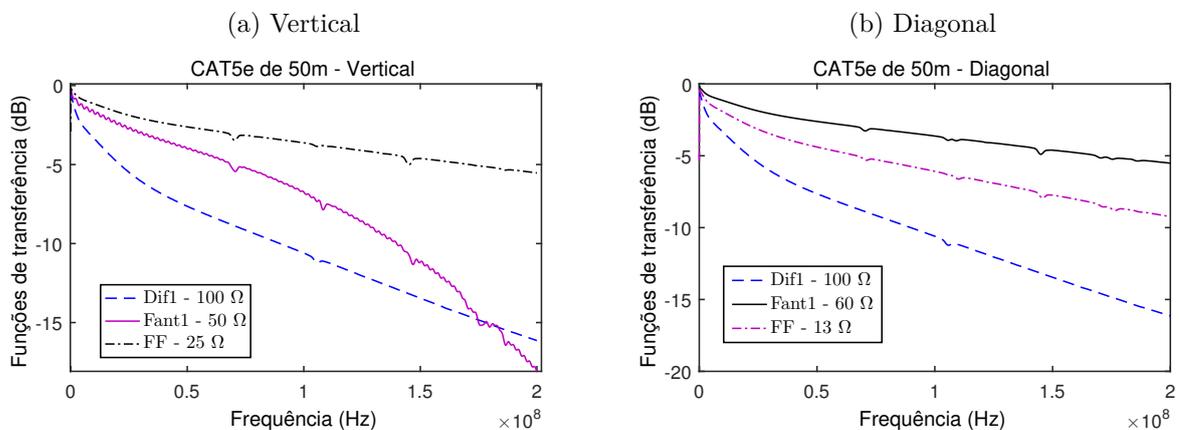
A partir das configurações vertical e diagonal da Figura 38, a Figura 39 mostra as funções de transferência de cada tipo de canal de transmissão - diferencial (Dif), fantasma de 1ª camada (Fant) e fantasma de 2ª camada (FF). É possível perceber, que quando todos os canais estão devidamente casados, os canais fantasmas (Fant e FF) detém funções de transferência de nível superior a dos diferenciais (Dif) tanto na configuração vertical quanto na diagonal, apesar de na configuração vertical, Figura 39a, a partir 174 MHz a FT do canal fantasma de 1ª camada ficar abaixo da FT do canal diferencial. Além disso, na configuração diagonal, Figura 39b, o fantasma de segunda camada tem um desempenho menor que o fantasma de primeira camada, diferentemente do modo vertical, Figura 39a.

Figura 38 – Configurações vertical e diagonal.



Fonte – Adaptada de Gomes (2012).

Figura 39 – Função de transferência dos canais diferencial, e fantasma de 1ª e fantasma 2ª camada casados nas configurações vertical e diagonal.



Fonte – Elaborada pela autora.

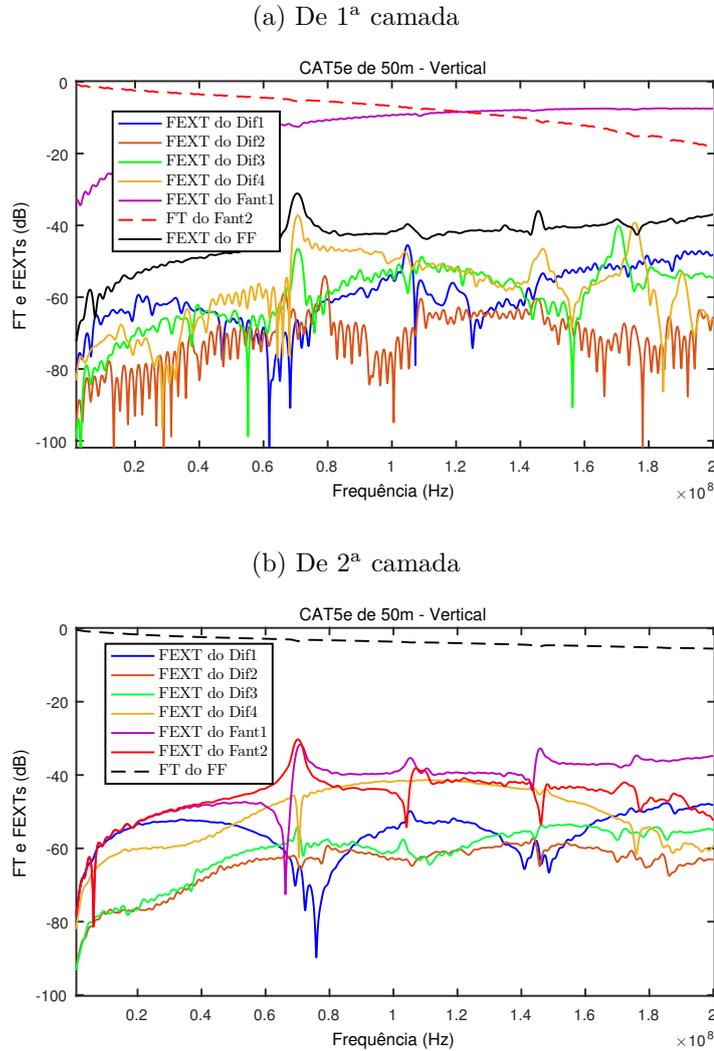
Nas Figuras 40 e 41 vemos as funções de transferência dos canais fantasmas e os FEXTs causados pelos outros canais no modo de transmissão fantasma de 2ª camada (MF2) e dele sobre outros, tanto nas configurações vertical e diagonal. Percebe-se que a escolha dos arranjos afeta não somente a FT, mas também os FEXTs.

A Figura 41, por exemplo, mostra que as funções de transferências da configuração diagonal obtidas são melhores que a da configuração vertical, Figura 40. Pois ao longo de toda a faixa de frequência, as FTs da configuração diagonal sofrem menor atenuação e permanecem abaixo dos níveis de *crosstalk*, enquanto que no arranjo vertical, a atenuação do canal fantasma de 1ª camada (Fant) é maior e o FEXT chega até mesmo a cruzar a FT em aproximadamente 120 MHz.

A explicação para isto pode ser vista na Tabela 4. Nela percebe-se que os pares que formam os fantasmas de 1ª camada (Fant 1 e Fant 2) na configuração diagonal têm comprimento do trançado similares e, portanto, dão origem a canais fantasmas mais balanceados, enquanto que na configuração vertical, têm valores mais distantes, o que gera canais mais desbalanceados e, portanto, com maior atenuação e interferência sobre eles

(FEXTs).

Figura 40 – Funções de transferência e FEXTs na configuração vertical dos canais fantasmas:

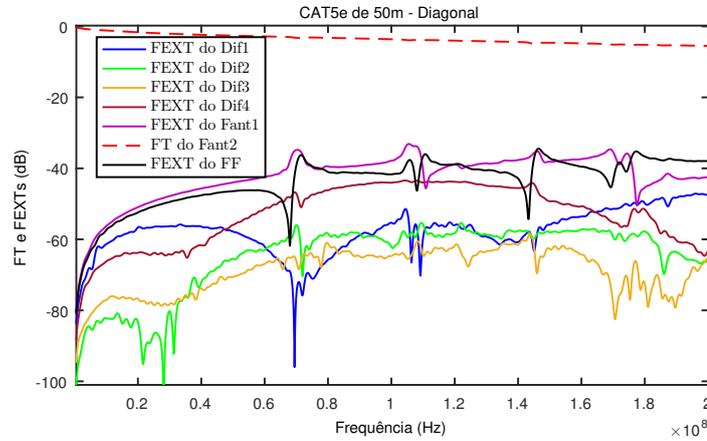


Fonte – Elaborada pela autora.

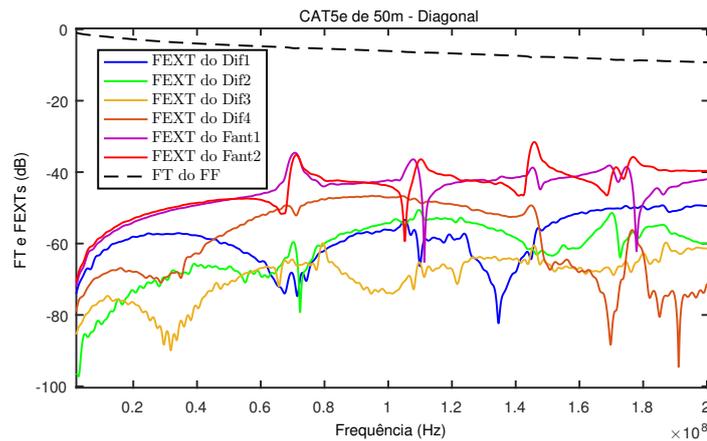
Na Figura 42, são mostradas as taxas obtidas com ou sem *vectoring* nas configurações vertical e diagonal. Da Figura 42a, percebe-se que apesar das taxas dos modos diferenciais não se alterarem com a escolha da configuração, a taxa exclusivamente dos três canais fantasmas (2 Fant e 1 FF) na configuração vertical é 6,14 Gbps, enquanto que no arranjo diagonal é 6,51 Gbps. Nota-se também, que a taxa dos canais fantasmas nas configurações vertical e diagonal está de acordo com o que foi mostrado na Figura 39, pois quanto maior o nível da FT do canal, maior será a sua taxa de transmissão, desconsiderando o efeito do FEXT já que neste caso é aplicado *vectoring*.

Figura 41 – Funções de transferência e FEXTs na configuração diagonal dos canais fantasmas:

(a) De 1ª camada



(b) De 2ª camada



Fonte – Elaborada pela autora.

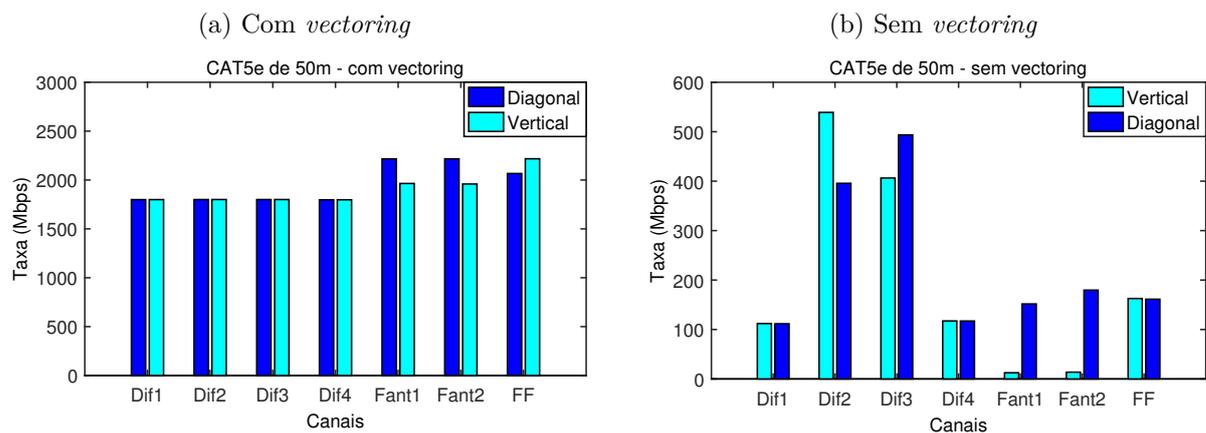
Já na Figura 42b, também é possível perceber que a taxa agregada no arranjo diagonal é melhor que no arranjo vertical, mesmo sem *vectoring*, e correspondem a uma taxa agregada de 1,61 Gbps e 1,36 Gbps, respectivamente. A maior diferença entre os dois arranjos são os canais fantasmas de 1ª camada (Fant 1 e Fant 2) que contribuem pouco com a taxa agregada na configuração vertical. Portanto, para que possamos obter o melhor desempenho do modo fantasma, as análises dos próximos testes de caso serão feitas na configuração diagonal.

Tabela 4 – Comprimento do trançado (mm) dos pares escolhidos para criar os MF1s nas configurações diagonal e vertical

Comprimento do trançado (mm)			
Vertical	Fant 1	Azul	17,87
		Marrom	12,63
	Fant 2	Laranja	13,28
		Verde	19,21
Diagonal	Fant 1	Azul	17,87
		Verde	19,21
	Fant 2	Laranja	13,28
		Marrom	12,63

Fonte – Elaborada pela autora.

Figura 42 – Taxas de todos os canais do MF2 nas configurações verticais e diagonais:



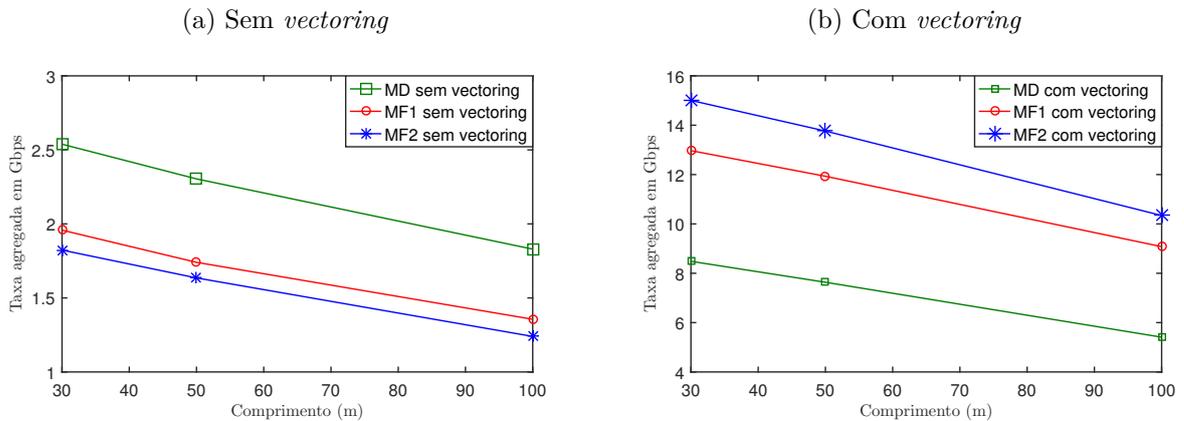
Fonte – Elaborada pela autora

#### 4.1.3 CT 3: Comparação dos modos MF2, MF1 e MD com ou sem *vectoring*

Na Figura 43 foram comparadas as taxas agregadas de transmissão dos sistemas MD (4 Dif), MF1 (4 Dif + 2 Fant) e MF2 (4 Dif + 2 Fant + FF), com ou sem *vectoring* para 30, 50 e 100 m – comprimentos de cabos dentro faixa especificada para o padrão G.fast.

Da Figura 43a é possível perceber que ao utilizar o modo fantasma de transmissão sem *vectoring*, tanto o MF1 quanto o MF2 têm resultados piores que o MD, que atinge 1,8 Gbps em 100 m, sendo que o MF2 é o que apresenta a menor taxa agregada de todos, por volta de 1,24 Gbps para esse mesmo comprimento, já o MF1 alcança taxas de 1,35 Gbps. Isso demonstra que apesar dos sistemas MF1 e MF2 aumentarem o número de canais disponíveis, nesta situação o uso deles traz prejuízos devido à forte interferência dos entre os canais fantasmas e diferenciais.

Figura 43 – Taxas agregada para os modos de transmissão diferencial(MD), fantasma de 1ª camada (MF1) e fantasma de 2ª camada (MF2):



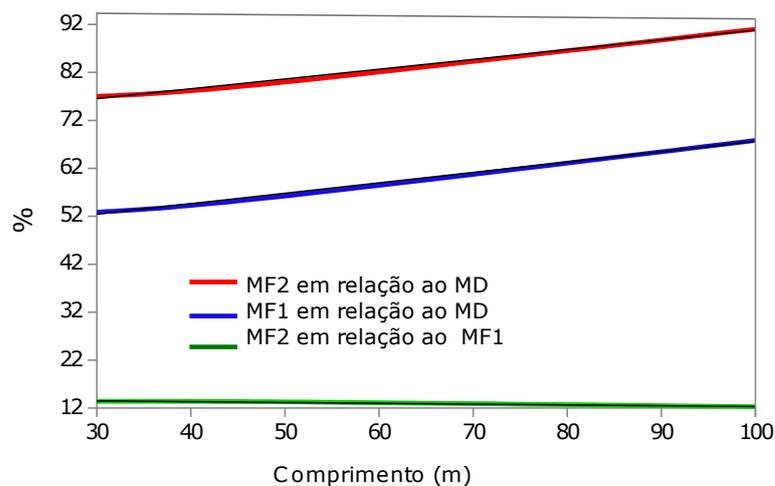
Fonte – Elaborada pela autora.

Entretanto, da Figura 43b percebe-se que a taxa agregada com *vectoring* obtida pelo MF2 é melhor que os modos MF1 e MD, por volta de 15 Gbps para comprimentos de 30 m, 13,76 Gbps para 50 m e permanece superior a 10,3 Gbps em 100 m. Em relação ao MD, o MF2 apresenta um ganho de 6,52 Gbps em 30 m, 6,13 Gbps para 50 m e 4,97 Gbps em 100 m. Sendo que o MF1 apresenta um ganho em relação ao MD para 30, 50 e 100 m de 4,48 Gbps, 4,29 Gbps, 3,66 Gbps, respectivamente. Já comparando a segunda camada (MF2) em relação à primeira (MF1), temos o ganho de 2,03 Gbps, 1,83 Gbps, 1,27 Gbps, respectivamente para 30, 50 e 100 m. Demonstrando que de fato o MF2 tem capacidade de aumentar a taxa agregada de transmissão do sistema G.fast, porém somente quando é aplicado *vectoring*.

Comparando as Figuras 43a e 43b percebe-se que a taxa agregada ao aplicar *vectoring* em relação ao resultado sem *vectoring*, é em média 3,3 vezes maior para o MD, 6,6 vezes maior para o MF1 e 8,4 vezes maior para MF2.

Apesar dos ganhos em Gbps entre os modos MD, MF1 e MF2 diminuam com o comprimento, a Figura 44 mostra que, percentualmente, o ganho de taxa de transmissão do MF2 em relação ao MD aumenta com comprimento, assim como o ganho em utilizar o MF1 em relação ao MD. Entretanto, o ganho percentual do MF2 em relação ao MF1 diminui com o comprimento. Isso ocorre devido a FT de cada canal, pois a atenuação dos canais Fant e FF são menores que a do canal Dif, como mostrado anteriormente na Figura 39b. Assim, a taxa dos canais Dif diminuem mais rapidamente que as dos canais fantasmas, fazendo que os ganhos percentuais ao utilizar os modos MF1 e MF2 em relação ao MD aumentem com o comprimento. O ganho percentual ao utilizar o MF2 em relação ao MF1 diminui com o comprimento devido a atenuação do canal FF ser maior que a dos canais Fant, como também foi visto na Figura 39b. Dessa forma, a taxa do canal FF diminui mais rapidamente que as dos canais Fant.

Figura 44 – Ganho de taxa de transmissão percentual entre os modos MF2, MF1 e MD.



Fonte – Elaborada pela autora.

#### 4.1.4 CT 4: Comparação dos modos MF2 e MF1 sob a influência ou não de sistema agressor

Os resultados obtidos mostram que o MF2 (4 Dif + 2 Fant + 1 FF) possui um grande ganho de taxa quando *vectoring* é aplicado. No entanto, esses resultados consideram que o sistema sempre está isolado, quando em cenários de transmissões reais podem haver interferências externas, conhecidas como *alien crosstalk*, gerados por outros sistemas, como por exemplo, o sistema Ethernet. Essas linhas são conhecidas como agressores ou *aliens* e possuem efeito degradante pela adição de ruído ao sistema G.fast. Devido essas linhas estarem fora do sistema, em geral o operador não terá como vetorizá-las.

Nas Figuras 45 e 46, são mostrados o desempenho do sistema MF2 e comparação com o MF1 (4 Dif + 2 Fant), na presença ou na ausência de uma linha agressora. Da Figura 45 é possível notar que o MF2 apresenta baixa imunidade ao ruído, pois na presença de uma linha agressora atinge taxas menores que 1,4 Gbps, e seu desempenho se torna pior até mesmo que o MF1, que possui taxas em média 6,7 vezes maior que o MF2 neste cenário e atinge até 8,39 Gbps em 30 m. O efeito da linha agressora no MF2 é responsável por uma redução na sua taxa de transmissão de em média de 90% (Gbps) enquanto que para o sistema MF1 há uma queda em média de 27,8% ao considerar a presença de agressores.

Na Figura 46 é visto que para um cabo da mesma categoria, mas com blindagem externa, o efeito da linha agressora é consideravelmente reduzido, porém ainda impacta mais ao modo de transmissão MF2, levando à uma perda na taxa de transmissão de 10,6% em média. Contudo, o MF2 é mais vantajoso de utilizar que o MF1, por possuir maior taxa agregada em qualquer das situações representadas na figura. No pior caso, a taxa agregada na presença de AXT, é 9,56 Gbps para o MF2 possui enquanto que o MF1 atinge 8,06 Gbps, ambos para 100 m.

Figura 45 – Taxas agregadas de transmissão quando é utilizada a 2ª camada do modo fantasma e comparação com a 1ª camada. Cenários com e sem agressor em um cabo sem blindagem para diferentes comprimentos.

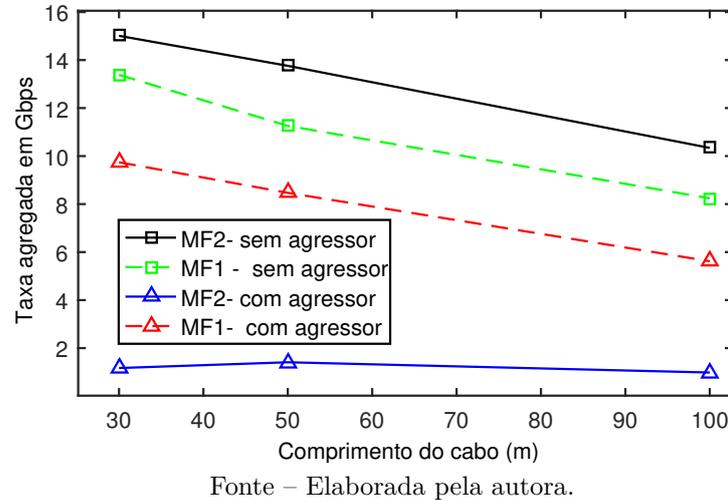
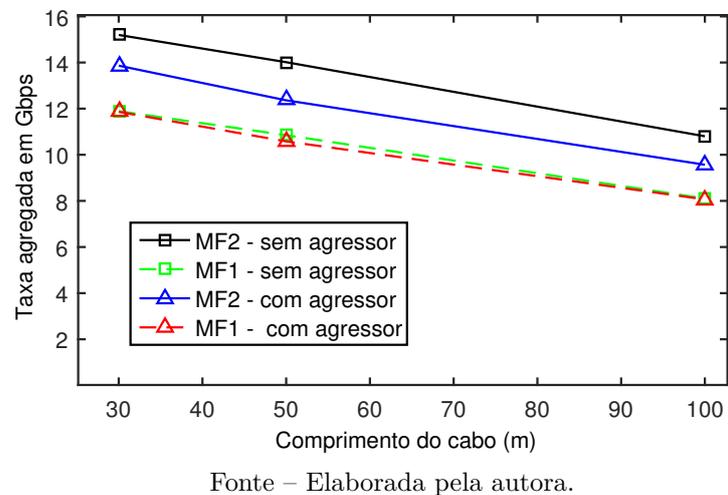


Figura 46 – Taxas agregadas de transmissão quando é utilizada a 2ª camada do modo fantasma e comparação com a 1ª camada. Cenários com e sem agressor em um cabo com blindagem para diferentes comprimentos.



O efeito dessa linha *alien* também pode ser analisado a partir do grau de distorção que ela aplica nos símbolos ao serem transmitidos pelo canal. Da Tabela 5 percebe-se que na ausência do sistema agressor todos os EVMs ficam abaixo do limite de 8% especificado para 64 QAM (3GPP, 2017). Já com a linha agressora, os níveis do EVM ficam de acordo com o especificado pelo 3GPP apenas até 30m; enquanto que nos demais comprimentos ele chega a ser até mesmo 5,4 vezes maior.

Tabela 5 – EVM(%) médio por canal na presença ou na ausência de *alien crosstalk*

EVM médio dos canais com <i>vectoring</i>					
Comprimento (m)	Canal	Sem blindagem		Com blindagem	
		Com agressor	Sem agressor	Com agressor	Sem agressor
30	Dif	2,968	0,063	0,053	0,053
	Fant	4,058	0,038	0,042	0,041
	FF	4,104	0,047	0,043	0,043
50	Dif	20,590	0,101	0,074	0,074
	Fant	18,590	0,046	0,052	0,052
	FF	20,100	0,061	0,055	0,055
100	Dif	43,540	0,317	0,211	0,211
	Fant	17,150	0,067	0,079	0,079
	FF	26,290	0,118	0,103	0,110

Fonte – Elaborada pela autora.

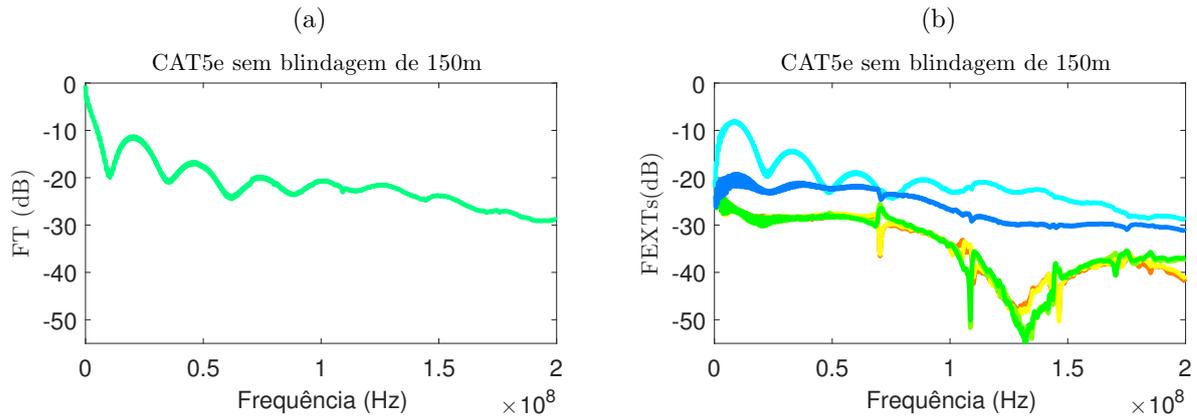
#### 4.1.5 CT 5: Comparação dos modos MF2, MF1, SP e WS sob a influência ou não de sistema agressor.

Nesta seção serão apresentados os resultados de simulações comparando os modos *split-pair* (SP) e *wire-shield* (WS) com os modos fantasma (MF1 e MF2) em termos de taxa de transmissão e EVM. Para estas análises, foram escolhidos cabos mais longos dentro do padrão G.fast, que ainda não foi analisado anteriormente, no caso 150 m, além de cenários com ou sem *alien crosstalk* (AXT).

As Figuras 47 e 48 mostram as funções de transferência de um canal e FEXTs sobre o mesmo, obtidos nas simulações dos modos SP e WS, respectivamente. Foram utilizadas fontes transmissoras e receptoras de  $50 \Omega$ , de acordo com o que foi calculado usando a equação (2.12) descrita na Seção 2.1.3 para a obtenção da impedância característica. Mas mesmo assim ocorrem grandes oscilações indicando algum tipo de descasamento. As Figuras 47 e 48 mostram que o acoplamento FEXTs entre os canais é bastante elevado como esperado devido a transmissão em modo comum, e até ultrapassa os níveis das FT nos dois casos. Dessa forma, esses modos de transmissão serão avaliados somente com a utilização de *vectoring* para cancelamento de interferência.

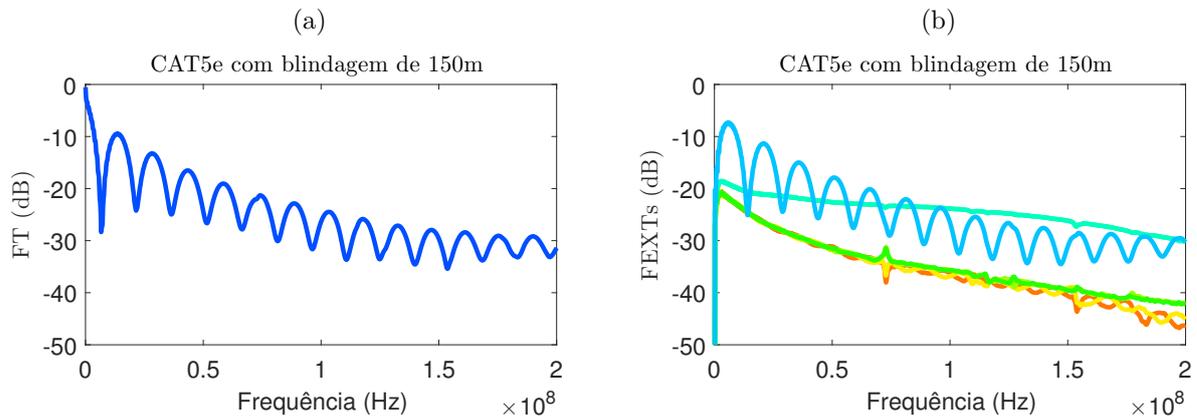
Como no caso do CAT5e sem blindagem não é possível transmitir o modo WS, dessa forma foram comparados apenas os modos SP, MF1 e MF2, como mostra a Figura 49. Percebe-se que no cenário sem agressor, o MF2 atinge 6,85 Gbps e possui melhor desempenho que o SP, que atinge 5,87 Gbps, mesmo ambos tendo o mesmo número de canais. Isto representa uma diferença de 980 Mbps (14,3%) entre os dois. Nesse mesmo cenário, a taxa agregada do MF1 é a menor de todas, com 4,96 Gbps. Entretanto, no cenário com agressor, a taxa do MF2 diminui drasticamente e atinge 799 Mbps, e possui

Figura 47 – FT e FEXTs de um canal do modo SP em cabo de 150 m sem blindagem.



Fonte – Elaborada pela autora.

Figura 48 – FT e FEXTs de um canal do modo WS em cabo de 150 m com blindagem.



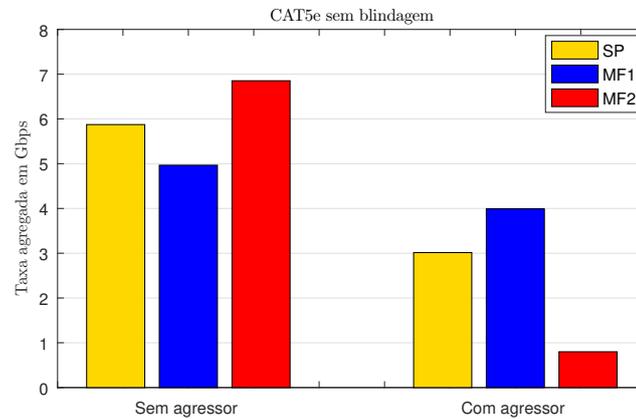
Fonte – Elaborada pela autora.

um desempenho menor que o SP, que apresenta 2,21 Gbps, o que representa 73,4% a mais que o MF2. Neste cenário, o sistema com melhor desempenho é o MF1, que apesar de ter um canal a menos que o SP e MF2, é o menos susceptível ao efeito da linha agressora, e mantém uma taxa agregada de 3,99 Gbps, o que significa 976 Mbps a mais que o SP. As reduções (percentual) de taxa de transmissão dos modos SP, MF1 e MF2 nos cenários sem agressor e com agressor foram de 48,7%, 19% e 88%, respectivamente.

A Figura 50 apresenta a comparação entre os modos WS, MF1 e MF2 no CAT5e com blindagem externa. Apesar de o modo WS possuir um canal a mais que o MF2, a taxa agregada do MF2 é ligeiramente maior que a do WS, isto é, 6,85 Gbps para o MF2 e 6,71 Gbps para o WS, sendo que a taxa do MF1 é a mais baixa com 4,96 Gbps, no cenário sem AXT (linha Ethernet agressora). No caso do cenário com agressor, o MF2 atingiu 5,97 Gbps e ainda é melhor que o WS, porém a diferença entre os dois é maior que no caso anterior, em torno de 1,73 Gbps. Além disso, nesse cenário o desempenho do WS é pior até

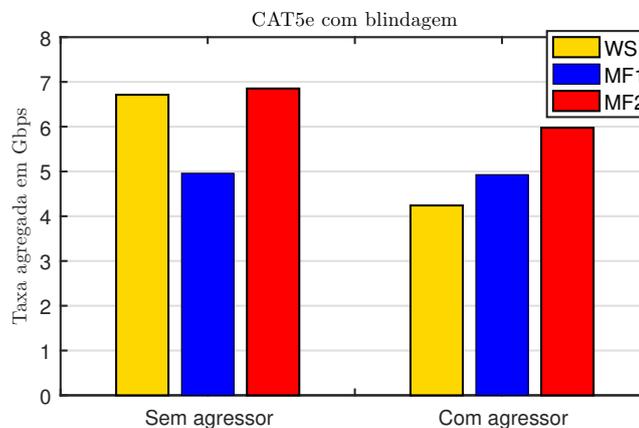
mesmo que o MF1. Isso ocorre devido ao WS usar a blindagem externa como referência para os canais, assim perde parte da proteção que a utilização de cabos blindados oferece.

Figura 49 – Taxas agregadas de transmissão quando é utilizada o modo SP e MF2. Cenários com e sem agressor em um cabo de 150 m sem blindagem.



Fonte – Elaborada pela autora.

Figura 50 – Taxas agregadas de transmissão quando é utilizada o modo WS e MF2. Cenários com e sem agressor em um cabo de 150 m com blindagem.



Fonte – Elaborada pela autora.

Na Tabela 6 temos os resultados de EVM calculado a partir da média dos EVMs de todos os canais dos modos SP e MF2 para os cenários com ou sem agressor. Percebe-se que a influência de AXT no modo SP é insignificante em torno de 2,75 % em ambos cenários, enquanto que para o MF2, o EVM médio fica abaixo de 1 % sem agressor e com agressor é mais de 77 vezes maior, e ultrapassa o limite de 8 % para a constelação de 64 QAM.

O último resultado de simulação a ser mostrado é o EVM médio para os modos WS e MF2 (Tabela 7). Ambos os modos de transmissão possuem baixo EVM, menos de

Tabela 6 – EVM(%) médio na presença ou na ausência de *alien crosstalk* em CAT5e de 150 m sem blindagem.

EVM médio dos canais com <i>vectoring</i>		
Modo de transmissão	Sem agressor	Com agressor
SP	2,754	2,755
MF2	0,778	60,408

Fonte – Elaborada pela autora.

1 %, tanto no cenário sem agressor quanto no com agressor, e o EVM do WS é um pouco maior que o EVM do MF2.

Tabela 7 – EVM(%) médio na presença ou na ausência de *alien crosstalk* em CAT5e de 150 m com blindagem.

EVM médio dos canais com <i>vectoring</i>		
Modo de transmissão	Sem agressor	Com agressor
WS	0,783	0,784
MF2	0,619	0,621

Fonte – Elaborada pela autora.

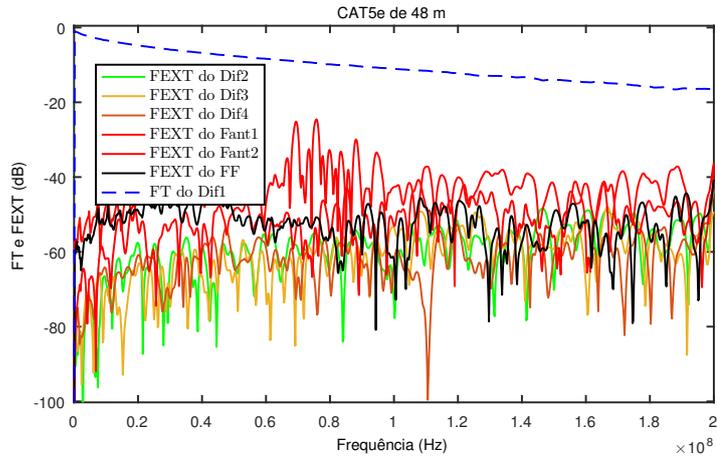
## 4.2 Resultados do cenário de medição

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através de medições de FT e FEXT do MF2, e servem para validar em certa medida os resultados obtidos através de simulações.

As medições foram realizadas com um cabo CAT5e de 48 m. As impedâncias características dos canais fantasma foram calculadas através da equação (2.12) usando os parâmetros de espalhamento obtidos a partir das medições, foram encontrados para o canal fantasma de 1ª camada (Fant)  $97 \Omega$  e para o fantasma de 2ª camada (FF)  $47 \Omega$ . Esses primeiros resultados já diferem dos obtidos nas simulações, onde foram encontrados  $60 \Omega$  para o Fant e  $13 \Omega$  para o FF. Levando em consideração a disponibilidade dos *baluns* em laboratório, foram utilizadas em todas as medições um *balun* de  $100 \Omega$ .

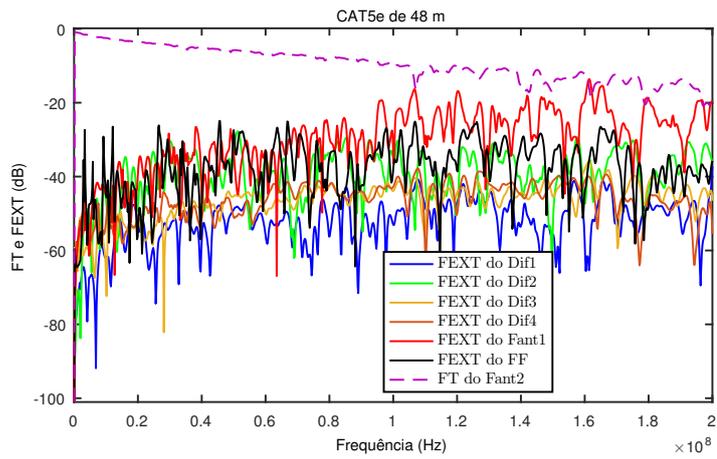
Feitas essas considerações, as Figuras 51, 52 e 53 apresentam respectivamente os resultados de FT dos canais diferenciais (Dif), fantasmas de 1ª camada (Fant) e fantasma de 2ª camada (FF) e os FEXTs entre eles. Através dessas medidas foi possível calcular as taxas de transmissão de cada canal individualmente do MF2 com e sem *vectoring*, como mostra a Figura 54. Também foram obtidas as taxas agregadas de transmissão do MF2 comparando com o MD (apenas canais diferenciais - 4 Dif) e MF1 (canais diferenciais e fantasmas de 1ª camada - 4 Dif + 2 Fant), mostrada na Figura 55.

Figura 51 – Medições de FT e FEXTs do canal diferencial.



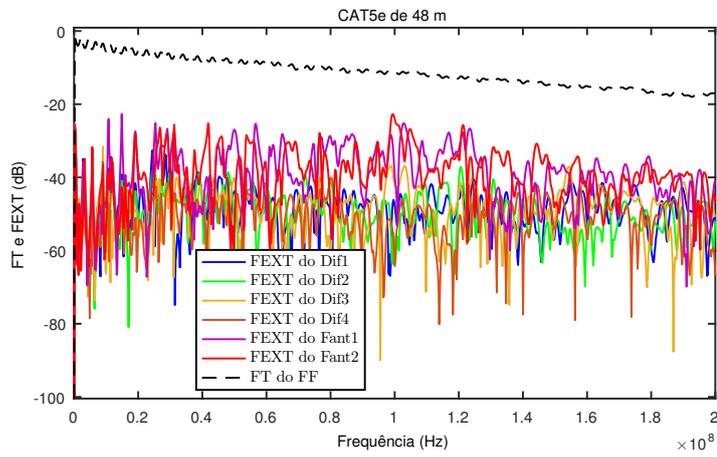
Fonte – Elaborada pela autora.

Figura 52 – Medições de FT e FEXTs do canal fantasma de 2ª camada.



Fonte – Elaborada pela autora.

Figura 53 – Medições de FT e FEXTs do canal fantasma de 2ª camada.

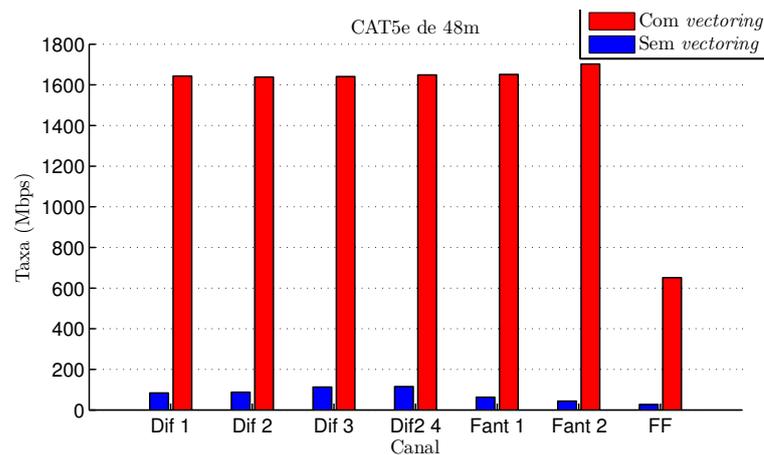


Fonte – Elaborada pela autora.

Devido aos altos níveis de FEXT entre os canais mostrado nas Figuras 51, 52 e 53, as taxas sem *vectoring* de cada canal do MF2 são baixas como mostra a Figura 54, e não ultrapassam de 150 Mbps (cada canal), tendo os canais diferenciais (Difs) melhor taxa que os canais fantasmas (Fants e FF). Ainda na Figura 54, vemos que a taxa de cada canal com *vectoring* ultrapassa 1,6 Gbps nos canais Difs e Fants, sendo a taxa dos Fants ligeiramente maior. Entretanto, a taxa do canal FF corresponde à aproximadamente 40% da taxa dos outros canais, contribuindo com 651 Mbps.

Essa taxa menor é devido ao descasamento ocasionado ao utilizar um *balun* de  $100\ \Omega$  sendo que a impedância característica do FF é aproximadamente  $47\ \Omega$ . A Tabela 8 apresenta os resultados de EVM médio dos canais do MF2 com ou sem *vectoring*. Nos dois casos o EVM de todos os canais estão dentro do permitido pelo 3GPP, no pior caso, não ultrapassa 0,2%, e o EVM é um pouco maior sem *vectoring*.

Figura 54 – Taxas agregadas por canal do MF2 no cenário de medição.



Fonte – Elaborada pela autora.

Tabela 8 – EVM(%) médio do modo fantasma de 2ª camada de medições em CAT5e de 48 m.

EVM (%) médio dos canais		
Canal	Sem <i>vectoring</i>	Com <i>vectoring</i>
Dif	0,148	0,143
Fant	0,138	0,130
FF	0,162	0,134

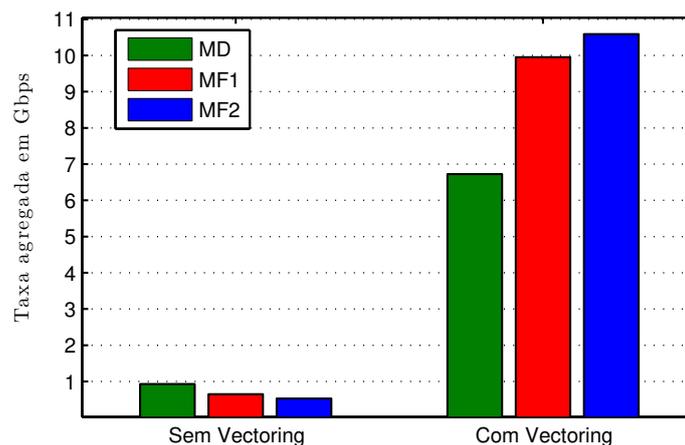
Fonte – Elaborada pela autora.

A última análise a ser feita é a comparação do MF2 com o MD e MF1 em cenários com ou sem *vectoring*, mostrada na Figura 55. Nesse caso, quando não é utilizado *vectoring*, a implementação da transmissão em modo fantasma, tanto usando apenas a 1ª camada (MF1) quanto explorando a 2ª camada (MF2), é mais prejudicial do que usar apenas os

modos diferenciais, pois vemos que a taxa agregada do MD é maior nesse caso, em torno de 930 Mbps. Especificamente, ao usar o MF2, atinge-se taxas sem *vectoring* de 530 Mbps, que é inferior a taxa obtida com somente o MF1, com 650 Mbps. Essas taxas representam uma perda de 43 % e 30 % em relação ao MD, respectivamente. Esse efeito degradante ao utilizar os modos fantasmas (MF1 e MF2) ocorre devido aos canais adicionais não possuírem as vantagens do efeito do trançamento que os pares físicos têm, intensificando a interferência entre os canais e estão de acordo com o que foi visto nas simulações.

Os resultados com *vectoring* presentes na Figura 55, mostram que com o devido cancelamento do FEXT, a configuração MF1 atinge 9,95 Gbps e possui vantagens em relação ao MD que atinge 6,72 Gbps, um aumento de 48 %. Já com MF2 se atinge uma taxa agregada ainda maior, de 10,59 Gbps, que representa um ganho de 6,5 % e 57 % em relação ao MF1 e MD, respectivamente.

Figura 55 – Taxas agregadas de transmissão no cenário de medição do MD, MF1 e MF2.



Fonte – Elaborada pela autora.

## 5 Conclusão

Neste trabalho apresentou-se resultados oriundos de simulações numéricas e de procedimento experimental para transmissões em modo fantasma de 2ª camada (MF2), ou seja, transmissão simultânea de 4 canais diferenciais, 2 fantasma de 1ª camada e 1 fantasma de 2ª camada. Além disso, comparou-se o desempenho do MF2 com os modos alternativos de transmissão *wire-shield* (WS) e *split-pair* (SP) através de simulações, assumindo cabos CAT5e de 150 m, com e sem blindagem. Considerando cenários sob a influência ou não de interferências externas.

Constatou-se que o MF2 é o melhor modo de transmissão alternativo quando não há a presença de AXT. Por outro lado, na presença de AXT e assumindo um cabo sem blindagem, o MF2 é o mais afetado de todos os modos, tendo uma redução de taxa de transmissão acima de 80% e EVM acima dos definidos pelo 3GPP, conseqüentemente o pior desempenho dentre todos.

Quando tem-se um cabo com blindagem, o MF2 obtém o melhor desempenho com e sem a presença de AXT, tendo EVM inferior a 0,21% mesmo na presença de AXT.

Verifica-se que o MF2 atinge níveis de taxa agregada com a aplicação de *vectoring* de até 15 Gbps, em comprimentos de 30 m, taxa cerca de 1,8 vezes maior ao que seria obtido sem sua utilização (MD). Além disso, a utilização da segunda camada do modo fantasma (MF2) proporcionou um aumento na taxa agregada de transmissão acima de 27% em média em relação ao MF1. E em cabos de comprimentos maiores como 150 m, o MF2 apresentou taxa agregada de 6,85 Gbps, o decaimento da taxa de transmissão não foi tão expressivo até 100 m, pois esta ficou em torno de 10 Gbps. Desta forma, o uso do *vectoring* mostra-se obrigatório para sistemas que queiram utilizar o MF2 (em cabos do tipo CAT5e). Sem *vectoring*, o MF2 apresenta desempenho pior até mesmo que MF1 e MD.

Foi visto que a configuração dos pares utilizados para geração dos modo fantasma influi diretamente nos níveis das funções de transferências, dos *crosstalks*, nos valores das impedâncias características dos canais fantasmas e nas taxas agregadas de transmissão do sistema MF2. Diante disso, foi esclarecido que o mais recomendado é que os pares tenham comprimento do trançado parecidas.

No cenário de medição em um cabo CAT5e de 48 m, os resultados mostraram comportamentos semelhantes aos da simulação em relação a necessidade de aplicação de *vectoring*. Entretanto, a taxa agregada com *vectoring* do MF2, obtida na simulação para 50 m foi de 13,76 Gbps, enquanto que para a medição foi de 10,59 Gbps. Outra diferença é em relação a impedância características dos canais fantasmas, pois foram obtidos 100  $\Omega$

para o canal fantasma de 1ª camada na medição e  $60\ \Omega$  na simulação, enquanto que para o canal fantasma de 2ª camada,  $13\ \Omega$  na simulação e  $47\ \Omega$  na medição.

Como trabalhos futuros nessa linha de pesquisa têm-se:

- Investigar os modos de transmissão alternativos, SP, WS, MF1 e MF2, por simulações e medições em cenários acima de 200 MHz, como no sistema G.mgfast.
- Implementar uma placa de circuito do MF2 para avaliação prática da capacidade desse sistema com transmissão simultânea dos canais diferenciais e fantasmas.

## 5.1 Artigos publicados

Durante a graduação foram publicados alguns artigos relacionados ao sistema DSL, mais especificamente sobre métodos de mitigação de interferência e o modo fantasma de transmissão. A seguir, os trabalhos são destacados de acordo com o ano e tipo de publicação.

Trabalhos completos publicados em anais de congressos:

1. SOUZA, D. D.; FREITAS, M. M. M. ; SOUSA, B. P. T. ; SALES JUNIOR, C. S. ; RODRIGUES, R. M. ; COSTA, J. C. W. A. . Análise do modo fantasma aplicado a sistemas G.fast e XG.fast. In: XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2017, São Pedro-SP. Anais do XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2017.
2. FREITAS, M. M. M. ; SOUZA, D. D. ; SOUSA, B. P. T. ; GOMES, D. A. ; SALES JUNIOR, C. S. ; RODRIGUES, R. M. ; COSTA, J. C. W. A. . Utilizando a segunda camada do modo fantasma para aprimoramento de aplicações G.fast. In: XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2017, São Pedro-SP. Anais do XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2017.
3. GOMES, D. A. ; SALES JUNIOR, C. S. ; PELAES, E. ; SOUZA, D. D. ; COSTA, J. C. W. A. . Improving PLC to DSL Interference Mitigation Methods by Considering Mode Conversion Effects. In: XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2016) (SBrT 2016), 2016, Santarém. Anais do XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2016. p. 727.

Resumos publicados em anais de congressos:

1. FREITAS, M. M. M. ; SOUSA, B. P. T. ; SOUZA, D. D. ; SALES JUNIOR, C. S. ; COSTA, J. C. W. A. . Performance analysis for transmission in phantom systems

in corporate environments. In: XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2016), 2016, Sanatarém. IC-03: Poster: Trabalhos de Iniciação Científica III, 2016. p. 747-748.

## Referências

- 3GPP. *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 15)*. 2017. Citado na página 59.
- BERGEL, I.; LESHEM, A. The performance of zero forcing dsl systems. *IEEE Signal Processing Letters*, v. 20, n. 5, p. 527–530, May 2013. ISSN 1070-9908. Citado na página 38.
- CABLEWHOLESALE. 2017. Disponível em: <<https://www.cablewholesale.com/products/network-phone/cat-5/product-10x6-522th.php>>. Citado na página 25.
- CHEN, F.; ZHENG, X.; JI, X. Evm measurement method of pusch in td-lte system. In: *2011 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–4. ISSN 2161-9646. Citado na página 39.
- CISCO. *The Zettabyte Era: Trends and Analysis*. 2017. Disponível em: <<http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-indexvni/vni-hyperconnectivity-wp.html>>. Citado na página 19.
- COOMANS, W.; MORAES, R. B.; HOOGHE, K.; DUQUE, A.; GALARO, J.; TIMMERS, M.; WIJNGAARDEN, A. J. van; GUENACH, M.; MAES, J. Xg-fast: the 5th generation broadband. *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 12, p. 83–88, Dec 2015. ISSN 0163-6804. Citado na página 19.
- DRAKULIĆ, S.; STATOVCI, D.; WOLKERSTORFER, M.; ZEMEN, T. 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 3 vezes nas páginas 20, 37 e 38.
- FOUBERT, W.; NEUS, C.; BIESEN, L. V.; ROLAIN, Y. 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 22.
- GABARA, T. Phantom mode signaling in vlsi systems. In: *Proceedings 2001 Conference on Advanced Research in VLSI. ARVLSI 2001*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 88–100. ISSN 1522-869X. Citado na página 21.
- 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 38.
- GOLDEN, P.; DEDIEU, H.; JACOBSEN, K. *Fundamentals of DSL Technology*. [S.l.]: Auerbach Publications, 2006. Citado 6 vezes nas páginas 26, 27, 28, 29, 36 e 37.
- GOLDEN, P.; DEDIEU, H.; JACOBSEN, K. (Ed.). *Implementation and applications of DSL technology*. [S.l.]: Auerbach Publications, 2007. Citado na página 30.

- GOMES, D. *Transmissão DSL em Phantom Mode: Medições e Avaliação de Desempenho*. Dissertação (Mestrado) — UFPA, 2012. Citado 7 vezes nas páginas 22, 33, 45, 46, 47, 48 e 53.
- IKEDA, G. *Avaliação de Desempenho na Segunda Camada de uma Transmissão em Modo Fantasma*. 2015. Citado na página 23.
- JAKOVLJEVIC, M.; MAGESACHER, T.; ERICSON, K.; ODLING, P.; BORJESSON, P. O.; ZAZO, S. Common mode characterization and channel model verification for shielded twisted pair (stp) cable. In: *2008 IEEE International Conference on Communications*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 447–451. ISSN 1550-3607. Citado na página 21.
- JAKOVLJEVIC, M.; MAGESACHER, T.; ODLING, P.; BORJESSON, P. O.; SANCHEZ, M.; ZAZO, S. 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 21.
- 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 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- LEE, B.; CIOFFI, J. M.; JAGANNATHAN, S.; MOHSENI, M. Gigabit dsl. *IEEE Transactions on Communications*, v. 55, n. 9, p. 1689–1692, Sept 2007. ISSN 0090-6778. Citado na página 21.
- 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 na página 39.
- 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 20.
- MAKHARASHVILI, T.; BOOTH, B.; MARTIN, K.; DREWNIK, J.; BEETNER, D. G. Study of alien crosstalk to a broadreach; protocol based system. In: *2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 379–384. Citado na página 30.
- NIR, V. L.; MOONEN, M. *Measurement setup for differential-mode and common-mode channels*. [S.l.], 2007. Citado na página 29.
- OHASHI, A. *Impacto de não-uniformidades em cabos de pares trançados na transmissão em modo fantasma*. Dissertação (Mestrado) — UFPA, 2017. Citado na página 22.
- PALM., S. *ITU-T xDSL Standards*. 2004. Citado na página 28.
- SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, v. 27, n. 3, p. 379–423, July 1948. ISSN 0005-8580. Citado na página 36.
- STROBEL, R.; JOHAM, M.; UTSCHICK, W. Achievable rates with implementation limitations for g.fast-based hybrid copper/fiber networks. In: *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 958–963. ISSN 1550-3607. Citado na página 20.

- TOPIC, P. *World Broadband Statistics Q2 2017*. 2017. Disponível em: <<http://point-topic.com/free-analysis/world-broadband-statistics-q2-2017/>>. Citado na página 20.
- WANG, M. *Classification and Specification of Ethernet Cables*. 2017. Disponível em: <<http://www.fiber-optic-solutions.com/classification-specification-ethernet-cables.html>>. Citado na página 25.
- ZHANG, J.; HSIANG, T. Y. *Extraction of Subterahertz Transmission-line Parameters of Coplanar Waveguides*. 2007. Piers online. Vol. 3, no. 7. Citado na página 31.