UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

LUIZ RAIMUNDO RAMOS LEÃO JUNIOR

CARACTERIZAÇÃO DE CANAL RÁDIO MÓVEL NAS FAIXAS DE OPERAÇÃO SUB-6 GHZ PARA 5G NO BRASIL

SÃO LUÍS - MA
2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

LUIZ RAIMUNDO RAMOS LEÃO JUNIOR

CARACTERIZAÇÃO DE CANAL RÁDIO MÓVEL NAS FAIXAS DE OPERAÇÃO SUB-6 GHZ PARA 5G NO BRASIL

Projeto de pesquisa apresentado ao programa do Mestrado Profissional de Engenharia da Computação e Sistemas da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Mariano Costa do Amaral

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Henrique Gonsioroski Furtado da Silva

SÃO LUÍS - MA

2023

-

Leão Junior, Luiz Raimundo Ramos.

Caracterização de canal rádio móvel nas faixas de operação SUB-6 GHZ para 5G no Brasil./ Luiz Raimundo Ramos Leão Junior. – São Luís, 2023.

59 f

Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação e Sistemas).- Universidade Estadual do Maranhão, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Mariano Costa do Amaral.

Elaborado por Luciana de Araújo - CRB 13/445

LUIZ RAIMUNDO RAMOS LEÃO JUNIOR

DISSERTAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO DE CANAL RÁDIO MÓVEL NAS FAIXAS DE OPERAÇÃO SUB-6 GHZ PARA 5G NO BRASIL

Dissertação apresentada ao programa do Mestrado Profissional de Engenharia da Computação e Sistemas da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Computação e Sistemas.

Aprovado em: ____ de março de 2023.

Prof. Me. Henrique Mariano Costa do Amaral
(Orientador - UEMA)

Prof. Dr. Leonardo Henrique Gonsioroski Furtado da Silva
(UEMA)

Prof. Dr. Rogério Moreira Lima Silva
(UEMA)

Amanda Beatriz C. dos Santos

Prof. Me Amanda Beatriz Cunha dos Santos
(PUC-Rio)

Prof. Me. André Santos da Silva Neto
(IFMA)

AGRADECIMENTOS

Nesta minha passagem pelo Programa de Pôs Graduação em Engenharia e Sistemas da UEMA (PECS) tenho muitos agradecimentos a fazer pois sem essas pessoas não seria possível a conclusão desta caminhada.

Primeiramente a Deus pela minha existência e pelos percalços que consegui superar com a sua intervenção.

Aos meus pais pelo apoio emocional e pela presença constante, mesmo que virtualmente durante esses anos de estudo.

A minha esposa e minha filha pelo apoio e por suportar minha ausência de momentos que poderíamos estar juntos e precisamos abrir mão para que minha passagem pelo mestrado pudesse ser concluída.

Aos funcionários do departamento do PECS em especial a Secretária Karoline Meireles pelas dicas e ajudas administrativas.

Aos professores do PECS em especial ao professor Rogério Moreira de Lima e Silva pelos conselhos e longos papos sobre o desenvolvimento e aprimoramento da engenharia em especial a engenharia de Computação e de Telecomunicações

Faço aqui um agradecimento especial ao meu orientador Henrique Mariano Costa do Amaral e ao meu coorientador Leonardo Henrique Gonsioroski Furtado da Silva pela orientação certeira e pela paciência que tiveram comigo para que este trabalho de dissertação pudesse ser concluído

RESUMO

A propagação de sinal pelo ar se mostra um ambiente predominantemente probabilístico devido as características e fenômenos da propagação neste tipo de ambiente. A medida que a demanda por serviços móveis crescem, novas tecnologias para a transmissão de sinais são desenvolvidas, objetivando oferecer soluções e novos serviços que utilizam a interface aérea. A demanda por dispositivos móveis e consequentemente o tráfego de dados através de redes sem fio deve aumentar por conta desse desenvolvimento. Além disso não existem muitos resultados divulgados sobre as constantes de propagação, que permite calcular mais precisamente a contribuição de campo, que são muito importantes na predição de cobertura de sistemas microcelulares. Portanto, pesquisar o comportamento do sinal em diversos ambientes e submetendo o sinal aos mais variados efeitos da interface aérea ajuda a definir os caminhos que devem ser seguidos para as tecnologias em propagação rádio móvel. O presente trabalho tem como objetivo caracterizar a canalização rádio móvel nas frequências de frequências de 700 MHz, 2,3 e 3,5 GHz, que serão faixas de utilização da tecnologia 5G. no Brasil. A caracterização do canal em banda larga e em banda estreita é realizada a partir da campanha de medições realizadas na região suburbana do Rio de Janeiro (Bairro Higienópolis), Para a banda larga utiliza-se resultados como retardo médio e espalhamento de retardo, que descrevem a dispersão temporal do canal. Por outro lado, a análise estatística do desvanecimento em pequena e larga escala na região suburbana caracterizam o sinal em banda estreita. Caracterizar o canal utilizando dados experimentais auxilia sobremaneira tanto o desenvolvimento quanto a implementação de projetos de redes móveis.

Palavras-chave: Sondagem do canal; 5G; Redes móveis; Propagação em regiões suburbanas.

ABSTRACT

Signal propagation through the air is a predominantly probabilistic environment due to the propagation characteristics and phenomena in this type of environment. As the demand for mobile services grows, new technologies for signal transmission are developed, aiming to offer solutions and new services that use the air interface. The demand for mobile devices and consequently data traffic over wireless networks is expected to increase due to this development. Furthermore, there are not many published results about the propagation constants, which allow a more precise calculation of the field contribution, which are very important in predicting the coverage of microcellular systems. Therefore, researching the behavior of the signal in different environments and subjecting the signal to the most varied effects of the air interface helps to define the paths that must be followed for technologies in mobile radio propagation. The present work aims to characterize the mobile radio channeling in the frequencies of 700 MHz, 2.3 and 3.5 GHz, which will be bands of use of the 5G technology. in Brazil. The characterization of the broadband and narrowband channel is carried out from the measurement campaign carried out in the suburban region of Rio de Janeiro (Bairro Higienópolis). For broadband, results such as average delay and delay spread are used, which describe the time dispersion of the channel. On the other hand, the statistical analysis of small and large scale fading in the suburban region characterizes the narrowband signal. Characterizing the channel using experimental data greatly assists both the development and implementation of mobile network projects.

Keywords: Channel survey; 5G; Mobile networks; Suburban Propagation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolução dos padrões de rede sem fio 9

Figura 2 Evolução do Tráfego mensal de dados de 2017 à 2022 10

Figura 3. Mecanismos de propagação do Sinal no Canal Rádio Móvel 15

Figura 4 Resposta ao impulso do canal 18

Figura 5. Comportamento do Sinal em um canal Rádio Móvel Urbano 20

Figura 6. Comportamento do Canal Rádio Móvel 22

Figura 7. Perfil de retardo 23

Figura 8. Técnicas de Sondagem do Canal Banda Larga e Ultra-larga 27

Figura 9. Comparativo entre a técnicas FDM e OFDM 29

Figura 10. Processo de modulação OFDM 30

Figura 11. Diagrama em blocos do sistema de comunicação por Espalhamento Espectral 31

Figura 12. Registrador com m=5 32

Figura 13 Sequência de Etapas para Execução das Campanhas de medição 33

Figura 14. Setup de Transmissão 34

Figura 15. Setup de Recepção 35

Figura 16. Rota da campanha de medições 36

Figura 17. Sinal Recebido no domínio do tempo 37

Figura 18. Matriz de Multipercursos válidos 38

Figura 19. Rota de recepção do sinal (a), Perfil de retardo (b), Sinal recebido no domínio do tempo (c) e Sinal recebido no domínio da frequência (d) 39

Figura 20. Distribuição cumulativa dos números de componentes de multipercurso na região de Higienópolis 41

Figura 21. Distribuição cumulativa das amplitudes dos multipercursos na região de Higienópolis 42

Figura 22. *Distribuição* Cumulativa dos Retardos RMS na Região de Higienópolis 42

Figura 23. Trajeto das medições incluindo a proximidade entre o ponto de partida e o de transmissão 43

Figura 24. Ponto limite das interferências 44

Figura 25. Distribuição cumulativa dos números de componentes de multipercurso na região de Higienópolis após alteração 45

Figura 26. Distribuição Cumulativa dos Retardos RMS na Região de Higienópolis após alteração 46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo das Tecnologias 0G até 5G 12

Tabela 2 Valores típicos para expoente de perda de percurso 21

Tabela 3. Classificação de Códigos de Espalhamento Espetral 30

Tabela 4. Equipamentos Utilizados no setup de medidas 35

Tabela 5. Retardo médio e espalhamento de retardo RMS 40

Tabela 6. Outros parâmetros de dispersão 40

Tabela 7. Retardo médio e espalhamento de retardo RMS após alteração 44

Tabela 8. Outros parâmetros de dispersão após alteração 44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NMT	Nordic Mobile Telephone system
AMPS	Advanced Mobile Phone Service
TACS	Total Access Communication Systems
ETACS	Total Access Communication Systems
IS-54	Interim Standard 54
TDMA	Time Division Modulation Access
GSM	Global System Mobile
CDMA	Code Division Multi Access
IS-95	Interim Standard 95
3GPP2	3rd Generation Partnership Project 2
3GPP	3rd Generation Partnership Project
8-PSK	8 Phase Shift Keying
1xRTT	Single-Carrier Radio Transmission Technology
1x-EV-DO	Evolution Data Optimized
1x-EV-Dv	Evolution Data and Voice
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Service
HSPA	High Speed Packet Access
HSPUA	High Speed Uplink Packet Access
HSPDA	High Speed Downlink Packet Access
MIMO	Multiple Imput Multiple Output
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
WLANs	Wireless Local Area Network
WMANs	Wireless Metropolitan Area Network
1G	Tecnologia de telefonia móvel celular de 1ª Geração

2G	Tecnologia de telefonia móvel celular de 2ª Geração
3G	Tecnologia de telefonia móvel celular de 3ª Geração
4G	Tecnologia de telefonia móvel celular de 4ª Geração
5G	Tecnologia de telefonia móvel celular de 5ª Geração
OFDM	Ortogonal Frequency Division Modulation
OFDMA	Ortogonal Frequency Division Modulation Access
V2X	Aplicações Veículos a tudo
M2M	Aplicações Máquina a máquina
eMBB	Enhanced mobile broadband
CEO	Comitê de Uso do Espectro e de Órbita
IMT-2020	International Mobile Telecommunications-2020
URLLC	Ultra-reliable and low latency communications
mMTC	Massive machine type communications
TVRO	Television Receive-Only
V2V	Aplicações veículo a veículo
V2I	Aplicações veículo a Infraestrutura
ITS	transportes inteligentes
UHF	Ultra High Frequency
ISI	Interferência Intersimbólica
BER	Bit Error Rate
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
FDM	Frequency Division Modulation
FDP	Função densidade de probabilidade
CETUC	Centro de Telecomunicações da PUC-Rio
EiRP	Effective Radited Power
FSS	Fixed-Satellite Service
MathLab	MATrix LABoratory

CFAR	Constant False Alarm Rate

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 7
1.1. Evolução das Redes Móveis Objetivo Geral 7
1.2. Evolução dos usuários de Redes Móveis 9
1.3. A Tecnologia 5G 10
1.4. Propagação de sinais em ambientes abertos 11
2. Justificativa 13
3. Objetivos 13
3.1. Objetivo Geral 14
3.2. Objetivos Específicos 14
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 15
4.1. Caracterização do Canal Rádio Móvel 15
4.2. O comportamento do sinal no Canal Rádio-Móvel 19
4.3. Perfil de Potência de Retardo 22
4.4. Banda de Coerência 24
4.5. Modelagem estatística 25
4.6. A Sondagem do canal rádio móvel 26
4.7. Técnicas de Sondagem de canal 27
5. Infraestrutura e metodologia das medições 33
6. Trabalho Proposto 36
6.1. Metodologia 36
6.2. Análise dos Dados e Resultados 37
7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 47
REFERÊNCIAS 48

1. INTRODUÇÃO

O interesse na caracterização do canal rádio móvel se intensifica à medida que o ar se torna cada vez mais o canal de comunicação para diversos serviços, em espacial a evolução da telefonia móvel celular (*Transmissão de voz e dados*). As variáveis de interesse neste contexto são as interferências (sinais interferentes) e a atenuação do sinal.

1.1. Evolução das Redes Móveis Objetivo Geral

A evolução dos sistemas de telecomunicações está se tornando cada vez mais dinâmica, com o surgimento da demanda por dados para redes sem fio. As redes móveis vêm evoluindo desde a introdução do conceito de redes móveis celulares, onde se consegue fazer a distribuição das frequências do canal espacialmente.

As redes móveis anteriores ao conceito celular (Classificadas como redes 0G) tinham como objetivo alcançar uma grande área de cobertura através de um único transmissor de alta potência, e utilizavam como técnica de acesso o FDMA (Frequency Division Multiple Access), onde cada usuário era alocado em uma frequência distinta. Embora essa abordagem gerasse uma cobertura muito boa, o número de usuários era limitado. Podemos apontar como exemplo da baixa capacidade, o sistema móvel da Bell em Nova Iorque, em 1970: o sistema suportava um máximo de apenas doze chamadas simultâneas em uma área de mais de dois mil quinhentos e oitenta quilômetros quadrados.[6]. Ficou claro que esse sistema precisava ser melhorado já que as agências de regulamentação dos governos não conseguiriam alocar novos espectros de frequência na velocidade que aumentava a demanda por serviços móveis. Desta necessidade surgia o conceito de célula na telefonia móvel

Para que esse conceito pudesse ser implantado, precisou-se implementar ferramentas para suportar a nova condição da estação móvel, que deveria ser capaz de percorrer a rede sem que o serviço de voz/dados fosse interrompido.

As redes móveis celulares de 1ª Geração tinham apenas serviços de voz e não havia uma padronização, com isso as Estações móveis que estivessem em uma determinada rede, não poderiam ficar disponíveis em outra rede. Dentre os sistemas desenvolvidos merecem destaque o Nordic Mobile Telecomunications (NMT), Advanced Mobile Phone Service (AMPS), Total Access Comunications System (TACS), Extended Total Access Comunications System (ETACS), C450 e o Radicom 2000.

No início dos anos 90 as redes de 2ª geração começaram a surgir. Na Europa surgia o GSM (Global System Mobile) e nos Estados Unidos surgia o IS-54 (Interiun Standard – 54),

ambos baseados na técnica de acesso TDMA (Time Division Multiple Acess). As taxas de transmissão de dados eram modestas. No GSM, por exemplo, chegavam a 9,6 Kbps. Para ser ter uma comparação. A taxa de transmissão de conexões discadas (conexões dial up) era de 56 Kbps.

As redes GSM evoluíram para o GPRS (*Generalized Packet Radio Service*), que suportava uma taxa de pico de 171.2 Kbps. Em outro momento A tecnologia GPRS evoluiu para o Enhanced Data Rates for Global Evolution (EDGE), que introduziu um esquema de modulação à alta taxa (8-PSK), que elevaram ainda mais a taxa de dados (pico) para 384 Kbps

Na América do Norte, O IS-95 marcou o início de operação de uma rede de comunicações comercial desenvolvida para o Acesso múltiplo por divisão de código, ou o como é comumente conhecido o CDMA (*Code Division Multiple Acess*). Essa técnica se baseia no espectro espalhado direto, onde vários usuários dividiam toda a largura de banda usando códigos de espalhamento ortogonais. O IS-95 emprega uma largura de banda de 1.22,84 MHz que comportam até 64 canais de voz por célula, com um uma taxa de transmissão de dados máxima de 14.4 Kbps. A revisão IS-95-B foi desenvolvida para suportar a transmissão de dados em alta velocidade. A taca de transmissão de dados chegou a 115.2 kbps.

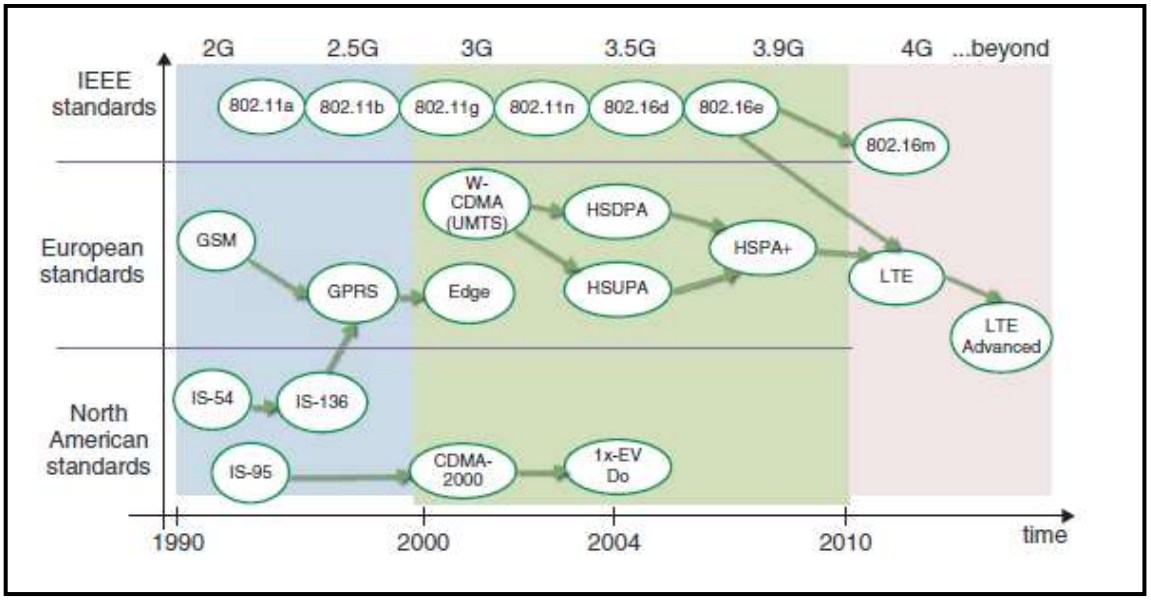
A 3GPP2 (Third Generation Project 2), normalizou as regras e especificações técnicas para Sistemas móveis 3G baseadas na evolução do CDMA. A 3GPP2 desenvolveu uma família de normas baseadas no IS-95, incluindo o 1xRTT, 1x-EV-DO e Ev-DV. O 1xRTT permitiu a adição de mais 64 canais de tráfego por célula que permitiu que se alcança-se uma taxa máxima de transmissão de dados de 307 Kbps. O 1x EV-DO e 1x EV-DV alcançaram uma taxa de transmissão de dados na faixa de 2,4 a 3,1 Mbps adicionando várias características, como por exemplo a modulação e codificação adaptativa, solicitação de repetição automática hibrida (HARQ), código turbo por exemplo.

As redes de 3ª Geração surgiram por volta do ano de 2001 com a padronização do UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*). Este novo padrão revolucionou a transmissão de dados, conseguindo taxas máximas de donwlink de 1,92 Mbps. Como uma evolução do UMTS, o HSPDA (*High-Speed Packet Access*) foi padronizado em 2002 como o Release 5 do 3GPP. O HSPUA (*High-Speed Uplink Packet Access*) foi padronizado em 2004 como o Release 6 da norma. Com uma taxa máxima de 5,76 Mbps. Estes dois padrões juntos são conhecidos como HSPA (*High-Speed Packet Access*) que foi atualizado para o release 7 da norma do 3GPP, conhecida como norma HSPA+ ou MIMO (*Multiple Input multiple Output*) HSDPA, que pode alcançar taxas acima 84 Mbps. Esta norma foi a primeira a introduzir a

técnica MIMO 2x2, que utiliza o esquema de modulação 16 QAM, mas pode ser usada para o esquema 64 QAM.

A evolução dos padrões Europeu e Americano estão demostradas no quadro abaixo

Figura 1. Evolução dos padrões de rede sem fio



Fonte: [2]

O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE – *Institute of Eletric and Eletronic Engineers*), desenvolveu normas internacionais para redes locais e redes metropolitanas sem fio (WLANs e WMANs respectivamente). Com o advento de Wi-Fi e do Wi-Max, O IEEE estabeleceu o OFDM (*Orthogonal Frequency Multiplexing*) como uma inovadora e promissora tecnologia de interface aérea. Por exemplo, o padrão 802.11 pode chegar a uma taxa de transmissão de 54 Mbps

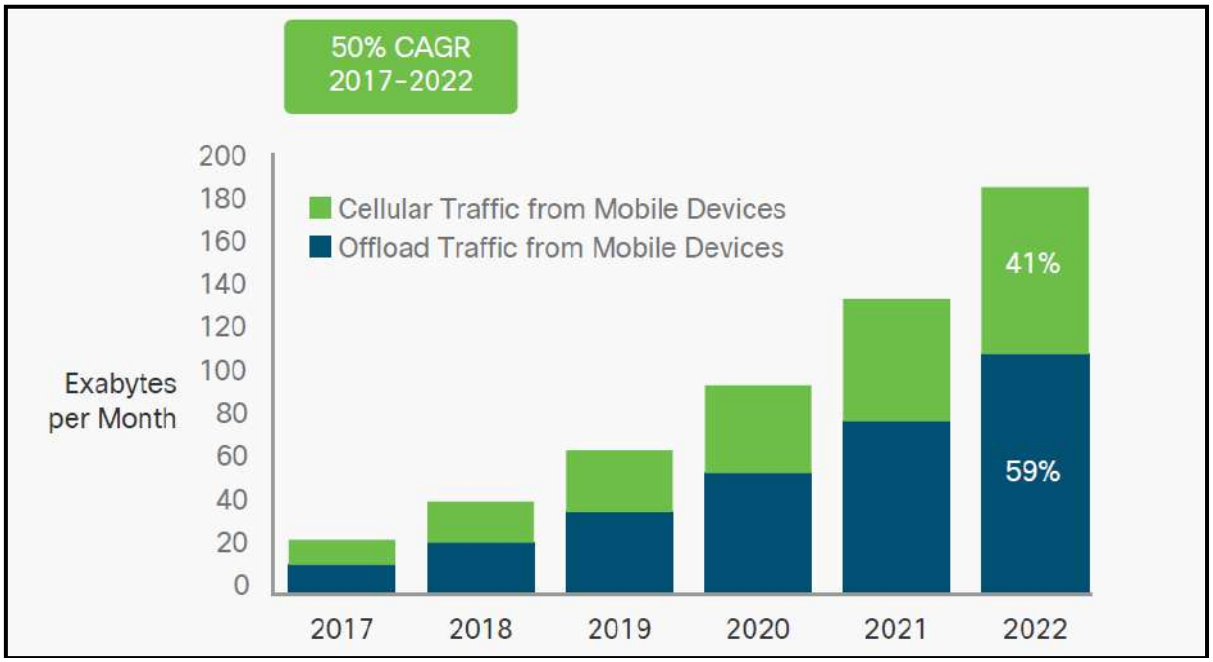
1.2. Evolução dos usuários de Redes Móveis

A evolução dos sistemas de telecomunicações está se tornando cada vez mais dinâmica, com o aumento da demanda por dados para redes sem fio. Redes que inicialmente foram concebidas para tráfego exclusivo de voz, foram evoluindo e suportando cada vez mais o trânsito de dados O interesse pelo tráfego de dados cresce à medida que as tecnologias de transmissão de dados móveis evoluem. A tecnologia 2G (TDMA e GSM) foram os precursores

da transmissão de dados em redes de telefonia móvel, mas somente com o advento do 3G o fluxo de dados começa a superar de voz. As redes 4G e 5G foram concebidas para incrementar e melhorar o tráfego de dados,

Segundo [2], a previsão de tráfego de dados mensal para 2021 será próximo de 140 ExaBytes (EB), que é uma unidade de medida de informação equivalente a 1.000.000.000.000.000.000 Bytes, ou seja, 1EB = $1x10^{18}$ Bytes. Na figura 2 Apresenta-se a evolução de tráfego anual entre 2016 e 2021.

Figura 2 Evolução do Tráfego mensal de dados de 2017 à 2022



Fonte: [2]

1.3. A Tecnologia 5G

A interface aérea do 5G é baseado em OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Acess) que é um redesenho do LTE [4], No entanto, os padrões de uso do 5G (IMT 2020) não se limitam apenas à banda larga móvel. De fato, o IMT 2020 está previsto para oferecer suporte a uma variedade diversificada de cenários / casos de uso em três grandes categorias:[4]

- Banda Larga Móvel Aprimorada (Enhanced mobile broadband – eMBB): É a experiência ótima do usuário em ambiente de banda larga

- Comunicação ultra confiável e de baixa latência (Ultra-reliable and low latency communications - URLLC): aqui temos requisitos rigorosos de confiabilidade, latência e disponibilidade. Isso abre espaço para atendimento de demandas como: sistemas inteligentes de transporte, veículo para tudo (V2X) cirurgia médica remota, etc.

- Comunicações massivas do tipo máquina *(Massive machine type communications - mMTC*): Basicamente é a comunicação máquina - máquina (M2M) não sensíveis a atraso. Requer dispositivos de baixo custo e com uma duração de bateria muito longa.

Comunicações massivas do tipo máquina (Massive machine type communications - mMTC): Basicamente é a comunicação máquina - máquina (M2M) não sensíveis a atraso. Requer dispositivos de baixo custo e com uma duração de bateria muito longa.

Em [5] estão os requisitos mínimos de performance previamente aprovados, como por exemplo a taxa de dados (pico) de 20 Gbps para Download e 10 Gb para Upload e latência mínima de 1ms

A faixa de espetro definida para o 5G, e acordo com [4] é distribuída da seguinte forma:

- Faixa abaixo dos 6 GHz, que é uma faixa muito congestionada com outros serviços de telecomunicações e que deve ser estudada quanto a interferência em outros serviços na mesma faixa.
- Faixa entre 24 e 100 Ghz, ou seja, ondas milimétricas.

Como premissa de cobertura as frequências baixas (abaixo de 6Ghz) devem ser usada, a princípio, para cobertura de áreas grandes, e por outro lado as altas frequências (24-100 GHz) devem ser usadas para incremento de tráfego

1.4. Propagação de sinais em ambientes abertos.

Dependendo do tipo de ambiente a propagação do sinal sofre alterações. Desde o espaço livre, ou seja, o sinal transmitido não encontra nenhum obstáculo, até o espaço urbano denso, isto é, densamente povoado, com muitas construções e obstáculos. Além disso um novo serviço pode sofrer interferência dos serviços já existentes em frequências muito próximas

O CEO (Comitê de Uso do Espectro e de Órbita), ligado à Anatel, divulgou dois estudos internos sobe os sistemas móveis 5G (IMT-2020), em 3,5 GHz, e o FSS – Serviço Fixo Satelital, na Banda C, assim como os equipamentos de recepção de televisão por parabólica (TVRO, Television Receive-Only).[1]

De acordo com [3] a decisão disse: O Comitê recomenda que se avalie a possibilidade de ser estabelecida, para a licitação do 5G, uma faixa de guarda entre os dois sistemas de radiocomunicação. A título de exemplo, os Estados Unidos da América adotaram uma faixa de guarda de 20 MHz. Uma faixa dinâmica de até 40 MHz também poderia ser utilizada, conforme a necessidade do caso concreto. A faixa de guarda facilita a coexistência dos sistemas e diminui consideravelmente a necessidade de soluções mais invasivas, como a separação geográfica de alguns quilômetros, diminuição de potências de operação e a substituição de equipamentos e dispositivos (sintonizadores, filtros de guia de onda etc.)

O estudo sugere também que a coexistência entre o novo serviço (5G) e os serviços FSS e TRV.

Percebemos que ao longo dos anos a tecnologia de rádio acesso tem evoluído iniciamos com serviços de voz sem reuso de frequência até transmissão de dados a 10 Gbps(teórico), o que fez a oferta de vários serviços em redes sem fio aumentar bastante. A medida que os serviços oferecidos nas redes sem fio se tornam cada vez mais diversos, com o aumento no trafego de dados e com taxas de transmissão cada vez maiores, torna-se cada vez mais importante o entendimento dos fenômenos da interface aérea nas diversas faixas de frequência. Na tabela 1 temos um resumo das tecnologias desde o marco 0(0G) até a tecnologia 5G

Tabela 1. Resumo das Tecnologias 0G até 5G

	0G	*1G*				*2G*			*3G*		*4G*	*5G*
Tecnologia e Norma	**FDMA**	**AMPS**	**NMT**	**TACS**	**C450**	**GSM**	**D-AMPS**	**IS-95 A**	**UMTS**	**CDMA2000**	**LTE**	**NR**
Analógico / Digital	**Analógico**	**Analógico**				**Digital**			**Digital**		**Digital**	**Digital**
Ano de Lançamento (Aproximadamente)	**~1973**	**~1980**				**~1990**			**~2000**		**~2010**	**~2020**
Melhorias	**-**	**-**				**GPRS**		**IS-95 B**	**HSPDA**	**EVDO Rev. 0**	**LTE-Advanced**	**-**
						EDGE			**HSPDA+**	**EVDO Rev. A**	**LTE-Pro**	

						EVDO Rev. B			
Serviços	Apenas voz	Apenas voz	Voz + SMS + Dados *(Internet Móvel)*						
Velocidade download (Pico)	-	-	D-AMPS	8 Kpbs	UMTS	2 Mbps	LTE	300 Mbps	10 Gbps
			PRS	171,2 Kbps	HSPA	14,4 Mbps			
			DGE	384 Kbps	HSPA+	42 Mbps	LTE-A	1Gbps	
			S-95 A	14,4 Kbps	CDMA2000	153 Kbps			
					EVDO 0	2,4 Mbps	LTE-Pro	3Gbps	
			S-95 B	115 Kbps	EVDO A	3,1 Mpbs			
					EVDO B	14,7 Mbps			

2. JUSTIFICATIVA

Um dos desafios desde as primeiras transmissões Ponto-Ponto e Ponto-Multiponto, em especial desde as tecnologias de telefonia móvel celular é a caraterização do canal rádio móvel. O especial interesse nesta caracterização é a evolução de tecnologias de comunicação sem fio que está em constante evolução e com isso novas faixas de frequência estão sendo alocadas para o tráfego de novos serviços, em especial a tecnologia 5G que estará disponível em breve (5G NSA) oferecendo uma nova gama de serviços em telecomunicações. Nesse contexto é natural que a sondagem e a caraterização do canal rádio móvel seja estudada para o tráfego de sinal tanto em banda larga quanto em banda estreita.

3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo a caracterização estatística do canal de propagação na faixa de 700 MHz 2.3 GHz e 3,5 GHz, através de campanhas de medições outdoor em condições que se aproximam daquelas em que os sistemas móveis celulares de terceira, quarta geração operam assim como devem operar os sistemas de 5ª Geração. Serão determinadas as estatísticas dos parâmetros do modelo do canal de banda estreita através dos desvanecimentos de pequena e larga escala obtidos durante as medições, além da perda média de propagação outdoor em regiões urbanas e suburbanas para um cenário macrocelular, assim como para os sinais que atravessam edificações em abordagem microceluar. Serão determinadas também os perfis de potência de retardo e as estatísticas serão avaliadas para a propagação em banda larga

Ao final desse trabalho, os dados coletados permitirão realizar a avaliação de métodos de predição da perda média de propagação em regiões urbanas densas incluindo as perdas de transmissão do sinal atrás das edificações, a determinação do retardo médio e da banda de

coerência do canal nestas regiões, em condições de propagação outdoor e de propagação outdoor-indoor-outdoor e a caracterização estatística do espalhamento de retardos do canal.

3.1. Objetivo Geral

- Caracterização estatística do canal de rádio propagação móvel em banda larga e em banda estreita na faixa de 700 MHz, 2,3 e 3,5 Ghz

3.2. Objetivos Específicos

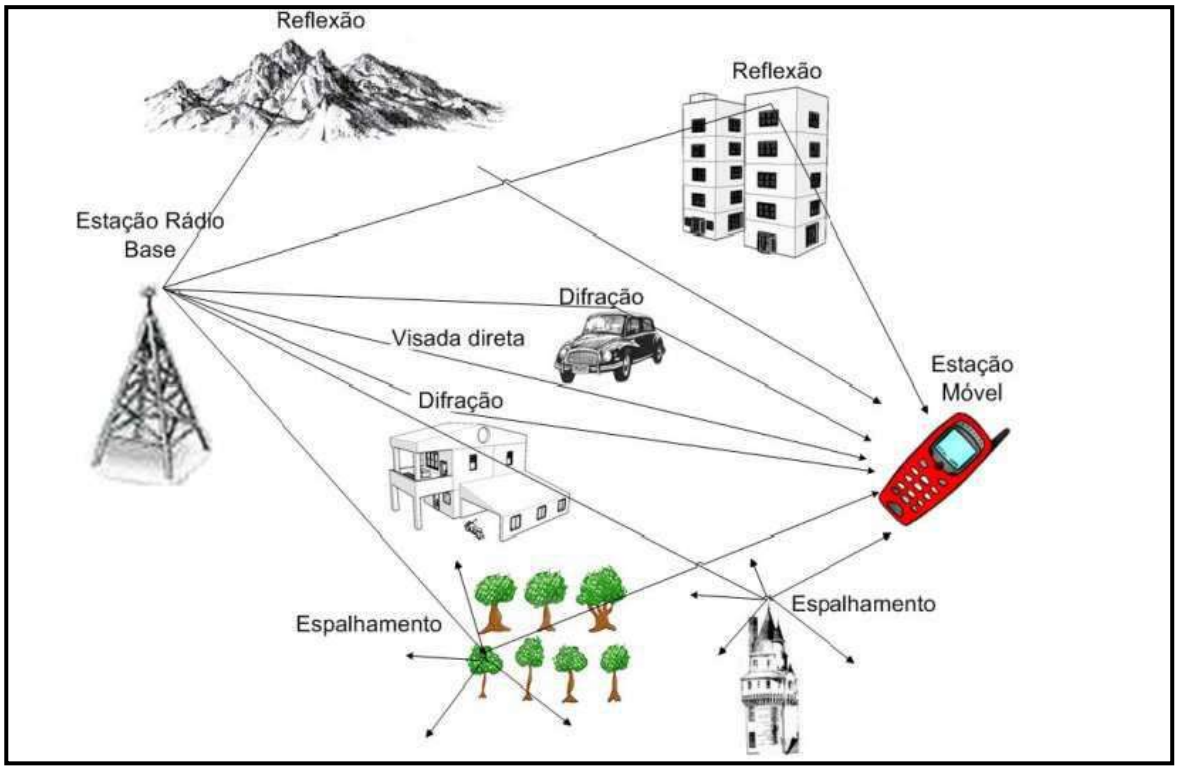
- Processamento de medições de campo para determinação perda média de propagação em áreas urbanas e suburbanas.
- Caracterização estatística do desvanecimento em pequena e larga escala do canal urbano e suburbano na faixa de 700 MHz, 2,3 e 3,5 Ghz.
- Determinação dos parâmetros de dispersão temporal do canal banda larga através de dois métodos diferentes de processamento de dados, utilizando dois tipos diferentes de sinais de testes durante a sondagem do canal.
- Utilização de ferramentas de processamento de dados e simulação que permitam identificar os parâmetros característicos do canal.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. Caracterização do Canal Rádio Móvel

Nos sistemas de comunicação rádio móvel as informações transmitidas sob a forma de ondas eletromagnéticas propagadas num determinado ambiente, sofre diferentes mecanismos e efeitos que influenciam decisivamente em seu desempenho. Portanto, descrever a caracterização de um canal rádio móvel é importante, mas não é algo trivial, pois existe uma ampla variedade de ambientes, cada um com suas peculiares diversidades e características distintas. Na figura 1 podemos observar os mecanismos de propagação do sinal no canal rádio móvel, que serão brevemente descritos a seguir.

Figura 3. Mecanismos de propagação do Sinal no Canal Rádio Móvel



Fonte: Magalhães, Diogo Augusto Bêtta**.**

SILVA (2013, p.23) descreve que a perda de percurso (pathloss) é a atenuação ocorrida na potência média do sinal devido a propagação no espaço livre, difrações e reflexões são causadas pelos obstáculos presentes no canal quando o receptor se distancia do transmissor. Essa atenuação é calculada em relação ao logaritmo da distância entre transmissor e receptor em torno de centenas a milhares de metros

Podemos encontrar abordagens distintas na literatura para caracterizar e modelar o canal rádio móvel, baseado em características da energia eletromagnéticas do sinal recebido ou no módulo do campo eletromagnético em função da distância entre transmissor e receptor

4.1.1. Efeitos do Canal Rádio Móvel sobre o sinal transmitido

As características do canal rádio móvel dependem dos diferentes ambientes de propagação do sinal que pode ser *indoor*, que é a propagação em ambientes confinados geralmente com poucos metros quadrados de área e propagação *outdoor* quando a propagação se dá através de um ambiente abertos com vários quilômetros quadros de área. Mais recentemente, se tornou necessária a modelagem da propagação *in car* mais especificamente para as aplicações *veículo a veículo* (V2V) e *veículo a Infraestrutura* (V2I) para as aplicações de transportes inteligentes (ITS)

A propagação das ondas eletromagnéticas ocorre por diferentes mecanismos e efeitos que dependem da faixa de frequência utilizada e da distância considerada. Nesse trabalho, os estudos do canal rádio móvel foram desenvolvidos em ambiente *outdoor* urbanizado na faixa de UHF (Ultra High Frequency) que é a designação da faixa de radiofrequência nas faixas de 750 MHz e 3 GHz. Nos ambientes urbanos, a presença das edificações e alterações no relevo interferem diretamente na modelagem do sinal transmitido onde nem sempre é possível ter a visibilidade entre transmissor e receptor pois a comunicação é estabelecida por intermédio dos efeitos sofridos pelo canal através da reflexão, difração e espalhamento.

Sobre esses fenômenos (RITA, 2013., p. 14) explica “a reflexão ocorre quando as ondas eletromagnéticas encontram uma superfície lisa cujas dimensões lineares são grandes em comparação com o comprimento de onda do sinal que se propaga.”

A difração ocorre quando obstáculos obstruem a visada direta entre transmissor e receptor e permite que as ondas eletromagnéticas alcancem o receptor mesmo em áreas de sombra, esse fenômeno é descrito como o Princípio de Huygens (VIRTUOUS, 2017) que “propôs um método de representação de frentes de onda, onde cada ponto de uma frente de onda se comporta como uma nova fonte de ondas elementares que se propagam para além da região já atingida pela onda original e com a mesma frequência que ela.” O fenômeno da difração é observado na figura 4.

Podemos destacar que o espalhamento é outro fenômeno ondulatório muito comum em canais de comunicação móvel. Ele é observado quando a onda incide em uma superfície que contém muitos objetos com dimensões pequenas em relação ao comprimento de onda e a

energia refletida é espalhada e difundida em todas as direções. A Figura 5 demonstra o efeito ondulatório do espalhamento.

Outro fenômeno que merece destaque é o efeito Doppler que é observado quando uma parte dos receptores está em movimento em relação ao transmissor ou ao canal *rádio móvel*. Dessa forma, aparecerá um deslocamento em frequência do sinal que está sendo transmitido devido o efeito Doppler. Esse deslocamento é dado por: $\boldsymbol{f_d} = \frac{\boldsymbol{v}}{\boldsymbol{\lambda}}\mathbf{cos}(\boldsymbol{\alpha})$

Onde v é a velocidade do receptor *(ou eventualmente a soma vetorial das velocidades do transmissor e do receptor no caso de aplicações V2V por exemplo)* e λ é o comprimento de onda do sinal transmitido. No entanto, como os modelos de propagação geralmente admitem que a distribuição de probabilidade do ângulo de chegada é uniforme, define-se o deslocamento Doppler pelo máximo deslocamento, f_m, que é dado por,$\boldsymbol{f_m} = \frac{\pm \boldsymbol{v}}{\boldsymbol{\lambda}}$

O Espalhamento Doppler ocorre pelos efeitos do multipercurso, que geram sinais atenuados e/ou defasados do sinal original, podendo ser calculado a partir do desvio padrão do desvio doppler.

4.1.2. Características do canal em Banda Estreita

A canalização em banda estreita normalmente é descrita como sendo um sinal sofrendo desvanecimento em pequena escala com uma com distribuição de Rayleigh e em larga escala com distribuição lognormal. Na prática transmite-se um sinal com espectro de frequência próxima do impulso. Neste caso a análise fica por conta da potência do sinal captado na recepção. Com os dados de potência do sinal, é possível analisar suas flutuações em pequena e larga escala e a perda de percurso. Na análise da variação lenta do sinal e da perda com a distância, normalmente, os resultados das medições são comparados com modelos estocásticos desenvolvidos para determinadas áreas de interesse, conhecidos como modelos de propagação em larga escala. Os modelos de propagação realizam a predição da potência média do sinal recebido pelo receptor a uma dada distância do transmissor e são úteis para estimar a cobertura de rádio de um transmissor. Existe uma variedade muito grande de modelos de predição na literatura, tanto para ambientes externos (outdoor) como para ambientes internos (indoor). Esses modelos são normalmente agrupados em três categorias: determinísticos, empíricos e semi-empíricos.

Para os modelos determinísticos são utilizados os princípios da teoria eletromagnética para cálculo de cobertura de uma determinada região. Tem como vantagem o fato de poder ser

aplicado sem maiores restrições, mas tem como desvantagem a exigência de um alto esforço computacional

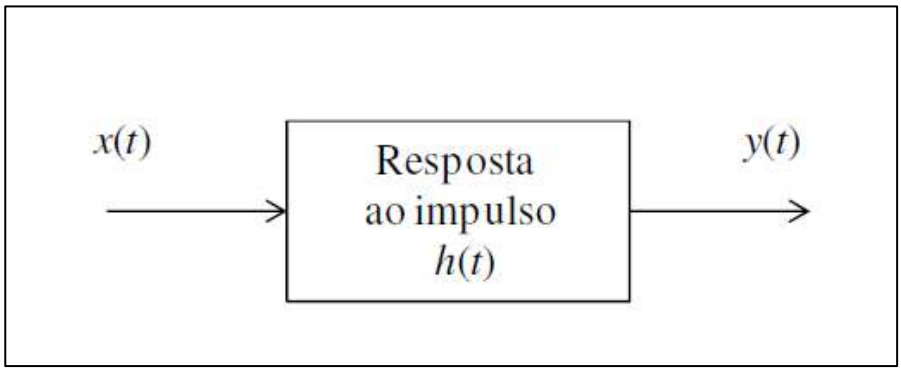
Já os modelos empíricos utilizam ajustes de curva construída tendo como base resultados de campanha de medidas realizadas em uma ou mais regiões. Os parâmetros destes modelos são simples como a altura de transmissores e receptores ou o tipo de ambiente. Como vantagem podemos apontar a simplicidade de implantação e baixo esforço computacional quando comparado com modelos determinísticos.

No caso dos casos de modelo semi empírico, eles mesclam a teoria eletromagnética com dados estatísticos baseado em medições. Os modelos semi-empíricos são aqueles que mesclam a teoria e dados estatísticos derivados de medições.

4.1.3. Características do canal em Banda Larga

A caracterização banda larga do canal rádio móvel é importante por causa do comportamento dispersivo no tempo e no espaço. Este entendimento permite a escolha adequada das técnicas de modulação, codificação e processamento de sinal para compensar as distorções introduzidas no sinal. Vamos considerar o canal rádio móvel como sendo linear e invariante no tempo apesar de serem notórias as características aleatórias e variantes no tempo desta canalização. Neste caso podemos considerar a resposta ao impulso a sinalização em estas condições pode ser consideradas a mesma não importando o momento em que o impulso é aplicado à entrada do sistema, que é representado pela figura [4]

Figura 4 Resposta ao impulso do canal



Neste caso a resposta y(t) a excitação a uma entrada x(t) será dado pela integral de convolução a seguir:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau$$

Neste caso a função h(t,τ) é a resposta ao impulso a uma f. Com a aplicação da transformada de Fourier temos outras funções estudadas na caracterização do canal rádio móvel: A função de transferência variante no tempo, (H(t,τ)), Função deslocamento doppler (D(f,ν))Função Espalhamento atraso-doppler (S(f,ν)).

Na prática, canais rádio móvel possuem estatística de desvanescimento que podem ser consideradas estacionárias no sentido amplo (Canais WSS – Wide sense stationary)

Podemos considerar também que esta canalização pode ter multipercursos com espalhamento descorrelatados (Canais US – Uncorrelated Scattering). Para os estudos

Na maioria dos casos de canalização rádio móvel, podemos considerar que o canal Estacionário no sentodo amplo com espalhamento descorrelatado (canais WSSUS - Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering)e Segundo Parsons [?] a auto correlação dos sinais de saída deste tipo de canal é descrita estatisticamente pela distribuição temporal da potência de retardo. Com esta contribuição importantíssima podemos encontrar os parâmetros de dispersão de um canal real, linear e variante no tempo, sem que se tenha o conhecimento prévio funções de densidade de probabilidade conjunta de todas as funções de sistema mostradas na Figura [4]

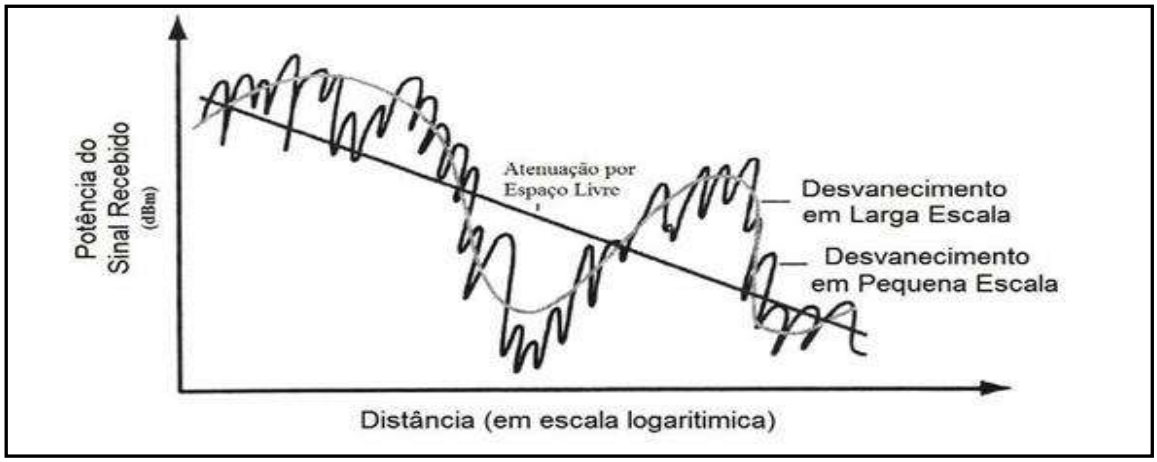
4.2. O comportamento do sinal no Canal Rádio-Móvel

A atenuação na potência média do sinal transmitido é chamada de perda de percurso (pathloss) decorrente de difrações e reflexões causadas pelos obstáculos no canal. Estas atenuações têm como causas a distância entre o transmissor e o receptor, Sombreamentos e grandes obstáculos do canal, conhecidos como desvanecimentos de larga escala ou desvanescimento lento e pelo espalhamento do sinal por obstáculos que tem diferentes índices de reflexão e difração do sinal, produzindo réplicas do sinal que percorrem múltiplos percursos com mudanças variadas de amplitude e de fase causando efeitos construtivos e destrutivos ao sinal recebido

A variação em larga escala pode ser representada por uma distribuição Log-normal, enquanto a variação em pequena escala pode ser caracterizada com uma distribuição Riceana, caso haja visada direta entre transmissor e receptor e uma distribuição de Rayleigh caso não haja visada.

Para entendermos o comportamento do sinal rádio-móvel, precisamos distinguir as degradações e os desvanecimentos de larga escala e pequena escala. O comportamento típico deste tipo de sinal é apresentado na figura 4.

Figura 5. Comportamento do Sinal em um canal Rádio Móvel Urbano



Fonte: (RITA, 2013).

Atenuação no Espaço Livre

A atenuação no espaço livre é caracterizada pela tendência de queda do nível do sinal com a distância segundo algum expoente de atenuação, que varia conforme o ambiente. Esse tipo de perda pode ser descrita por uma equação linear com escala logarítmica, onde é possível ou calcular determinar o expoente de perda de percurso. Em linhas gerais podemos representar essa perda por

$y = a + Kx$ [?]

Onde:

a: Perda em uma distância referência d_0 (Normalmente 100 m),

K: Inclinação da reta (K=10n, onde n representa o expoente de perda)

x: Distância em encala logarítmica (x=log(d)),

Na tabela [2] temos os valores típicos para expoente de perda de percurso

Tabela 2 Valores típicos para expoente de perda de percurso

Ambiente	Expoente de perda de percurso (n)
Espaço livre	2
Áreas urbanas	2,7 a 3,5
Áreas urbanas com sombreamento	3 a 5
Dentro de construções com linha de visada (LOS)	1,6 a 1,8
Dentro de construções com obstrução (NLOS)	4 a 6

Desvanescimentos em Larga Escala

O desvanecimento em larga escala está associado a variação mais suave e lenta associada ao sombreamento por obstáculos ou pelo relevo e ocorre em torno do nível médio do sinal e pode ser percebida ao longo de centenas de metros. Tem o comportamento aleatório que pode ser representado por uma distribuição Log Normal

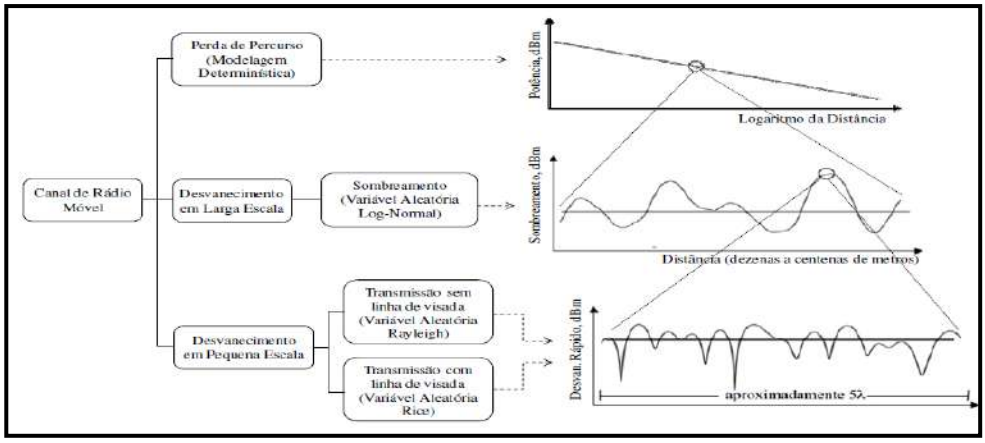
Desvanescimetos em pequena Escala

Os desvanecimentos em pequena escala são caraterizados pelas flutuações rápidas do sinal associadas ao multipercurso

Um dos efeitos indesejáveis do desvanecimento de pequena escala é interferência Intersimbólica (ISI) devido a multipercurso, prejudicando o desempenho da rede e causando a degradação da sua taxa de erro de bit (BER, bit error rate). Por outro lado, o sombreamento e a queda do nível do sinal com a distância (desvanecimento Log normal), permitindo que se determine distribuições estatísticas, modelo de propagação, retardo médio, espalhamento de retardo e banda de coerência

A Figura 5 apresenta de forma estruturada, variações ocorridas frequentemente no comportamento de um sinal em um canal rádio móvel.

Figura 6. Comportamento do Canal Rádio Móvel

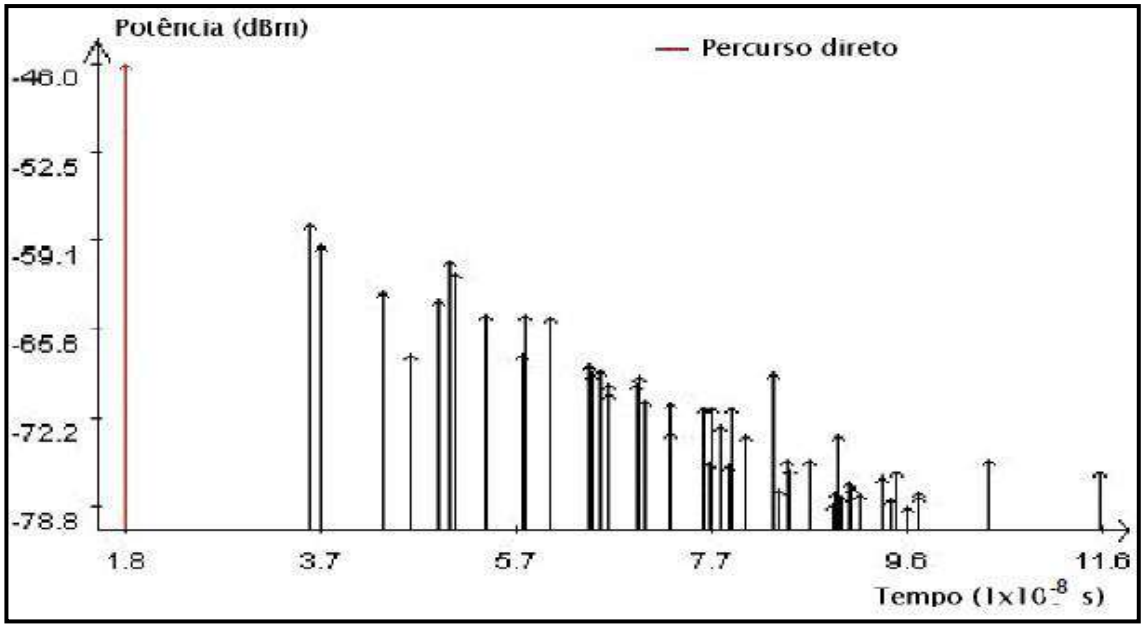


Fonte: SAMPLEI, 1997 (Adaptado).

4.3. Perfil de Potência de Retardo

Em um canal com multipercurso, o sinal transmitido, alcança o receptor por caminhos diversos, e o tempo de chegada de cada componente do sinal ao receptor, devido aos mecanismos de propagação, será distinto. Dessa forma, o sinal resultante será composto por um conjunto de versões do sinal original enviado, que possuem retardos entre si. (Ou seja, sinais atenuados e/ou defasados em relação ao sinal original). Assim, o sinal sofre espalhamento no tempo e o gráfico que mostra cada componente significativa de multipercurso, com informação de potência e o instante de tempo da respectiva chegada é denominado Perfil de Retardos de Potência (Power Delay Profile) ou simplesmente Perfil de Retardos. (SILVA, 2013) Um exemplo típico de Perfil de Retardos é mostrado na Figura 7.

Figura 7. Perfil de retardo



A partir dos perfis de retardos capturados em medições podemos determinar os parâmetros de dispersão temporal do canal e as equações matemáticas

que os determinam, que são

- Retardo Excedido Médio: Do inglês mean excess delay, descreve o atraso médio da propagação das componentes retardadas em relação à primeira componente a chegar no receptor.

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} = \frac{\sum_k \boldsymbol{P}(\boldsymbol{\tau_k})\boldsymbol{\tau_k}}{\sum_k \boldsymbol{P}(\boldsymbol{\tau_k})}$$

- Espalhamento do Retardo RMS: Do Inglês RMS delay spread), esse parâmetro mede o espalhamento temporal do perfil de retardos em torno do retardo excedido médio (valores típicos são da ordem de microssegundos para canais outdoor e da ordem de nano segundos para canais indoor) [8]. Matematicamente, o espalhamento de retardo RMS é a raiz quadrada do segundo momento central do perfil de retardo, podendo ser expresso por:

$$\sigma_t = \tau_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_k (\tau_k - \bar{\tau})^2 P(\tau_k)}{\sum_k P(\tau_k)}}$$

4.4. Banda de Coerência

A banda de coerência é uma importante medida estatística no estudo da canalização rádio móvel. Está definida com a faixa de frequências na qual um canal atua de forma igual (coerente) ou, ao menos, com pouquíssimas variações de tal modo que possamos considerá-la de forma muito próxima à igualdade, sobre todas as frequências de um sinal durante a propagação.

Esta medida depende de diversos fatores como por exemplo a frequência do sinal, a distância entre a antena transmissora e receptora, as condições atmosféricas e a presença de obstáculos físicos na trajetória do sinal

Podemos relacionar a banda de coerência com parâmetros de dispersão temporal do sinal. As estimativas para definições de Banda de coerência descritas acima, são empíricas e não existe um relacionamento exato entre banda de coerência e sinal de retardo

Podemos considerar o valor para a banda de coerência tanto para função de correlação entre as frequências está acima de 90% ou acima de 50%, dependendo do quão rigorosa se queira a banda de coerência}, que é dada, aproximadamente, por [8]:

$$Bc = \frac{1}{50\,\sigma_t} \qquad \text{(Correlação acima de 90\%)}$$

$$Bc = \frac{1}{5\,\sigma_t} \qquad \text{(Correlação acima de 50\%)}$$

onde σ_t = espalhamento do retardo RMS [s].

Vale ressaltar que as equações acima foram obtidas de forma empírica portanto não existe uma relação exata entre a banda de coerência e o espalhamento de retardo. Segundo [22], a utilização de técnicas de análise espectral e simulações são normalmente necessárias para avaliar o impacto do multipercurso exerce sobre a interface aérea

Em sistemas de comunicação móvel a seletividade do canal e a banda de coerência são importantes pois afetam diretamente a qualidade do sinal recebido pelo usuário. Quanto menor a seletividade do canal, maior banda de coerência e melhor será a qualidade do sinal recebido

A seletividade se refere à capacidade de um receptor de discriminar entre sinais que estão em frequências próximas, mas que devem ser recebidos separadamente para garantir uma comunicação sem interferência

4.5. Modelagem estatística

O comportamento aleatório do sinal transmitido no canal rádio móvel quando se depara com obstáculos no seu percurso é chamado de Desvanecimento (*Multipath Fading*), causado pelas variações do ambiente e depende da relação entre os parâmetros do sinal transmitido e do canal.

Para caracterizar um canal rádio móvel necessita-se trabalhar com processos estocásticos e probabilísticos, devido a sua natureza aleatória e variante no tempo. Com isso, é preciso seguir modelos de funções de autocorrelação que representarão o comportamento do canal e métodos de modelagem estatísticas, para calcular a performance do sinal, utilizando estas funções para ajuste de padrões. Uma função largamente utilizada, é a de densidade de probabilidade (FDP).

Neste trabalho serão abrangidas as distribuições de probabilidades, juntas de suas funções densidade que são utilizadas para descrever o comportamento dos desvanecimentos em pequena e larga escala. Elas são a funções de Rayleigh, Rice, Log-Normal, Weibull e Nakagami. Todas estas serão brevemente descritas a seguir.

RAYLEIGH

Utilizada em distâncias suficientemente pequenas, sem linha de visada entre o transmissor e receptor, para descrever o sinal recebido em função das variações temporais e de amplitude, causadas pelo multipercurso. Pode ser definida pela função

$$\boldsymbol{f(r;\sigma) = \frac{r}{\sigma^2} exp\left(\frac{-r^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (01)$$

onde σ^2 é a potência média do sinal antes da detecção e r é a intensidade do campo.

RICE

Calcula a variação temporal do sinal recebido, principalmente em ambientes com visada direta. A FDP é dada por:

$$\boldsymbol{f(r;s;\sigma) = I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right)\frac{r}{\sigma^2} exp\left[\frac{-r^2+s^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (02)$$

, onde I_0 é a função de Bessel tipo 1 e ordem zero, s é a média.

LOG-NORMAL

Descreve a variação em larga escala do sinal recebido ao sofrer o efeito do multipercurso e do sombreamento, causado por grandes obstruções, conforme explicado no Item 2.2.2. Sua

função densidade de probabilidade é definida por:

$$\boldsymbol{f(r;s;\sigma) = \frac{1}{r\sigma\sqrt{2\Pi}} exp\left[\frac{-(ln(x)-s)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (03)$$

WEIBULL

Largamente utilizado nas mais variadas áreas. Para a radiopropagação, se demonstra útil para caracterizar a variação de sinais que sofreram desvanecimento por multipercurso.

$$\boldsymbol{f(x;\lambda;\alpha) = \frac{\alpha}{\lambda}\left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\alpha-1} exp\left(\frac{-x}{\lambda}\right)^{\alpha}} \quad (04)$$

onde **α** é a declividade de weibull, **λ** é o tempo característico, x é uma variável aleatória

NAKAGAMI

Assim como a distribuição de Rice, pode ser utilizado para descrever a variação de sinais em pequenas regiões. Tendo sido determinada a partir de cálculos medidos na faixa de frequência HF. A FDP para esta distribuição é dada por:

$$\boldsymbol{f(x;m;\Omega) = \frac{2m^m x^{2_m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} exp\left(\frac{-mx^2}{\Omega}\right)} \quad (05)$$

onde m é o fator de desvanecimento e Ω é a potência média temporal do sinal recebido

4.6. A Sondagem do canal rádio móvel

O canal rádio móvel é um meio predominantemente aleatório, basicamente porque as antenas de transmissão onde recepção ou ambas estarem em movimento, assim como os obstáculos que se interpõem entre elas. A sondagem do canal, é um passo importante para a determinação do comportamento do sinal transmitido sob determinadas técnicas de modulação e transmissão assim como determinadas condições do ambiente onde o sinal está sendo transmitido. De acordo com [20] sonda pode ser definido como um sistema formado por um equipamento transmissor e outro equipamento receptor e seu respectivo sistema aéreo (linhas de transmissão, antenas etc.), capaz de estimar os parâmetros de canais rádio móveis criados em ambientes interiores (indoor) ou exteriores (outdoor). Espera-se que na recepção da sonda obtenha-se um sinal, que depois de reprocessado tenha características semelhantes ao sinal transmitido, porém com informações sobre o atraso relativo a cada multipercurso percebido no ambiente pesquisado, assim como fase e amplitude que são captados no receptor. Os principais tipos de sondagem de canal rádio móvel serão descritos a seguir:

4.7. Técnicas de Sondagem de canal

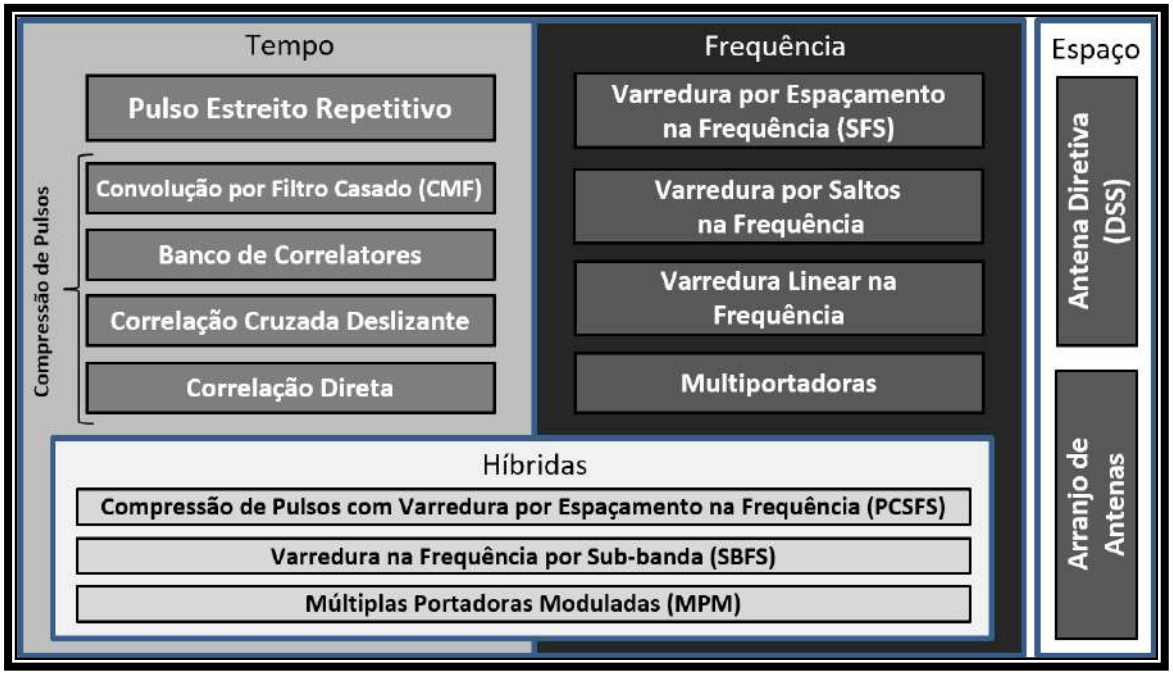
Podemos classificar as técnicas de sondagem de canal da seguinte maneira:

- Sondagem no domínio do tempo
- Sondagem no domínio da frequência
- Sondagem no domínio do espaço

Segundo [21], A sondagem no domínio do tempo realiza de forma direta a medição da resposta ao impulso do canal, enquanto a sondagem no domínio da frequência efetua a medição da resposta em frequência do canal. Já a sondagem no domínio do espaço realiza medição da direção angular de chegada do sinal no receptor. As técnicas que adotam mais de uma técnica básica de sondagem podem ser chamadas de híbridas, sendo possível a realização da sondagem no domínio do tempo, da frequência, ou, ainda, em ambos os domínios conjuntamente. A técnica de sondagem no domínio do espaço pode ser utilizada adicionalmente às técnicas de domínio do tempo e domínio da frequência

Um resumo das principais técnicas de sondagem de canal é apresentado a seguir:

Figura 8. Técnicas de Sondagem do Canal Banda Larga e Ultra-larga



Fonte: BARBOSA Filho, José Marcos Leal (2021)

Existem várias técnicas de sondagem de canal que derivam das técnicas básicas, mas neste trabalho nos ateremos somente nas técnicas das Multiportadoras, que foi técnica utilizada para a sondagem do canal através de geração de sinais OFDM e utilizando -se código de espalhamento espectral Pseudo Aleatório (Pseudo Noise Signal -PN)

4.7.1. Técnica das Multiportadoras

Nesta técnica utiliza-se um sinal com múltiplas portadoras simultâneas. Segundo [21], dentre as vantagens desta técnica estão a diminuição no tempo de sondagem do canal assim como a melhor caracterização do espalhamento Doppler, porém esta técnica apresenta uma alta PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) que é a razão entre potência de pico de pulso e potência média do sinal. Para este trabalho utilizamos a técnica de geração de sinais OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing ou Multiplexação por divisão de frequência Ortogonal*)

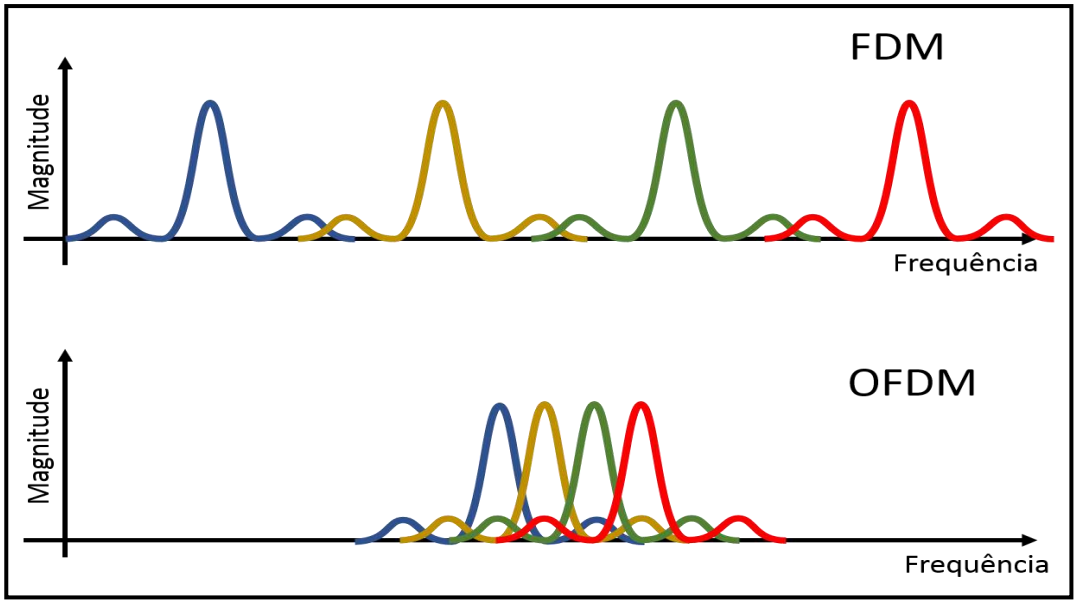
4.7.2. Técnica de Transmissão OFDM

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) é atualmente a técnica predominante nos padrões de transmissão para redes sem fio em locais fechados (indoor) e também para o LTE (tecnologia 4G) e para o 5G. Trata-se de uma evolução da técnica FDM, que permitia o múltiplo acesso de usuários através da divisão da largura de banda em subcanais diferentes e não sobrepostos, separados por uma banda de guarda. Dessa forma, diferentes sinais percorrem de forma separada e simultânea sem interferirem entre si.

Já na Técnica OFDM, os subcanais são sobrepostos de forma ortogonal, ou seja, agem independentemente, sem interferência entre si. Os sinais estão multiplexados de uma forma que o ponto máximo de uma subportadora ocorre no ponto nulo dos outros sinais vizinhos. Com isso, a largura de banda disponível é mais bem aproveitada, alcançando taxas de transmissão de dados maiores que no método FDM

É importante destacar que, além da técnica de transmissão também há várias técnicas de modulação no qual uma técnica de transmissão como OFDM pode utilizar, só para esclarecer em OFDM, utiliza-se basicamente as técnicas de modulação BPSK, QPSK e as variantes do QAM, 16-QAM, 64-QAM e 256-QAM. A figura abaixo mostra um comparativo da organização das ondas em uma mesma largura de banda nas duas técnicas de modulação.

Figura 9. Comparativo entre a técnicas FDM e OFDM



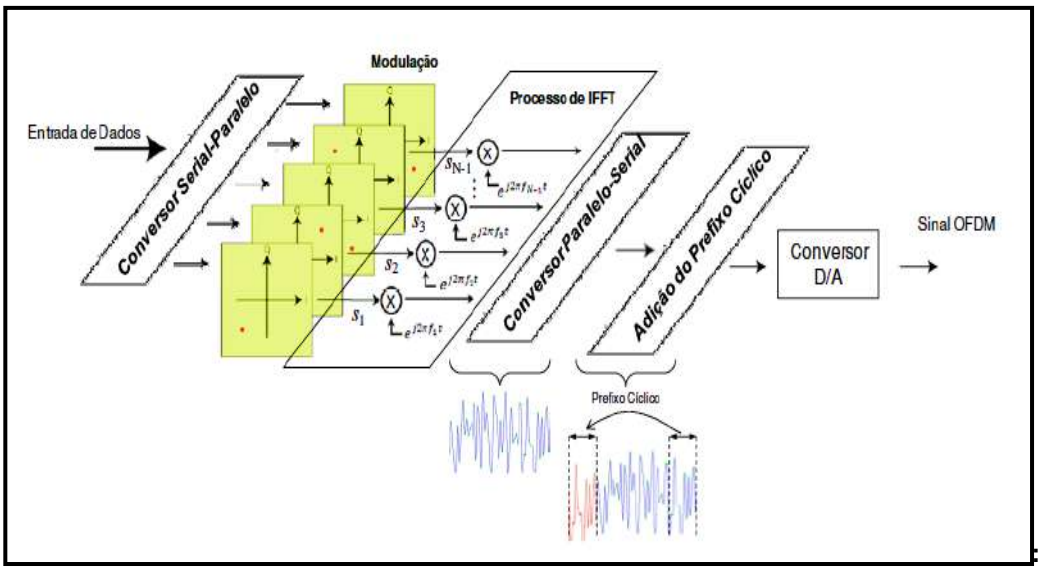
4.7.3. Geração e Recepção do Sinal OFDM

A geração e recepção de sinais OFDM são basicamente realizadas com técnicas utilizando as Transformadas de Fourier, sendo que a técnica da Transformada rápida de Fourier (FFT) e a sua inversa (IFFT), se mostra a melhor opção para estas operações devido a *sua baixa complexidade*, alta eficiência e menor carga computacional. A Transformada Discreta de Fourier (DFT) e a sua inversa (IDFT) também é utilizada, mas a sua alta complexidade computacional, que aumenta exponencialmente com o número de portadoras, restringem o uso desta técnica.

Em linhas gerais, a geração/*transmissão* do sinal OFDM é feito com a codificação dos bits de dados sendo agrupados em quadros chamados de *símbolos OFDM* e em seguida são modulados digitalmente. Foi utilizada uma sequência PN (Pseudo Noise) para a geração do sinal que será usado para “sondar “o canal rádio móvel.

Na recepção é aplicado o processo IFFT para organizar estes símbolos em frequências ortogonais e espaçadas *em frequência* de forma ortogonal e espaçados para que cada subportadora tenha o seu ponto máximo posicionado no ponto nulo das demais. Entre cada subportadora, é inserido um intervalo de guarda para se evitar a interferência intersimbólica. Finalmente, as amostras são *enviadas* para um conversor paralelo no domínio do tempo, resultando assim no sinal OFDM, como mostra a figura 6

Figura 10. Processo de modulação OFDM



Fonte: Gonsioroski, Leonardo (2013)

4.7.4. Códigos ou sequências para espalhamento espectral (Spread Spectrum)

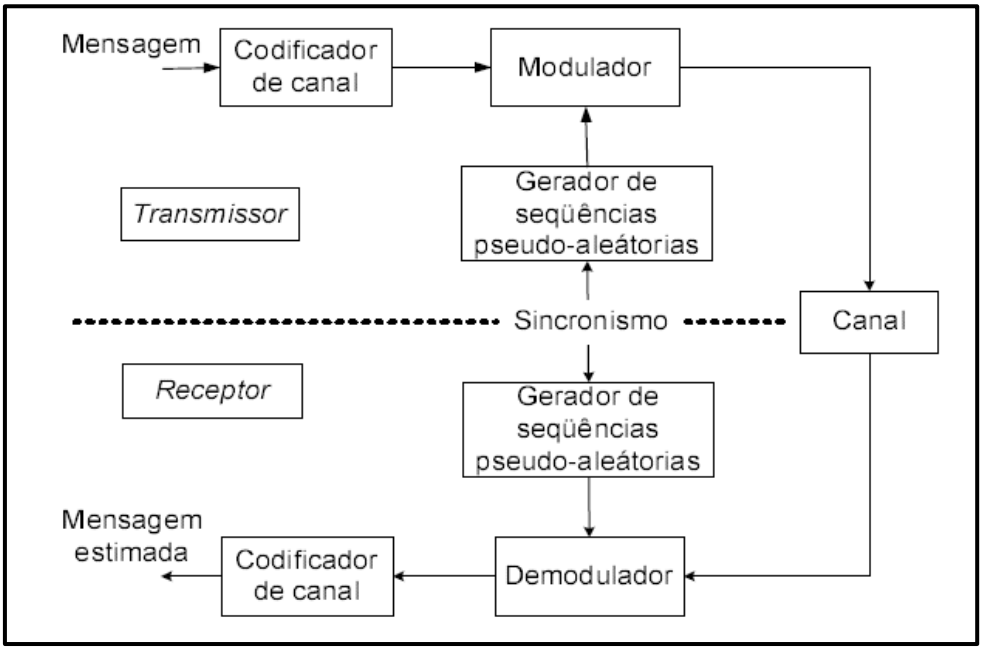
Os códigos utilizados para espalhamento espectral podem ser divididos em códigos ortogonais e não ortogonais. Os principais códigos utilizados são:

Tabela 3. Classificação de Códigos de Espalhamento Espetral

• Códigos Ortogonais	Códigos de Walsh-Hadamard
• Códigos não Ortogonais	Códigos de Barker
	Códigos (sequências) PN de comprimento máximo
	Códigos de Gold
	Códigos de Kasami

De maneira geral, um sistema de comunicação por espalhamento espectral pode ser representado pela figura abaixo:

Figura 11. Diagrama em blocos do sistema de comunicação por Espalhamento



Espectral

Fonte: Netto, Fábio S.; Eisencraft, M (2009)

4.7.4.1. Geração da Sequência Pseudo Noise (PN)

Para a sondagem de canais são utilizados códigos ou sequências para o espalhamento espectral. Esses códigos ou sequências tem como objetivo observar o comportamento deste quando submetido a respostas em frequência. Estes sinais são utilizados para fazer o levantamento estatístico do canal.

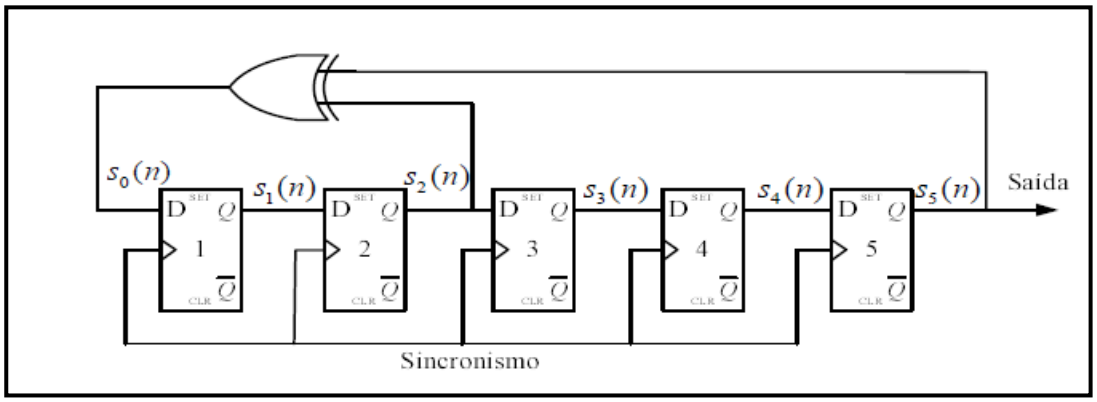
Algumas propriedades desejáveis dos códigos espalhadores, são:

- Devem ter dois valores.
- Função de autocorrelação com um único pico estreito, (ajuda na sincronização do código).
- Funções de correlação cruzada com valores baixos, (permite mais utilizadores simultâneos).
- Balanceados (equilibrados) no número de “0” e “1”, (Densidade espectral de potência esteja bem repartida nas frequências).

A geração da sequência PN é utilizada realizando-se a correlação cruzada ente o sinal recebido (RX) e o sinal transmitido. O resultado dessa correlação produz a função impulso no ponto onde "ocorre" o retardo, que é exatamente a parte do sinal que foi atenuada e ou defasada do sinal original. A soma dessas várias partes do sinal recebido nos ajuda a levantar a função densidade de probabilidade (FDP) do sinal.

Uma sequência pseudo-aleatória (ou sequência PN, de "Pseudo Noise") é gerada por um circuito com um registo de deslocamento, portas "OU exclusivo" e uma malha de realimentação.

Figura 12. Registrador com m=5



Fonte: Haykin, S. Communication Systems (2001)

A sequência é periódica e tem características que a tornam parecida com uma sequência verdadeiramente aleatória. O período de uma sequência é, no máximo, $N = 2^m - 1$, sendo m o número de estágios de registo de deslocamento. Uma sequência de período máximo chama-se sequência de comprimento máximo, ou sequência m. É desejável que o período da sequência PN seja elevado para que esta seja aparentemente mais aleatória:

- O número de estágios, n, deve ser elevado
- A sequência deve ser de comprimento máximo

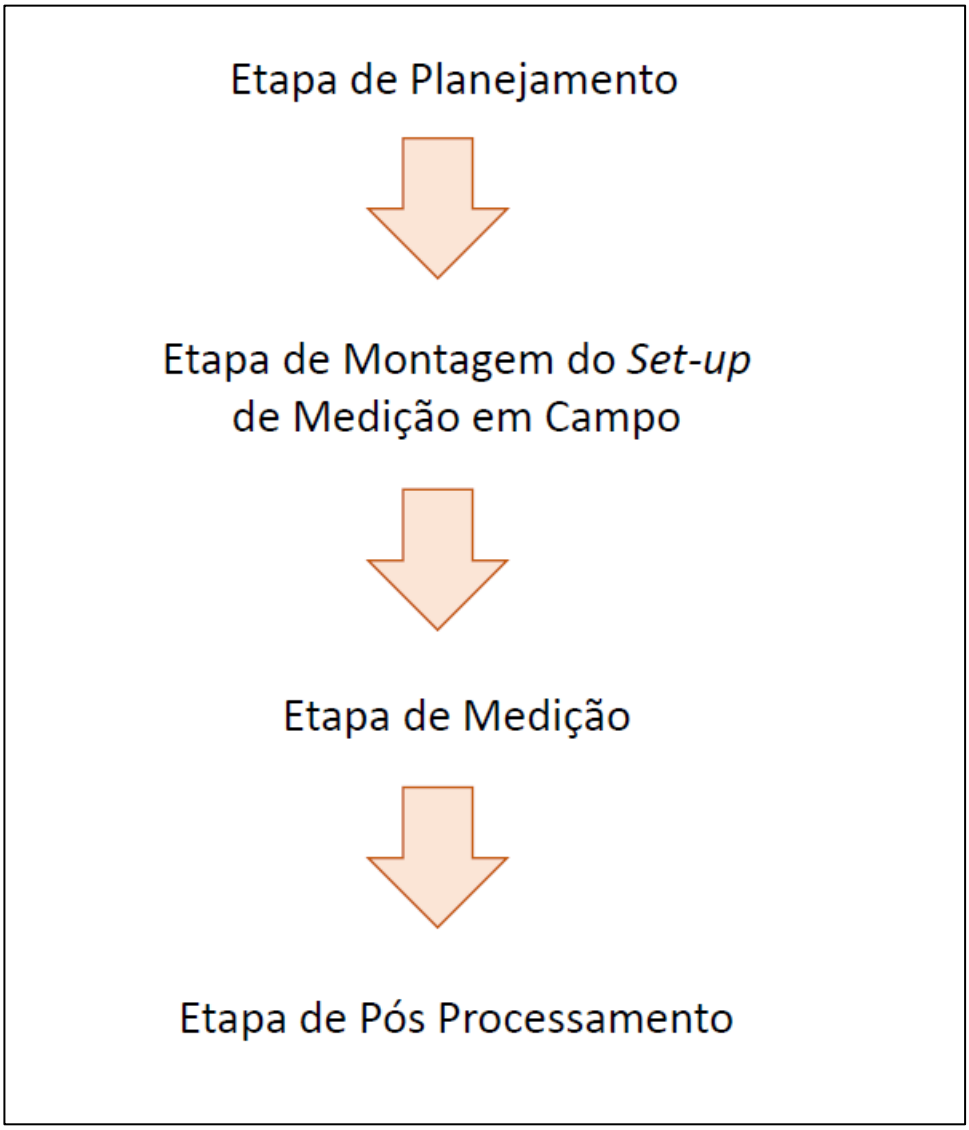
Um gerador de sequências é definido por um polinómio de grau *n* de coeficientes binários é chamado de polinómio gerador, ou polinómio característico. Se a sequência tiver comprimento máximo o polinómio é chamado de primitivo.

5. INFRAESTRUTURA E METODOLOGIA DAS MEDIÇÕES

Uma parte importante deste trabalho são as medições realizadas para a análise do canal rádio móvel. A campanha de medições vai permitir avaliar o comportamento do sinal no canal e os perfis de retardo obtidos. Para isso é necessário a montagem de uma estrutura de medições que será a mesma tanto para caracterização em banda larga quanto em a banda estreita.

A sequência de eventos sugerida foi a mesma utilizada por [13], que pode ser visualizada na figura 12

Figura 13 Sequência de Etapas para Execução das Campanhas de medição



Para a transmissão dos sinais utilizou-se os seguintes materiais:

- 01 gerador vetorial;
- 01 amplificador de potência;
- 01 antena setorial, além de cabos e conectores utilizados para interligar os equipamentos.

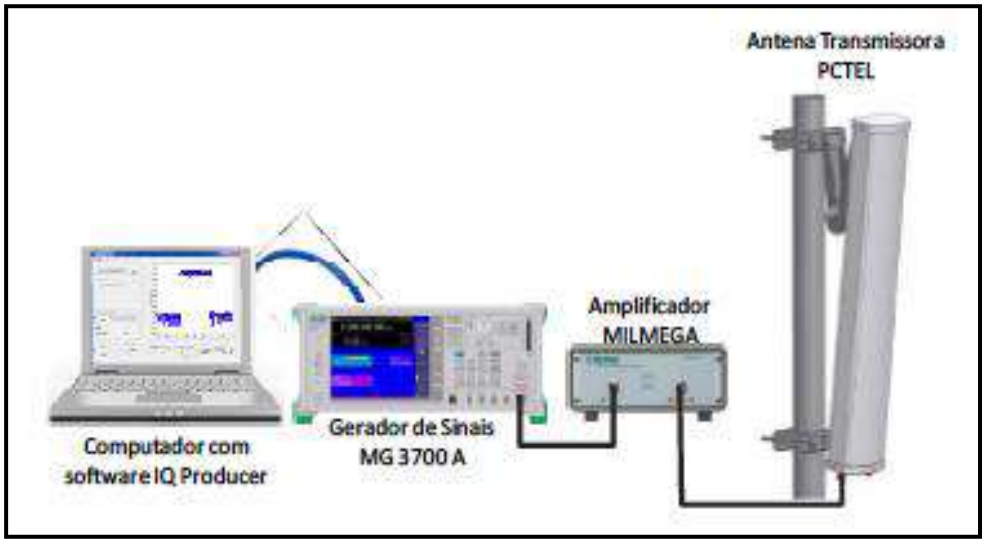
O sinal recebido será modulado em OFDM tanto em fase quanto em quadratura que serão gerados em MathLab com tratamento prévio do Software IQ producer

Ganhos e perdas no caminho da transmissão precisam ser computados para que seja determinada a EiRP (Effective Radited Power ou Potência Efetivamente Irradiada), que foram mantidas no caso desta campanha de medições. Os parâmetros para os cálculos da EiRP são:

- Potência de Saída do Gerador de Sinais
- Frequência de Transmissão
- Ganho do Amplificador de Potência
- Ganho da Antena de Transmissão
- Perdas nos Cabos e Conectores

A estrutura de setup de transmissão está descrita na figura 14

Figura 14. Setup de Transmissão



Fonte: Autor

O setup de recepção será responsável pela coleta de dados dos sinais transmitido pelo setup de transmissão (mais precisamente o gerador de sinais), que é composto basicamente por:

01 antena omnidirecional;

01 amplificador de baixo ruído (LNA, do inglês Low Noise Amplifier),

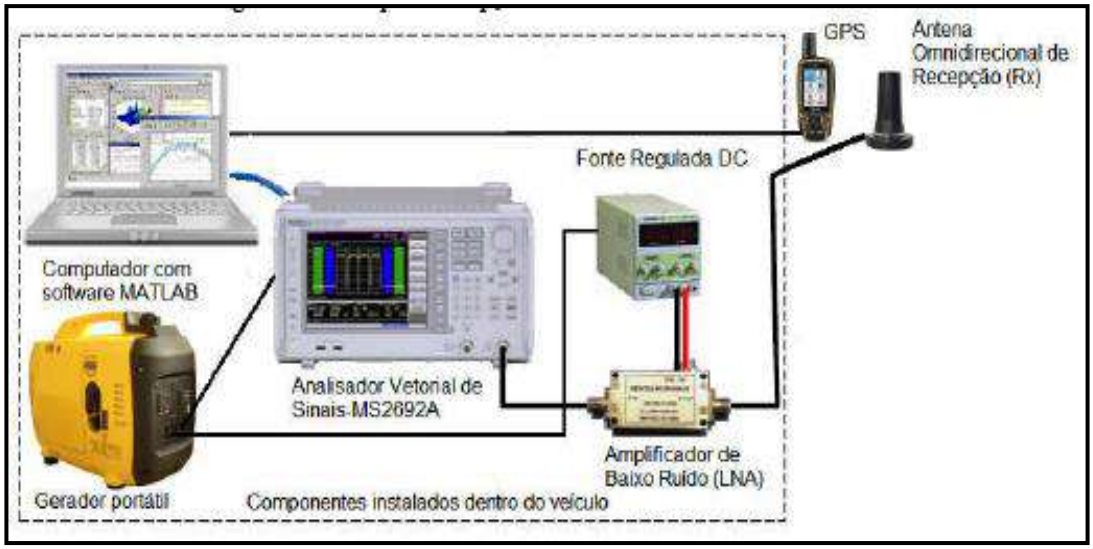
02 analisadores vetoriais sinais;

01 fonte regulada DC;

01 GPS ;

01 computador além de cabos e conectores.

Figura 15. Setup de Recepção



Fonte: Autor

Abaixo apresentamos uma tabela com o resumo com os equipamentos utilizados na campanha de medições deste trabalho

Tabela 4. Equipamentos Utilizados no setup de medidas

Faixa de Frequência	700 MHz	2300 MHz	3500 MHz
Equipamentos de Transmissão			
Gerador Vetorial de Sinais	Anritsu, MG3700A	Anritsu, MG3700A	Anritsu, MG3700A
Amplificador de Potência	MiniCircuits, ZVE-2W-272+	Milmega, AS0204-7B	Milmega, AS0204-7B
Antena Painel	Digital Broadcast, APO8/N	PCTEL, SP2327-18XP60NUF	Hyperlink Technologies, HG3515P-120
Equipamentos de Recepção			
Analisador Vetorial de Sinais	MS2962A	MS2962A	MS2962A
Amplificador de Baixo Ruído	Wenteq Microwave, ALN0060-33-4006	Wenteq Microwave, ABL0800-12-3315	Wenteq Microwave, ABL0800-12-3316
Antena Omnidirecional	Mobile Mark, MGRM-WLF-1C-BLK-120	Mobile Mark, MGRM-WLF-1C-BLK-121	Hyperlink Technologies HG3505RD-RSP
GPS	Garmim 62s	Garmim 62s	Garmim 62s

6. TRABALHO PROPOSTO

6.1. Metodologia

Para a realização deste projeto foram realizadas medições na cidade do Rio de Janeiro no bairro de Higienópolis nas frequências de 700 MHz, 2,3 e 3,5 Ghz através do laboratório móvel do CETUC sob a orientação do professor Leonardo Gonsioroski. A primeira campanha de medição ocorreu em 23 de julho de 2015 no bairro Higienópolis, localizado na zona norte da cidade do Rio de Janeiro, sendo medidas para as coletas de dados de sinal OFDM em banda larga foram realizadas na frequência de 3,5 GHz. Assim como para as frequências de 700 Mhz e 2,3 GHz

Após a coleta, os dados serão aplicados para o desenvolvimento de uma aplicação automatizada utilizando o software MATLAB® R2014a para a modulação, implementação e treinamento da RNA. Ná figura 16 podemos observar a rota desta campanha de medições.

Figura 16. Rota da campanha de medições

Fonte: Autor

Em seguida os resultados obtidos com essa análise serão discutidos sob o aspecto de propagação e desvanecimento *em pequena e larga escala* para banda larga e banda estreita

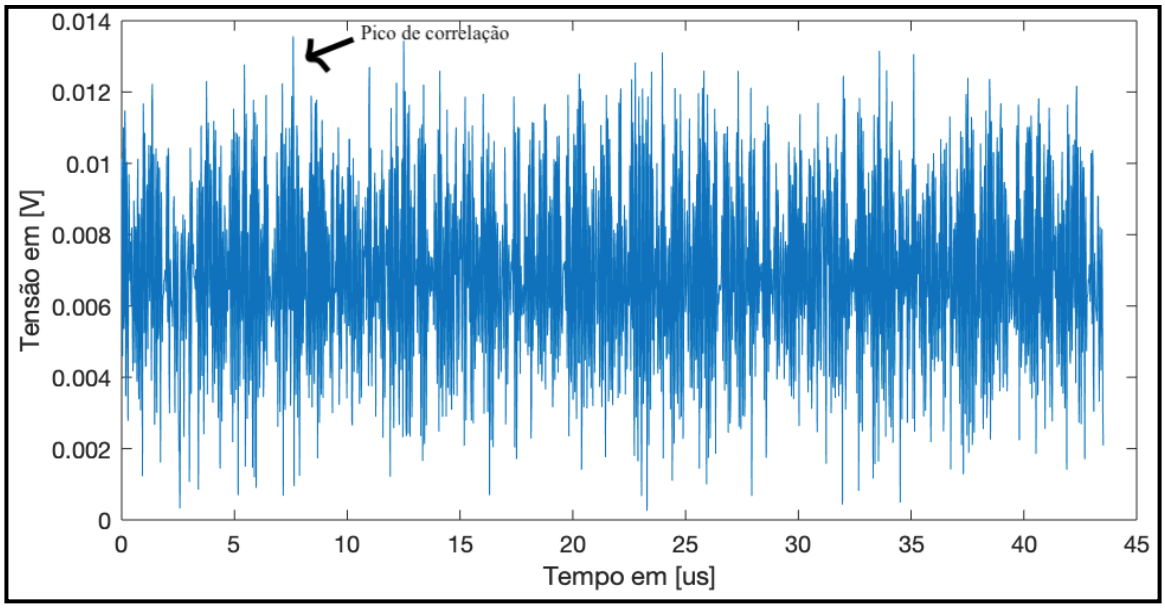
6.2. Análise dos Dados e Resultados

Nesta seção serão discutidos os principais resultados obtidos na etapa de pós-processamento a partir do perfil de retardos dos sinais. Em seguida, serão aplicadas modelagens de distribuição estatísticas aos parâmetros de dispersão temporal.

6.2.1. Obtenção do Perfil de Potência de Retardo

Para a obtenção do perfil de potência de retardo, foi realizada uma correlação cruzada do sinal recebido com o sinal transmitido. O processo ocorre da seguinte forma: para identificar cada símbolo OFDM recebido, o sinal capturado inteiro é comparado ao símbolo original, distinguindo-se os picos de correlação a partir dos prefixos cíclicos que foram adicionados entre cada símbolo OFDM no processo de modulação.

Figura 17. Sinal Recebido no domínio do tempo



Fonte: Autor

6.2.2. Filtragem do Perfil de Potência de Retardo

Ao definir o perfil de potência de retardo é necessário realizar a filtragem dos dados, processo indispensável para o cálculo dos parâmetros de dispersão do canal. Isto se deve, pois os componentes de multipercurso serão distinguidos de possíveis ruídos advindos do canal ou do receptor.

Há diversas técnicas para filtragem de dados utilizadas na limpeza de perfis de retardo, porém, a técnica CFAR (Constant False Alarm Rate) foi escolhida para este trabalho por conceder resultados satisfatórios no estudo da dispersão temporal em diferentes cenários, conforme os relatados por (Gonsioroski, 2013) e (Batista, 2019).

De acordo com Santa Rita (2013), a técnica CFAR consiste na definição dos perfis de potência válidos a partir da comparação em um dado ponto de uma medida, de um pico máximo de potência medido para esse perfil com a mediana e seu desvio padrão. A diferença entre as duas medidas, somadas ao desvio estabelecerá a limiar de ruído. Com isso, para uma componente ser interpretada como um multipercurso válido, deverá atender a dois requisitos, simultaneamente:

I. Se os retardos imediatamente posterior e anterior a um ponto qualquer desta medida, ultrapassaram o valor do limiar de ruído estabelecido, assim como o ponto analisado;

II. Se ao menos um dos pontos vizinhos cumpriram o requisito I.

Na Figura 18, é representada a matriz de multipercursos válidos em dBm resultante da filtragem pela técnica CFAR. Observa-se a grande quantidade de valores de -60 dBm, que é um valor arbitrário escolhido para simbolizar os multipercursos não válidos.

Figura 18. Matriz de Multipercursos válidos

Multipercurso_Valido

494x2175 double

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	-60	-60	-60	-60	-60	-19.1348	-60	-60	-60	-60
2	0	-60	-60	-60	-15.4377	-60	-18.2858	-60	-60	-23.5438	-60
3	0	-60	-60	-60	-16.0725	-60	-18.4754	-60	-60	-60	-60
4	0	-60	-60	-60	-15.9094	-60	-60	-20.2364	-60	-20.0698	-60
5	0	-60	-60	-60	-16.8828	-60	-19.5765	-60	-60	-60	-60
6	0	-60	-60	-60	-17.5359	-60	-19.9092	-60	-60	-20.4084	-60
7	0	-60	-60	-60	-14.6125	-60	-19.5474	-60	-60	-18.5712	-60
8	0	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-18.0281	-60	-60	-19.3355
9	0	-60	-60	-60	-14.3908	-60	-60	-18.4219	-60	-21.6595	-60
10	0	-60	-60	-60	-13.6435	-60	-60	-14.7473	-60	-60	-20.2933
11	0	-60	-60	-60	-14.5157	-60	-60	-19.6882	-60	-24.5844	-60
12	0	-60	-60	-60	-14.4420	-60	-60	-17.0649	-60	-23.0936	-60
13	0	-60	-60	-60	-60	-60	-18.9493	-60	-60	-60	-60
14	0	-60	-60	-13.6579	-60	-60	-16.2925	-60	-60	-19.1466	-60
15	0	-60	-60	-60	-13.7413	-60	-60	-60	-60	-20.9736	-60
16	0	-60	-60	-60	-13.9637	-60	-60	-60	-60	-60	-20.9532
17	0	-60	-60	-60	-13.8987	-60	-60	-60	-60	-60	-21.8241
18	0	-60	-60	-60	0	-60	-60	-60	-60	-60	-60
19	-0.5697	-60	-60	-60	-14.9688	-60	-60	-60	-60	-60	-21.7698

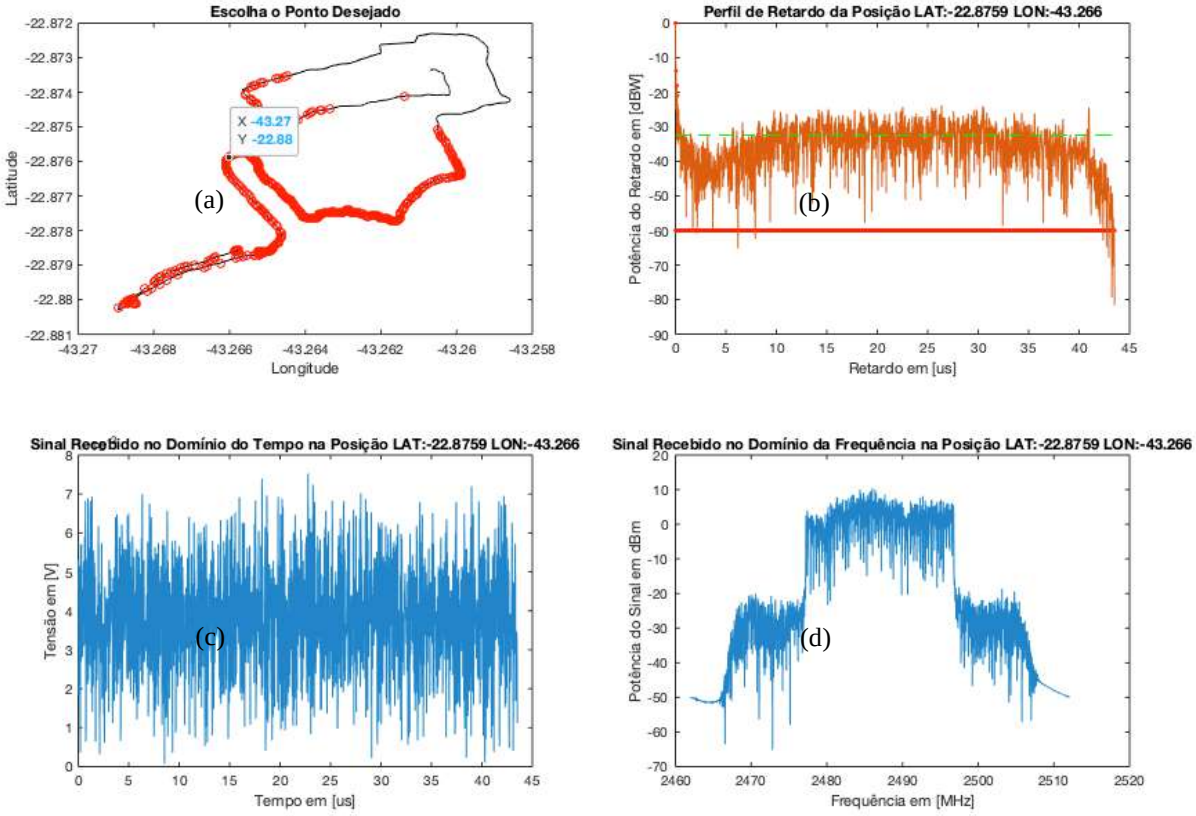
Fonte: Autor

Na Figura 18, é representado graficamente cada retardo válido capturando durante a campanha de medição, representados pelos círculos vermelhos. Ao clicar em qualquer ponto na Figura (a), será apresentado o seu respectivo Perfil de Retardo junto com o seu limiar e mediana

obtidas a partir da técnica CFAR na Figura (b), o seu comportamento no domínio do tempo na Figura (c) e no domínio da frequência na Figura (d).

Figura 18: Rota de recepção do sinal (a), Perfil de retardo (b), Sinal recebido no domínio do tempo (c) e Sinal recebido no domínio da frequência (d)

Figura 19. Rota de recepção do sinal (a), Perfil de retardo (b), Sinal recebido no domínio do tempo (c) e Sinal recebido no domínio da frequência (d)



Fonte: Autor

Após a limpeza dos perfis de retardos recebidos, encontrou-se os valores de Retardo Médio e o Espalhamento de Retardo RMS de cada componente. Em seguida, foram calculadas a média e o desvio padrão de cada parâmetro, resultando na Tabela 3. A partir desses valores, é possível determinar a banda de coerência e prefixo cíclico, além da distância entre os espalhadores.

Tabela 5. Retardo médio e espalhamento de retardo RMS

Resultados Técnica CFAR		
Parâmetro	**Média (µs)**	**Desvio Padrão (µs)**
Retardo Médio	0,1744	0,1407
Espalhamento de Retardo RMS	0,1284	0,1509

Tabela 6. Outros parâmetros de dispersão

Outros Parâmetros de dispersão		
Distância média dos espalhadores (m)	52,32	
Banda de Coerência	50%	1,558 MHZ
	90%	0,1558 MHZ
Prefixo Cíclico (µs)	1,284	
Duração do Prefixo Cíclico (µs)	0,0295	

6.2.3. Modelagem Estatística dos Parâmetros de Dispersão Temporal

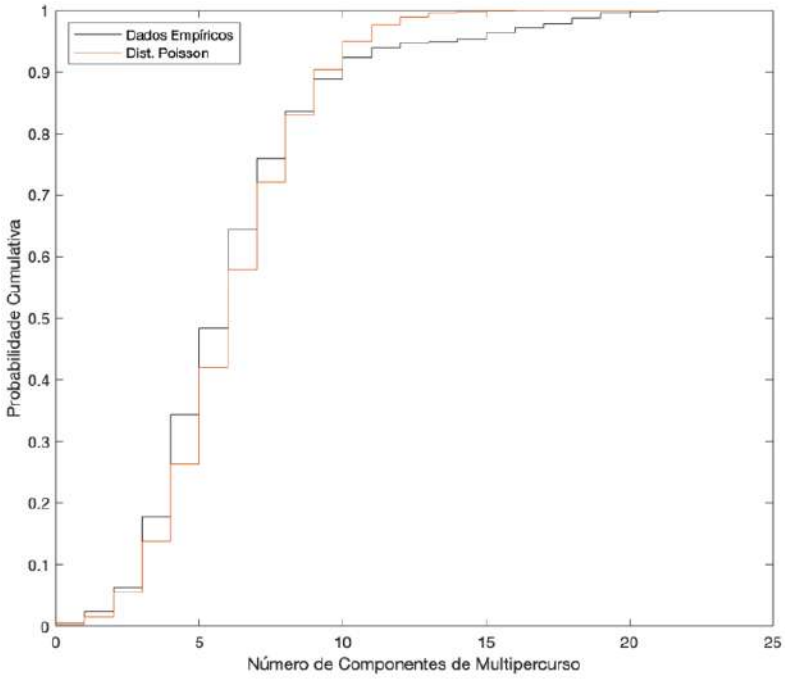
Pela característica aleatória e variante no tempo do canal rádio móvel, é necessária uma análise mais estatística para entender o comportamento dos perfis de retardo em determinadas regiões. Portanto, os dados empíricos são comparados a diferentes distribuições teóricas de probabilidade, com o objetivo de se encontrar a que mais se assemelha e entender os obstáculos sofridos pelo canal no ambiente em questão.

Neste panorama, é apresentado na Figura 21 a distribuição cumulativa dos números de componentes de multipercurso no ambiente estudado. Utilizou-se os dados válidos resultados da filtragem pela técnica CFAR. Assim, pode-se observar que os componentes de multipercurso tendem a obedecer a distribuição de Poisson, uma distribuição estatística muito utilizada para calcular probabilidades de ocorrências de imperfeições raras em sistemas, cuja fórmula é expressa por:

$$\boldsymbol{P_N(L = l) = \frac{e^{-\lambda}\lambda!}{l!}} \quad (6)$$

onde λ é o índice médio de chegadas de componentes de multipercurso.

Figura 20. Distribuição cumulativa dos números de componentes de multipercurso na região de Higienópolis

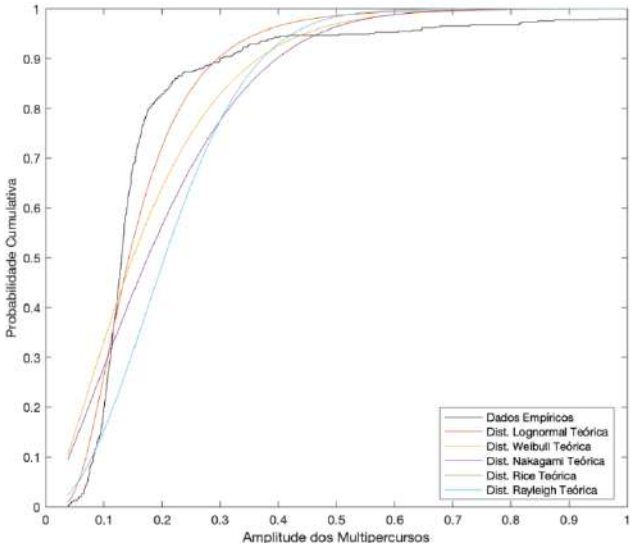


Fonte: Autor

Uma comparação da distribuição cumulativa das amplitudes dos multipercursos com as distribuições de probabilidades teóricas Rayleigh, Rice, Log-Normal, Weibull e Nakagami foi realizada e apresentada na Figura 22. Para esta avaliação, foi utilizado o teste de Kolmogorov – Smirnov, cujo critério de avaliação depende de uma hipótese (H) que comparada a probabilidade cumulativa de referência, resulta nas possíveis saídas:

- **H = 0: modelo adequado;**
- **H = 1: modelo inadequado.**

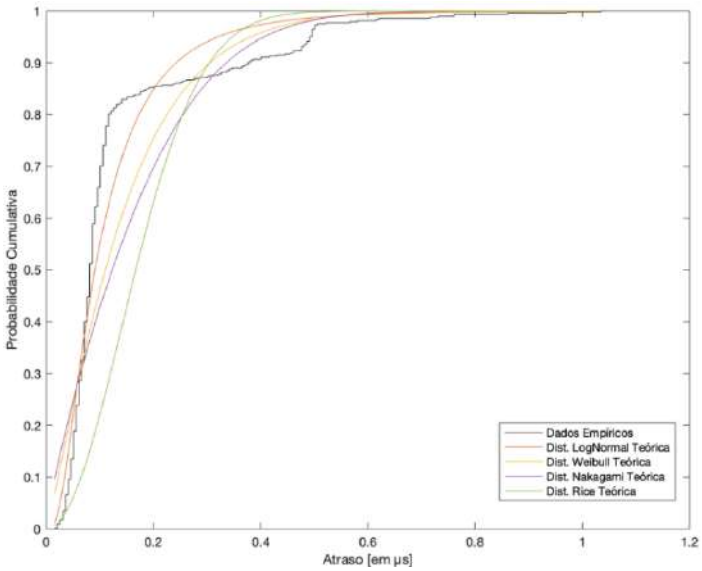
Figura 21. Distribuição cumulativa das amplitudes dos multipercursos na região de Higienópolis



Fonte: Autor

Ao realizar o teste de aderência com probabilidade, verificou-se que o valor de H foi igual a 1 (H=1) para todas as probabilidades cumulativas tidas como referência. Assim como ao observar as curvas, é possível concluir que a probabilidade cumulativa das amplitudes do canal analisado não segue nenhum padrão comportamental das probabilidades acumulativas citadas.

Figura 22. *Distribuição* Cumulativa dos Retardos RMS na Região de Higienópolis

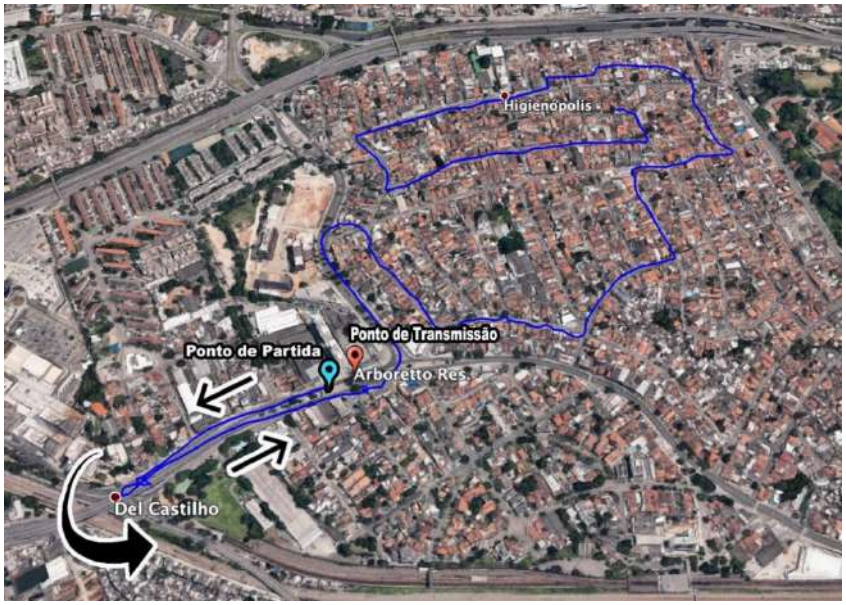


Fonte: Autor

A Figura 20 aponta que probabilidade cumulativa dos retardos RMS do canal analisado não segue nenhum padrão comportamental das distribuições probabilísticas trabalhadas neste projeto. Da mesma forma que o resultado obtido do teste de aderência foi igual a 1 (H=1). Contudo, pode-se observar um comportamento atípico nas curvas dos dados empíricos, que de certa forma confirma a falta de compatibilidade com algum modelo estatístico.

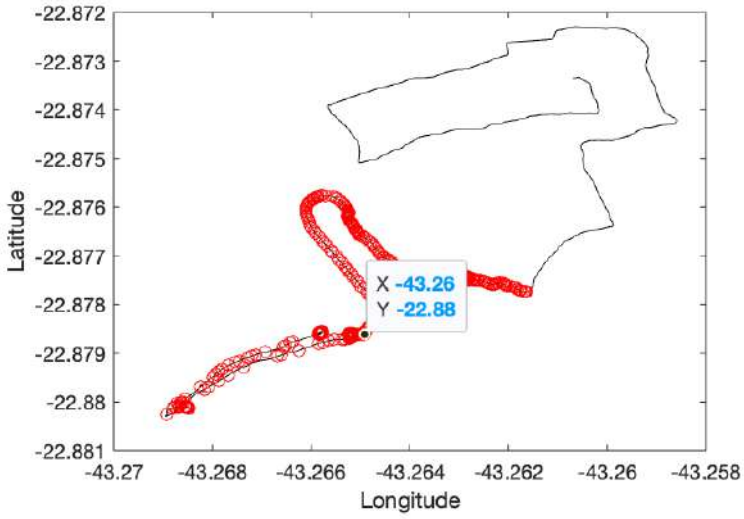
Após a constatação do comportamento anômalo nas curvas dos dados empíricos, verificados principalmente na Figura 21, e partir da visualização dos pontos, e dos testes de distribuição, percebeu-se que os resultados seriam mais satisfatórios se analisados após a passagem pelas adjacências de onde a antena transmissora estava localizada. A Figura 24 ilustra a proximidade entre o trajeto percorrido com o ponto de transmissão do sinal OFDM. E a Figura 22 ilustra o ponto limite das interferências.

Figura 23. Trajeto das medições incluindo a proximidade entre o ponto de partida e o de transmissão



Fonte: Autor

Figura 24. Ponto limite das interferências



Fonte: Autor

Ao desconsiderar os pontos anteriores ao especificado na Figura 22, pôde-se determinar novos valores de parâmetros de dispersão, como Retardo RMS e Retardo Médio. Assim como traçar novos gráficos de distribuição cumulativa dos números de componentes de multipercurso e dos gráficos de distribuição cumulativa dos retardos RMS, conforme serão apresentados a seguir.

Tabela 7. Retardo médio e espalhamento de retardo RMS após alteração

Resultados Técnica CFAR		
Parâmetro	**Média (µs)**	**Desvio Padrão (µs)**
Retardo Médio	0,1322	0,0625
Espalhamento de Retardo RMS	0,0768	0,0616

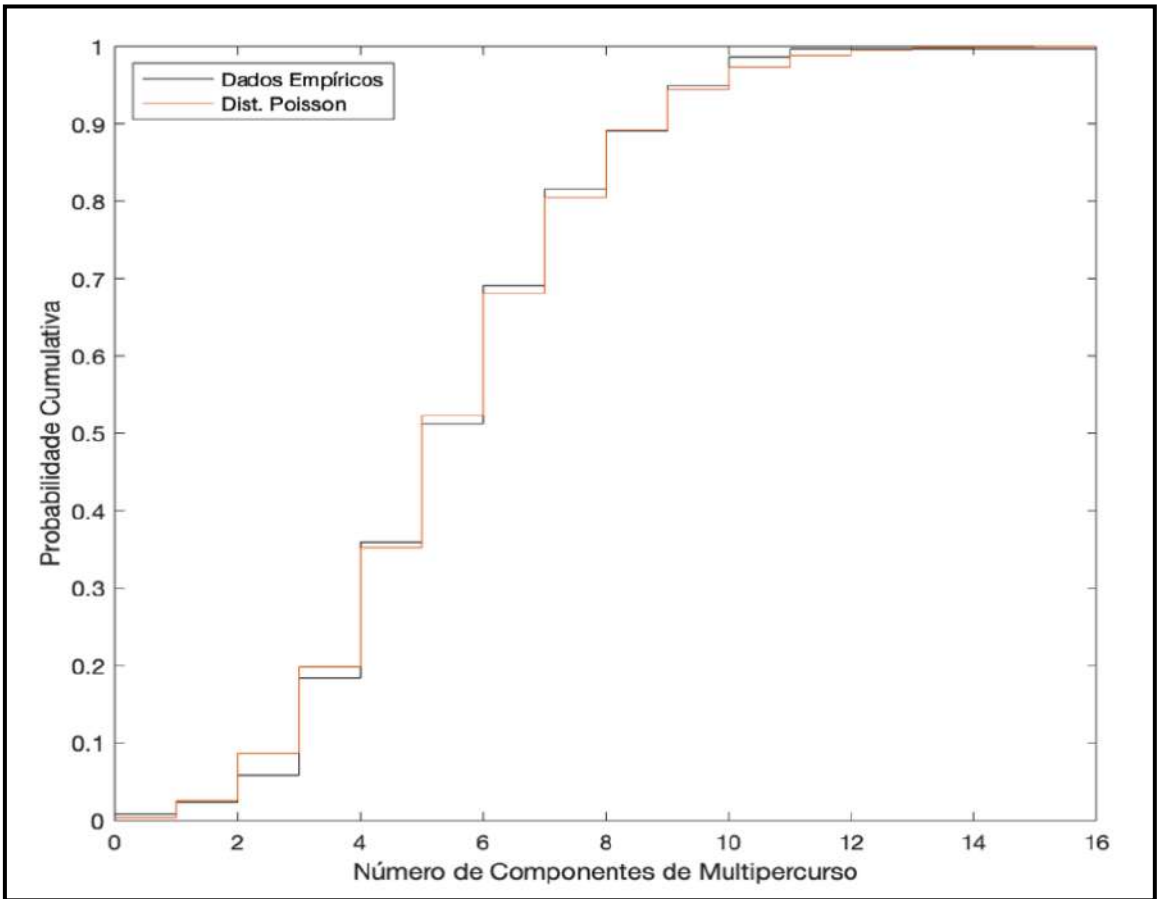
Fonte: Autor

Tabela 8. Outros parâmetros de dispersão após alteração

Outros Parâmetros de dispersão		
Distância média dos espalhadores (m)	39,66	
Banda de Coerência	50%	2,604 MHZ
	90%	0,2604 MHZ
Prefixo Cíclico (µs)	0,768	
Duração do Prefixo Cíclico (µs)	0,0176	

Fonte: Autor

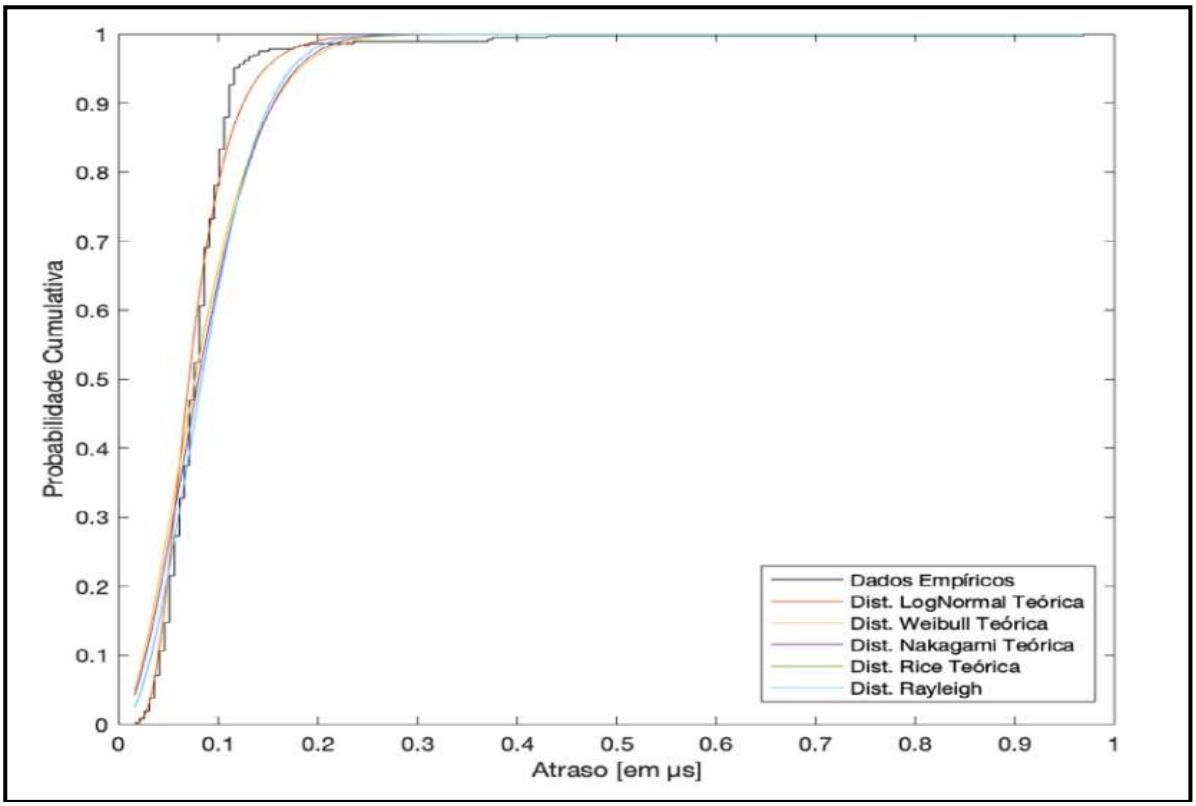
Figura 25. Distribuição cumulativa dos números de componentes de multipercurso na região de Higienópolis após alteração



Fonte: Autor

A Figura 26 mostra a reação do gráfico à diminuição do número de componentes de multipercurso do sinal analisado. Observa-se também um maior alinhamento com a distribuição de Poisson, em relação a Figura 21.

Figura 26. Distribuição Cumulativa dos Retardos RMS na Região de Higienópolis após alteração



Fonte: Autor

Apesar do resultado obtido do teste de aderência ainda ter sido igual a 1 (H=1), a curva de distribuição cumulativa dos retardos RMS apresentaram uma melhora significativa. Por análise visual, pode-se afirmar que a distribuição Log-Normal teve melhor adesão aos dados coletados.

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Como pudemos ver nas campanhas de medições de 700 Mhz, 2,5 Ghz e 3,5 Ghz, o perfil de retardo foi melhor representado pela distribuição Log normal. O que corrobora com a teoria vigente com o tipo de região que melhor representa este tipo de ambiente (Região suburbana)

Percebemos também que para as medições de 2,5 e 3,5 Ghz as atenuações de sinais se mostraram maiores que as medições em 700 Mhz, isso também corrobora a teoria vigente já que para as regiões suburbanas a componentes em visada direta são os contribuem mais com o sinal recebido. A distribuição Riceana (Ou Log normal) é a que melhor representa o sinal recebido

Durante os primeiros tratamentos de dados, percebemos que houve uma distorção nos perfis de retardo levantados, isso se deveu a um sombreamento nas proximidades de onde estava instalado a antena de transmissão. Para melhorar a performance dos dados coletados, foi preciso descartar uma parte deles. Este tipo de análise, apesar de descartar parte dos dados, conseguiu “recompor” a aderência a uma distribuição de probabilidade conhecida. A observação do circuito da campanha de medições assim como os dados que estão sendo analisados precisaram ser ajustados para que tivéssemos uma melhor interpretação dos dados pós processados.

Como sugestão de trabalhos futuros podemos destacar a sondagem dos canais para ondas milimétricas (acima dos 6 GHz) em particular as frequências em torno dos 60 e 100 GHz (frequência do 5G) assim como faixas em torno dos 3THz (Faixa prevista para o 6G). Para esses casos é factível que tenhamos somente sinais em visada direta por conta das altas frequências.

REFERÊNCIAS

[1] I**nfra News Telecom** disponível em <https://www.infranewstelecom.com.br/anatel-divulga-estudos-sobre-convivencia-entre-sistemas-5g/> acessado em 24/05/2020.

[2] **Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017 – 2022**. Disponível em <http://media.mediapost.com/uploads/CiscoForecast.pdf /> acessado em 10/01/2023

[3] Aquino, Miriam. **Anatel aponta que 5G brasileira não poderá contar com 400 MHz**. Disponível em: <http://www.telesintese.com.br/anatel-aponta-que-5g-brasileira-nao-podera-contar-com-400-mhz/> acessado em 24/05/2020

[4] M. Shafi et al., **5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice.** in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 6, pp. 1201-1221, June 2017, doi: 10.1109/JSAC.2017.2692307.

[5] **Minimum Requirements Related to Technical Performance for IMT-2020 Radio Interface(s),** document ITU-R M.[IMT-2020.TECH PERFREQ], Oct. 2016.

[6] Rappaport, T, **Wireless Communications Principles and Practice,** 2nd Edition,, Prentice Hall-2001

[7] CASTELLANOS, P. V. (29 de agosto de 2008). **Caracterização do Canal de Propagação Banda Larga na Faixa UHF para Aplicações de TV Digital.** Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Elétrica). Pontíficia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ: CETUC-PUC/RIO.

[8] KIM, H.-S. (2003). **Measurement and Model Based Characterization of Indoor Wireless Channels.** These PHD, Departament of Electrical and Computer Engineering University. Massachusetts: University of Massachusetts Lowell.

[9] KRAUS, J. D. (1992). **Eletromagnetics.** McGraw-Hill: Ed. Ohio.

[10] RITA, I. N. Comparação das técnicas CLEAR e CEFAR para análise dos parâmetros de dispersão do canal rádio móvel na faixa 2.5 GHz. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 92 f. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: PUC/RIO, 2013.

[11] SALEH, A. A., & Venezuela, R. A. (February de 1987). **A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation,**. IEEE Journal on Selected Areas in Comunications, vol. 5, no 2, pp.128-13.

[12] SAMPLEI, S. **Applications of Digital Wireless Technologies to Global Wireless Comnunications**. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1997

[13] SILVA, L. H. **Caracterização do Canal de Propagação banda larga e modelagem da perda e transmissão através de edificações em regiões urbanizadas na faixa 2.5 GHz.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil: PUC/RIO, 2013.

[14] VILLANUEVA, U. **Caracterização do Canal de Propagação com Diversidade Espacial na Faixa de 2,48 GHz em Ambientes Urbanos.** Tese de Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2015. Rio de Janeiro, RJ: PUC/RIO, 2015.

[15] VIRTUOUS. (2017). **Só Física**. Acesso em 10 de dezembro de 2022, disponível em http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Ondas/principiodehuygens.php

[16] YACOUB, M. D. (1993.). **Foundations of Mobile Radio Engineering.** Boca Raton, CRC Press.

[17] FERREIRA, Carlos Eduardo Salles. **Comparação entre métodos de sondagem do canal rádio móvel em banda larga na presença de imperfeições nas sondas.** Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: PUC/RIO, 2013.

[18] BARBOSA Filho, José Marcos Leal. **Sondagem do Canal Banda Larga sem Fio: Técnicas, Simulação e Pós-processamento de Dados.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, RN, Brasil: UFRN, 2021.

[19] Haykin, S. **Communication Systems.** 4th Edition. New York: John Wiley and Sons, 2001

[20] Netto, Fábio S; Eisencraft, M. **SEQUÊNCIAS PSEUDOALEATÓRIAS USANDO CAOS PARA SISTEMAS DE ESPALHAMENTO ESPECTRAL,** DINCON, São Paulo, 2009

[21] Gupt, Krishn K., Singh, Vinay K. **EVOLUTION OF MODERNCOMMUNICATION SYSTEMS**, International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering (IJARCCE), Vol. 5, Issue 6, 2016

[22] ITU-R. Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz. Recomendation ITU-R P.1411-3, 2005.