

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**IMPACTO DE NÃO-UNIFORMIDADES EM  
CABOS DE PARES TRANÇADOS NA  
TRANSMISSÃO EM MODO FANTASMA**

ALINE AYAKO OHASHI

DM 36/2017

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALINE AYAKO OHASHI

**IMPACTO DE NÃO-UNIFORMIDADES EM  
CABOS DE PARES TRANÇADOS NA  
TRANSMISSÃO EM MODO FANTASMA**

DM 36/2017

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALINE AYAKO OHASHI

**IMPACTO DE NÃO-UNIFORMIDADES EM CABOS DE  
PARES TRANÇADOS NA TRANSMISSÃO EM MODO  
FANTASMA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações.

Orientador: João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa

Coorientador: Roberto Menezes Rodrigues

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

2017

Dados Internacionais de Catalogação - na – Publicação (CIP) Sistema de Bibliotecas da UFPA

---

Ohashi, Aline Ayako, 1993 -

Impacto de não-uniformidades em cabos de pares trançados na transmissão em modo fantasma / Aline Ayako Ohashi.- 2017.

Orientador :João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa.

Coorientador: Roberto Menezes Rodrigues.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2017.

1. Sistemas de telecomunicação – tráfego. 2. Cabos de telecomunicação. 3. Inovações tecnológicas. I. Título.

CDD 23. ed. 621.382

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

## **IMPACTO DE NÃO-UNIFORMIDADES EM CABOS DE PARES TRANÇADOS NA TRANSMISSÃO EM MODO FANTASMA**

AUTORA: **ALINE AYAKO OHASHI**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADO EM: 25 / 09 / 2017

**BANCA EXAMINADORA:**

---

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

---

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

---

**Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante**  
(Avaliador Interno - PPGEE/UFPA)

---

**Prof. Dr. Claudomiro de Souza de Sales Junior**  
(Avaliador Externo ao Programa - PPGCC/UFPA)

---

**Prof. Dr. Gilvan Soares Borges**  
(Avaliador Externo - IFPA)

**VISTO:**

---

**Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes**  
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

Dedico aos meus pais.

# Agradecimentos

Agradeço à Deus por tornar mais esta etapa da minha vida um evento concretizado, por me dar forças, porque somente ele sabe as tantas dificuldades que enfrentei para enfim estar neste momento podendo concluir meu mestrado.

Agradeço ao meu namorado, André Fernandes, pelo apoio, paciência, por me dar forças a continuar nessa jornada e nunca desistir, e pela compreensão em tantos momentos difíceis e dias corridos.

Aos meus pais, Pedro e Marlene Ohashi, e minha avó paterna Chiyoko Ohashi, por me incentivarem e apoiarem em cada escolha da minha vida. Por compreenderem a minha ausência e falta de convivência com eles, durante o período de mestrado.

Ao professor e Orientador Dr. João Weyl por acreditar em mim, pela confiança no trabalho que me confiou, e pelos conhecimentos repassados em âmbito acadêmico e social. Agradeço também ao Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA) pela vivência e experiência acadêmica que me possibilitou participar.

Aos professores Dr. Roberto Menezes e Dr. Claudomiro Sales pelos ensinamentos bastante produtivos. Agradeço também ao professor Dr. Gilvan Soares pelas muitas discussões acerca do trabalho, e conhecimentos repassados.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Computação e Elétrica com os quais tive a oportunidade de ser aluna, por terem ensinado e repassado seus vastos conhecimento na área da forma mais adequada possível.

Aos amigos e colegas de trabalho em especial Daynara Dias, Daniel Levy, Kárytha Nascimento, Marx Miguel, Moisés Felipe, Reginaldo Santos, Waldeir Brito e Wederson Medeiros. Não me esquecendo também da secretária Liane Barbosa que me ajudou muito em questões da faculdade.

Agradeço aos meus colegas e amigos de profissão que fiz durante este período do mestrado e que levarei-os para além desta etapa da minha vida: Evelin Cardoso e Juan Vidal.

Às instituições CNPq, Fapespa e Ericsson pelo suporte financeiro enquanto bolsista. Agradeço também ao Bin Lee, que gentilmente cedeu o código para o desenvolvimento do presente trabalho.

*“ Quando perguntado sobre qual era a sua maior peça, a resposta de Charles Chaplin era sempre a mesma: “A próxima!” Não há impasse quando se está imbuído de desafio. Não se anda porque existe um caminho; por andar é que se abre o caminho.”*

*(Daisuke Ikeda)*

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Trabalhos relacionados . . . . .	5
1.1.1	Estudos de transmissão fantasma . . . . .	5
1.1.2	Estudos de não-uniformidades . . . . .	6
1.2	Justificativas . . . . .	8
1.3	Objetivos . . . . .	8
1.4	Metodologia . . . . .	9
1.5	Organização da Dissertação . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Referencial Teórico</b>	<b>10</b>
2.1	Teoria de multicondutores . . . . .	10
2.2	Transmissão em modo fantasma . . . . .	17
2.3	Capacidade do canal . . . . .	20
2.4	Não-Uniformidades . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Metodologia e cenários</b>	<b>23</b>
3.1	Simulador de Bin Lee . . . . .	23
3.2	Metodologia . . . . .	26
3.3	Cenários . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>32</b>
4.1	Análise da Taxa de Dados em Cenários Uniformes . . . . .	32
4.2	Taxa de Dados para cenários com não-uniformidades . . . . .	33
4.2.1	Não-uniformidade – Variação no centro do par . . . . .	33
4.2.2	Não-uniformidade – Pigtail . . . . .	34
4.2.3	Não-uniformidade – Trançado não-uniforme . . . . .	35
4.2.4	Não-uniformidade – Variação do centro do par, <i>Pigtail</i> e Trançado não-uniforme . . . . .	36
4.3	Análises em função dos níveis de FEXT e função de transferência . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Considerações finais e trabalhos futuros</b>	<b>47</b>
	<b>Referências</b>	<b>50</b>

# Lista de ilustrações

Figura 1	Cronologia do desenvolvimento da quinta geração (5G) em termos de padronização e desenvolvimento, com previsões até 2021. . . . .	3
Figura 2	Estimativas do crescimento do tráfego no período de 2016–2021. . . . .	4
Figura 3	Arquitetura de rede de acesso rádio e <i>fronthaul</i> . . . . .	4
Figura 4	Representação das definições de voltagem e corrente através das linhas do campo elétrico e magnético. . . . .	11
Figura 5	Ilustração do modelo MTL para circuitos distribuídos. . . . .	13
Figura 6	Representação da teoria de 2 portas estendida para $(n + 1)$ condutores. . . . .	15
Figura 7	Representação do cascadeamento de segmentos que formam a matriz em cadeia da matriz de transferência da linha $\phi$ . . . . .	17
Figura 8	Representação dos modos de transmissão (a) diferencial e (b) comum. . . . .	18
Figura 9	Ilustração mostrando como o modo fantasma explora os sinais em modo comum para criar novos canais sobre os pares trançados existentes. . . . .	18
Figura 10	Exemplo de <i>pigtail</i> em cabos Ethernet. . . . .	21
Figura 11	Variação na distância entre os centros dos pares ao longo do cabo. . . . .	22
Figura 12	Trançamento não-uniforme dos pares ao longo do cabo. . . . .	22
Figura 13	Esquemáticos para obtenção das matrizes de impedância de carga e de fonte para a transmissão em modo diferencial. . . . .	25
Figura 14	Esquemáticos para obtenção das matrizes de impedância de carga e de fonte para a transmissão em modo fantasma. . . . .	27
Figura 15	Relação entre as voltagens de entrada e saída para o canal fantasma. . . . .	29
Figura 16	Taxa de transmissão em cenários com e sem a presença do canal fantasma – cenário uniforme. . . . .	32
Figura 17	Porcentagem da contribuição de cada canal: diferenciais e fantasma, na taxa agregada do sistema – cenário uniforme. . . . .	33
Figura 18	Taxa de transmissão em cenários com e sem a presença do canal fantasma – cenário com variação no centro do par. . . . .	34
Figura 19	Porcentagem da contribuição de cada canal: diferenciais e fantasma, na taxa agregada do sistema – cenário com variação no centro do par. . . . .	34
Figura 20	Taxa de transmissão em cenários com e sem a presença do canal fantasma – cenário com <i>pigtail</i> . . . . .	35

Figura 21	Porcentagem da contribuição de cada canal: diferenciais e fantasma, na taxa agregada do sistema – cenário com <i>pigtail</i> . . . . .	35
Figura 22	Taxa de transmissão em cenários com e sem a presença do canal fantasma – cenário com trançado não-uniforme. . . . .	36
Figura 23	Porcentagem da contribuição de cada canal: diferenciais e fantasma, na taxa agregada do sistema – cenário com trançado não-uniforme. . . . .	36
Figura 24	Taxa de transmissão em cenários com e sem a presença do canal fantasma – cenário com todas as não-uniformidades: variação no centro do par, <i>pigtail</i> e trançado não-uniforme. . . . .	37
Figura 25	Porcentagem da contribuição de cada canal: diferenciais e fantasma, na taxa agregada do sistema – cenário com todas as não-uniformidades: variação no centro do par, <i>pigtail</i> e trançado não-uniforme. . . . .	37
Figura 26	Taxa de transmissão somente do canal fantasma para todos os cenários simulados. . . . .	38
Figura 27	Relação entre função de transferência e FEXTs em 10 m – canais diferenciais. . . . .	39
Figura 28	Relação entre função de transferência e FEXTs em 10 m – canal fantasma.	40
Figura 29	Curvas de decaimento dos valores médios das funções de transferência e FEXTs em relação aos valores médios (referência) em comprimentos de 10 m – canais diferenciais. . . . .	41
Figura 30	Curvas de decaimento dos valores médios das funções de transferência e FEXTs em relação aos valores médios (referência) em comprimentos de 10 m – canal fantasma. . . . .	42
Figura 31	Diferença entre o valor médio das funções de transferência e FEXT para cada comprimento de cabo. . . . .	43
Figura 32	Relação entre função de transferência e FEXTs em 10 m – canais diferenciais (uniforme e todas as imperfeições) e canal fantasma (uniforme e todas as imperfeições). . . . .	44
Figura 33	Curvas de decaimento dos valores médios das funções de transferência e FEXTs em relação aos valores médios (referência) em comprimentos de 10 m – canais diferenciais e fantasma em cenários uniformes e com todas as não-uniformidades. . . . .	45
Figura 34	Diferença entre o valor médio das funções de transferência e FEXT para cada comprimento de cabo para cenários uniformes e com todas as não-uniformidades, no canal fantasma. . . . .	46

# Lista de tabelas

Tabela 1	Comparação das gerações de redes <i>wireless</i> : 1G, 2G, 3G, 4G e 5G. . . .	2
Tabela 2	Especificações do cabo de cobre simulado – CAT5e. . . . .	31

# Lista de abreviaturas e siglas

AI	Artificial Intelligence
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AWG	American Wire Gauge
BBU	Baseband Unit
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CDMA	Code Division Multiple Access
CNS	Cable Nonuniformities Simulator
CPRI	Common Public Radio Interface
C-RAN	Centralized Radio Access Network
DMT	Discrete Multitone
DSL	Digital Subscriber Line
EDGE	Enhanced Data rates in GSM environment
EVM	Error Vector Magnitude
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEXT	Far-End Crosstalk
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communication
HD	High Definition
IMT	International Mobile Telecommunications
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IPv6	Internet Protocol Version 6

IS-95	Interim Standard 95
IS-136	Interim Standard 136
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
LAS-CDMA	Large Area Synchronized Code Division Multiple Access
LMDS	Local Multipoint Distribution Services
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine to Machine
MC	Mode Conversion
MC-CDMA	Multi-Carrier Code-Division Multiple Access
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MMS	Multimedia Message Services
MTL	Multiconductor Transmission Line
NEXT	Near-End Crosstalk
PAN	Personal Area Network
PDC	Personal Digital Cellular
RRH	Radio Remote Head
SMS	Short Message Services
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SVM	Support Vector Machine
TDMA	Time Division Multiple Access
TD-SCDMA	Time Division - Synchronous Code Division Multiple Access
TEM	Transverse Electromagnetic
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UWB	Ultra Wideband
VANETs	Vehicular Ad Hoc Networks

VDMT	Vectored Discrete Multitone Modulation
WAN	Wide Area Network
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Wireless Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WRC	World Radiocommunication Conference
WWW	Wireless World Wide Web

# Resumo

Espera-se que o tráfego para sistemas de comunicação móveis aumente drasticamente nos próximos anos. A nova geração de comunicação denominada 5G está em processo de desenvolvimento com o intuito de dar suporte a tais demandas, permitindo uma gama de novas aplicações. Um ponto chave para o sucesso das futuras redes 5G é a adoção de soluções *fronthaul*. Em geral, enlaces ópticos e de microondas são as alternativas mais adequadas para o *fronthaul*. Entretanto, o cobre ainda é uma alternativa viável em certas situações, principalmente devido ao custo reduzido e a aplicação de técnicas que aumentam o seu desempenho, como o modo fantasma. Tal técnica adiciona canais de comunicação extras aos enlaces físicos existentes, aumentando assim a taxa de dados agregada. Para tanto, os canais ditos “fantasmas” utilizam sinalização em modo comum sobre os canais ordinários (diferenciais). Idealmente, não existe acoplamento entre os canais diferenciais e o fantasma. Entretanto, cabos de cobre possuem não-uniformidades que são fonte de acoplamento de sinal entre os pares, especialmente em frequências da ordem de centenas de MHz. Não é completamente conhecido como as não-uniformidades nos cabos afetam o vazamento do modo de transmissão diferencial para o fantasma e vice-versa. Neste trabalho é estudado o efeito de não-uniformidades em cabos na atenuação dos canais fantasma e diferencial bem como no acoplamento de sinal (*crosstalk*) entre eles. Para viabilizar a transmissão em modo fantasma, foi adaptado um simulador desenvolvido na Universidade de *Stanford*. Foram simulados três tipos de não-uniformidades: variação na distância entre o centro dos pares, *pigtail* e trançado não-uniforme, para faixas de DC até 500 MHz, utilizando cabos com comprimentos de 10 a 100 m. Mostra-se que o canal fantasma agrega taxa com contribuição de 61,94 % em cenários uniformes para 100 m. Além disso, para este mesmo comprimento, variações no centro do par teve impacto dominante para redução da taxa agregada com apenas 24,02 % de contribuição do canal fantasma, enquanto que o trançado não-uniforme tem impacto desprezível na taxa de dados do canal, de maneira que a contribuição do canal fantasma foi de 61,93 %. Além disso, mostrou-se que o *pigtail* teve impacto somente para comprimentos pequenos.

**Palavras-chave:** Fronthaul, modo fantasma, não-uniformidades, pares trançados.

# Abstract

In the next years, a dramatic increase in traffic demands for mobile - communication systems is expected. To support such demands, the new generation of communication, called 5G, is being developed to allow a wide range of new applications. The key point to the future success of 5G networks is the adopted fronthaul solution. In general, optical and microwave links are suitable alternatives for fronthaul. However, copper is still a viable option in some situations, mainly due to reduced cost and the application of techniques to boost the copper performance, such as the phantom mode. Such technique includes extra channels over the ordinary differential ones for the same copper system, increasing its aggregated data rate. For this purpose, the channels called “phantom” use signaling in common mode, over ordinary channels (differentials). Ideally, there is no leakage between differential channels to the phantom one. However, copper cables have non-uniformities that are the source of the signal leakage into the pairs, especially for frequencies of the order of hundreds of MHz. It is not fully understood how the cable non-uniformities affect the crosstalk from the differential to phantom mode transmission, and vice-versa. In this work, effect of cable non-uniformities on the attenuation of differential and phantom channels, as well as on the crosstalk among them, is studied. To enable phantom transmission, a simulator developed by Stanford University was adapted. Three types of non-uniformities were simulated: variation in the distance between the center of pairs, pigtail and non-uniform twisted pairs, for frequencies range from DC to 500 MHz, using cable length from 10 to 100 m. The results showed: phantom mode aggregate data rate for uniform scenarios with 61.94 % of contribution. Moreover, considering the same length cable, variation in the distance between the center of pairs had a big impact in the reduction of phantom channel contribution with just 24.02 %, more impact than others studied, whereas the non-uniform twists had negligible impact on channel aggregated data rate, with phantom contribution of 61.93 %. Besides that, it is shown that pigtail has impact just to short length cables.

**Keywords:** Fronthaul, phantom mode, non-uniformities, twisted pairs.

# 1 Introdução

Nos próximos anos estima-se que o tráfego de dados cresça drasticamente com o aumento de usuários conectados a rede compartilhando conteúdos de multimídia, bem como o surgimento de novas aplicações relacionados à “Internet das coisas” - IoT (*Internet of Things*). Este termo é a convergência de um conceito já bem estabelecido em cenários atuais, as tecnologias M2M (*Machine to Machine*)(CHASE, 2013).

IoT refere-se ao novo cenário em redes, nos quais tudo pode ser conectado via internet, desde dispositivos pessoais e pequenos eletrodomésticos em casas inteligentes, até processos industriais que possam ser automatizados de forma a possibilitar o monitoramento e gerenciamento dos mesmos em tempo real, direta ou indiretamente. Em suma, a chegada da IoT insere cada vez mais dispositivos conectados à rede sem a necessidade de qualquer intervenção humana e de maneira inteligente. A consolidação de redes com aplicações IoT demandará o estabelecimento de tecnologias que forneçam os requisitos necessários para a implementação completa de IoT. Neste contexto, o 5G surge como alicerce ao IoT (GAWAS, 2015).

A evolução dos padrões de redes móveis ocorreu de forma contínua até o estabelecimento das redes *wireless* na maneira que a conhecemos hoje. Assim, o termo geração (G) refere-se às mudanças que ocorreram nas redes como, por exemplo, as velocidades de transmissão de dados, tecnologias utilizadas, faixas de frequência entre outros critérios, como pode ser observado na Tabela 1 (FAGBOHUN, 2014) (GAWAS, 2015).

As primeiras redes, denominadas primeira geração (1G), foram projetadas para oferecer serviços básicos de voz em baixas velocidades alcançando 2,4 kbps, com capacidade de até 30 kHz. A necessidade por novos serviços impulsionou em meados de 1980 a implementação das redes da segunda geração (2G), o qual inseriu serviços como SMS (*Short Message Services*) e MMS (*Multimedia Message Services*). Tal rede já alcançava velocidades de 64 kbps usando esquemas de modulação digital como TDMA (*Time Division Multiple Access*) e CDMA (*Code Division Multiple Access*). A terceira geração (3G) surge em 1990 com o objetivo de integrar áudio, vídeo e dados em alta qualidade. O 3G apresenta maior eficiência espectral em relação ao seu antecessor, atingindo velocidades em torno de 2 Mbps. Os padrões LTE (*Long Term Evolution*) e WiMAX (*Wireless Interoperability for Microwave Access*) surgiram no contexto da quarta geração (4G), nos quais o acesso à informação ocorre de maneira dinâmica, possibilitando serviços tais como videoconferência, navegação em alta velocidade e transmissão em HD (*High Definition*). Em 2010, surgem os primeiros esforços para o estabelecimento da quinta geração (5G),

Tabela 1 – Comparação das gerações de redes *wireless*: 1G, 2G, 3G, 4G e 5G.

Geração → Características ↓	1G	2G	3G	4G	5G
Ano	1970 - 1980	1980 - 1990	1990 - 2000	2000 - 2010	2015 - para frente
Velocidade	2.4 kbps	64 kbps	2 Mbps	200 Mbps até 1Gbps	1 Gbps e além
Tecnologia	Celular analógico	Celular digital	Banda larga, CDMA, IP	IP unificado, combinação de banda larga LAN, WAN, WLAN, PAN	4G+ WWW
Padrão	AMPS	GSM, PDC, IS-95, IS-136, EDGE, GPRS	CDMA 2000, UMTS, TD-SCDMA, WCDMA	LTE, WiMAX	LAS-CDMA, OFDM, MC-CDMA, UWB, Network-LMDS, IPv6
Multiplexação	FDMA	TDMA, CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Serviços	Somente voz	Voz digital, mensagens curtas, dados empacotados	Integração de alta qualidade de áudio, vídeo e dados	Acesso a informação dinâmica, dispositivos <i>wearable</i>	Acesso a informação dinâmica, dispositivos <i>wearables</i> com capacidades AI

Fonte: Modificado de (GAWAS, 2015).

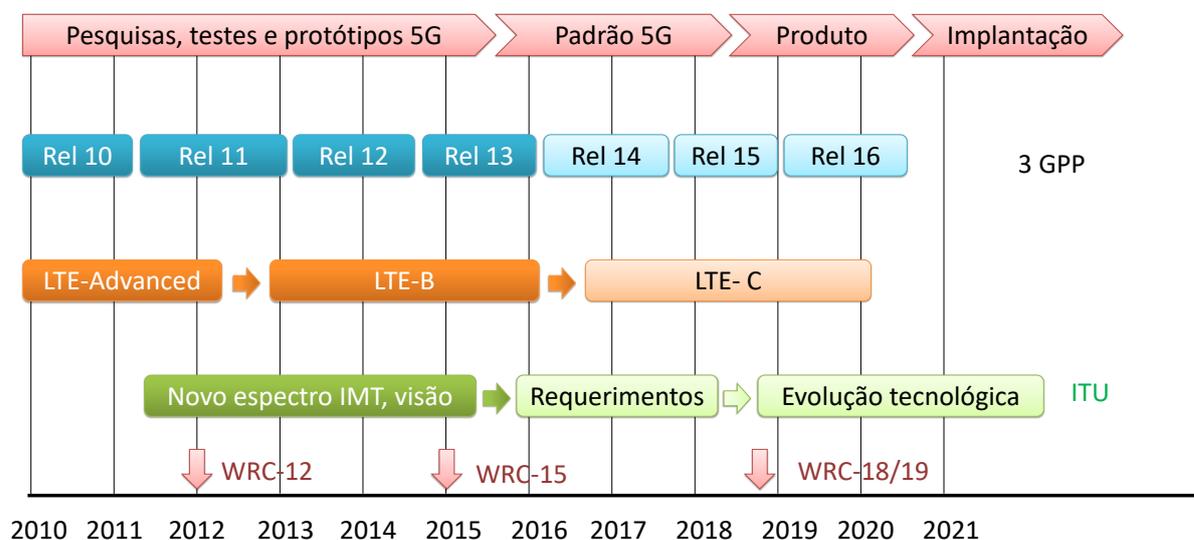
com pesquisas, testes e protótipos. O 5G efetivamente iniciou o processo de padronização em meados de 2015, com previsões para padronização completa até 2021 (GAWAS, 2015), conforme ilustrado na Figura 1.

O 5G propõe melhorias na rede, as quais destacam-se a latência mínima, i.e., tempo de resposta a uma aplicação, em torno de  $1\text{ ms}$ , para possibilitar a experiência em tempo real necessária em casos como controle de tráfego seguro em redes VANETs (*Vehicular Ad Hoc Networks*) e casas inteligentes, e taxa de tráfego além de 1 Gbps para suportar o crescimento de dispositivos conectadas, com o advento de tecnologias IoT (ERICSSON, 2016)(HUAWEI, 2013).

Dados fornecidos pela Cisco indicam que estimativas do crescimento de tráfego atinjam em 2021 até 278 exabytes por mês, um aumento em cerca de 182 exabytes quando comparado ao ano de 2016, como indicado na Figura 2. Tal aumento no tráfego de dados surge com o advento de novos dispositivos conectados e novas aplicações em redes 5G (CISCO, 2017).

Para comportar tal tráfego de dados nas futuras redes 5G, soluções em *fronthaul* para diversas tecnologias estão em desenvolvimento. O conceito de *fronthaul* surge no contexto de arquiteturas C-RAN (*Centralized Radio Access Network*), no qual o processamento da rede é centralizado nas BBUs (*Baseband Units*) enquanto as RRHs (*Radio*

Figura 1 – Cronologia do desenvolvimento da quinta geração (5G) em termos de padronização e desenvolvimento, com previsões até 2021.



Fonte: Modificado de (HUAWEI, 2013).

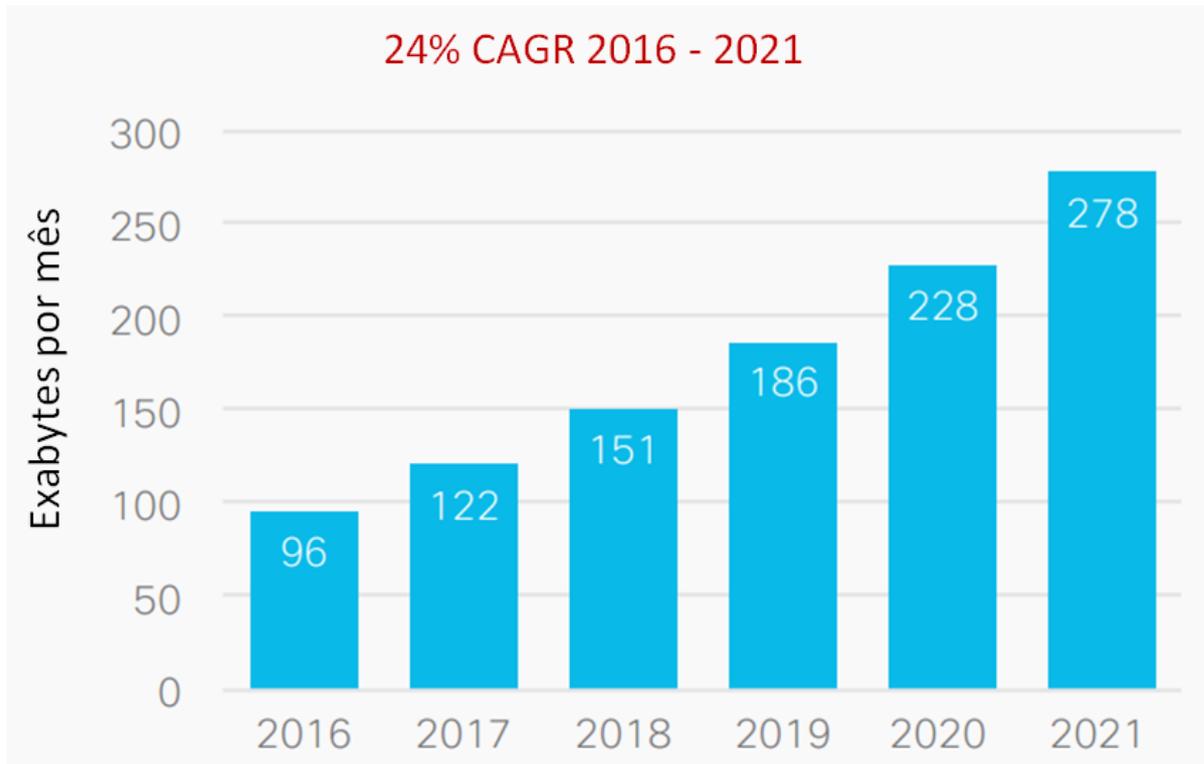
*Remote Heads*) são dispostas separadamente a algumas centenas de metros das BBUs. O enlace que interliga estas duas estruturas, RRHs e BBUs, é denominado *fronthaul*, que deve fornecer suporte às novas demandas do 5G.

Antes das arquiteturas C-RAN, todo processamento da rede ocorria nas antenas. Porém, com o estabelecimento das novas redes em que as antenas no conceito de *massive* MIMO serão mais comuns, torna-se necessário otimizar o uso de antenas em relação aos custos operacionais das mesmas. Assim, nesse contexto, ocorre uma separação dos processos, em que o processamento dos dados é realizado nas BBUs, e posteriormente enviada para as RRHs através do enlace *fronthaul*. Tipicamente, esta ligação é feita via fibra, entretanto, embora a fibra seja mais promissora em questão de altas taxas de bits alcançáveis, a sua implantação completa ainda deverá tomar um considerável tempo devido aos custos elevados de implantação (INFINERA, 2013), como ilustrado na Figura 3.

Assim, neste contexto, as tecnologias de acesso baseada em cobre, como um sistema legado, tornam-se a solução mais viável em termos de implantação, principalmente pelos custos reduzidos. Ainda que não alcancem as mesmas taxas que a fibra pode fornecer, técnicas recentes tem almejado aumentar a taxa de bits tais como *vectoring*, *bonding* e modo fantasma.

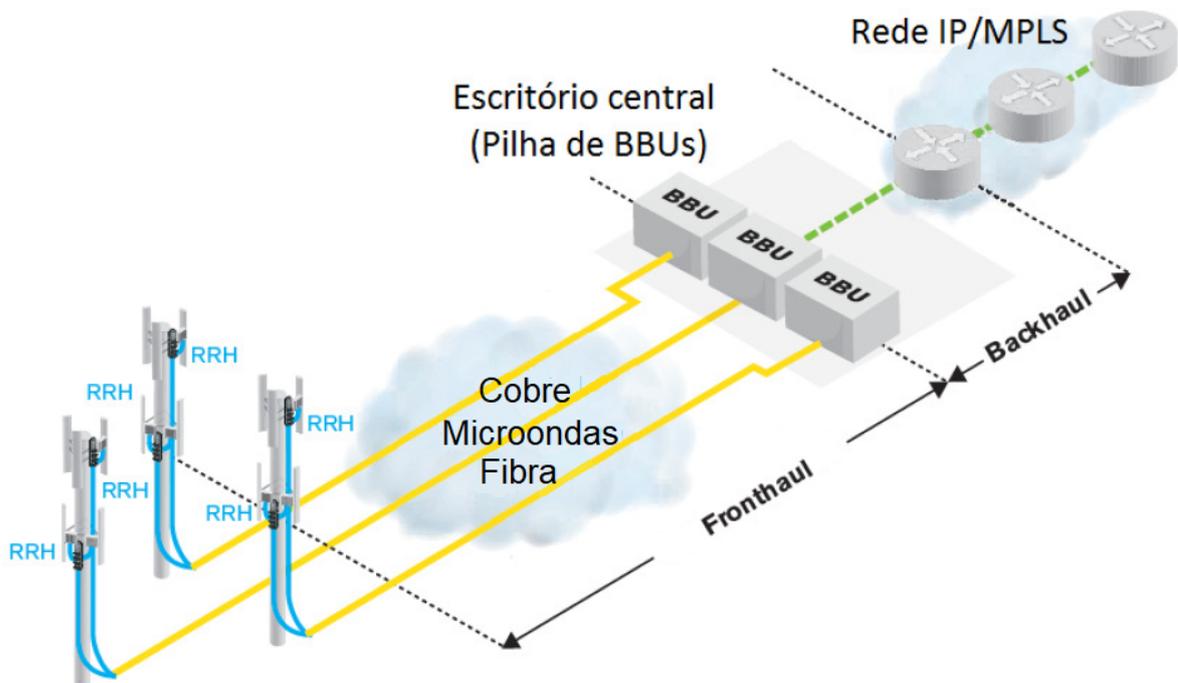
A técnica de *vectoring* proporciona mitigar o *crosstalk*, i.e., a interferência que ocorre entre os canais, aumentando assim a taxa de dados agregada no canal (LAFATA, 2015). Enquanto a *bonding* consiste em explorar altas taxas de dados combinando diversos enlaces de DSL (*Digital Subscriber Line*) independentes em um único canal de forma lógica

Figura 2 – Estimativas do crescimento do tráfego no período de 2016–2021.



Fonte: Modificado de (CISCO, 2017).

Figura 3 – Arquitetura de rede de acesso rádio e *fronthaul*.



Fonte: Modificado de (MACKNOFSKY, 2015).

(CIOFFI, 2009). E o modo fantasma permite aumentar a taxa de dados adicionando um canal extra sem a necessidade de inserir mais pares trançados no canal (GABARA, 2001).

Estudos de não-uniformidades na transmissão em modo fantasma tem importância em outras aplicações, além do contexto de redes 5G, como por exemplo, estudos em sistemas *G.fast*, onde se utilizam faixas de frequências acima de 212 MHz. Além disso, as redes 5G, irão necessitar espectros de frequências mais altas, os quais as não-uniformidades podem ter impactos severos.

## 1.1 Trabalhos relacionados

Diversos trabalhos anteriores mostram que a utilização da transmissão em modo fantasma é bastante promissora para aumento da taxa de dados agregados, porém suas análises restringiram-se a cenários uniformes, ou sejam, cabos sem a presença de não-uniformidades, como por exemplo, os trabalhos de (GABARA, 2001), (FOUBERT et al., 2012), (GOMES et al., 2012), (LAFATA, 2014), (LAFATA, 2015) e (FREITAS et al., 2016).

Por outro lado, diversos outros trabalhos estudaram os efeitos de não-uniformidades em cabos pares-trançados, entretanto não consideraram transmissão em modo fantasma, como por exemplo, os trabalhos de (LEE et al., 2007), (LAGO et al., 2009), (LAGO et al., 2011), (BORGES et al., 2014) e (BORGES et al., 2015).

### 1.1.1 Estudos de transmissão fantasma

Trabalhos mais antigos já demonstravam que o canal fantasma seria uma técnica bastante promissora para agregar taxa ao sistema, como o trabalho de (GABARA, 2001), onde foram realizadas simulações que indicando que taxas de *bits* de até 1 Gb/s podem ser alcançadas com transmissão em modo fantasma (modo comum), mostrando diversos esquemas de sinalização de corrente e voltagem.

Outro trabalho relativamente antigo foi o trabalho de (FOUBERT et al., 2012) o qual verificou que para cabos *Quad*, a transmissão em modo fantasma, assim como os modos diferenciais são modos próprios, não tendo praticamente nenhum efeito entre os modos de transmissão. Entretanto as análises foram obtidas para faixas de frequências inferiores as usadas em 5G. Deste modo, indiretamente é mostrado que o modo fantasma pode aumentar a capacidade de transmissão de dados necessários as novas aplicações com o advento do 5G que demandarão maior taxa de transmissão.

Enquanto no trabalho de (GOMES et al., 2012) foram realizadas medidas em cenários com e sem mitigação por *vectoring* analisando as funções de transferência direta, FEXT (*Far-end crosstalk*) e conversão de modo - MC (*Mode Conversion*). Foram estuda-

dos cabos CAT5e com comprimento de 50 m, e faixa de frequência entre 100 kHz e 300 MHz.

Em (LAFATA, 2014) e (LAFATA, 2015) foram realizadas estimativas e simulações para verificar a viabilidade em termos práticos do uso de modo fantasma em sistemas de transmissão *G.fast* usando cabos metálicos multi-*Quad* para aumento da taxa de transmissão.

O trabalho de (LAFATA, 2014) ateu-se a estudos de medidas e análises de sistemas *G. fast* e xDSL, em cabos reais 26 AWG (*American Wire Gauge*). Foram analisados cenários com e sem eliminação de *crosstalk* do tipo FEXT, e cenários onde se aplica VDMT (*Vectored Discrete Multitone Modulation*) para supressão parcial de FEXT. Os resultados mostraram que o canal fantasma pode agregar mais taxa de dados se técnicas de supressão de FEXT, como modulação VDMT, e eliminação de ruído fantasma são utilizados. Além disso, a aplicação de VDMT em circuitos fantasmas podem aumentar consideravelmente o esforço computacional, devido ao aumento do número de canais DMT (*Discrete Multitone*).

Enquanto o trabalho de (LAFATA, 2015) focaram em comparar dois cenários analisando somente o *crosstalk* devido ao FEXT, que é um dos principais fatores limitantes em *G.fast*, assim como em alguns sistemas xDSL. Resultados mostraram que técnicas de *vectoring* e *bonding* juntamente com o modo fantasma podem aumentar consideravelmente a taxa agregada do canal.

Dentro do grupo de pesquisa LEA (Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado) diversos trabalhos abordaram o modo de transmissão fantasma, dentre eles, destaca-se o trabalho de (FREITAS et al., 2016), onde foi analisado a performance de sistemas transmitindo modo fantasma com aplicação da técnica de *vectoring* para aumentar a taxa de transmissão em cenários híbridos. Foram mostrados também que quando se utiliza *vectoring*, os FEXTs são mitigados. A performance foi baseada em valores de taxa agregada e de magnitude do vetor de erros - EVM (*Error Vector Magnitude*) médio.

De maneira geral, os estudos anteriores sobre transmissão em modo fantasma, mostraram que esta técnica possibilita agregação de taxa para o canal. Taxas essas que serão requisitos necessários para estabelecimento do 5G.

Embora estudos mostrem que o canal fantasma agrega maior taxa, nenhum dos trabalhos abordaram como não-uniformidades (intrínsecas a qualquer cabo) afetam na taxa de transmissão desse canal.

### 1.1.2 Estudos de não-uniformidades

Estudos mais antigos já abordavam o impacto de não-uniformidades, como os de (LEE et al., 2007). (LEE et al., 2007) propõe a utilização de modelos MIMO em

*Binders* explorando não-uniformidades, apesar do referido trabalho abordar teoricamente a transmissão em modo fantasma, este apresenta somente resultados para cenários com transmissão em modo diferencial e diferencial *split-pair*. Os resultados obtidos mostram que as não-uniformidades tem pouco impacto na função de transferência direta do canal, mas deve ser considerado seus efeitos nos *crosstalks* FEXT e NEXT (*Near-End Crosstalk*). Seus resultados foram validados através de medidas para um cabo 24 AWG consistindo de 25 pares trançados.

Não-uniformidades em pares trançados são problemas constantes que diversas empresas tentam minimizar através da otimização de processos de manufatura, como explorado em trabalhos como (LAGO et al., 2009) e (LAGO et al., 2011). O primeiro aborda a relação entre o comprimento do cabo par trançado e o comprimento de cada um dos fios que compõem o cabo através de conceitos como ângulo de inclinação e raio da hélice, ou seja, presença de não-uniformidades. No qual, o mesmo buscou analisar os efeitos destas não-uniformidades, os quais forneceram subsídios para estabelecer especificações ótimas de parâmetros elétricos e dimensões para produção de futuros cabos. O segundo trabalho, segue a mesma linha de aplicação buscando otimizar a produção de cabos através de um modelo melhorado para estimação da impedância característica.

Trabalhos recentes realizados pelo grupo de pesquisa LEA da UFPA abordaram estudos acerca das não-uniformidades, os quais citam-se os trabalhos de (BORGES et al., 2014) e (BORGES et al., 2015). Porém, tais estudos não se encontravam no contexto de transmissão em modo fantasma.

O trabalho de (BORGES et al., 2014) estuda dois tipos de não-uniformidades: *pigtail* e irregularidades periódicas no isolamento (permissividade relativa) através do simulador CNS (*Cable Nonuniformities Simulator*). Os resultados mostram como as não-uniformidades impactam parâmetros elétricos do cabo, como impedância.

Complementar ao trabalho de (BORGES et al., 2014), o mesmo, (BORGES et al., 2015), realizou estudo abordando efeitos de não-uniformidades periódicas devidos processos de manufatura, mostrando que faixas sem transmissão de sinal surgem, i.e., algumas partes do sinal são perdidos, afetando desta forma, a taxa de transmissão nesse canal.

Desta forma, o estudo do impacto de não-uniformidades na taxa de transmissão do canal fantasma veem a complementar os estudos anteriores de não-uniformidades. Uma vez que o simulador de Bin Lee permite simular não-uniformidades, o modelo implementado pelo mesmo será o modelo base para o desenvolvimento da presente dissertação.

## 1.2 Justificativas

Com o advento do 5G o tráfego sob a rede tende à aumentar, bem como também a carga sobre o *fronthaul*. Uma maneira de evitar congestionamento na rede e também a perda de pacotes é a utilização de algoritmos de congestionamento que possam reduzir a carga útil sob o mesmo. Outra solução é aumentar a capacidade do canal que pode ser obtida inserindo o modo fantasma de transmissão. Então, nesses cenários de *fronthaul* baseado em cobre explorando modo fantasma é interessante investigar qual o impacto das não-uniformidades em cabos na taxa de *bits* agregadas transmitidas, sendo este a principal motivação para o desenvolvimento da dissertação.

Embora a solução para *fronthaul* seja majoritariamente fibra óptica, os custos de implantação das mesmas não é viável a curto prazo, então utilizar a infraestrutura legado do cobre torna-se a alternativa mais promissora.

A transmissão em modo fantasma envolve a criação de um canal virtual, formado por dois canais diferenciais físicos, para transferência de informações. De maneira que o modo fantasma observa os canais diferenciais em modo diferencial. Como o canal fantasma é transmitido sob os canais diferenciais, então imperfeições nos cabos devem provavelmente impactar nos *crosstalks* entre o modo diferencial e o modo fantasma.

Ainda que fabricantes utilizando técnicas precisas na fabricação dos cabos, imperfeições nos mesmos ainda podem surgir mesmo que mínimas. É praticamente impossível a fabricação de cabos livres de imperfeições. As não-uniformidades são devidos, por exemplo, efeitos periódicos na manufatura, inhomogeneidade dos materiais de condutores e isolantes, bem como efeitos relacionados a geometria dos cabos, como, por exemplo, raio do condutor e distância entre o centro dos pares. Deste modo, a análise destes efeitos e seus impactos nos *crosstalks* entre os canais são muito importantes.

## 1.3 Objetivos

Desta forma, o presente trabalho visa estudar o efeito de não-uniformidades em cabos, que utilizam transmissão em modo fantasma. Os cenários escolhidos tentam representar enlaces *fronthaul* sobre cobre. De maneira a identificar:

- Qual o impacto das não-uniformidades nas transmissões em modo fantasma por meio de análise de informações sobre *crosstalks*, entre os modos diferencial e fantasma, em especial o FEXT (que corresponde a um dos principais degradantes do sinal transmitido);
- Estimar a taxa de dados no canal que é diretamente afetada por efeitos degradantes no canal, como por exemplo, as não-uniformidades;

- Quantificar o aumento na taxa de transmissão quando o modo fantasma é empregado e cabos com não-uniformidades são apresentados.

## 1.4 Metodologia

A metodologia do trabalho utilizou o simulador em MATLAB criado por Bin Lee (LEE, 2004b) (LEE et al., 2007), modificando-o para possibilitar a transmissão em modo fantasma. Dentre as principais modificações no simulador destacam-se as especificações das matrizes de impedância de carga e impedância de fonte, e vetores de entrada, bem como configurações de corrente.

Os estudos e análises focaram nas taxas de transmissão, bem como nos níveis de *crosstalk* (em especial, FEXT) para quantificar o desempenho do canal fantasma afetados pelos impactos decorrentes de não-uniformidades. Simulando cenários *fronthaul* baseados em cabos de cobre imperfeitos com modo fantasma. Mais especificamente como não-uniformidades do tipo: variação na distância entre o centro dos pares, *pigtail* e trançado não-uniforme afetam a taxa de transmissão.

Além disso, as taxas de transmissão foram calculados a partir dos parâmetros S de espalhamento, com o código interno desenvolvido pelo grupo LaPS (Laboratório de processamento de sinais) da UFPA e cedido pelo mesmo.

## 1.5 Organização da Dissertação

O trabalho está organizado em cinco capítulos que discorrem na seguinte maneira listada abaixo:

- O Capítulo 1 busca apresentar brevemente a conjuntura da problemática em questão juntamente aos trabalhos relacionados e correlatos, justificativas, objetivos e metodologia do presente trabalho;
- O Capítulo 2 discorre sobre o embasamento teórico para o presente trabalho, desde a teoria de multi condutores - MTL (*Multiconductor Transmission Line*) até o conceito de transmissão em modo fantasma, bem como sobre as não-uniformidades estudadas;
- O Capítulo 3 aborda a metodologia desenvolvida neste trabalho para análise dos resultados e os cenários escolhidos para simulação;
- O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos através de simulações e suas análises;
- O Capítulo 5 discute as considerações finais e os trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir do presente trabalho, bem como as contribuições deste trabalho e os trabalhos publicados.

## 2 Referencial Teórico

Antes de abordarmos a teoria de multicondutores - MTL (*Multiconductor Transmission Line*) é importante uma breve discussão acerca das linhas de transmissão que correspondem aos meios pelos quais as ondas eletromagnéticas são guiadas de uma fonte até o receptor. São assim, resumidamente, guias de ondas. Os sinais transmitidos por estes meios podem sofrer interferências devido sinais gerados por fontes externas, bem como efeitos decorrentes de acoplamento eletromagnéticos entre os condutores que formam a mesma linha de transmissão, ou entre condutores de linhas diferentes, efeito conhecido como *crosstalk*. Quando o sinal do transmissor interfere no receptor dos outros pares no lado oposto ao cabo é denominado FEXT, quando a interferência ocorre no lado do transmissor na porta de entrada dos outros pares é denominado NEXT (*Near-end crosstalk*).

Idealmente linhas de transmissão deveriam obedecer a hipótese de campo TEM (*Transverse Electromagnetic*), no qual os campos elétricos e magnéticos propagam-se perpendicularmente a direção de propagação considerada, cujos modos de propagação são denominados de modo TEM. Porém, as linhas podem ser imperfeitas entre outros fatores, de modo a existir propagação de outras componentes conhecidas como componentes de ordens altas. Na prática considera-se aproximação de estruturas de campo *quasi*-TEM, nos quais existem pequenas perdas sendo representadas pela resistência por unidade de comprimento.

### 2.1 Teoria de multicondutores

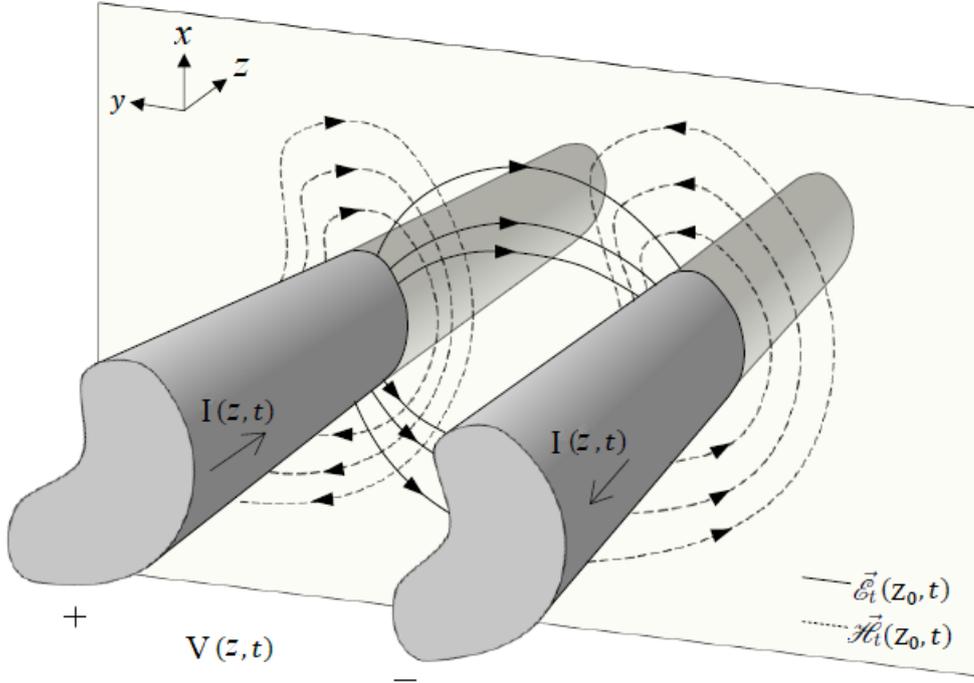
Antes de propriamente entrarmos na teoria de multicondutores é importante definir duas grandezas: a voltagem e a corrente, os quais são obtidos das equações de *Maxwell* juntamente com as propriedades do campo TEM. A voltagem é definida em função da componente transversal do campo elétrico,  $\vec{\mathcal{E}}_t$ , entre dois condutores  $P_1$  e  $P_2$ , representada pela seguinte equação (PAUL, 1994), como ilustrado na Figura 4:

$$V(z, t) = - \int_{P_1}^{P_2} \vec{\mathcal{E}}_t \cdot d\vec{l} \quad (2.1)$$

Enquanto a corrente elétrica é definida a partir da componente transversal do campo magnético,  $\vec{\mathcal{H}}_t$ , circundada por um contorno fechado  $c_i$ , ilustrada na Figura 4 e representada na seguinte equação:

$$I(z, t) = \oint_{c_i} \vec{\mathcal{H}}_t \cdot d\vec{l} \quad (2.2)$$

Figura 4 – Representação das definições de voltagem e corrente através das linhas do campo elétrico e magnético.



Fonte: Modificado de (BORGES, 2016).

As formulações que regem a teoria de multicondutores podem ser obtidas basicamente através de duas maneiras: pelas equações de *Maxwell* ou da teoria de circuitos distribuídos. Independente da escolha do método utilizado, as equações resultantes são as mesmas (PAUL, 1994).

Partindo da teoria de circuitos distribuídos, sendo válidos em condições no qual a dimensão do elemento considerado seja muito menor que o comprimento de onda do sinal de excitação, como ilustrado na Figura 5. Podemos considerar os condutores como um cascadeamento de segmentos, em que cada segmento é analisado individualmente. Deste modo, através do equacionamento a partir das leis de *Kirchhoff* das malhas e dos nós para o segmento considerado, respectivamente, obtemos as seguintes equações:

$$\begin{aligned}
 -V_i(z, t) + V_i(z + \Delta z, t) &= -r_i \Delta z I_i(z, t) - r_0 \Delta z \sum_{k=1}^n I_k(z, t) \\
 &\quad - l_{i1} \Delta z \frac{\partial I_1(z, t)}{\partial t} - l_{i2} \Delta z \frac{\partial I_2(z, t)}{\partial t} - \dots \\
 &\quad - l_{ii} \Delta z \frac{\partial I_i(z, t)}{\partial t} - \dots - l_{in} \Delta z \frac{\partial I_n(z, t)}{\partial t}
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

$$\begin{aligned}
I_i(z + \Delta z, t) - I_i(z, t) &= -g_{i1}\Delta z(V_i - V_1) - \dots - g_{ij}\Delta z(V_i - V_j) - \dots \\
&- g_{in}\Delta z(V_i - V_n) - c_{i1}\Delta z \frac{\partial}{\partial t}(V_i - V_1) - \dots \\
&- c_{ii}\Delta z \frac{\partial}{\partial t}V_i - \dots - c_{in}\Delta z \frac{\partial}{\partial t}(V_i - V_n)
\end{aligned} \tag{2.4}$$

onde:  $\Delta z$  é o incremento na posição do cabo.  $I_i$  e  $V_i$  são, respectivamente, a corrente e a voltagem do  $i$ -ésimo condutor.  $r_0$  e  $r_i$ , são as resistências no condutor de referência e no  $i$ -ésimo condutor, respectivamente. Enquanto  $l_{ii}$ ,  $g_{in}$ , e  $c_{in}$  são, respectivamente, os elementos de indutância, condutância e capacitância do sistema.

Manipulando as Equações 2.3 e 2.4, realizando alguns passos matemáticos, obtêm-se as equações de linhas para multicondutores. A tensão,  $\mathbf{V}$ , e a corrente,  $\mathbf{I}$ , dependentes do tempo e posição, relacionam-se por (PAUL, 1994):

$$\frac{\partial \mathbf{V}(z, t)}{\partial z} = -\mathbf{R} \cdot \mathbf{I}(z, t) - \mathbf{L} \frac{\partial \mathbf{I}(z, t)}{\partial t} \tag{2.5}$$

$$\frac{\partial \mathbf{I}(z, t)}{\partial z} = -\mathbf{G} \cdot \mathbf{V}(z, t) - \mathbf{C} \frac{\partial \mathbf{V}(z, t)}{\partial t} \tag{2.6}$$

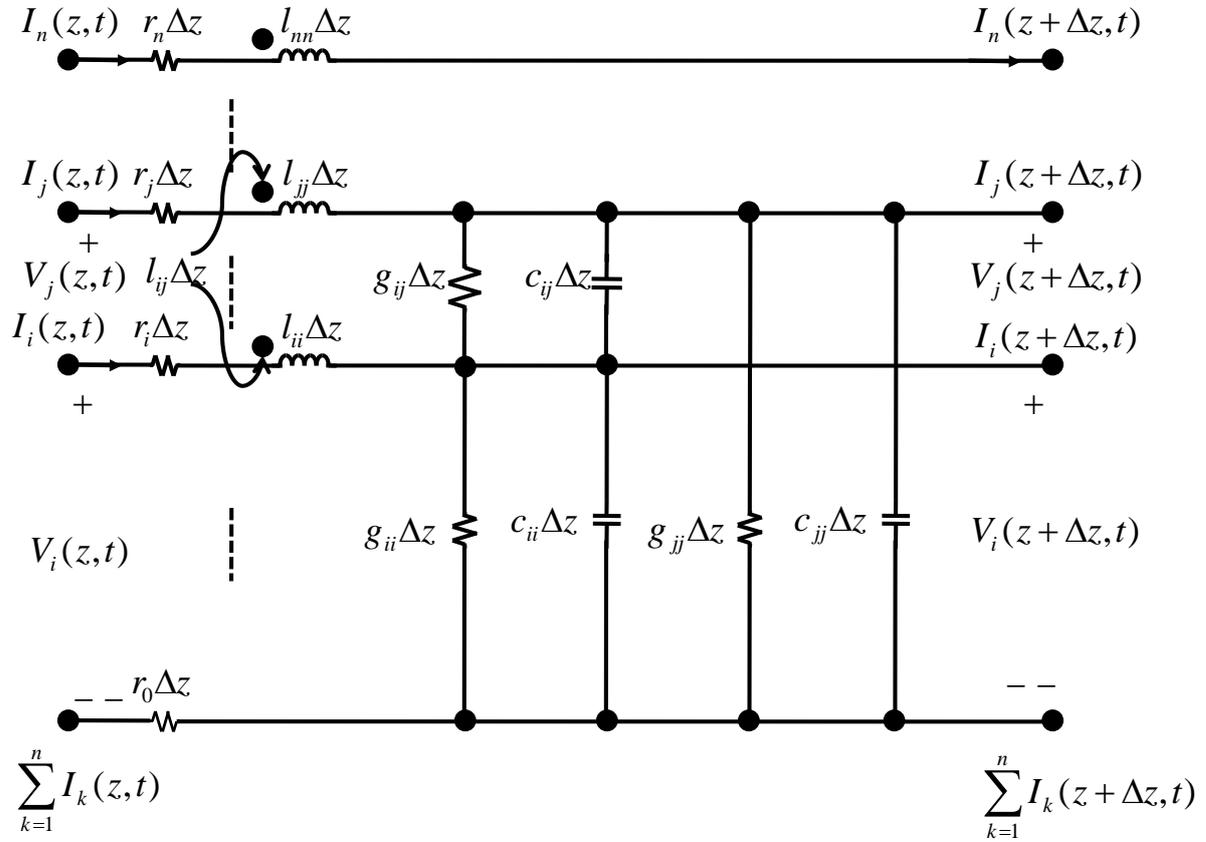
onde  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{G}$  e  $\mathbf{C}$  são respectivamente as matrizes por unidade de comprimento da resistência, indutância, condutância e capacitância sendo definidas a seguir para o caso geral com  $n$  condutores pelas Equações 2.7, 2.8, 2.9 e 2.10, como:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} (r_1 + r_0) & r_0 & r_0 & \dots & r_0 \\ r_0 & (r_2 + r_0) & r_0 & \dots & r_0 \\ r_0 & r_0 & (r_3 + r_0) & \dots & r_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_0 & r_0 & r_0 & \dots & (r_n + r_0) \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} & \dots & l_{1n} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} & \dots & l_{2n} \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} & \dots & l_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & l_{n2} & l_{n3} & \dots & l_{nn} \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

onde os elementos na diagonal principal representam as auto-indutâncias,  $l_{ii}$ , enquanto os

Figura 5 – Ilustração do modelo MTL para circuitos distribuídos.



Fonte: Modificado de (PAUL, 1994).

elementos  $l_{ij}$  representam as indutâncias mútuas entre os condutores.

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n g_{1k} & -g_{12} & -g_{13} & \cdots & -g_{1n} \\ -g_{21} & \sum_{k=1}^n g_{2k} & -g_{23} & \cdots & -g_{2n} \\ -g_{31} & -g_{32} & \sum_{k=1}^n g_{3k} & \cdots & -g_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -g_{n1} & -g_{n2} & -g_{n3} & \cdots & \sum_{k=1}^n g_{nk} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n c_{1k} & -c_{12} & -c_{13} & \cdots & -c_{1n} \\ -c_{21} & \sum_{k=1}^n c_{2k} & -c_{23} & \cdots & -c_{2n} \\ -c_{31} & -c_{32} & \sum_{k=1}^n c_{3k} & \cdots & -c_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -c_{n1} & -c_{n2} & -c_{n3} & \cdots & \sum_{k=1}^n c_{nk} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Reescrevendo as equações 2.5 e 2.6 no domínio da frequência através da transformada de *Fourier* obtemos, sem perda de generalidade, as seguintes formulações:

$$-\frac{d\mathbf{V}}{dz} = (\mathbf{R} + j\omega\mathbf{L}) \cdot \mathbf{I} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I} \quad (2.11)$$

$$-\frac{d\mathbf{I}}{dz} = (\mathbf{G} + j\omega\mathbf{C}) \cdot \mathbf{V} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{V} \quad (2.12)$$

em que  $\mathbf{Z}$  e  $\mathbf{Y}$  são as matrizes de impedância e admitância por unidade de comprimento, respectivamente, e suas equações são expressas a seguir:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R} + j\omega\mathbf{L} \quad (2.13)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G} + j\omega\mathbf{C} \quad (2.14)$$

A Figura 6 mostra a ilustração de  $n$ -linhas condutoras da teoria de duas portas estendida para o caso geral de  $n$  condutores. Esta teoria possibilita obter as relações entre correntes e voltagens de entrada e saída relacionando a matriz de transferência  $\phi$ , como descrito na Equação 2.15.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}(z, \omega) \\ \mathbf{I}(z, \omega) \end{bmatrix} = \phi(z, L, \omega) \begin{bmatrix} \mathbf{V}(z + L, \omega) \\ \mathbf{I}(z + L, \omega) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

onde  $\phi$  é a matriz de transferência,  $z$  é a posição inicial do cabo e  $L$  corresponde ao comprimento total da linha. Sendo a matriz de transferência definida em função das matrizes dos parâmetros  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{D}$ , são obtidas por meio das seguintes equações:

$$\phi(z, L, \omega) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(z, L, \omega) & \mathbf{B}(z, L, \omega) \\ \mathbf{C}(z, L, \omega) & \mathbf{D}(z, L, \omega) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Desta forma, para obter os termos  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{D}$  da matriz de transferência  $\phi$ , devemos obter a solução das equações MTL na forma fasorial para a linha de comprimento  $L$ . Onde  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{D}$  são:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \phi_{11} = \cosh(\gamma L)\mathbf{1}_n \\ \mathbf{B} &= \phi_{12} = -\sinh(\gamma L)\mathbf{Z}_c \\ \mathbf{C} &= \phi_{21} = -\sinh(\gamma L)\mathbf{Z}_c^{-1} \\ \mathbf{D} &= \phi_{22} = \cosh(\gamma L)\mathbf{1}_n \end{aligned} \quad (2.17)$$

onde  $\mathbf{1}_n$  é a matriz identidade de tamanho  $n \times n$ :

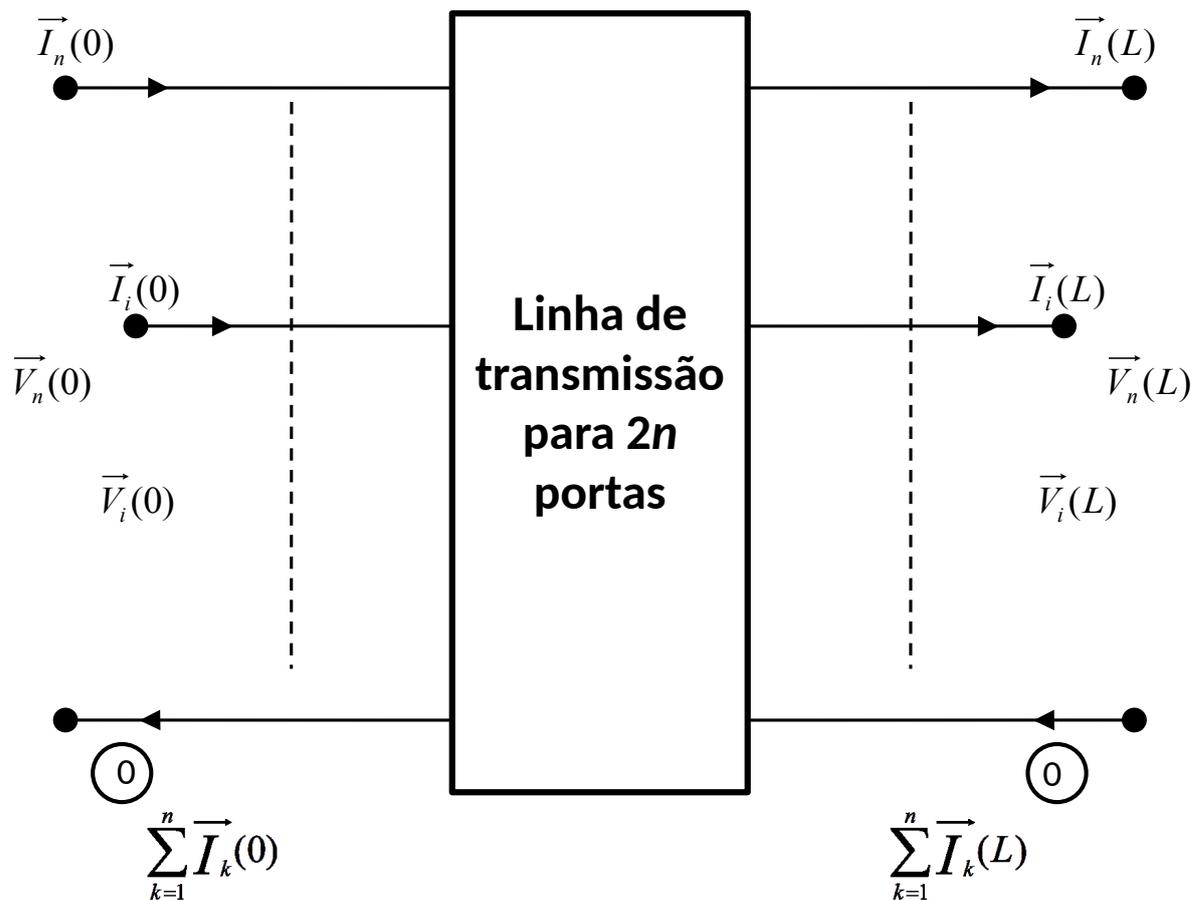
$$\mathbf{1}_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Sendo  $\mathbf{Z}_c$ , a impedância característica da linha e  $\boldsymbol{\gamma}$ , a matriz de propagação, definidas, respectivamente, pelas Equações 2.19 e 2.20:

$$\mathbf{Z}_c = \sqrt{\mathbf{Z}\mathbf{Y}^{-1}} = \sqrt{(\mathbf{R} + j\omega\mathbf{L})(\mathbf{G} + j\omega\mathbf{C})^{-1}} \quad (2.19)$$

$$\boldsymbol{\gamma} = \sqrt{\mathbf{Z}\mathbf{Y}} = \sqrt{(\mathbf{R} + j\omega\mathbf{L})(\mathbf{G} + j\omega\mathbf{C})} \quad (2.20)$$

Figura 6 – Representação da teoria de 2 portas estendida para  $(n + 1)$  condutores.



Fonte: Modificado de (PAUL, 1994).

Assim, de maneira inversa se as informações da impedância característica e matriz de propagação são valores conhecidos, através de suas partes reais e imaginárias, podemos obter as matrizes **RLCG** da seguinte forma:

$$\mathbf{R} = \text{real}\{\boldsymbol{\gamma} \cdot \mathbf{Z}_0\} \quad (2.21)$$

$$\mathbf{L} = \frac{1}{\omega} \text{imag}\{\boldsymbol{\gamma} \cdot \mathbf{Z}_0\} \quad (2.22)$$

$$\mathbf{C} = \frac{1}{\omega} \text{real}\{\mathbf{Z}_0^{-1} \cdot \boldsymbol{\gamma}\} \quad (2.23)$$

$$\mathbf{G} = \text{real}\{\mathbf{Z}_0^{-1} \cdot \boldsymbol{\gamma}\} \quad (2.24)$$

Se atendo ainda as matrizes dos parâmetros **L**, **C** e **G**, estas possuem propriedades importantes que relacionam umas as outras, os quais são descritas abaixo:

$$\mathbf{LC} = \mathbf{CL} = \mu\epsilon\mathbf{1}_n \quad (2.25)$$

$$\mathbf{LG} = \mathbf{GL} = \mu\sigma\mathbf{1}_n \quad (2.26)$$

Considerando a teoria de  $2n$  portas para um segmento de comprimento  $l$  assumindo  $z = 0$  temos que 2.16 toma forma da equação a seguir:

$$\boldsymbol{\phi}(l) = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l)\mathbf{1}_n & -\sinh(\gamma l)\mathbf{Z}_c \\ -\sinh(\gamma l)\mathbf{Z}_c^{-1} & \cosh(\gamma l)\mathbf{1}_n \end{bmatrix}$$

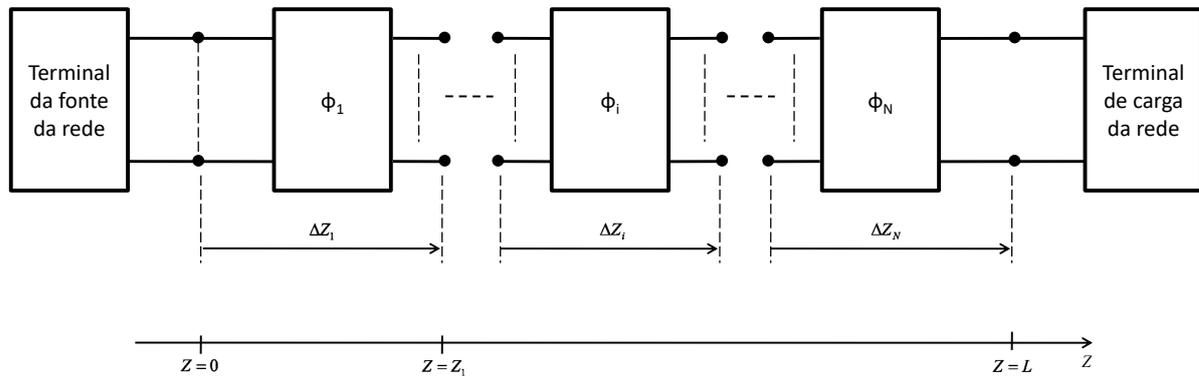
Considerando a linha inteira dividida em  $N$  segmentos de comprimento  $l$ , calculando todas as matrizes  $\boldsymbol{\phi}(l)$  para cada segmento considerado, é possível obter a matriz completa da função de transferência da relação entrada-saída da linha, usando o artifício matemático de cascadeamento de seções como exposto a seguir:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{I}(0) \end{bmatrix} = \boldsymbol{\phi}(l)_1 \cdot \boldsymbol{\phi}(l)_2 \cdot \boldsymbol{\phi}(l)_3 \cdots \boldsymbol{\phi}(l)_N \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}(L) \\ \mathbf{I}(L) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

onde  $L$  é o comprimento do cabo total. O melhor entendimento do cascadeamento das seções da linha pode ser visualmente ilustrado na Figura 7, onde é representado os vários segmentos  $\Delta z$  que formam a linha completa do terminal da fonte até o terminal de carga.

O cascadeamento de seções é importante, pois que cabos de comprimentos longos podem ser formados por diferentes tipos de cabo que variam mais comumente o diâmetro

Figura 7 – Representação do cascadeamento de segmentos que formam a matriz em cadeia da matriz de transferência da linha  $\phi$ .



Fonte: Modificado de (PAUL, 1994).

da seção transversal da bitola do mesmo. Desde que soluções fechadas para linhas de transmissão com imperfeições não existem, a divisão do cabo em seções facilita a formulação matemática, uma vez que cada seção pode ser aproximada por seções uniformes, os quais possuem solução. Deste modo o cascadeamento torna suas soluções mais simples de se manipular.

## 2.2 Transmissão em modo fantasma

Antes de abordar o modo de transmissão propriamente dito, é importante definir dois modos básicos de transmissão: o modo diferencial e o modo comum. Esses modos são definidos em relação ao sentido do sinal injetado no canal. Considere assim, uma linha de transmissão com dois condutores uniformes, como ilustrado na Figura 8. Na Figura 8a, é representado o modo diferencial de transmissão, onde as correntes nos dois condutores são iguais em magnitude (de valor “ $I_d$ ”), mas possuem sentidos opostos de propagação. Na Figura 8b é ilustrado o modo comum, no qual os correntes são inseridas no mesmo sentido e mesma magnitude em ambos os condutores que formam um par.

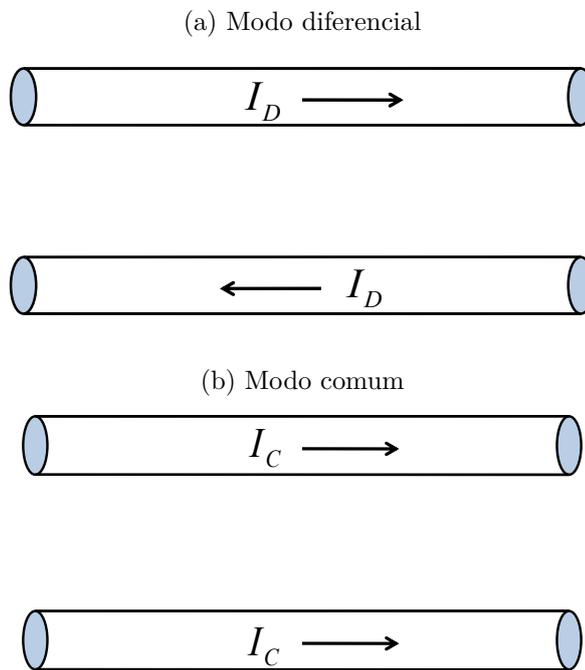
Deste modo, definidos os modos diferencial e comum, podemos abordar o modo de transmissão fantasma, que consiste em injetar sinais em modo comum nos pares trançados, e processar o sinal diferencialmente no lado do receptor, como ilustrado na Figura 9.  $V_{d1Tx}^+$  e  $V_{d1Tx}^-$  correspondem ao conjunto de sinais que formam o canal diferencial 1. De maneira análoga, é formando o canal diferencial 2. Enquanto  $V_{PTx}^+$  e  $V_{PTx}^-$  são os sinais transmitidos nos canais diferenciais 1 e 2, respectivamente.

Assim, o modo fantasma aumenta o número de canais disponíveis para transmissão de dados sobre a mesma infraestrutura de cobre. A denominação de canal fantasma decorre do fato de que o canal existe, mas não fisicamente. Deste modo, reduz-se a quantidade de

pares trançados necessários para aumentar a taxa de transmissão de dados.

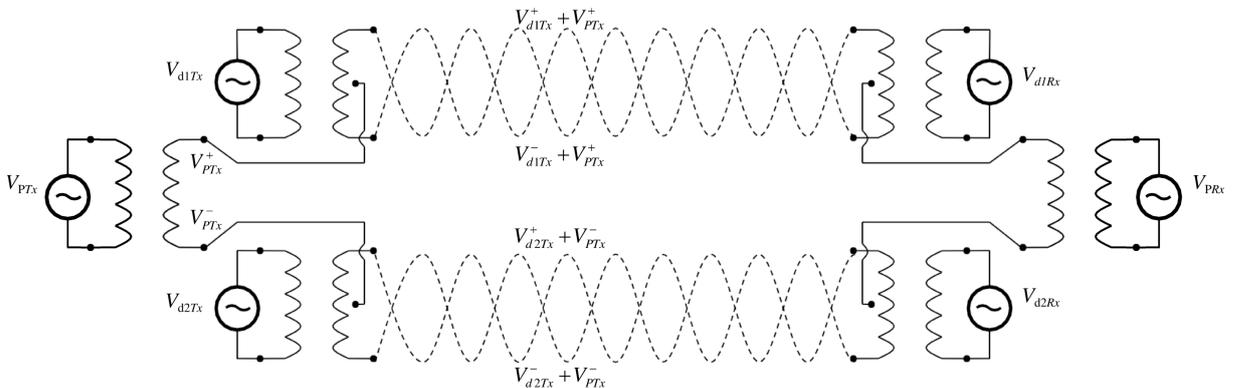
A relação entre o número de canais diferenciais com o número de canais fantasmas que podem ser obtidos é regido da seguinte forma:  $N$  canais diferenciais permitem obter  $N - 1$  canais fantasma, porém o número total máximo de canais para transmissão é de  $2N - 1$ , pois os canais fantasmas de primeira camada compõem a base para a formação da segunda camada e este procedimento ocorre da mesma maneira nas camadas do canal fantasma mais altas. Assim, em um enlace com quatro pares, irão quatro canais diferenciais e três canais fantasma, sendo dois canais fantasma de primeira camada e um canal

Figura 8 – Representação dos modos de transmissão (a) diferencial e (b) comum.



Fonte: (PAUL, 1994).

Figura 9 – Ilustração mostrando como o modo fantasma explora os sinais em modo comum para criar novos canais sobre os pares trançados existentes.



Fonte: Modificado de (GABARA, 2001).

fantasma de segunda camada (GOMES, 2012).

Assim, o sinal comum em cada par é processado diferencialmente no receptor do canal fantasma. O sinal fantasma é desta forma mais um canal diferencial sobre os canais existentes. Seja o canal transmitindo modo fantasma,  $V_{PTx}$ , definido pela Equação 2.28 e  $V_{PRx}$  é o sinal fantasma recebido:

$$V_{PTx} = V_{PTx}^+ - V_{PTx}^- \quad (2.28)$$

Enquanto  $V_{d1Tx}$  e  $V_{d2Tx}$ , os outros sinais transmitidos, em modo diferencial, e  $V_{d1Rx}$  e  $V_{d2Rx}$ , os sinais diferenciais recebidos, respectivamente, definidos pelas Equações 2.29, 2.30, 2.31 e 2.32:

$$V_{d1Tx} = V_{d1Tx}^+ - V_{d1Tx}^- \quad (2.29)$$

$$V_{d2Tx} = V_{d2Tx}^+ - V_{d2Tx}^- \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} V_{d1Rx} &= (V_{d1Tx}^+ + V_{PTx}^+) - (V_{d1Tx}^- + V_{PTx}^-) \\ V_{d1Rx} &= V_{d1Tx}^+ - V_{d1Tx}^- = V_{d1Tx} \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} V_{d2Rx} &= (V_{d2Tx}^+ + V_{PTx}^+) - (V_{d2Tx}^- + V_{PTx}^-) \\ V_{d2Rx} &= V_{d2Tx}^+ - V_{d2Tx}^- = V_{d2Tx} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Como já dito anteriormente na descrição da transmissão em modo fantasma, o sinal em cada par é processando diferencialmente da seguinte forma:

$$\begin{aligned} V_{PRx} &= \frac{(V_{d1Tx}^+ + V_{PTx}^+ + V_{d1Tx}^- + V_{PTx}^-)}{2} \\ &\quad - \frac{(V_{d2Tx}^+ + V_{PTx}^- + V_{d2Tx}^- + V_{PTx}^+)}{2} \\ V_{PRx} &= V_{PTx}^+ - V_{PTx}^- = V_{PTx} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Através das equações acima, observa-se que os modos fantasma e diferenciais não sofrem interferências, teoricamente. Uma vez que os pares trançados não são perfeitos e balanceados, as interferências entre os modos devem existir.

## 2.3 Capacidade do canal

Idealmente a máxima taxa de dados que podem ser transmitidas pelo canal,  $C$ , depende da largura de banda,  $W$ , e da razão sinal-ruído (SNR), o qual é fornecido por (SHANNON, 1948):

$$C = W \log_2(1 + SNR) \quad (2.34)$$

onde SNR é obtida da seguinte formulação:

$$SNR = \frac{S_i |H_i|^2}{\sum_j |FEXT_{j,i}|^2 S_j + N} \quad (2.35)$$

onde  $S$  é a potência de entrada,  $H$  é a função de transferência do canal que pode ser do modo fantasma ou diferencial, FEXT é o *crosstalk* do canal  $j$  para o canal  $i$  e  $N$  é a potência do ruído. A razão sinal-ruído é a razão entre a potência do sinal recebida e potência do ruído recebida no receptor para o sistema analisado. O *crosstalk* mais danoso para o sistema é o FEXT visto que acopla diretamente com o sinal de saída. Além disso, o NEXT pode ser mitigado através de técnicas de multiplexação na frequência, uma vez que existe a separação das bandas de frequência *upstream* e *downstream*, de modo que somente o FEXT afeta os sistemas atuais. Note que a SNR é diretamente proporcional a função de transferência, mas inversamente proporcional ao FEXT. Deste modo quando FEXT é muito alto, a capacidade do canal é afetada de maneira a reduzir a taxa de dados máxima transmissível.

## 2.4 Não-Uniformidades

Linhas de transmissão formadas por cabos perfeitos e balanceados são idealizações da realidade. As imperfeições estão presentes em qualquer cabo de cobre. E podem surgir devido diversos fatores, como por exemplo, defeitos no processo de produção (não-uniformidades periódicas), inhomogeneidade dos seus materiais (não-uniformidades aleatórias), bem como estar relacionada ao manuseamento inapropriado do cabo. De maneira que, mesmo processos rígidos e minuciosos de testes de qualidade para os cabos são difíceis de serem realizados.

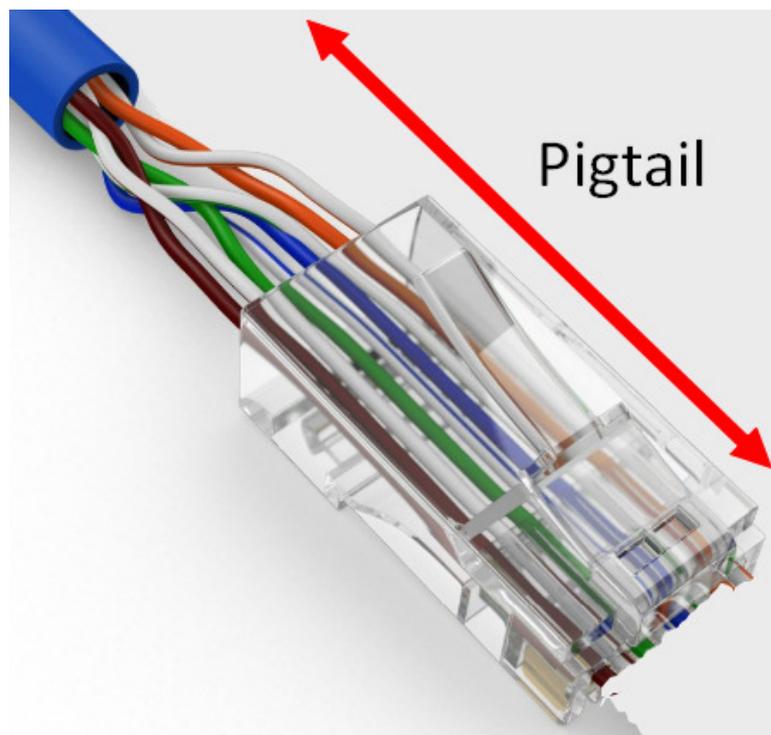
Além do próprio acoplamento que ocorre entre os sinais nos canais diferenciais ao longo de um mesma linha de transmissão, existe a conversão de modo. A conversão de modo é um tipo de *crosstalk* também denominado vazamento, que ocorre quando parte do sinal de um modo para outro, neste caso em que se utiliza modo fantasma, seria o vazamento do modo comum (fantasma) para o modo diferencial ou vice-versa. É de amplo

conhecimento que não-uniformidades podem gerar conversão de modo (NIR; MOONEN, 2007) (NEUS et al., 2011) (GOMES et al., 2012).

Além disso, a presença de não-uniformidades tem efeitos degradantes no sinal transmitido como, por exemplo, aumento dos níveis de *crosstalk* e aumento da irradiação do cabo, fatores estes que afetam a taxa de transmissão nestes canais. Porém estudos das não-uniformidades em modo de transmissão fantasma não são bem conhecidos. A seguir são descritas alguns tipos de não-uniformidades cujos efeitos na transmissão fantasma serão analisadas nesta dissertação:

1. **Pigtail:** está relacionado ao pedaço não trançado do par(es) nas extremidades do cabo. Na maioria dos casos, tal efeito é intencional para conectar o mesmo a um equipamento ou adaptador. Por exemplo, cabos *Ethernet* utilizam conectores RJ-45. Para uso de tal conector, é necessário o destrançamento dos pares em suas extremidades, como ilustrado na Figura 10.
2. **Variação no centro do par:** está relacionada a variação na distância entre o centro dos pares trançados ao longo do cabo, como ilustrado na Figura 11. Em cenários ideais tal distância ocorreria de forma que o centro dos pares permanecessem paralelos. Esta não-uniformidade está intrinsecamente relacionada a qualidade do cabo utilizado. Por exemplo, cabos CAT6 são menos propensos a interferências,

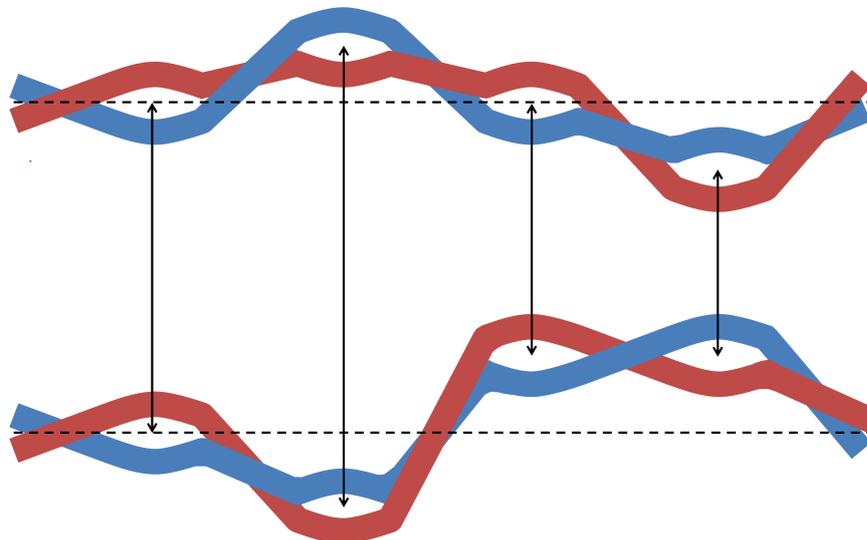
Figura 10 – Exemplo de *pigtail* em cabos Ethernet.



Fonte:(OHASHI et al., 2017).

devido sua produção ser de maior qualidade em comparações com cabos da linha predecessores como CAT5, por exemplo.

Figura 11 – Variação na distância entre os centros dos pares ao longo do cabo.



Fonte: Elaborado pela Autora.

3. **Trançamento não-uniforme dos pares:** corresponde as diferentes taxas de trançamento ao longo do par que podem variar em valor o comprimento especificado para o mesmo, decorrente de processos de manufatura, como ilustrado na Figura 12. Pares trançados ideias apresentam, de acordo com o seu trançamento, um mecanismo que cancela o acoplamento magnético entre os pares. Assim, a referida não-uniformidade quebra este mecanismo afetando assim a taxa da transmissão de dados.

Figura 12 – Trançamento não-uniforme dos pares ao longo do cabo.



Fonte: Elaborado pela Autora.

## 3 Metodologia e cenários

Neste capítulo serão abordadas os seguintes tópicos: uma breve abordagem das principais funcionalidades e aspectos gerais do simulador desenvolvido por Bin Lee (LEE, 2004b), em seguida será abordada a metodologia de análise utilizada para realização deste trabalho, que inclui modificações no simulador de Bin Lee; e por fim serão abordados os cenários escolhidos para simulações.

### 3.1 Simulador de Bin Lee

O simulador desenvolvido por Bin Lee denominado *Binder MIMO Channel Software* possibilita analisar as características do canal *Binder* calculando diversos parâmetros como função de transferência, perdas de inserção e *crosstalks* (LEE, 2004a).

O *software* consiste basicamente de seis programas, os quais são listados a seguir com as principais características de cada programa:

- **MIMO\_Usage:** É o programa principal, o qual calcula a matriz da função de transferência do canal, bem como os *crosstalks* e a taxa de dados;
- **MIMO\_UsageComparing:** Funciona somente para modelo de dois pares, não suporta multipares. Pode comparar diversos cenários variando um ou mais parâmetros. Tem como saída: a função de transferência, FEXT, NEXT e FEXT-*equal level*, i.e., o FEXT sem atenuação devido o comprimento do cabo, e a taxa de dados;
- **MIMO\_ParameterLoop:** Analisa as características do canal em função de um parâmetro específico variante. Não considera descontinuidades no cabo, mas suporta multipares. Tem como saída: a função de transferência 3D, FEXT 3D, NEXT 3D; função de transferência, FEXT e NEXT médios;
- **MIMO\_PairLoop:** Calcula a soma de potência do crosstalk de pares individuais. Não calcula o efeito de multipares, pois apesar de possibilitar analisar vários pares, o cálculo da soma de potência é feita par a par. Tem como saída: a soma de potência do crosstalk FEXT e NEXT e a taxa de dados;
- **MIMO\_GUI:** É uma interface gráfica de suporte para o programa MIMO\_Usage, de maneira a tornar o simulador mais simples ao usuário. Porém não implementa todos os parâmetros referentes a MIMO\_Usage;

- **MIMO\_Rate:** É um programa que realiza o cálculo da taxa de dados.

O simulador possibilita definir o conjunto de parâmetros geométricos do cabo, como, por exemplo, as posições iniciais dos condutores e modelagem de imperfeições no cabo; tipo de cabo; e configurações de excitação de fonte e carga. Desta forma, modificando esta última opção pode-se simular transmissão em modo diferencial e diferencial *split-pair*. Além disso, o simulador possibilita análise das seguintes não-uniformidades implementada no código: variação na distância entre o centro dos pares, *pigtail* e trançado não uniforme.

As funções de transferência e crosstalks são apresentados em dB (potência) na seguinte forma:

$$H(dB) = 20 \log_{10}|H| \quad (3.1)$$

$$FEXT(dB) = 20 \log_{10}|FEXT| \quad (3.2)$$

$$NEXT(dB) = 20 \log_{10}|NEXT| \quad (3.3)$$

Partindo da teoria de grafos aplicados a circuitos elétricos, as matrizes de fonte,  $\mathbf{Y}_s$ , e de admitância de carga,  $\mathbf{Y}_l$ , do circuito podem ser definidas como:

$$\mathbf{Y}_s = \mathbf{Y}_l = \mathbf{Y}_n = \mathbf{A} \times \mathbf{Y}_b \times \mathbf{A}^T \quad (3.4)$$

onde:

$\mathbf{Y}_n$  = Matriz de admitância de nó;

$\mathbf{A}$  = Matriz incidente reduzida;

$\mathbf{Y}_b$  = Matriz de admitância de braço;

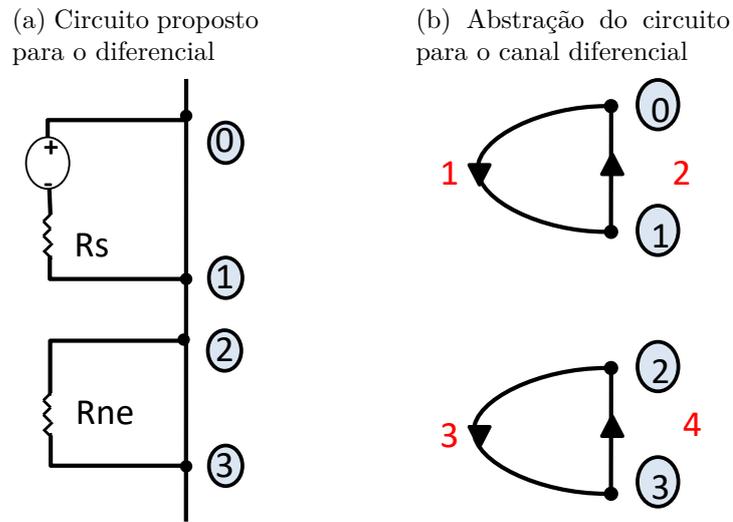
$\mathbf{A}^T$  = Transposta da matriz  $\mathbf{A}$ ;

Assim, a matriz  $\mathbf{A}$  que relaciona os nós pelos braços no circuito tem dimensão ( $n^\circ$  de nós - 1) x ( $n^\circ$  de braços). E a matriz  $\mathbf{Y}_b$  que relaciona os braços, tem dimensão ( $n^\circ$  de braços) x ( $n^\circ$  de braços). A Figura 13 ilustra 13a o esquemático do circuito para o modo de transmissão implementado no simulador de Bin Lee (modo de transmissão diferencial) e 13b o esquema de abstração para obter as matrizes de impedância da fonte e de carga.

Assim, sendo  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{Y}_b$  definidas para esta configuração, respectivamente, como:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Figura 13 – Esquêmatics para obtenção das matrizes de impedância de carga e de fonte para a transmissão em modo diferencial.



Fonte: Elaborado pela Autora

$$\mathbf{Y}_b = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_{ne}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

e  $\mathbf{A}^T$ , a transposta de  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Desta forma, a matriz de admitância de carga é:

$$\mathbf{Y}_s = \mathbf{A} \times \mathbf{Y}_n \times \mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{1}{R_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_{ne}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_s = \mathbf{A} \times \mathbf{Y}_n \times \mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{ne}} & \frac{-1}{R_{ne}} \\ 0 & \frac{-1}{R_{ne}} & \frac{1}{R_{ne}} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Onde  $R_s$  é a impedância de fonte entre os condutores de fonte excitados, e  $R_{ne}$  é a impedância de NEXT entre os condutores não excitados. De maneira similar, realizado as mesmas análises e metodologia, é obtida a matriz de admitância de carga,  $\mathbf{Y}_l$ . Após aplicado a teoria de grafos a saída do sistema obtêm-se que  $Y_l$  é:

$$\mathbf{Y}_l = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{fe}} & \frac{-1}{R_{fe}} \\ 0 & \frac{-1}{R_{fe}} & \frac{1}{R_{fe}} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Onde  $R_l$  é a impedância de carga entre os condutores excitados e  $R_{fe}$  é a impedância de FEXT entre os condutores não excitados. Outras implementações assumidas para transmissão em modo diferencial no simulador de Bin Lee são as configurações de corrente que incluem:

- Vetor de fonte, na seguinte forma:

$$\text{ICurrentConfig.m\_ISourceVector} = [\text{Is\_ScalarExcitation}, 0, 0]'$$

- Vetor de seleção do par excitado, na seguinte forma:

$$\text{ICurrentConfig.m\_ExcitedPairSelectingVector} = [1, 0, 0]$$

- Vetor de seleção do par observado, na seguinte forma:

$$\text{ICurrentConfig.m\_ObservedPairSelectingVector} = [0, -1, 1]$$

Onde  $\text{Is\_ScalarExcitation}$  é definido como  $\text{Is\_ScalarExcitation} = 1/R_s$ , assumindo que a voltagem de excitação de entrada é 1 volt.

## 3.2 Metodologia

Neste secção abordaremos a metodologia de análise. As simulações realizadas neste trabalho utilizaram o simulador de cabos desenvolvimento por Bin Lee (LEE, 2004b) (LEE et al., 2007) (LEE, 2004a) e cedido pelo mesmo. Optou-se por utilizar seu simulador, pois este é capaz de realizar simulações de não-uniformidades em cabos, as quais são estudadas neste trabalho.

Porém, uma vez que o simulador fora desenvolvido para simulações de pares trançados em modo diferencial, algumas modificações foram necessárias para simular a transmissão em modo fantasma propriamente dita. Em termos práticos separou-se o código em duas partes: uma para realização de simulações em transmissão diferencial e outra para

transmissões em modo fantasma, de maneira que o conjunto dos seus resultados fornecem a taxa total do canal.

As principais modificações são listadas a seguir:

- Modificações nas especificações das matrizes de impedância de carga;
- Modificações nas especificações das matrizes de impedância de fonte;
- Modificações nos vetores de entrada e configuração de corrente.

Partindo da teoria de grafos aplicados a circuitos elétricos, novamente, as matrizes de admitância de fonte,  $\mathbf{Y}_s$ , e de carga,  $\mathbf{Y}_l$ , podem ser definidas como:

$$\mathbf{Y}_s = \mathbf{Y}_l = \mathbf{Y}_n = \mathbf{A} \times \mathbf{Y}_b \times \mathbf{A}^T \quad (3.10)$$

onde:

$\mathbf{Y}_n$  = Matriz de admitância de nó;

$\mathbf{A}$  = Matriz incidente reduzida;

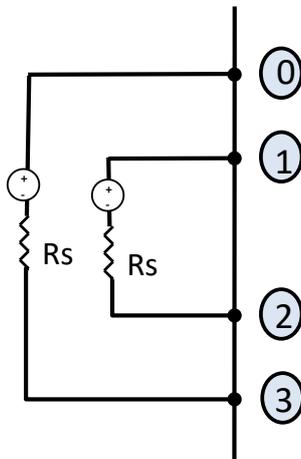
$\mathbf{Y}_b$  = Matriz de admitância de braço;

$\mathbf{A}^T$  = Transposta da matriz  $\mathbf{A}$ ;

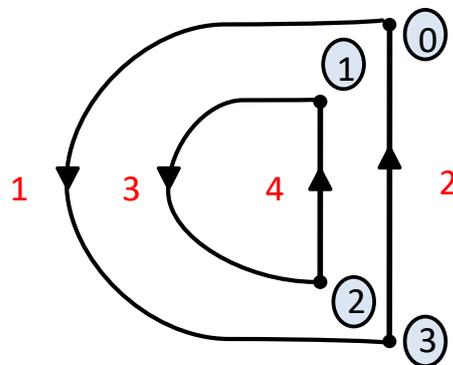
A Figura 14 ilustra 14a o esquemático do circuito para inclusão do canal fantasma de transmissão e 14b o esquema de abstração para obter as matrizes de impedância da fonte e de carga.

Figura 14 – Esquemáticos para obtenção das matrizes de impedância de carga e de fonte para a transmissão em modo fantasma.

(a) Circuito proposto para o fantasma



(b) Abstração do circuito para o canal fantasma



Fonte: Elaborado pela Autora

Assim,  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{Y}_b$  são definidas para esta configuração, respectivamente, como:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{Y}_b = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

e  $\mathbf{A}^T$ , a transposta de  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Desta forma, a matriz de admitância de carga é:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_s = \mathbf{A} \times \mathbf{Y}_n \times \mathbf{A}^T &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{1}{R_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{Y}_s = \mathbf{A} \times \mathbf{Y}_n \times \mathbf{A}^T &= \begin{bmatrix} \frac{1}{R_s} & \frac{-1}{R_s} & 0 \\ \frac{-1}{R_s} & \frac{1}{R_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_s} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Onde  $R_s$  é a impedância de fonte entre os condutores de fonte excitados. De maneira similar, realizado as mesmas análises e metodologia, é obtida a matriz de admitância de carga,  $\mathbf{Y}_l$ . Sendo, esta matriz definida como,  $\mathbf{Y}_l$ :

$$\mathbf{Y}_l = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_l} & \frac{-1}{R_l} & 0 \\ \frac{-1}{R_l} & \frac{1}{R_l} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_l} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Onde  $R_l$  é a impedância de carga entre os condutores excitados. Para transmissão em modo fantasma, as configurações de vetores de entrada e corrente foram modificadas de maneira que:

- O vetor de fonte assume a seguinte forma:

$$\text{ICurrentConfig.m\_ISourceVector} = [-\text{Is\_ScalarExcitation}, \text{Is\_ScalarExcitation}, \text{Is\_ScalarExcitation}]'$$

- O vetor de seleção do par excitado assume a seguinte forma:

$$\text{ICurrentConfig.m\_ExcitedPairSelectingVector} = [-1, 1, 1]$$

- O vetor de seleção do par observado assume a seguinte forma:

[1, 0, 0] → Observar o primeiro par diferencial.

[0, -1, 1] → Observar o segundo par diferencial.

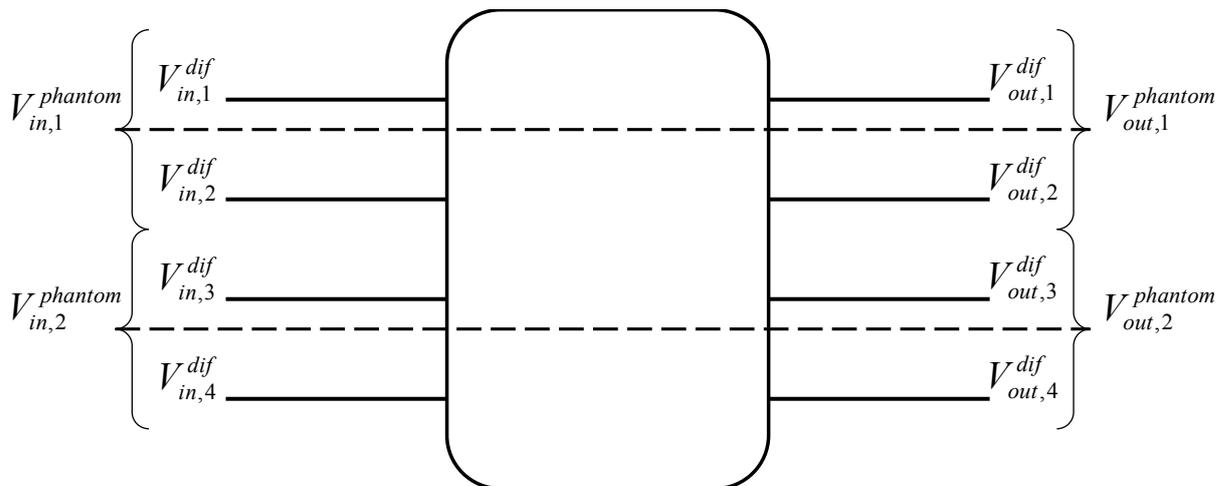
[1, -1, 1] → Observar o fantasma.

A Figura 15 mostra as relações entre voltagens de entrada e saída para o canal fantasma entre dois pares trançados.

Como a função de transferência do canal é geralmente definida como a razão entre a voltagem de saída,  $V_{out}$ , e a voltagem de entrada,  $V_{in}$ , tal definição pode ser estendida para a definição da função de transferência do canal fantasma,  $H_{Phantom}$ , como:

$$H_{Phantom} = \frac{V_{out,1}^{Phantom} - V_{out,2}^{Phantom}}{V_{in,1}^{Phantom} - V_{in,2}^{Phantom}} \quad (3.16)$$

Figura 15 – Relação entre as voltagens de entrada e saída para o canal fantasma.



Fonte:Elaborado pela Autora

Definindo as voltagens do canal fantasma em termos das voltagens dos condutores, a Equação (3.16) pode ser reescrita como:

$$H_{Phantom} = \frac{(V_{out,3} + V_{out,4}) - (V_{out,2} + V_{out,1})}{(V_{in,3} + V_{in,4}) - (V_{in,2} + V_{in,1})} \quad (3.17)$$

Aproximações similares podem ser utilizadas para derivar os FEXTs entre os canais diferenciais e entre os canais dos modos diferencial e comum. Como o FEXT é definido como a razão da voltagem de saída em uma determinada porta pela voltagem de entrada no sistema, tem-se que os FEXTs do canal fantasma para os canais diferencial 1 e 2 são definidos, respectivamente, como:

$$FEXT_{PhantomDif1} = \frac{V_{out,2} - V_{out,1}}{(V_{in,3} + V_{in,4}) - (V_{in,2} + V_{in,1})} \quad (3.18)$$

$$FEXT_{PhantomDif2} = \frac{V_{out,3} - V_{out,4}}{(V_{in,3} + V_{in,4}) - (V_{in,2} + V_{in,1})} \quad (3.19)$$

E o FEXT dos canais diferenciais 1 e 2 para o canal fantasma são definidos, respectivamente, como:

$$FEXT_{Dif1Phantom} = \frac{(V_{out,3} + V_{out,4}) - (V_{out,2} + V_{out,1})}{V_{in,2} - V_{in,1}} \quad (3.20)$$

$$FEXT_{Dif2Phantom} = \frac{(V_{out,3} + V_{out,4}) - (V_{out,2} + V_{out,1})}{V_{in,3} - V_{in,4}} \quad (3.21)$$

Além disso, as taxas de transmissão foram calculados a partir do parâmetros S de espalhamento, com o código interno desenvolvido pelo grupo LaPS (Laboratório de processamento de sinais) da UFPA e cedido pelo mesmo.

### 3.3 Cenários

Em todas as simulações realizadas, dois pares trançados diferenciais foram excitados para criar o canal fantasma. Em todos os cenários, os comprimentos de cabo considerados variavam de 10 m a 100 m e a faixa de frequência considerada foi de DC até 500 MHz.

De forma a obter resultados realísticos, as características do cabo utilizado nas simulações foram obtidos através medidos em laboratório e catalogados em relatórios internos (UFPA, 2016), cujas especificações são ilustradas a seguir na Tabela 2. Por meio das medições realizadas, notou-se que pares dispostos na diagonal apresentam trançados

Tabela 2 – Especificações do cabo de cobre simulado – CAT5e.

Especificação	Valores/tipo
Diâmetro do condutor (AWG)	24
Número de pares	2
Distância entre o centro dos pares (mm)	24
Comprimento de Trançado – par 1 (mm)	12,70
Comprimento de Trançado – par 2 (mm)	13,37
Material Isolante	Polietileno

semelhantes e pares dispostos lateralmente possuem trançados bastante distintos. Escolhendo transmissão fantasma com pares na diagonal mostraram taxas de transmissão maiores que quando se utiliza os pares da lateral. Dessa forma, foram escolhidos dois desses comprimentos medidos diagonalmente como comprimento de trançado para os cenários simulados.

Os cenários escolhidos tem como ênfase analisar o comportamentos do canal fantasma para três tipos de não-uniformidades em cabos reais: variação da distância entre o centro dos pares, *pigtail* e trançado não-uniforme. Os cenários analisados foram os seguintes:

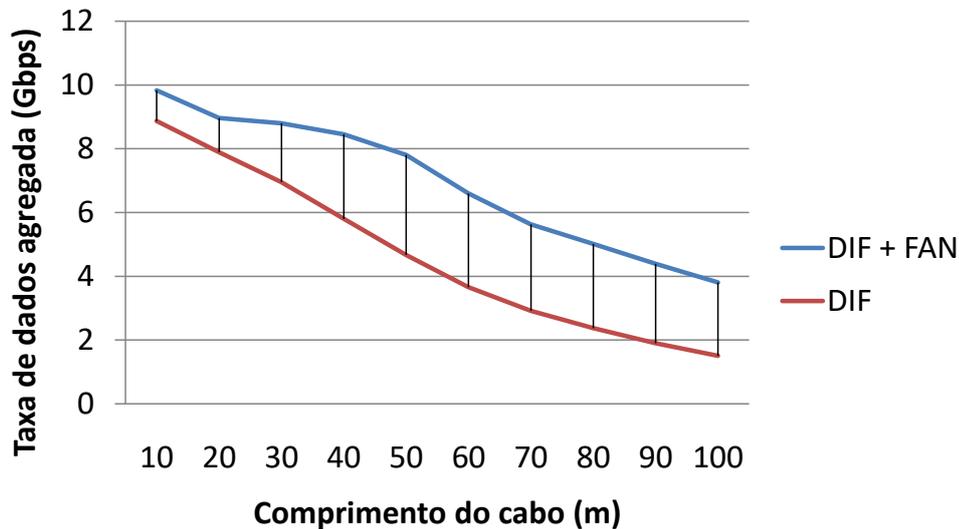
- Cabo de cobre uniforme (caso ideal);
- Cabo de cobre com uma das não-uniformidades a seguir:
  - Variação no centro do par ao longo do comprimento com valor nominal de 10 %, assumindo distribuição uniforme;
  - “Pigtail” de 1,5 cm em ambas as extremidades dos pares (valor medido em laboratório para um conector RJ-45);
  - Trançamento não-uniforme ao longo do cabo, considerando uma distribuição uniforme com 10 % de variação.
- Cabo de cobre com as três não-uniformidades acima listadas.

## 4 Resultados

### 4.1 Análise da Taxa de Dados em Cenários Uniformes

Os resultados obtidos para cenários uniformes mostram que a presença do canal fantasma de transmissão consegue agregar taxa em relação ao cenário sem o fantasma para todos os comprimentos analisados, como ilustrado na Figura 16.

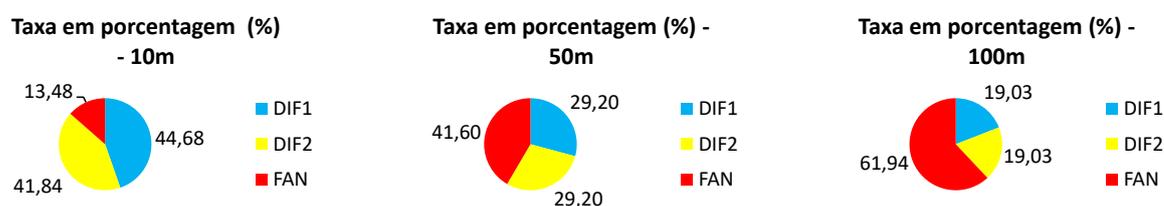
Figura 16 – Taxa de transmissão em cenários com e sem a presença do canal fantasma – cenário uniforme.



Fonte: Elaborado pela Autora

A Figura 17 apresenta as taxas em porcentagens que cada canal contribui na taxa agregada do sistema para os comprimentos de 10 m, 50 m e 100 m em cenário uniforme. Observa-se que com o aumento no comprimento do cabo, a contribuição do canal fantasma aumenta consideravelmente. Além disso, essa contribuição passa a ser maior que a contribuição dos canais diferenciais. Nota-se ainda que as taxas dos canais diferenciais são diferentes para comprimentos pequenos, por exemplo, em 10 m, e que em comprimentos maiores essa diferença desaparece. Isto ocorre devido a leve diferença entre os comprimentos de trançado dos pares, onde o 1º par possui comprimento de trança menor que o 2º par, isto fornece ao 1º par maior imunidade ao acoplamento eletromagnético. Porém, em comprimentos maiores essa diferença de comprimento de trançado perde o efeito devido sua proporção em relação ao comprimento total do cabo. Esse comportamento também ocorre para cenários não-uniformes, entretanto quando há presença de trançado

Figura 17 – Porcentagem da contribuição de cada canal: diferenciais e fantasma, na taxa agregada do sistema – cenário uniforme.



Fonte: Elaborado pela Autora

não-uniforme essa diferença de taxa dos canais diferenciais continua a ocorrer em comprimentos além de 50 m. Em 100z,m, a contribuição devido ao canal fantasma é de 61,94 % na taxa agregada.

## 4.2 Taxa de Dados para cenários com não-uniformidades

Nesta secção serão abordadas as taxas de transmissão obtidos em cenários não-uniformes: variação no centro do par, *pigtail* e trançamento não-uniforme.

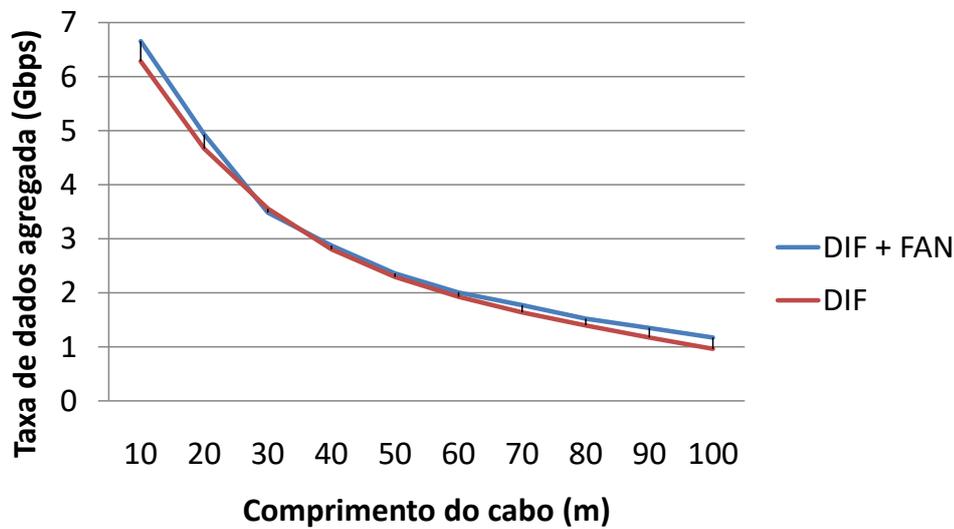
### 4.2.1 Não-uniformidade – Variação no centro do par

A variação no centro do par como mencionada no Capítulo 2, é uma não - uniformidade ao longo de todo o comprimento do cabo, onde os centros dos pares não mantêm uma distância igual ao longo da mesma.

A presença da não-uniformidade do tipo variação da distância entre o centro dos pares degrada a taxa de transmissão no canal fantasma, como ilustrado na Figura 18. Observa-se que neste cenário, a inclusão da transmissão em modo fantasma agrega pouco taxa de transmissão e que entre 30 m e 60 m a taxa de transmissão no sistema com canais fantasma e diferenciais é praticamente o mesmo que somente os canais diferenciais, não agregando taxa neste intervalo de comprimento do cabo. Este comportamento ocorre devido a não-uniformidade ser distribuída ao longo de todo comprimento do cabo.

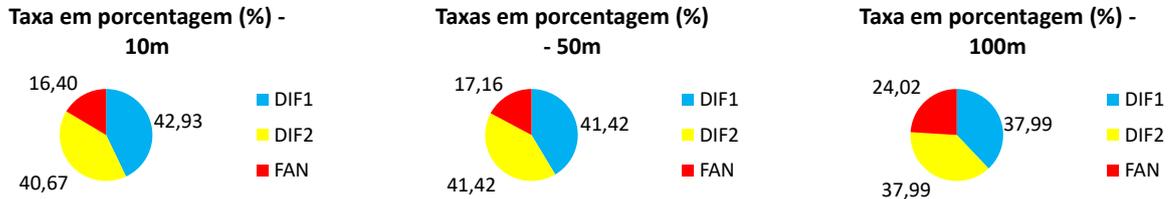
Na Figura 19 são apresentados as taxas em porcentagens com a contribuição de cada canal para taxa agregada do sistema em comprimentos de 10 m, 50 m e 100 m para o cenário com variação na distância entre o centro dos pares. Observa-se que com o aumento do comprimento do cabo considerado a contribuição do canal fantasma aumenta, porém esta contribuição não é a maior contribuição devidos aos canais diferenciais para a taxa agregada. Em 100 m a taxa do canal fantasma corresponde a somente 24,02 % da taxa agregada do sistema.

Figura 18 – Taxa de transmissão em cenários com e sem a presença do canal fantasma – cenário com variação no centro do par.



Fonte: Elaborado pela Autora

Figura 19 – Porcentagem da contribuição de cada canal: diferenciais e fantasma, na taxa agregada do sistema – cenário com variação no centro do par.



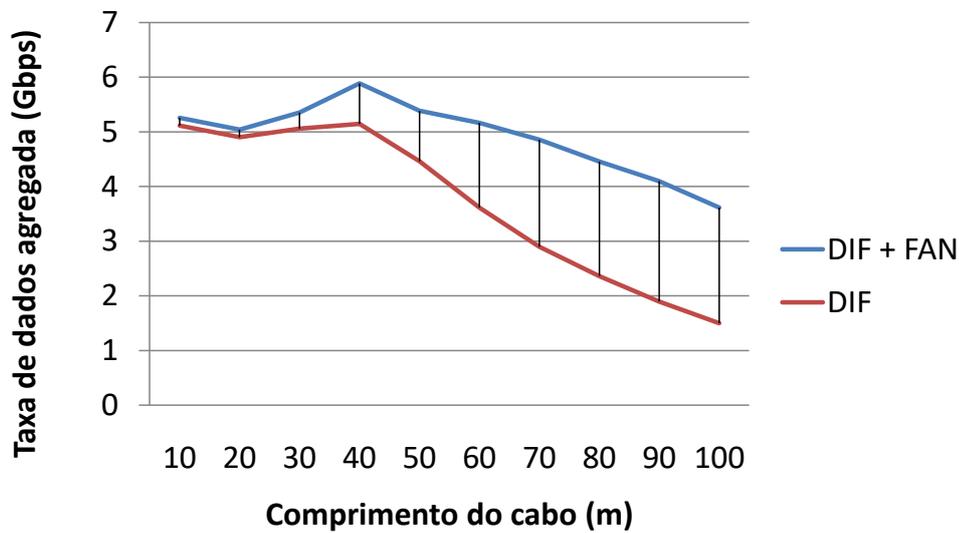
Fonte: Elaborado pela Autora

#### 4.2.2 Não-uniformidade – Pigtail

Na Figura 20 são apresentadas as taxas agregadas para canais diferenciais juntamente com o canal fantasma e para o sistema somente com canais diferenciais para cenários com *pigtail*. Nota-se que neste cenário entre 10 m a 40 m, a presença do canal fantasma agrega pouca taxa, uma vez que o efeito de *pigtail* degrada o canal fantasma. Para comprimentos acima de 40 m o canal fantasma passa a agregar mais taxa. Esse comportamento na taxa agregada é devido ao fato desta não-uniformidade ser pontual, de maneira que para comprimentos maiores seu efeito torna-se desprezível em proporção ao comprimento do cabo.

Enquanto na Figura 21 são apresentados as taxas em porcentagens com a contribuição de cada canal para taxa agregada do sistema em comprimentos de 10 m, 50 m e 100 m para o cenário a presença de *pigtail*. Nota-se que com o aumento do comprimento do cabo, a contribuição do canal fantasma na taxa agregada aumenta. Porém, é notável

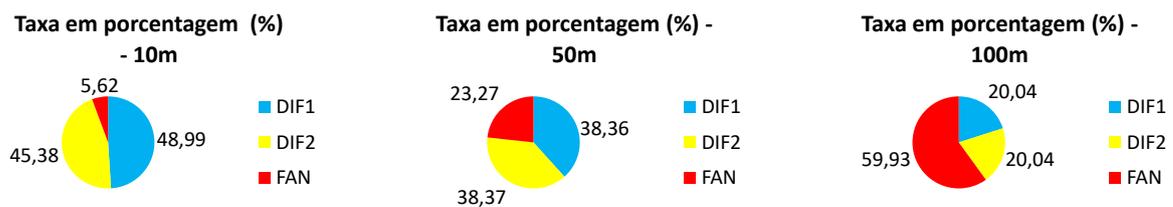
Figura 20 – Taxa de transmissão em cenários com e sem a presença do canal fantasma – cenário com *pigtail*.



Fonte: Elaborado pela Autora

que a contribuição do fantasma em 10 m é irrisória em relação a contribuição devido aos canais diferenciais, ilustrando que o *pigtail* tem impacto severo para comprimentos pequenos para o canal fantasma, e que tal efeito passa a diminuir com o comprimento do cabo. Em 100 m a taxa do canal fantasma corresponde a 59,93 % da taxa agregada do sistema.

Figura 21 – Porcentagem da contribuição de cada canal: diferenciais e fantasma, na taxa agregada do sistema – cenário com *pigtail*.

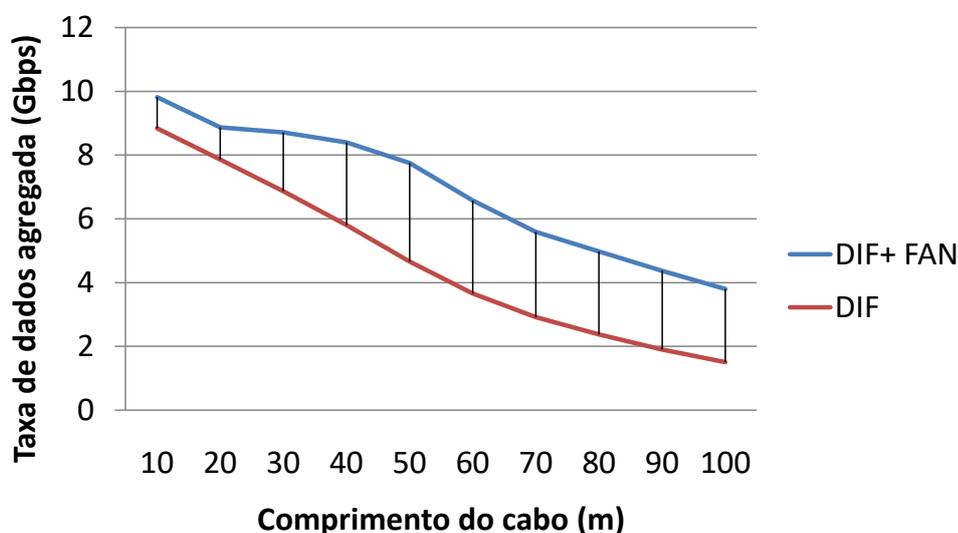


Fonte: Elaborado pela Autora

### 4.2.3 Não-uniformidade – Trançado não-uniforme

Em cenários com trançado não-uniforme observa-se que a presença do canal fantasma agrega taxa ao sistema em todos os comprimentos analisados, como ilustrado na Figura 22. Nota-se ainda que o comportamento da curva de taxa agregada para os diversos comprimentos analisados é semelhante ao obtido para cenários uniformes. Dessa forma, essa não-uniformidade tem pouco impacto tanto nos canais diferenciais quanto no canal fantasma.

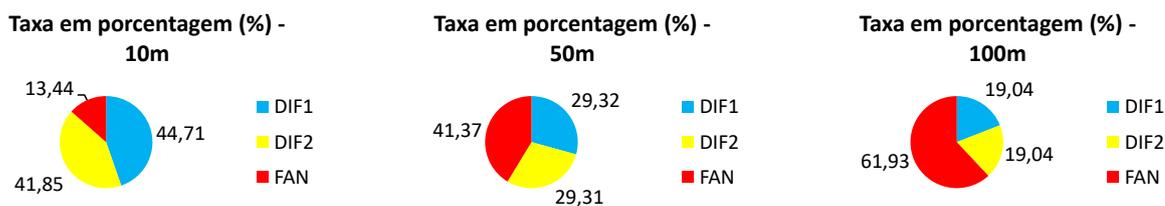
Figura 22 – Taxa de transmissão em cenários com e sem a presença do canal fantasma – cenário com trançado não-uniforme.



Fonte: Elaborado pela Autora

Além disso, valores semelhantes aos obtidos nas taxas em porcentagens para os gráficos de pizza do cenário uniforme, Figura 17, são obtidos no cenário com trançado não-uniforme, ilustrado na Figura 23. Nota-se que com o aumento do comprimento do cabo, a contribuição do canal fantasma na taxa agregada aumenta. Em 100 m a taxa do canal fantasma corresponde a 61,93% da taxa agregada do sistema.

Figura 23 – Porcentagem da contribuição de cada canal: diferenciais e fantasma, na taxa agregada do sistema – cenário com trançado não-uniforme.

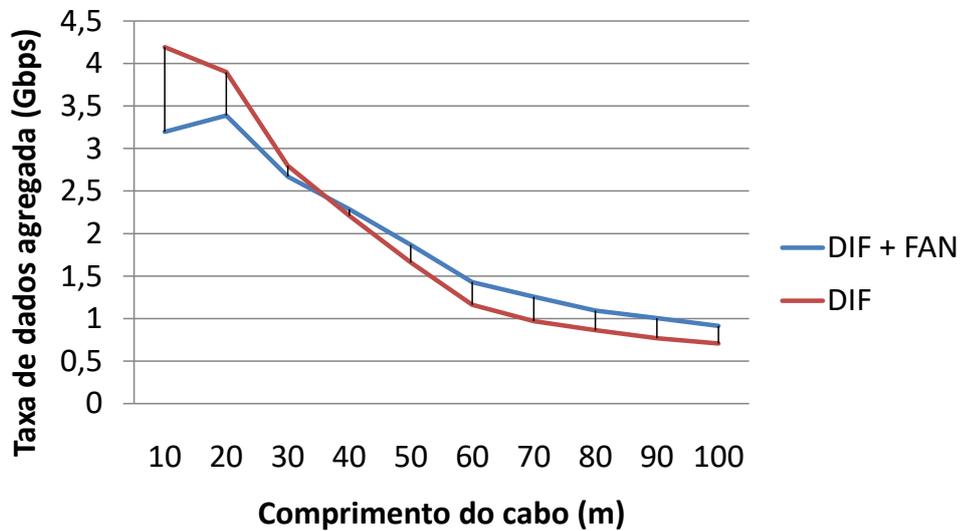


Fonte: Elaborado pela Autora

#### 4.2.4 Não-uniformidade – Variação do centro do par, Pigtail e Trançado não-uniforme

Por fim, é analisado o cenário que inclui todas as não-uniformidades. A taxa de transmissão agregada do sistema com e sem o canal fantasma é ilustrado na Figura 24. Nota-se que entre 10 m e 40 m, o canal fantasma não consegue agregar taxa, uma vez que a presença de todas as não-uniformidades degrada tanto os canais diferenciais quanto o

Figura 24 – Taxa de transmissão em cenários com e sem a presença do canal fantasma – cenário com todas as não-uniformidades: variação no centro do par, *pigtail* e trançado não-uniforme.

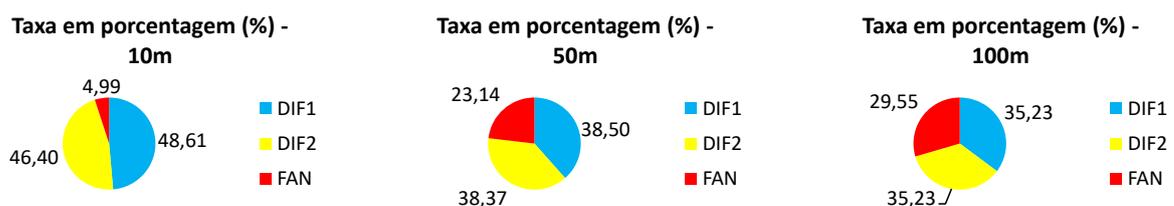


Fonte: Elaborado pela Autora

canal fantasma. Além disso, observa-se que dentre todas as não-uniformidades, o *pigtail* é aquela que apresenta maior impacto em comprimentos pequenos, logo o comportamento observado sob a não agregação de taxa do canal fantasma deve-se principalmente a presença de *pigtail*.

Na Figura 25 é apresentado as taxas em porcentagem da contribuição de cada canal para taxa agregada, nos comprimentos de 10 m, 50 m e 100 m. Observa-se que com o aumento do comprimento do cabo, a contribuição do canal fantasma aumenta, porém está contribuição nunca é maior que a contribuição devido aos canais diferenciais, para os comprimentos analisados neste trabalho. Além disso, nota-se que em 100 m a contribuição do canal fantasma é de 29,55%, contribuição essa bem menor que no cenário uniforme.

Figura 25 – Porcentagem da contribuição de cada canal: diferenciais e fantasma, na taxa agregada do sistema – cenário com todas as não-uniformidades: variação no centro do par, *pigtail* e trançado não-uniforme.

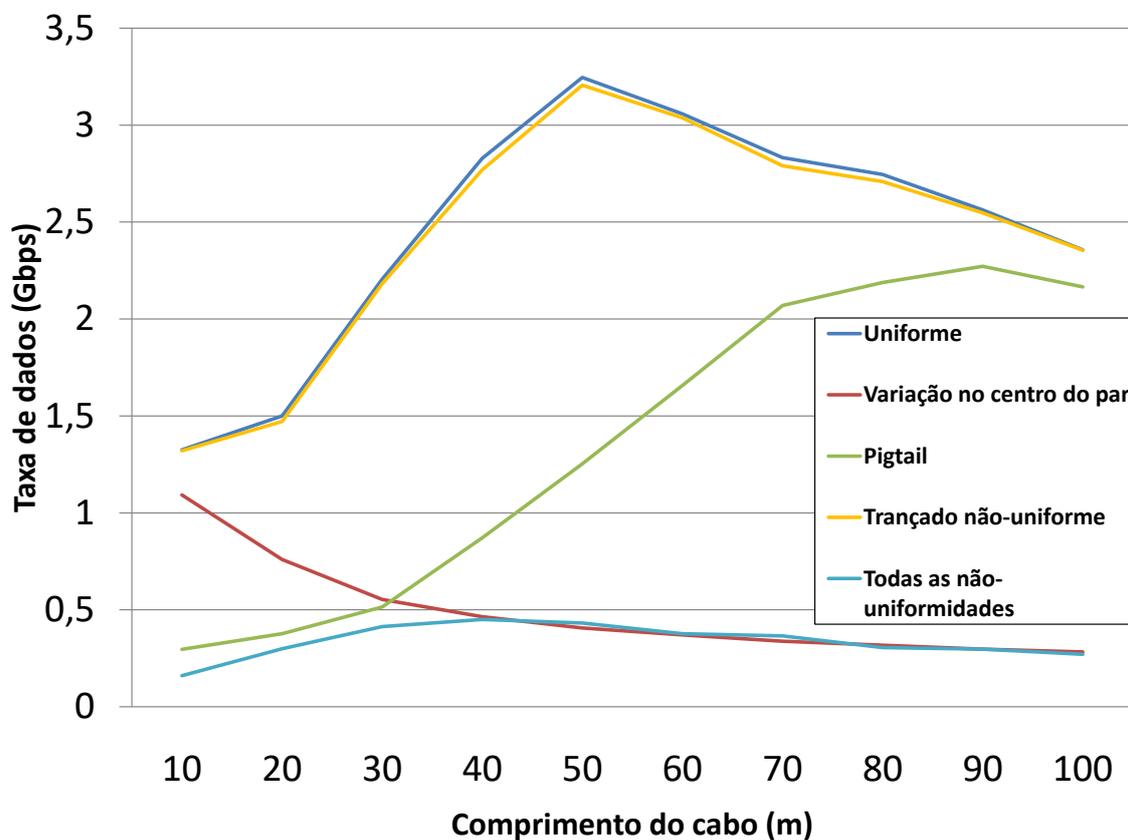


Fonte: Elaborado pela Autora

Para visualizar melhor o impacto de cada cenário na taxa do canal fantasma, é

apresentado todas as curvas de taxa no canal fantasma na Figura 26, ilustrada a seguir:

Figura 26 – Taxa de transmissão somente do canal fantasma para todos os cenários simulados.



Fonte: Elaborado pela Autora

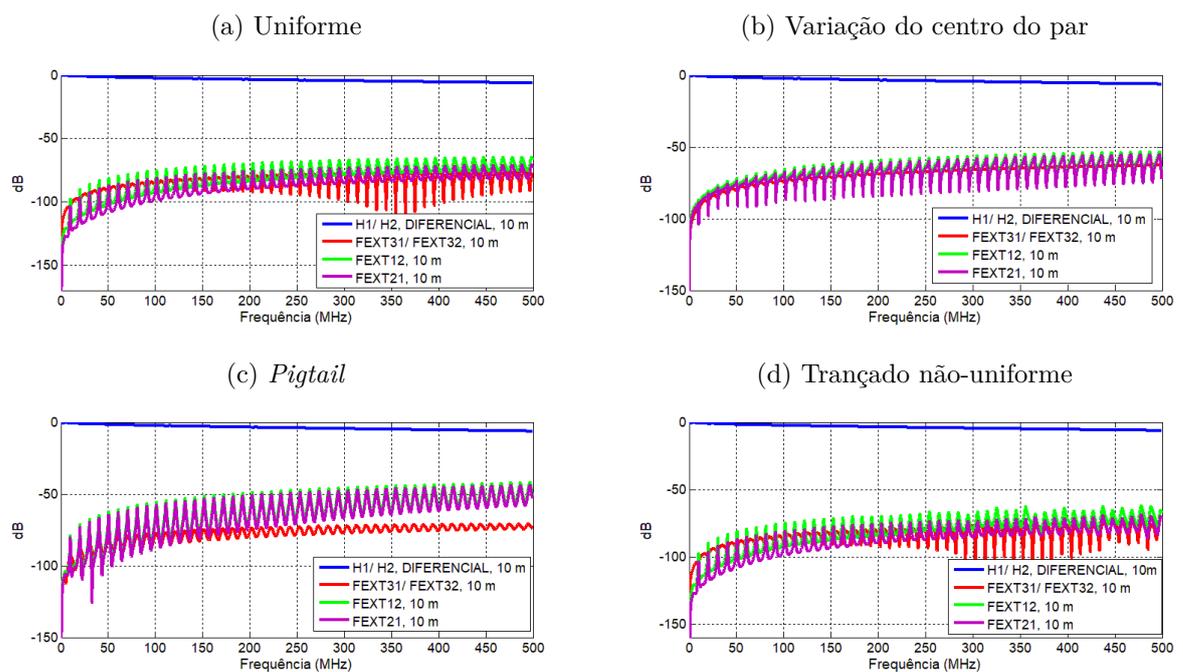
Observa-se que a presença de trançado não-uniforme tem pouco impacto na taxa de transmissão do canal fantasma. Enquanto o *pigtail* tem impacto considerável na taxa principalmente em comprimentos pequenos, até em torno de 40 m, depois sua taxa tende a crescer até determinado comprimento de cabo. Em relação a variação na distância entre o centro dos pares, observa-se que esta não-uniformidade tem grandes impacto na taxa em todos os comprimentos de cabo consideradas, reduzindo a taxa do fantasma abaixo de 500 Mbps. Quando se considera a presença de todas as não-uniformidades nota-se que a taxa é afetada principalmente pelo efeito da variação da distância entre o centro dos pares.

### 4.3 Análises em função dos níveis de FEXT e função de transferência

Outra fome de analisar os resultados obtidos é através das relações entre os níveis de FEXT e da função de transferência, uma vez que a taxa de transmissão é diretamente proporcional a função de transferência e inversamente proporcional aos FEXTs. Será usada o termo “gap” a relação entre os níveis de FEXT e função de transferência.

A Figura 27 apresenta os “gaps” para o canal diferencial, ou seja, as funções de transferência do canal e os FEXTs que impactam o mesmo, em cabos com comprimento de 10 m (comprimento de cabo de referência). H1 e H2 são, respectivamente, as funções de transferência do canal diferencial 1 e 2. FEXT21 e FEXT12 são os FEXTs de um canal diferencial para o outro canal diferencial. Enquanto FEXT31 e FEXT32 são os FEXTs que impactam os canais diferenciais 1 e 2 devido o canal fantasma. Observa-se que em relação ao canal diferencial, o FEXT do par 1 para o par 2 é maior que o FEXT do par 2 para o par1, o que explica porque a taxa no par 1 é maior que no par 2, e esta relacionada a leve diferença na taxa de trançado dos pares considerados. Além disso, nota-se com a presença de não-uniformidades tal diferença diminui principalmente para o pigtail e para variação no centro do par. Ademais, a presença de pigtail e variação no centro do par, aumenta os níveis de FEXTs. Em média, os níveis das curvas de FEXT para o cenário uniforme e com trançado não-uniforme são próximos, o que explica porque as taxas nos canais diferenciais desses cenários são semelhantes.

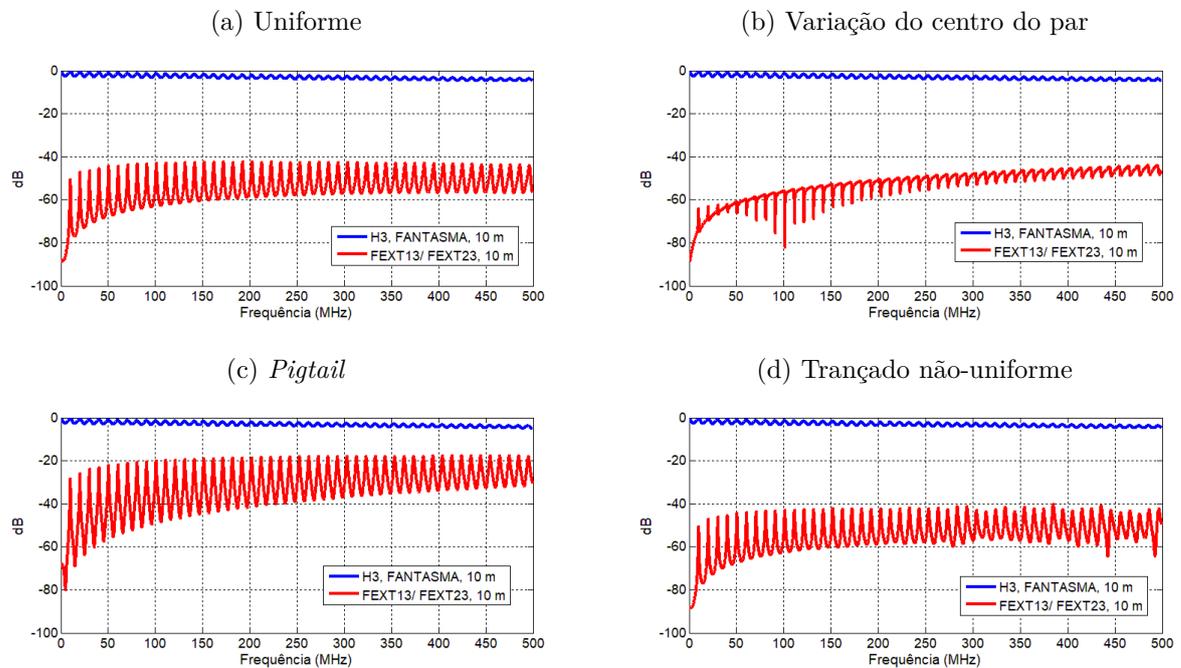
Figura 27 – Relação entre função de transferência e FEXTs em 10 m – canais diferenciais.



Fonte: Elaborado pela Autora

Enquanto a Figura 28 apresenta os “gaps” para o canal fantasma, ou seja, as funções de transferência do canal e os FEXTs que impactam o mesmo, para 10 m. H3 é a função de transferência do canal fantasma, e FEXT13 e FEXT23, são os FEXTs inseridos pelos canais diferenciais no canal fantasma. Analisando as curvas de FEXT e função de transferência para o canal fantasma, observa-se que a presença de *pigtail* aumenta o nível de FEXT, indicando uma taxa menor. E que a presença da variação no centro do par aumenta levemente o nível da curva de FEXT, resultando na taxa um pouco menor que o cenário uniforme. As curvas de FEXTs e trançado não-uniforme são praticamente iguais, indicando taxas de dados semelhantes para o canal fantasma. Assim, o *pigtail* tem maior impacto em comprimentos menores.

Figura 28 – Relação entre função de transferência e FEXTs em 10 m – canal fantasma.



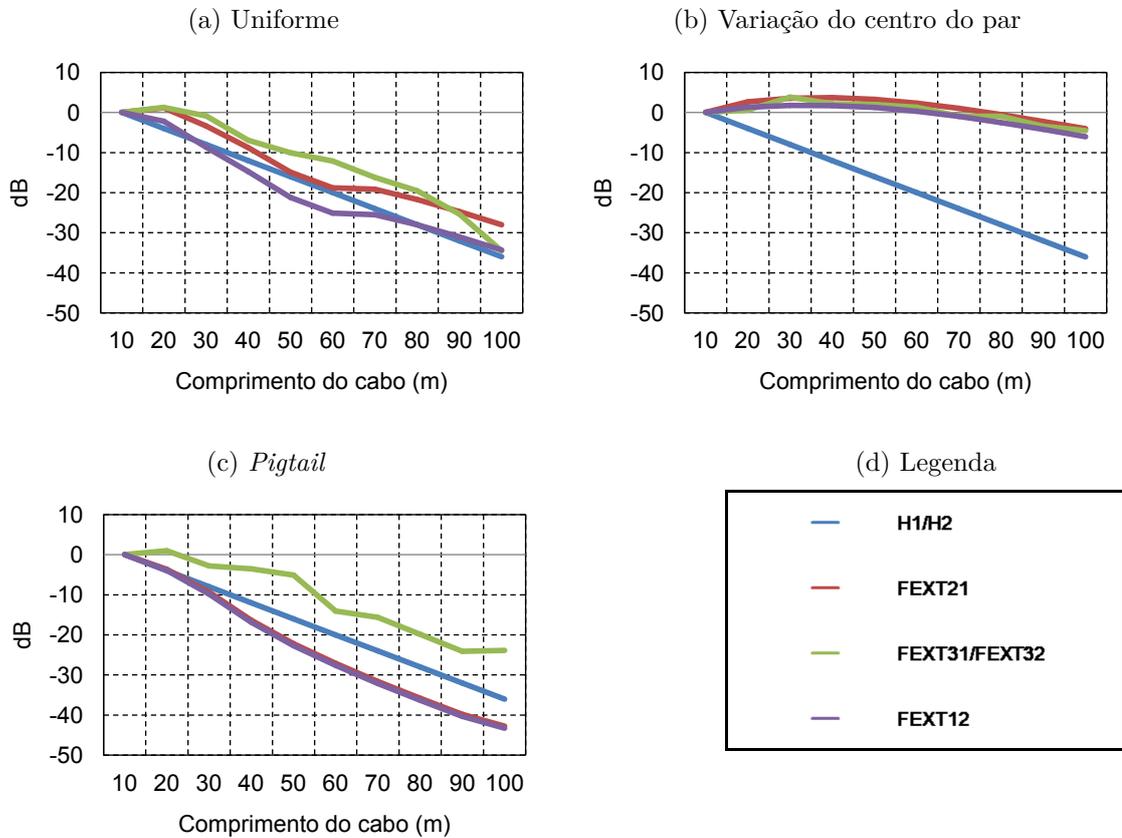
Fonte: Elaborado pela Autora

Para analisar os níveis de FEXTs e H para outros comprimentos de cabo, desde que os resultados são numerosos, optou-se por analisar os valores médios das curvas de FEXT e H para cada comprimento, em relação aos valores médios das curvas em 10 m (valores de referência).

A Figura 29 apresenta as curvas de decaimento nos canais diferenciais para os cenários 29a – uniforme, 29b – variação na distância entre o centro dos pares, 29c – *pigtail*.

Observa-se que para o canal diferencial, os decaimentos dos FEXTs no cenário com variação no centro do par, ilustrado na Figura 29b têm decaimento menor do que o decaimento da função de transferência, assim nota-se que essa não-uniformidade dificulta

Figura 29 – Curvas de decaimento dos valores médios das funções de transferência e FEXTs em relação aos valores médios (referência) em comprimentos de 10 m – canais diferenciais.



Fonte: Elaborado pela Autora

o decaimento dos FEXTs que deveriam cair mais rápido com o aumento do comprimento do cabo, porque esta não-uniformidade impacta em todo comprimento do cabo. Indicando dessa forma que o “gap”, ou seja, diferença da função de transferência e FEXT, diminui com o aumento comprimento, sendo impactada principalmente pelo decaimento da função de transferência.

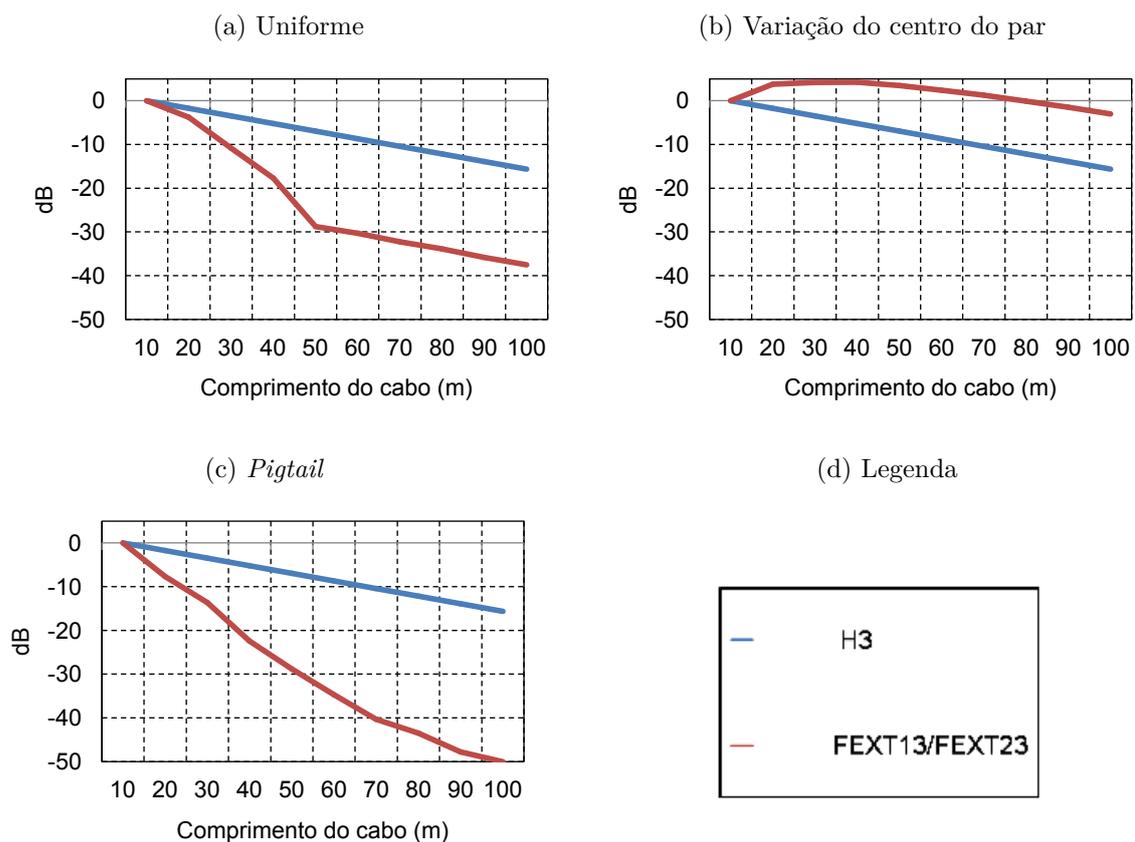
Já para o *pigtail*, ilustrado na Figura 29c, observa-se que para comprimentos menores que 30 m, FEXT entre os diferenciais e H, decaem na mesma proporção resultando em “gap” constante, porém como nível de FEXT com *pigtail* é maior que para o cenário uniforme, o “gap” torna-se menor que o gap no cenário uniforme. Com o aumento do comprimento do cabo, o FEXT entre os diferenciais decai mais rápido, tanto é que em cenários uniformes o nível está em entre 25 e 30 dB, mas com *pigtail* o nível cai para em torno de 45 dB. Nota-se então que o *pigtail*, a partir de certo comprimento passa a ser dominado pelo decaimento da função de transferência, já que o FEXT passa a decair mais rápido. Observa-se que o decaimento FEXT do fantasma no diferencial com *pigtail* é menos acentuado que uniforme para longos comprimentos.

Uma vez que as taxas observadas para os cenários uniformes e trançado não-uniforme são muito semelhantes, optou-se por analisar somente os outros cenários em função dos níveis de FEXT e função de transferência.

Em relação ao canal fantasma, observam-se comportamentos semelhantes. A Figura 30 apresenta as curvas de decaimento no canal fantasma para os cenários 30a – uniforme, 30b – variação na distância entre o centro dos pares, 30c – *pigtail*.

Observa-se que no cenário uniforme a partir de 50 m os decaimentos da função de transferência e FEXT passam a ser constante, o que indica que o “gap” entre os mesmos é máximo em 50 m, depois deste comprimento a taxa passa a ser limitada principalmente pelo decaimento da função de transferência. Para os cenários com variação no centro do par e *pigtail*, respectivamente, os decaimentos da função de transferência e FEXT tendem a se igualar a partir de 90 a 100 m.

Figura 30 – Curvas de decaimento dos valores médios das funções de transferência e FEXTs em relação aos valores médios (referência) em comprimentos de 10 m – canal fantasma.

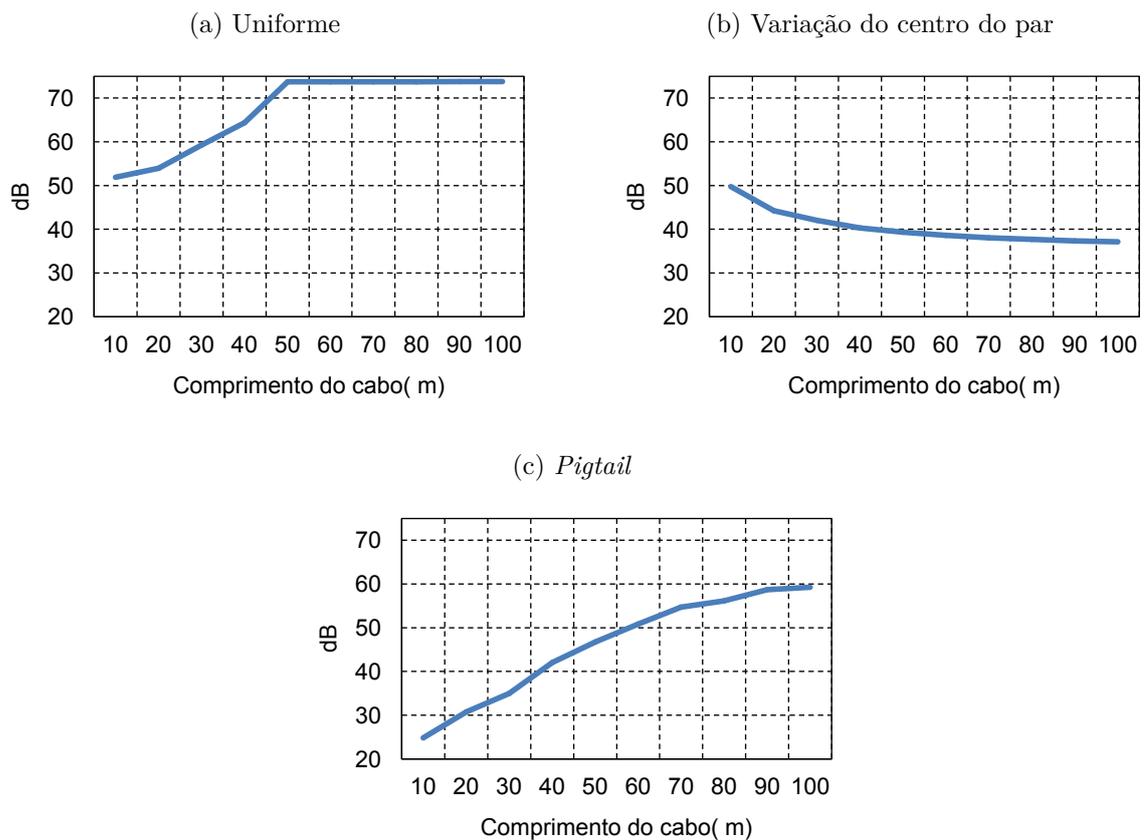


Fonte: Elaborado pela Autora

A Figura 31 apresenta as diferenças entre o valor médio das funções de transferência e FEXT para cada comprimento de cabo. Analisando os “gaps”, observa-se que no cenário

uniforme o “gap” aumenta até 50m e depois mantém constante. Já para variação no centro do par, o “gap” diminui comprovando que a diminuição na taxa de dados, enquanto para o *pigtail* o “gap” aumenta até o comprimento analisado indicando que a taxa aumenta, de maneira que o aumento no comprimento do cabo diminui o efeito de *pigtail*. É importante notar que em 50m no cenário perfeito se obtêm a maior taxa porque o “gap” já é constante, e a função de transferência tem nível maior que em outras metragens com “gap” constante.

Figura 31 – Diferença entre o valor médio das funções de transferência e FEXT para cada comprimento de cabo.

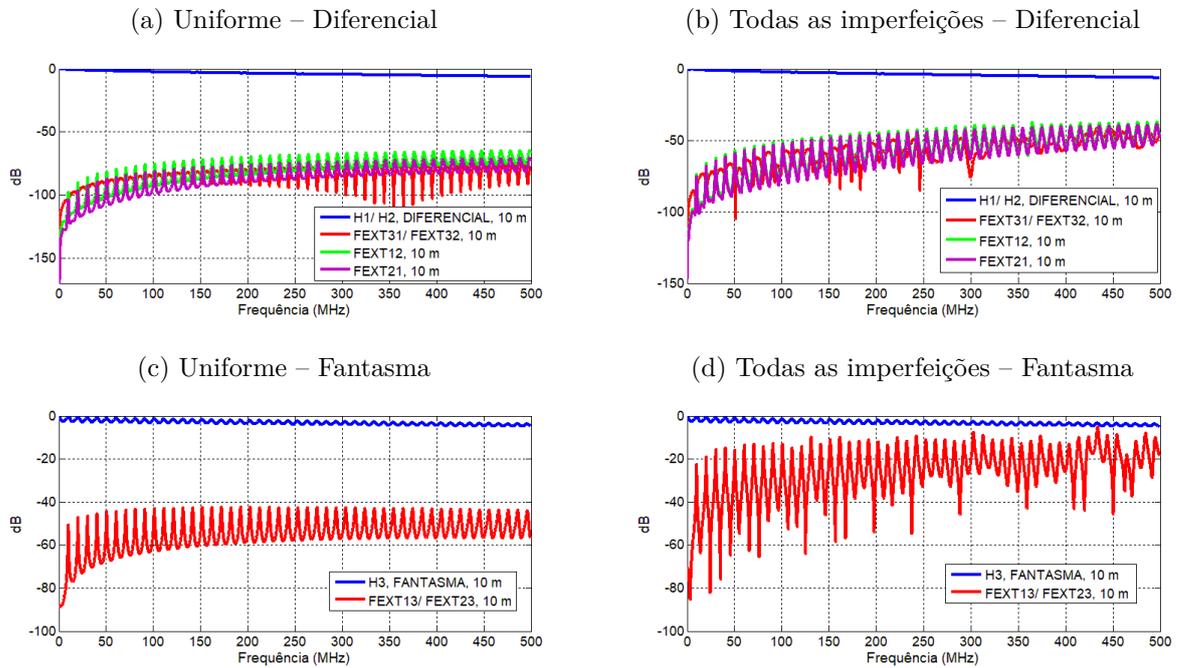


Fonte: Elaborado pela Autora

Para tornar as análises mais realísticas foi realizada simulações com todas as não-uniformidades acima – variação na distância entre o centro dos pares, *pigtail* e trançado não-uniforme. Na Figura 32 são apresentadas os níveis de FEXTs e função de transferência em cenários uniformes: diferencial (Figura 32a) e fantasma (Figura 32c) e com todas as não-uniformidades: diferencial (Figura 32b) e fantasma (Figura 32d), para comprimento de cabo de 10 m.

Quando todas as não-uniformidades são simuladas conjuntamente, observa-se que a diferença entre os FEXTs dos canais diferenciais (FEXT12 e FEXT21) praticamente inexistente tanto para os canais diferenciais quanto para o canal fantasma, pois neste cenário a diferença de trançado dos pares tem pouca influência nos níveis de FEXT. Comparando

Figura 32 – Relação entre função de transferência e FEXTs em 10 m – canais diferenciais (uniforme e todas as imperfeições) e canal fantasma (uniforme e todas as imperfeições).



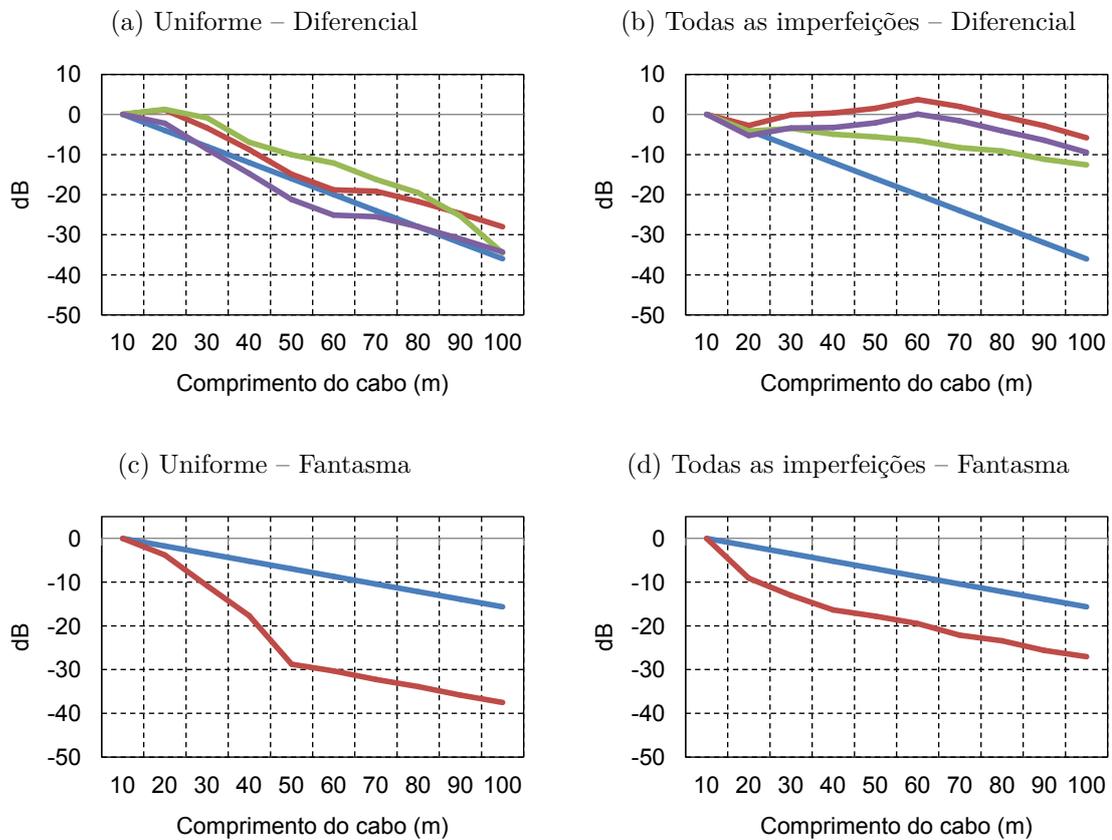
Fonte: Elaborado pela Autora

as curvas de FEXT e função de transferência para os cenários uniformes e todas as não-uniformidades, para 10 m, observa-se que tanto em relação aos canais diferenciais como para o fantasma, os FEXTs aumentam os níveis na presença de todas as não-uniformidades comprovando porque a taxa diminui nesse cenário. Uma vez que em pequenos comprimentos o efeito do *pigtail* é maior.

A Figura 33 apresenta as curvas de decaimento nos canais diferenciais para os cenários 33a – uniforme e 33b – com todas as não-uniformidades, e no canal fantasma para cenários 33c – uniforme e 33d – com todas as não-uniformidades. Analisando os decaimentos nos canais diferenciais, observa-se que os FEXTs em comprimentos pequenos tendem a decair na mesma proporção que a função de transferência e que em comprimentos maiores, acima de 60 m os decaimentos diminuem, ou seja, decaem em uma proporção menor que a função de transferência. Esse comportamento de decaimento em curtos comprimentos é semelhante ao comportamento dos decaimentos no cenário com *pigtail*, indicando que o *pigtail* tem efeito maior em comprimentos menores. Enquanto que o comportamento para comprimentos maiores segue o comportamento do decaimento em cenários com variação na distância entre o centro dos pares.

Analisando o canal fantasma, Figuras 33c e 33d, observa-se que a presença de a presença de todas as não-uniformidades é o conjunto dos impactos isolados de cada não-uniformidade. A presença de variação na distância entre o centro dos pares faz com

Figura 33 – Curvas de decaimento dos valores médios das funções de transferência e FEXTs em relação aos valores médios (referência) em comprimentos de 10 m – canais diferenciais e fantasma em cenários uniformes e com todas as não-uniformidades.

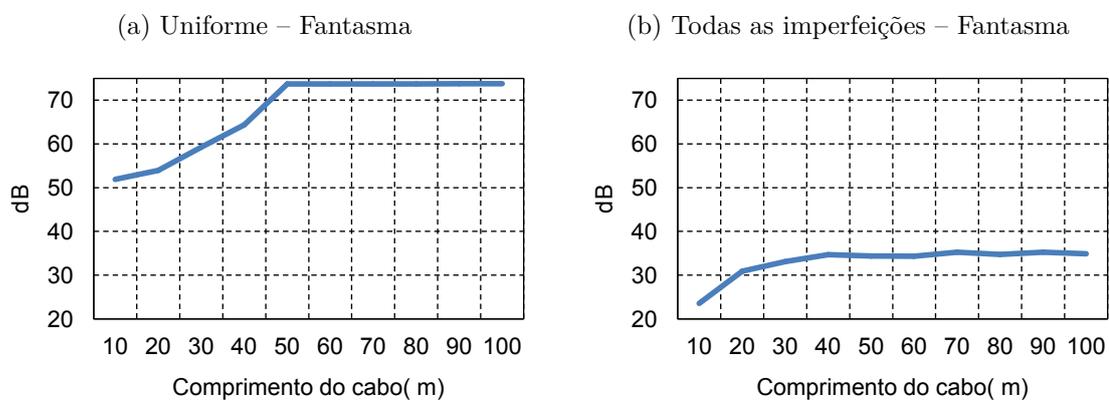


Fonte: Elaborado pela Autora

que o decaimento dos FEXTs decaia em menor proporção quando comparada ao cenário uniforme que alcança em torno de  $-40$  dB em 100 m contra em torno de 30 dB para cenário com todas as não-uniformidades, esta diferença em dBs ocorre devido esta não-uniformidade ser distribuída ao longo de todo comprimento do cabo.

A Figura 34 apresenta as diferenças entre o valor médio das funções de transferência e o FEXT, ou seja, o “gap”. Observa-se que a associação de todas as não-uniformidades torna o “gap” constante a partir de 40 m, enquanto em cenários uniformes o “gap” estabiliza a partir de 50 m. Além disso, no cenário com todas as não-uniformidades diminui o “gap” consideravelmente, em torno de 30 dB, comparando os níveis constantes em cada cenário, resultando em taxas bem menores que as alcançáveis em cenários uniformes. Nota-se que com o aumento do comprimento do cabo, a diferença aumenta até 40 m e depois se torna estável indicando que o canal fantasma passa a ser menos impactada pelas não-uniformidades. Porém, desde que o nível em dB ainda é considerável, uma parcela do impacto das não-uniformidades ainda atinge a taxa de transmissão nesse canal.

Figura 34 – Diferença entre o valor médio das funções de transferência e FEXT para cada comprimento de cabo para cenários uniformes e com todas as não-uniformidades, no canal fantasma.



Fonte: Elaborado pela Autora.

## 5 Considerações finais e trabalhos futuros

O presente trabalho buscou analisar os impactos das não-uniformidades na transmissão de dados, principalmente em canais fantasmas. O conjunto das não-uniformidades analisadas foram: a variação no centro do par, *pigtail* e trançado não-uniforme.

Analisando os resultados obtidos nota-se o seguinte comportamento na taxa de transmissão do canal fantasma: o mesmo cresce até o comprimento de cabo de 50 m e depois tende a diminuir com o aumento do mesmo. Este comportamento está relacionado às relações entre FEXT e a função de transferência, ou seja, o “gap”. Em 50 m, o “gap” é máximo, fato que explica a máxima taxa de transmissão obtida para o canal fantasma nesse cenário. A partir deste comprimento o decaimento da função de transferência passa a ser o fator limitante na taxa de transmissão.

Em cenários de não-uniformidades devido à variação na distância entre o centro dos pares, a taxa de transmissão no canal fantasma tende a diminuir com o aumento no comprimento do cabo, apresentando comportamento exponencial decrescente. Devido tal não-uniformidade se propagar ao longo de todo o comprimento do cabo, seu efeito é cumulativo e afeta principalmente comprimentos mais longos. Observa-se ainda que a presença desta não-uniformidade faz com que o canal fantasma praticamente não agregue taxa ao sistema.

Em cenários não-uniformes devido ao *pigtail* observa-se que a taxa de transmissão é afetada de maneira contrária ao comportamento observado em cenários com variação na distância entre o centro dos pares. A taxa de transmissão passa a ser menos impactada ao *pigtail* com o aumento no comprimento do cabo, em consequência do fato das dimensões do *pigtail* serem desprezíveis em relação ao comprimento total do cabo. Além disso, observa-se que em 100 m este impacto praticamente desaparece.

Já em cenários de não-uniformidade devido ao trançado não-uniforme verifica-se que o mesmo tem pouco efeito nas taxas de transmissão. Este resultado é devido ao comportamento dos níveis de função de transferência e FEXTs serem muito próximas dos valores em cenários uniformes. Esta imperfeição torna as curvas mais realísticas aproximando-as dos comportamentos de curvas reais.

Em cenários não-uniformes devido a todas as não-uniformidades consideradas: variação na distância entre o centro dos pares, *pigtail* e trançado não-uniforme, observa-se que a taxa de transmissão é a combinação de todos os impactos das não-uniformidades. Observa-se em curtos comprimentos até em torno de 40 m o principal limitação da taxa

é devido ao *pigtail*, e a medida que o comprimento do cabo aumenta, a taxa de dados passa a sofrer efeito maior devido a variação no centro do par, que limita a taxa em longos comprimentos, embora o mesmo impacte também em curtos comprimentos.

Desta forma, considerar os efeitos decorrentes das não-uniformidades é importante, posto que as mesmas podem mitigar o potencial de aumento de taxa fornecida pela utilização de canais fantasmas. Conclui-se que trabalhos anteriores que desconsideram a presença de não-uniformidades tendem a sobre-estimar a máxima taxa de transmissão do canal fantasma, uma vez que cabos reais não são livres de imperfeições.

As contribuições do presente trabalho foram:

1. Adequação do simulador desenvolvido por Bin Lee (LEE et al., 2007), que realiza análises da taxa de dados na presença de não-uniformidades, porém o simulador restringia-se somente à transmissão em modo diferencial. Então, uma das contribuições foi implementar a transmissão em modo fantasma para o simulador que já realiza simulações de não-uniformidades. As adequações consistem de modificações nas matrizes de impedância de carga e fonte, configurações de corrente e vetores de entrada;
2. Análise de não-uniformidades dos tipos: variação na distância entre o centro dos pares, *pigtail* e trançado não-uniforme nas transmissões em modo fantasma para quantificar o impacto de não-uniformidades;

Como trabalhos futuros listam-se os seguintes tópicos de pesquisa:

- Uma vez que foi realizada estudos dos impactos de não-uniformidades em função do comprimento de cabo utilizado, propõe-se como trabalho futuro investigar tais impactos em função da faixa de frequência utilizada;
- Investigar o efeito do *pigtail* uma vez que pode-se controlar tal não-uniformidade;
- Investigar os efeitos de não-uniformidades em frequências maiores requeridas para a geração 5G, porém uma vez que em frequência mais altas, as distorções no sinal são maiores, talvez seja necessária o uso conjunto de outras técnicas para reduzir tais distorções no sinal;
- A investigação de não-uniformidades nos parâmetros físicos do cabo (condutor e isolante), e análise de seus efeitos nas taxas de dados;
- Realizar investigação de outras não-uniformidades geométricas por meio de medidas experimentais em cenários reais;

- Adaptar o modelo para transmissão usando outras camadas do canal fantasma para análise de não-uniformidades no mesmo.

Nesse mesma linha de pesquisa foi publicado um artigo:

- OHASHI, A. A.; BORGES, G. S.; RODRIGUES, R. M., FERNANDES, A. L. P.; COSTA J. C. W. A. Impact of cable non-uniformities on the performance of copper fronthaul exploiting the phantom mode transmission. In: XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT. São Pedro: [s.n.], 2017. pp. 783-787.

## Referências

- BORGES, G. et al. Effect of periodic cable nonuniformities on transmission measurements. In: *2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 315–319. ISSN 1091-5281. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 7.
- BORGES, G. et al. Simulator of nonuniformities in twisted-pair cables. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 13, p. 29–38, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 7.
- BORGES, G. S. *MODELAGEM DE PAR-TRANÇADO PARA COMUNICAÇÕES EM BANDA LARGA*. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, Março 2016. Disponível em: <[http://www.ppgee.ufpa.br/ARQUIVOS/teses/Gilvan\\_Borges.pdf](http://www.ppgee.ufpa.br/ARQUIVOS/teses/Gilvan_Borges.pdf)>. Citado na página 11.
- CHASE, J. *The Evolution of the Internet of Things*. Texas Instruments. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ml/swrb028/swrb028.pdf>>. Acesso em: 21.06.2017. Citado na página 1.
- CIOFFI, J. *High speed multiple loop DSL system*. Google Patents, 2009. US Patent 7,639,596. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US7639596>>. Citado na página 5.
- CISCO. *The Zettabyte Era: Trends and Analysis*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>>. Acesso em: 20.06.2017. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 4.
- ERICSSON. *5G Radio Access*. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://www.ericsson.com/assets/local/publications/white-papers/wp-5g.pdf>>. Acesso em: 15.12.2016. Citado na página 2.
- FAGBOHUN, O. O. Comparative studies on 3G, 4G and 5G wireless technology. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, v. 9, p. 88–94, May-Jun 2014. ISSN 2278-2834. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/92cf/1e3eb16a2f18db2766897164e084c995e36e.pdf>>. Citado na página 1.
- FOUBERT, W. et al. Exploiting the phantom-mode signal in DSL applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 61, n. 4, p. 896–902, April 2012. ISSN 0018-9456. Citado na página 5.
- FREITAS, M. M. M. et al. Performance analysis for transmission in phantom systems in corporate environments. In: *XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT*. Santarém, Pará: [s.n.], 2016. p. 747–748. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.

- 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 2 vezes nas páginas 5 e 18.
- GAWAS, A. U. An overview on evolution of mobile wireless communication networks: 1G-6G. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, v. 3, p. 3130–3133, May 2015. ISSN 2321-8169. Disponível em: <<http://www.ijritcc.org/download/1433144145.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- GOMES, D. et al. DSL phantom mode transmission: Cable measurements and performance evaluation. In: *4th IEEE Latin-American Conference on Communications*. Cuenca, Equador: [s.n.], 2012. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 21.
- GOMES, D. de A. *Transmissão DSL em Modo Fantasma: Medições e Avaliação de Desempenho*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, ITEC, PPGE, Belém, Dezembro 2012. Disponível em: <<http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011-3315>>. Citado na página 19.
- HUAWEI. *5G: A Technology Vision*. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://www.huawei.com/5gwhitepaper/>>. Acesso em: 22.06.2017. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 3.
- INFINERA. *ENABLING CLOUD-RAN WITH MOBILE FRONTHAUL - Application Note*. [S.l.], 2013. Disponível em: <[https://www.infinera.com/wp-content/uploads/2017/02/infinera-an-enabling-cloud-ran\\_mobile\\_fronthaul.pdf](https://www.infinera.com/wp-content/uploads/2017/02/infinera-an-enabling-cloud-ran_mobile_fronthaul.pdf)>. Acesso em: 27.09.2017. Citado na página 3.
- LAFATA, P. Investigation of phantom circuit benefits for next generation xDSL systems. *International Journal of Communication Systems*, v. 29, n. 1, p. 5–15, 2014. ISSN 1099-1131. IJCS-13-0738.R1. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/dac.2786>>. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.
- LAFATA, P. Estimations of G.fast transmission performance over phantom modes. In: *2015 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. Praga, República Tcheca: [s.n.], 2015. p. 1–5. Citado 3 vezes nas páginas 3, 5 e 6.
- LAGO, A. et al. Geometric analysis and manufacturing considerations for optimizing the characteristics of a twisted pair. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, v. 32, n. 1, p. 22–31, Jan 2009. ISSN 1521-334X. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 7.
- LAGO, A. et al. Electrical design automation of a twisted pair to optimize the manufacturing process. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, v. 1, n. 8, p. 1269–1281, Aug 2011. ISSN 2156-3950. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 7.
- LEE, B. *BINDER MIMO CHANNEL SOFTWARE SUITE USER GUIDE*. [S.l.], 2004. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 26.
- LEE, B. *BINDER MIMO CHANNELS*. Dissertação (Mestrado) — DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING, Stanford University, California, October 2004. Citado 3 vezes nas páginas 9, 23 e 26.

- LEE, B. et al. Binder MIMO channels. *IEEE Transactions on Communications*, v. 55, n. 8, p. 1617–1628, Aug 2007. ISSN 0090-6778. Citado 5 vezes nas páginas 5, 6, 9, 26 e 48.
- MACKNOFSKY, G. *Understanding the Basics of CPRI Fronthaul Technology*. Canadá, 2015. Citado na página 4.
- NEUS, C. et al. Binder identification by means of phantom measurements. v. 60, p. 1967 – 1975, 07 2011. Citado na página 21.
- NIR, V. L.; MOONEN, M. Measurement setup for differential-mode and common-mode channels. *Internal report 07-162, ESAT-SISTA, Katholieke Universiteit Leuven (KUL)*, p. 1–5, June 2007. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/235434954\\_Measurement\\_setup\\_for\\_differential-mode\\_and\\_common-mode\\_channels](https://www.researchgate.net/publication/235434954_Measurement_setup_for_differential-mode_and_common-mode_channels)>. Citado na página 21.
- OHASHI, A. A. et al. Impact of cable non-uniformities on the performance of copper fronthaul exploiting the phantom mode transmission. In: *XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT*. São Pedro: [s.n.], 2017. p. “to apper”. Citado na página 21.
- PAUL, C. R. *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. 1st. ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1994. ISBN 047102080X. Citado 7 vezes nas páginas 10, 11, 12, 13, 15, 17 e 18.
- SHANNON, C. A mathematical theory of communication. *Bell system technical journal*, v. 27, 1948. Citado na página 20.
- UFPA, E. *5th Quarterly Technical Report - Internal Report*. [S.l.], 2016. Citado na página 30.