



PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO

ESTUDO DE MODELOS DE CANAL DE COMUNICAÇÃO SEM FIO NA FAIXA DE ONDAS MILIMÉTRICAS PARA TECNOLOGIAS 5G

Laryssa Dayse Vilar e Silva

Brasília, 04 de Julho de 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO DE MODELOS DE CANAL DE
COMUNICAÇÃO SEM FIO NA FAIXA DE
ONDAS MILIMÉTRICAS PARA TECNOLOGIAS
5G**

Laryssa Dayse Vilar e Silva

Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheira de Redes de Comunicação.

Banca Examinadora

Prof. João Paulo Leite, Dr., UnB/ENE (Orientador)

Prof. Paulo Henrique Portela de Carvalho, Dr.,
UnB/ENE

Prof. Plínio Ricardo Ganime Alves, Dr., UnB/ENE

Brasília, 04 de Julho de 2016

Agradecimentos

À minha mãe, Aparecida, força motriz dessa conquista e a quem tudo isto é devido. Mãe, você é o retrato fiel de uma verdadeira heroína.

Ao Pedro, por tamanho carinho, paciência e curiosidade.

Ao meu orientador e indispensável guia, Prof. Dr. João Paulo, pelo incentivo, entusiasmo e, essencialmente, pela liberdade criativa que me facultou durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade de Brasília, pela oportunidade que me proporcionou e pela certeza de uma formação de excelência, fruto do mérito aqui presente.

Aos meus estimados companheiros de graduação, responsáveis por tornar meu dia-a-dia mais proveitoso, intenso, doce e sustentável.

Aos demais amigos e familiares, por se importarem, e serem um sustentáculo indireto desse ciclo que se encerra.

Laryssa Dayse Vilar e Silva

A quinta geração de redes celulares, 5G, inicialmente prevista para iniciar sua introdução ao mercado em 2020, já propõe desafios que incluem a necessidade de uma rede extremamente robusta, com elevada taxa de dados, elevada largura de banda e baixíssima latência, capaz de agregar uma quantidade massiva funcionalidades e dispositivos, principalmente com o advento da Internet das Coisas, e garantindo excelente experiência ao usuário. Além disso, despontou com o desenvolvimento da quinta geração a convicção de que a faixa operacional da 4ª geração de redes celulares (2,5 a 2,69 GHz) e outros sistemas de radiofrequência (RF) no espectro eletromagnético pode não ser capaz de comportar o volume de recursos da 5ª geração, direcionando a implementação desses sistemas na faixa de ondas milimétricas (30 GHz a 300 GHz).

Focando nisso, este trabalho apresenta um estudo acerca do canal de comunicação sem fio na faixa milimétrica. Esse extensivo estudo foi concluído a partir de simulações em torno da faixa de 60 GHz com os modelos de canal considerados mais ajustados a essa tecnologia: de Saleh-Valenzuela, IEEE 802.15.3c e IEEE 802.11ad. A comparação entre os resultados das simulações e algumas medições reais desses sistemas feitas por pesquisadores e estudiosos traz, por fim, um valioso exame das características desse canal e seu comportamento.

Palavras-chave: 5G, ondas milimétricas, modelos de canal, 60 GHz, de Saleh-Valenzuela, IEEE 802.15.3c, IEEE 802.11ad.

The fifth generation of cellular networks, 5G, originally scheduled to start its introduction to the market in 2020, already proposes challenges that include the need for an extremely robust network with incredibly high data rates and very low latency, capable of putting together a massive amount features and devices, especially with the advent of the Internet of Things, and ensuring excellent user experience. Moreover, it emerged with the development of the fifth generation the conviction that the operating range of the 4th generation of cellular networks (2.5 to 2.69 GHz) and other radiofrequency (RF) systems in the electromagnetic spectrum can not be able to support the volume of 5th generation resources, directing the implementation of those systems in the millimeter waves range (30 GHz to 300 GHz).

Focusing on this, this paper presents a study of the wireless communication channel in the millimeter range. This extensive study was completed from simulations around the 60 GHz band with channel models considered more suited to this technology: de Saleh-Valenzuela, IEEE 802.15.3c and IEEE 802.11ad. The comparison between the simulation results and some actual measurements of these systems made by researchers and scholars brings ultimately a valuable examination of the characteristics of this channel and its behavior.

Keywords: 5G, millimeter waves, channel modelling, 60 GHz, de Saleh-Valenzuela, IEEE 802.15.3c, IEEE 802.11ad.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	1
1.3 OBJETIVOS	7
1.3.1 Objetivo geral.....	7
1.3.2 Objetivos específicos	7
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	7
2 MODELOS DE DESVANECIMENTO PARA O CANAL DE COMUNICAÇÃO SEM FIO	9
2.1 INTRODUÇÃO	9
2.2 TIPOS DE DESVANECIMENTO	9
2.3 DESVANECIMENTO BANDA LARGA.....	14
2.4 MODELOS DE CANAIS BASEADOS EM <i>CLUSTERS</i>	18
2.5 CONCLUSÕES	20
3 MODELO DE SALEH-VALENZUELA.....	21
3.1 INTRODUÇÃO	21
3.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.3 METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO	24
3.4 RESULTADOS.....	25
3.4.1 Perfil de potência do atraso	25
3.4.2 Tempos entre chegadas.....	26
3.4.3 Espalhamento de atraso RMS	27
3.4.4 Distribuição de probabilidade das amplitudes.....	29
3.4.5 Resposta impulsional do canal	29
3.4.6 Resposta em frequência	31
3.5 CONCLUSÕES	32
4 MODELO IEEE 802.15.3c.....	33
4.1 INTRODUÇÃO	33
4.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
4.3 METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO	40
4.4 RESULTADOS.....	42
4.4.1 Residencial	43
4.4.1.1 Perfil de potência do atraso.....	43
4.4.1.2 Espalhamento de atraso RMS.....	48
4.4.1.3 Distribuição de probabilidade das potências.....	50
4.4.1.4 Resposta impulsional do canal.....	52
4.4.1.5 Resposta em frequência.....	57
4.4.2 Escritório (LOS)	59
4.4.2.1 Perfil de potência do atraso.....	60
4.4.2.2 Espalhamento de atraso RMS.....	62
4.4.2.3 Distribuição de probabilidade das potências.....	64

4.4.2.4 Resposta impulsional do canal.....	65
4.4.2.5 Resposta em frequência.....	68
4.4.3 Escritório (NLOS).....	69
4.4.3.1 Perfil de potência do atraso.....	69
4.4.3.2 Espalhamento de atraso RMS.....	71
4.4.3.3 Distribuição de probabilidade das potências.....	73
4.4.3.4 Resposta impulsional do canal.....	74
4.4.3.5 Resposta em frequência.....	76
4.4.4 Área de trabalho (Desktop)	77
4.4.4.1 Perfil de potência do atraso.....	77
4.4.4.2 Espalhamento de atraso RMS.....	80
4.4.4.3 Distribuição de probabilidade das potências.....	81
4.4.4.4 Resposta impulsional do canal.....	82
4.4.4.5 Resposta em frequência.....	85
4.4.5 Kiosk.....	86
4.4.5.1 Perfil de potência do atraso.....	87
4.4.5.2 Espalhamento de atraso RMS.....	90
4.4.5.3 Distribuição de probabilidade das potências.....	91
4.4.5.4 Resposta impulsional do canal.....	92
4.4.5.5 Resposta em frequência.....	95
4.5 CONCLUSÕES	96
5 MODELO IEEE 802.11.ad	99
5.1 INTRODUÇÃO	99
5.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	99
5.3 METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO	110
5.4 RESULTADOS.....	111
5.4.1 Sala de conferências (LOS)	111
5.4.1.1 Resposta impulsional do canal.....	111
5.4.1.2 Resposta em frequência.....	115
5.4.2 Sala de conferências (NLOS)	117
5.4.2.1 Resposta impulsional do canal.....	117
5.4.2.2 Resposta em frequência.....	121
5.4.3 Cubículo (LOS)	123
5.4.3.1 Resposta impulsional do canal.....	123
5.4.3.2 Resposta em frequência.....	125
5.4.4 Cubículo (NLOS)	126
5.4.4.1 Resposta impulsional do canal.....	126
5.4.4.2 Resposta em frequência.....	129
5.4.5 Sala de estar (LOS)	129
5.4.5.1 Resposta impulsional do canal.....	129
5.4.5.2 Resposta em frequência.....	132
5.4.6 Sala de estar (NLOS)	132
5.4.6.1 Resposta impulsional do canal.....	132
5.5 CONCLUSÕES	135
6 CONCLUSÕES	136
6.1 CONCLUSÕES GERAIS.....	136
6.2 TRABALHOS FUTUROS.....	137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	138
APÊNDICE A.....	141
A.1 REALIZAÇÃO DE CANAL ALTERNATIVA DO AMBIENTE RESIDENCIAL TX: 360º, Rx: 15º DO MODELO IEEE 802.15.3C.....	141

LISTA DE FIGURAS

1.1	Uso da Internet no Brasil feito pela agência de marketing social <i>We Are Social</i>	2
1.2	Crescimento das redes móveis 3G/4G no mundo	2
1.3	Aplicações móveis dispositivo-para-dispositivo (D2D – do inglês <i>Device-2-Device</i>) .	3
1.4	Comparação entre as larguras dos feixes de ondas milimétricas e microondas	5
1.5	Picos de absorção atmosférica no espectro eletromagnético	5
1.6	Perdas no espaço livre mais absorção em função da distância. É interessante notar a predominância da perda no espaço livre em 60 GHz a partir de 9 Km de distância	6
2.1	Sistema de comunicação genérico adaptado de SHANNON; WEAVER (1949).....	10
2.2	Propagação por múltiplos percursos.....	11
2.3	Resposta impulsional de um canal de múltiplos percursos: cada impulso em τ_N representa um percurso diferente percorrido pelo sinal.....	11
2.4	Desvanecimento de larga e pequena escala	12
2.5	Desvanecimento plano do sinal	13
2.6	Desvanecimento seletivo em frequência	13
2.7	Desvio Doppler	14
2.8	Formação de múltiplos percursos por espalhadores.....	15
2.9	Interferência inter-simbólica no canal de banda larga	16
2.10	Resposta impulsional do canal de banda larga	17
2.11	Canal baseado em <i>clusters</i>	19
3.1	Perfil de potencia do atraso (PDP) do modelo de Saleh-Valenzuela	22
3.2	Fluxograma da simulação do modelo de Saleh-Valenzuela	24
3.3	Perfil de potência do atraso extraído das simulações do canal de Saleh-Valenzuela	26
3.4	Função distribuição de probabilidade dos tempos entre chegadas dos <i>clusters</i>	27
3.5	Função distribuição de probabilidade dos tempos entre chegadas dos raios dentro dos <i>clusters</i>	27
3.6	Espalhamento de atraso RMS extraído das simulações do canal de Saleh-Valenzuela.....	28
3.7	Distribuição de probabilidade das amplitudes do canal de Saleh-Valenzuela.....	29
3.8	Resposta em amplitude do canal de Saleh-Valenzuela	30
3.9	Resposta em fase do canal de Saleh-Valenzuela	30
3.10	Resposta em frequência do canal de Saleh-Valenzuela	31
4.1	Ganho da antena pelo modelo de antena de referência.....	35
4.2	Perfil de potência do atraso do modelo IEEE 802.15.3c.....	37
4.3	Fluxograma da simulação do modelo IEEE 802.15.3c	41
4.4	Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 360°, Rx: 15°	44
4.5	Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Residencial (LOS) Tx: 360°, Rx: 15°	44
4.6	Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 60°, Rx: 15°.....	45
4.7	Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Residencial (LOS) Tx: 60°, Rx: 15°	45
4.8	Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 30°, Rx: 15°.....	46
4.9	Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Residencial (LOS) Tx: 30°, Rx: 15°	46
4.10	Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 15°, Rx: 15°.....	47

4.11	Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Residencial (LOS) Tx: 15°, Rx: 15°	47
4.12	Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 360°, Rx: 15°....	48
4.13	Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 60°, Rx: 15°	49
4.14	Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 30°, Rx: 15°	49
4.15	Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 15°, Rx: 15°	50
4.16	PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro cluster – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 360°, Rx: 15°.....	51
4.17	PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro cluster – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 60°, Rx: 15°	51
4.18	PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro cluster – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 30°, Rx: 15°	52
4.19	PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro cluster – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 15°, Rx: 15°	52
4.20	Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 360°, Rx: 15°.....	53
4.21	Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 360°, Rx: 15°.....	54
4.22	Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 60°, Rx: 15°.....	54
4.23	Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 60°, Rx: 15°.....	55
4.24	Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 30°, Rx: 15°.....	55
4.25	Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 30°, Rx: 15°.....	56
4.26	Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 15°, Rx: 15°.....	56
4.27	Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 15°, Rx: 15°.....	57
4.28	Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 360°, Rx: 15°.....	57
4.29	Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 60°, Rx: 15°	58
4.30	Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 30°, Rx: 15°	58
4.31	Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 15°, Rx: 15°	59
4.32	Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°.....	60
4.33	Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Escritório (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°	61
4.34	Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°.....	61
4.35	Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Escritório (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°	62
4.36	Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°.....	63
4.37	Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°.....	63
4.38	PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro cluster – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°.....	64
4.39	PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro cluster – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°.....	65
4.40	Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°.....	66
4.41	Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°.....	66
4.42	Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°.....	67

4.43 Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°	67
4.44 Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°	68
4.45 Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°	68
4.46 Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 360°, Rx: 15°	69
4.47 Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 360°, Rx: 15°	70
4.48 Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 30°, Rx: 15°	70
4.49 Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 30°, Rx: 15°	71
4.50 Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 360°, Rx: 15°	72
4.51 Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 30°, Rx: 15°	72
4.52 PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro cluster – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 360°, Rx: 15°	73
4.53 PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro cluster – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 30°, Rx: 15°	73
4.54 Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 360°, Rx: 15°	74
4.55 Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 360°, Rx: 15°	75
4.56 Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 30°, Rx: 15°	75
4.57 Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 30°, Rx: 15°	76
4.58 Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 360°, Rx: 15°	76
4.59 Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 30°, Rx: 15°	77
4.60 Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°	78
4.61 Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°	78
4.62 Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°	79
4.63 Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°	79
4.64 Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°	80
4.65 Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°	81
4.66 PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro cluster – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°	82
4.67 PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro cluster – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°	82
4.68 Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°	83
4.69 Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°	83
4.70 Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°	84
4.71 Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°	84
4.72 Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°	85

4.73 Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°	86
4.74 Cenários do ambiente kiosk: campanha de medição do ambiente/cenário 1 (cima) e campanha de medição do ambiente/cenário 2 (abaixo)	87
4.75 Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Kiosk (LOS) – Cenário 1	88
4.76 Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Kiosk (LOS) – Cenário 1	88
4.77 Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Kiosk (LOS) – Cenário 2	89
4.78 Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Kiosk (LOS) – Cenário 2	89
4.79 Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Kiosk (LOS) – Cenário 1	90
4.80 Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Kiosk (LOS) – Cenário 2	90
4.81 PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro cluster – Ambiente Kiosk (LOS) - Cenário 1	91
4.82 PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro cluster – Ambiente Kiosk (LOS) - Cenário 2	92
4.83 Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Kiosk (LOS) Tx: 30°, Rx: 30° - Cenário 1	93
4.84 Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Kiosk (LOS) Tx: 30°, Rx: 30° - Cenário 1	93
4.85 Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Kiosk (LOS) Tx: 30°, Rx: 30° - Cenário 2	94
4.86 Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Kiosk (LOS) Tx: 30°, Rx: 30° - Cenário 2	94
4.87 Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Kiosk (LOS) Tx: 30°, Rx: 30° - Cenário 1	95
4.88 Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Kiosk (LOS) Tx: 30°, Rx: 30° - Cenário 2	96
5.1 Ambiente de propagação sala de conferência	100
5.2 Ambiente de propagação cubículo (os cubículos são as áreas destacadas em laranja)	100
5.3 Ambiente de propagação sala de estar	101
5.4 Processo de reflexão de primeira ordem	103
5.5 Identificação dos clusters para o ambiente “sala de estar”	105
5.6 Distribuições empíricas dos tempos de chegada obtidas por <i>ray-tracing</i> (linhas sólidas) e aproximações utilizadas no modelo (linhas tracejadas) para o ambiente “sala de conferência”	107
5.7 Estrutura do cluster no domínio do tempo	107
5.8 Estrutura geral de simulação do modelo IEEE 802.11ad	110
5.9 Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (LOS), STA-STA	111
5.10 Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (LOS), STA-STA	112
5.11 Perspectiva Atrasos x Azimute no Tx e Rx. Ambiente Sala de conferência (LOS), STA-STA	112
5.12 Perspectiva Atrasos x Elevação no Tx e Rx. Ambiente Sala de conferência (LOS), STA-STA	113
5.13 Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (LOS), STA-AP	113
5.14 Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (LOS), STA-AP	114
5.15 Perspectiva Atrasos x Azimute no Tx e Rx. Ambiente Sala de conferência (LOS), STA-AP	114
5.16 Perspectiva Atrasos x Elevação no Tx e Rx. Ambiente Sala de conferência (LOS), STA-AP	115
5.17 Resposta em frequência do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (LOS), STA-STA	116

5.18 Resposta em frequência do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (LOS), STA-AP.....	116
5.19 Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (NLOS), STA-STA.....	117
5.20 Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (NLOS), STA-STA.....	118
5.21 Perspectiva Atrasos x Azimute no Tx e Rx. Ambiente Sala de conferência (NLOS), STA-STA.....	118
5.22 Perspectiva Atrasos x Elevação no Tx e Rx. Ambiente Sala de conferência (NLOS), STA-STA.....	119
5.23. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (NLOS), STA-AP.....	119
5.24 Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (NLOS), STA-AP.....	120
5.25 Perspectiva Atrasos x Azimute no Tx e Rx. Ambiente Sala de conferência (NLOS), STA-AP.....	120
5.26 Perspectiva Atrasos x Elevação no Tx e Rx. Ambiente Sala de conferência (NLOS), STA-AP.....	121
5.27 Resposta em frequência do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (NLOS), STA-STA.....	122
5.28 Resposta em frequência do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (NLOS), STA-AP.....	122
5.29 Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Cubículo (LOS).....	123
5.30 Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Cubículo (LOS).....	124
5.31 Perspectiva Atrasos x Azimute no Tx e Rx. Ambiente Cubículo (LOS).....	124
5.32 Perspectiva Atrasos x Elevação no Tx e Rx. Ambiente Cubículo (LOS).....	125
5.33 Resposta em frequência do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Cubículo (LOS) ...	126
5.34 Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Cubículo (NLOS).....	127
5.35 Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Cubículo (NLOS).....	12
7	
5.36 Perspectiva Atrasos x Azimute no Tx e Rx. Ambiente Cubículo (NLOS).....	128
5.37 Perspectiva Atrasos x Elevação no Tx e Rx. Ambiente Cubículo (NLOS).....	128
5.38 Resposta em frequência do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Cubículo (NLOS) .	129
5.39 Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de estar (LOS).....	130
5.40 Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de estar (LOS).....	130
5.41 Perspectiva Atrasos x Azimute no Tx e Rx. Ambiente Sala de estar (LOS)	131
5.42 Perspectiva Atrasos x Elevação no Tx e Rx. Ambiente Sala de estar (LOS)	131
5.43 Resposta em frequência do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de estar (LOS).....	13
2	
5.44 Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de estar (NLOS).....	133
5.45 Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de estar (NLOS).....	133
5.46 Perspectiva Atrasos x Azimute no Tx e Rx. Ambiente Sala de estar (NLOS)	134
5.47 Perspectiva Atrasos x Elevação no Tx e Rx. Ambiente Sala de estar (NLOS)	134
A.1 Perfil de potência do atraso alternativo do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 360°, Rx: 15°.....	141

LISTA DE TABELAS

3.1	Parâmetros do modelo de Saleh-Valenzuela medidos em ambiente indoor ponto-a-ponto	24
4.1	Parâmetros para ambiente residencial LOS e NLOS i.e., CM1 e CM2. Os parâmetros foram extraídos de medições em 62,5 GHz e 3 GHz de largura de banda para uma cobertura de até 3m.....	38
4.2	Parâmetros para ambiente escritório LOS e NLOS i.e., CM3 e CM4. Os parâmetros foram extraídos de medições em 62,5 GHz e 3 GHz de largura de banda para uma cobertura de 1-5 m no caso LOS e até 10 m no caso NLOS.....	38
4.3	Parâmetros para ambiente biblioteca LOS e NLOS i.e., CM5 e CM6. Os parâmetros foram extraídos de medições em 60 GHz e 1 GHz de largura de banda para uma cobertura de 2-5 m.....	39
4.4	Parâmetros para ambiente área de trabalho LOS e NLOS, i.e., CM7 e CM8. Os parâmetros foram extraídos de medições em 62,5 GHz e 3 GHz de largura de banda para uma cobertura de 5 m. No entanto, para as medições com antena omnidirecional as medições foram centradas em 60 GHz com 10 GHz de largura de banda e cobertura de 2 m.....	39
4.5	Parâmetros para ambiente kiosk LOS i.e., CM9. Os parâmetros foram extraídos de medições em 62,5 GHz e 3 GHz de largura de banda para uma cobertura de 1 m.....	40
5.1	Número de clusters para o ambiente "sala de estar".....	105
5.2	Distribuições empíricas dos tempos de chegada para o ambiente "sala de conferência"	106
5.3	Parâmetros intra-cluster do modelo IEEE 802.11ad para ambientes "cubículo" e "sala de conferência".....	109
5.4	Parâmetros intra-cluster do modelo IEEE 802.11ad para ambientes "sala de estar".....	109

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Gregos

π Pi [3.14159265359]

Grupos Adimensionais

dB Decibel

Subscritos

amb ambiente

Sobrescritos

– Valor médio

Siglas

3G 3ª Geração de redes móveis
4G 4ª Geração de redes móveis
5G 5ª Geração de redes móveis
AoA *Angle of Arrival (Ângulo de Chegada)*
AP *Access Point (Ponto de Acesso)*
CM *Channel Model (Modelo de Canal)*
D2D *Device-2-Device (Dispositivo-para-Dispositivo)*
HPBW *Half Power Beam Width (Largura de Feixe de Meia Potência)*
ITU *International Telecommunications Union (União Internacional de Telecomunicações)*
LOS *Line of Sight (Linha de Visada)*
PDF *Probability Density Function (Função Densidade de Probabilidade)*
PL *Path Loss (Perda de Percurso)*
MIMO *Multiple-Input Multiple-Output (Múltiplas-Entradas Múltiplas-Saídas)*
NICT *National Institute of Information and Communications Technology (Instituto Nacional de Tecnologia da Informação e Comunicações)*
NICTA *National Institute of Information and Communications Technology Australia (Instituto Nacional de Tecnologia da Informação e Comunicações Australia)*
NLOS *Non Line of Sight (Sem Linha de Visada)*
PDP *Power Delay profile (Perfil de Potência do Atraso)*
RF Radiofrequência
RMS *Root Mean Square (Valor Quadrático Médio)*
Rx Receptor
Tx Transmissor
WSSUS *Wide-Sense Stationary and Uncorrelated Scattering (Estacionário no Sentido Amplo e de Espalhamento Não Correlacionado)*

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma revisão do atual estado da arte das redes móveis em sua quarta geração. Inicialmente, busca apresentar a realidade desses sistemas atualmente e o quanto esses sistemas ainda tendem a crescer no futuro. Nesse contexto, traça-se, de forma breve, os desafios inerentes à esse crescimento em nível tecnológico e de serviços.

Um desafio particular a ser tratado nesse processo é a escassez espectral na atual faixa de operação dos sistemas celulares 4G. Dessa forma, surge a necessidade de se explorar novas faixas de frequência capazes de comportar a evolução prevista para os sistemas do futuro. Esse futuro é o desenvolvimento da quinta geração de redes celulares – 5G, e essas novas faixas de frequência são aquelas de comprimentos de onda milimétricos.

A motivação deste trabalho reside, portanto, em compreender o canal de comunicação na faixa de ondas milimétricas, visando a melhor forma de representá-lo e adequá-lo aos sistemas que estão por vir.

Partindo dessa motivação, o capítulo pontua os objetivos gerais e específicos almejados por este trabalho e, por fim, descreve como é estruturado este documento.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Em 2015, a ITU (*International Telecommunications Union* – em português União Internacional de Telecomunicações) divulgou um relatório anunciando que o número de telefones celulares no mundo havia ultrapassado a casa dos sete bilhões, e que o acesso à Internet se tornara uma realidade para 3,2 bilhões de pessoas ao redor do mundo [1]. Esses números transparecem um progresso tecnológico que é visível no nosso dia-a-dia. As pessoas estão *online* durante todo o dia, navegando na *Web*, compartilhando fotos, liberando *streamings*, atualizando as redes sociais. E fazem isso de suas casas, da rua, dos escritórios, das universidades, dos carros, do transporte público, enfim, de qualquer lugar.

As Figs. 1.1 e 1.2 mostram como o uso das redes móveis no Brasil e no mundo é uma variável crescente, tanto em termos de acesso, quanto em termos de velocidade de transmissão, ilustrando o progresso tecnológico citado acima.

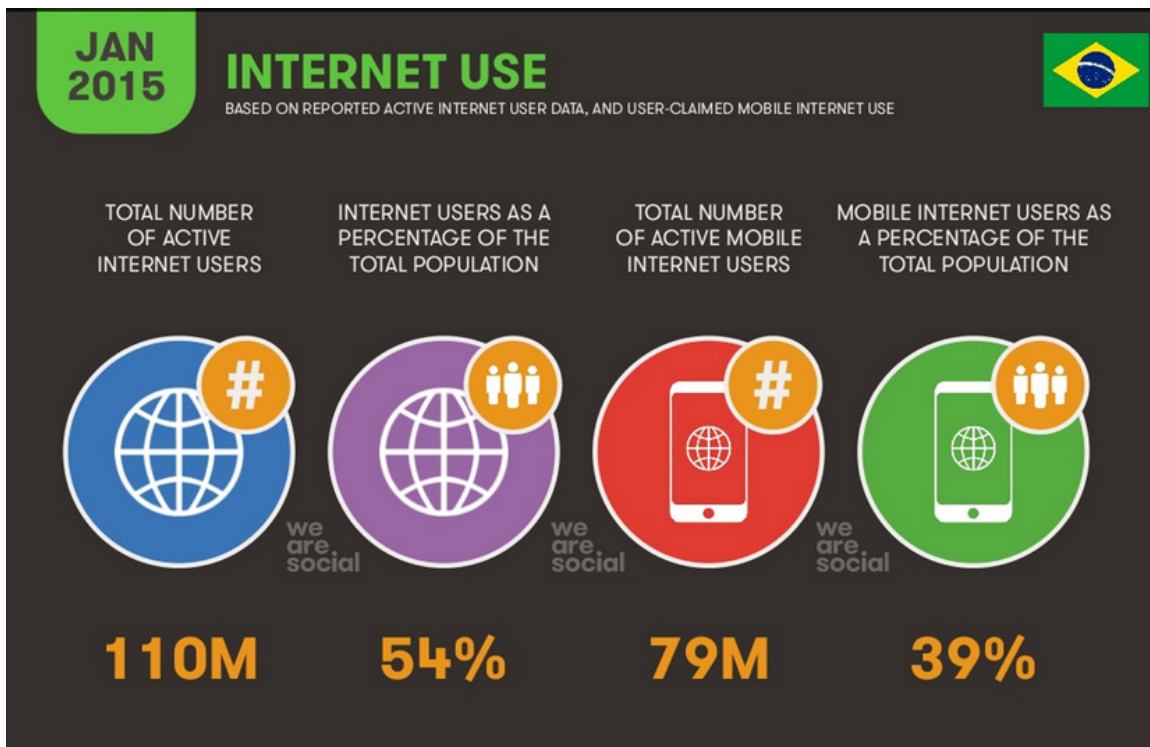


Figura 1.1. Uso da Internet no Brasil feito pela agência de marketing social *We Are Social* [2].

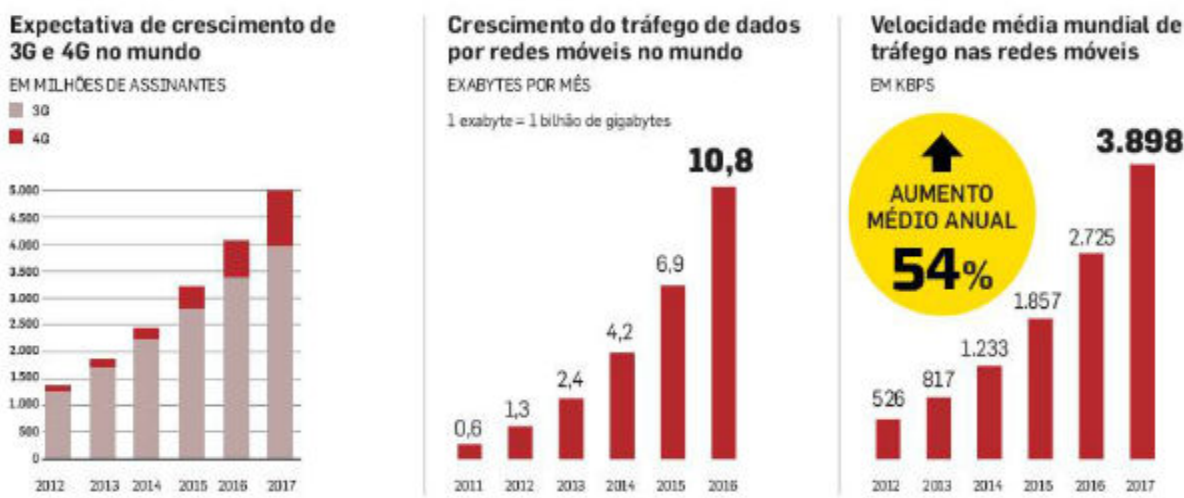


Figura 1.2. Crescimento das redes móveis 3G/4G no mundo [3].

O que é notadamente claro nesse processo é que os sistemas de comunicação precisam evoluir para dar conta dessa explosão virtual e, principalmente, para acompanhar a mais importante das constatações desse contexto: uma evolução das necessidades das pessoas. No final dos anos 60, quando o conceito de Internet começava a se tornar realidade, a tecnologia ainda não havia mostrado do que era capaz, e revolucionário era transmitir dados entre dois computadores numa mesma sala conectados por um fio. Naquele momento, substituir as cartas, enciclopédias, revistas e jornais pareceu algo que todos sempre precisaram e que, a partir de então, tornara-se indispensável, essencial.

No entanto, os serviços considerados essenciais dessa época não mais são considerados essenciais hoje. Atualmente, as pessoas não precisam mais ir aos bancos pagar suas contas, usam o próprio carro como aparelho telefônico, gravam vídeos em *shows* e enviam aos seus amigos no mesmo instante. Logo, não se trata mais de só não precisar enviar cartas. E a tecnologia é a grande responsável por reformular esse conceito. Para o futuro, esse processo tende a se amplificar ainda mais, afinal, quando mais se conquista, mais alto se aspira.

Logo, a motivação existente no desenvolvimento da nova geração de redes celulares (5G) reside em tornar possível uma gama de cenários de comunicação e experiências para o usuário, não previstos até então, e que vieram dessa evolução nas necessidades dos consumidores, expressando aquilo que, no contexto atual, é o novo essencial. Entre esses cenários podem-se citar [4]:

- ❖ Conexões confiáveis e em tempo real para aplicações voltadas a segurança de tráfego, a fim de evitar acidentes de trânsito por meio de sistemas inteligentes e cooperativos trocando informações, conforme ilustrado na Fig 1.3;



Fig 1.3. Aplicações móveis dispositivo-para-dispositivo (D2D – do inglês *Device-2-Device*) [4].

- ❖ Troca de enorme quantidade de dados que possibilite aplicações de trabalho interativo entre pessoas em locais remotos, vislumbrando um escritório virtual;
- ❖ Garantia de conectividade em lugares de grande aglomeração de pessoas, como concertos, por exemplo;
- ❖ Número massivo de dispositivos se conectando sem congestionar a rede com o advento da Internet das Coisas;
- ❖ Aplicações em saúde pública com a popularização da *mobile health*, que propõe monitoramento remoto via rede celular dos sinais vitais de pacientes em situações de risco por seus respectivos médicos e/ou unidades de saúde.

A descrição mais superficial desses cenários já oferece um vislumbre de que o desenvolvimento de uma geração de rede celular que ampare tantas funcionalidades, atingindo o padrão de excelência esperado e para um número de usuários que aumenta consideravelmente a cada ano, demandará uma padronização muito sensível. Essa sensibilidade refere-se principalmente à necessidade de um ajuste fino de variáveis (arranjos de antena, aplicação de técnicas de *beamforming*, melhores técnicas de modulação e multiplexação considerando um número massivo de usuários compartilhando o canal, redução de interferência inter simbólica, ajuste de regiões de visibilidade, baixíssima latência etc.) que possibilite o projeto de um sistema de comunicações que atenda aos requisitos rigorosos desses novos cenários.

Um particular requisito a ser tratado nesses novos sistemas é a escassez de largura de banda disponível para atendê-los dentro da atual faixa de utilização de dos sistemas de 4ª geração. Isso traz à tona o desafio de explorar novas faixas de frequência, em especial àquelas de comprimentos de onda milimétricos, capazes de oferecer larguras de banda da ordem de gigahertz.

Pela definição da ITU, a banda de ondas milimétricas se estende de 30 a 300 GHz. No entanto, a maioria dos pesquisadores e estudiosos também inclui as frequências vizinhas, a partir de cerca de 10 a 30 GHz, porque nesta faixa as ondas já se propagam de forma semelhante às ondas milimétricas [5]. A utilização dessa faixa traria um enorme aumento à largura de banda disponível dos sistemas devido à elevada disponibilidade espectral nessa faixa de frequências, o que diretamente aumentaria a taxa de dados disponível para o usuário final que poderia chegar a fazer downloads a uma taxa de dezenas de Gb/s [5].

Historicamente, a indústria da telefonia móvel se baseou exclusivamente em uma faixa de espectro fixa — entre 300 MHz e 3 GHz — que compreende apenas cerca de 1% do espectro eletromagnético regulamentado. Dentro dessa faixa, os comprimentos de onda são curtos o suficiente (da ordem de 1 m a 10 cm) para tornar a comunicação viável com as pequenas antenas que vêm dentro dos aparelhos celulares, mas longos o suficientes para contornar e penetrar obstáculos, como prédios e folhagem. Desta forma, estas ondas podem propagar-se por vários quilômetros mantendo um nível razoável de sinal, independente do ambiente que precisarem atravessar [5].

Um comprimento de onda de ordem milimétrica – 5 mm, por exemplo — implica em um feixe de energia bastante estreito se comparado à largura do feixe da microonda, conforme ilustrado na Fig. 1.4. Isso contribui para uma maior atenuação do sinal com a distância, fazendo com que uma célula de comunicação milimétrica tenha um alcance menor do que as células dos sistemas atuais. Além disso, os comprimentos de onda curtos de sinais de ondas milimétricas resultam em baixa difração. Como as ondas de luz, esses sinais estão mais sujeitos ao sombreamento e reflexão.

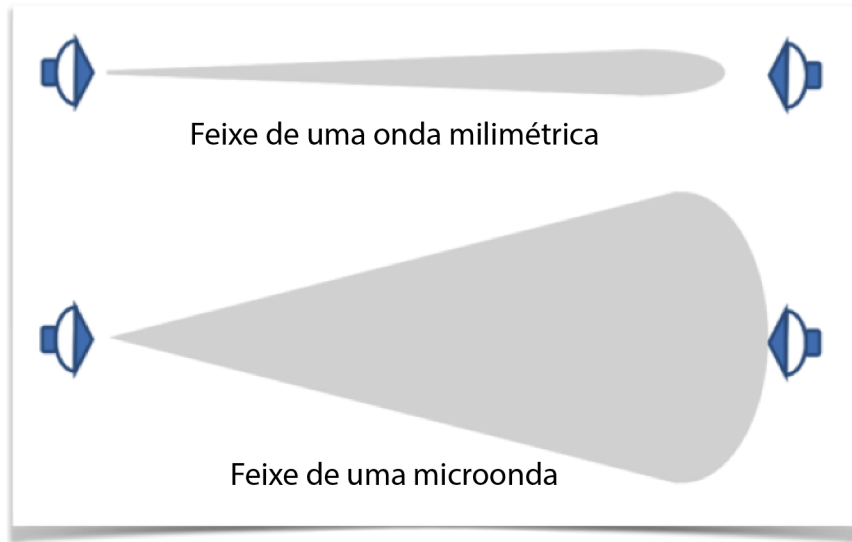


Figura 1.4. Comparação entre as larguras dos feixes de onda milimétrica e microonda. Adaptado de [6].

Ainda, uma das maiores preocupações com relação ao desempenho desses sistemas é a existência de alguns picos de atenuação em algumas frequências dessa faixa espectral devido ao fenômeno de absorção por oxigênio, vapor de água e outros constituintes da atmosfera. Isso é mais fortemente notado em 24 GHz (água) e em 60 GHz (oxigênio), conforme ilustrado na Fig. 1.5. Vale ressaltar que de todas as condições atmosféricas, a chuva é a que causa a maior atenuação em ondas milimétricas [6]. No entanto, em ambientes *outdoor* podem ocorrer ainda perdas por folhagem, que também são significativas.

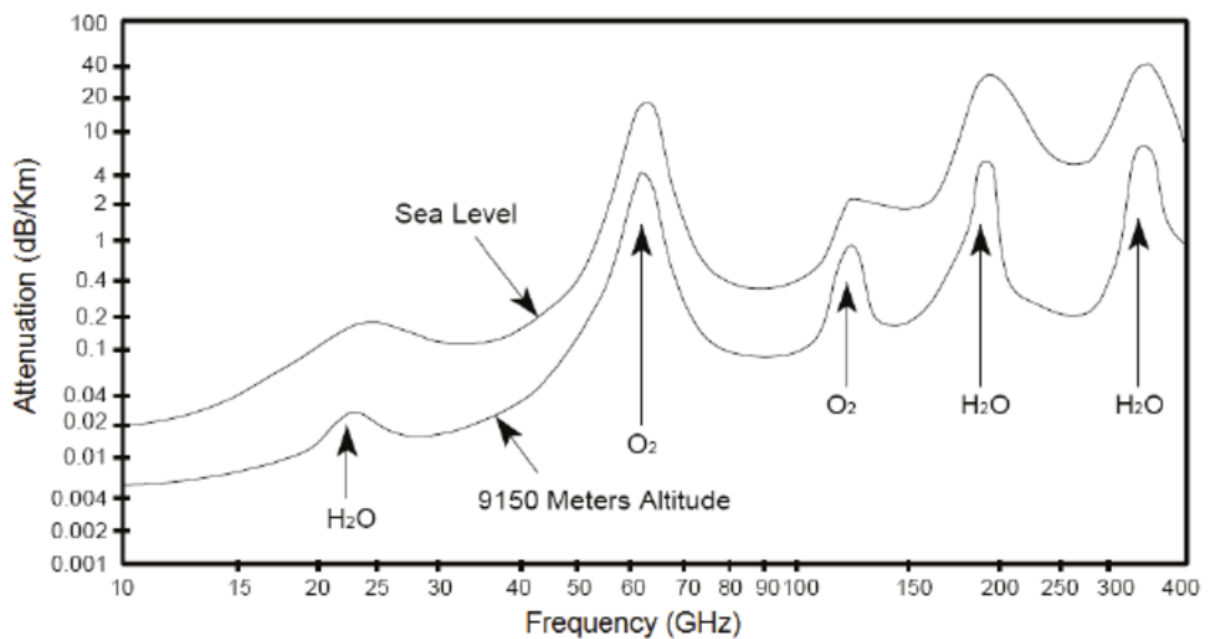


Figura 1.5. Picos de absorção atmosférica no espectro eletromagnético [6].

A grande rejeição que existe do espectro de ondas milimétricas por parte das indústrias e até mesmo de alguns pesquisadores acontece porque os componentes de rádio necessários para colocar esses sistemas em pleno funcionamento eram caros e porque muitos acreditavam que essas frequências apresentariam baixo desempenho de propagação no ambiente, sendo excessivamente absorvidas ou espalhadas pela atmosfera, chuva e vegetação, como já dito, e não conseguindo penetrar nem contornar obstáculos [5].

Porém, esses receios vêm desaparecendo. As recentes pesquisas em comunicações móveis na faixa milimétrica têm mostrado que esses sistemas podem ser bastante viáveis e eficazes, pois, de fato, existem diversas técnicas que podem ser aplicadas para otimizar o desempenho desses sistemas, derrubando o estigma existente em torno deles.

Por exemplo, a perda de absorção por oxigênio de até 20 dB/km é quase desprezível para redes que operam dentro de 100 m, algo que não acontece para comunicações de longas distâncias, conforme ilustrado na Fig. 1.6. Esse afastamento das comunicações de longa distância beneficia as comunicações de curta distância porque permite um intenso reuso de frequência com redes operando simultaneamente sem interferir de forma tão prejudicial uma na outra. Adicionalmente, as antenas altamente direcionais exigidas para mitigar a perda de percurso podem, por sua vez, trabalhar para promover confidencialidade às transmissões, no contexto da segurança de dados [5].

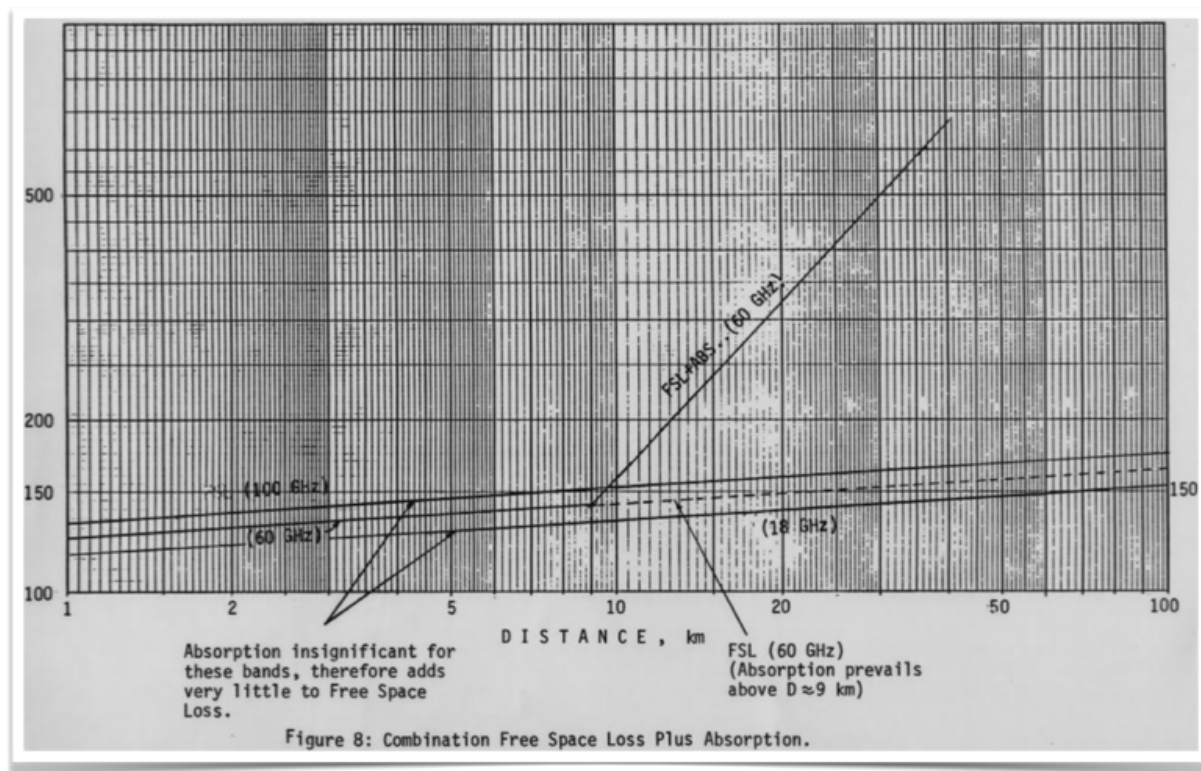


Figura 1.6. Perdas no espaço livre mais absorção em função da distância. É interessante notar a predominância da perda no espaço livre em 60 GHz a partir de 9 Km de distância [7].

Atualmente, os poucos modelos de canais existentes para a faixa milimétrica são definidos e parametrizados para 60 GHz. Esses modelos tratam o canal como um conjunto de raios (múltiplos percursos) com características angulares (ângulos de chegada e ângulos de partida) e de atraso distintas, normalmente definidas por distribuições probabilísticas ou baseadas em medições. Por esta razão, optou-se por concentrar o desenvolvimento desse projeto dentro do escopo da faixa milimétrica de 60 GHz.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho visa elaborar um estudo acerca das características das comunicações sem fio na faixa de comprimentos de onda milimétricos. Este estudo tem especial enfoque no comportamento do canal de comunicações, suas características no domínio do tempo e no domínio angular, de forma a constatar um modelo de canal baseado em *clusters* que melhor expresse essas características, baseando-se na comparação dos resultados das simulações desses modelos com medições reais. Busca-se com isso, desconfigurar um pouco o estigma existente acerca das comunicações sem fio na faixa milimétrica.

As simulações e medições comparativas são voltadas à ambientes *indoor* na faixa de frequências em torno de 60 GHz.

1.3.2 Objetivos específicos

- ❖ Compor extensiva coletânea de bibliografia especializada em: desvanecimento em banda larga, modelos de canal baseados em *clusters*, propagação em ondas milimétricas e medições *indoor* para a faixa de 60 GHz.
- ❖ Desenvolver a implementação computacional dos modelos de canal baseados em *clusters* de Saleh-Valenzuela, IEEE 802.15.3c e IEEE 802.11ad.
- ❖ Obter, a partir da implementação e simulação dos modelos supracitados, estatísticas para avaliação do canal sem fio em 60 GHz para variados tipos de ambientes *indoor*.
- ❖ Discorrer, a partir da comparação entre os dados simulados e literatura disponível com medições *indoor*, sobre o modelo de canal que mais se adequa à eventual realidade das tecnologias indoor na faixa de 60 GHz.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está sumarizado em quatro capítulos, sendo eles: Modelos de desvanecimento para o canal de comunicação sem fio, Saleh-Valenzuela, IEEE 802.15.3c, IEEE 802.11ad e Conclusões, respectivamente.

O Capítulo 2 traz uma breve fundamentação teórica acerca das teorias de desvanecimento, especialmente sobre o desvanecimento do canal em banda larga. Esse estudo é importante pois, considerando as exigências do 5G em termos de banda, devido às altas taxas de transmissão, os processos envolvidos nas transmissões em banda larga serão os cursos dos modelos a serem estudados. Além disso, este capítulo discorre sobre as características comuns de modelos voltados às comunicações em banda larga, que são aqueles modelos baseados em *clusters*.

O Capítulo 3 apresenta o primeiro modelo baseado em *clusters* a ser estudado, o modelo de Saleh-Valenzuela. Saleh e Valenzuela foram alguns dos primeiros estudiosos a observarem os efeitos do agrupamento de raios em *clusters* (grupos). E, a partir do modelo deles, desenvolveram-se os outros modelos abordados neste trabalho para a faixa milimétrica. Esses outros modelos carregam a base do modelo de Saleh-Valenzuela, mas adicionam alguns outros elementos que se mostraram necessários com a evolução das comunicações.

O Capítulo 4 discorre sobre o modelo IEEE 802.15.3c, que também é um modelo baseado em *clusters* e uma versão modificada do modelo de Saleh-Valenzuela. O modelo IEEE 802.15.3c é voltado para a faixa de 60 GHz e a maioria dos parâmetros que compõem o modelo são baseados em observações empíricas do canal de comunicação.

O Capítulo 5 apresenta o modelo IEEE 802.11ad, também baseado em *clusters* e no modelo de Saleh-Valenzuela. Este modelo também definiu seus principais parâmetros a partir de medições ou utilizando tecnologias de *ray-tracing*. Assim como o modelo IEEE 802.15.3c, este modelo é voltado para a faixa de 60 GHz e traz novos elementos para a caracterização do canal, não contidos originalmente nem no de Saleh-Valenzuela nem no IEEE 802.15.3c.

O Capítulo 6 encerra essa monografia, pronunciando as conclusões atingidas e as perspectivas para futuros trabalhos na área.

2 MODELOS DE DESVANECIMENTO PARA O CANAL DE COMUNICAÇÃO SEM FIO

2.1 INTRODUÇÃO

Na propagação de ondas de rádio muitos elementos podem interferir para gerar flutuações na potência do sinal recebido. Estas ondas podem sofrer reflexões no solo, difrações ao encontrarem algum objeto ou quina pelo percurso, atenuação pela chuva, entre outros fenômenos que podem ocasionar alterações na amplitude e no caminho percorrido que, por conseguinte, geram as variações na potência do sinal no receptor. Essas variações caracterizam o desvanecimento.

O desvanecimento tem uma influência elementar na qualidade dos sistemas de comunicações sem fio. Por isso, este capítulo discorre acerca dos conceitos associados ao fenômeno de desvanecimento, quais tipos existem, como é classificado, qual modalidade é mais predominante em cada tipo de canal etc.

Como este trabalho trata do canal de banda larga em ambientes *indoor*, o desvanecimento em pequena escala vai ser o mais aprofundado nesse estudo devido ao fato de não se obter uma perda de percurso significativamente variável com a distância, já que as pontas da transmissão são fixas e os ambientes são de pequenas dimensões. Logo, é apresentada uma seção a respeito dos efeitos desse tipo de desvanecimento em canais de banda larga e como esses efeitos direcionam o funcionamento do canal.

Adicionalmente, será observado no estudo do canal de banda larga que o sinal recebido é composto de várias pequenas contribuições oriundas dos múltiplos percursos que o sinal pode percorrer no seu trajeto do transmissor ao receptor. Essas contribuições por múltiplos percursos normalmente chegam ao receptor agrupadas no tempo, caracterizando o fenômeno de *clustering* (em português, agrupamento) de raios. Por conseguinte, um modelo de canal que vise representar o canal de banda larga precisa levar em conta esse tipo de fenômeno.

Nesse contexto, o capítulo se encerra pronunciando a infraestrutura básica comum a modelos de canais baseados em *cluster*.

2.2 TIPOS DE DESVANECIMENTO

Considera-se que todo sistema de comunicações é constituído por, no mínimo, três elementos básicos: transmissor, canal e receptor. Transmissor e receptor são, respectivamente, o remetente e o destinatário da mensagem a ser transmitida, e o canal é o meio utilizado para transmitir essa mensagem, conforme ilustrado na Fig. 2.1.

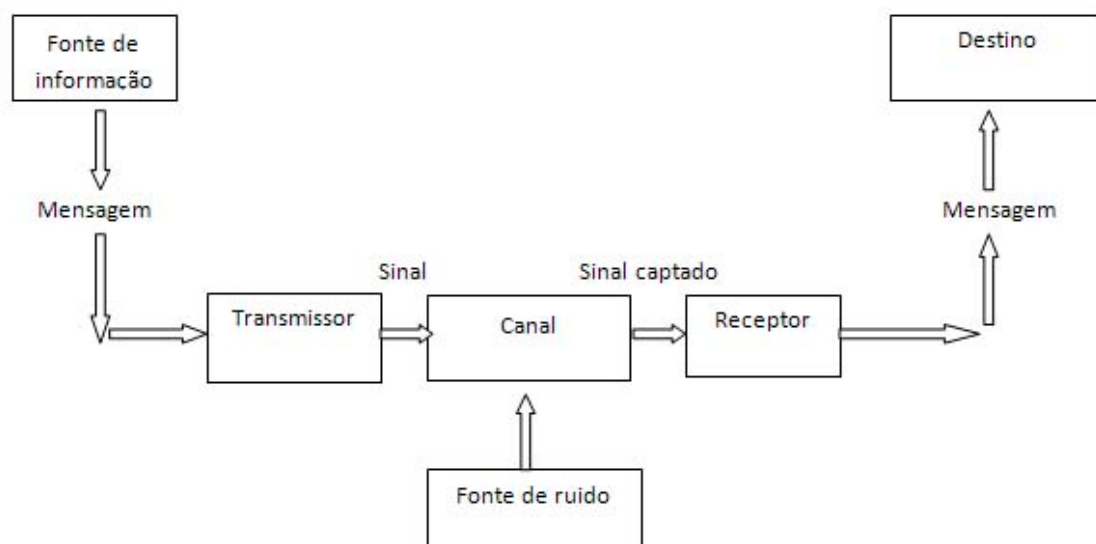


Figura 2.1. Sistema de comunicação genérico adaptado de SHANNON; WEAVER (1949) [8].

O canal de comunicação está sujeito a experimentar diversas formas de degradação, como atenuação, ruído, interferência e distorção. A atenuação diz respeito à redução progressiva da intensidade do sinal com o aumento da distância. O ruído refere-se a sinais elétricos imprevisíveis que degradam o sistema como, por exemplo, o ruído térmico. Na interferência, ocorre uma contaminação do sinal transmitido por sinais interferentes, normalmente transmitidos nas faixas ou *slots* de tempo vizinhos, e que possuem forma similar ao sinal transmitido. Por sua vez, a distorção é uma alteração nas componentes de amplitude e fase do sinal devida à uma resposta seletiva em frequência do sistema.

Alguns desses fenômenos de degradação inseridos no sinal pelo canal de comunicação, como o ruído térmico citado acima, por exemplo, são formas de degradação naturais, pois nenhum sistema que possua componentes elétricos e eletrônicos está imune a ele. Por isso, a modelagem de um canal de comunicação deve sempre considerar a influência desses fenômenos.

O canal rádio móvel, que é o tipo de canal estudado aqui, impõe certas limitações ao desempenho de sistemas de comunicações sem fio. Diferente dos canais de sistemas com fios, de caráter mais estacionário e cujo comportamento é mais facilmente previsto, os canais de rádio possuem natureza mais aleatória e, portanto, uma modelagem mais desafiadora.

O meio de propagação entre transmissor e receptor do canal rádio móvel pode variar entre uma simples transmissão com visada direta – LOS (do inglês *Line of Sight*) – e aquela que é severamente obstruída por prédios, montanhas, e até mesmo folhagem. Os ambientes de transmissão típicos obedecem mais ao segundo caso. Tal cenário proporciona, na prática, a possibilidade de o receptor detectar uma combinação de componentes do sinal provenientes de diversos mecanismos de propagação, tais quais, reflexão, difração, refração e espalhamento nas edificações existentes, conforme ilustrado na Fig. 2.2. Esses fenômenos podem caracterizar uma situação no receptor de se

obter um sinal proveniente de múltiplos percursos, ou seja, de detecção de energia do sinal proveniente de direções distintas e com diferentes atrasos temporais (Fig. 2.3) [9].

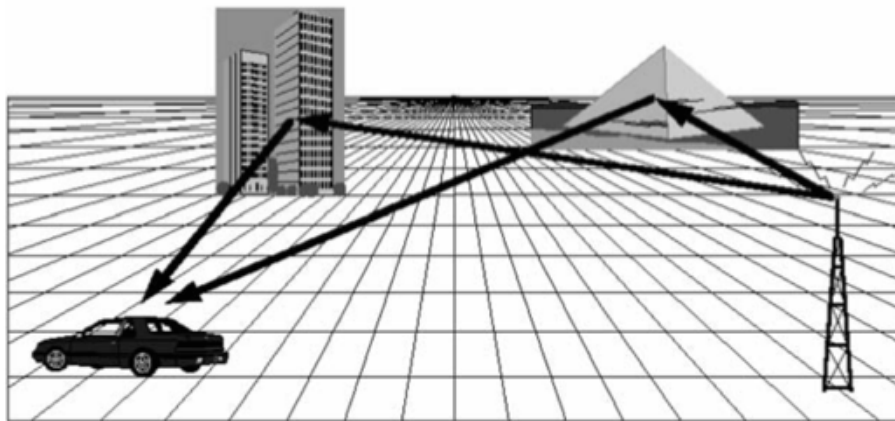
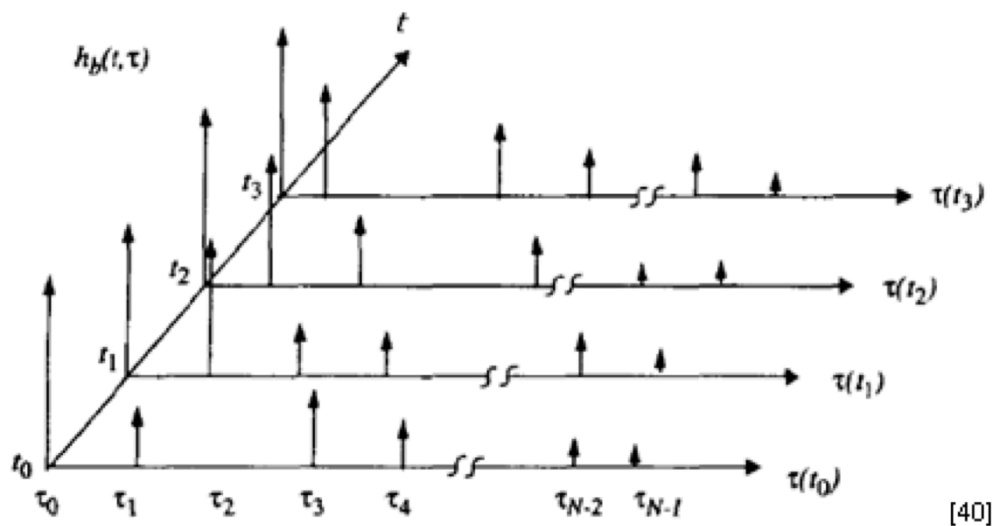


Figura 2.2. Propagação por múltiplos percursos [10].



[40]

Figura 2.3. Resposta impulsional de um canal de múltiplos percursos: cada impulso em τ_N representa um percurso diferente percorrido pelo sinal [9].

A Fig. 2.3 ilustra a resposta impulsional de um canal composto de múltiplos percursos. Pode-se observar que os múltiplos percursos são agrupados no tempo, cada um com seu atraso τ_N , no entanto, em torno de um tempo médio t_N . Os diferentes t são devidos ao movimento relativo do transmissor e receptor ou de artefatos presentes no ambiente de propagação que pode ocasionar um desvio Doppler, fenômeno a ser explorado no decorrer do capítulo.

Os tipos de desvanecimento experimentados por um sinal de rádio vão depender da natureza desse sinal e das características de propagação do canal.

O desvanecimento em larga escala tem como principais efeitos as perdas de potência do sinal no espaço livre e o sombreamento do sinal por obstáculos. Refere-se à intensidade média do sinal avaliada em termos de uma grande distância de separação entre o transmissor e o receptor.

Basicamente, a potência média do sinal diminui com o quadrado da distância entre o transmissor e o receptor. Em ambientes urbanos, essa relação deixa de ser quadrática e a perda de potência do sinal passa a ser ainda mais acentuada à medida em que a separação transmissor-receptor aumenta. Esse desvanecimento também é afetado pela existência de grandes objetos no percurso de transmissão, tais como colinas, prédios, árvores etc [11].

O desvanecimento em pequena escala considera os efeitos da propagação do sinal por múltiplos caminhos e será o tipo de desvanecimento mais relevante para a proposta desse trabalho. Esse desvanecimento se refere às bruscas mudanças na amplitude e na fase do sinal em pequenos deslocamentos entre transmissor e receptor ou em curtos intervalos de tempo. As características desse desvanecimento são: o espalhamento temporal do sinal e o ambiente variante no tempo devido à mobilidade relativa existente entre transmissor e receptor [11].

A Fig. 2.4 ilustra graficamente os dois tipos de desvanecimento, mostrando o quanto o primeiro varia lentamente com a distância, enquanto o segundo apresenta mudanças bruscas na amplitude.

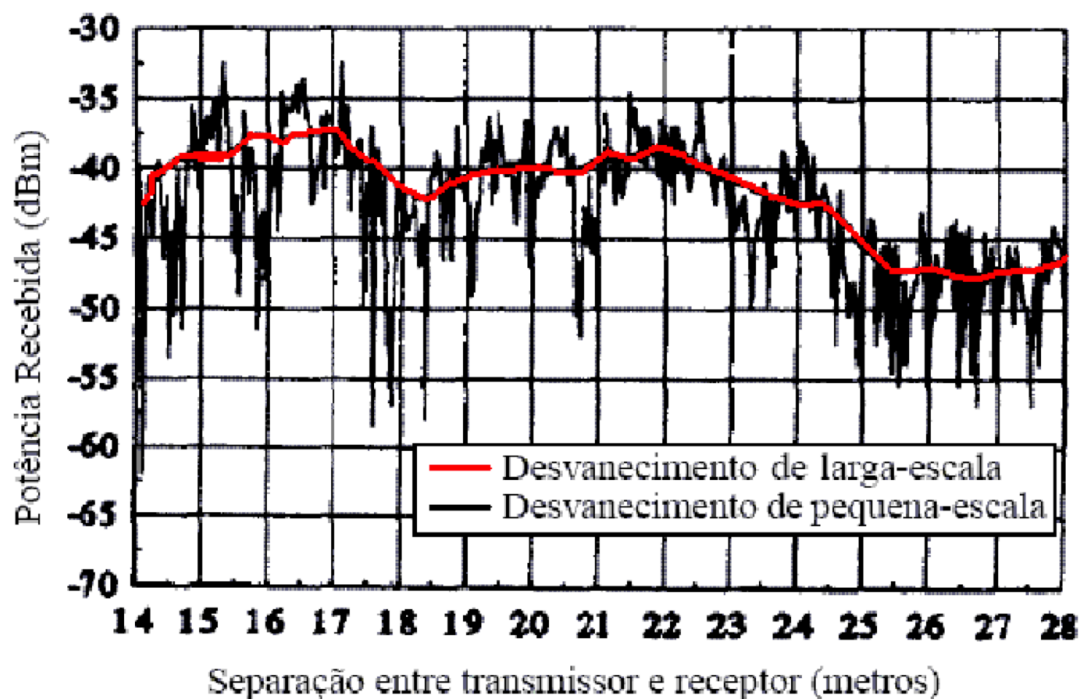


Figura 2.4 Desvanecimento de larga e pequena escala [11].

Existem duas classes de desvanecimento em pequena escala. A primeira é o desvanecimento devido ao espalhamento de atraso RMS, que se subdivide em plano e seletivo em frequência. A segunda é o desvanecimento devido ao espalhamento Doppler que, por sua vez, se subdivide em lento e rápido.

O espalhamento de atraso RMS pode ser interpretado como a diferença entre o tempo de chegada dos primeiros componentes mais significativos do sinal (tipicamente o componente LOS) e o tempo de chegada dos componentes mais atrasados, revelando a natureza dispersiva do canal. Por sua vez, o

espalhamento de atraso RMS é uma medida do sinal que avalia o valor do perfil de atrasos em relação ao atraso médio. O perfil de atrasos pode ser entendido como o perfil de potência do canal em função dos atrasos que a onda sofre em seu processo de propagação transmissor-receptor.

O desvanecimento plano devido ao espalhamento de atraso RMS ocorre quando o tempo de símbolo do sinal T_s é maior que o espalhamento de atraso RMS τ_{RMS} , conforme ilustrado na Fig. 2.5. Dessa forma, as características espectrais do sinal são preservadas e o sinal apresenta ganho e fase constantes por toda sua banda. No entanto, a potência do sinal recebido varia com o tempo.

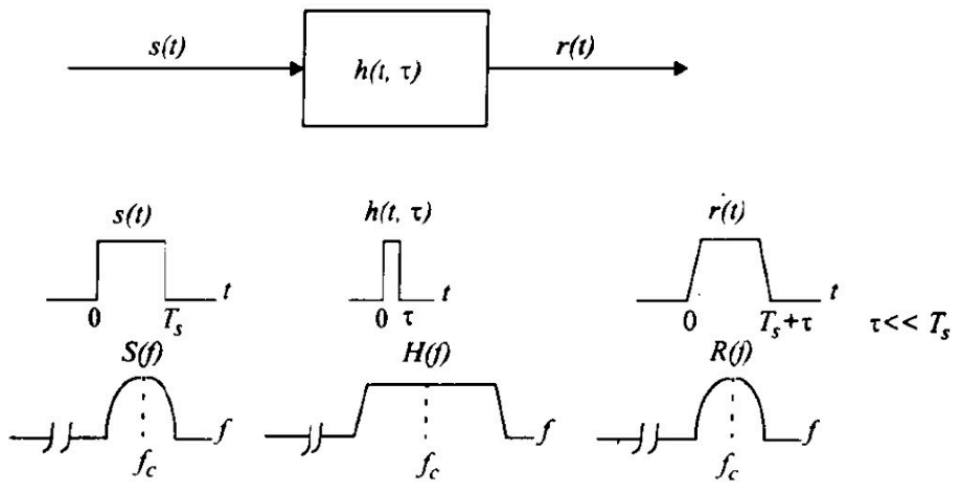


Figura 2.5. Desvanecimento plano do sinal [12].

Por outro lado, o desvanecimento seletivo em frequência devido ao espalhamento de atraso RMS ocorre quando o tempo de símbolo do sinal T_s é menor que o espalhamento de atraso RMS τ_{RMS} , fazendo com o sinal no receptor chegue distorcido, com os símbolos interferindo entre si. Dessa forma, os sinais que experimentam esse tipo de desvanecimento não possuem ganho constante nem fase linear. A Fig. 2.6 ilustra bem esse processo.

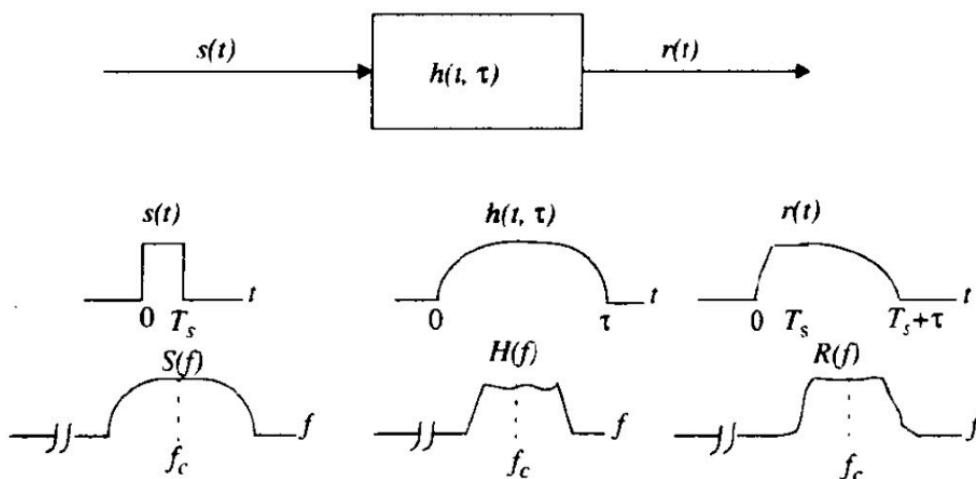


Figura 2.6. Desvanecimento seletivo em frequência [12].

O espalhamento Doppler, por sua vez, é um fenômeno que descreve a natureza variante do canal, que pode ser causada pelo movimento relativo entre transmissor e receptor ou pelo movimento de artefatos/objetos presentes no canal em uma região de pequena escala. Havendo essa movimentação relativa, as componentes do sinal estão sujeitas a perceberem um desvio na frequência.

Quando um sinal de frequência central f_c Hertz é transmitido por um terminal móvel a uma velocidade constante v , conforme a Fig. 2.7, o espectro recebido, chamado espectro Doppler, possuirá componentes que vão de $f_c - f_d$ a $f_c + f_d$, no qual f_d é chamado desvio Doppler e pode ser calculado por:

$$f_d = \frac{v \cdot f_c}{c} \cos \alpha \quad (2.1),$$

em que c é a velocidade da luz e α o ângulo formado entre a direção de movimento do terminal e a direção de incidência do sinal recebido.

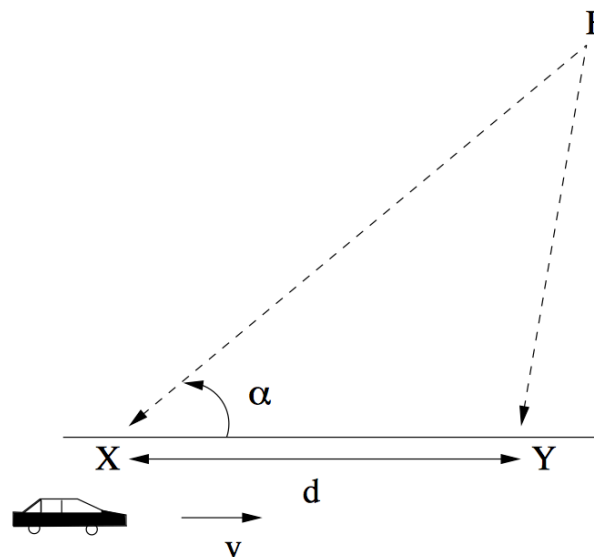


Figura 2.7. Desvio Doppler [11].

Como dito anteriormente, o sinal percorre diferentes caminhos no trajeto do transmissor ao receptor, formando diferentes ângulos de incidência. Logo, cada um desses caminhos sofrerá um desvio diferente na frequência, resultando em um aumento da largura de faixa do sinal [11].

O desvanecimento lento devido ao espalhamento Doppler ocorre quando a resposta ao impulso do canal varia muito mais lentamente em relação à duração do símbolo T_s apresentando, portanto, um baixo desvio Doppler.

Já no desvanecimento rápido, a resposta ao impulso do canal muda muito rapidamente em comparação com a duração do símbolo, no qual a banda do sinal é menor que o espectro Doppler, causando dispersão de frequência e distorção do sinal. Esse é o tipo de desvanecimento mais determinante em canais de banda larga.

2.3 DESVANECIMENTO BANDA LARGA

Dentre os tipos de desvanecimento apresentados na seção anterior, um em especial é mais relevante para o canal estudado neste trabalho: o desvanecimento rápido. O desvanecimento rápido é um desvanecimento em pequena escala que ocorre principalmente a partir da interferência construtiva e destrutiva dos múltiplos caminhos percorridos pelo sinal entre transmissor e receptor. Esse desvanecimento pode ser chamado também de desvanecimento por múltiplos percursos.

No canal de banda estreita, o desvanecimento por múltiplos percursos acontece como resultado de pequenas diferenças de comprimento de percurso entre os raios vindos dos espalhadores nas proximidades do receptor. Estas diferenças, da ordem de alguns comprimentos de onda, conduzem a diferenças de fase significativas. No entanto, os raios chegam todos essencialmente ao mesmo tempo, de modo que todas as frequências dentro de uma ampla largura de banda sejam afetadas da mesma maneira.

Em contrapartida, se existem fortes fontes de espalhamento distribuídas em torno do percurso entre as estações transmissora e receptora, as diferenças de tempo podem ser significativas. Se os atrasos relativos forem grandes comparados à unidade básica de informação transmitida no canal (normalmente um símbolo ou um *bit*), o sinal irá então experimentar distorção significativa, que irá variar ao longo da largura do canal. Este canal é então considerado de banda larga, e qualquer modelo que tente descrevê-lo precisará levar em conta esses efeitos [10].

O canal banda larga é então composto por raios que atingem o receptor pelo percurso direto e aqueles provenientes de espalhadores em torno desse percurso, conforme ilustrado na Fig. 2.8. O ambiente de propagação é então pensado como um conjunto de elipses de diferentes raios, no qual todos os espalhadores posicionados em uma elipse, com transmissor e receptor em seus focos, contribuirão com energia de mesmo atraso relativo.

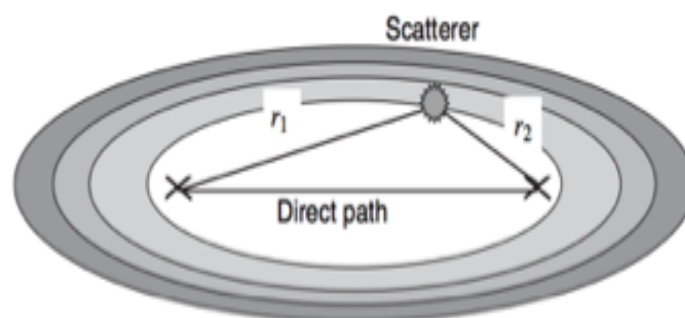


Figura 2.8. Formação de múltiplos percursos por espalhadores [10].

O sinal recebido y será então a soma dos raios vindos de todos os espalhadores de todas as elipses pelo caminho, conforme expresso pela Eq. (2.2), cuja amplitude a e fase θ , dependem do coeficiente de reflexão e das características de espalhamento dos espalhadores.

$$y = a_1 e^{j(\omega\tau_1 + \theta_1)} + a_2 e^{j(\omega\tau_2 + \theta_2)} + \dots \quad (2.2),$$

em que, $\tau = \frac{r_1 + r_2}{c}$ e c é a velocidade da luz.

Para visualizar o impacto do espalhamento do atraso, causado justamente pela diferenças de tempo que o sinal leva para ser transmitido nos diferentes percursos, considere que um símbolo transmitido no canal está atrasado. Este atraso não teria importância se todos os outros símbolos chegassem com o mesmo atraso. No entanto, a energia torna-se realmente espalhada no tempo, e o símbolo chega ao receptor com uma duração igual ao tempo de transmissão mais o intervalo de atraso do canal. O símbolo está portanto, ainda chegando no receptor quando a energia inicial do próximo símbolo começa a chegar, criando ambiguidade na demodulação do novo símbolo. Este processo, ilustrado na Fig. 2.9, é chamado de interferência inter simbólica [10].

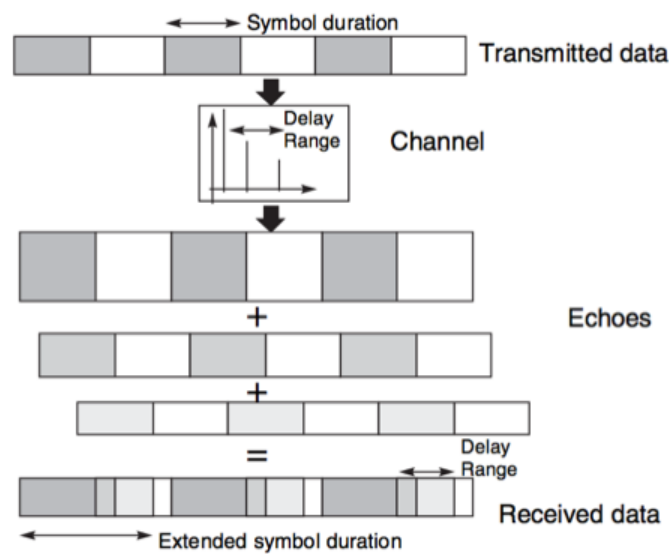


Figura 2.9. Interferência inter-simbólica no canal de banda larga [10].

O formato padrão do modelo de canal para canais móveis em banda larga é ilustrado na Fig. 2.10. Os intervalos de atraso (discretos) são separados em grupos, os quais são compostos por todas as ondas que chegaram ao receptor com este mesmo atraso. Os grupos são não correlacionados uns com os outros, uma vez que cada um surge de dispersores que são fisicamente distintos e separados por diversos comprimentos de onda. O canal é, portanto, um filtro linear com uma resposta impulsional finita variante no tempo [10].

A potência média relativa desses grupos é expressa pelo perfil de potência do atraso do canal – PDP (do inglês, *Power Delay Profile*), definido como a variação da potência média com o atraso. Normalmente, o perfil de potência do atraso é discretizado na dimensão do atraso para produzir “n” grupos individuais de potência P_1, \dots, P_n .

O perfil de potência do atraso pode ser caracterizado por vários parâmetros, dentre eles:

- ❖ Atraso de excesso: o atraso de qualquer grupo em relação ao primeiro grupo de chegar.

- ❖ Atraso médio: o atraso correspondente “centro de gravidade” do perfil, definido por

$$\tau_0 = \frac{1}{P_T} \sum_{i=1}^n P_i \tau_i \quad (2.3),$$

em que $P_T = \sum_{i=1}^n P_i$ é a potência total presente no canal.

- ❖ Espalhamento de atraso RMS: espalhamento dos grupos. Leva em conta as potências relativas destes, bem como o atraso, tornando-se um melhor indicador do espalhamento do sistema do que os outros parâmetros [10]. É definido como:

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{P_T} \sum_{i=1}^n P_i \tau_i^2 - \tau_0^2} \quad (2.4),$$

sendo independente do atraso médio e, portanto, do comprimento real do percurso, sendo definido apenas pelos atrasos relativos dos múltiplos percursos.

Se o espalhamento de atraso RMS é muito menor do que a duração de símbolo, não é encontrada interferência inter-simbólica significativa e o canal pode ser assumido como de banda estreita.

Ainda, o efeito dos grupos atrasados é ponderado pelo quadrado do atraso médio. Isso tende a superestimar o efeito de grupos com grandes atrasos, mas com potência muito baixa, sugerindo que espalhamento de atraso RMS não é um indicador de desempenho totalmente desambíguo. É, apesar disso, uma forma conveniente de comparar diferentes canais de banda larga [10].

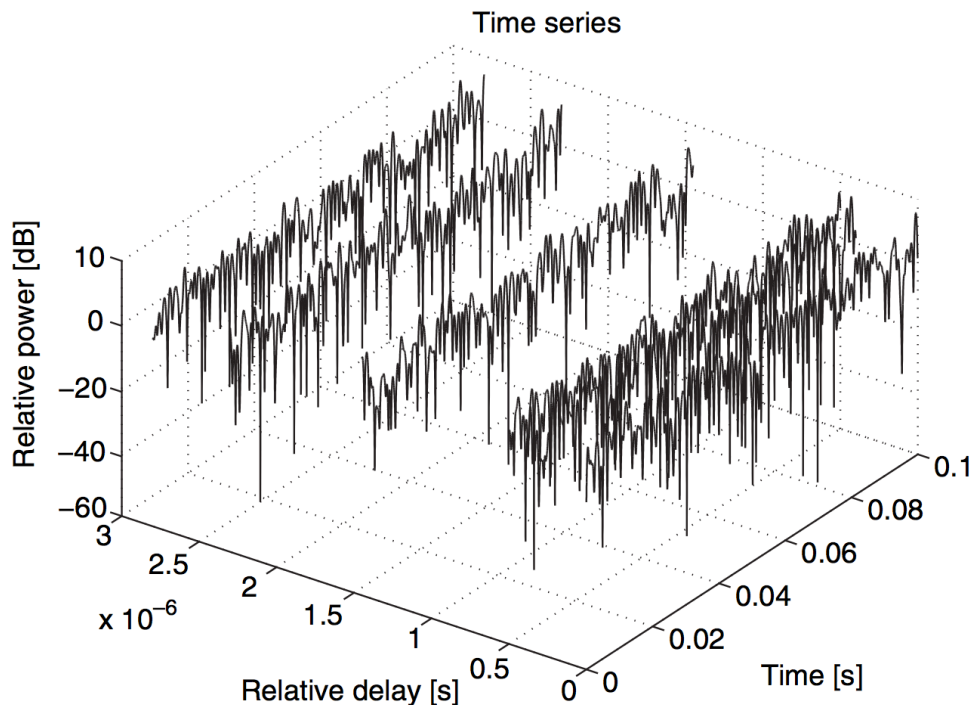


Figura 2.10. Resposta impulsional do canal de banda larga [10].

É igualmente válido considerar para o canal em questão uma resposta em frequência. Essa resposta vai ser a função de transferência do canal, definida como a transformada de Fourier da resposta impulsional no tempo em relação ao atraso:

$$T(f, t) = F[h(t, \tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (2.5).$$

Na prática, a função de transferência do canal não é conhecida inicialmente e é determinada estatisticamente em termos da correlação entre os componentes espectrais do sinal de saída separados por um dado espaçamento.

A correlação entre dois componentes de frequência da função de transferência de um canal com um espaçamento frequência Δf e um espaçamento no tempo Δt é dada por:

$$\rho(\Delta f, \Delta t) = \frac{E[T(f, t)T^*(f + \Delta f, t + \Delta t)]}{E[|T(f, t)|^2]E[|T(f + \Delta f, t + \Delta t)|^2]} \quad (2.6).$$

Essa correlação é dada como independente do tempo e da frequência na qual é avaliada se o ambiente de propagação é considerado homogêneo. Esse pressuposto, junto com o de que os espalhadores também estão descorrelacionados formam o pressuposto do canal estacionário no sentido amplo e de espalhamento não correlacionado (WSSUS – do inglês Wide-Sense Stationary and Uncorrelated Scattering).

Se a correlação é examinada para sinais com $\Delta t=0$, então o espaçamento em frequência Δf para o qual a correlação é igual a 0,5 é chamada de largura de banda de coerência do sinal. O sinal é, dessa forma, tido como banda larga quando sua largura de banda é alta quanto comparada à largura de banda de coerência.

A banda de coerência calculada em função do atraso RMS é expressa pela relação [10]:

$$Bc \geq \frac{1}{2\pi\tau_{RMS}} \cos^{-1}\rho \quad (2.7).$$

2.4 MODELOS DE CANAIS BASEADOS EM CLUSTERS

Já foi dito neste trabalho que a energia irradiada por uma antena pode tomar vários caminhos até o receptor – múltiplos percursos. Essa energia pode ser recebida em grupos, geralmente denominados *clusters*.

Cada espalhador vai formar um ou vários novos percursos carregando a energia do transmissor ao receptor. No receptor, essa energia vai chegar em instantes distintos e de ângulos diferentes. Um *cluster* será definido então como um conjunto de componentes de múltiplos percursos que possuem parâmetros similares. No entanto, essa definição depende de como estes componentes de múltiplos percursos estão agrupados, ou seja, do quão similares eles são entre si. Os diferentes comprimentos

dos percursos leva a diferentes atrasos de chegada. Logo, o tamanho de um *cluster* é determinado pelo seu espalhamento, visto a partir dos dois fins da transmissão [13].

A Fig. 2.11 ilustra o conceito de *cluster* de múltiplos percursos.

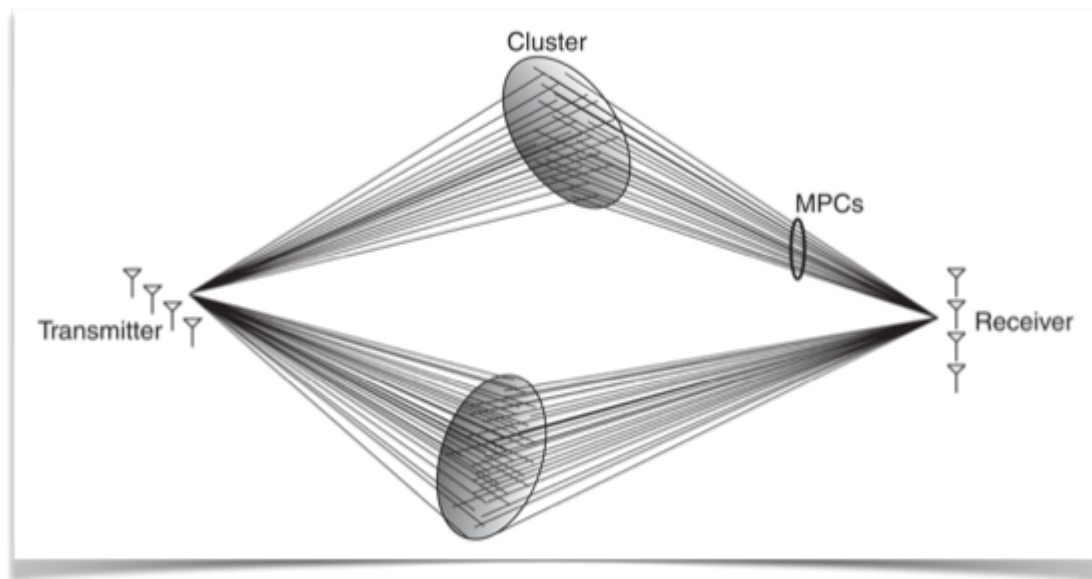


Figura 2.11. Canal baseado em *clusters* [13]. Os múltiplos percursos são identificados na figura por MPCs.

A modelagem de *clusters* reduz o comportamento destes a um conjunto de parâmetros estocásticos. Na maioria dos modelos baseados em *clusters*, os parâmetros são extraídos de medições em ambientes reais. Dessa forma, os modelos conseguem refletir o comportamento real dos canais.

Até recentemente, os *clusters* eram mais frequentemente identificados visualmente. Foi Turin et al [15] um dos primeiros a reconhecer que a energia chegava ao receptor em *clusters* e que os tempos de chegadas dos *clusters* – grupos – seguiam um processo de Poisson. Saleh e Valenzuela [14], com base no trabalho de Turin et al. [15], mostraram que a energia de um canal de banda larga chegava em grupos e que cada grupo era composto por vários componentes de múltiplos percursos. O conceito de *clusters* foi utilizado para explicar os múltiplos caminhos que se manifestavam no domínio atraso [13].

Identificar todos os *clusters* dentro de um conjunto de dados é muito difícil, se não impossível. Dessa forma, é bastante improvável que duas pessoas identifiquem os mesmos *clusters* num dado conjunto de dados. É ainda importante ressaltar que um *cluster* pode ser decomposto em vários percursos, podendo ser vistos de maneira diferente em cada uma das pontas de uma transmissão.

Em ambientes *indoor*, uma modelagem de canal baseada em *clusters* é significativamente expressiva porque há uma variedade de objetos e mobiliário, além de estruturas de diferentes composições materiais, que são fontes potenciais de múltiplos percursos e podem gerar espalhamento significativo do sinal, gerando vários caminhos que dividem os mesmos parâmetros médios.

2.5 CONCLUSÕES

O estudo de modelos de canal baseados em *clusters* é tão relevante neste trabalho porque este é o fenômeno de desvanecimento predominante em canais de banda larga, que é o tipo de canal que será estudado aqui. Além disso, ambientes urbanos provêm uma quantidade elevada de percursos, especialmente em energia refletida e espalhada, e essa riqueza de percursos pode ser explorada para aumentar a potência de sinais recebidos em ambientes de propagação sem linha de visada (NLOS - do inglês, *Non Line-Of-Sight*).

O modelo de Saleh-Valenzuela se estabeleceu como a base dos modelos de canal baseados em *clusters* e, por isso, será o primeiro modelo de canal a ser apresentado neste ensaio. No entanto, o modelo de Saleh-Valenzuela não é voltado para a faixa milimétrica de comprimentos de onda, por isso é necessário estudar outros modelos que sejam voltados para essa faixa.

Esses outros modelos são o IEEE 802.15.3c e o IEEE 802.11ad, e são baseados no modelo de Saleh-Valenzuela. Estes modelos foram escolhidos seguindo a sugestão dos principais pesquisadores da área de comunicações móveis em ondas milimétricas [16] que, por suas medições, acreditam que estes são os modelos de canal que melhor representariam os canais de faixa milimétrica em geral, já que estes modelos foram padronizados para a faixa de frequência de 60 GHz (comprimento de onda de 5 mm).

Primeiramente, é apresentado o modelo IEEE 802.15.3c e depois o modelo IEEE 802.11ad. Essa sequência foi adotada por ordem crescente de complexidade. O IEEE 802.15.3c traz elementos extras de caracterização do canal em relação ao modelo de Saleh-Valenzuela e o IEEE 802.11.ad, por sua vez, traz os elementos a mais do IEEE 802.5.3c, salvo algumas modificações, e acrescenta ainda outros elementos considerados relevantes na descrição desse canal de comunicação.

É válido ressaltar que esses modelos são, por definição, voltados à representação de ambientes *indoor*. Por sua vez, os ambientes-escopo desse trabalho também o são.

3 MODELO DE SALEH-VALENZUELA

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo trata do modelo mais básico de canal baseado em *clusters*. O modelo de Saleh-Valenzuela foi apresentado em 1987 e traz uma caracterização no domínio do atraso do canal de comunicação *indoor* na faixa de 1,5 GHz.

O modelo serviu como base para o desenvolvimento de vários outros modelos de canal baseados em *clusters* que surgiram posteriormente, inclusive para outras faixas de frequência que não a sua original. Por ser bastante simples e realístico, esse modelo conseguiu ser facilmente estendido, mantendo a mesma estrutura base, mas com outros valores de parâmetros. Por isso, é essencial entender o funcionamento do modelo de Saleh-Valenzuela para ser capaz de compreender a estrutura dos outros modelos a serem estudados neste trabalho que, por sua vez, são baseados neste.

O capítulo apresenta inicialmente uma fundamentação teórica do modelo, discorrendo sobre suas equações principais e o funcionamento de sua estrutura. Depois, é exposta a metodologia utilizada na simulação desse modelo de canal desenvolvida neste projeto, bem como os resultados extraídos dessas simulações. Por fim, são avaliados os resultados das simulações do modelo, de forma a analisar a compatibilidade entre o modelo e o canal da faixa milimétrica.

3.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O modelo de Saleh e Valenzuela [14] é um modelo de canal baseado em *clusters* para a faixa de 1,5 GHz, que provê a descrição básica do canal no domínio do atraso. O estudo desse modelo é importante pois ele é um precursor dos modelos de canais baseados em *clusters*. Os principais modelos de canal voltados para a faixa milimétrica de comprimentos de onda (IEEE 802.15.3c e IEEE 802.11ad) são extensões do Saleh-Valenzuela, e serão apresentados em capítulos posteriores.

O modelo de Saleh-Valenzuela é basicamente um modelo para canais invariantes no tempo que descreve os tempos de chegada dos múltiplos percursos no domínio do atraso. Neste modelo, os tempos de chegada dos *clusters* e dos raios dentro de cada *cluster* são modelados por processos de Poisson independentes e de diferentes taxas.

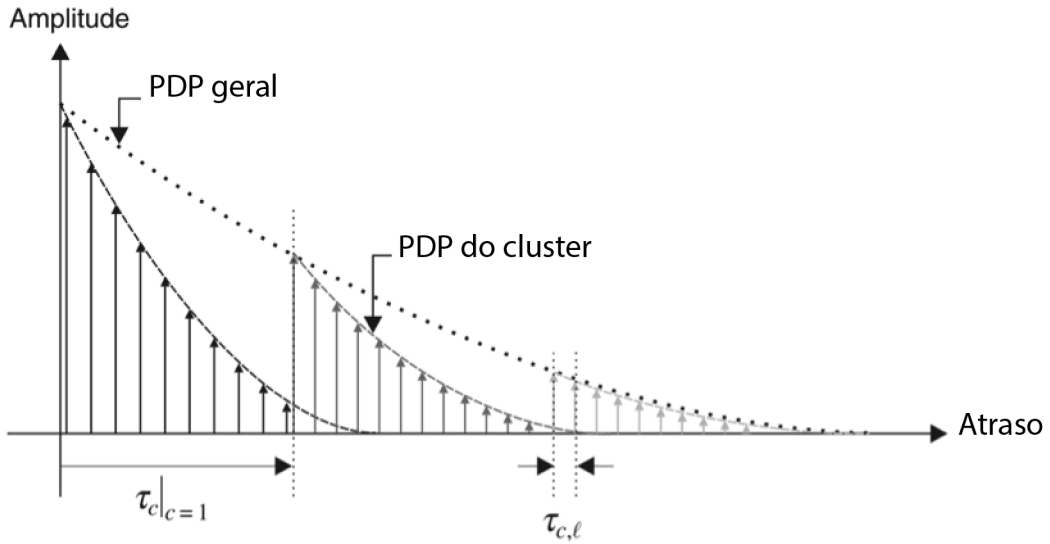


Figura 3.1. Perfil de potência do atraso (PDP) do modelo de Saleh-Valenzuela [13].

A Fig. 3.1 ilustra um canal descrito pelo modelo de Saleh-Valenzuela em termos da potência dos raios que chegam ao receptor em função do atraso de cada um. É interessante notar que o modelo dividiu o perfil de potência do atraso em um conjunto de perfis de potência de *clusters* e um perfil de potência geral do canal, ambos com decaimento exponencial, mas com diferentes constantes de decaimento.

O tempo de chegada de um *cluster*, τ_c , conforme ilustrado na Fig. 3.1, é definido como o tempo de chegada do primeiro componente de múltiplo percurso associado àquele *cluster*, sendo caracterizado por um processo de Poisson de taxa λ_c e distribuição condicional dada pela fórmula:

$$p(\tau_c|\tau_{c-1}) = \lambda_c e^{-\lambda_c(\tau_c - \tau_{c-1})} \quad (3.1).$$

Considera-se que o tempo de chegada do primeiro *cluster* $\tau_0 = 0$.

Já o tempo de chegada do *l*-ésimo múltiplo percurso dentro de um dado *cluster* c é denotado por $\tau_{c,l}$. Estes tempos também são processos de Poisson de taxa $\lambda_{c,l}$ e independentes de τ_c .

$$p(\tau_{c,l}|\tau_{c,l-1}) = \lambda_{c,l} e^{-\lambda_{c,l}(\tau_{c,l} - \tau_{c,l-1})} \quad (3.2).$$

Considera-se que o atraso do primeiro componente de cada *cluster* $\tau_{c,0} = 0$.

Além disso, o número de *clusters* adicionais ($n_{c,add}$) ao *cluster* de menor atraso – o primeiro *cluster* – é dado por uma distribuição de Poisson, expressa pela seguinte equação:

$$p(n_{c,add}) = \frac{(T_0 \lambda_{c,add})^{n_{c,add}}}{n_{c,add}!} e^{-T_0 \lambda_{c,add}} \quad (3.3).$$

Logo, o número total de *clusters* no canal será dado por $N_c = n_{c,add} + 1$. Na Eq. (3.3), T_0 é o período de observação e $\lambda_{c,add}$ é a média do processo de Poisson, que pode ser computada pela observação dos dados.

A resposta impulsional do canal de Saleh-Valenzuela será dada pela soma da contribuição de todos os componentes de percursos de todos os *clusters*.

$$h(\tau) = \sum_{c=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} a_{c,l} e^{j\varphi_{c,l}} \delta(\tau - \tau_c - \tau_{c,l}) \quad (3.4).$$

Na Eq. (3.4), $a_{c,l}$ e $\varphi_{c,l}$ representam o ganho e a fase do l -ésimo múltiplo percurso, respectivamente. A fase tem distribuição uniforme no intervalo $[0, 2\pi]$. O ganho é real e governa o PDP de cada *cluster*, bem como a inclinação do PDP total [13].

O valor quadrático do ganho pode ser aproximado pela Eq. 3.5. Nela, $\overline{a_{0,0}^2}$ é a potência inicial do PDP e, γ_c e $\gamma_{c,l}$ são constantes de decaimento de potência do *cluster* e dos múltiplos percursos, respectivamente. Essas constantes são importantes. Elas são a medição direta da severidade do desvanecimento por múltiplos percursos do canal ou, equivalentemente, uma medida da diversidade [13].

$$\overline{a_{c,l}^2} = \overline{a_{0,0}^2} e^{-\tau_c/\gamma_c} e^{-\tau_{c,l}/\gamma_{c,l}} \quad (3.5).$$

O valor quadrático do ganho do primeiro componente de múltiplo percurso do primeiro *cluster* pode ser escolhido arbitrariamente para escalar o PDP. Saleh e Valenzuela escolheram esse valor para refletir a média da potência recebida quando transmissor e receptor estão separados por 1 m, que é aproximadamente:

$$\overline{a_{0,0}^2} = \frac{1}{\gamma_{c,l} \lambda_{c,l}} G_{Tx} G_{Rx} \frac{\lambda_0^2}{(4\pi)^2} r^{-(1+\alpha)} \Big|_{\alpha=1} \quad (3.6).$$

Os ganhos de amplitude em si são variáveis aleatórias de distribuição Rayleigh com função densidade de probabilidade (PDF – do inglês *Probability Density Function*) traçadas por:

$$p_c(a_{c,l}) = \frac{2a_{c,l}}{a_{c,l}^2} \exp\left(-\frac{a_{c,l}^2}{a_{c,l}^2}\right) \quad (3.7).$$

Em geral, *clusters* podem se sobrepor, ou seja, é possível ter um $\tau_{c,l}$ tal que $\tau_{c,l} > \tau_{c+1} - \tau_c$, onde o período de tempo entre *clusters* é dado por $\tau_{c+1} - \tau_c$. Não obstante, na prática, os *clusters* decaem mais rápido que o PDP total ($\gamma_c > \gamma_{c,l}$). Mesmo que o somatório da resposta impulsional envolva uma soma ao infinito, os raios dentro de cada *cluster* tendem a desaparecer abaixo do piso de ruído na maioria das vezes antes da chegada do próximo *cluster*. O resultado disso é que os *clusters* aparecem desmembrados e podem ser distinguidos visualmente [13].

A Tabela 3.1 mostra os valores dos principais parâmetros do canal de Saleh-Valenzuela: taxas de chegada e constantes de decaimento de potência dos *clusters* e múltiplos percursos, além do expoente de perda no espaço livre.

Tabela 3.1. Paramêtros do modelo de Saleh-Valenzuela medidos em ambiente indoor ponto-a-ponto [14].

Parâmetro	Descrição	Valor medido
γ_c	Constante de decaimento de potência do <i>cluster</i>	60 ns
$\gamma_{c,l}$	Constante de decaimento de potência dos raios dentro de um <i>cluster</i>	20 ns
$1/\lambda_c$	Taxa de chegada do <i>cluster</i>	Entre 200 e 300 ns
$1/\lambda_{c,l}$	Taxa de chegada dos múltiplos percursos (raios) dentro de um <i>cluster</i>	≈ 5 ns
α	Expoente de perda no espaço livre	Entre 3 e 4

3.3 METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Para realizar a implementação computacional do modelo de Saleh-Valenzuela foi desenvolvido um script que segue a estrutura apresentada a seguir:

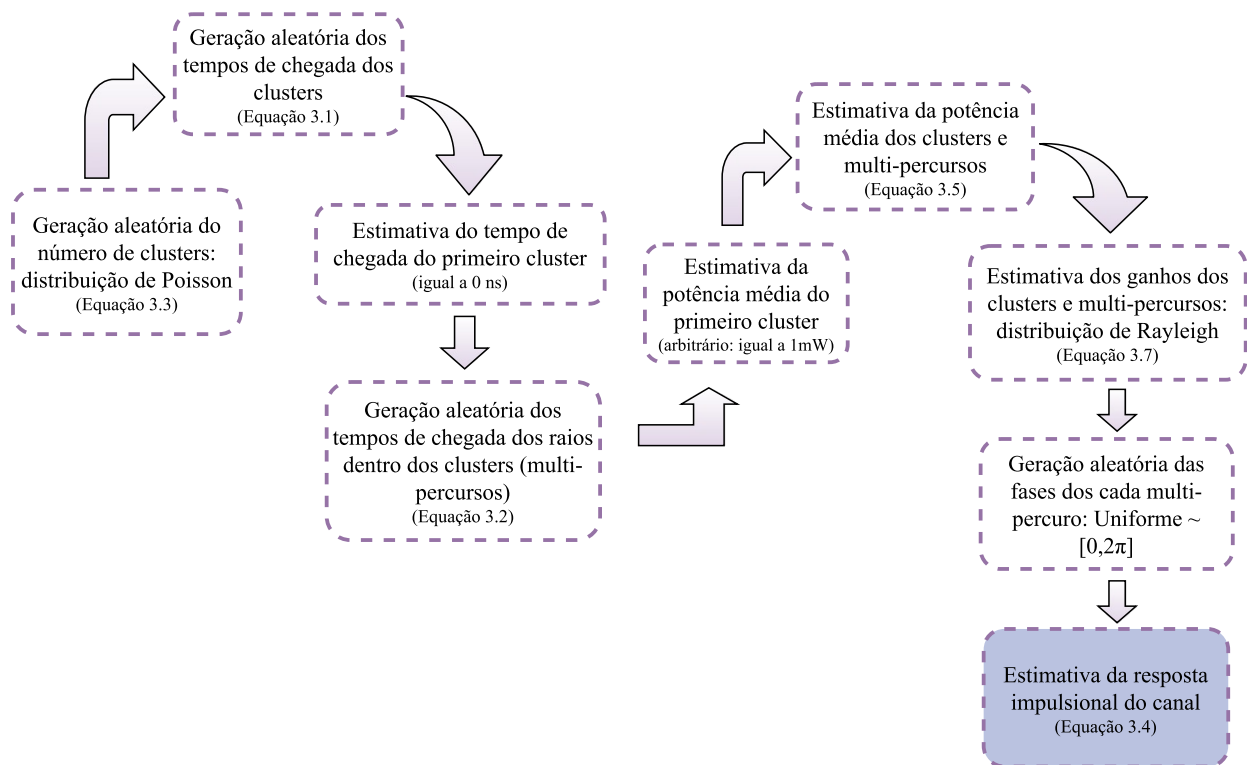


Figura 3.2. Fluxograma da simulação do modelo de Saleh-Valenzuela.

Inicialmente, o código define aleatoriamente o número de *clusters* adicionais ao *cluster* de menor atraso que serão gerados para a realização corrente. Esse processo aleatório depende de um tempo de observação T_0 que foi fixado arbitrariamente em 1000 ns e da taxa de chegada de *clusters* dada na Tabela 3.1 ($1/200 \frac{1}{ns}$), conforme Eq. 3.3. O próximo passo é gerar os tempos de chegadas dos *clusters* e dos raios de cada *cluster*, de acordo com as taxas de chegada definidas na Tabela 3.1.

Depois, a partir da potência do primeiro raio do primeiro *cluster* $\overline{a_{0,0}^2}$, são geradas as potências dos outros raios e *clusters* com base no tempo de chegada de cada um e nos respectivos decaimentos de potência, definidos anteriormente na Tabela 3.1. Com as potências dos componentes prontamente calculadas, são estimadas as amplitudes de cada múltiplo percurso por meio de uma função de geração de números aleatórios do tipo Rayleigh. Depois, os tempos de chegadas dos *clusters* e raios são ordenados de modo a formar uma linha de atraso crescente (as potências, fases e ganhos de amplitude correspondentes a cada tempo de chegada são ordenados com os mesmos índices). Por fim, as potências e ganhos de amplitude normalizados com relação a seu valor total e representados graficamente em função do atraso.

Foram geradas 50.000 realizações do canal de Saleh-Valenzuela. Este valor foi escolhido avaliando-se a variância dos dados gerados pelo modelo conforme se aumentava a quantidade de realizações. A partir de 50.000 realizações de canal, a variância dos dados já não se alterava tão significativamente.

Os resultados obtidos das simulações são apresentados na seção a seguir.

3.4 RESULTADOS

Os resultados apresentados aqui representam uma realização de canal escolhida aleatoriamente, com exceção das funções densidade de probabilidade, que foram examinadas para todo o conjunto de dados. A análise dos gráficos foi dividida em subseções afim de facilitar o entendimento e apresentar os dados de forma mais organizada.

3.4.1 Perfil de potência do atraso

A Fig. 3.3 apresenta um perfil de potência do atraso do canal de Saleh-Valenzuela simulado nesse projeto. Na figura, pode-se distinguir claramente quatro *clusters* de múltiplos percursos e seus respectivos decaimentos, além do decaimento geral do PDP, representado na cor *magenta*. Em [20], há alguns PDPs extraídos de medições feitas por Saleh e Valenzuela que apresentam resultados semelhantes.

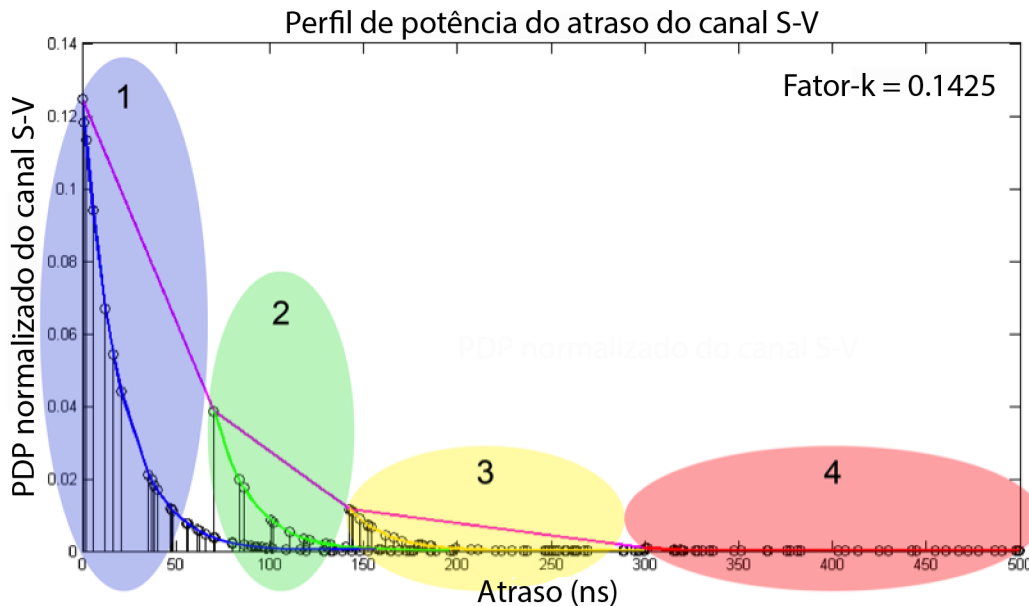


Figura 3.3 Perfil de potência do atraso extraído das simulações do canal de Saleh-Valenzuela.

Em [17], constam medições de perfis de potência do atraso efetuadas em 62,4 GHz, no qual o perfil de potência do atraso decai similarmente ao modelo de Saleh-Valenzuela, mas não de forma tão regular. Isso sugere que possa existir um componente aleatório que influencia a potência dos percursos e que deveria ser estudado. Além disso, é possível identificar um componente LOS de destaque nas medições das referências, algo que obviamente não acontece em todos os cenários, mas que poderia ter sido uma alternativa prevista pelo modelo.

3.4.2 Tempos entre chegadas

As Figs. 3.4 e 3.5, respectivamente, apresentam a função distribuição de probabilidade dos tempos entre chegadas dos *clusters* e dos raios que compõem os *clusters*. Os dados simulados foram aproximados em uma distribuição exponencial de parâmetros $1/200,63 \text{ ns}^{-1}$ para o tempo entre chegadas dos *clusters* e $1/4,938 \text{ ns}^{-1}$ para o tempo entre chegadas dos raios. Os valores simulados desses parâmetros ficaram muito próximos dos valores teóricos de $1/200 \text{ ns}^{-1}$ para *clusters* e $1/5 \text{ ns}^{-1}$ para raios, respectivamente.

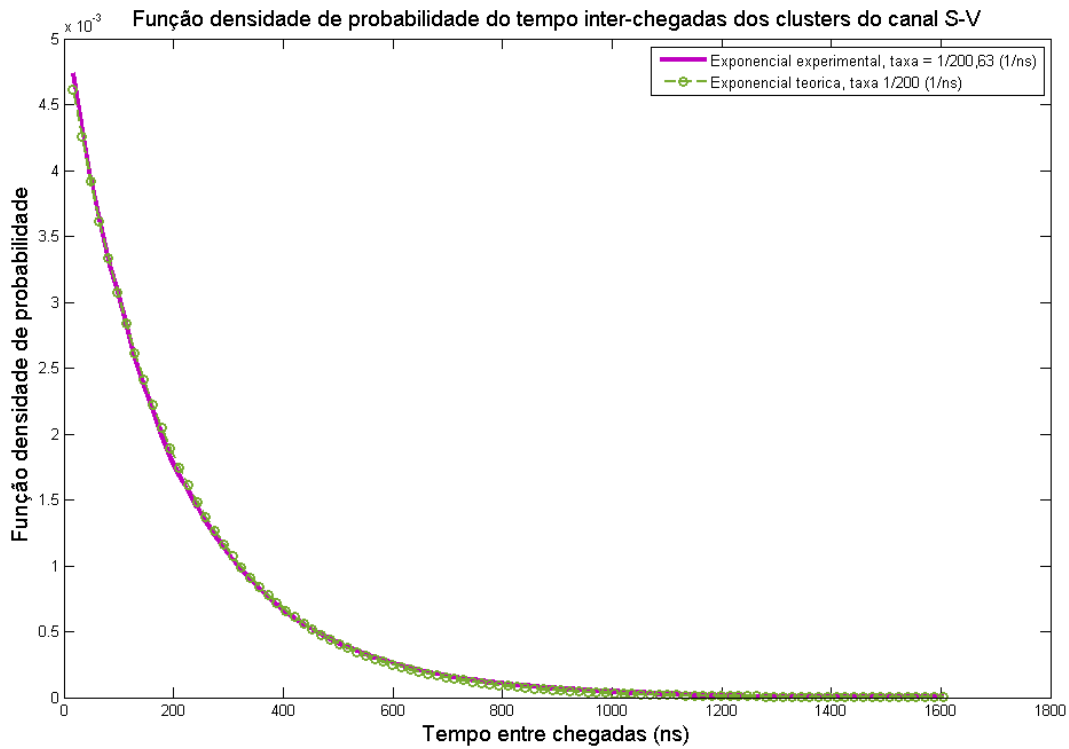


Figura 3.4. Função distribuição de probabilidade dos tempos entre chegadas dos *clusters*.

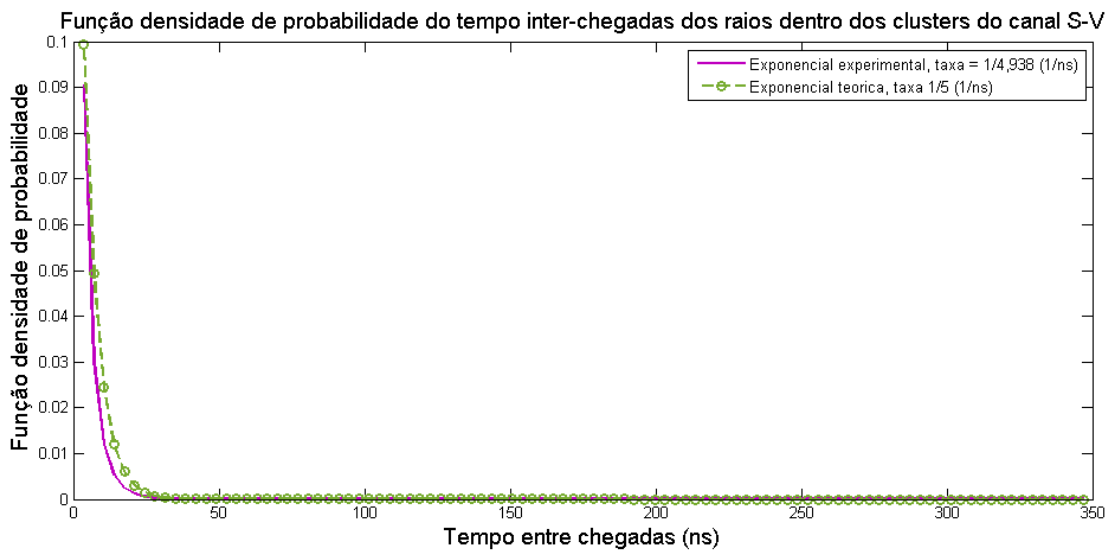


Figura 3.5. Função distribuição de probabilidade dos tempos entre chegadas dos raios dentro dos *clusters*.

3.4.3 Espalhamento de atraso RMS

A Fig. 3.6 traz uma estimativa do espalhamento de atraso RMS do canal de Saleh-Valenzuela, feita utilizando as 50.000 realizações de canal. O espalhamento de atraso RMS apresentou uma média

em torno de 50 ns e uma banda de coerência com 50% de correlação em torno de 4 MHz e com 90% de correlação em torno de 400 KHz. Esses valores de banda de coerência foram estimados a partir de uma aproximação da Eq. (2.7) definida por $B_c = \frac{1}{5\tau_{RMS}}$ para uma correlação de 50% e $B_c = \frac{1}{50\tau_{RMS}}$ para uma correlação de 90%. Essas aproximações também foram utilizadas no cálculo de todas as próximas bandas de coerência a serem apresentadas neste trabalho.

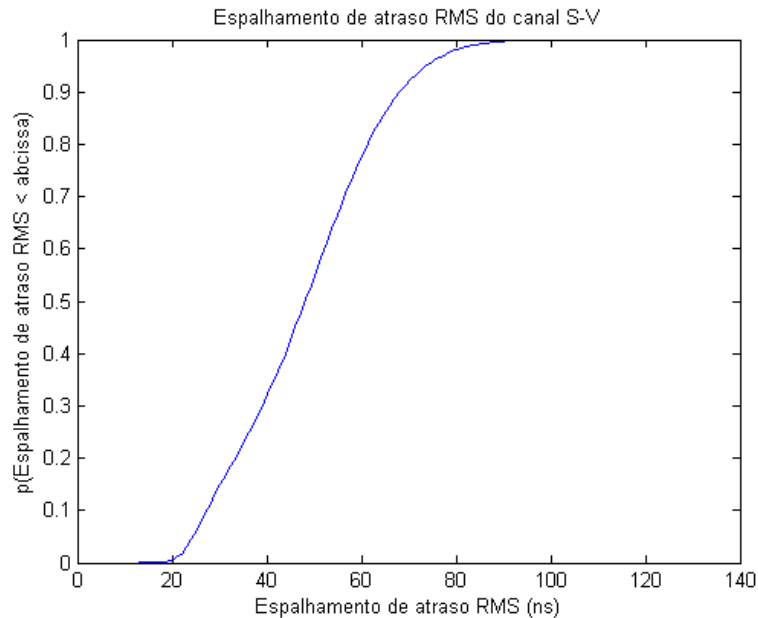


Figura 3.6. Espalhamento de atraso RMS extraído das simulações do canal de Saleh-Valenzuela.

Nas medições em 62,4 GHz de [17], nas medições realizadas nos corredores, estes de dimensões comparáveis às distâncias consideradas no ambiente de medição utilizado por Saleh e Valenzuela para padronizar seu modelo, tem-se um atraso RMS comparável (aproximadamente 40 ns, em média) ao atraso RMS simulado neste trabalho e ilustrado na Fig. 3.6. No entanto, quando as medições são realizadas dentro de salas e pequenos espaços como nos ambientes *E* e *F* de [17] (cômodos de 48 m² de área) e em [26], obtém-se um valor de espalhamento de atraso RMS consideravelmente menor (aproximadamente 8 ns, em média).

Tem-se no modelo de Saleh-Valenzuela uma definição de parâmetros que considera um alcance, em termos de distância transmissor-receptor, maior do que a maioria das medições em 60 GHz. A parametrização do modelo de Saleh-Valenzuela foi definida para um andar inteiro, com o transmissor posicionado no meio de um corredor de 115 m de comprimento de um andar com 14 m de largura com várias salas. O fato da maioria das medições *indoor* em 60 GHz serem avaliadas para pequenas dimensões acontece porque a natureza atenuadora do canal em 60 GHz limita de forma bastante restritiva essas distâncias, o que influenciará diretamente os atrasos dos componentes do sinal no receptor. Logo, há a necessidade de um modelo para essa faixa que seja parametrizado para pequenos espaços.

3.4.4 Distribuição de probabilidade das amplitudes

A Fig. 3.7 atesta a geração de amplitudes de distribuição aleatória Rayleigh. A PDF foi realizada para o primeiro raio do primeiro *cluster*, pois este é o único raio que possui o parâmetro $\overline{a_{c,l}^2}$ comum a todas as realizações, já que este é $\overline{a_{0,0}^2} = 1$ para todas as realizações.

O valor do parâmetro σ da distribuição genérica de Rayleigh é expresso por $\sigma = \sqrt{\overline{a_{c,l}^2}/2}$ de acordo com a Eq. (3.7), sendo para a primeira realização igual a 0,707, já que $\overline{a_{c,l}^2} = 1$. O valor estimado do parâmetro σ para os dados simulados é 0,7086, valor este dentro do esperado.

Função densidade de probabilidade do primeiro raio do primeiro cluster do canal S-V

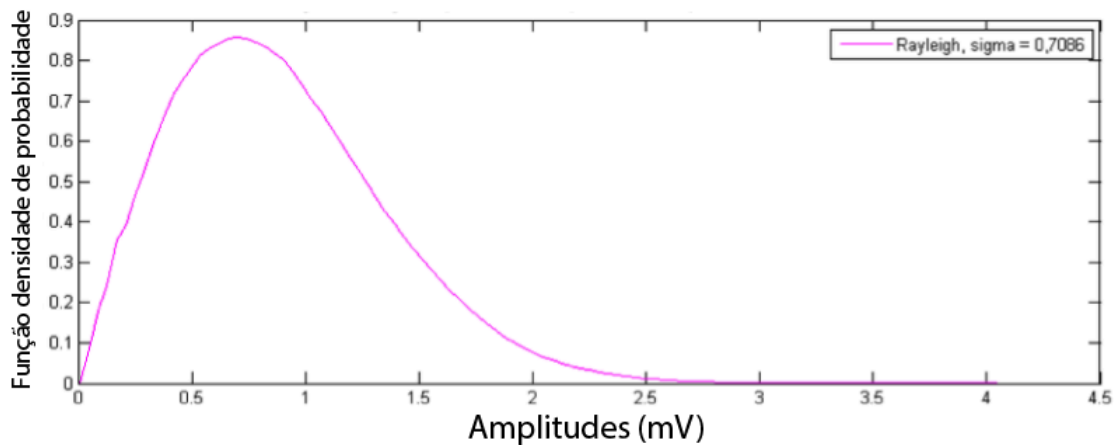


Figura 3.7. Distribuição de probabilidade das amplitudes do canal de Saleh-Valenzuela.

3.4.5 Resposta impulsional do canal

As Figs. 3.8 e 3.9 apresentam a amplitude e a fase da resposta impulsional do canal para a realização da Fig. 3.2, respectivamente. As amplitudes da resposta impulsional estão normalizadas e decaem com o tempo, conforme Eq. (3.4).

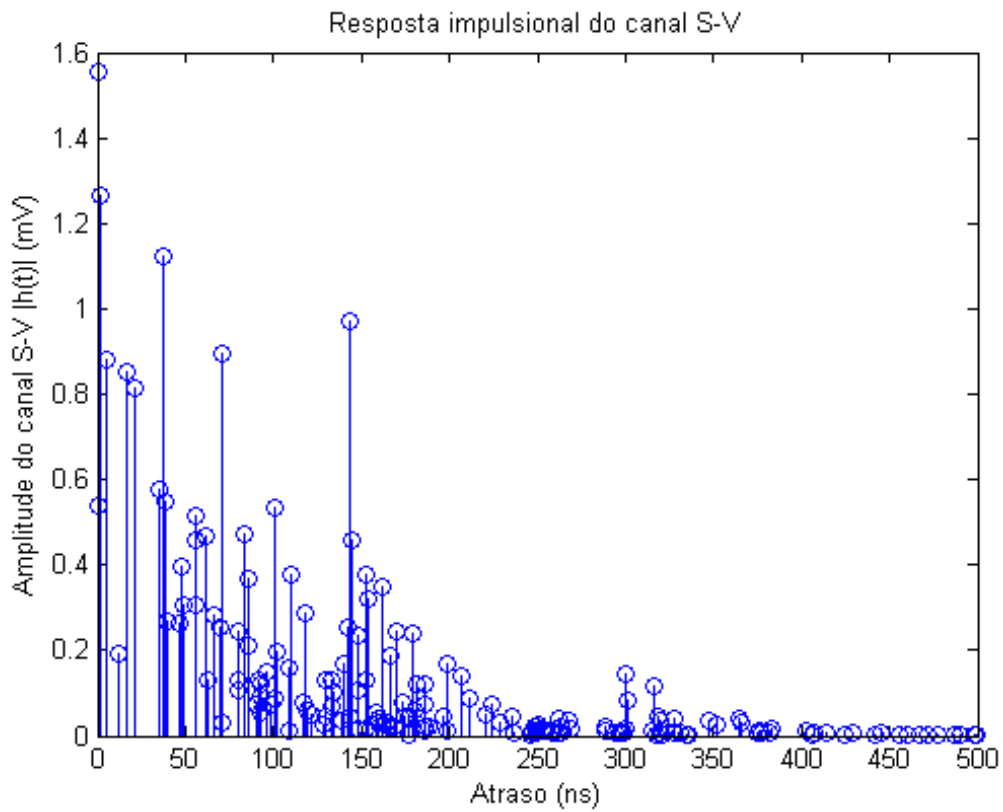


Figura 3.8. Resposta em amplitude do canal de Saleh-Valenzuela.

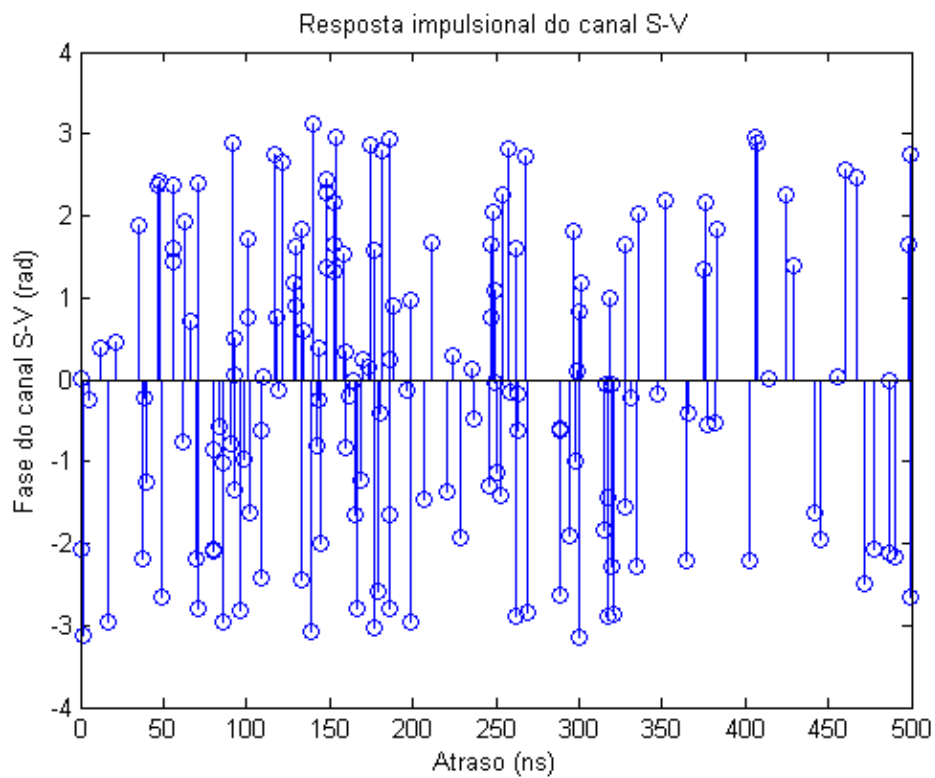


Figura 3.9. Resposta em fase do canal de Saleh-Valenzuela.

Conforme pode ser visto na Fig. 3.9, as fases variam de maneira aproximadamente uniforme entre $-\pi$ e π , como previsto na definição do modelo.

3.4.6 Resposta em frequência

A resposta em frequência do canal de Saleh-Valenzuela também foi observada. A partir da resposta impulsional no tempo, é efetuada a transformada rápida de Fourier FFT (do inglês, *Fast Fourier Transform*) para a frequência. O resultado consta na Fig. 3.10.

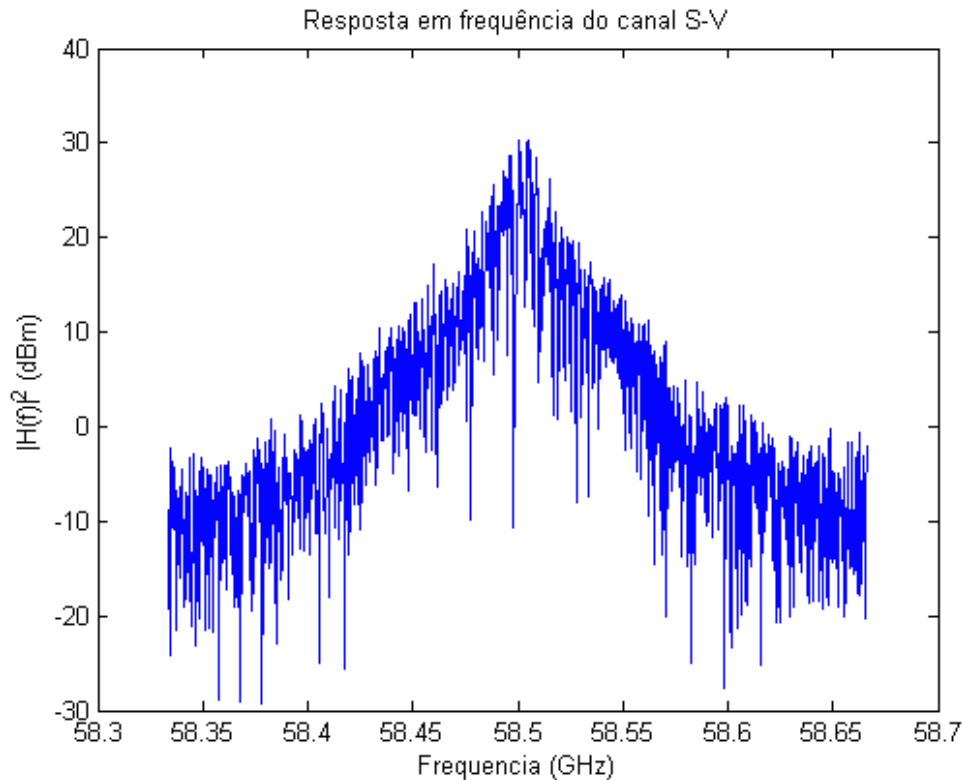


Figura 3.10. Resposta em frequência do canal de Saleh-Valenzuela.

De fato, uma estimativa do canal de Saleh-Valenzuela na faixa de frequências em torno de 60 GHz e com uma largura de banda de 3 GHz mostra que este pode ser bastante seletivo em frequência, ainda mais se observado que essa largura de banda é consideravelmente maior do que a banda de coerência do canal de Saleh-Valenzuela, estimada pelas simulações em 4 MHz (para correlação de 50%). Isso leva à constatação de que o modelo de Saleh-Valenzuela da forma como foi parametrizado possivelmente não se adequa de maneira acurada à representação de canais na faixa milimétrica, principalmente porque as taxas de chegadas de múltiplos percursos e constantes de decaimento de potência derivam de medições em 1,5 GHz. No entanto, se os parâmetros do modelo fossem reavaliados para a faixa milimétrica, e, adicionalmente para espaços de dimensões menores, talvez o modelo de Saleh-Valenzuela pudesse representar melhor essa faixa.

3.5 CONCLUSÕES

A metodologia de modelagem de *clusters* por processos de Poisson e a abordagem do decaimento exponencial de potências pode ser tomada como algo replicável para outras faixas de frequências e modelagens, pois mostrou um formato similar tanto em 1,5 GHz, faixa para o qual foi definido, quanto para as medições em 60 GHz observadas na literatura. Isso possibilita entender porque os modelos de canal para a faixa milimétrica mantiveram essa abordagem.

No entanto, as parametrizações do modelo de Saleh-Valenzuela são muito específicas, o que impossibilita afirmar que o modelo com todas as suas definições possa ser aplicado à faixa milimétrica. Como dito, os perfis de potência do atraso apresentam formato similar em outras faixas de frequência, mas claramente não obedecem aos mesmos parâmetros. A própria resposta em frequência do canal em uma largura de banda elevada (3 GHz) mostrou que o modelo, da forma como é definido, é bastante seletivo em frequência nessa faixa, o que impactaria diretamente a detecção e decodificação do sinal.

E sobretudo, a principal queixa a esse modelo é a falta de caracterização do canal no domínio angular. As medições em 60 GHz recentes, como [18], passaram a contemplar a avaliação do sinal também por seus ângulos de chegada no receptor. Com o passar dos anos, essa tem se mostrado uma variável influente no comportamento do sinal. A popularização das tecnologias de arranjos de antenas dos sistemas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) apontam na direção da modelagem espacial dos canais, com caracterização de ângulos de chegada e de partida dos raios nos domínios azimute e/ou elevação.

Essa inadequação do modelo de Saleh-Valenzuela à faixa milimétrica é o que motiva esse trabalho a explorar outros modelos.

4 MODELO IEEE 802.15.3c

4.1 INTRODUÇÃO

A aparelhagem utilizada por Saleh e Valenzuela durante seus experimentos empregavam antenas omnidirecionais no plano azimutal [13]. Dessa forma, o modelo de Saleh-Valenzuela omite qualquer caracterização dos ângulos de chegada dos raios e *clusters*. No entanto, com o passar dos anos e o advento das comunicações móveis foi-se percebendo que era muito importante obter uma caracterização do canal no domínio espacial. Uma descoberta importante foi a de que, além de serem agrupados no domínio do atraso (*clusters*), os múltiplos percursos também podiam ser agrupados no domínio azimute. Nesse contexto, o IEEE 802.15.3c aperfeiçoa o modelo de Saleh-Valenzuela trazendo a possibilidade de caracterizar o canal também pelos ângulos de chegada AoA (do inglês, *Angle of Arrival*) do sinais.

O capítulo busca então apresentar as principais características do modelo IEEE 802.15.3c. Inicialmente, é exposta uma explanação teórica do modelo, mostrando suas principais equações, parâmetros e estrutura de funcionamento na faixa de 60 GHz.

Posteriormente, é explicada a metodologia utilizada na simulação desse modelo de canal, bem como os resultados extraídos dessas simulações. A partir desses resultados, analisa-se se o modelo é compatível com as medições reais na faixa de 60 GHz.

4.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O modelo de canal IEEE 802.15.3c [19] é um padrão para comunicações sem fio de frequência central em torno de 60 GHz. O modelo é derivado principalmente de medições em canais banda larga para um conjunto de ambientes pré-definidos, e traz, como já introduzido, uma caracterização do canal tanto no domínio do atraso, quanto no domínio angular (azimute).

O IEEE 802.15.3c define ainda para cada ambiente abordagens LOS e NLOS.

O IEEE 802.15.3c subdivide seu modelo em cinco diferentes ambientes de propagação. São eles:

- ❖ Residencial (LOS/NLOS): casa com cômodos mobiliados, paredes de concreto ou madeira, chão com carpete;
- ❖ Escritório (LOS/NLOS): várias cadeiras, mesas e computadores para escritório; estantes de livros, cabinets e armários; paredes de metal/concreto; pode haver estações de trabalho; corredores longos interligando os escritórios;
- ❖ Biblioteca (LOS/NLOS): muitas mesas e prateleiras de metal/madeira cobertas de livros; janelas largas; acessos peatonais largos;
- ❖ Área de trabalho (*desktop*) (LOS/NLOS): nichos de trabalho com computador;

- ❖ Kiosk (LOS): estação em um shopping ou outro lugar público; implica que os usuários se posicionem diretamente em frente ou perto (1-2m) do kiosk.

O IEEE 802.15.3c é um modelo de canal baseado em *clusters*, fruto de uma modificação do padrão de Saleh-Valenzuela. A diferença entre eles reside no fato de que alguns resultados de medições do IEEE 802.15.3c mostraram que quando antenas diretivas são utilizadas, especialmente no cenário LOS, surge uma componente LOS bastante distinta e forte que se sobrepõe à contribuição dos *clusters*. Em função disso, a resposta impulsional desse modelo adiciona uma componente LOS representada separadamente à soma de amplitudes dos *clusters* e seus múltiplos percursos, conforme a equação:

$$h(\tau, \phi) = \beta \delta(\tau, \phi) + \sum_{c=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} a_{c,l} e^{j\varphi_{c,l}} \delta(\tau - \tau_c - \tau_{c,l}) \delta(\phi - \Phi_c - w_{c,l}) \quad (4.1).$$

Outra diferença entre este modelo e o de Saleh-Valenzuela é a existência uma segunda dimensão na caracterização do canal de propagação (Eq. (4.1)). Agora, existe uma contribuição angular no domínio azimute para o canal.

A versão LOS da resposta impulsional é determinada de forma determinística (utilizando *ray-tracing* ou algum método simples baseado em geometria) ou estatisticamente [25]. Por exemplo, para um cenário LOS no ambiente área de trabalho foi observado, durante os estudos de padronização do modelo, uma resposta de dois caminhos para esta componente devido à reflexão na mesa. Neste caso, a componente LOS para esse ambiente pode ser modelada estatisticamente como:

$$\beta[dB] = 20 \log_{10} \left[\frac{\mu_d}{d} \left| \sqrt{G_{t1} G_{r1}} + \sqrt{G_{t2} G_{r2}} \Gamma_0 \exp\left(\frac{j2\pi 2h_1 h_2}{\lambda_f d}\right) \right| \right] - PL_d(\mu_d) \quad (4.2).$$

Na fórmula acima, β descreve o ganho do percurso LOS. λ_f , μ_d , Γ_0 , d , h_1 e h_2 são, respectivamente, o comprimento de onda, a distância média transmissor-receptor, o coeficiente de reflexão, a distância transmissor-receptor e alturas do transmissor e receptor. G_{t1} , G_{r1} , G_{t2} e G_{r2} são os ganhos das antenas transmissora e receptora do caminho 1 e os ganhos das antenas transmissora e receptora do caminho 2, respectivamente.

O coeficiente de reflexão Γ_0 é tido como 1 para o ambiente área de trabalho com LOS [19] [25].

Os ganhos das antenas transmissora e receptora podem ser calculados pelo modelo de antena de referência ou pelo modelo de antena gaussiano.

O modelo de antena de referência [19] apresenta um padrão simétrico nos planos E e H e o ganho pode ser calculado por:

(4.3),

$$G(\theta, \varphi)[dB] = G_0 - 3.01 \cdot \left(\frac{2\theta}{\theta_{-3dB}} \right)^2 \quad 0 \leq \theta \leq \theta_{ml}/2$$

$$G(\theta, \varphi)[dB] = -0.4111 \cdot \ln(\theta_{-3dB}) - 10.597 \quad \theta_{ml}/2 \leq \theta \leq 180^\circ$$

em que, $\theta_{ml} = 2.6 \cdot \theta_{-3dB}$ e $G_0 = 10 \log \left(\left(\frac{1.6162}{\sin(\theta_{-3dB}/2)} \right)^2 \right) \cdot \theta_{ml}$, θ_{-3dB} , e θ são a largura de feixe do

lóbulo principal, o ângulo de meia potência e o ângulo de feixe, respectivamente. A Fig. 4.1 ilustra o ganho de antena em função do ângulo do feixe quando calculado pelo modelo de referência. Dado que a natureza do canal na faixa de 60 GHz prioriza o uso de antenas direcionais, é possível observar na Fig. 4.1 que a largura de feixe utilizada irá impactar diretamente a distribuição espacial do ganho da antena e, conseqüentemente, os parâmetros da transmissão como espalhamento angular e constantes de decaimento de potência, por exemplo.

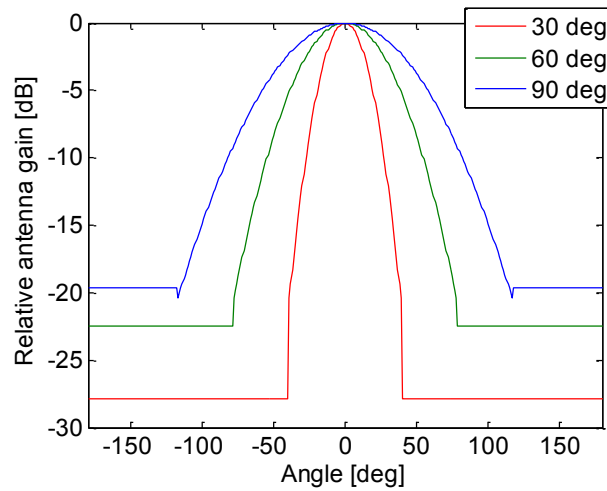


Fig. 4.1. Ganho da antena pelo modelo de antena de referência [19].

$PL_d(\mu_d)$ representa, na Eq. (4.2), a perda de percurso (do inglês *path loss*) associada ao percurso LOS e dada pela fórmula:

$$PL_d(\mu_d)[dB] = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda_f} \right) + A_{NLOS} + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (4.4),$$

em que A_{NLOS} é dado e representa uma constante de atenuação para ambientes NLOS; d_0 (m) é a distância de referência do espaço livre (normalmente 1m); e n é o expoente de perda de percurso, que define como a perda de percurso média depende da distância transmissor-receptor, e é definido pelo modelo para cada ambiente baseado em medições. Lembrando que essas medições foram feitas para uma variedade de configurações de antenas. logo, dependendo do tipo de antena a ser utilizada, os parâmetros mudam.

O número médio de *clusters* do padrão 802.15.3c varia de 3 a 14, mas mais tipicamente entre 3 e 4. Não segue nenhuma distribuição específica, mas possui uma natureza estatística (média) muito

dependente de cada ambiente. Essa média é definida para cada ambiente e está representada nas Tabelas 4.1 a 4.5 por \bar{L} .

Os tempos de chegada dos *clusters* e dos raios são modelados por processos de Poisson, exatamente como no modelo de Saleh-Valenzuela. A diferença é que no IEEE 802.15.3c o tempo de chegada do primeiro *cluster*, τ_0 , não é mais igual a 0 desde que o ponto de referência mudou. Agora, a componente LOS é que tem tempo de chegada igual a 0. As taxas de chegada dos *clusters* e dos raios são parametrizadas para cada ambiente e estão representadas nas Tabelas 4.1 a 4.5 por Λ e λ , respectivamente.

As potências dos *clusters* e dos raios possuem um decaimento que seguem a mesma estrutura genérica do de Saleh-Valenzuela (Eq. (3.5)). No entanto, a potência do primeiro raio do primeiro *cluster* não é definida arbitrariamente, e sim parametrizada para cada ambiente de acordo com as medições. Outra diferença é que existe uma componente aleatória que pondera a estrutura genérica do cálculo das potências, de desvio padrão σ_c para o *cluster* como um todo e σ_r entre os raios dentro de cada *cluster* (Eq. (4.5)). Logo, cada múltiplo percurso que chega ao receptor tem um termo de desvanecimento associado à chegada do *cluster* e um termo de desvanecimento associado à chegada do raio em si. Além disso, as potências dos raios dentro de um dado *cluster* possuem uma diferença de potência mínima com relação ao primeiro raio do mesmo. Essa diferença é definida para cada ambiente e está representada nas Tabelas 4.1 a 4.5 por Δk . Os valores das potências do primeiro raio do primeiro *cluster* e dos desvios padrões das componentes aleatórias que ponderam as potências dos *clusters* e dos raios constam nas Tabelas 4.1 a 4.5, representados por Ω , σ_c e σ_r , respectivamente. A Fig. 4.2 ilustra o perfil de potência do atraso do modelo, destacando as novas componentes citadas para o cálculo das potências. É possível observar nessa figura que, diferentemente do modelo de Saleh-Valenzuela, o decaimento negativo das potências dos *clusters* e dos múltiplos percursos não é tão regular, justamente em virtude da componente aleatória associada à potência de cada raio.

No canal IEEE 802.15.3c, assume-se uma distribuição log-normal para os ganhos em amplitude dada por [20]:

$$20 \log(a_{c,l}) \propto Normal(\mu_{c,l}, \sigma_c^2 + \sigma_r^2) \quad (4.5)$$

ou

$$|a_{c,l}| = 10^{\mu_{c,l} + n_c + n_r / 20}, n_c \propto Normal(\mu_{c,l}, \sigma_c^2 + \sigma_r^2) \quad (4.6),$$

em que $\mu_{c,l} = \frac{10 \ln(\Omega) - \frac{10(\tau_c - \tau_0)}{\Lambda}}{\ln(10)} - \frac{(\sigma_c^2 + \sigma_r^2) \ln(10)}{20}$, quando se trata do primeiro raio de cada *cluster*.

Para os demais raios do *cluster*, $\mu_{c,l} = \frac{10 \ln(\Omega) - \frac{10(\tau_c - \tau_0)}{\Lambda} - \frac{10\tau_{c,l}}{\lambda} - 10 \ln(\Delta k)}{\ln(10)} - \frac{(\sigma_c^2 + \sigma_r^2) \ln(10)}{20}$.

Quanto à representação dos *clusters* no domínio angular proposta nesse modelo, tem-se que o ângulo de chegada da componente LOS Φ_{LOS} é 0° . Cada *cluster* possui um ângulo de chegada médio

Φ_c que é definido como uma variável aleatória uniforme de 0 a 2π , conforme Eq. (4.7), condicionada ao ângulo de chegada médio do *cluster* anterior.

Os raios dentro de um *cluster* possuem um ângulo de chegada $w_{c,l}$ que consiste no ângulo médio do *cluster* mais uma contribuição aleatória que pode ser laplaciana (Eq. (4.8)) ou gaussiana (Eq. (4.9)) de média zero e desvio padrão σ_Φ parametrizado para cada ambiente e representado nas Tabelas 4.1 a 4.5 por σ_Φ .

$$p(\Phi_c|\Phi_{c-1}) = \frac{1}{2\pi} \quad (4.7).$$

$$p(w_{c,l}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\Phi} \exp\left(\frac{-w_{c,l}^2}{2\sigma_\Phi^2}\right) \quad (4.8).$$

$$p(w_{c,l}) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_\Phi} \exp\left(-\left|\frac{\sqrt{2}w_{c,l}}{\sigma_\Phi}\right|\right) \quad (4.9).$$

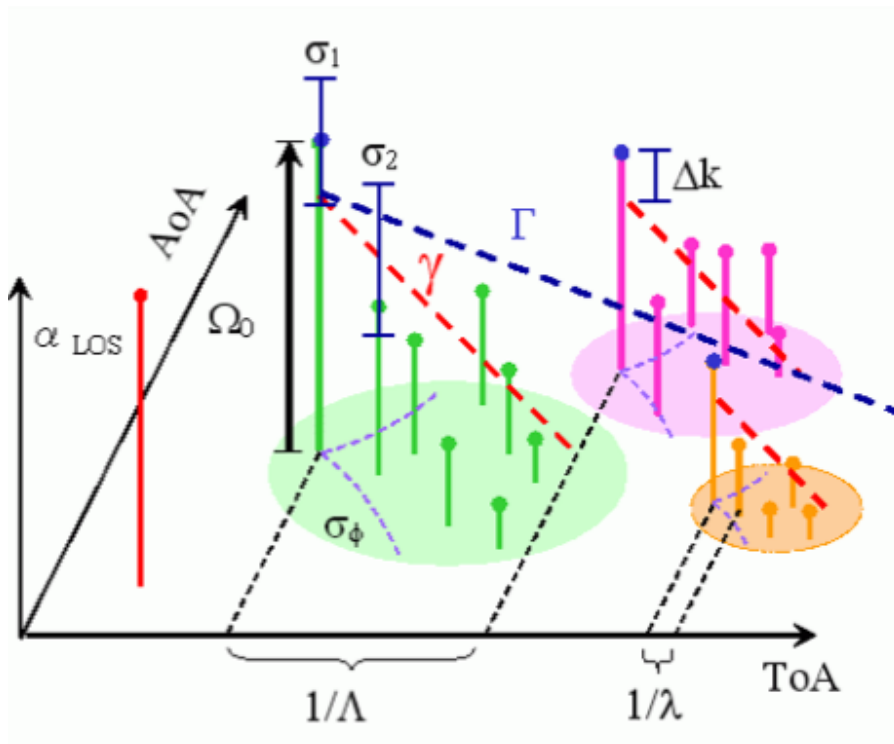


Figura 4.2. Perfil de potência do atraso do modelo IEEE 802.15.3c [19].

Para cada ambiente do IEEE 802.15.3c, foram definidos diferentes valores de parâmetros para diferentes configurações de largura de feixe de meia potência das antenas transmissora e receptora. Dessa forma, as simulações dos ambientes com diferentes configurações de antena trarão resultados diferentes entre si, pois o canal comporta-se diferentemente para cada configuração. Além disso, é importante ressaltar que os parâmetros de cada ambiente foram medidos usando preferencialmente antenas do tipo corneta ou omnidirecional.

Tabela 4.1. Parâmetros para ambiente residencial LOS e NLOS i.e., CM1 e CM2. Os parâmetros foram extraídos de medições em 62,5 GHz e 3 GHz de largura de banda para uma cobertura de até 3m [19].

Residencial	LOS (CM1)					NLOS (CM2)	Comentários
	Tx-360°, Rx-15° NICT ¹	Tx-60°, Rx-15° NICT ¹	Tx-30°, Rx-15° NICT ¹	Tx-15°, Rx-15° NICT ¹	Tx-360°, Rx-15° NICTA ²		
Λ [1/ns]	0,191	0,194	0,144	0,045	0,21	N/A	
λ [1/ns]	1,22	0,90	1,17	0,93	0,77	N/A	
Γ [ns]	4,46	8,98	21,5	12,6	4,19	N/A	
γ [ns]	6,25	9,17	4,35	4,98	1,07	N/A	
σ_c [dB]	6,28	6,63	3,71	7,34	1,54	N/A	
σ_r [dB]	13	9,83	7,31	6,11	1,26	N/A	
σ_ϕ [graus]	49,8	119	46,2	107	8,32	N/A	
\bar{L}	9	11	8	4	4	N/A	
Δk [dB]	18,8	17,4	11,9	4,60	N/A	N/A	
$\Omega(d)$ [dB]	-88,7	-108	-111	-110,7	N/A	N/A	Ω_0 foi derivado para 3 m
n_d	2	2	2	2	N/A	N/A	
A_{NLOS}	0	0	0	0	N/A	N/A	

Tabela 4.2. Parâmetros para ambiente escritório LOS e NLOS i.e., CM3 e CM4. Os parâmetros foram extraídos de medições em 62,5 GHz e 3 GHz de largura de banda para uma cobertura de 1-5 m no caso LOS e até 10 m no caso NLOS [19].

Escritório	LOS (CM3)		NLOS (CM4)			Comentários
	Tx-30°, Rx-30° NICT ¹	Tx-60°, Rx-60° NICT ¹	Tx-360°, Rx-15° NICT ¹	Tx-30°, Rx-15° NICT ¹	Omni-Tx, Rx-15° NICTA ²	
Λ [1/ns]	0,041	0,027	0,032	0,028	0,07	
λ [1/ns]	0,971	0,293	3,45	0,76	1,88	
Γ [ns]	49,8	38,8	109,2	134	19,44	
γ [ns]	45,2	64,9	67,9	59	0,42	
σ_c [dB]	6,60	8,04	3,24	4,37	1,82	
σ_r [dB]	11,3	7,95	5,54	6,66	1,88	
σ_ϕ [graus]	102	66,4	60,2	22,2	9,1	
\bar{L}	6	5	5	5	6	
Δk [dB]	21,9	11,4	19	19,2	N/A	
$\Omega(d)$ [dB]	-3,27d-85,8	-0,303d-90,3	-109	-107,2	N/A	
n_d	2	2	3,35	3,35	N/A	
A_{NLOS}	0	0	5,56@3m	5,56@3m	N/A	

¹ A parametrização para esta configuração de antenas foi realizada a partir das medições efetuadas pelo NICT (National Institute of Information and Communications Technology – em português, Instituto Nacional de Tecnologia da Informação e Comunicações)

² A parametrização para esta configuração de antenas foi realizada a partir das medições efetuadas pelo NICTA (National Institute of Information and Communications Technology Australia – em português, Instituto Nacional de Tecnologia da Informação e Comunicações Austrália)

Tabela 4.3. Parâmetros para ambiente biblioteca LOS e NLOS i.e., CM5 e CM6. Os parâmetros foram extraídos de medições em 60 GHz e 1 GHz de largura de banda para uma cobertura de 2-5 m [19].

Biblioteca	LOS (CM5)	NLOS (CM6)	Comentários
Λ [1/ns]	0,25	N/A	
λ [1/ns]	4,0	N/A	
Γ [ns]	12	N/A	
γ [ns]	7,0	N/A	
σ_c [dB]	5,0	N/A	
σ_r [dB]	6,0	N/A	
σ_ϕ [graus]	10,0	N/A	
\bar{L}	9	N/A	
K_{LOS} [dB]	8	N/A	

Tabela 4.4. Parâmetros para ambiente área de trabalho LOS e NLOS i.e., CM7 e CM8. Os parâmetros foram extraídos de medições em 62,5 GHz e 3 GHz de largura de banda para uma cobertura de 5 m.

No entanto, para as medições com antena omnidirecional as medições foram centradas em 60 GHz com 10 GHz de largura de banda e cobertura de 2 m [19].

Área de trabalho	LOS (CM7)		LOS (CM7) Omni-Tx, Rx-21 dBi	NLOS (CM8)
	Tx-30°, Rx-30°	Tx-60°, Rx-60°		
Λ [1/ns]	0,037	0,047	1,72	N/A
λ [1/ns]	0,641	0,373	3,14	N/A
Γ [ns]	21,1	22,3	4,01	N/A
γ [ns]	8,85	17,2	0,58	N/A
σ_c [dB]	3,01	7,27	2,70	N/A
σ_r [dB]	7,69	4,42	1,90	N/A
σ_ϕ [graus]	34,6	38,1	14	N/A
\bar{L}	3	3	14	N/A
Δk [dB]	11	17,2	N/A	N/A
$\Omega(d)$ [dB]	4,44d-105,4	3,46d-98,4	N/A	N/A
h_1	Dist. uniforme Alcance: 0-0,3	Dist. uniforme Alcance: 0-0,3	N/A	N/A
h_2	Dist. uniforme Alcance: 0-0,3	Dist. uniforme Alcance: 0-0,3	N/A	N/A
d	Dist. uniforme Alcance: 0-0,3	Dist. uniforme Alcance: 0-0,3	N/A	N/A
G_{T1}	REF/GSS ³	REF/GSS ³	N/A	N/A
G_{R1}	REF/GSS ³	REF/GSS ³	N/A	N/A
G_{T2}	REF/GSS ³	REF/GSS ³	N/A	N/A
G_{R2}	REF/GSS ³	REF/GSS ³	N/A	N/A
n_d	2	2	N/A	N/A
A_{NLOS}	0	0	N/A	N/A

³ A estimativa do ganho da antena em questão pode ser definida a partir do modelo de antena de referência (REF) ou do modelo de antena gaussiano (GSS), conforme descrito na Seção 4.2 deste documento.

⁴ O atraso máximo de canal refere-se ao tempo máximo de simulação de um *cluster*. Esse valor foi definido

Tabela 4.5. Parâmetros para ambiente kiosk LOS i.e., CM9. Os parâmetros foram extraídos de medições em 62,5 GHz e 3 GHz de largura de banda para uma cobertura de 1 m [19].

Kiosk	LOS (CM9)		Comentários
	Tx-30°, Rx-30° Ambiente 1	Tx-30°, Rx-30° Ambiente 2	
Λ [1/ns]	0,0546	0,0442	
λ [1/ns]	0,917	1,01	
Γ [ns]	30,2	64,2	
γ [ns]	36,5	61,1	
σ_c [dB]	2,23	2,66	
σ_r [dB]	6,88	4,39	
σ_ϕ [graus]	34,2	45,8	
\bar{L}	5	7	
Δk [dB]	11	9,1	
$\Omega(d)$ [dB]	-98	-107,8	Ω_0 foi derivado para 1 m
n_d	2	2	
A_{NLOS}	0	0	

4.3 METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Para realizar a implementação computacional do modelo IEEE 802.15.3c, foi desenvolvido um *script* que segue a estrutura apresentada a seguir:

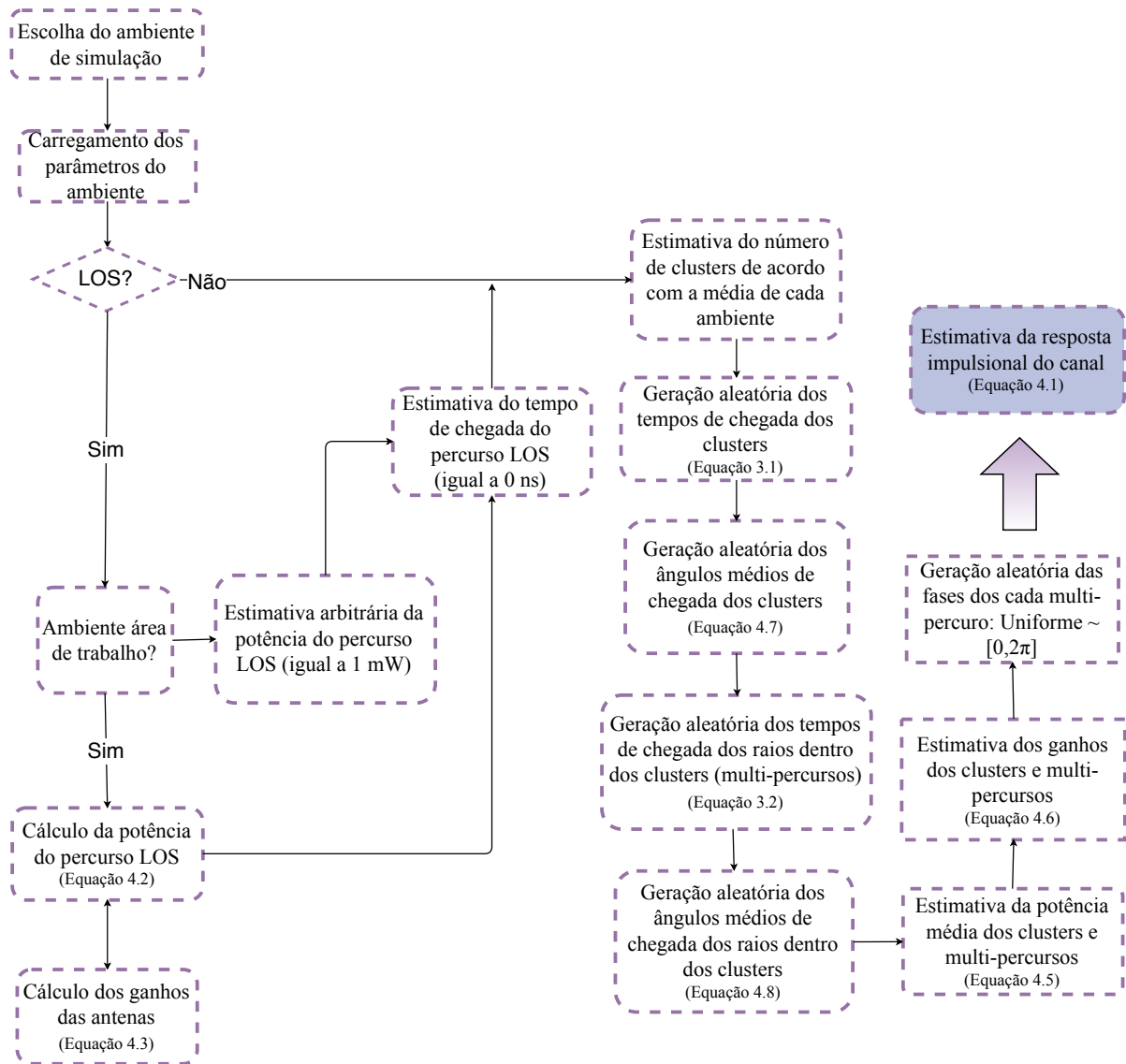


Figura 4.3. Fluxograma da simulação do modelo IEEE 802.15.3c.

Inicialmente, o código carrega os parâmetros do ambiente selecionado conforme as Tabelas 4.1 a 4.5. Se o ambiente for NLOS, o próximo passo é definir aleatoriamente o número de *clusters* a ser simulado. Como a estimativa do número de *clusters* não segue uma distribuição específica, foi escolhido gerar esse número por uma variável de Poisson, como no modelo de Saleh-Valenzuela, cuja média é definida pelo número médio de *clusters* de cada ambiente de acordo com as Tabelas 4.1 a 4.5. Se o ambiente for do tipo LOS, estima-se a amplitude do percurso LOS arbitrariamente (1 mV) ou, no caso do ambiente área de trabalho, conforme a Eq. 4.2. Em seguida, estima-se o número de *clusters* da maneira descrita.

Depois, são gerados os tempos de chegadas dos *clusters* e dos raios de cada *cluster*, de acordo com as taxas de chegada definidas nas Tabela 4.1 a 4.5. Além disso, são gerados os ângulos de chegada dos *clusters* a partir de uma distribuição uniforme de $-\pi$ a π , e os ângulos de chegada dos

raios dentro de cada *cluster* a partir de uma distribuição Laplaciana de parâmetro σ_{Φ} definido para cada ambiente. O percurso LOS tem tempo de chegada 0 ns e ângulo de chegada 0°.

A partir da potência do primeiro raio do primeiro *cluster*, Ω , definido para cada ambiente, são geradas as potências dos outros raios e *clusters* com base no tempo de chegada de cada um e nos respectivos decaimentos de potência, definidos nas Tabela 4.1 a 4.5. A esses valores é somada (em dB) uma contribuição aleatória gaussiana de parâmetros σ_c e σ_r , para *clusters* e raios, respectivamente, obtendo dessa forma potências que já são do tipo log-normal. Com as potências dos componentes prontamente calculadas, são estimadas as amplitudes dividindo as potências por 20 e transformando-as da escala logarítmica para a linear.

Por fim, os tempos de chegadas dos *clusters* e raios são ordenados de modo a formar uma linha de atraso crescente (as potências, ângulos de chegada, ganhos de amplitude e fase correspondentes a cada tempo de chegada são ordenados com os mesmos índices).

Para o ambiente residencial, foram geradas 50.000 realizações de canal com LOS para cada uma dentre quatro combinações de antena diferentes: Tx 360° e Rx 15°; Tx 60° e Rx 15°; Tx 30° e Rx 15°; Tx 15° e Rx 15°.

Para o ambiente escritório, foram geradas 20.000 realizações de canal para a primeira combinação de antenas do modelo LOS, Tx 30° e Rx 30°; 50.000 realizações para a segunda combinação de antenas do cenário LOS, Tx 60° e Rx 60°; 10.000 realizações para o modelo NLOS de Tx 360° e Rx 15° e 20.000 realizações para o modelo NLOS de Tx 30° e Rx 15°. Esse ambiente teve um número reduzido de realizações devido a disponibilidade de memória computacional no software utilizado para simulação, pois esses ambientes tem taxas de chegada de *clusters* e raios e constantes de decaimento de potência maiores.

Para o ambiente área de trabalho (*desktop*), foram geradas 50.000 realizações de canal com LOS para cada uma dentre duas combinações de antena diferentes: Tx 30° e Rx 15°; e Tx 60° e Rx 60°.

Para o ambiente kiosk, foram geradas 30.000 realizações de canal para o cenário 1 da Tabela 4.5 e 10.000 realizações de canal para o cenário 2 da Tabela 4.5. As realizações de canal foram reduzidas pra esses ambientes pelos motivos já expostos para o caso do escritório.

Devido à ausência de parametrização de alguns parâmetros importantes do ambiente biblioteca, não foram simuladas realizações de canal para este ambiente.

Os resultados obtidos das simulações são apresentados na seção a seguir.

4.4 RESULTADOS

Os resultados apresentados aqui representam uma realização de canal escolhida aleatoriamente, com exceção das funções densidade de probabilidade, que foram examinadas para todo o conjunto de

dados. A análise dos resultados foi dividida por ambiente. Ainda, para cada ambiente, os gráficos foram organizados em subseções, conforme a estrutura do capítulo anterior, afim facilitar o entendimento e apresentar os dados de forma mais organizada.

4.4.1 Residencial

O ambiente residencial é caracterizado por uma casa com cômodos mobiliados, paredes de concreto ou madeira e chão com carpete. Neste projeto, foram simuladas somente realizações de canal para este que considerassem a existência de um percurso LOS para esse ambiente. Dentro desse escopo, foram efetuadas simulações para quatro combinações diferentes de largura de feixe de meia potência no transmissor e no receptor: Tx: 360° e Rx: 15°, Tx: 60° e Rx: 15°, Tx: 30° e Rx: 15° e Tx: 15° e Rx: 15°.

4.4.1.1 Perfil de potência do atraso

As figuras a seguir apresentam os perfis de potência do atraso para os quatro tipos de configuração de antenas do ambiente residencial. Para cada configuração são mostradas uma perspectiva tridimensional do perfil de potência, caracterizando atraso de chegada, ângulo de chegada e potência de chegada, e uma perspectiva no domínio atraso-angular, caracterizando atrasos em função dos ângulos de chegada.

❖ Tx: 360°, Rx: 15°. Atraso máximo do canal: 62,5 ns.⁴

Para a realização de canal ilustrada na figura abaixo, obteve-se um fator K (dB) de valor negativo. Isso é explicado pelo fato de que, dada a componente aleatória do tipo normal presente nas potências dos múltiplos percursos, pode ocorrer de existirem caminhos cuja componente aleatória eleva o valor da potência média desses caminhos a ponto destes possuírem um valor final de potência comparável à potência do percurso LOS. A título de comparação, foi disponibilizado no Apêndice A deste documento uma realização de canal alterantiva para esse ambiente, na qual a potência da componente LOS destaca-se frente às potências dos múltiplos percursos, produzindo um fator K positivo.

⁴ O atraso máximo de canal refere-se ao tempo máximo de simulação de um *cluster*. Esse valor foi definido como 10 vezes o valor da constante de decaimento de potência dos raios (múltiplos percursos) de um *cluster*.

PDP do canal IEEE 802.15.3c: Ambiente LOS-Residencial TX: 360°, Rx: 15°

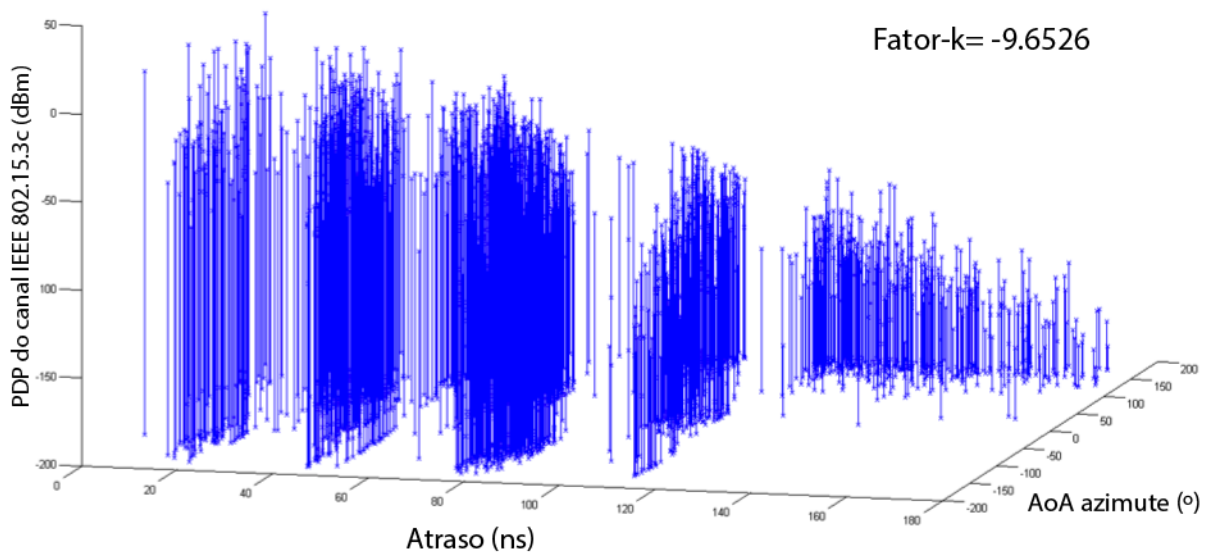


Figura 4.4 Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 360°, Rx: 15°.

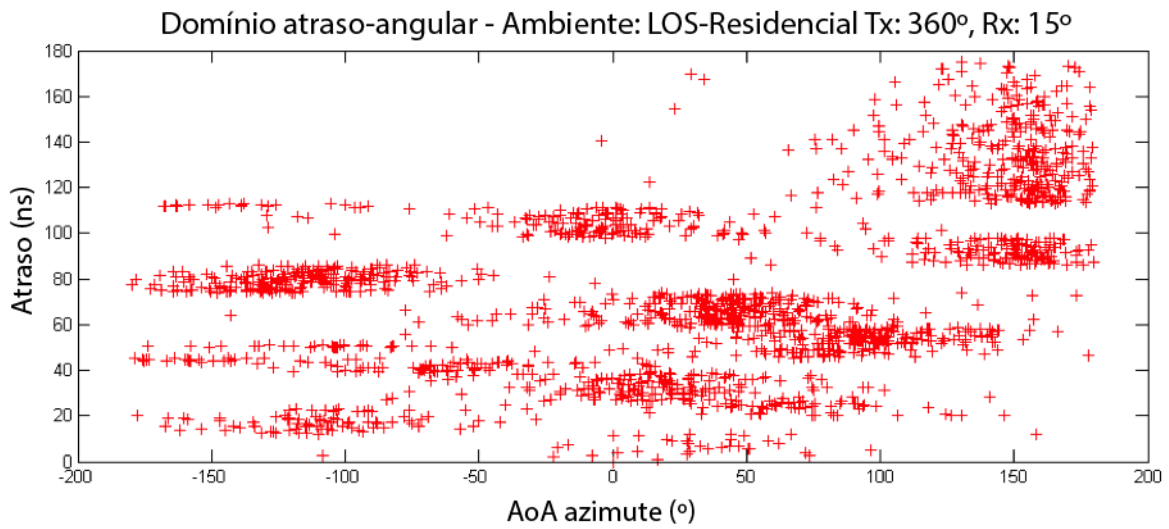


Figura 4.5. Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Residencial (LOS) Tx: 360°, Rx: 15°.

❖ Tx: 60°, Rx: 15°. Atraso máximo do canal: 91,7 ns.

PDP do canal IEEE 802.15.3c: Ambiente LOS-Residencial Tx: 60°, Rx: 15°

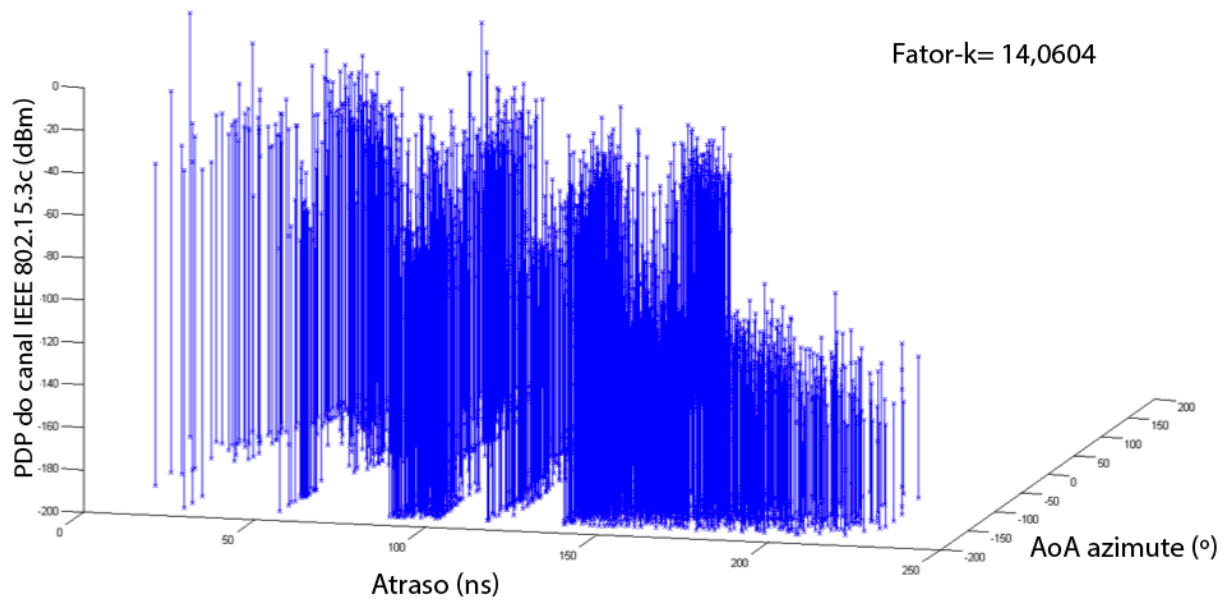


Figura 4.6. Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 60°, Rx: 15°.

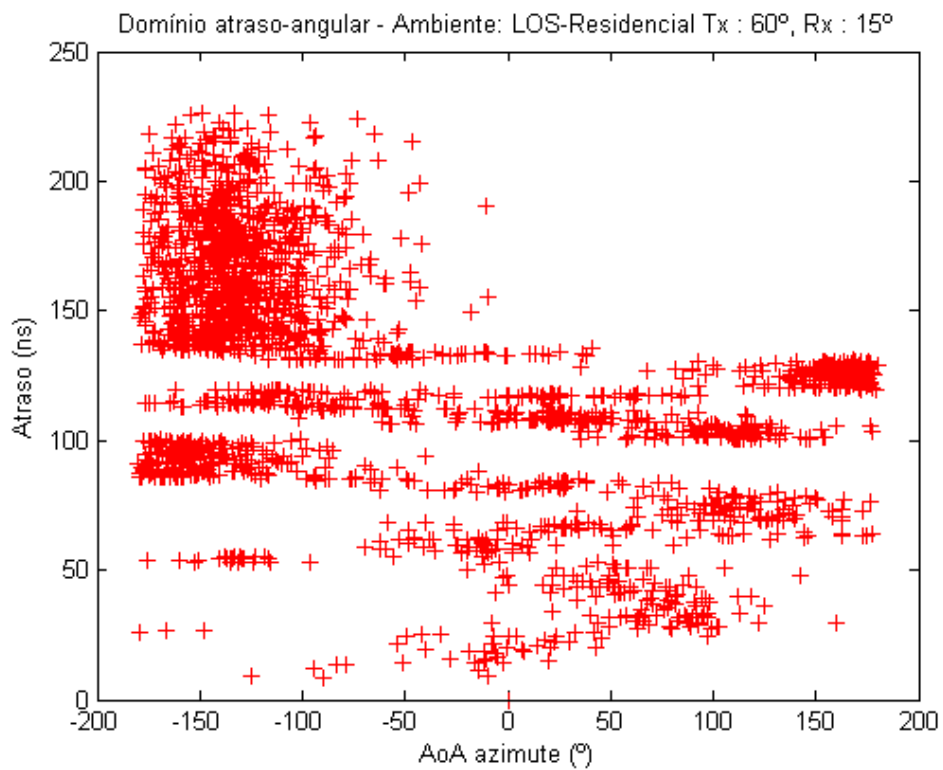


Figura 4.7. Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Residencial (LOS) Tx: 60°, Rx: 15°.

❖ Tx: 30°, Rx: 15°. Atraso máximo do canal: 43,5 ns.

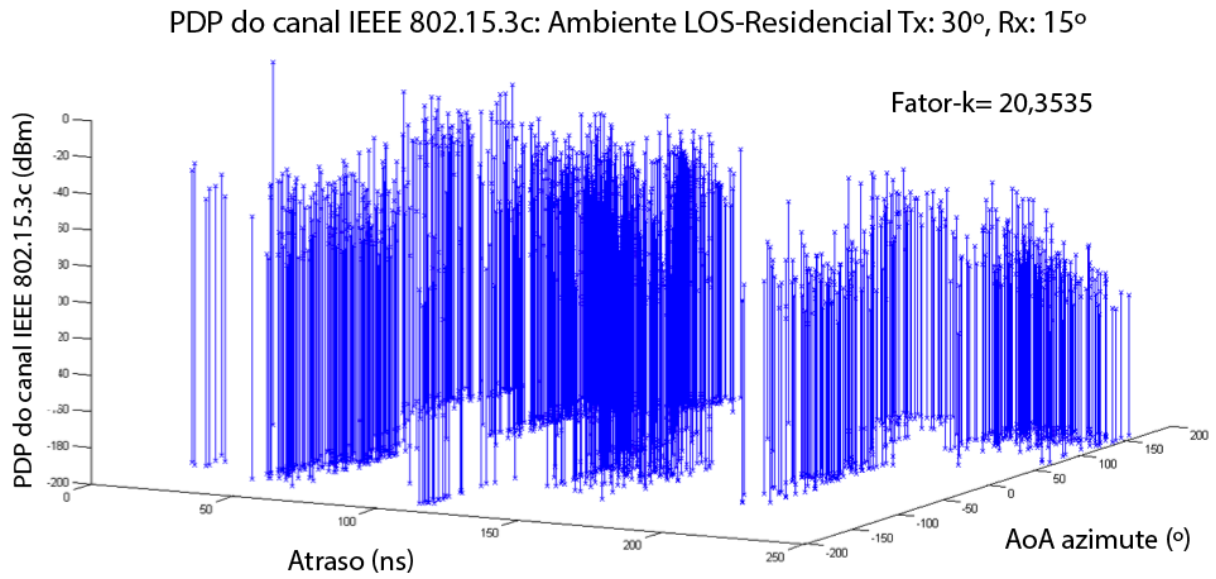


Figura 4.8. Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 30°, Rx: 15°.

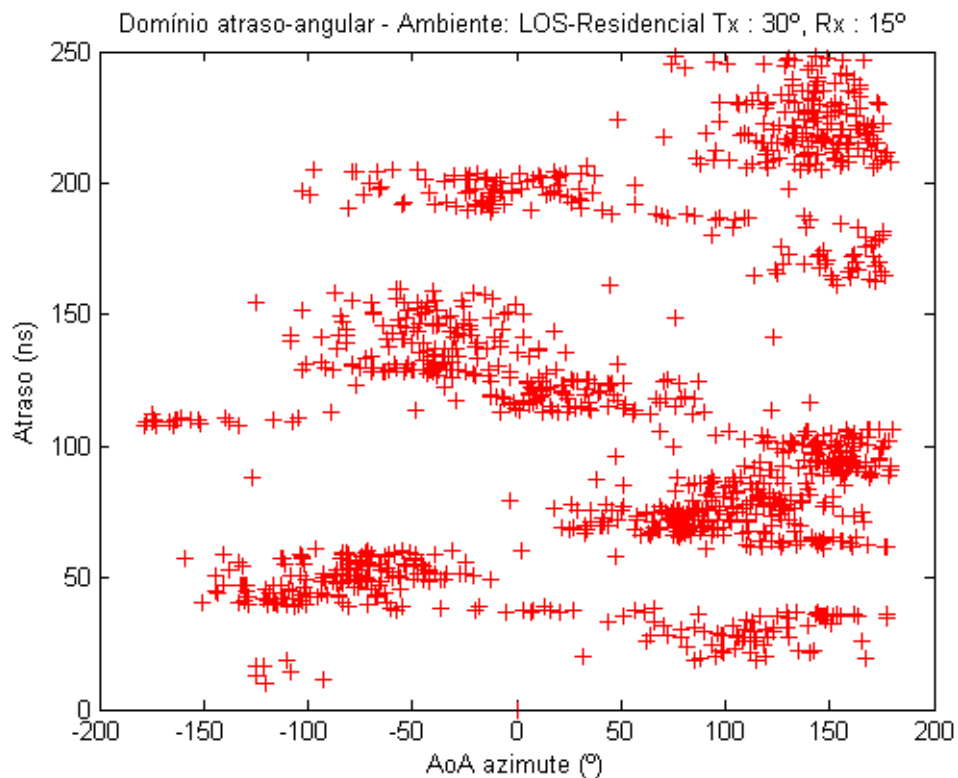


Figura 4.9. Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Residencial (LOS) Tx: 30°, Rx: 15°.

❖ Tx: 15°, Rx: 15°. Atraso máximo do canal: 49,8 ns.

PDP do canal IEEE 802.15.3c: Ambiente LOS-Residencial Tx: 15°, Rx: 15°

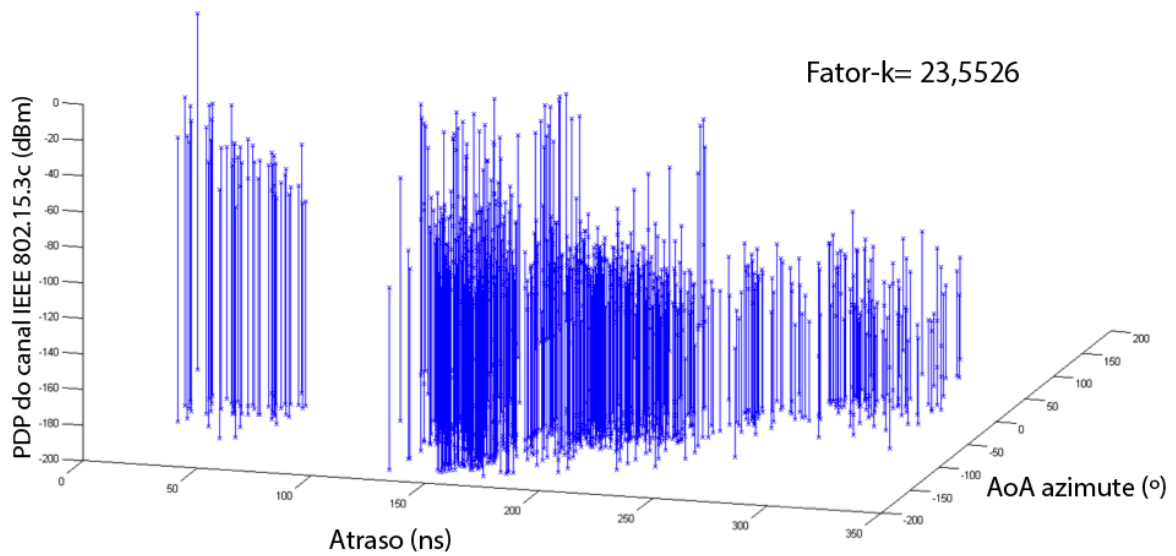


Figura 4.10. Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 15°, Rx: 15°.

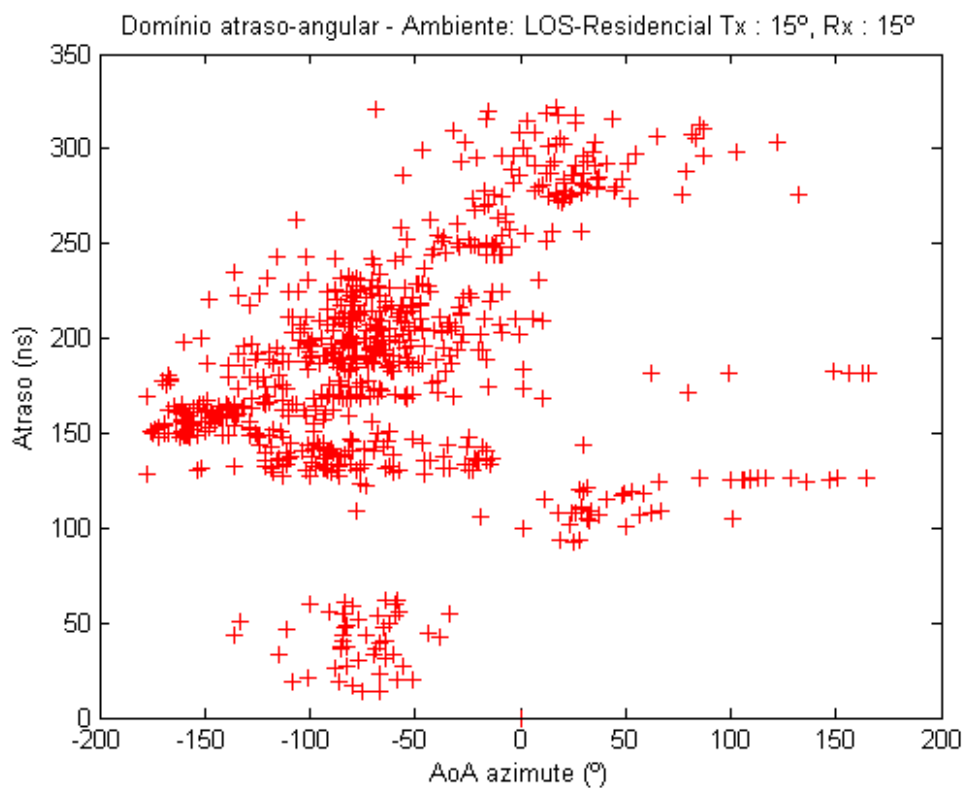


Figura 4.11. Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Residencial (LOS) Tx: 15°, Rx: 15°.

4.4.1.2 Espalhamento de atraso RMS

As figuras a seguir apresentam o espalhamento de atraso RMS para os quatro tipos de configuração de antenas do ambiente residencial. Esse espalhamento foi calculado de acordo com a Eq. (2.4) para 50.000 PDPs.

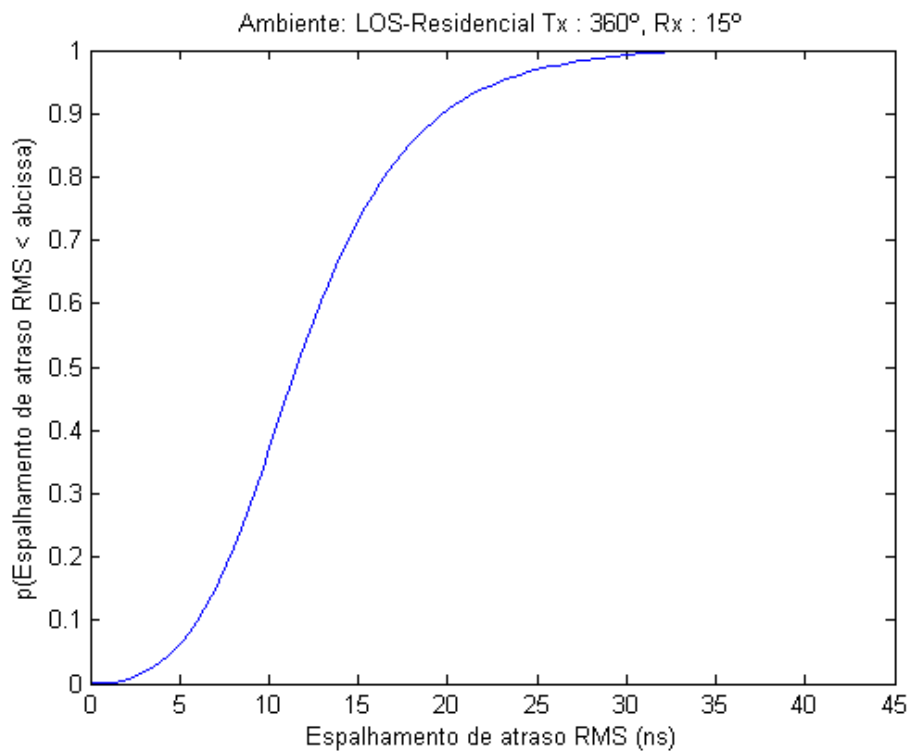


Figura 4.12. Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 360°, Rx: 15°.

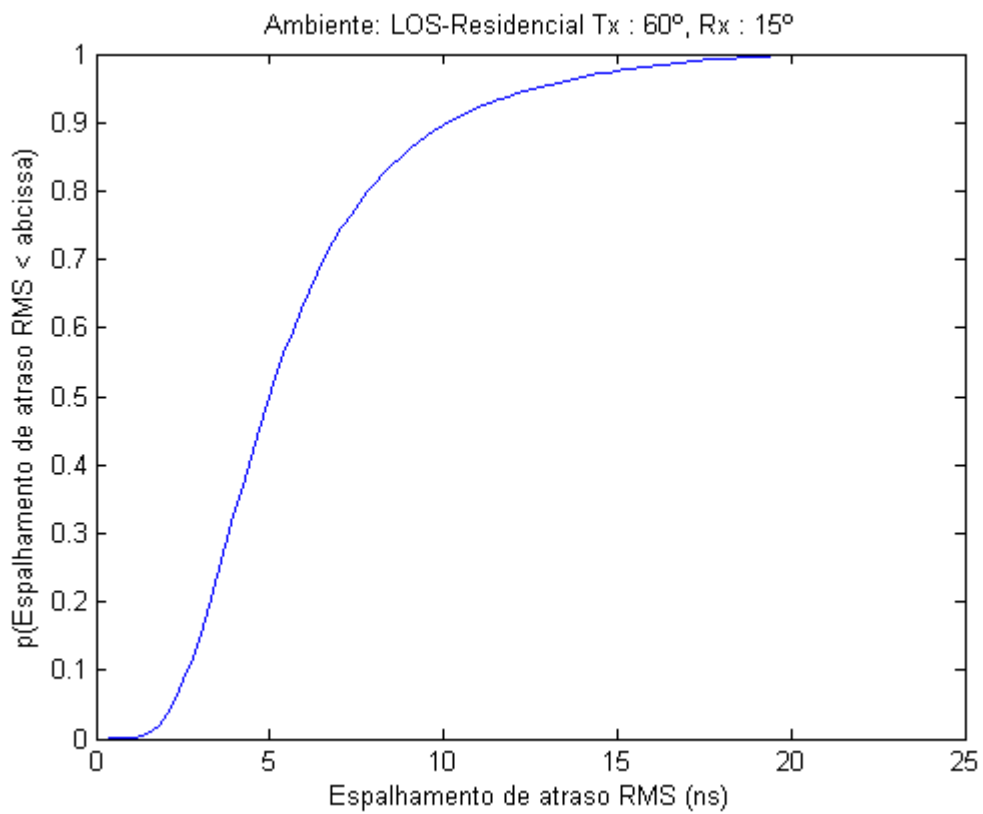


Figura 4.13. Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 60°, Rx: 15°.

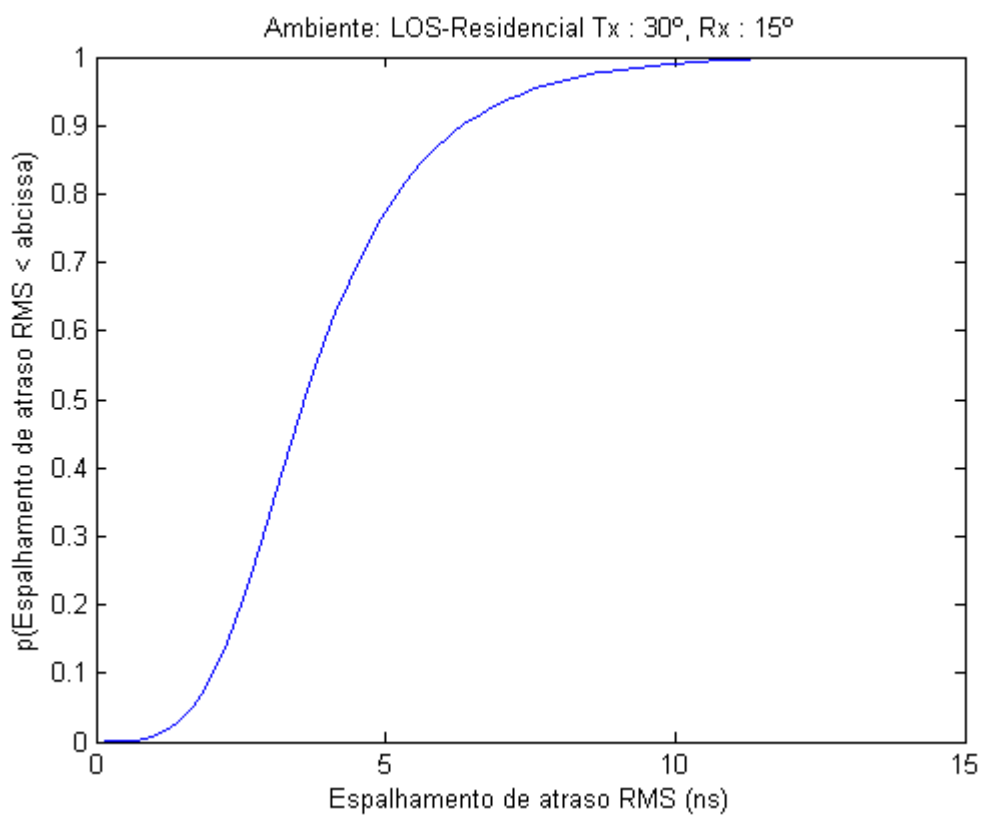


Figura 4.14. Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 30°, Rx: 15°.

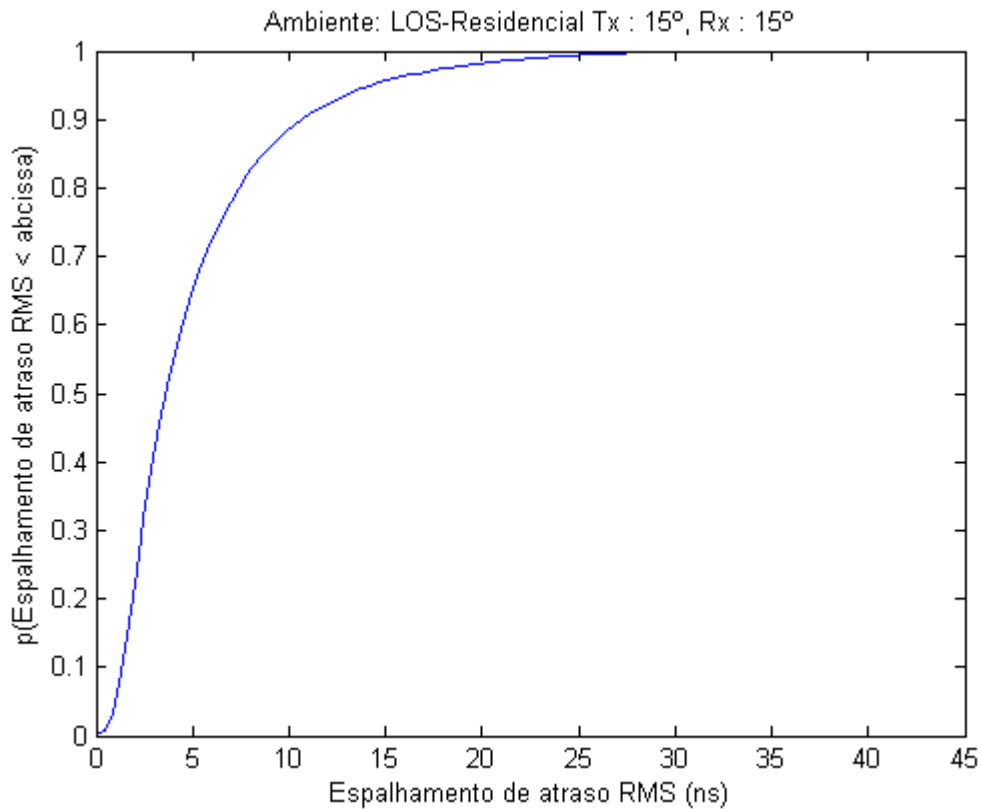


Figura 4.15. Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 15°, Rx: 15°.

É possível observar que o menor espalhamento de atraso RMS ocorre para o caso de Tx: 30° e Rx: 15°. Isso pode ser explicado pelo fato de que este cenário possui a menor constante de decaimento de potência dos múltiplos percursos, segundo a Tabela 4.1, e o menor atraso máximo de canal.

A média do espalhamento de atraso RMS para o ambiente residencial com LOS ficou entre 4 ns e 12 ns. Logo, a banda de coerência para uma correlação de 50% ficou entre 50 MHz e 16 MHz e entre 5 MHz e 1,6 MHz para uma correlação de 90%.

4.4.1.3 Distribuição de probabilidade das potências

As figuras a seguir apresentam as PDFs das potências do primeiro raio do primeiro *cluster* para os quatro tipos de configuração de antenas do ambiente residencial. As PDFs experimentais apresentam comportamento bastante semelhante às PDFs teóricas. Seguem uma distribuição normal em dB, como esperado, de média $\mu_{c,l} = \frac{10 \ln(\Omega) - \frac{10(\tau_c - \tau_0)}{\Lambda}}{\ln(10)} - \frac{(\sigma_c^2 + \sigma_r^2) \ln(10)}{20}$ e variância $\sigma_c^2 + \sigma_r^2$, cujos valores derivam da Tabela 4.1.

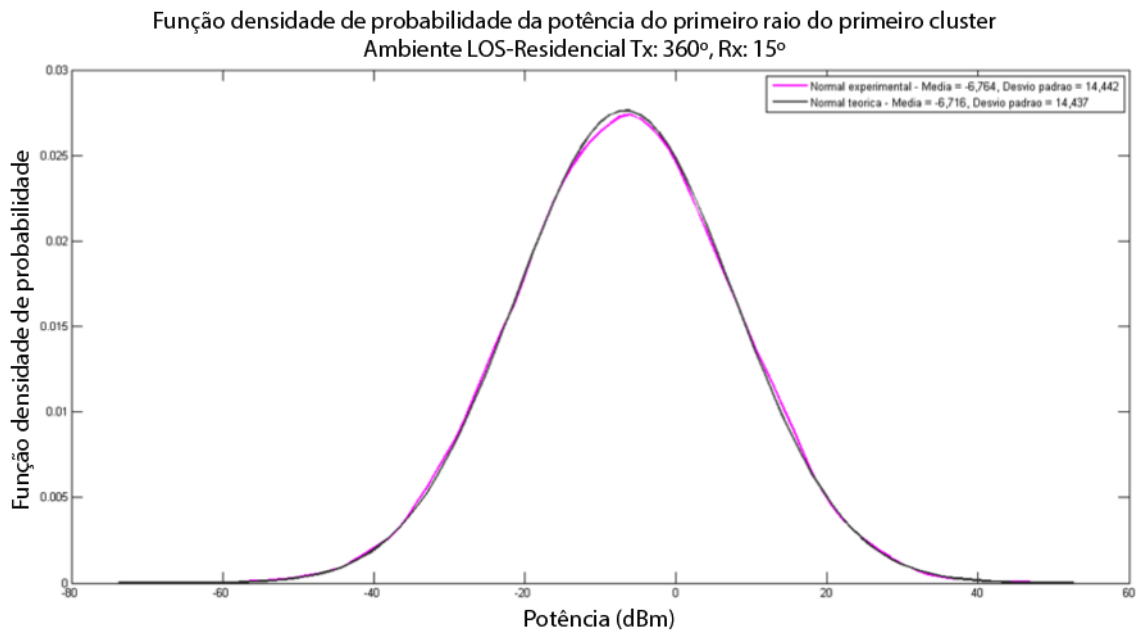


Figura 4.16. PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro *cluster* – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 360°, Rx: 15°.

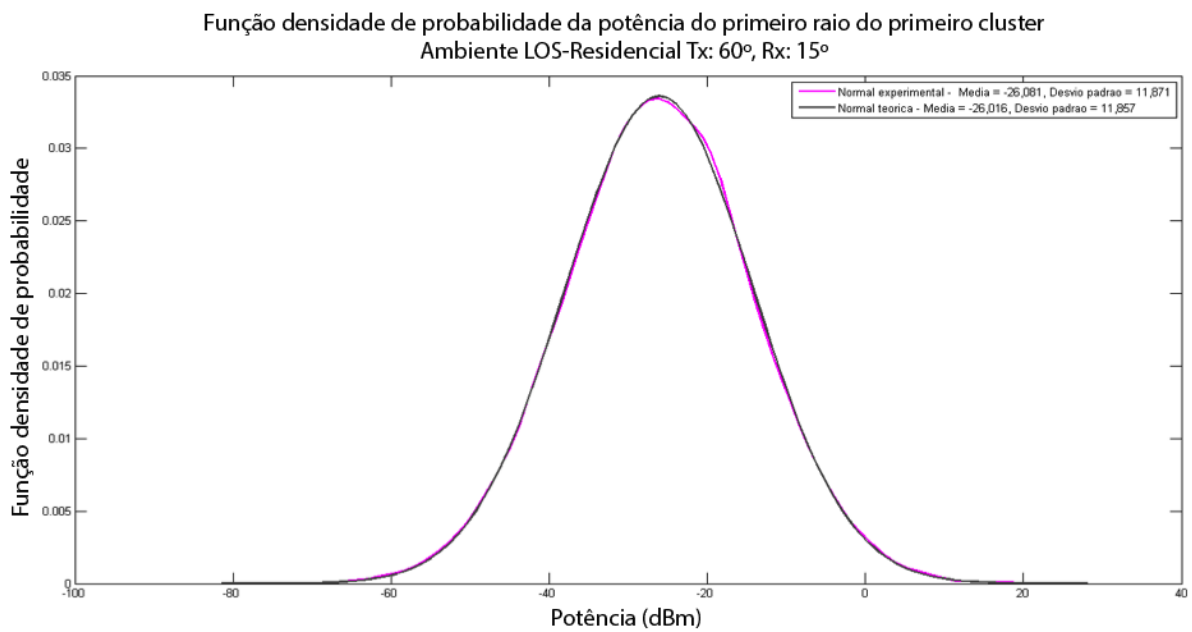


Figura 4.17. PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro *cluster* – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 60°, Rx: 15°.

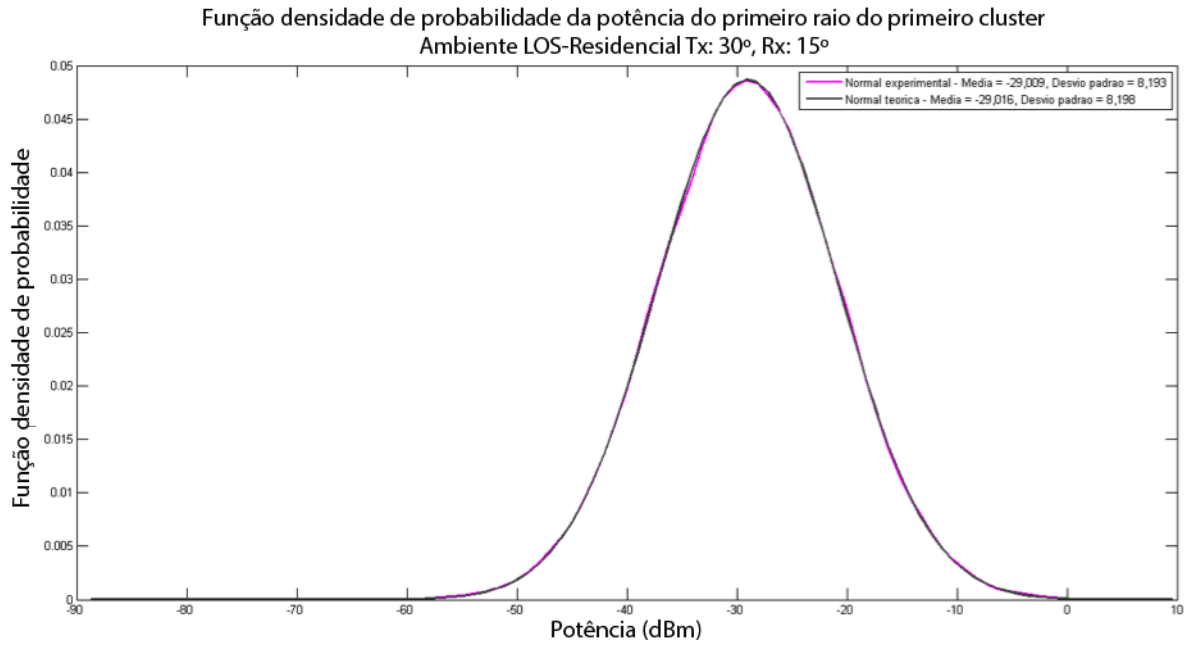


Figura 4.18. PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro *cluster* – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 30°, Rx: 15°.

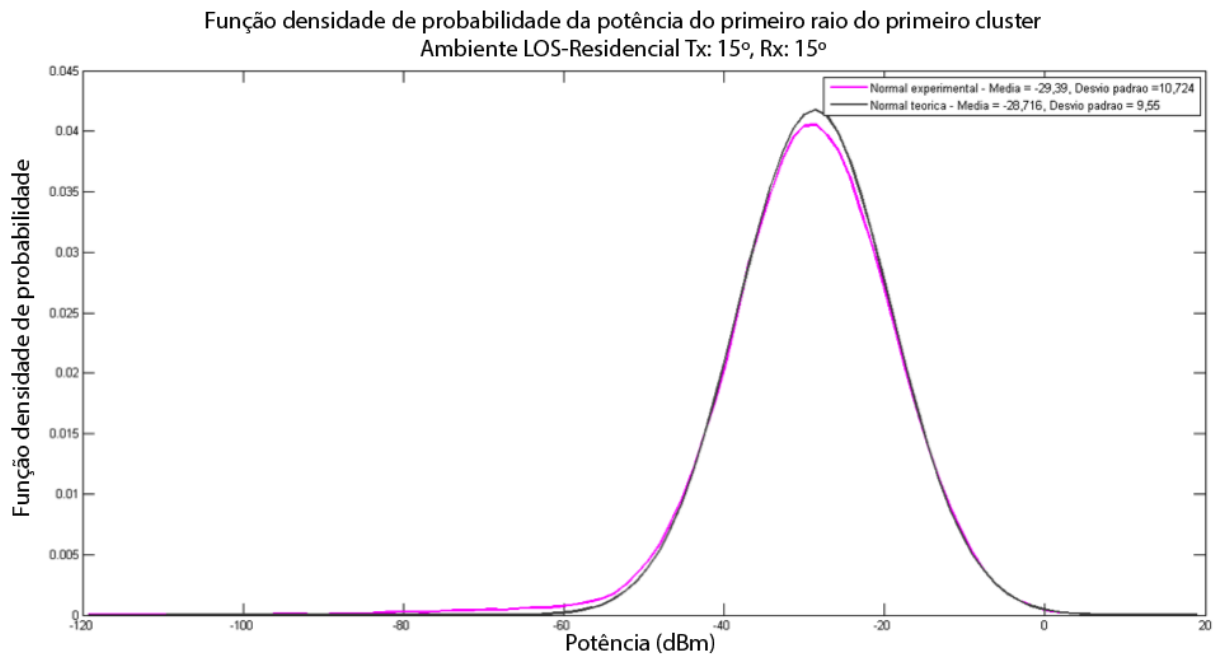


Figura 4.19. PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro *cluster* – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 15°, Rx: 15°.

4.4.1.4 Resposta impulsional do canal

As figuras a seguir apresentam as amplitudes e fases da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c para os quatro tipos de configuração de antenas do ambiente residencial.

Conforme poderá ser visto nas figuras a seguir, as fases variam de maneira aproximadamente uniforme entre $-\pi$ e π , como previsto na definição do modelo.

❖ Tx: 360°, Rx: 15°. Atraso máximo do canal: 62,5 ns.

Conforme exposto na seção 4.4.1.1, é possível observar na resposta impulsional abaixo que, de fato, existem várias componentes de múltiplos percurso sobresaindo-se além da componente LOS. Isso ratifica o que foi dito a respeito de um fator K negativo para este cenário.

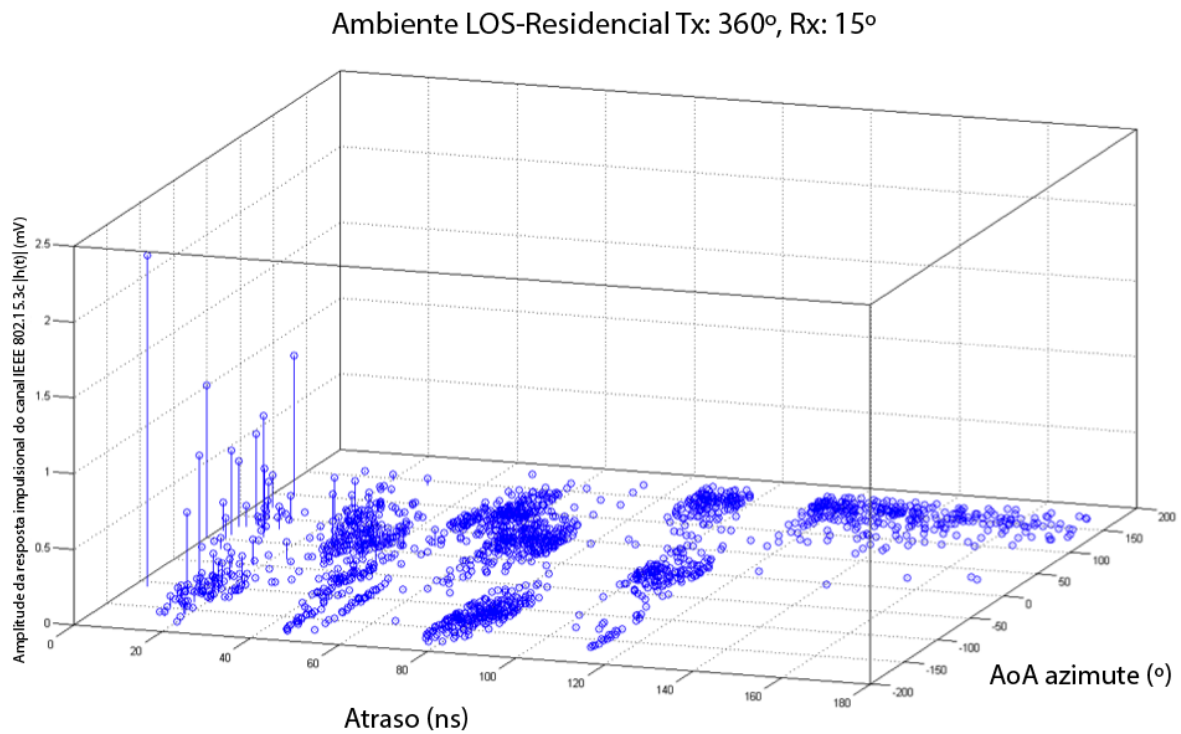


Figura 4.20. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 360°, Rx: 15°.

Ambiente LOS-Residencial Tx: 360°, Rx: 15°

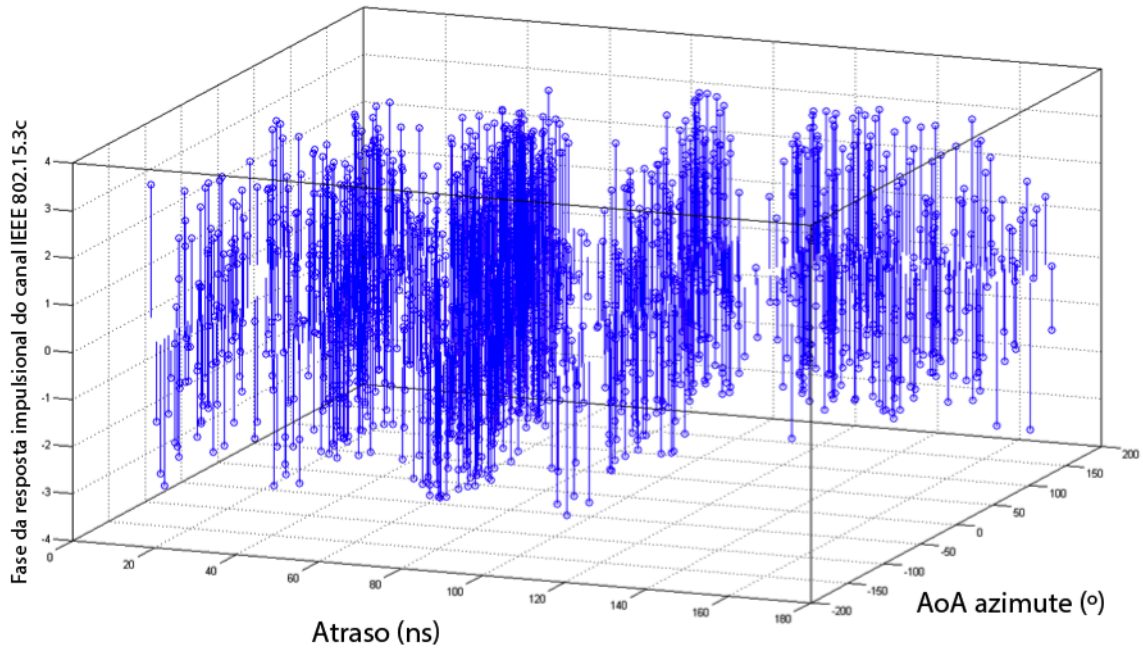


Figura 4.21. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS)
Tx: 360°, Rx: 15°.

❖ Tx: 60°, Rx: 15°. Atraso máximo do canal: 91,7 ns.

Ambiente LOS-Residencial Tx: 60°, Rx: 15°

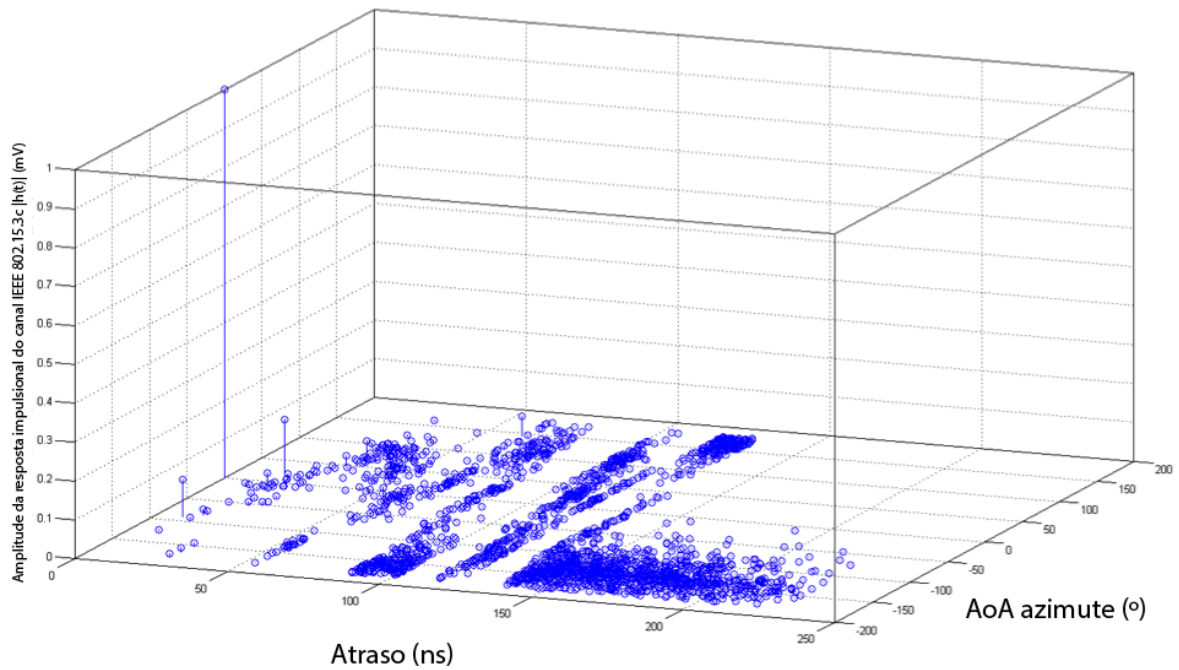


Figura 4.22. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 60°, Rx: 15°.

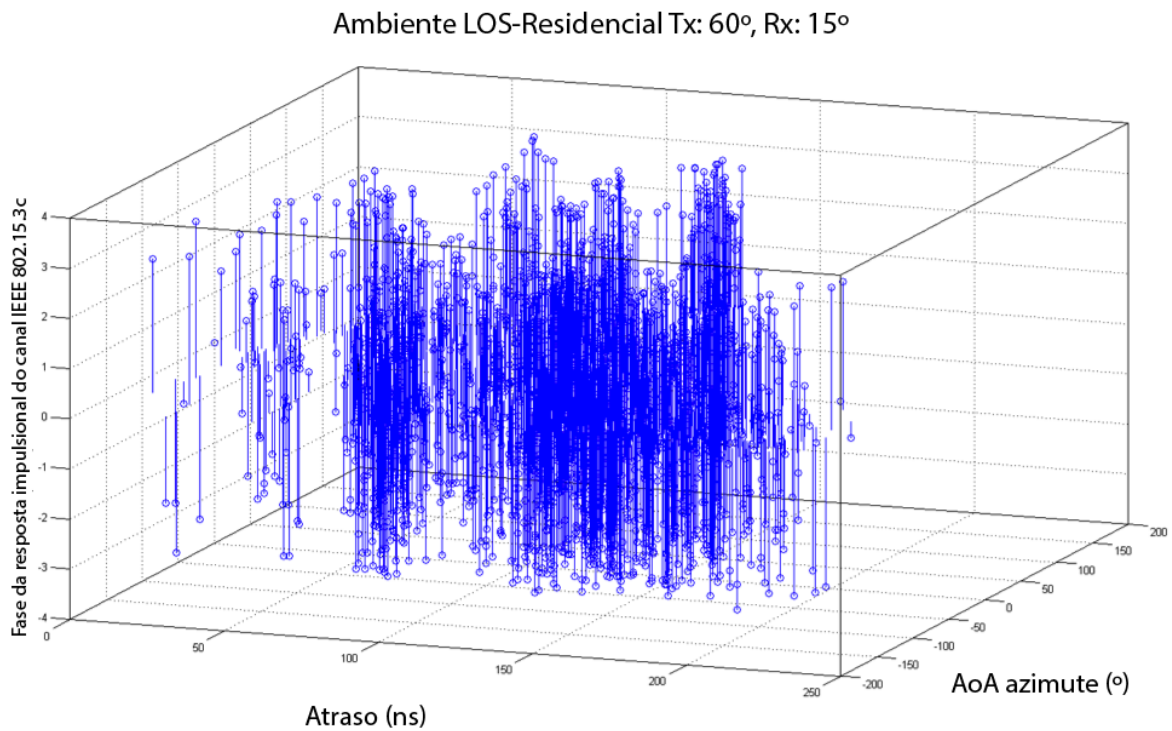


Figura 4.23. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS)
Tx: 60°, Rx: 15°.

❖ Tx: 30°, Rx: 15°. Atraso máximo do canal: 43,5 ns.

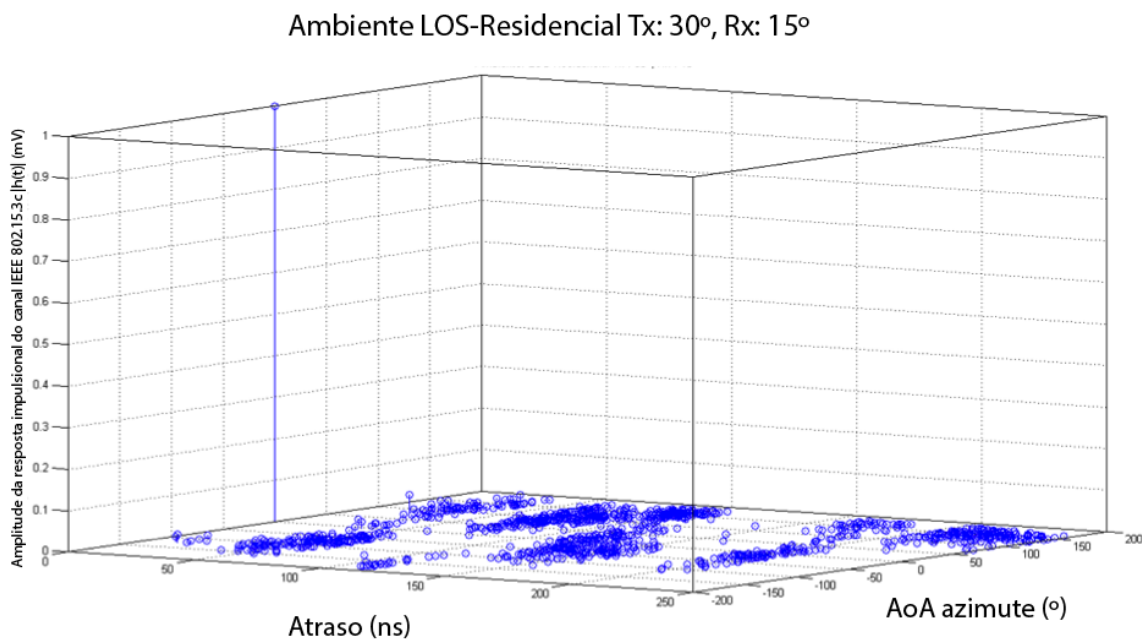


Figura 4.24. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial
(LOS) Tx: 30°, Rx: 15°.

Ambiente LOS-Residencial Tx: 30°, Rx: 15°

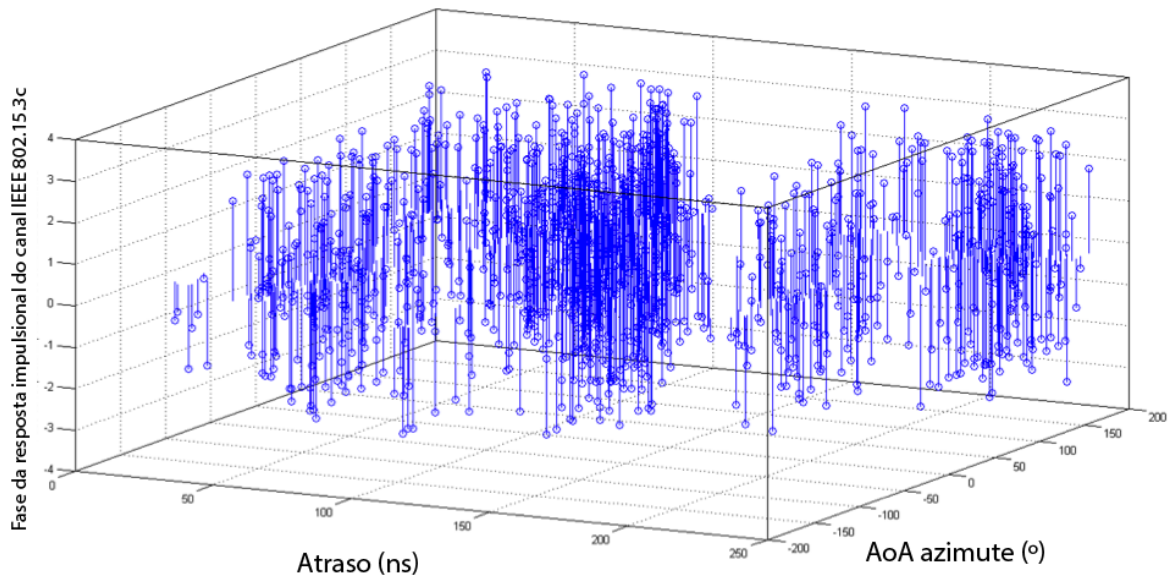


Figura 4.25. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS)

Tx: 30°, Rx: 15°.

❖ Tx: 15°, Rx: 15°. Atraso máximo do canal: 49,8 ns.

Ambiente LOS-Residencial Tx: 15°, Rx: 15°

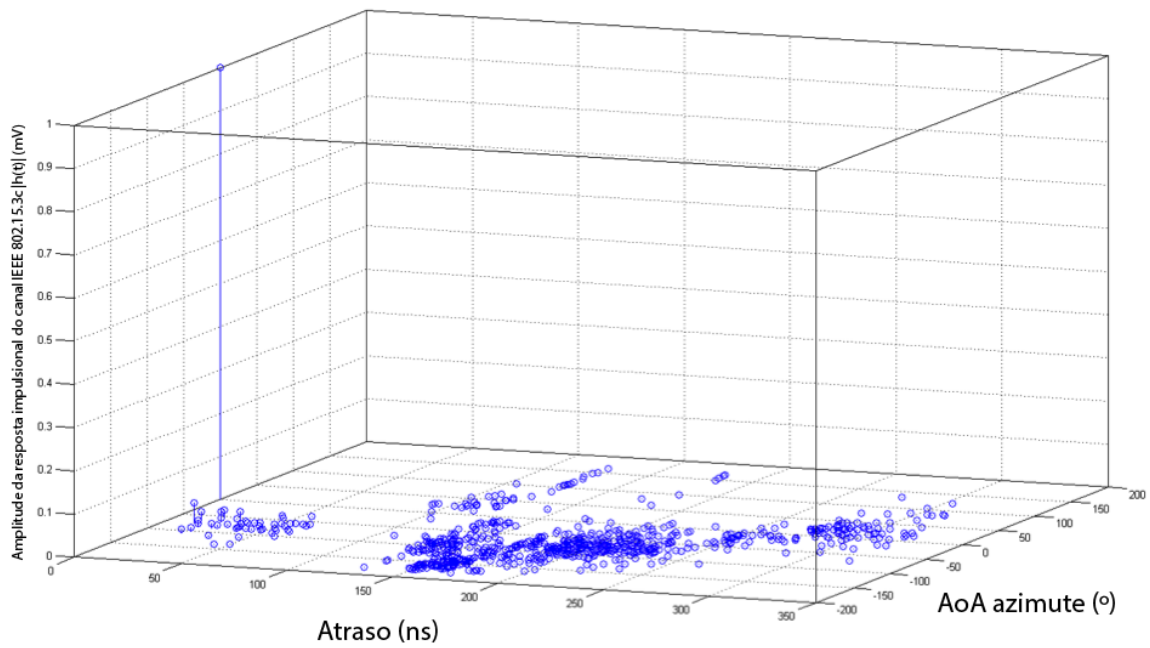


Figura 4.26. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial

(LOS) Tx: 15°, Rx: 15°.

Ambiente LOS-Residencial Tx: 15°, Rx: 15°

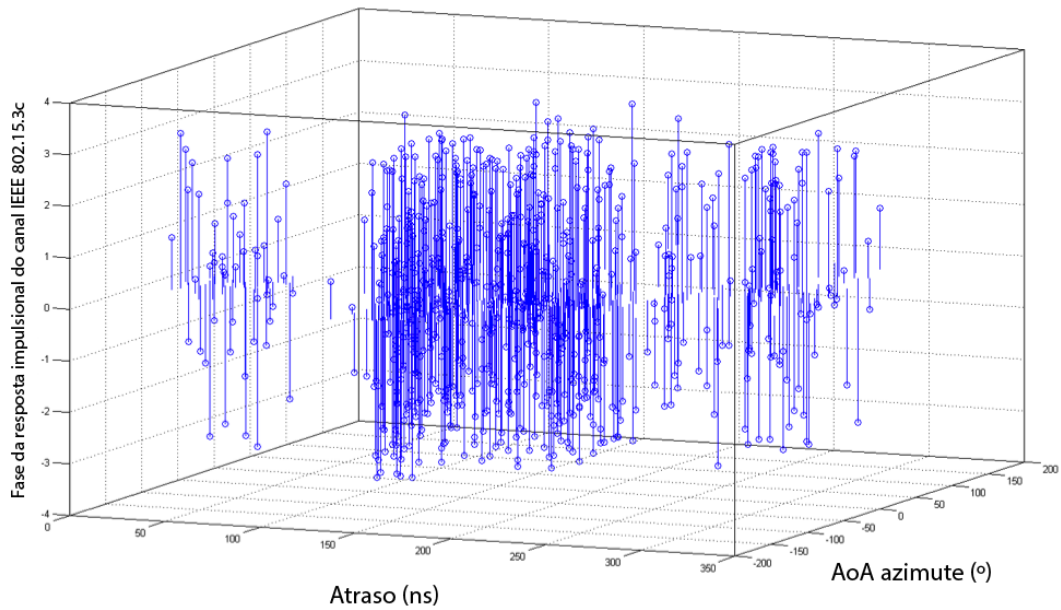


Figura 4.27. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS)
Tx: 15°, Rx: 15°.

4.4.1.5 Resposta em frequência

As figuras a seguir apresentam as respostas em frequência do canal IEEE 802.15.3c para os quatro tipos de configuração de antenas do ambiente residencial.

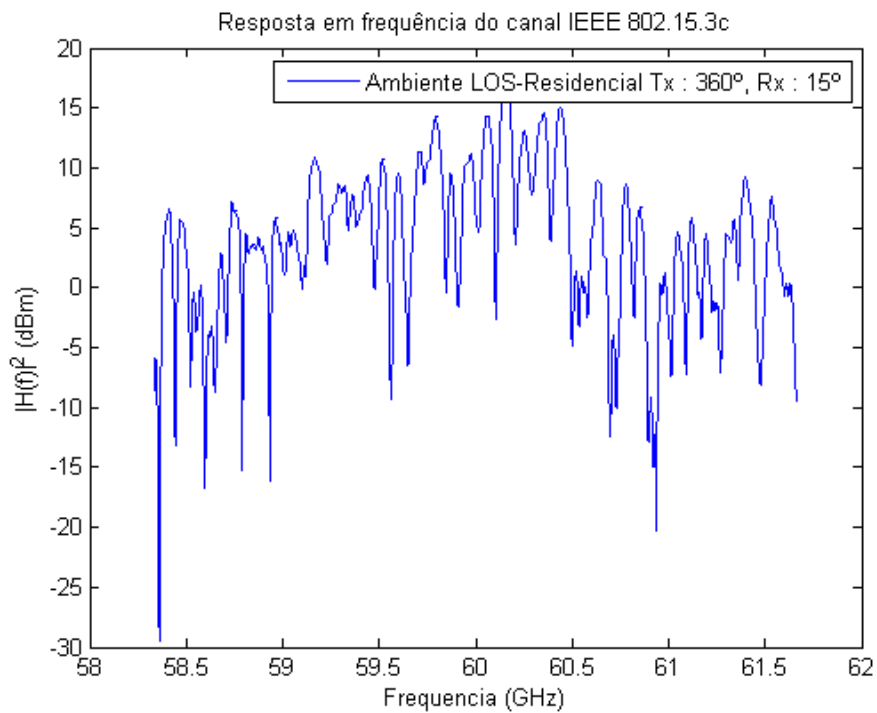


Figura 4.28. Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx:
360°, Rx: 15°.

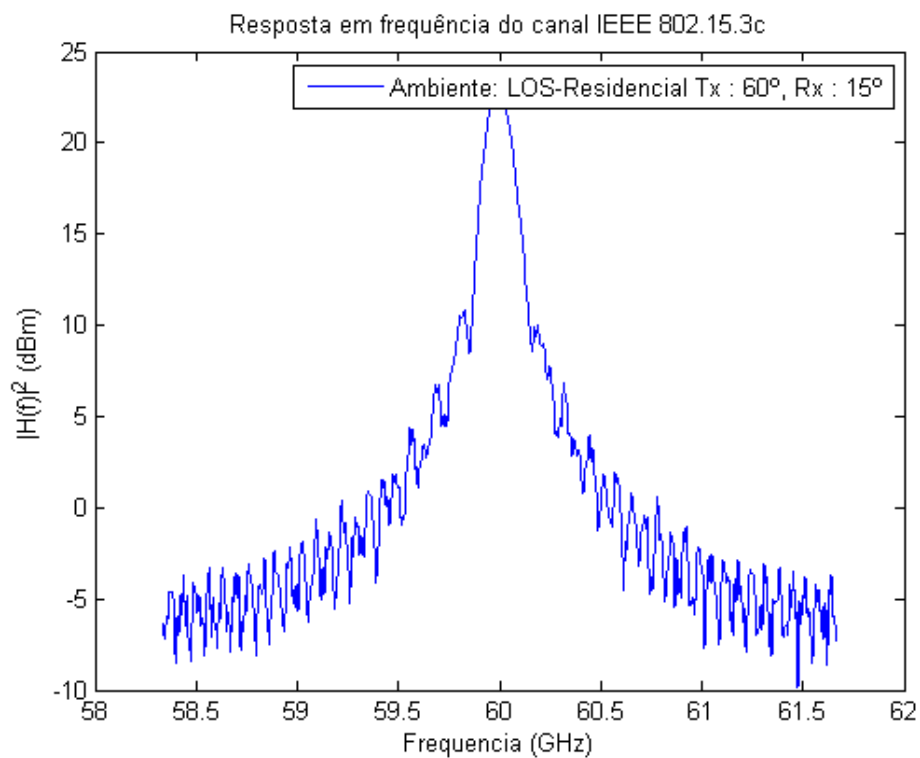


Figura 4.29. Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 60°, Rx: 15°.

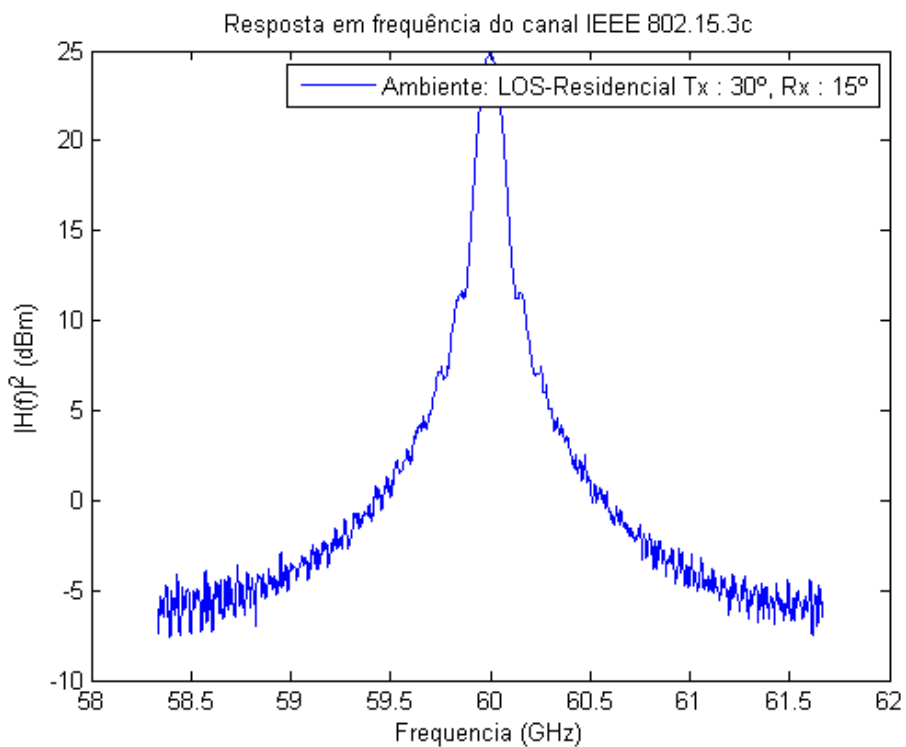


Figura 4.30. Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 30°, Rx: 15°.

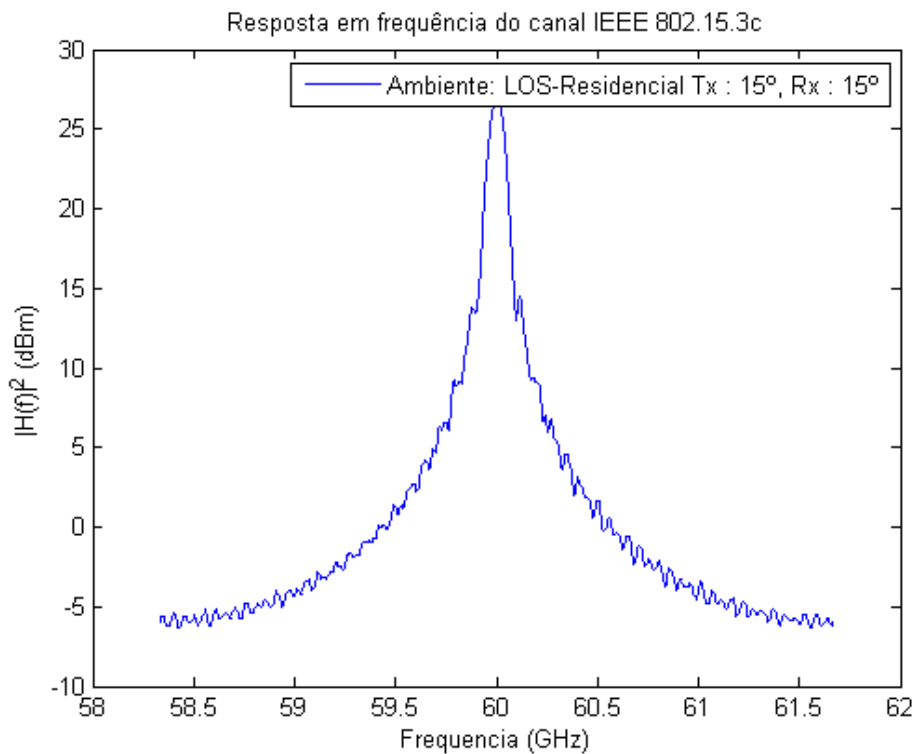


Figura 4.31. Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Residencial (LOS) Tx: 15°, Rx: 15°.

A Fig. 4.28, que ilustra a resposta em frequência para Tx: 360° e Rx: 15°, é a única que não possui um forte e distinto pico na potência em 60 GHz. Esse fato pode ser mais uma vez explicado pelo fator K negativo daquela realização de canal. A componente LOS para aquela realização de canal não é tão distinta como nas demais devido à existência de múltiplos percursos com potência comparável, graças ao componente aleatório existente nas potências desses múltiplos percursos, como dito anteriormente. Mesmo assim, é muito importante notar que mesmo para o pior caso de resposta em frequência para o ambiente residencial (Fig. 4.28), este ainda é consideravelmente melhor que a resposta em frequência do canal de Saleh-Valenzuela.

Percebe-se pelas Figs. 4.29 a 4.31, que, quanto maior o fator K – de acordo com as Figs. 4.6, 4.8 e 4.10 –, menos seletivo em frequência é o canal.

4.4.2 Escritório (LOS)

O ambiente escritório é caracterizado por uma configuração de várias cadeiras, mesas e computadores para escritório; estantes de livros, cabinets e armários; paredes de metal/concreto; podem haver estações de trabalho e corredores longos interligando os escritórios. Para este ambiente foram realizadas simulações com componente LOS e sem componente LOS (NLOS). Na simulação do escritório com linha de visada foram consideradas duas configurações de largura de feixe de meia potência para as antenas: Tx: 30° e Rx: 30° e Tx: 60° e Rx: 60°. As simulações sem linha de visada são apresentadas na seção seguinte (4.4.3).

4.4.2.1 Perfil de potência do atraso

As figuras a seguir apresentam os perfis de potência do atraso para os dois tipos de configuração de antenas dos cenários do ambiente escritório com componente LOS. Para cada configuração são mostradas uma perspectiva tridimensional do perfil de potência, caracterizando atraso de chegada, ângulo de chegada e potência de chegada, e uma perspectiva no domínio atraso-angular, caracterizando atrasos em função dos ângulos de chegada.

- ❖ Tx: 30°, Rx: 30°. Atraso máximo do canal: 452 ns.

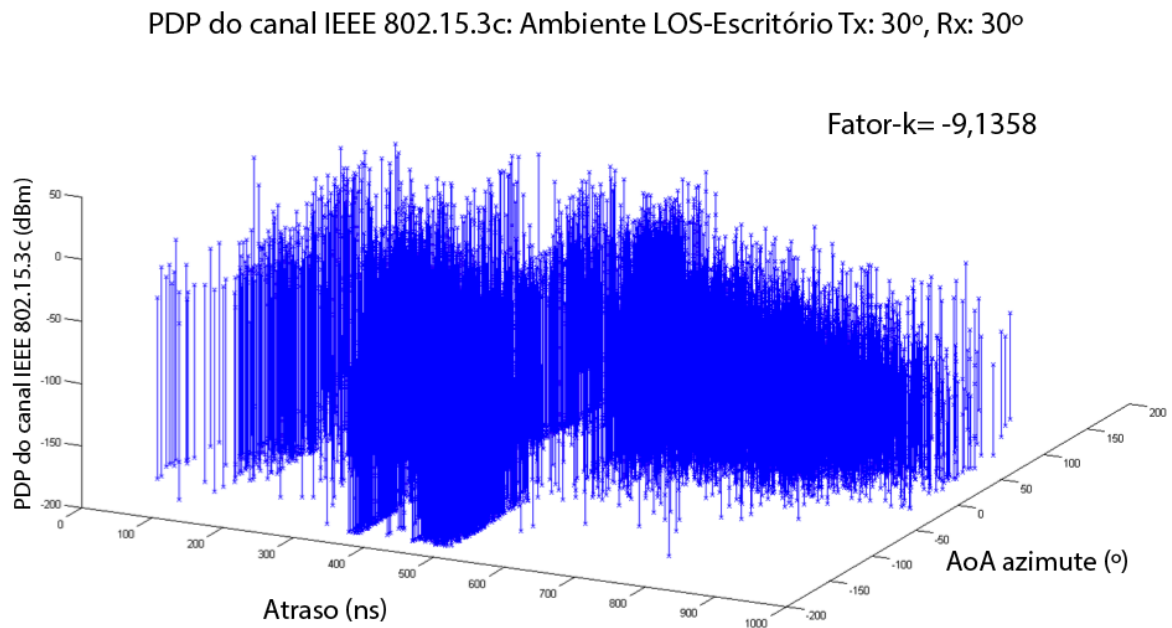


Figura 4.32. Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°.

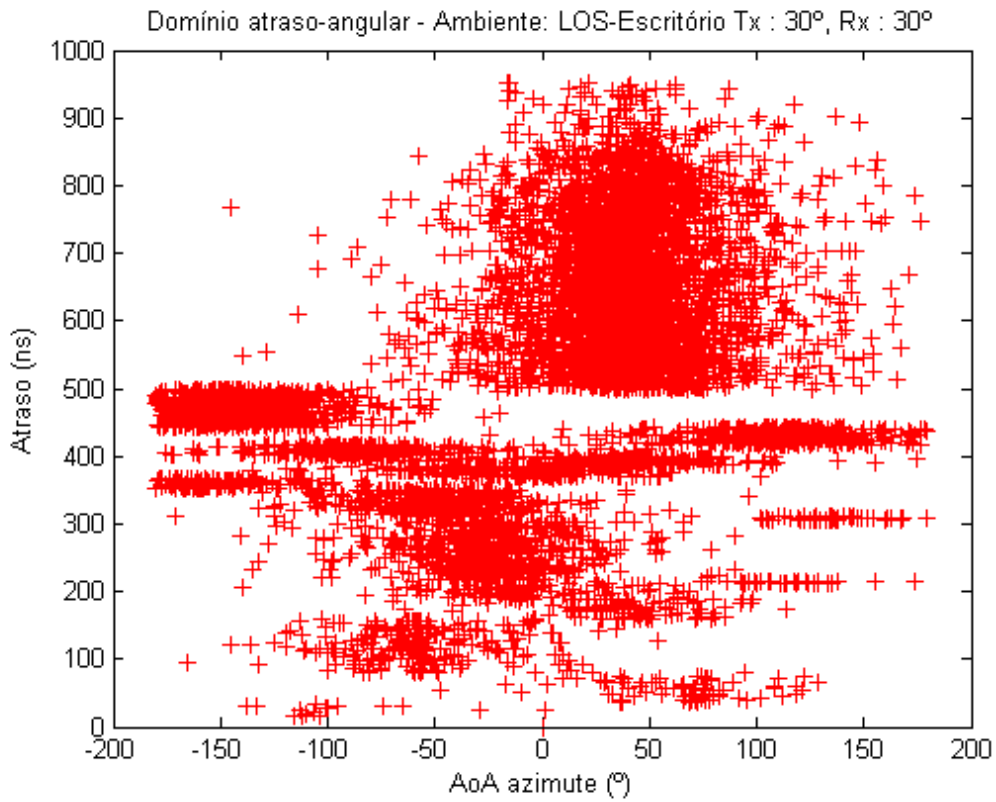


Figura 4.33. Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Escritório (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°.

❖ Tx: 60°, Rx: 60°. Atraso máximo do canal: 649 ns.

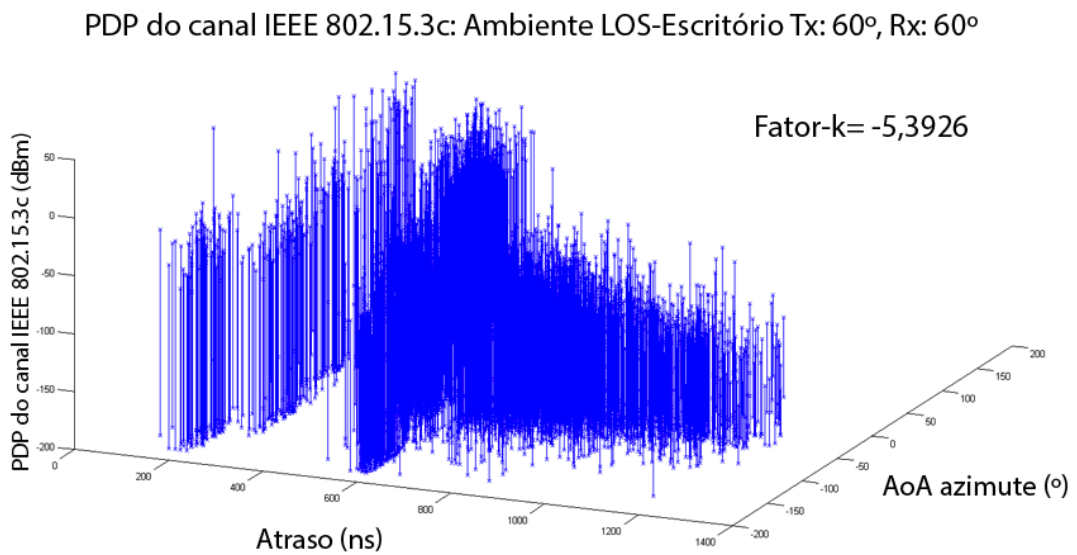


Figura 4.34. Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°.

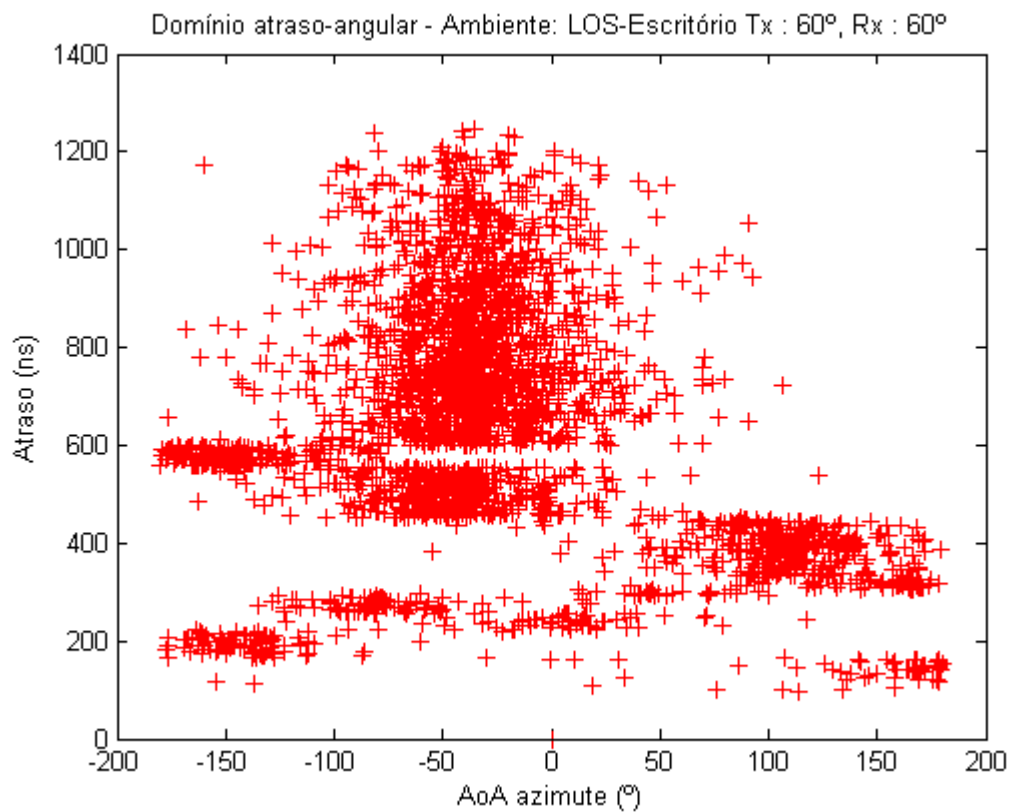


Figura 4.35. Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Escritório (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°.

4.4.2.2 Espalhamento de atraso RMS

As figuras a seguir apresentam o espalhamento de atraso RMS para os dois tipos de configuração de antenas dos cenários com componente LOS do ambiente escritório. Esse espalhamento foi calculado de acordo com a Eq. (2.4) para 20.000 PDPs no caso de Tx: 30° e Rx: 30°, e para 50.000 PDPs no caso de Tx: 60° e Rx: 60°.

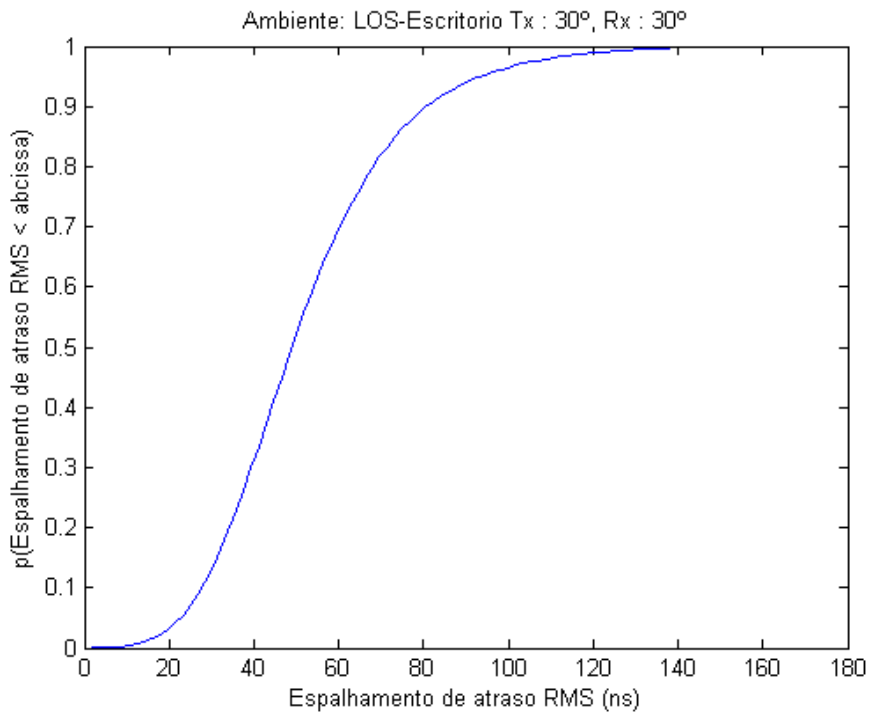


Figura 4.36. Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°.

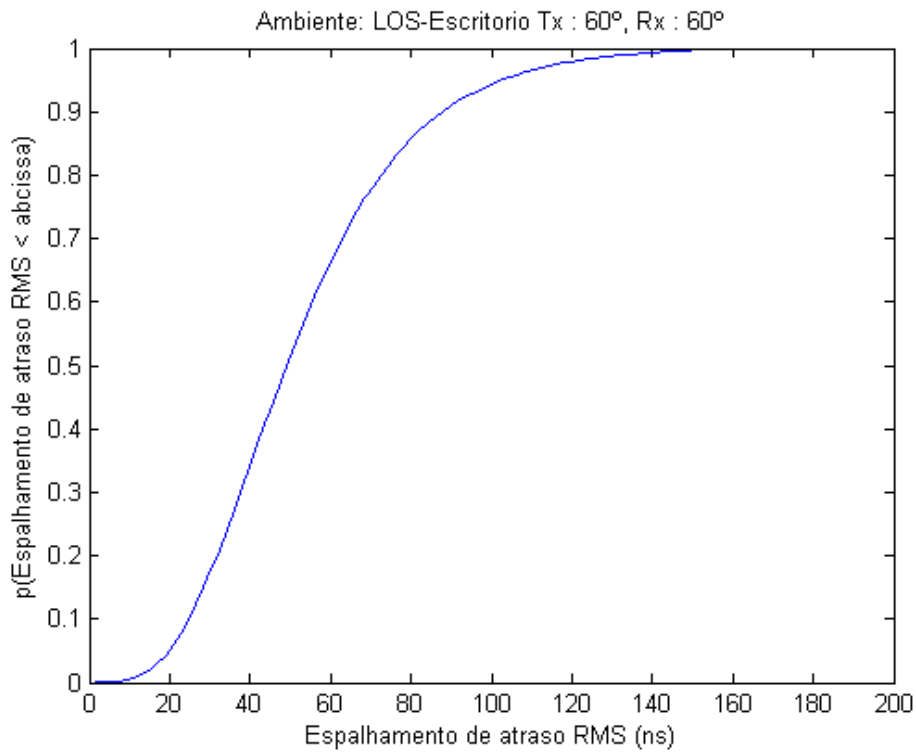


Figura 4.37. Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°.

O espalhamento de atraso RMS mostra-se semelhante para os dois cenários com LOS do ambiente escritório. Para o cenário com configuração de antenas Tx: 30° e Rx: 30°, a média do espalhamento de

atraso RMS está em torno de 47 ns e a banda de coerência estimada em 4,26 MHz para 50% de correlação e 426 KHz para 90% de correlação. Para o caso de Tx: 60° e Rx: 60°, a média do espalhamento de atraso RMS está em torno de 50 ns, resultando em uma banda de coerência para 50% de correlação de 4 MHz e de 400 KHz para 90% de correlação.

4.4.2.3 Distribuição de probabilidade das potências

As figuras a seguir apresentam as pdfs das potências do primeiro raio do primeiro *cluster* para os dois tipos de configuração de antenas do ambiente escritório com componente LOS. As PDFs experimentais apresentam comportamento bastante semelhante às PDFs teóricas. Seguem uma distribuição normal em dB, como esperado, de média $\mu_{c,l} = \frac{10 \ln(\Omega) - \frac{10(\tau_c - \tau_0)}{\Lambda}}{\ln(10)} - \frac{(\sigma_c^2 + \sigma_r^2) \ln(10)}{20}$ e variância $\sigma_c^2 + \sigma_r^2$, cujos valores derivam da Tabela 4.2.

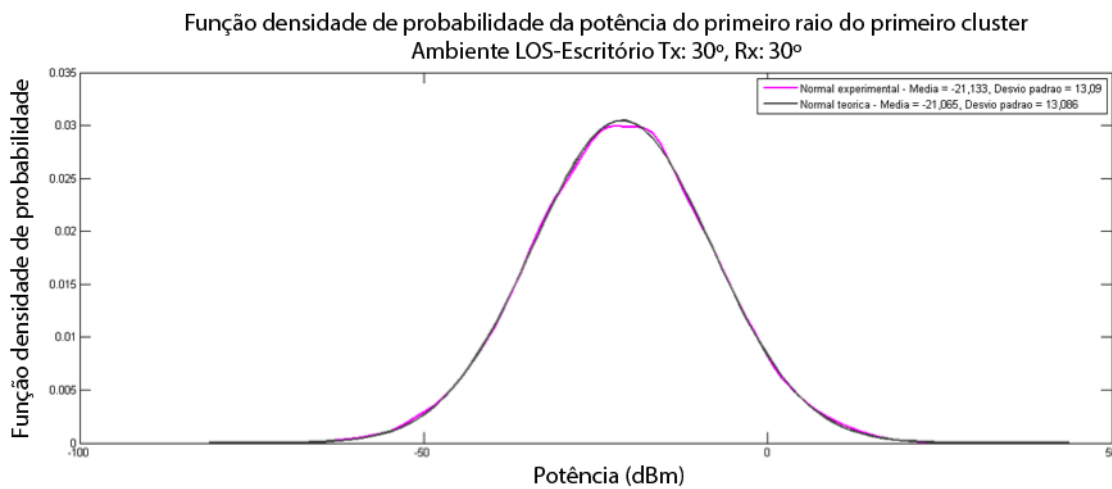


Figura 4.38. PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro *cluster* – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°.

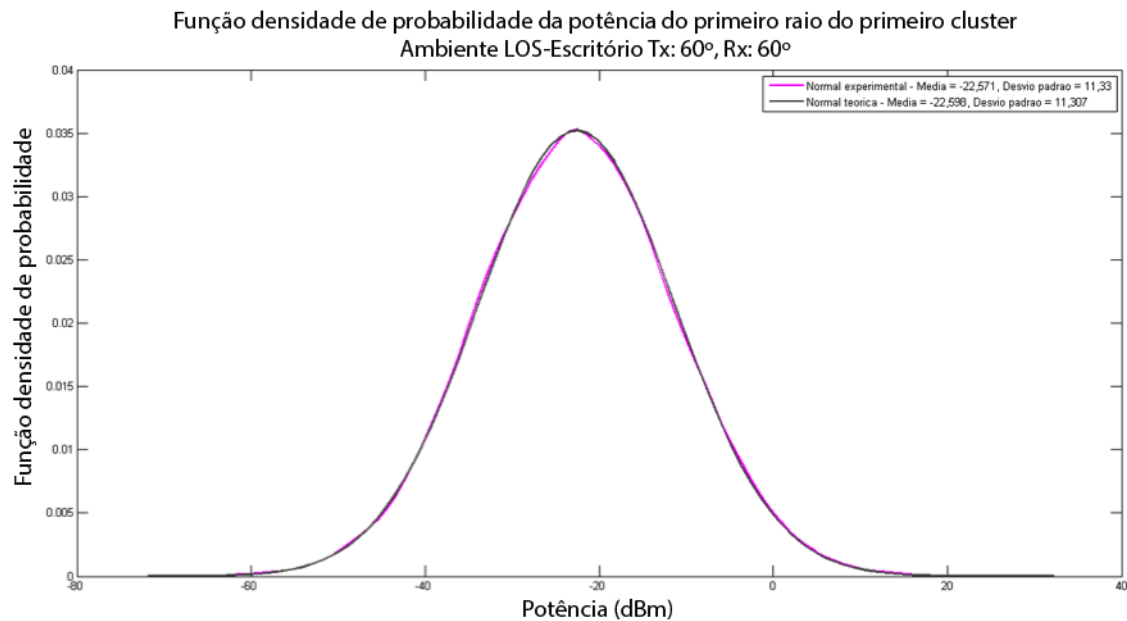


Figura 4.39. PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro *cluster* – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°.

4.4.2.4 Resposta impulsional do canal

As figuras a seguir apresentam as amplitudes e fases da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c para os dois tipos de configuração de antenas dos cenários com componente LOS do ambiente escritório.

Conforme poderá ser visto nas figuras a seguir, as fases variam de maneira aproximadamente uniforme entre $-\pi$ e π , como previsto na definição do modelo.

- ❖ Tx: 30°, Rx: 30°. Atraso máximo do canal: 452 ns.

Ambiente LOS-Escritório Tx: 30°, Rx: 30°

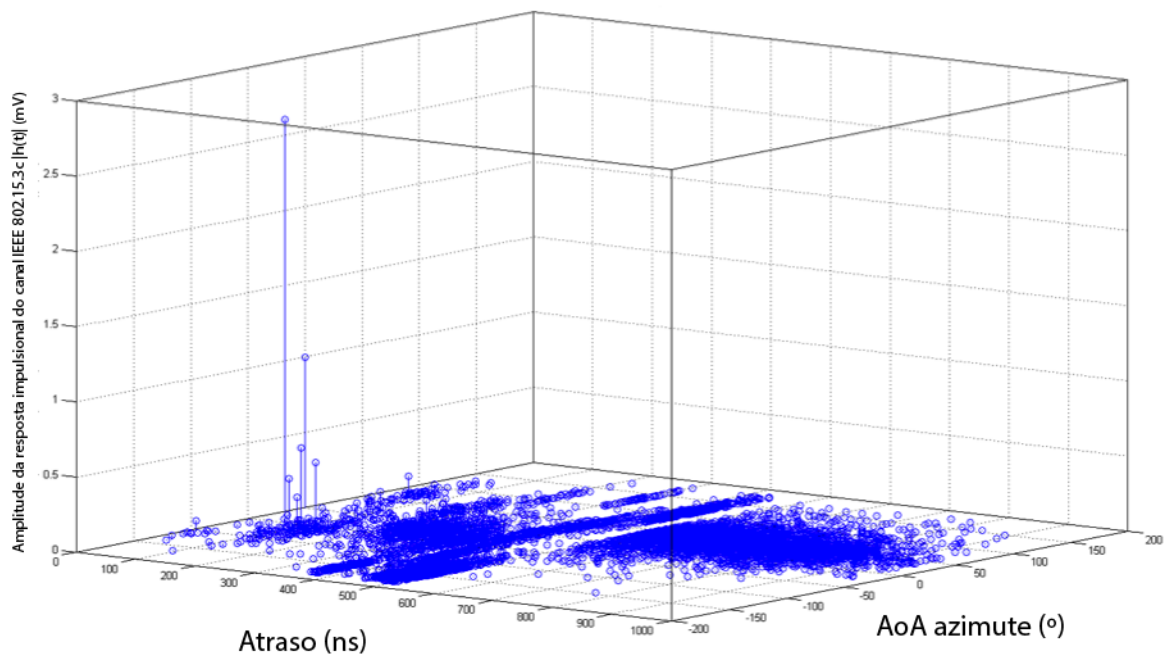


Figura 4.40. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°.

Ambiente LOS-Escritório Tx: 30°, Rx: 30°

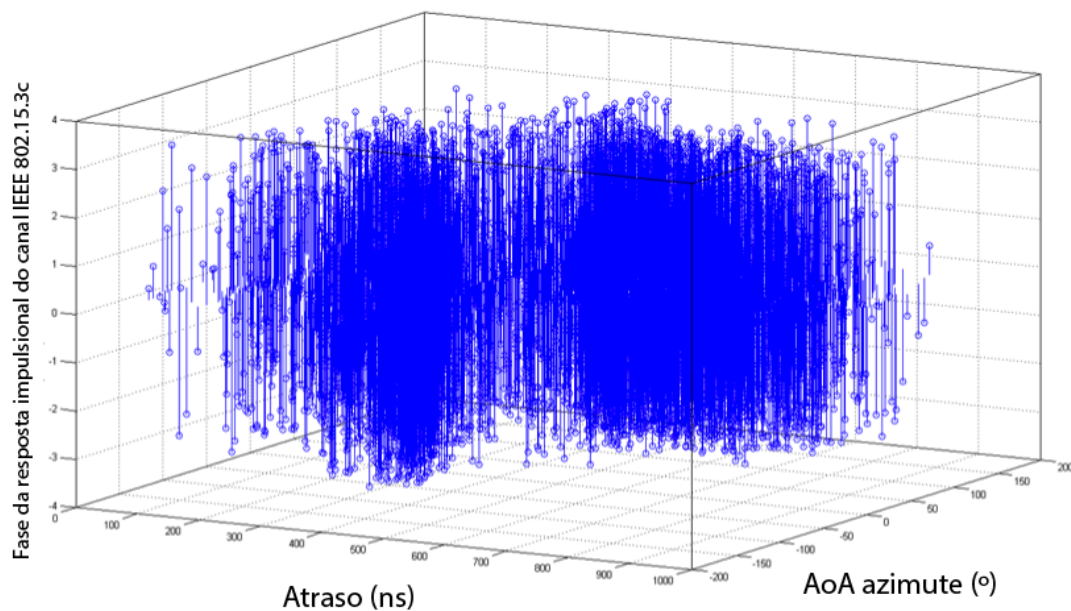


Figura 4.41. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°.

❖ Tx: 60°, Rx: 60°. Atraso máximo do canal: 649 ns.

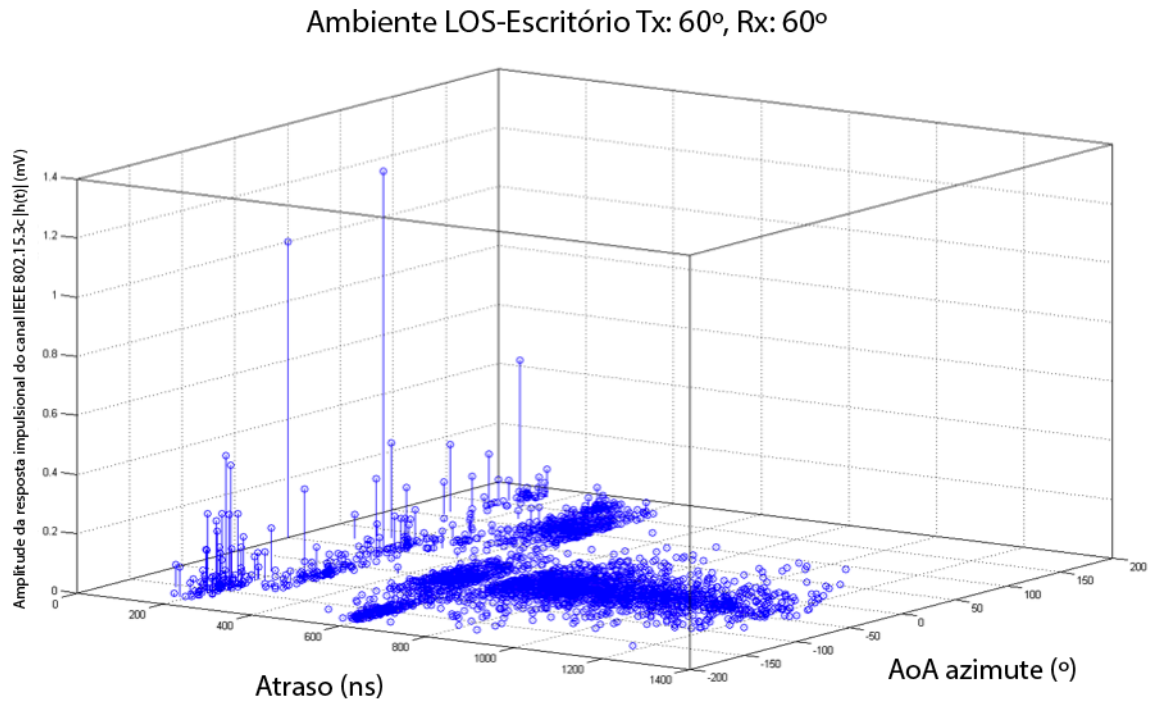


Figura 4.42. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°.

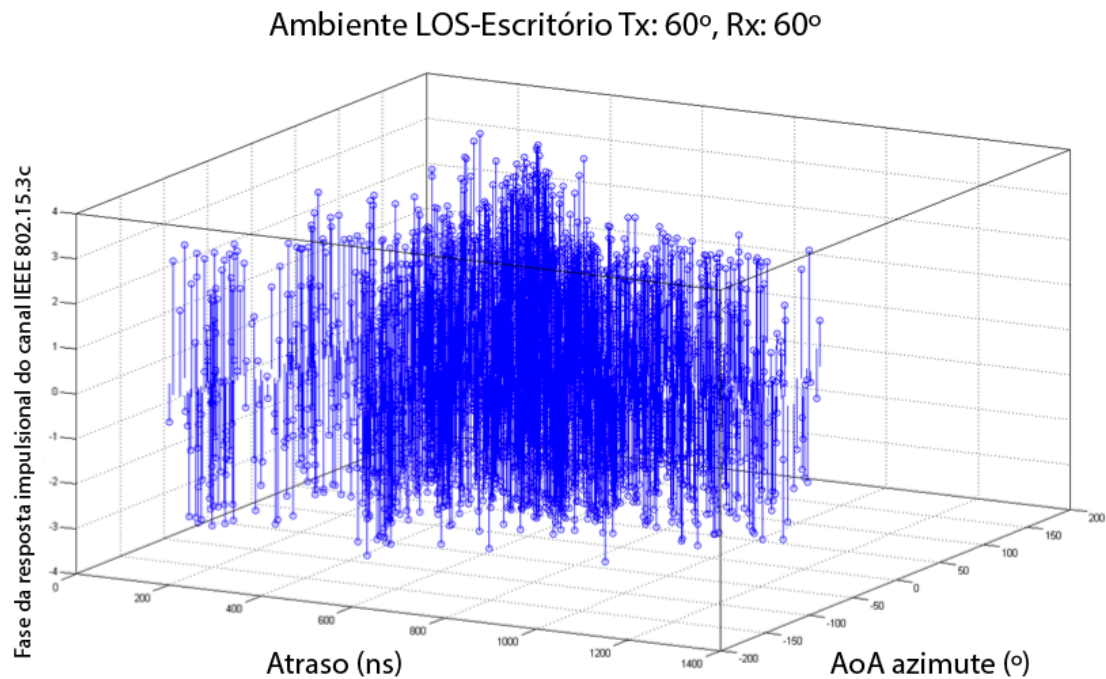


Figura 4.43. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°.

4.4.2.6 Resposta em frequência

As figuras a seguir apresentam as respostas em frequência do canal IEEE 802.15.3c para os dois tipos de configuração de antenas dos cenários com componente LOS do ambiente escritório.

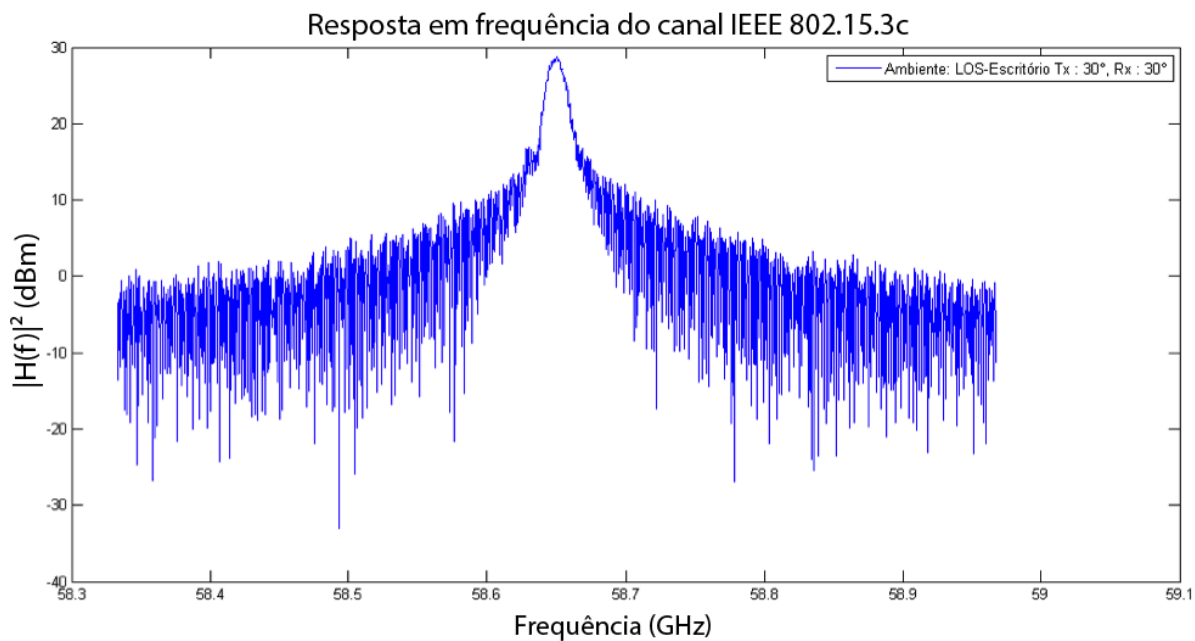


Figura 4.44. Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°.

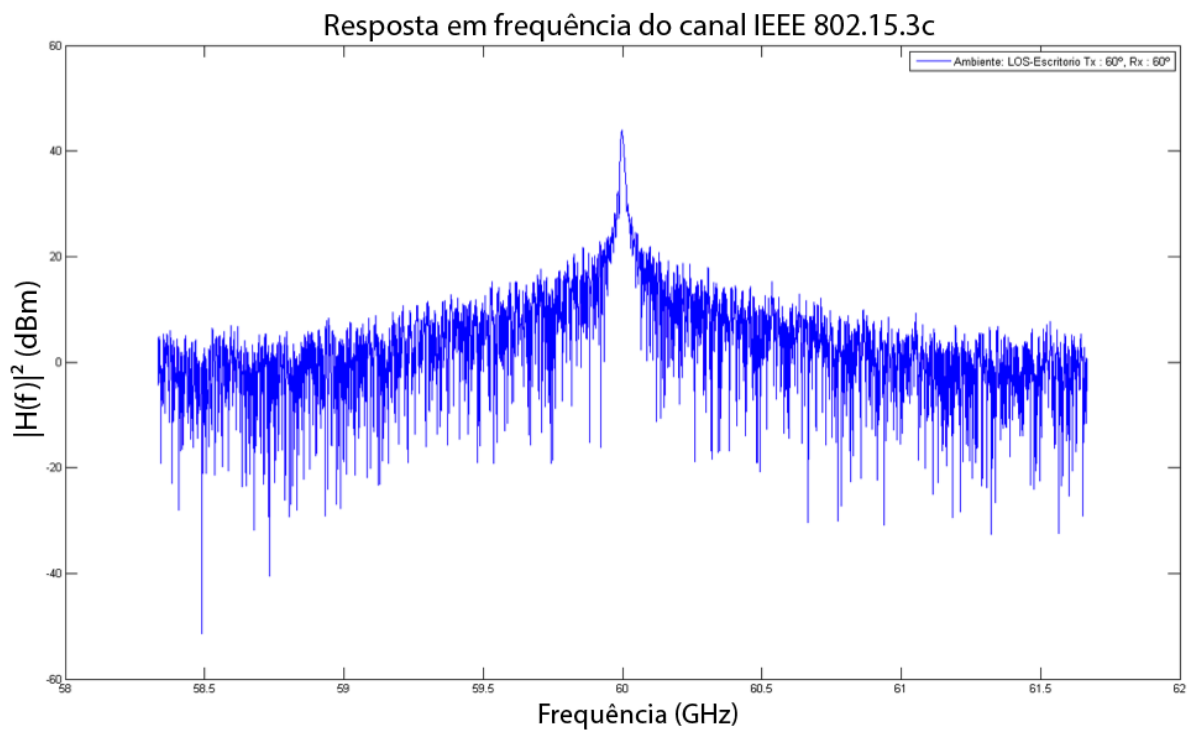


Figura 4.45. Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°.

Em virtude de se ter obtido um fator K maior para o caso de Tx: 60° e Rx: 60° , vê-se na Fig. 4.45 uma resposta impulsional de potência mais forte no pico em 60 GHz. No entanto, para os dois casos, pode-se inferir um canal fortemente marcado por múltiplos percursos fora da faixa central de frequência, que sofre um intenso desvanecimento de pequena escala.

4.4.3 Escritório (NLOS)

O ambiente simulado nesta seção segue a mesma configuração descrita na seção anterior. A diferença é que o ambiente escritório simulado nessa seção não possui linha de visada. Na simulação sem linha de visada foram consideradas duas configurações de largura de feixe de meia potência para as antenas: Tx: 360° e Rx: 15° e Tx: 30° e Rx: 15° .

4.4.3.1 Perfil de potência do atraso

As figuras a seguir apresentam os perfis de potência do atraso para os dois tipos de configuração de antenas dos cenários do ambiente escritório sem componente LOS. Para cada configuração são mostradas uma perspectiva tridimensional do perfil de potência, caracterizando atraso de chegada, ângulo de chegada e potência de chegada, e uma perspectiva no domínio atraso-angular, caracterizando atrasos em função dos ângulos de chegada.

❖ Tx: 360° , Rx: 15° . Atraso máximo do canal: 679 ns

PDP do canal IEEE 802.15.3c: Ambiente NLOS-Escritório Tx: 360° , Rx: 15°

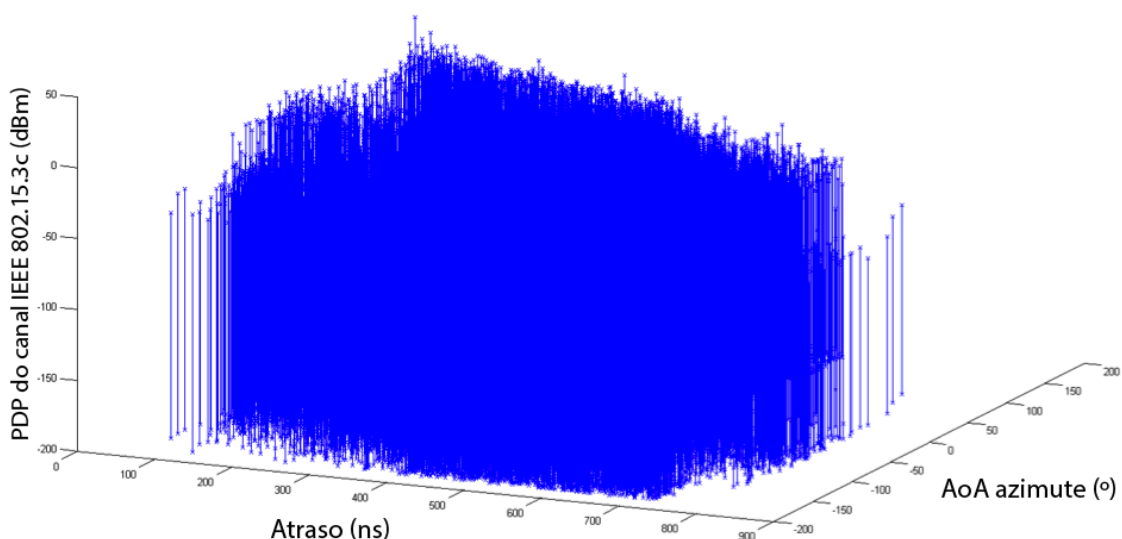


Figura 4.46. Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 360° , Rx: 15° .

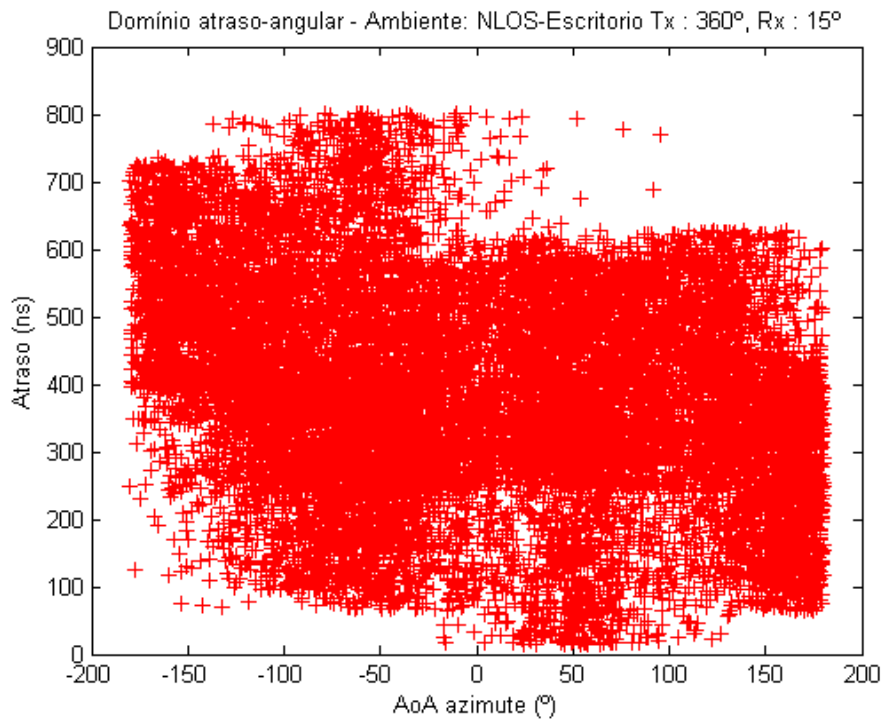


Figura 4.47. Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 360°, Rx: 15°.

❖ Tx: 30°, Rx: 15°. Atraso máximo do canal: 590 ns

PDP do canal IEEE 802.15.3c: Ambiente NLOS-Escritório Tx: 30°, Rx: 15°

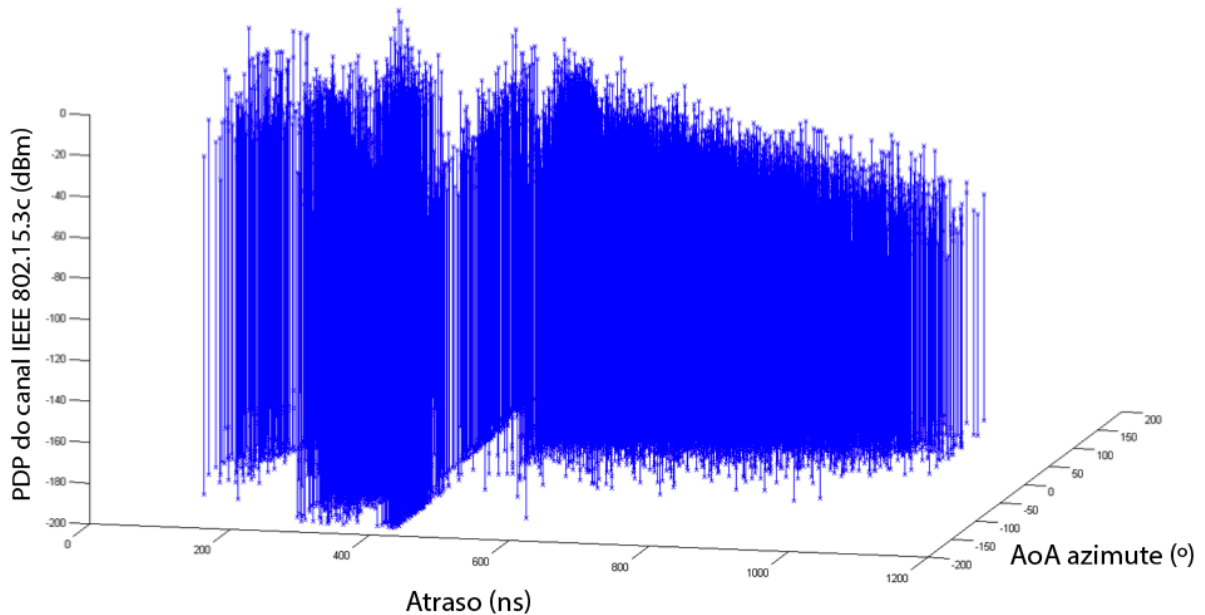


Figura 4.48. Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 30°, Rx: 15°.

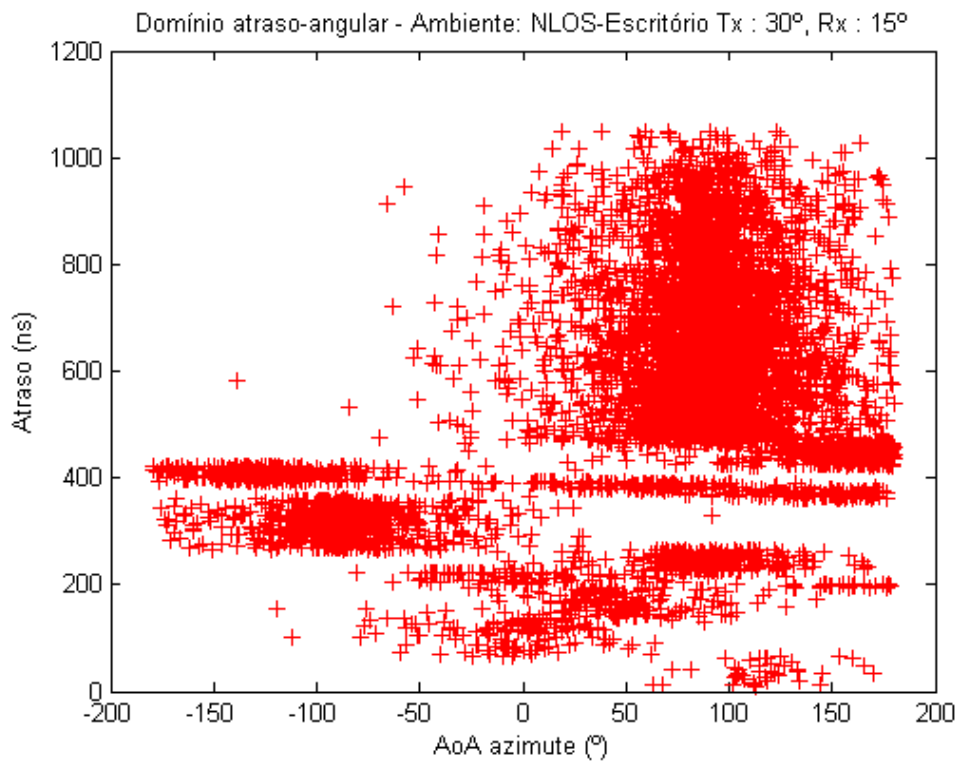


Figura 4.49. Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 30°, Rx: 15°.

4.4.3.2 Espalhamento de atraso RMS

As figuras a seguir apresentam o espalhamento de atraso RMS para os dois tipos de configuração de antenas dos cenários sem componente LOS do ambiente escritório. Esse espalhamento foi calculado de acordo com a Eq. (2.4) para 10.000 PDPs no caso de Tx: 360° e Rx: 15°, e para 20.000 PDPs no caso de Tx: 30° e Rx: 15°.

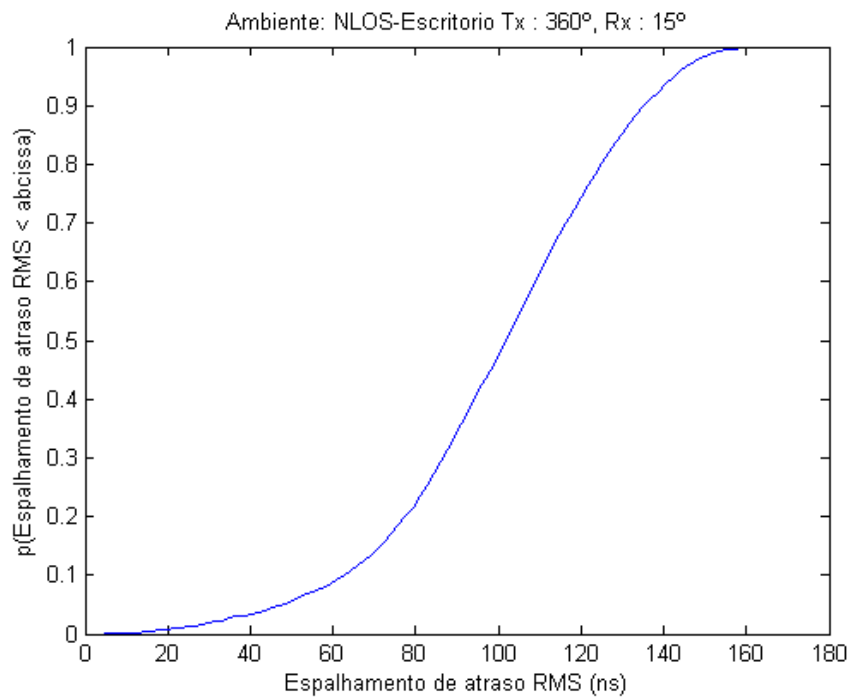


Figura 4.50. Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 360°, Rx: 15°.

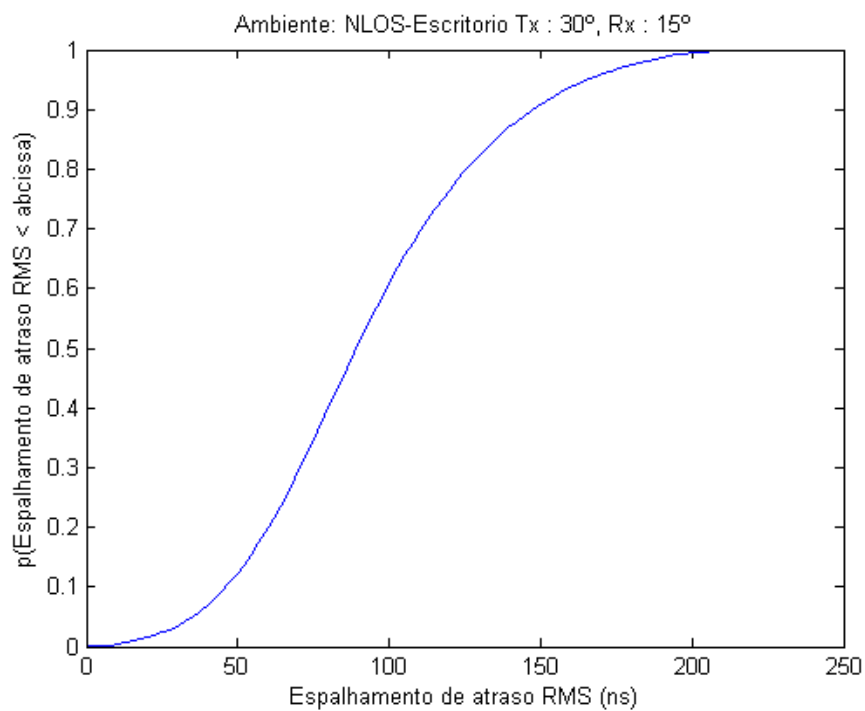


Figura 4.51. Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 30°, Rx: 15°.

A média do espalhamento de atraso RMS está em torno de 95 ns para o caso de Tx: 360° e Rx: 15° e 105 ns para o caso de Tx: 30° e Rx: 15° e a banda de coerência está em torno de 2,1 MHz para uma correlação de 50% e 210,5 KHz para uma correlação de 90% no primeiro caso e em torno de 1,9 MHz

para uma correlação de 50% e 190,5 KHz para uma correlação de 90% no segundo caso. É importante ressaltar que no primeiro caso a taxa de chegada de múltiplos percursos é consideravelmente maior que no segundo caso, o que justifica um maior espalhamento de atraso.

4.4.3.3 Distribuição de probabilidade das potências

As figuras a seguir apresentam as PDFs das potências do primeiro raio do primeiro *cluster* para os dois tipos de configuração de antenas do ambiente escritório sem componente LOS. As PDFs experimentais apresentam comportamento bastante semelhante às pdfs teóricas. Seguem uma distribuição normal em dB, como esperado, de média $\mu_{c,l} = \frac{10 \ln(\Omega) - \frac{10(\tau_c - \tau_0)}{\Lambda}}{\ln(10)} - \frac{(\sigma_c^2 + \sigma_r^2) \ln(10)}{20}$ e variância $\sigma_c^2 + \sigma_r^2$, cujos valores derivam da Tabela 4.2.

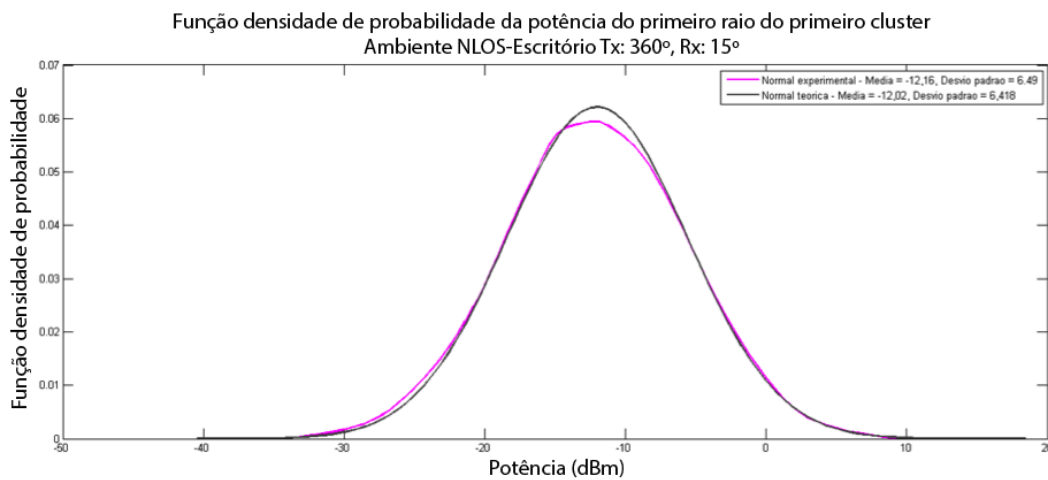


Figura 4.52 PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro *cluster* – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 360°, Rx: 15°.

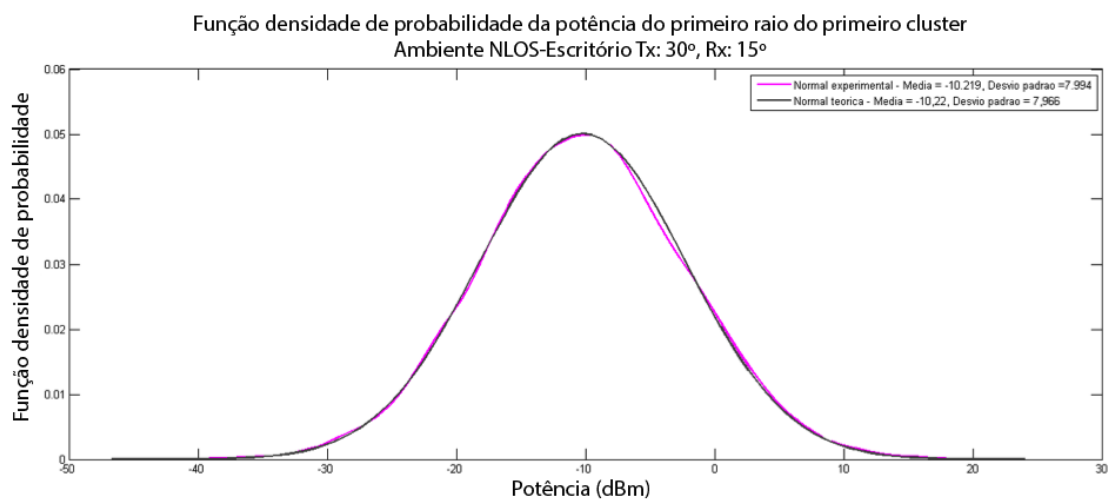


Figura 4.53. PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro *cluster* – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 30°, Rx: 15°.

4.4.3.4 Resposta impulsional do canal

As figuras a seguir apresentam as amplitudes e fases da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c para os dois tipos de configuração de antenas dos cenários sem componente LOS do ambiente escritório.

Conforme poderá ser visto nas figuras a seguir, as fases variam de maneira aproximadamente uniforme entre $-\pi$ e π , como previsto na definição do modelo.

- ❖ Tx: 360°, Rx: 15°. Atraso máximo do canal: 679 ns.

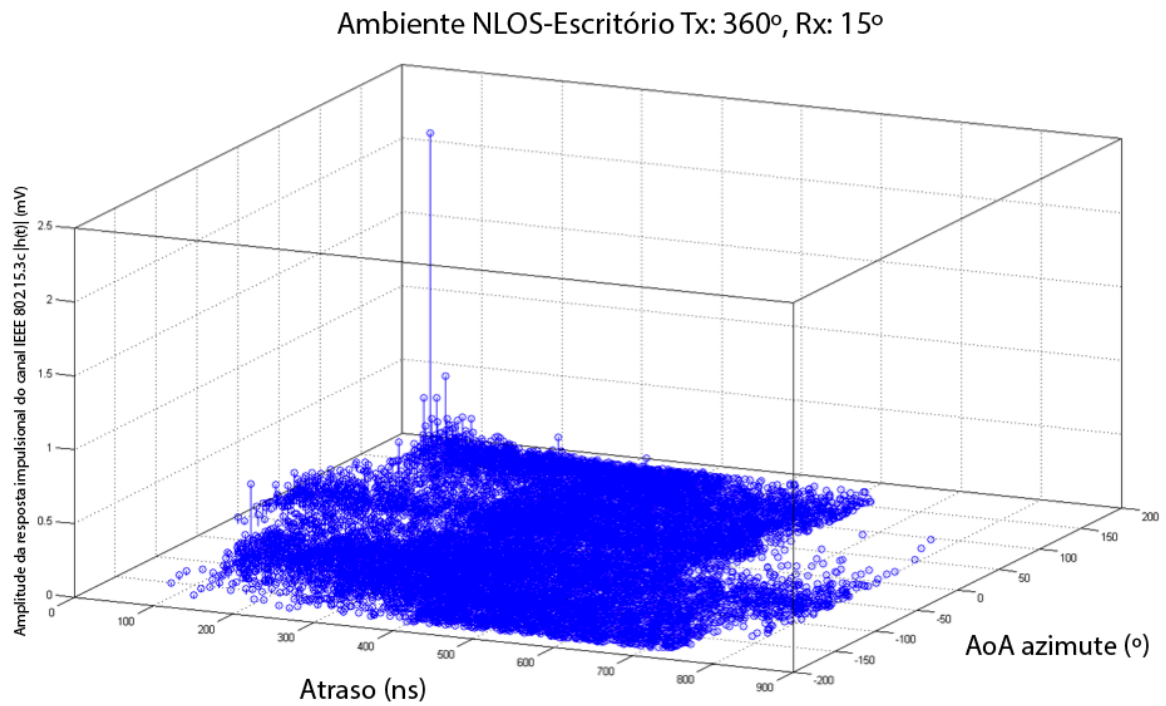


Figura 4.54. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 360°, Rx: 15°.

Ambiente NLOS-Escritório Tx: 360°, Rx: 15°

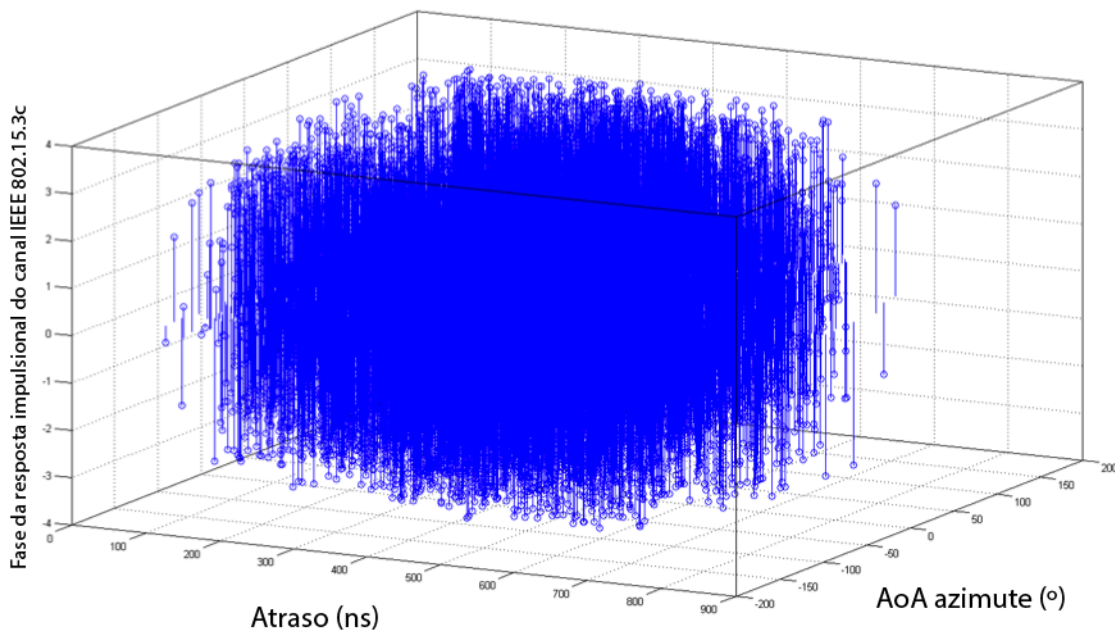


Figura 4.55. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (NLOS)
Tx: 360°, Rx: 15°.

❖ Tx: 30°, Rx: 15°. Atraso máximo do canal: 590 ns.

Ambiente NLOS-Escritório Tx: 30°, Rx: 15°

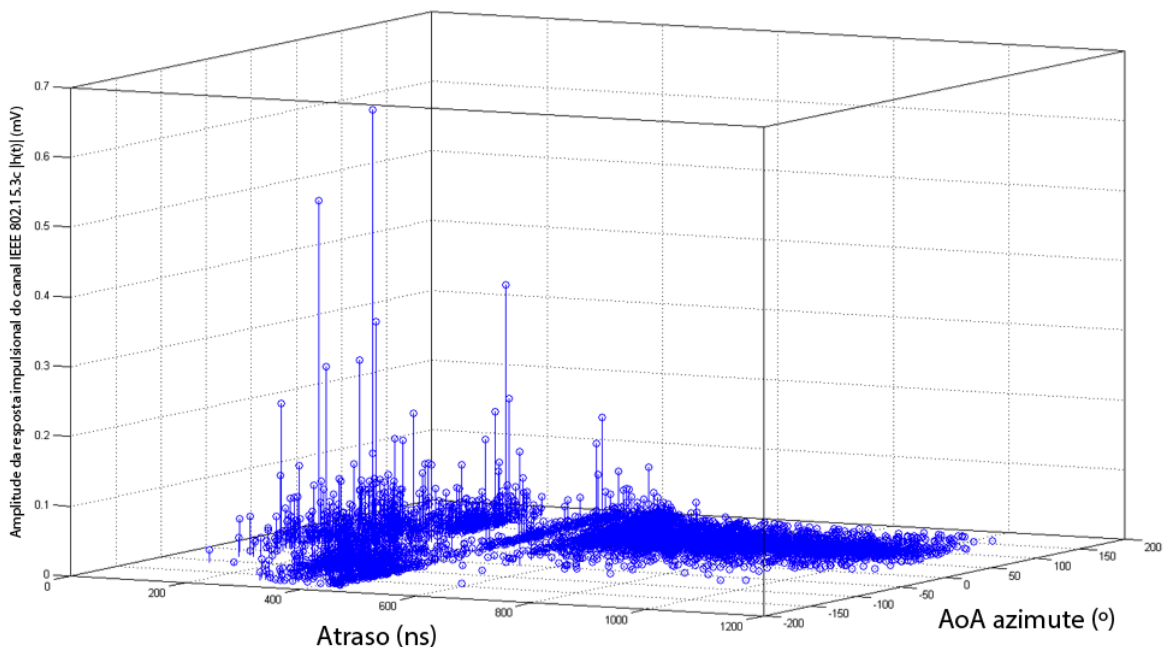


Figura 4.56. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório
(NLOS) Tx: 30°, Rx: 15°.

Ambiente NLOS-Escritório Tx: 30°, Rx: 15°

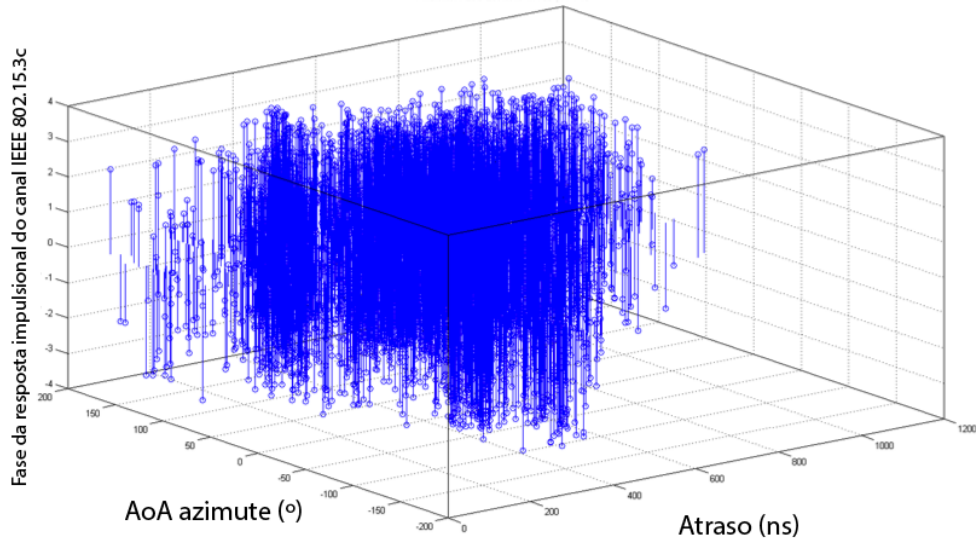


Figura 4.57. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (NLOS)
Tx: 30°, Rx: 15°.

4.4.3.5 Resposta em frequência

As figuras a seguir apresentam as respostas em frequência do canal IEEE 802.15.3c para os dois tipos de configuração de antenas dos cenários sem componente LOS do ambiente escritório.

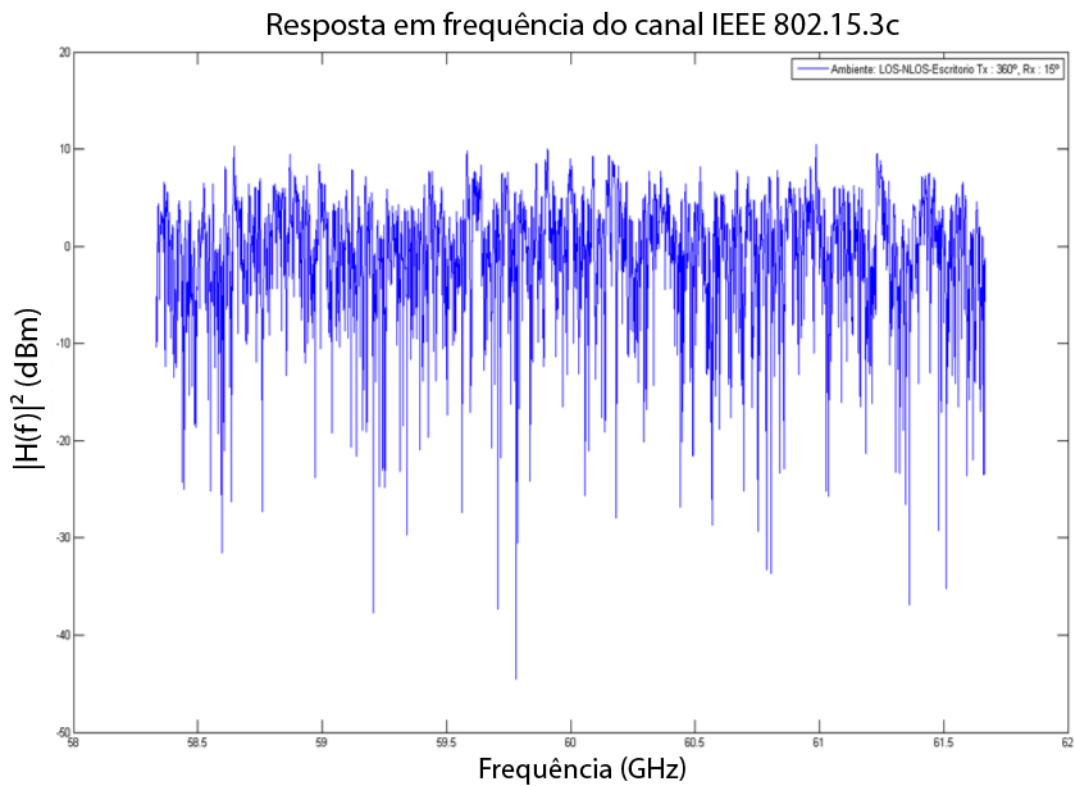


Figura 4.58. Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (NLOS) Tx:
360°, Rx: 15°.

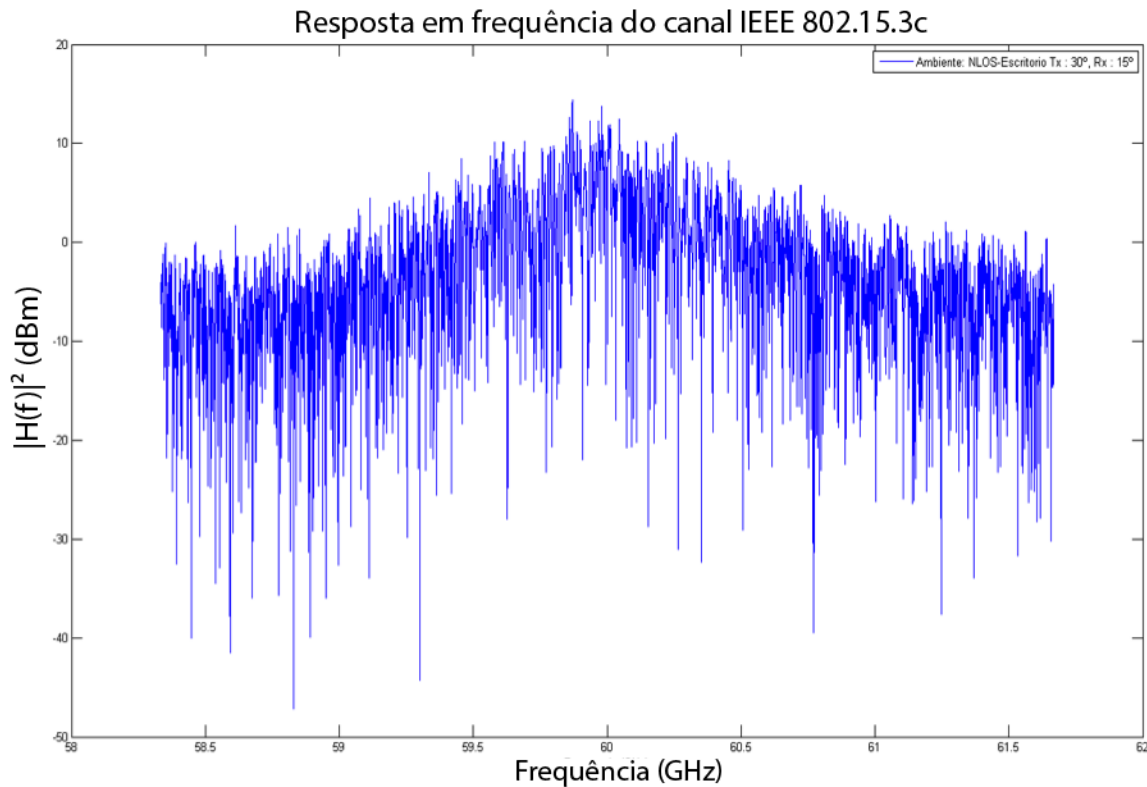


Figura 4.59. Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Escritório (NLOS) Tx: 30°, Rx: 15°.

É possível perceber, a partir da análise das Figs. 4.58 e 4.59, que o canal do ambiente NLOS sofre um desvanecimento muito mais forte do que nos canais nos quais a componente LOS predomina. O canal das figuras acima mostra-se bastante seletivo em frequência, principalmente no caso da Fig. 4.58, que possui uma taxa de chegada de múltiplos percursos maior.

4.4.4 Área de trabalho (*Desktop*)

O ambiente *desktop* é caracterizado por uma configuração de nichos de trabalho compactos com computador. Foram efetuadas simulações somente com linha de visada (LOS) e para duas configurações de largura de feixe de meia potência: Tx: 30° e Rx: 30° e Tx: 60° e Rx: 60°.

4.4.4.1 Perfil de potência do atraso

As figuras a seguir apresentam os perfis de potência do atraso para os dois tipos de configuração de antenas dos cenários do ambiente área de trabalho (*desktop*) com componente LOS. Para cada configuração são mostradas uma perspectiva tridimensional do perfil de potência, caracterizando atraso de chegada, ângulo de chegada e potência de chegada, e uma perspectiva no domínio atraso-angular, caracterizando atrasos em função dos ângulos de chegada.

❖ Tx: 30°, Rx: 30°. Atraso máximo do canal: 88.5 ns

PDP do canal IEEE 802.15.3c: Ambiente LOS-Desktop Tx: 30°, Rx: 30°

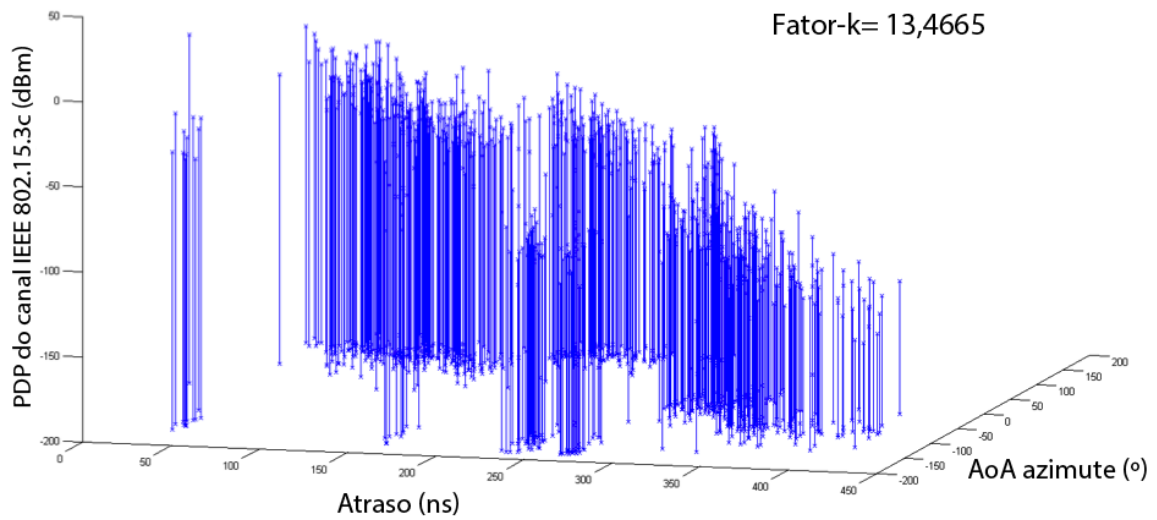


Figura 4.60. Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Área de trabalho (LOS)
Tx: 30°, Rx: 30°.

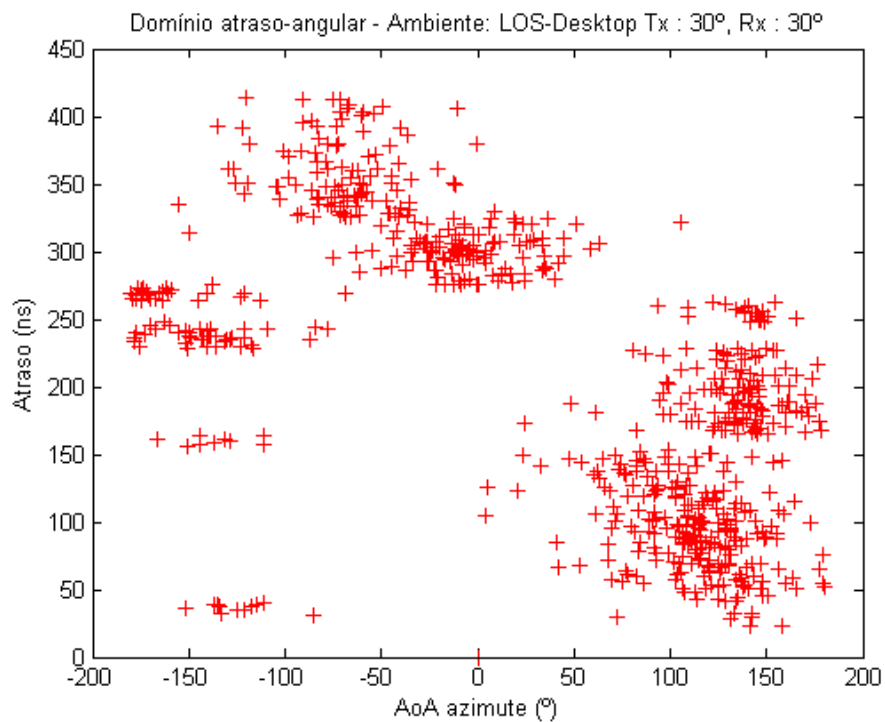


Figura 4.61. Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 30°,
Rx: 30°.

PDP do canal IEEE 802.15.3c: Ambiente LOS-Desktop Tx: 60°, Rx: 60°

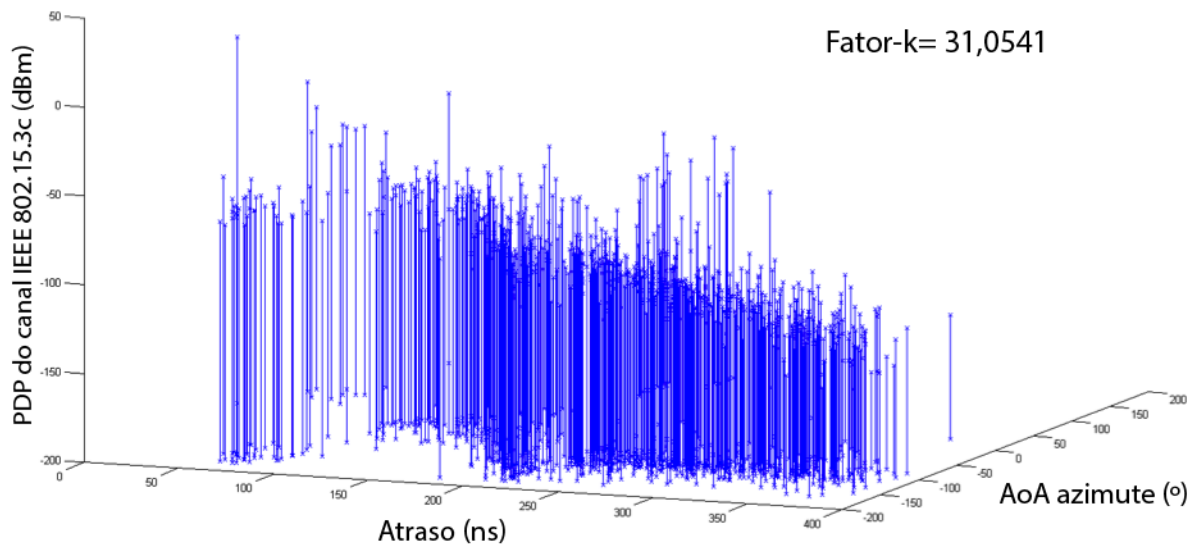


Figura 4.62. Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°.

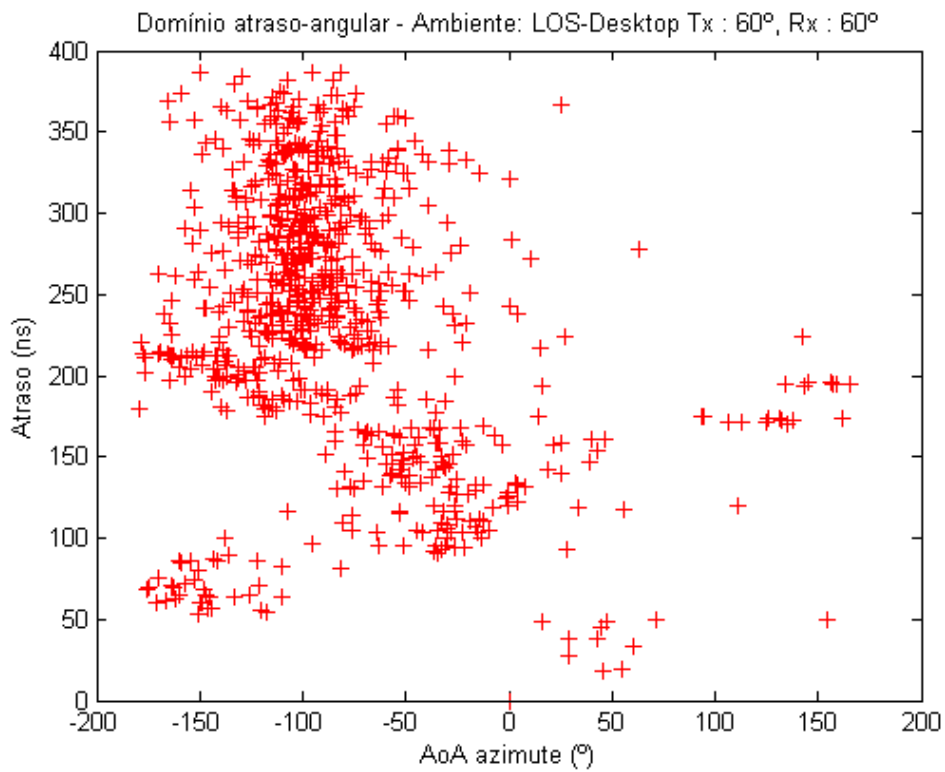


Figura 4.63. Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°.

4.4.4.2 Espalhamento de atraso RMS

As figuras a seguir apresentam o espalhamento de atraso RMS para os dois tipos de configuração de antenas dos cenários com componente LOS do ambiente área de trabalho. Esse espalhamento foi calculado de acordo com a Eq. (2.4) para 50.000 PDPs em cada uma das duas configurações de antena disponíveis para esse ambiente.

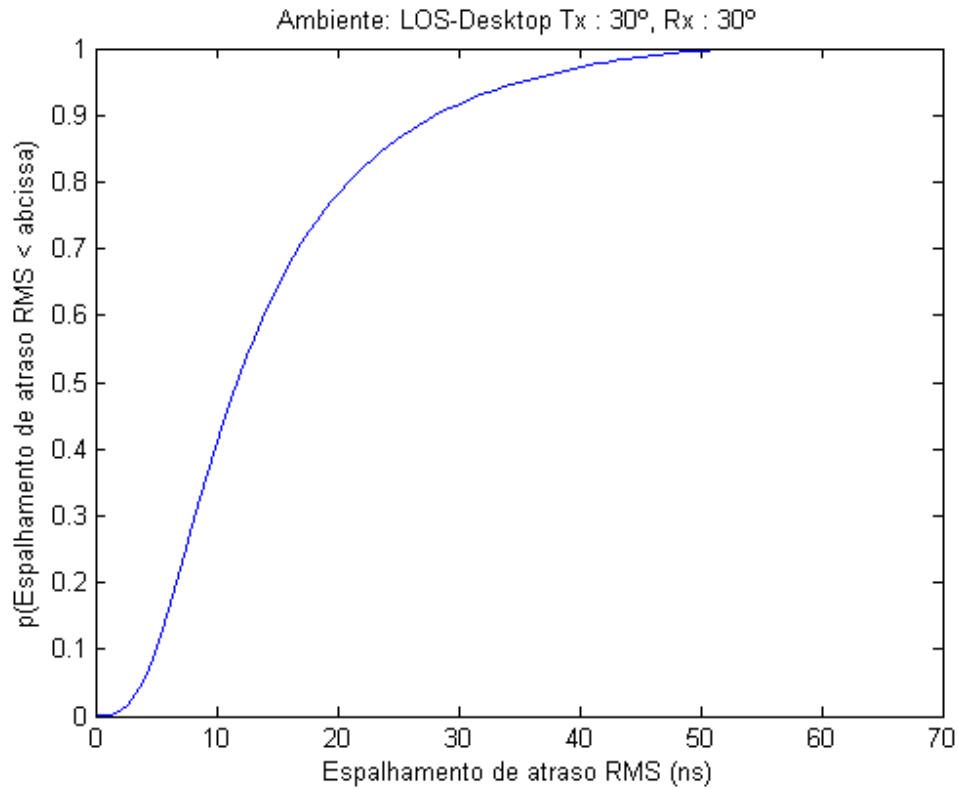


Figura 4.64. Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°.

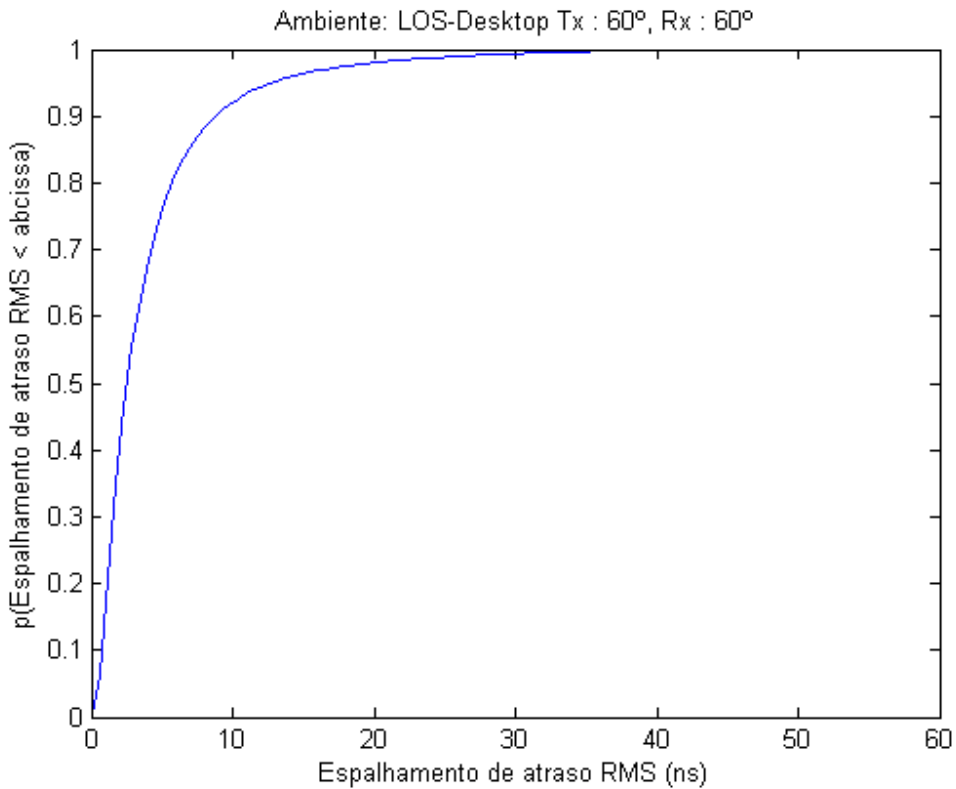


Figura 4.65. Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°.

A média do espalhamento de atraso RMS ficou em torno de 12 ns para a primeira configuração de antenas do ambiente área de trabalho (Fig. 4.64) e 3 ns para a segunda configuração (Fig. 4.65). Isso pode ser explicado pela considerável diferença no fator K dos dois casos, já que pro segundo caso (fator K de 31 dB contra 13 dB do primeiro caso), os múltiplos percursos somam menos potência ao sinal do que no primeiro caso. A banda de coerência para o primeiro caso ficou em torno de 16 MHz para uma correlação de 50% e 1,6 MHz para 90% de correlação. Para o segundo caso, a banda de coerência ficou em torno de 66,6 MHz para 50% de correlação e 6,66 MHz para 90% de correlação.

4.4.4.3 Distribuição de probabilidade das potências

As figuras a seguir apresentam as PDFs das potências do primeiro raio do primeiro *cluster* para os dois tipos de configuração de antenas do ambiente área de trabalho. As PDFs experimentais apresentam comportamento bastante semelhante às PDFs teóricas. Seguem uma distribuição normal em dB, como esperado, de média $\mu_{c,l} = \frac{10 \ln(\Omega) - \frac{10(\tau_c - \tau_0)}{\Lambda}}{\ln(10)} - \frac{(\sigma_c^2 + \sigma_r^2) \ln(10)}{20}$ e variância $\sigma_c^2 + \sigma_r^2$, cujos valores derivam da Tabela 4.4.

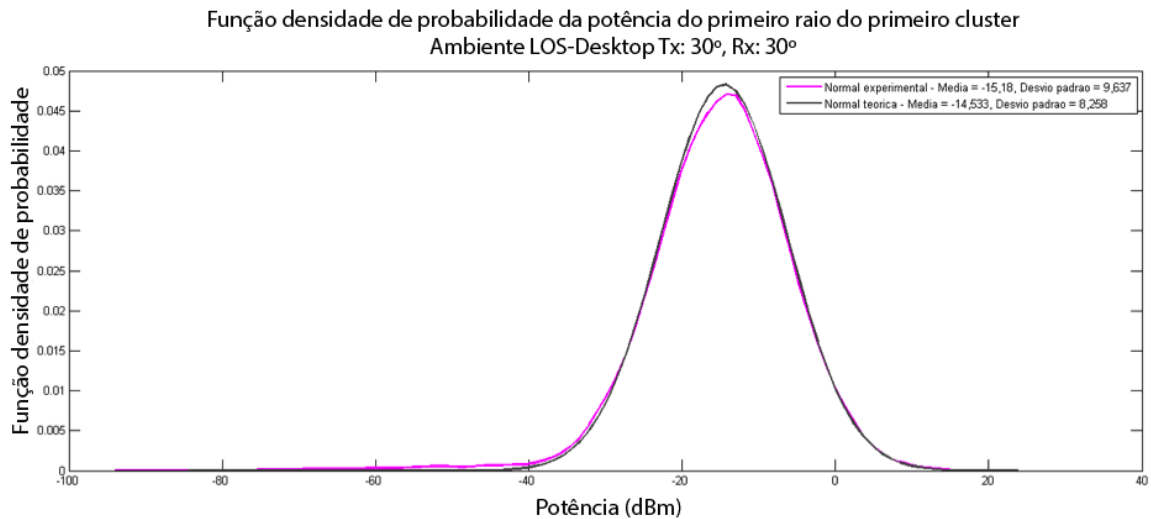


Figura 4.66. PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro *cluster* – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°.

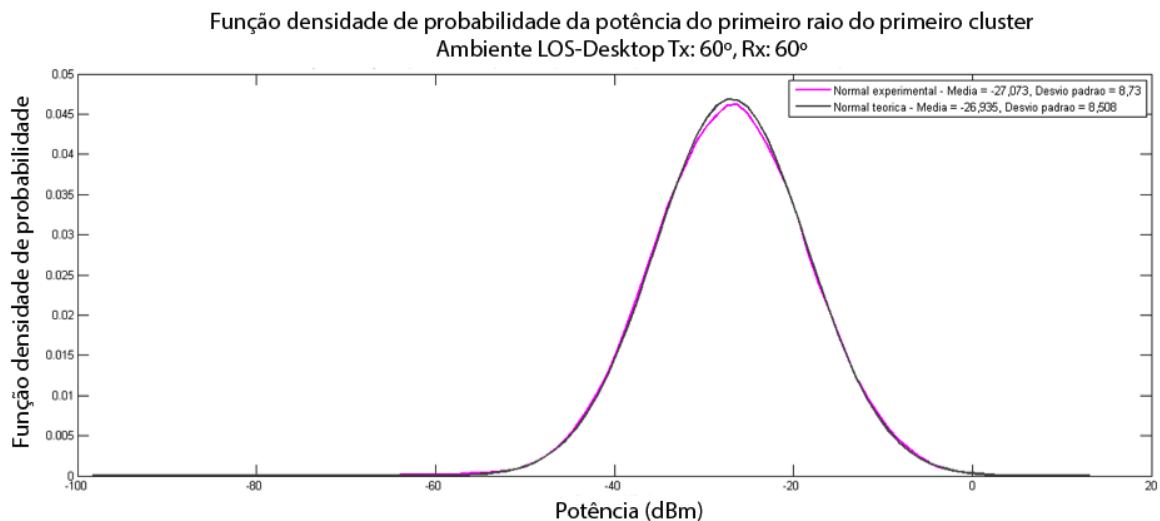


Figura 4.67. PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro *cluster* – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°.

4.4.4.4 Resposta impulsional do canal

As figuras a seguir apresentam as amplitudes e fases da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c para os dois tipos de configuração de antenas dos cenários com componente LOS do ambiente área de trabalho.

Conforme poderá ser visto nas figuras a seguir, as fases variam de maneira aproximadamente uniforme entre $-\pi$ e π , como previsto na definição do modelo.

❖ Tx: 30°, Rx: 30°. Atraso máximo do canal: 88.5 ns.

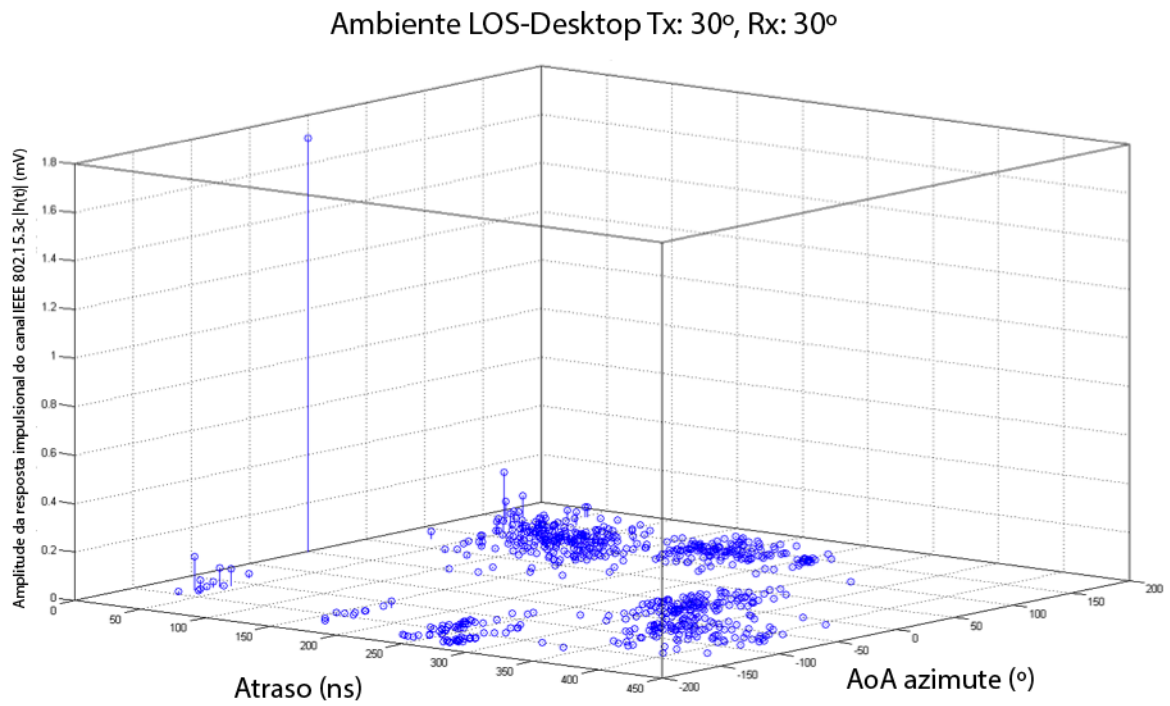


Figura 4.68. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°.

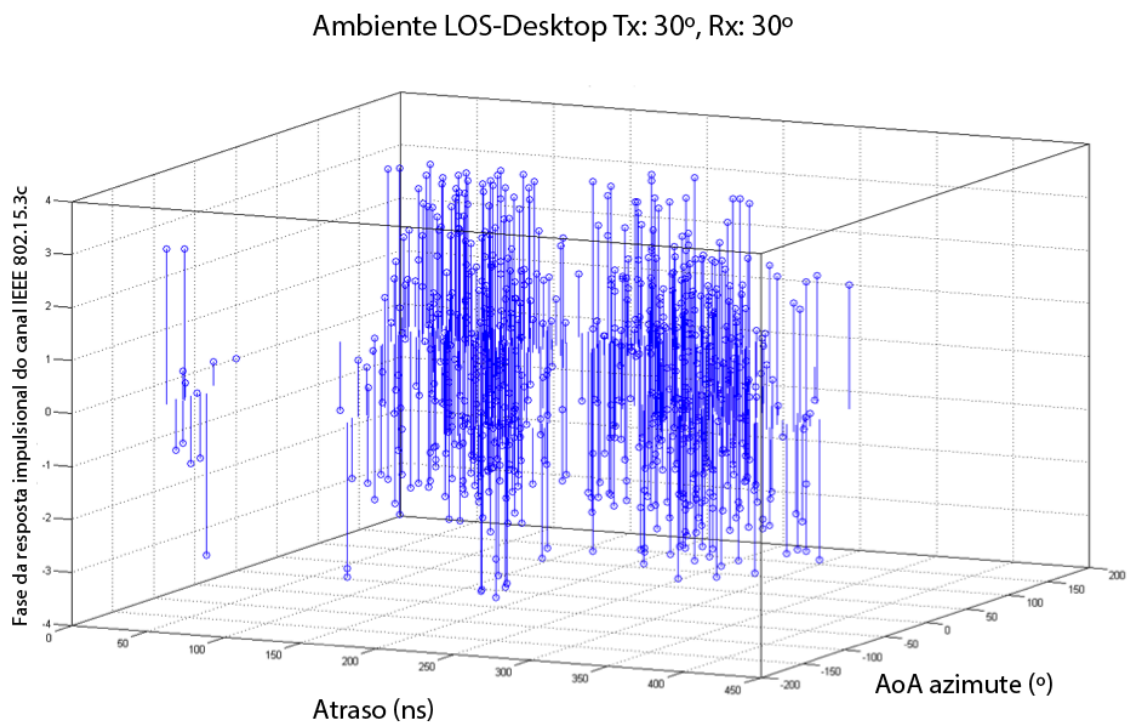


Figura 4.69. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 30°, Rx: 30°.

❖ Tx: 60°, Rx: 60°. Atraso máximo do canal: 172 ns.

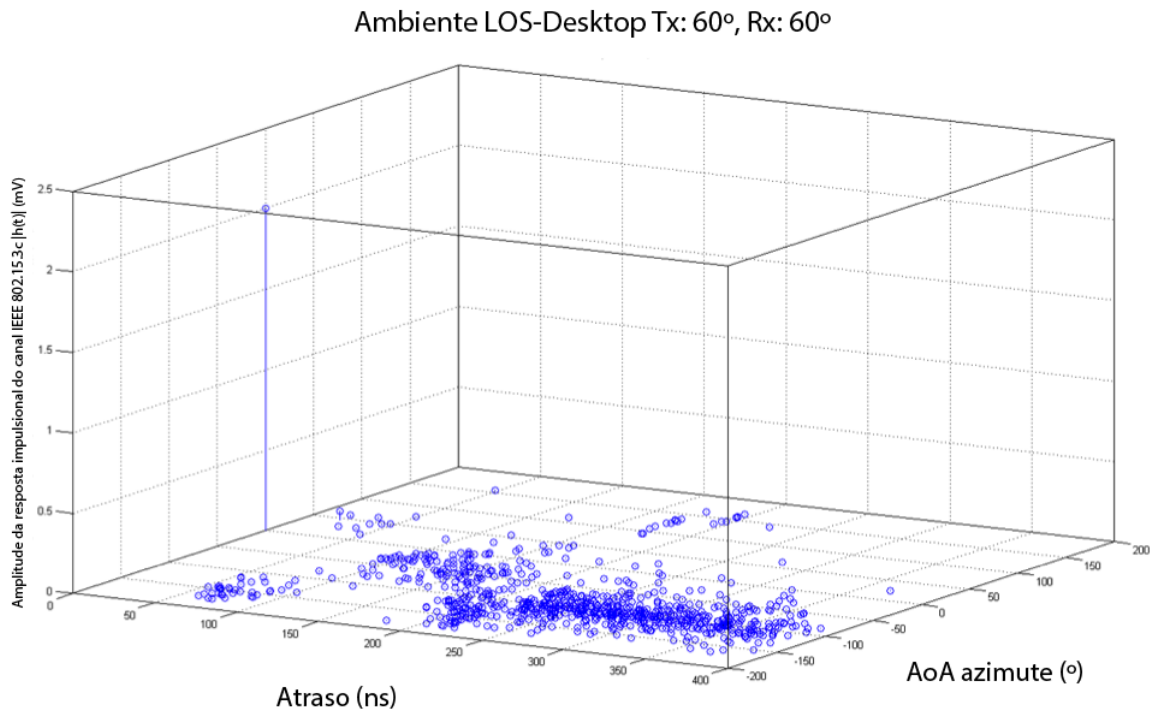


Figura 4.70. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°.

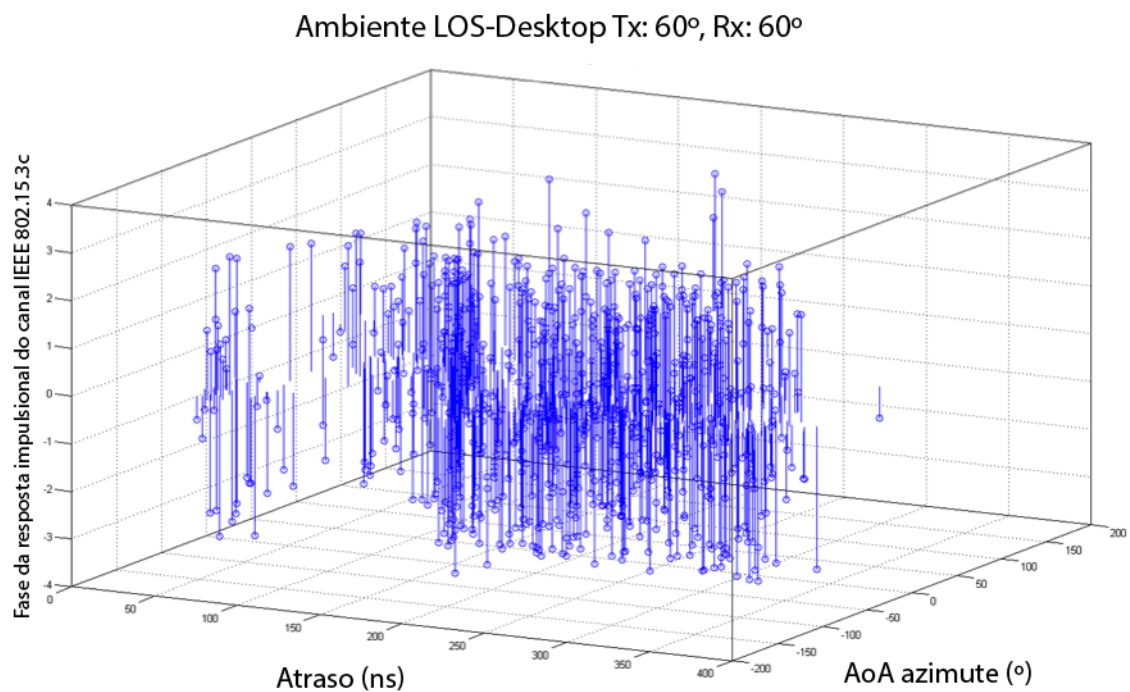


Figura 4.71. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Área de trabalho (LOS) Tx: 60°, Rx: 60°.

4.4.4.5 Resposta em frequência

As figuras a seguir apresentam as respostas em frequência do canal IEEE 802.15.3c para os dois tipos de configuração de antenas dos cenários com componente LOS do ambiente área de trabalho.

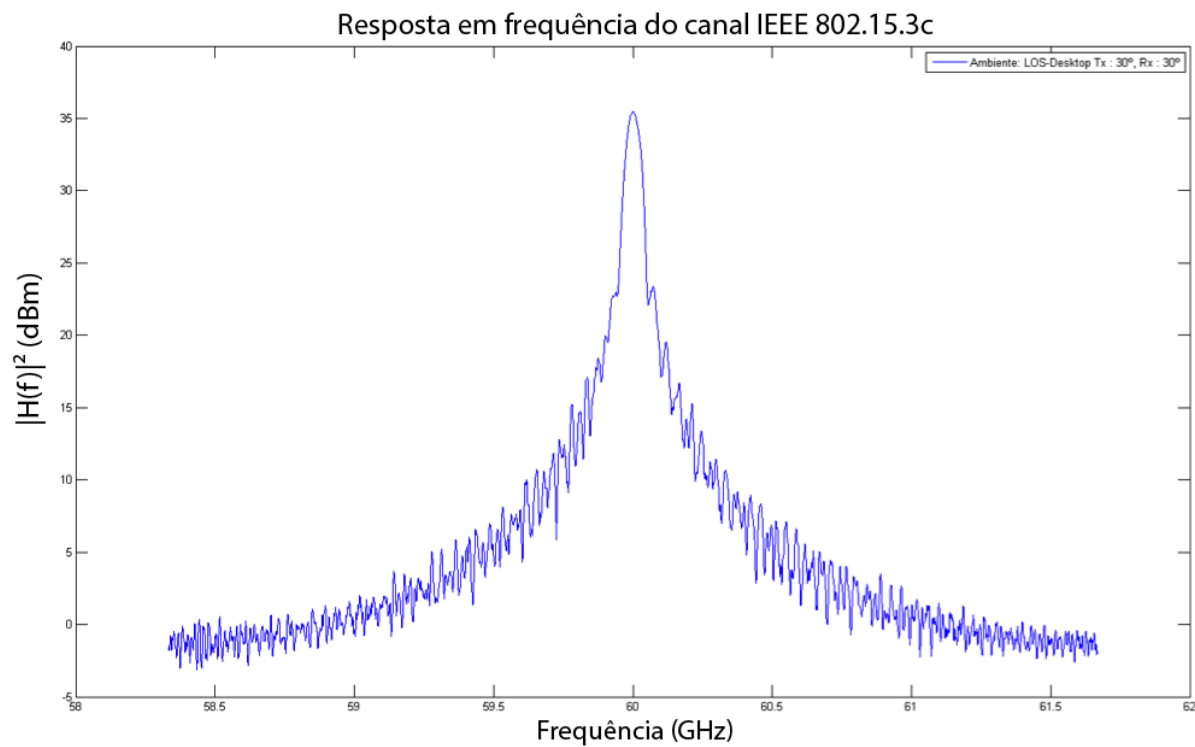


Figura 4.72. Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Área de trabalho (LOS)
Tx: 30°, Rx: 30°.

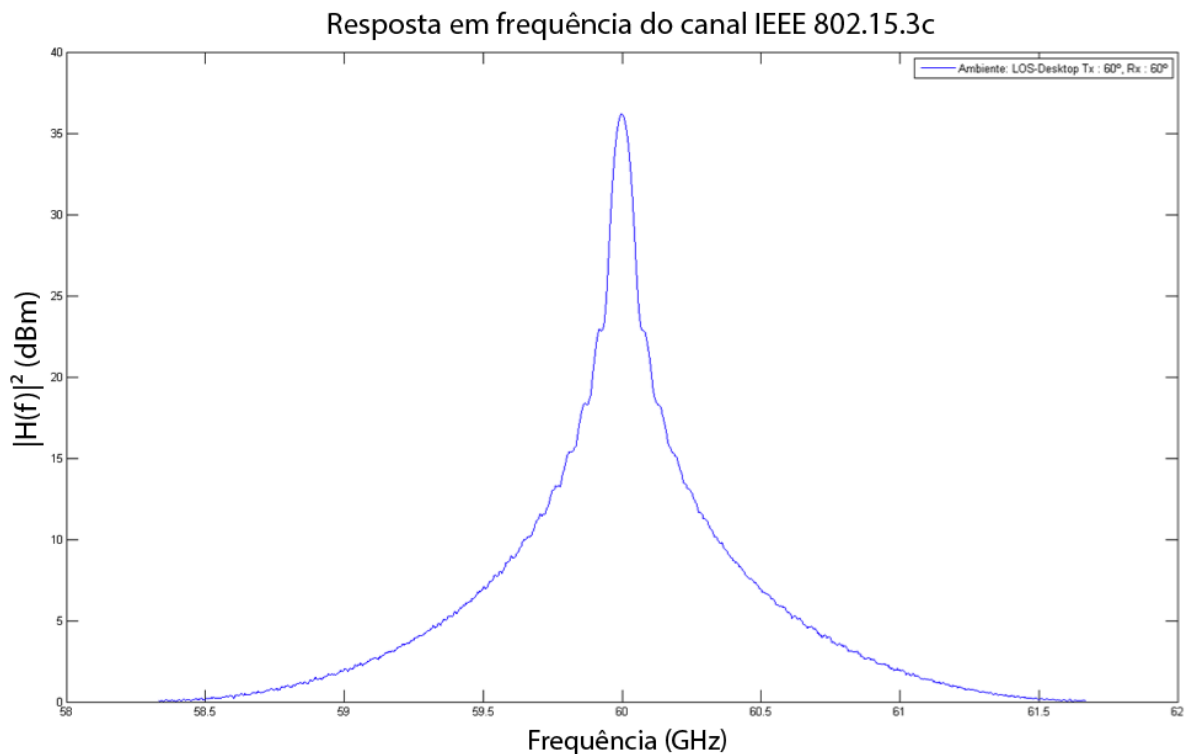


Figura 4.73. Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Área de trabalho (LOS)
Tx: 60°, Rx: 60°.

Ambos os cenários do ambiente área de trabalho possuem uma forte e distinta componente de frequência em 60 GHz, devido à existência de uma forte componente LOS no canal. A Fig. 4.73, correspondente ao segundo cenário do ambiente área de trabalho, possui uma resposta em frequência menos marcada por desvanecimento. Isso pode ser explicado pelo fator K dessa realização distintamente maior do que no caso ilustrado pela Fig. 4.72.

4.4.5 Kiosk

O ambiente kiosk é caracterizado por uma estação em um shopping ou outro lugar público e implica que os usuários se posicionem diretamente em frente ou perto (1-2m) do mesmo.

O ambiente kiosk foi definido pelo modelo utilizando duas campanhas de medição diferentes. Diferentemente dos outros ambientes, cuja diferença na campanha de medição reside na diferença da largura do feixe na antena, o ambiente kiosk manteve a mesma largura de feixe para as duas campanhas mas, alterando a configuração do ambiente de propagação, conforme ilustrado na Fig. 4.74. No primeiro ambiente, ilustrado na parte superior da Fig. 4.74, enquanto existe uma quina evidente entre paredes, há menos mobília e artefatos interferentes como pilares, por exemplo. Já no segundo ambiente (Fig. 4.74, parte inferior) nota-se a presença de várias mesas e alguns pilares, objetos sujeitos a gerarem mais espalhamento do sinal.

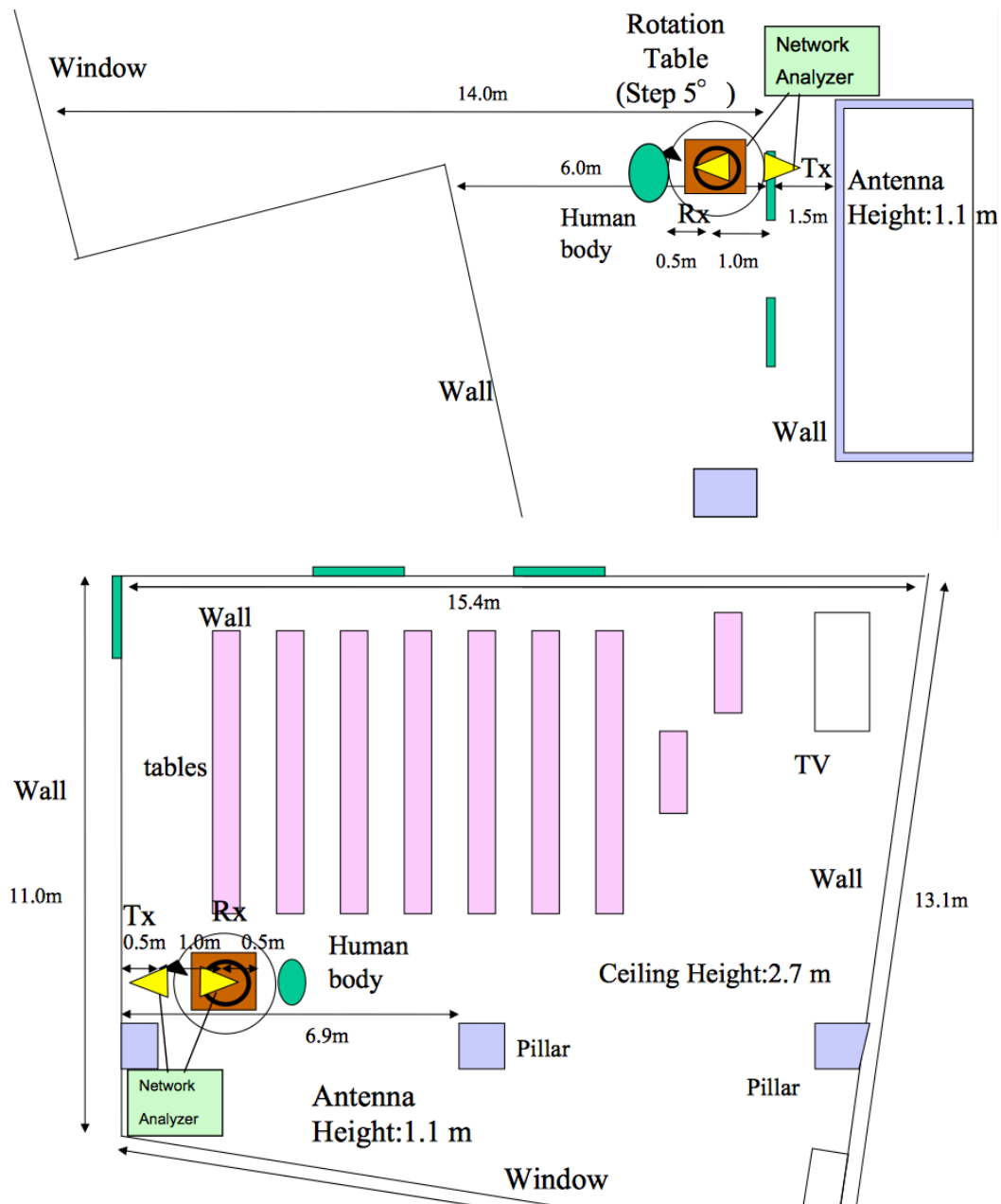


Figura 4.74. Cenários do ambiente kiosk: campanha de medição do ambiente/cenário 1 (superior) e campanha de medição do ambiente/cenário 2 (inferior) [21].

4.4.5.1 Perfil de potência do atraso

As figuras a seguir apresentam os perfis de potência do atraso para os dois tipos de cenários do ambiente kiosk. Para cada configuração são mostradas uma perspectiva tridimensional do perfil de potência, caracterizando atraso de chegada, ângulo de chegada e potência de chegada, e uma perspectiva no domínio atraso-angular, caracterizando atrasos em função dos ângulos de chegada.

❖ Cenário 1 - Tx: 30°, Rx: 30°. Atraso máximo do canal: 365 ns.

PDP do canal IEEE 802.15.3c: Ambiente LOS-Kiosk Tx: 30°, Rx: 30°

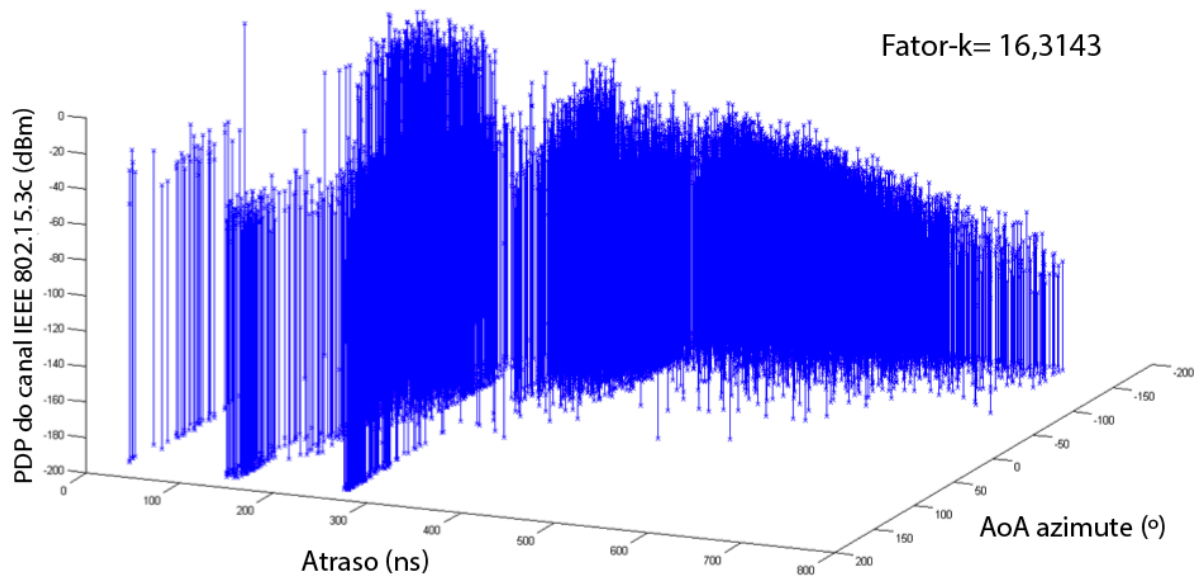


Figura 4.75. Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Kiosk (LOS) – Cenário 1.

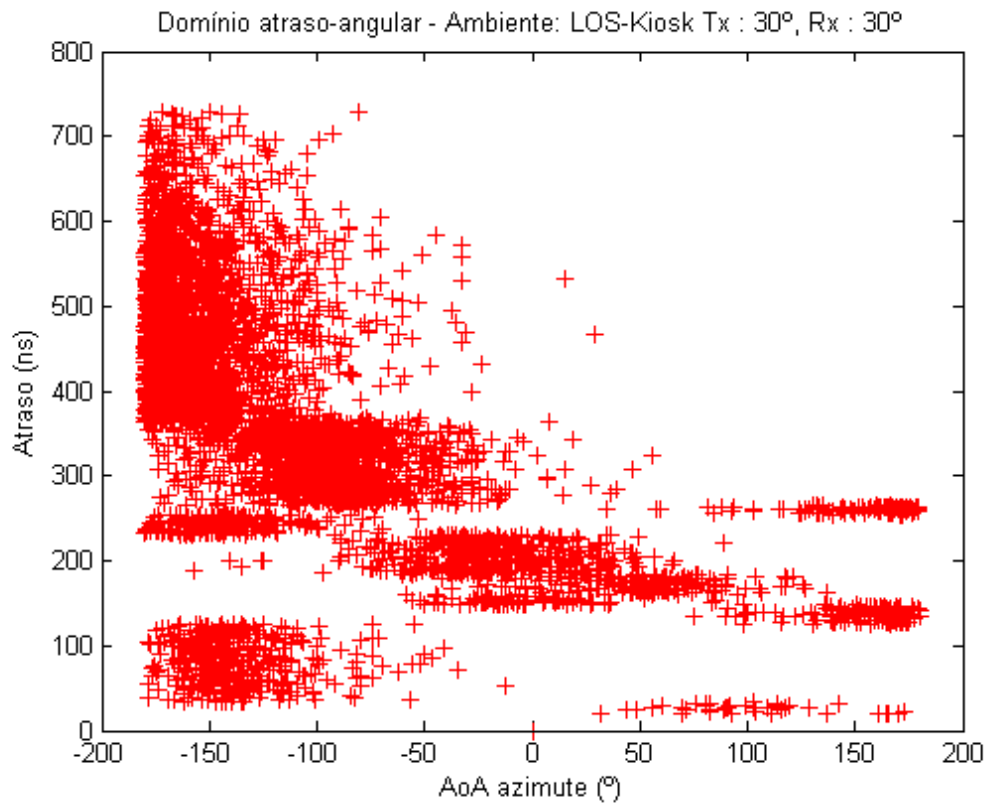


Figura 4.76. Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Kiosk (LOS) – Cenário 1.

❖ Cenário 2 - Tx: 30°, Rx: 30°. Atraso máximo do canal: 611 ns.

PDP do canal IEEE 802.15.3c: Ambiente LOS-Kiosk Tx: 30°, Rx: 30°

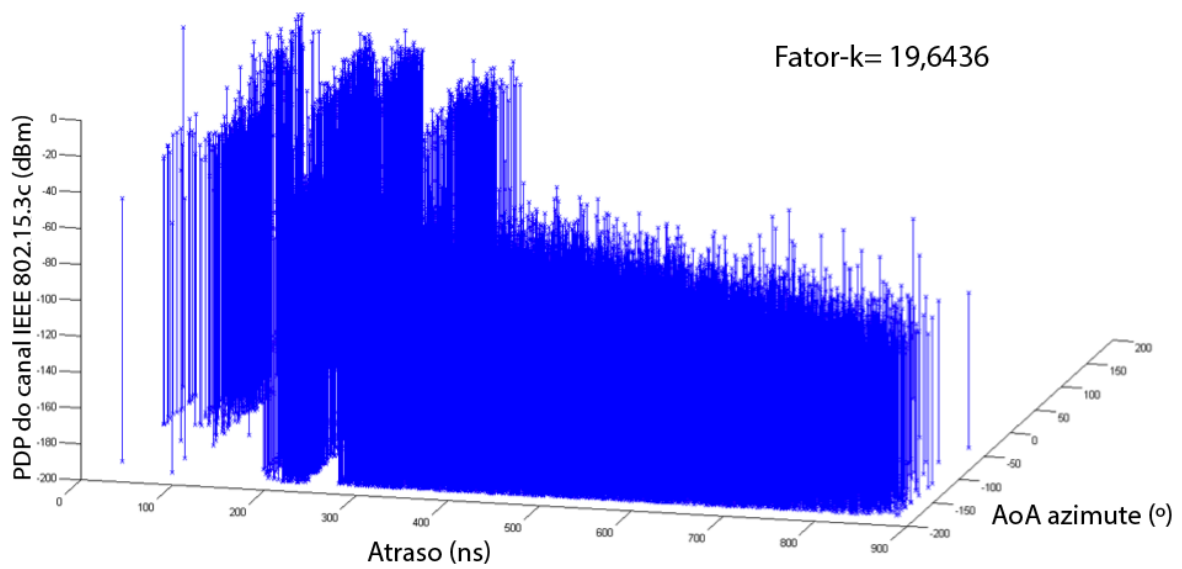


Figura 4.77. Perfil de potência do atraso do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Kiosk (LOS) – Cenário 2.

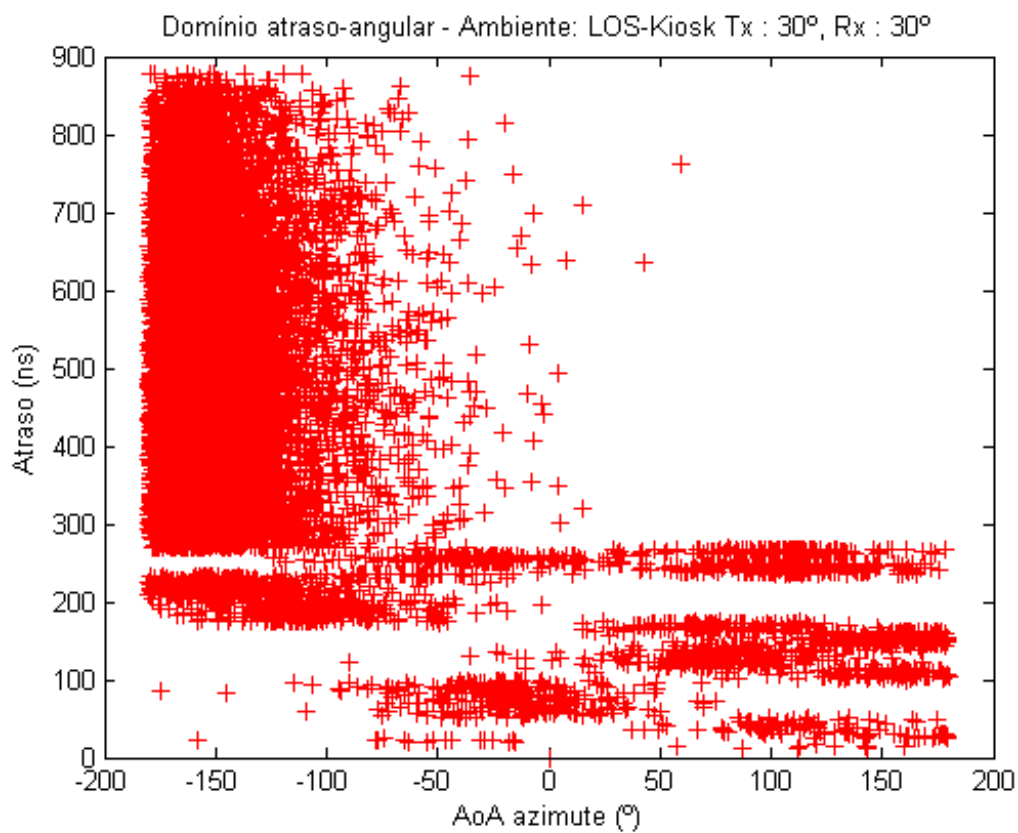


Figura 4.78. Perspectiva Atrasos x Ângulos de chegada. Ambiente Kiosk (LOS) – Cenário 2.

4.4.5.2 Espalhamento de atraso RMS

As figuras a seguir apresentam o espalhamento de atraso RMS para os dois cenários do ambiente kiosk. Esse espalhamento foi calculado de acordo com a Eq. (2.4) para 30.000 PDPs no caso do cenário 1, e para 10.000 PDPs no caso do cenário 2.

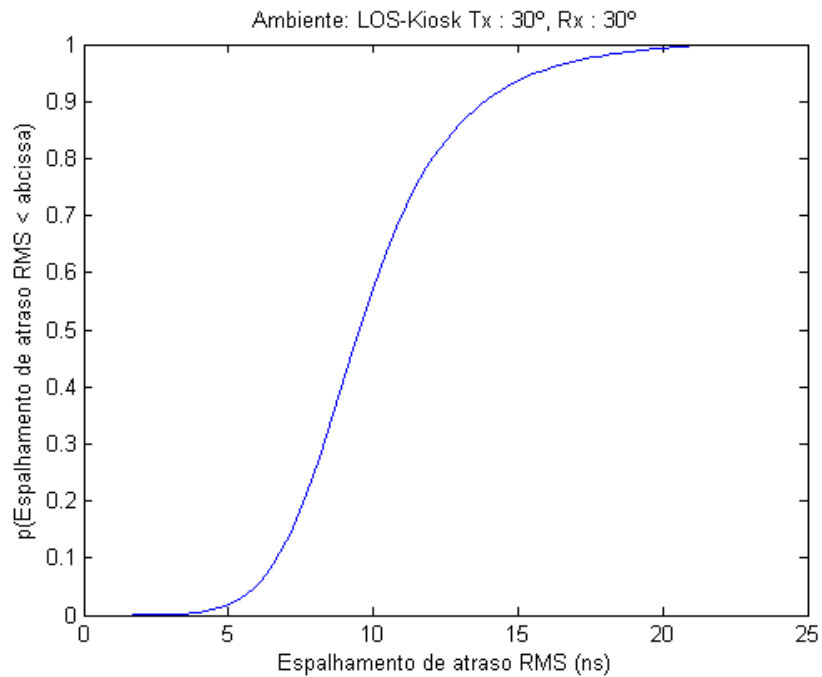


Figura 4.79. Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Kiosk (LOS) – Cenário 1.

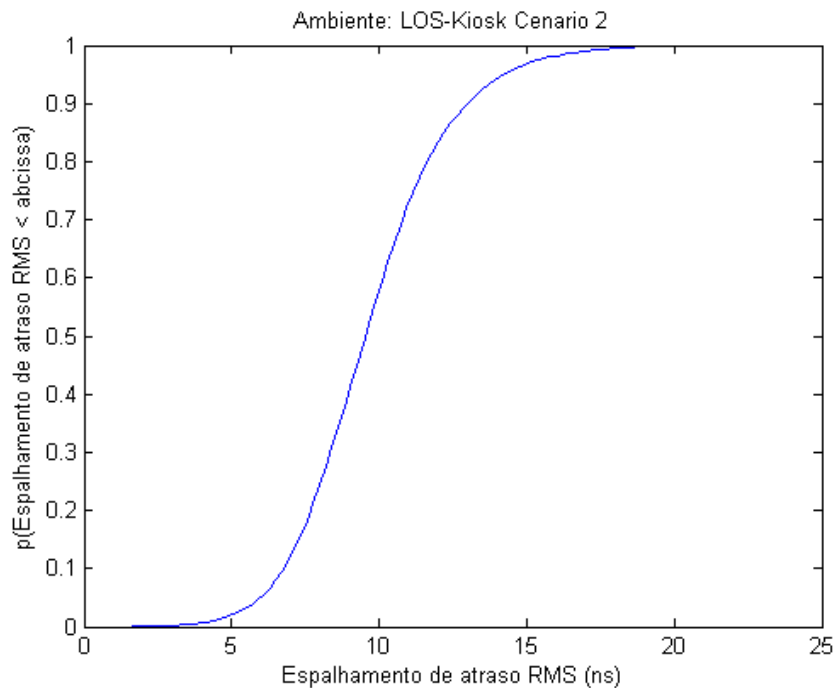


Figura 4.80. Espalhamento de atraso RMS – Ambiente Kiosk (LOS) – Cenário 2.

O espalhamento de atraso RMS mostra-se bastante semelhante para os dois cenários com LOS do ambiente kiosk. Para os dois cenários, a média do espalhamento de atraso RMS está em torno de 9,5 ns e a banda de coerência em torno de 21 MHz para uma correlação de 50% e 2 MHz para 90% de correlação.

4.4.5.3 Distribuição de probabilidade das potências

As figuras a seguir apresentam as PDFs das potências do primeiro raio do primeiro *cluster* para os dois cenários do ambiente kiosk. As PDFs experimentais apresentam comportamento bastante semelhante às PDFs teóricas. Seguem uma distribuição normal em dB, como esperado, de média

$$\mu_{c,l} = \frac{10 \ln(\Omega) - \frac{10(\tau_c - \tau_0)}{\Lambda}}{\ln(10)} - \frac{(\sigma_c^2 + \sigma_r^2) \ln(10)}{20} \text{ e variância } \sigma_c^2 + \sigma_r^2, \text{ cujos valores derivam da Tabela 4.5.}$$

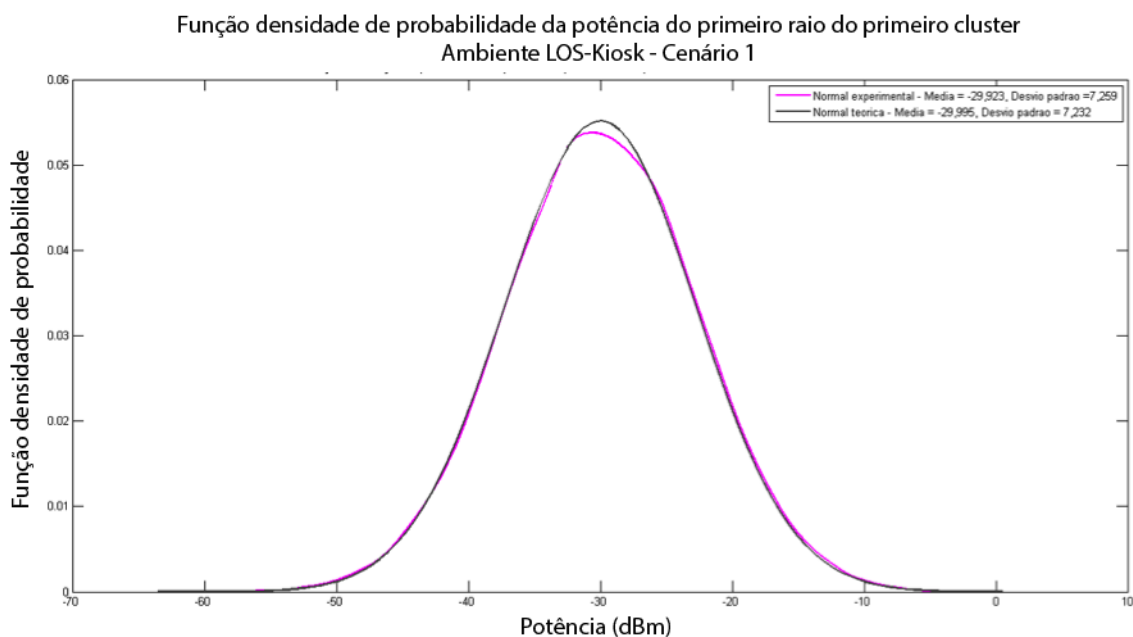


Figura 4.81. PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro *cluster* – Ambiente Kiosk (LOS) - Cenário 1.

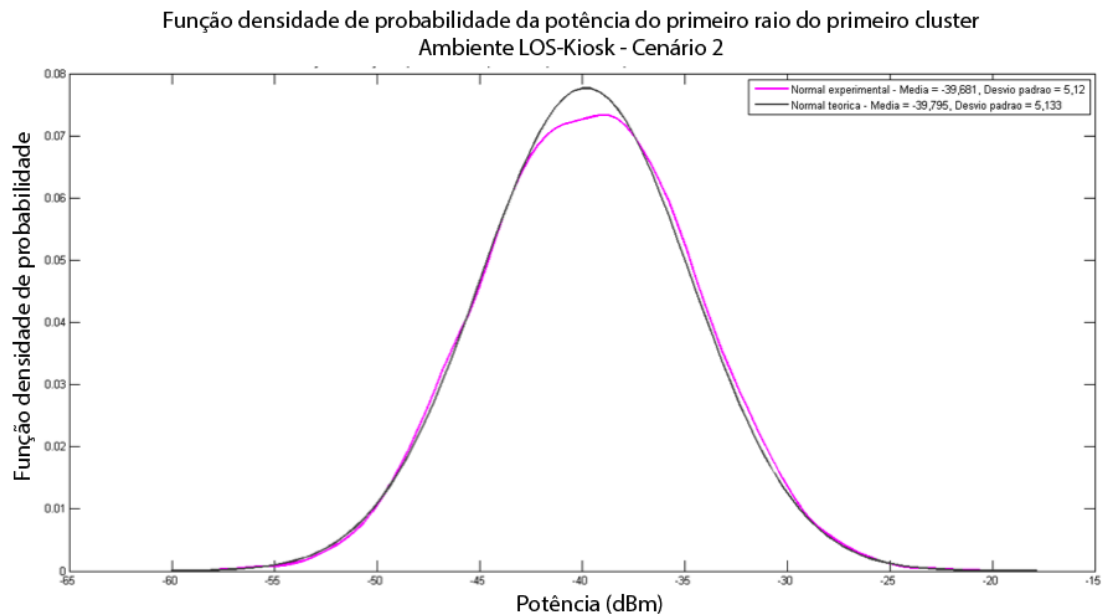


Figura 4.82. PDFs experimental e teórica do primeiro raio do primeiro *cluster* – Ambiente Kiosk (LOS) - Cenário 2.

4.4.5.4 Resposta impulsional do canal

As figuras a seguir apresentam as amplitudes e fases da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c para os dois de cenários do ambiente kiosk.

Conforme poderá ser visto nas figuras a seguir, as fases variam de maneira aproximadamente uniforme entre $-\pi$ e π , como previsto na definição do modelo.

❖ Cenário 1 - Tx: 30°, Rx: 30°. Atraso máximo do canal: 365 ns.

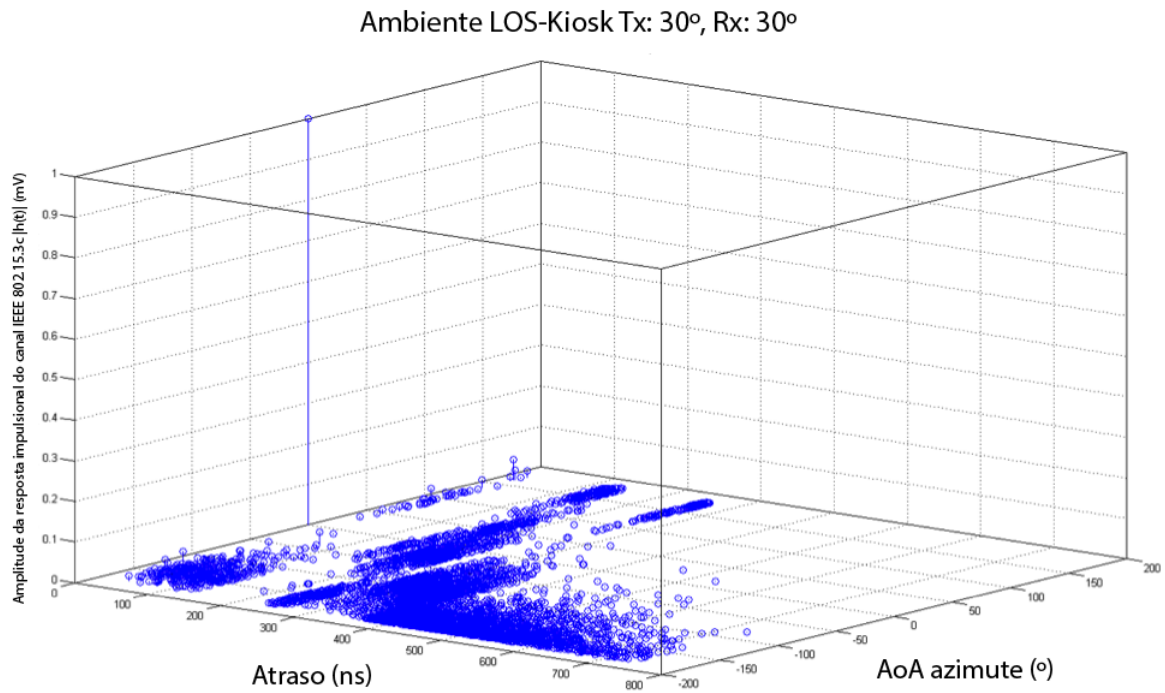


Figura 4.83. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Kiosk (LOS)
Tx: 30°, Rx: 30° - Cenário 1.

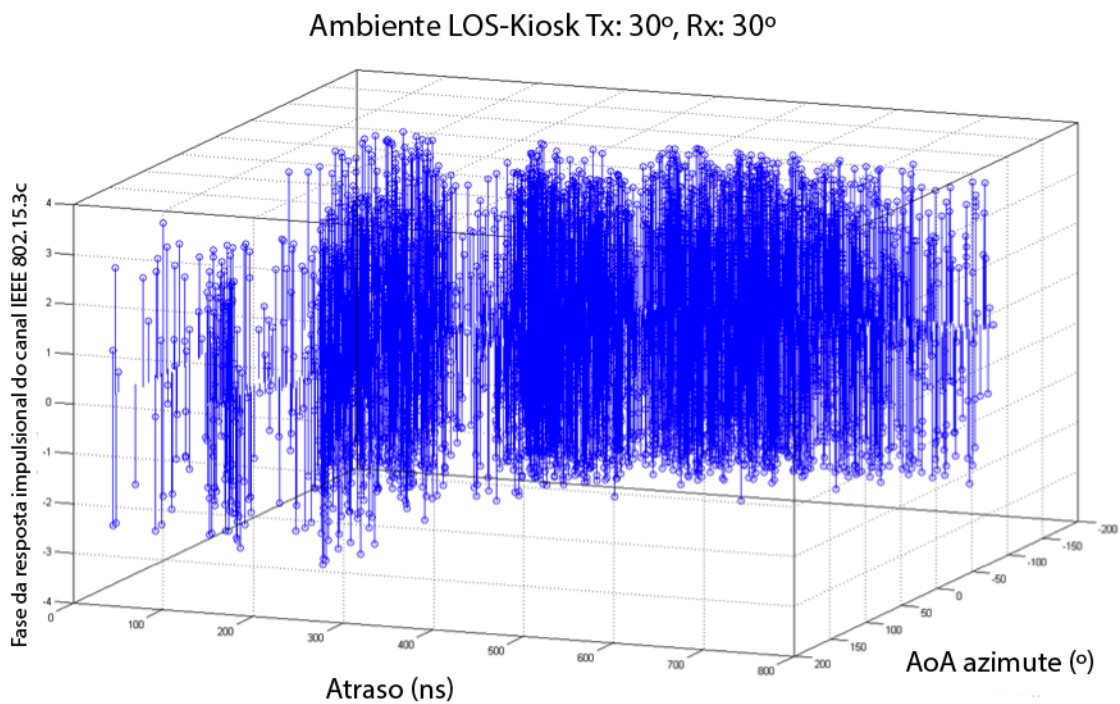


Figura 4.84. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Kiosk (LOS) Tx: 30°,
Rx: 30° - Cenário 1.

❖ Cenário 2 - Tx: 30°, Rx: 30°. Atraso máximo do canal: 611 ns.

Ambiente LOS-Kiosk Tx: 30°, Rx: 30°

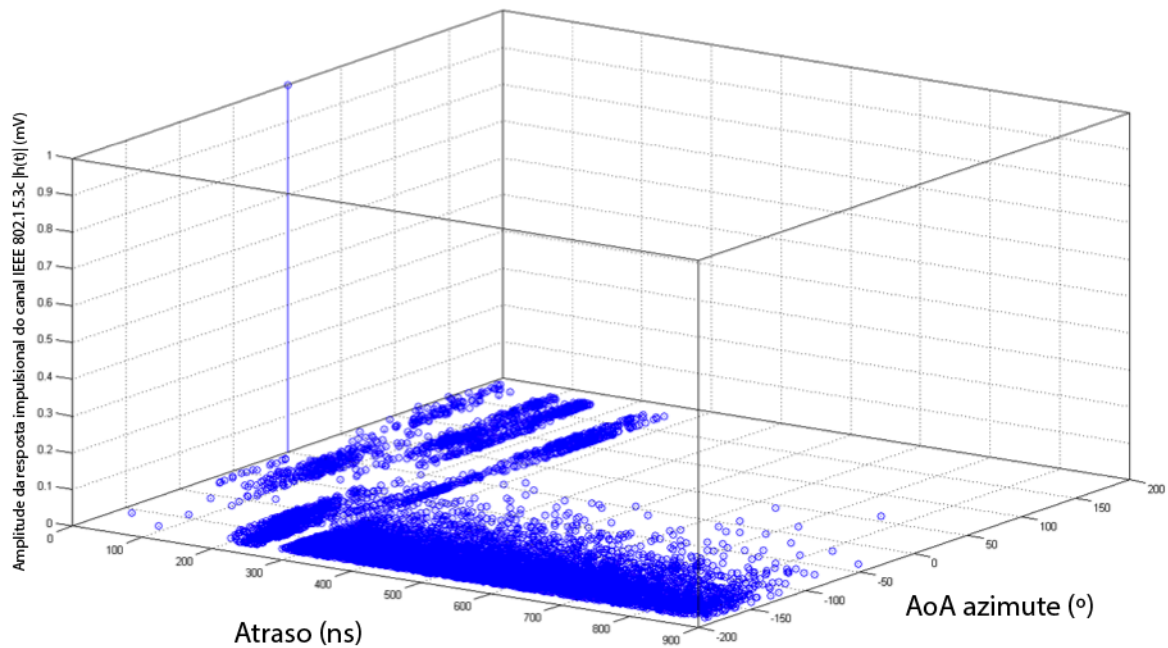


Figura 4.85. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Kiosk (LOS) Tx: 30°, Rx: 30° - Cenário 2.

Ambiente LOS-Kiosk Tx: 30°, Rx: 30°

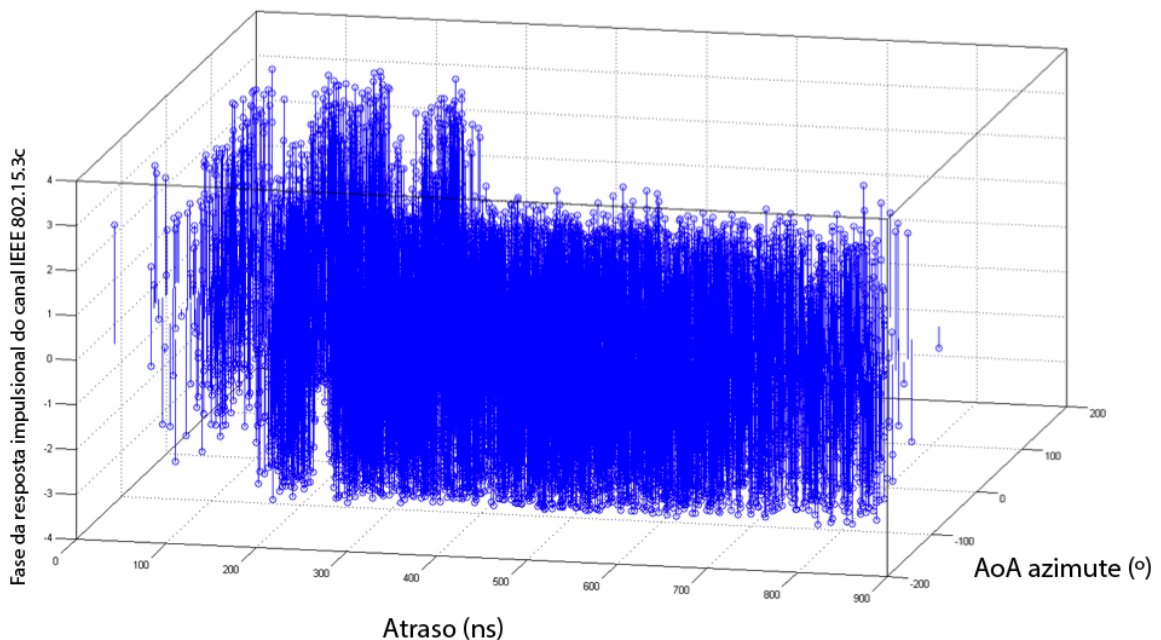


Figura 4.86. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Kiosk (LOS) Tx: 30°, Rx: 30° - Cenário 2.

4.4.5.5 Resposta em frequência

As figuras a seguir apresentam as respostas em frequência do canal IEEE 802.15.3c para os dois de cenários do ambiente kiosk.

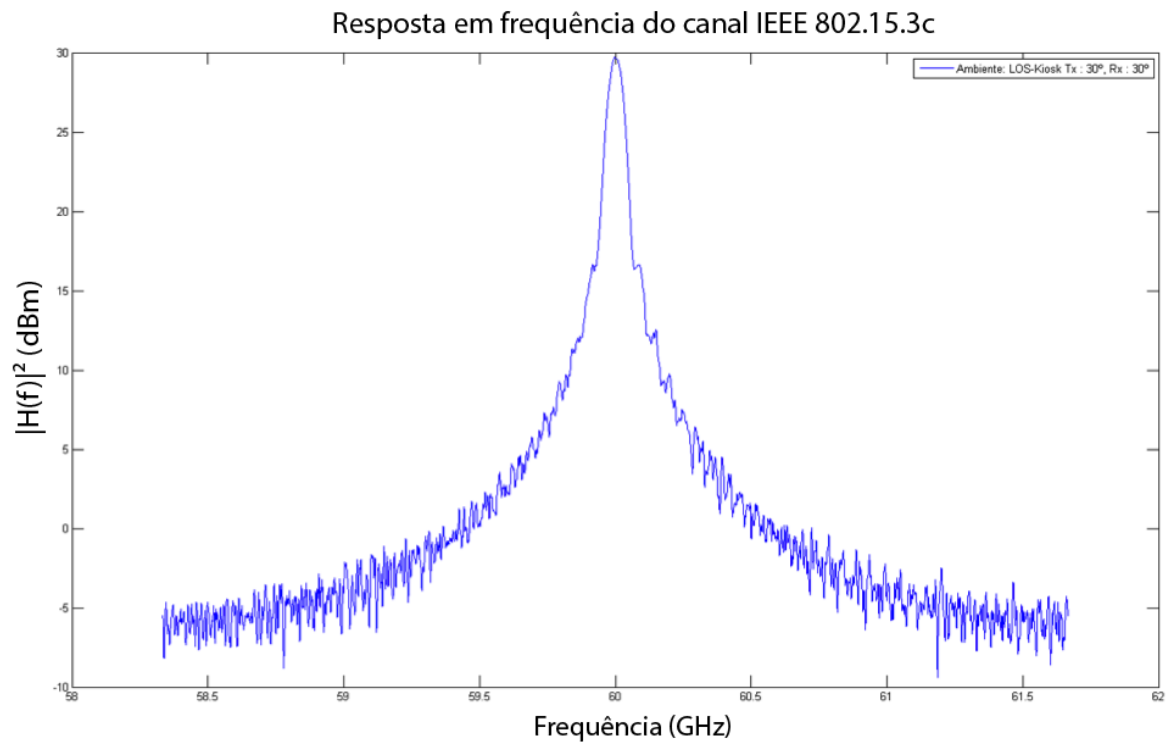


Figura 4.87. Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Kiosk (LOS) Tx: 30°, Rx: 30° - Cenário 1.

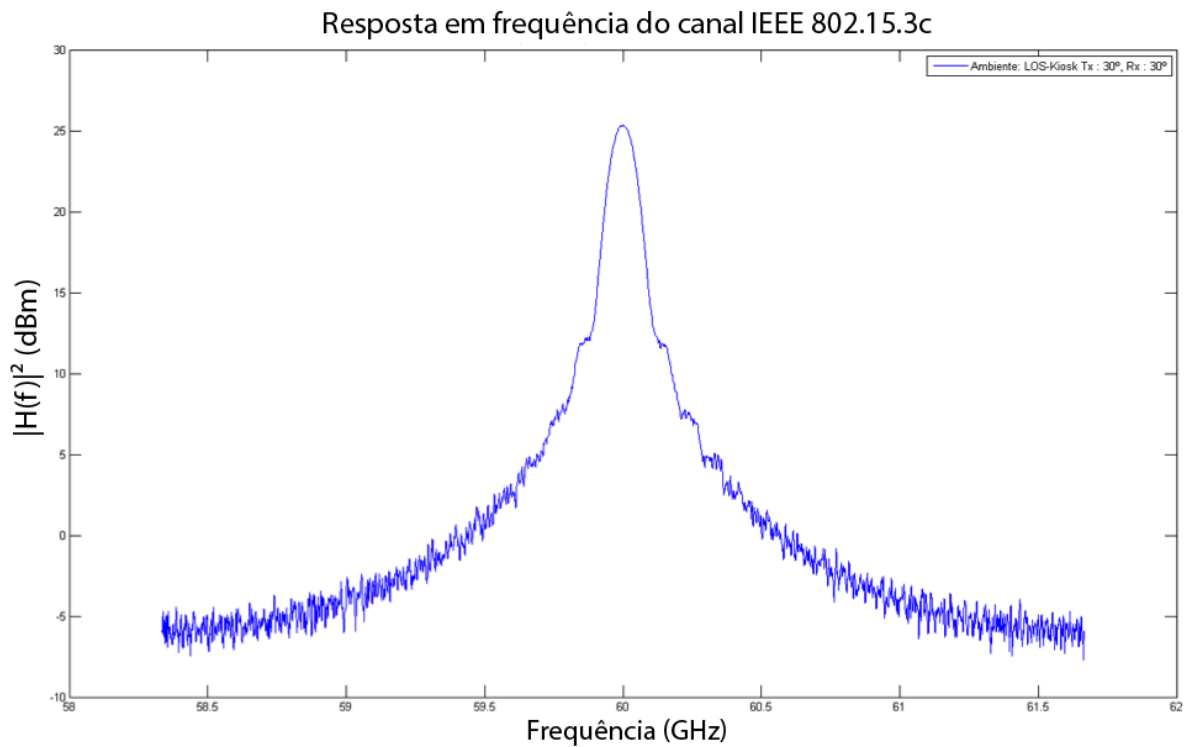


Figura 4.88. Resposta em frequência do canal IEEE 802.15.3c – Ambiente Kiosk (LOS) Tx: 30°, Rx: 30° - Cenário 2.

As respostas em frequência dos dois cenários do ambiente kiosk são muito semelhantes entre si. A causa disso é o fato de que ambas possuem valores de fator K e espalhamentos de atraso RMS parecidos. Além disso, os parâmetros de taxa de chegada de *clusters* e raios e respectivas constantes de decaimento de potência também possuem valores muito próximos entre si, como pode ser observado na Tabela 4.5. Entretanto, pode ser observado um comportamento levemente mais suave da seletividade do canal para o cenário 2 devido ao parâmetro aleatório de desvanecimento da potência e amplitude dos raios dentro do *cluster*, σ_r , possuir valor menor que no caso do cenário 1 (vide Tabela 4.5), fazendo com que a contribuição aleatória do canal nas amplitudes médias dos múltiplos percursos seja menos expressiva.

4.5 CONCLUSÕES

É possível observar significativa diferença entre os resultados dos ambientes definidos pelo modelo IEEE 802.15.3c. A parametrização dividida por ambientes do modelo mostrou-se essencial pois, de fato, as simulações mostraram que as características peculiares de cada ambiente são determinantes na avaliação do canal. Os pequenos atrasos de canal das configurações do ambiente residencial estão relacionados à distância máxima entre Tx e Rx em torno de 3 m, algo que não se repete para o ambiente escritório que possui um alcance de 5 m entre Tx e Rx. Além disso, deve ser considerada a natureza fortemente espalhadora de um ambiente residencial devido a mobília, o que

explica os baixos valores para as constantes de decaimento de potência dos *clusters* e múltiplos percursos, se comparados a ambientes de alcance ainda menor como, por exemplo, o alcance em torno de 1 m do ambiente kiosk. Além disso, destaca-se visualmente nos perfis de potência do atraso do ambiente área de trabalho (Figs. 4.60 e 4.62) uma quantidade menor de *clusters* devido ao número médio de *clusters* para esse tipo de ambiente ser o menor dentre os ambientes definidos pelo modelo. Isso acontece porque os nichos de trabalho são ambientes bastante compactos, sem tanta mobília quanto no ambiente residencial, por exemplo, ou no caso do kiosk, que está inserido no contexto de um lugar público com a presença de várias pessoas circulando, além de muitos pilares distribuídos pela estrutura, já que construções públicas possuem grande porte. Ainda, as figuras que ilustram a perspectiva dos atrasos em função dos ângulos de chegada dos múltiplos percursos também são muito diferentes entre si, já que, para cada configuração de antena utilizada, obtém-se um valor diferente de espalhamento angular. Por exemplo, os ângulos de chegada das configurações de antenas Tx: 60° e Rx: 15° e Tx: 15° e Rx: 15° do ambiente residencial (Figs. 4.9 e 4.11) estão muito mais espalhados em torno do ângulo médio de cada *cluster* do que o ambiente escritório sem linha de visada (NLOS) (Fig. 4.49), que possui um espalhamento angular de desvio padrão, por definição, consideravelmente menor do que os casos do ambiente escritório.

De acordo com as medições em [22], o espalhamento de atraso RMS para o ambiente residencial simulado neste trabalho para ficou consideravelmente próximo da realidade deste tipo de ambiente – aproximadamente 3 ns (Figs. 4.12 a 4.16) –, principalmente para as configurações de antenas Tx:30° e Rx:15° e Tx:15° e Rx:15°. No entanto, para o ambiente escritório, a simulação do modelo IEEE 802.15.3c apresentou um espalhamento de atraso RMS bem maior: aproximadamente 47 ns em média (Figs. 4.36 e 4.37) contra 11 ns da medição em [22].

Essa variação pode ter ocorrido devido a diferenças nas dimensões do ambiente utilizado na parametrização do modelo IEEE 802.15.3c e do ambiente na medição de [22]. Além disso, é válido ressaltar que para fins de validação, foi simulado um atraso máximo de canal elevado para o ambiente escritório neste trabalho, e também no caso de [22] somente foram consideradas 513 PDPs, enquanto neste trabalho foram consideradas 50.000.

As medições em [18] [23] também ajudam a corroborar que o atraso máximo em um canal em 60 GHz é normalmente menor do que o aplicado na maioria das simulações efetuadas aqui, gerando um eixo de atrasos entre 50 e 100 ns. A caracterização de ângulos de chegada das medições em [18] confirmam que a caracterização angular passa a ser um ponto de avaliação importante do canal. No entanto, não demonstram que estes tenham qualquer relação com o atraso ou com as amplitudes dos percursos, como também não é considerado no IEEE 802.15.3c. Quanto à distribuição de probabilidade que melhor descreva esses ângulos, não há em [18] quaisquer avaliação a esse respeito.

Para o ambiente kiosk, os valores simulados de perfis de potência do atraso (Figs. 4.76 e 4.77) estão condizentes com os valores medidos de [21] em termos dos valores médios das potências e de

seu decaimento quase linear em dB, pois é visível a presença de um componente de aleatório nas potências dos múltiplos percursos influenciando essa linearidade.

De fato, a modelagem de canal IEEE 802.15.3c é mais completa e mais adequada às medições na faixa de 60 GHz que o modelo de Saleh-Valenzuela. Além de oferecer a possibilidade de se modelar de um percurso LOS nos ambientes, e de dar suporte à caracterização angular, a parametrização do modelo foi feita para transmissões em pequenas dimensões, mais favorável a essa faixa de frequências.

No entanto, o IEEE 802.15.3c omite qualquer caracterização no domínio elevação ou de ângulos de partida. Por isso, este trabalho estendeu sua análise a mais um modelo, o IEEE 802.11ad, para verificar o impacto na modelagem do canal dessas caracterizações angulares extras.

5 MODELO IEEE 802.11.ad

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo trata do modelo de canal IEEE 802.11ad. Assim como o IEEE 802.15.3c, esse modelo é baseado no modelo de Saleh-Valenzuela aplicado à faixa de 60 GHz, entretanto, este modelo agrega alguns elementos adicionais à descrição do canal.

Semelhante ao IEEE 802.15.3c, o IEEE 802.11ad traz uma caracterização temporal e angular do canal, adicionando à caracterização angular o domínio elevação (no IEEE 802.15.3c essa caracterização se restringia ao domínio azumite). Além disso, o modelo aplica uma modelagem angular do canal considerando os pontos de vista tanto do transmissor quanto do receptor.

Outro ponto adicional forte desse modelo é a modelagem de interferência causada por artefatos presentes no ambiente tais como pessoas e computadores, expressa por uma probabilidade de bloqueio do *cluster*, algo que nem o de Saleh-Valenzuela nem o IEEE 802.15.3c fazem.

Assim como os Capítulos 3 e 4, este capítulo começa apresentando a base teórica do modelo, suas principais definições e equações.

Em seguida, descreve-se a metodologia utilizada na simulação desse modelo de canal, e apresentam-se os resultados extraídos dessas simulações. A partir desses resultados, faz-se uma análise da compatibilidade do modelo com as medições reais na faixa de 60 GHz.

5.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O IEEE 802.11ad [24] é um modelo semelhante ao IEEE 802.15.3c centrado na faixa de 60 GHz. O comitê de padronização deste modelo dedicou bastante esforço no estudo da natureza estatística do canal *indoor* nesta faixa de frequência, principalmente com o uso de ferramentas computacionais baseadas em *ray-tracing*.

O modelo de canal IEEE 802.11ad classifica os *clusters* de acordo com dois diferentes casos de uso: Estação-Estação (STA-STA) e Estação-Ponto de acesso (STA-AP). Os parâmetros padronizados pelo modelo derivam de medições experimentais em três ambientes: sala de conferência, cubículo e sala de estar, ilustrados pelas Figs. 5.1, 5.2 e 5.3, respectivamente. Para cada cenário são considerados percursos LOS e NLOS.

Na Fig. 5.1 identifica-se uma mesa larga de conferência e transmissor e receptor posicionados sobre ela, além da identificação de possíveis pontos de reflexão do sinal. Na Fig. 5.2 estão presentes oito configurações de cubículos delimitados por divisórias e mobiliados com material típico de escritório. Aqueles cubículos identificados em laranja foram os utilizados nas medições. Na Fig. 5.3,

tem-se uma típica sala de estar com sofá, poltronas, TV e algumas mesas. O receptor está posicionado na região da TV e o transmissor varia sua posição dentro da região rachurada em azul.

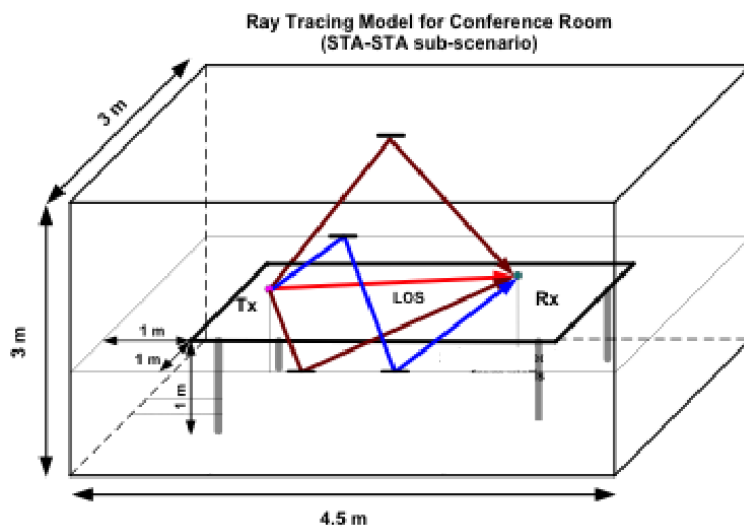


Fig. 5.1. Ambiente de propagação sala de conferência [24].



Fig. 5.2. Ambiente de propagação cubículo (os cubículos são as áreas destacadas em laranja) [24].

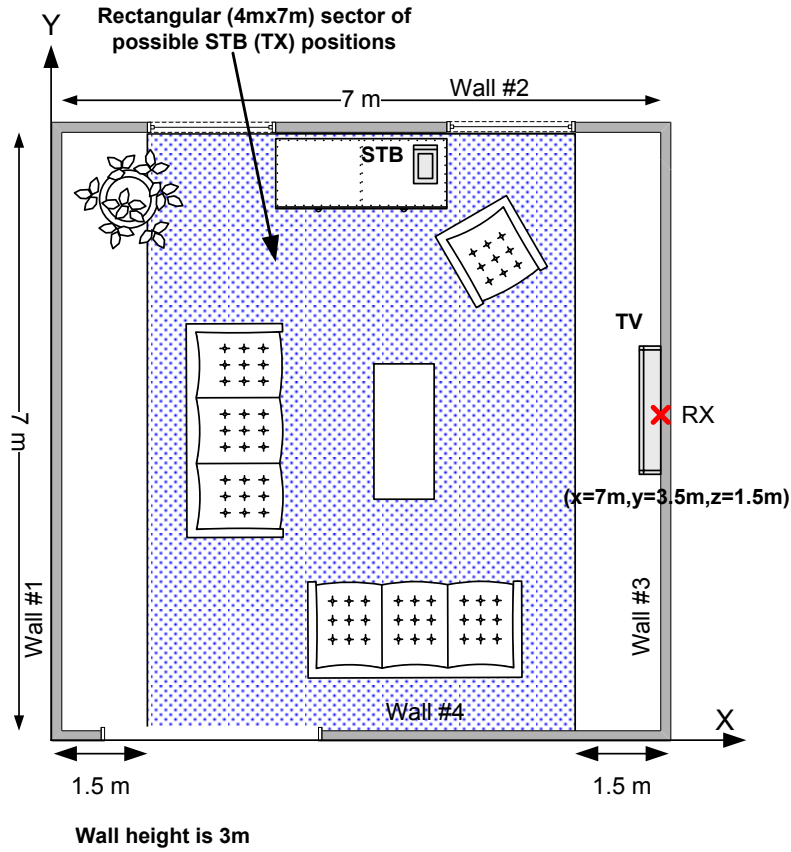


Fig. 5.3. Ambiente de propagação sala de estar [24].

Uma diferença fundamental do IEEE 802.11ad é que este oferece a possibilidade de se ter dois tipos de resposta impulsional, uma baseada no modelo de canal genérico e outra que leva em conta os efeitos de polarização na transmissão.

A resposta impulsional sem matriz de polarização é descrita como:

$$h(t, \phi_{tx}, \theta_{tx}, \phi_{rx}, \theta_{rx}) = \sum_i A^{(i)} C^{(i)}(t - T^{(i)}, \phi_{tx} - \Phi_{tx}^{(i)}, \theta_{tx} - \Theta_{tx}^{(i)}, \phi_{rx} - \Phi_{rx}^{(i)}, \theta_{rx} - \Theta_{rx}^{(i)}) \quad (5.1),$$

$$C^{(i)}(t, \phi_{tx}, \theta_{tx}, \phi_{rx}, \theta_{rx}) = \sum_k \alpha^{(i,k)} \delta(t - \tau^{(i,k)}) \delta(\phi_{tx} - \phi_{tx}^{(i,k)}) \delta(\theta_{tx} - \theta_{tx}^{(i,k)}) \delta(\phi_{rx} - \phi_{rx}^{(i,k)}) \delta(\theta_{rx} - \theta_{rx}^{(i,k)})$$

em que

- ❖ h é a resposta impulsional do canal;
- ❖ $t, \phi_{tx}, \theta_{tx}, \phi_{rx}, \theta_{rx}$ são tempo de chegada e ângulos azimute e elevação no transmissor e receptor, respectivamente.
- ❖ $A^{(i)}$ e $C^{(i)}$ são o ganho e a resposta impulsional do i -ésimo cluster, respectivamente.
- ❖ $T^{(i)}, \Phi_{tx}^{(i)}, \Theta_{tx}^{(i)}, \Phi_{rx}^{(i)}, \Theta_{rx}^{(i)}$ são as coordenadas temporais e angulares do i -ésimo cluster.
- ❖ $\alpha^{(i,k)}$ é a amplitude do k -ésimo raio (múltiplo percurso) dentro do i -ésimo cluster.

- ❖ $\tau^{(i,k)}$, $\varphi_{rx}^{(i,k)}$, $\theta_{rx}^{(i,k)}$, $\varphi_{rx}^{(i,k)}$, $\theta_{rx}^{(i,k)}$ são as coordenadas temporais e angulares do k -ésimo raio (múltiplo percurso) dentro do i -ésimo *cluster*.

Baseado em resultados experimentais e na análise teórica do modelo, características de polarização foram introduzidas na resposta impulsional do modelo a nível de *cluster*, assumindo que todos os raios que compreendem um *cluster* têm aproximadamente as mesmas características de polarização. No entanto, estender a estrutura do canal para dar suporte à polarização requer a troca dos coeficientes escalares de ganho dos *clusters* $A^{(i)}$ por matrizes 2x2 de polarização $\mathbf{H}^{(i)}$.

Portanto, a resposta impulsional do canal com suporte à polarização se torna:

$$\mathbf{h}(t, \varphi_{rx}, \theta_{rx}, \varphi_{rx}, \theta_{rx}) = \sum_i \mathbf{H}^{(i)} C^{(i)}(t - T^{(i)}, \varphi_{rx} - \Phi_{rx}^{(i)}, \theta_{rx} - \Theta_{rx}^{(i)}, \varphi_{rx} - \Phi_{rx}^{(i)}, \theta_{rx} - \Theta_{rx}^{(i)}) \quad (5.2).$$

Devido às propriedades do canal de propagação em 60 GHz, o impacto de características de polarização é significativo e substancialmente mais elevado do que para bandas WLAN abaixo de 6 GHz. A razão física para o alto impacto de características de polarização é que mesmo sinais NLOS (refletidos) permanecem fortemente polarizados (ou seja, o acoplamento entre modos de polarização ortogonais é baixo) e a discriminação de polarização cruzada (XPD – do inglês, *Cross-Polarization Discrimination*) é alta mesmo para sinais NLOS. Junto a isso, foi observado experimentalmente que uma incompatibilidade nas características de polarização das antenas de transmissão e recepção pode resultar em uma degradação de 10 a 20 dB [24].

Para o trajeto LOS, a matriz $\mathbf{H}^{(LOS)}$ pode ser aproximada por uma matriz identidade, e é multiplicada pelo coeficiente de ganho correspondente ao percurso LOS. A propagação por LOS não altera as características de polarização do sinal transmitido. No entanto, essas características são alteradas quando há reflexões (NLOS). A mudança nas características de polarização do sinal depois deste ter sofrido uma reflexão será definida pelo tipo de superfície e ângulo de incidência.

O modelo IEEE 802.11ad considera dois tipos de reflexão diferentes para seus múltiplos percursos: reflexão de primeira ordem e reflexão de segunda ordem. As reflexões de primeira ordem são aquelas nas quais os raios que saem do transmissor só refletem uma vez até chegar ao receptor. As de segunda ordem são aquelas nas quais os raios refletem duas vezes, ou seja, incidem em duas superfícies antes de chegar ao receptor. Além disso, estes dois tipos de reflexões ainda podem ser divididos em outros subtipos, dependendo de onde a reflexão acontece – reflexão pelo teto e/ou reflexão pela parede.

Logo, o cálculo da matriz de polarização dependerá do tipo de reflexão associada ao *cluster*. Se o *cluster* for composto de reflexões de segunda ordem, a matriz de polarização terá componentes de rotação e reflexão adicionais.

A matriz de polarização para reflexões de primeira ordem pode ser encontrada como um produto da matriz que rotaciona os componentes do vetor E (campo elétrico) do sistema de coordenadas

associado com a antena transmissora para o sistema de coordenadas associado com o plano incidente da reflexão. Em seguida, a matriz de reflexão, \mathbf{R} , com os coeficientes de reflexão e de acoplamento de polarização cruzada é aplicada, seguida de uma rotação para o sistema de coordenadas associado com a antena receptora [25]. A Fig. 5.4 e a Eq. (5.3) ilustram esse processo.

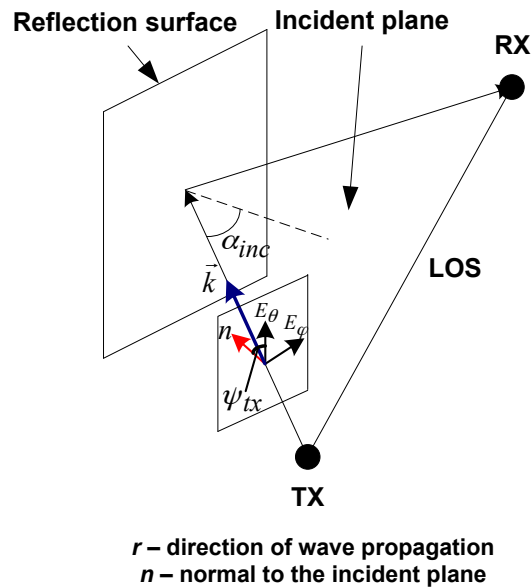


Figura 5.4. Processo de reflexão de primeira ordem [24].

$$\mathbf{H}_{ref1} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\psi_{rx}) & \sin(\psi_{rx}) \\ -\sin(\psi_{rx}) & \cos(\psi_{rx}) \end{bmatrix}}_{\substack{\text{cálculo} \\ \text{do vetor} \\ \text{de polarização} \\ \text{da base do plano incidente} \\ \text{para as coordenadas} \\ \text{de RX}}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} R_{\perp}(\alpha_{inc}) & \xi_1 \\ \xi_2 & R_{\parallel}(\alpha_{inc}) \end{bmatrix}}_{\substack{\text{matriz de} \\ \text{reflexão} \\ \mathbf{R}}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\psi_{tx}) & \sin(\psi_{tx}) \\ -\sin(\psi_{tx}) & \cos(\psi_{tx}) \end{bmatrix}}_{\substack{\text{cálculo} \\ \text{do vetor} \\ \text{de polarização} \\ \text{de TX} \\ \text{para a base do} \\ \text{plano incidente}}} \quad (5.3).$$

A matriz de reflexão \mathbf{R} inclui os coeficientes de reflexão R_{\perp} and R_{\parallel} para os componentes perpendiculares e paralelos do campo elétrico E_{\perp} and E_{\parallel} , respectivamente. Os elementos ξ_1 e ξ_2 são os coeficientes de acoplamento de polarização cruzada. O fator α_{inc} representa o ângulo de incidência na superfície de reflexão e os escalares ψ_{tx} e ψ_{rx} são a base de incidência para o vetor de polarização, relativo às coordenadas do transmissor e receptor, respectivamente [25].

Para reflexões de segunda ordem, a Eq. (5.3) é alterada para:

$$\mathbf{H}_{ref2} = \begin{bmatrix} \cos(\psi_{rx}) & \sin(\psi_{rx}) \\ -\sin(\psi_{rx}) & \cos(\psi_{rx}) \end{bmatrix} \times \underbrace{\begin{bmatrix} R_{\perp}(\alpha_{2inc}) & \xi_1 \\ \xi_2 & R_{\parallel}(\alpha_{2inc}) \end{bmatrix}}_{\substack{2a \text{ reflexão}}} \times \\ \times \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\psi_p) & \sin(\psi_p) \\ -\sin(\psi_p) & \cos(\psi_p) \end{bmatrix}}_{\substack{1a \text{ reflexão}}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} R_{\perp}(\alpha_{1inc}) & \xi_1 \\ \xi_2 & R_{\parallel}(\alpha_{1inc}) \end{bmatrix}}_{\substack{1a \text{ reflexão}}} \times \begin{bmatrix} \cos(\psi_{tx}) & \sin(\psi_{tx}) \\ -\sin(\psi_{tx}) & \cos(\psi_{tx}) \end{bmatrix} \quad (5.4).$$

Neste caso, α_{1inc} e α_{2inc} são os ângulos de incidência para a primeira e segunda reflexões, respectivamente. O escalar ψ_p denota o ângulo de rotação entre o primeiro e o segundo plano de incidência. A existência de duas matrizes de reflexão \mathbf{R} é baseada no fato de que a polarização muda com respeito à reflexão, que depende do ângulo de incidência e da rugosidade da superfície [25].

As matrizes de reflexão, escalares e ângulos de incidência necessárias ao cálculo da matriz de polarização foram determinadas estatisticamente e por *ray-tracing* para cada tipo de *cluster* em cada tipo de ambiente padronizado pelo modelo. Essa descrição pode ser encontrada em [24].

O modelo de canal IEEE 802.11ad, assim como o IEEE 802.15.3c, também modela uma componente LOS separado da modelagem em *clusters*. No entanto, o IEEE 802.11ad calcula o ganho do percurso LOS de maneira muito mais simples, de acordo com o modelo de propagação de Friis:

$$\beta_{LOS}[dB] = G_{tx} + G_{rx} + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (5.5)$$

Na Eq. (5.5), G_{tx} , G_{rx} , λ e d representam o ganho das antenas transmissora e receptora, o comprimento de onda de operação e a distância transmissor-receptor ao longo do percurso LOS, respectivamente.

Assume-se que o tempo de chegada, ângulos azimute no transmissor e no receptor e ângulos elevação no transmissor e no receptor são nulos para o percurso LOS.

Além disso, no IEEE 802.11ad cada *cluster* pode possuir um fator de ganho $A^{(i)}$ definido por:

$$A^{(i)}[dB] = 20 \log_{10} \left(\frac{g_i \lambda}{4\pi(d+R)} \right) \quad (5.6)$$

Na Eq. (5.6), g_i é a perda por reflexão e R representa a distância total ao longo do caminho do cluster subtraída de d , ou seja, um produto do tempo de chegada do cluster subtraído do tempo de chegada do percurso LOS pela velocidade da luz. Note-se ainda que g_i é modelado por uma distribuição log-normal de valor médio -10 dB e valor RMS 4 dB, no caso de reflexões de primeira ordem e, de valor médio -16 dB e valor RMS 5 dB, no caso de reflexões de segunda ordem [24].

Já foi dito que os *clusters* são compostos de reflexões de primeira ou segunda ordem. No entanto, existe ainda uma classificação adicional dos *clusters* que depende da natureza da reflexão. Nesse sentido, as reflexões podem ser pelo teto, pela parede, pelo chão ou pela combinação de dois desses (para o caso de *clusters* de reflexões de segunda ordem). Dessa forma, a classificação dos *clusters* se subdividirá em *clusters* de reflexão de primeira/segunda ordem pelo teto/chão/parede.

O modelo define um número fixo de cada um desses *clusters* para cada cenário. A Fig. 5.5 ilustra os tipos de *cluster* e a Tabela 5.1 mostra a quantidade de cada um desses tipos para o ambiente “sala de estar”. Esses parâmetros estão definidos para todos os cenários em [24].

Tabela 5.2. Distribuições empíricas dos tempos de chegada dos *clusters* para o ambiente sala de conferência. Adaptado de [25].

Ambiente e cenário	Descrição	PDF dos tempos de chegada inter-cluster
Sala de conferência STA-STA	Reflexões de 1a. ordem pela parede	$W_i(t) = \begin{cases} 0, & t < 4 \\ 0.0577 \cdot t - 0.2307, & 4 \leq t < 7 \\ -0.0307 \cdot t + 0.3882, & 7 \leq t < 11 \\ -0.0042 \cdot t + 0.0958, & 11 \leq t < 23 \\ 0, & t \geq 23 \end{cases}$
	Reflexões de 2a. ordem pelas paredes	$W_i(t) = \begin{cases} 0, & t < 10 \\ 0.08, & 10 \leq t < 20 \\ 0.02, & 20 \leq t < 30 \\ 0, & t \geq 30 \end{cases}$
	Reflexões de 1a. ordem pelo tetp	$W_i(t) = \begin{cases} 0, & t < 7 \\ 0.0677 \cdot t - 0.4741, & 7 \leq t < 11 \\ -0.0797 \cdot t + 1.1473, & 11 \leq t < 14.4 \\ 0, & t \geq 14.4 \end{cases}$
	Reflexões de 2a. ordem pelas paredes e teto	$W_i(t) = \begin{cases} 0, & t < 10.5 \\ 0.0551 \cdot t - 0.5790, & 10.5 \leq t < 14 \\ -0.0358 \cdot t + 0.6935, & 14 \leq t < 18 \\ -0.0071 \cdot t + 0.1786, & 18 \leq t < 25 \\ 0, & t \geq 25 \end{cases}$
Sala de conferência STA-AP	Reflexões de 1a. ordem pela parede	$W_i(t) = \begin{cases} 0, & t < 1 \\ 0.0977 \cdot t - 0.0983, & 1 \leq t < 3 \\ -0.0133 \cdot t + 0.2370, & 3 \leq t < 5 \\ -0.0760 \cdot t + 0.5507, & 5 \leq t < 7 \\ 0.0003 \cdot t + 0.0162, & 7 \leq t < 18 \\ -0.0110 \cdot t + 0.2237, & 18 \leq t < 20 \\ 0, & t \geq 20 \end{cases}$
	Reflexões de 2a. ordem pelas paredes	$W_i(t) = \begin{cases} 0, & t < 4 \\ 0.0535 \cdot t - 0.2170, & 4 \leq t < 6 \\ -0.0527 \cdot t + 0.4247, & 6 \leq t < 8 \\ 0.0194 \cdot t - 0.1520, & 8 \leq t < 13 \\ -0.0225 \cdot t + 0.3921, & 13 \leq t < 16 \\ 0.0003 \cdot t + 0.0271, & 16 \leq t < 20 \\ -0.0113 \cdot t + 0.2600, & 20 \leq t < 23 \\ 0, & 23 \leq t < 25 \\ 0.0200 \cdot t - 0.5005, & 25 \leq t < 28 \\ -0.0300 \cdot t + 0.9009, & 28 \leq t < 30 \\ 0, & t \geq 30 \end{cases}$

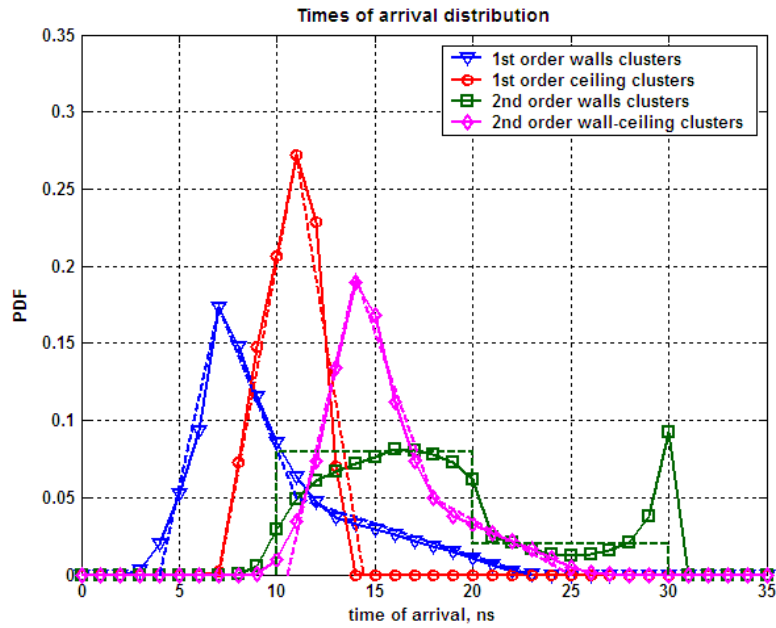


Figura 5.6. Distribuições empíricas dos tempos de chegada dos *clusters* obtidas por *ray-tracing* (linhas sólidas) e aproximações utilizadas no modelo (linhas tracejadas) para o ambiente sala de conferência [24].

No IEEE 802.15.3c, os *clusters* são caracterizados de quatro formas no domínio angular: ângulos azimute do transmissor e do receptor e ângulos elevação do transmissor e do receptor. A geração desses ângulos é também definida empiricamente, e varia de ambiente pra ambiente e para cada tipo de *cluster*. As propriedades envolvidas na geração dos parâmetros angulares do modelo estão descritas em [24].

Os parâmetros intra-*cluster* do modelo de canal foram estimados a partir das medições. Os raios individuais dentro de um *cluster* foram identificadas no domínio do tempo, e as características estatísticas, incluindo número médio, taxa de chegada e tempo de decaimento de energia dos raios foram medidos. A estrutura do modelo é esquematizada na Fig. 5.7.

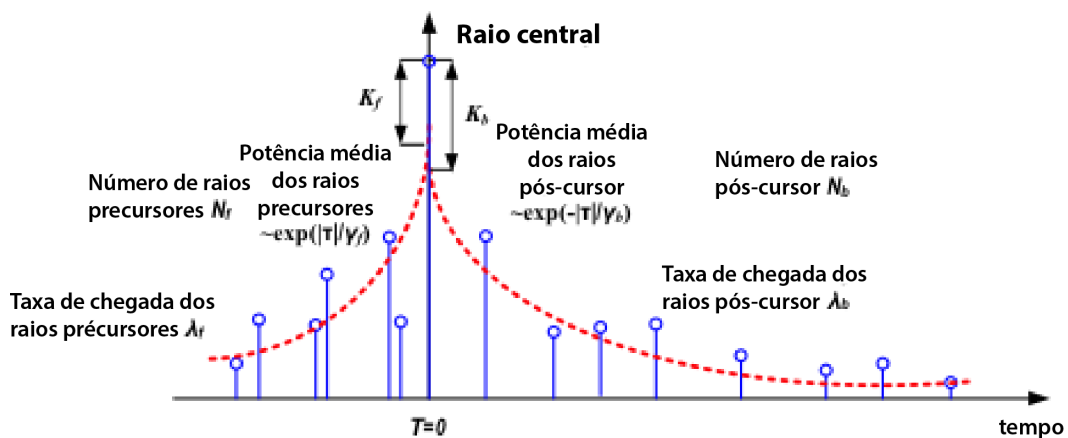


Figura 5.7. Estrutura do *cluster* no domínio do tempo. Adaptado de [24].

Na definição do modelo, três tipos de raios são especificados em um *cluster*, denominados:

- ❖ raio central (cursor), de amplitude fixa $\alpha^{(i,0)}$;
- ❖ raios precursoros, de amplitudes $\alpha^{(i,-N_f)} \dots \alpha^{(i,-1)}$, que são aqueles que precedem o raio principal (cursor);
- ❖ raios pós-cursoros, de amplitudes $\alpha^{(i,1)} \dots \alpha^{(i,N_b)}$, que são aqueles que sucedem o raio principal (cursor);

O número de raios precursoros N_f e pós-cursoros N_b são derivados das medições e fixos em 6 e 4, respectivamente, conforme Tabelas 5.3 e 5.4.

A chegada dos raios precursoros e pós-cursoros são modelados estatisticamente por processos de Poisson independentes de taxas λ_f e λ_b , respectivamente. Os valores das taxas de chegada dos raios estão definidos para os três ambientes nas Tabelas 5.3 e 5.4.

As amplitudes médias A_f e A_b dos raios precursoros e pós-cursoros decaem exponencialmente com um tempo de decaimento de potência de γ_f and γ_b , respectivamente:

$$\begin{aligned} A_f(\tau) &= A_f(0)e^{-\tau/\gamma_f} \\ A_b(\tau) &= A_b(0)e^{-\tau/\gamma_b} \end{aligned} \quad (5.7).$$

Os valores das constantes de decaimento de potência dos raios precursoros e pós-cursoros estão definidos para os três ambientes nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Os raios precursoros e pós-cursoros possuem fase uniformemente distribuída e amplitudes $\alpha^{(i,k)}$ que seguem uma distribuição de Rayleigh com valores médios A_f e A_b , respectivamente, definidos nas Tabelas 5.3 e 5.4 para os três ambientes.

As amplitudes médias dos raios precursoros e pós-cursoros se relacionam com a amplitude do raio central do *cluster* $\alpha^{(i,0)}$ por fatores K expressos por:

$$\begin{aligned} K_f &= 20 \log_{10} \left| \frac{\alpha^{(i,0)}}{A_f(0)} \right| \\ K_b &= 20 \log_{10} \left| \frac{\alpha^{(i,0)}}{A_b(0)} \right| \end{aligned} \quad (5.8).$$

Os fatores K são fixos e iguais a $K_f = 10$ dB e $K_b = 14.2$ dB, para os ambientes cubículo e sala de conferência; e iguais a $K_f = 11.5$ dB e $K_b = 10.9$ dB para o ambiente sala de estar.

Os parâmetros angulares intra-*cluster* – ângulos azimute e elevação dos raios no transmissor e no receptor— seguem o modelo mais simples. São modelados como variáveis aleatórias de distribuição normal com média 0 e RMS de 5° para ambientes os cubículo e sala de conferência; e média 0 e RMS de 10° para o ambiente sala de estar.

Tabela 5.3. Parâmetros intra-*cluster* do modelo IEEE 802.11ad para ambientes cubículo e sala de conferência [24].

Parâmetro	Notação	Valor
Fator-k dos raios precursores	K_f	5 dB
Tempo de decaimento de potência dos raios precursores	γ_f	3.7 ns
Taxa de chegada dos raios precursores	λ_f	0.37 ns^{-1}
Distribuição de amplitude dos raios precursores		Rayleigh
Número de raios precursores	N_f	6
Fator-k dos raios pós-cursor	K_b	10 dB
Tempo de decaimento de potência dos raios pós-cursor	γ_b	4.5 ns
Taxa de chegada dos raios pós-cursor	λ_b	0.31 ns^{-1}
Distribuição de amplitude dos raios pós-cursor		Rayleigh
Número de raios pós-cursor	N_b	8

Tabela 5.4. Parâmetros intra-*cluster* do modelo IEEE 802.11ad para ambientes sala de estar [24].

Parâmetro	Notação	Valor
Fator-k dos raios precursores	K_f	11.5 dB
Tempo de decaimento de potência dos raios precursores	γ_f	1.25 ns
Taxa de chegada dos raios precursores	λ_f	0.28 ns^{-1}
Distribuição de amplitude dos raios precursores		Rayleigh
Número de raios precursores	N_f	6
Fator-k dos raios pós-cursor	K_b	10.9 dB
Tempo de decaimento de potência dos raios pós-cursor	γ_b	8.7 ns
Taxa de chegada dos raios pós-cursor	λ_b	1.0 ns^{-1}
Distribuição de amplitude dos raios pós-cursor		Rayleigh
Número de raios pós-cursor	N_b	8

5.3 METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Diferentemente do modelo de Saleh-Valenzuela e do modelo IEEE 802.15.3c, o IEEE 802.11ad não foi implementado neste projeto. No entanto, como existe uma versão do modelo desenvolvida para Matlab® pelo próprio grupo de trabalho que padronizou o modelo [26], foram efetuadas algumas simulações nesse modelo pronto afim de possuir dados para comparação.

O código em Matlab® do modelo segue a estrutura apresentada na Fig. 5.8.

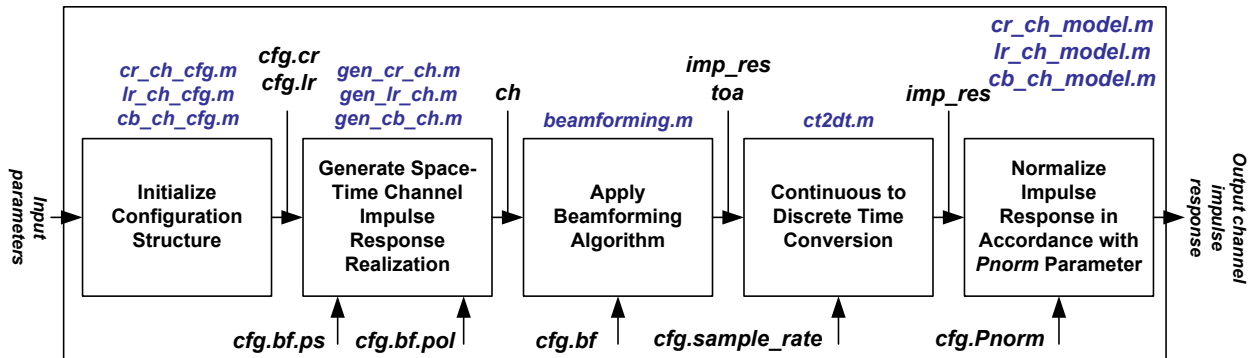


Figura 5.8. Estrutura geral de simulação do modelo IEEE 802.11ad [26].

Como pode ser observado na Fig. 5.8, as funções principais dos modelos de canal da sala de conferências, sala de estar e cubículo são `cr_ch_model.m`, `lr_ch_model.m` e `cb_ch_model.m` respectivamente. Cada uma dessas funções chama, posteriormente, a função de inicialização dos parâmetros de entrada `cr_ch_cfg.m` (`lr_ch_cfg.m`, `cb_ch_cfg.m`), a função de geração de resposta impulsional do canal `gen_cr_ch.m` (`gen_lr_ch.m`, `gen_cb_ch.m`), a função de implementação do algoritmo de *beamforming* `beamforming.m`, e uma sub-rotina simples que implementa a conversão de tempo contínuo para tempo discreto da resposta impulsional do canal.

O diagrama acima ilustra a ordem em que as funções do software são executadas durante a chamada das funções principais (`cr_ch_model.m`, `lr_ch_model.m` e `cb_ch_model.m`). A primeira função nessa sequência é a função de configuração, na qual todos os parâmetros de entrada do modelo de canal são definidos. Em seguida, são chamadas as funções `gen_cr_ch.m`, `gen_lr_ch.m`, e `gen_cb_ch.m`, que implementam a geração da resposta impulsional espaço-temporal para os ambientes propostos pelo modelo, incluindo características angulares, temporais, de amplitude e fase.

Buscando manter o mesmo nível de comparativo entre os dados, as simulações efetuadas para uso nessa monografia se concentraram só até o passo 2 da Fig. 5.8. Não foi aplicada à resposta impulsional do canal algoritmos de *beamforming*, nem conversão para tempo discreto nem normalização.

Os resultados obtidos das simulações são apresentados na seção a seguir.

5.4 RESULTADOS

Os resultados apresentados aqui representam uma realização de canal escolhida aleatoriamente. A análise dos resultados foi dividida por ambiente. Ainda, para cada ambiente, os gráficos foram organizados em subseções, conforme a estrutura do capítulo anterior, afim facilitar o entendimento e apresentar os dados de forma mais organizada.

5.4.1 Sala de conferência (LOS)

O ambiente sala de conferência é caracterizado segundo a Fig. 5.1.

5.4.1.1 Resposta impulsional do canal

As figuras a seguir apresentam as amplitudes e fases da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad para os casos de transmissão Estação-Estação (STA-STA) e Estação-Ponto de Acesso (STA-AP) com percurso LOS. Além disso, trazem também a perspectiva no domínio atraso-angular, caracterizando os atrasos em função dos ângulos no transmissor e no receptor tanto no domínio azimute, como no domínio elevação.

As fases estão representadas no intervalo de $-\pi$ a π .

❖ Caso Estação-Estação (STA-STA)

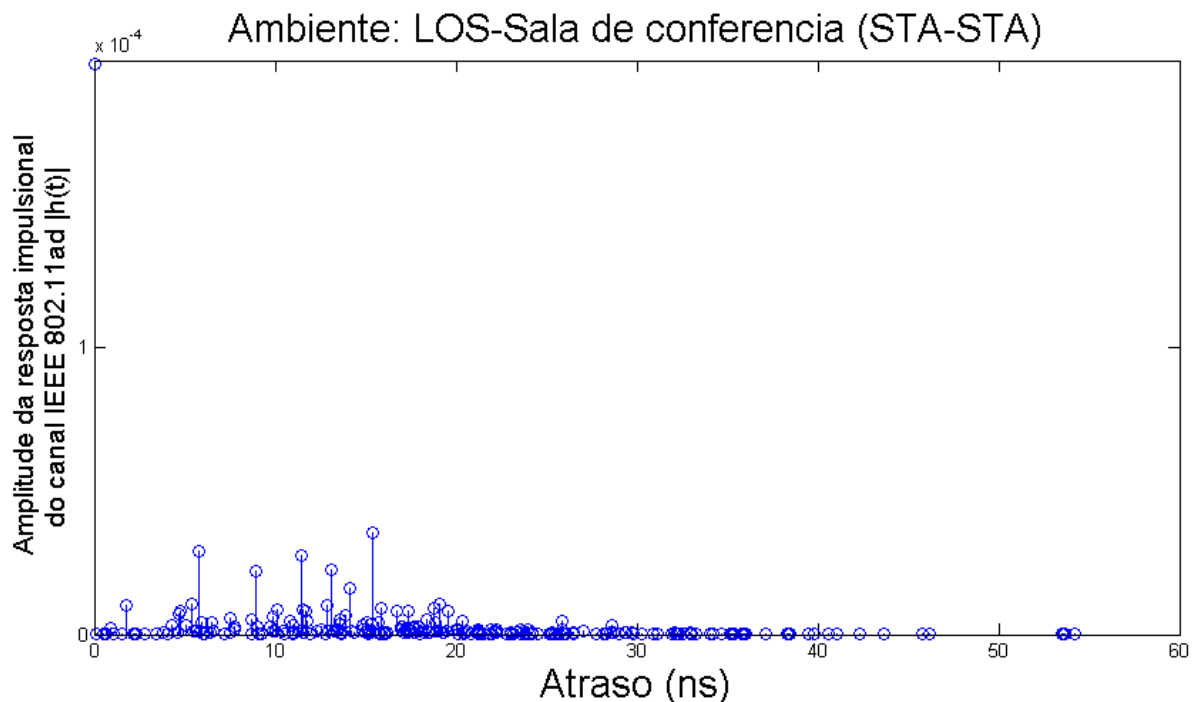


Figura 5.9. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (LOS), STA-STA.

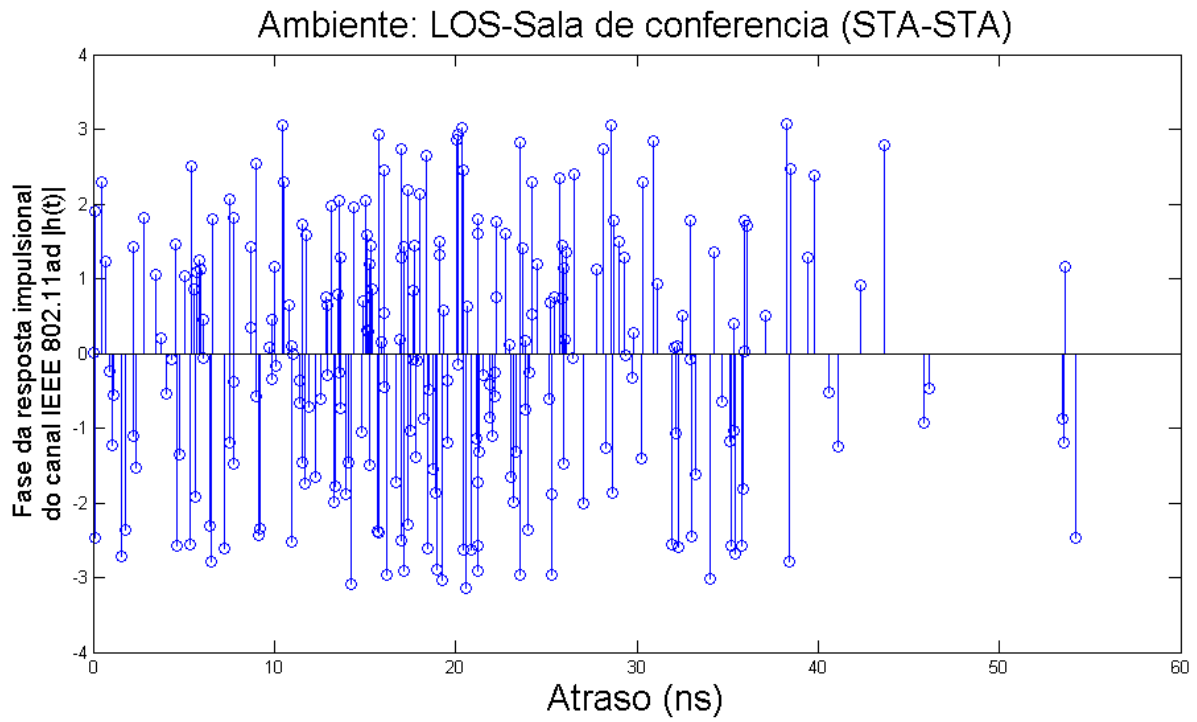


Figura 5.10. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (LOS), STA-STA.

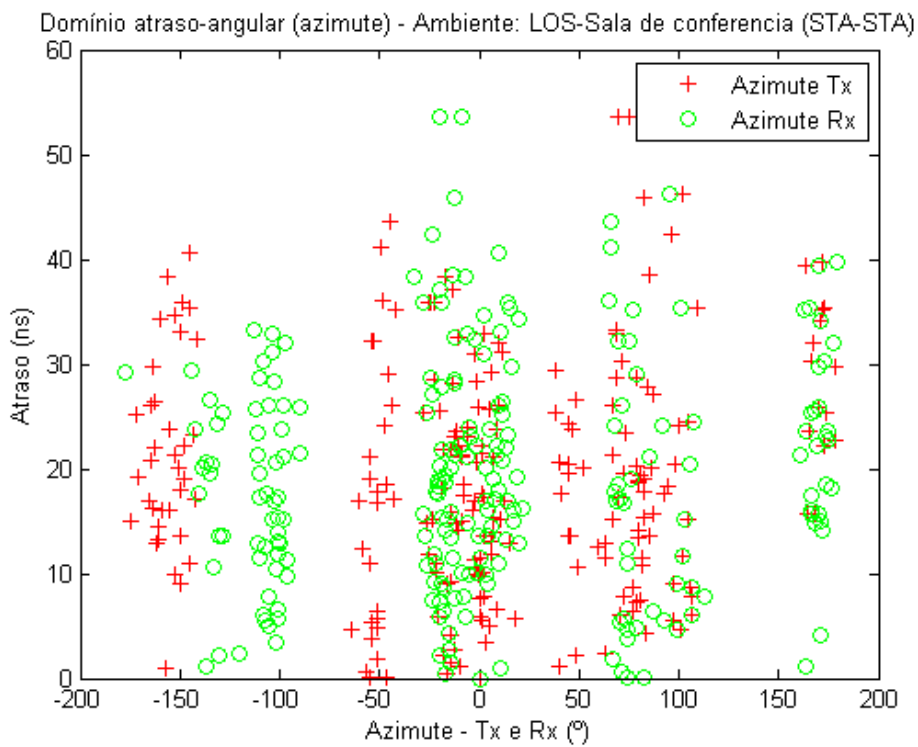


Figura 5.11. Perspectiva Atrasos x Azimute no Tx e Rx. Ambiente Sala de conferência (LOS), STA-STA.

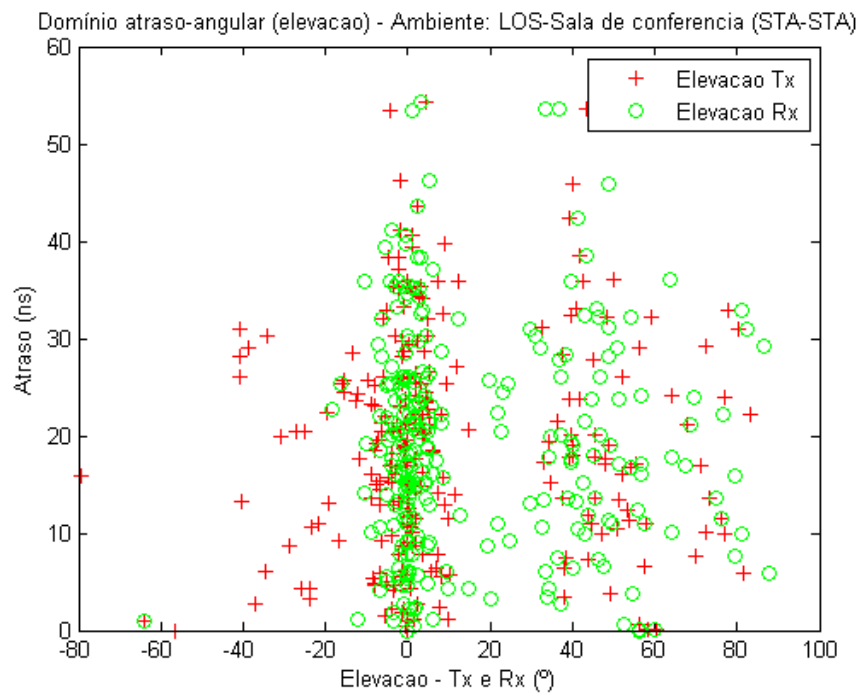


Figura 5.12. Perspectiva Atrasos x Elevação no Tx e Rx. Ambiente Sala de conferência (LOS), STA-STA.

❖ Caso Estação-Ponto de Acesso (STA-AP)

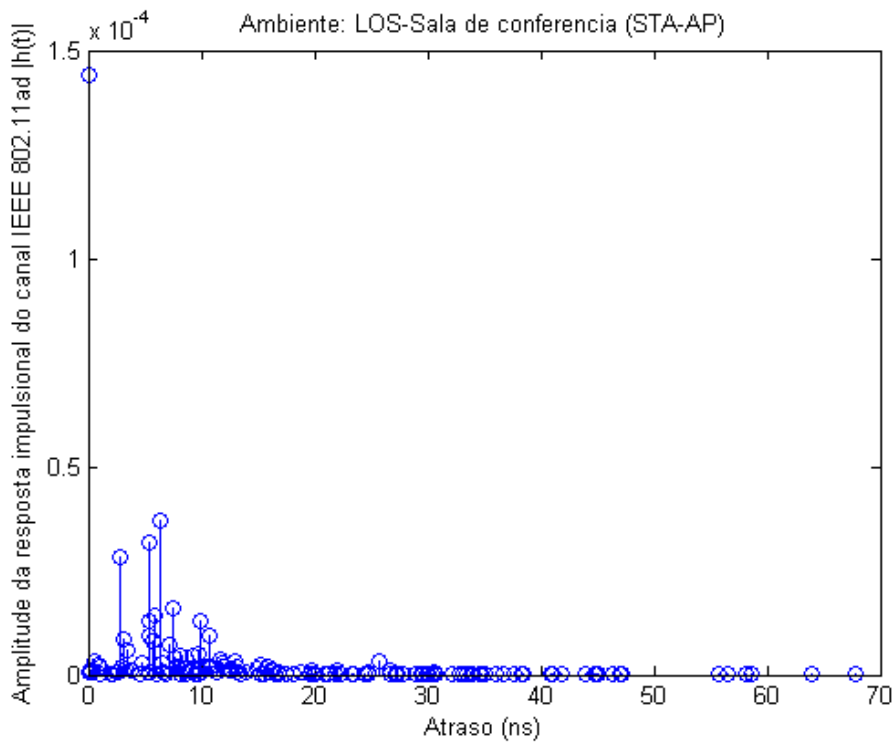


Figura 5.13. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (LOS), STA-AP.

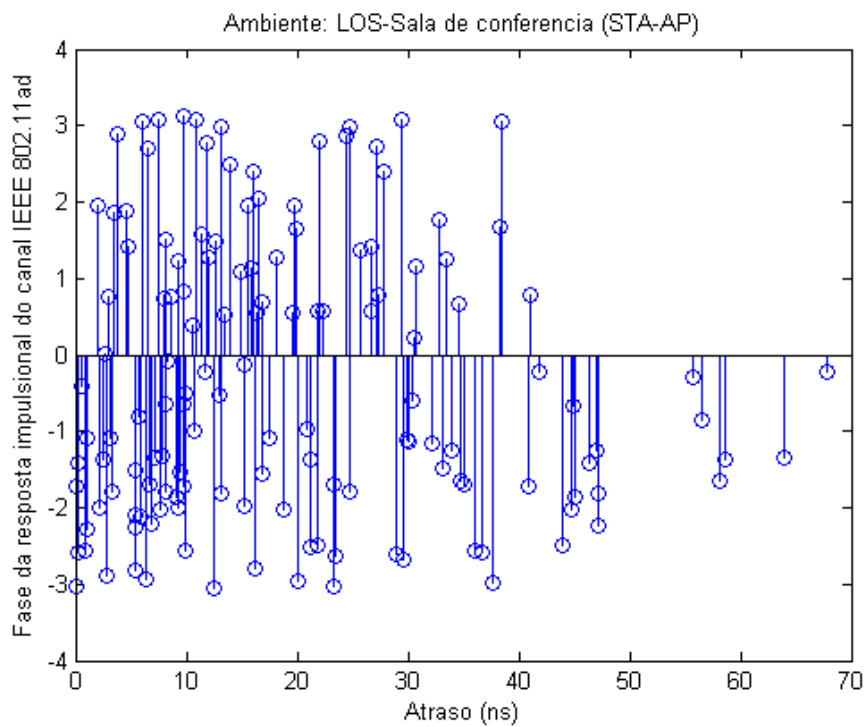


Figura 5.14. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (LOS), STA-AP.

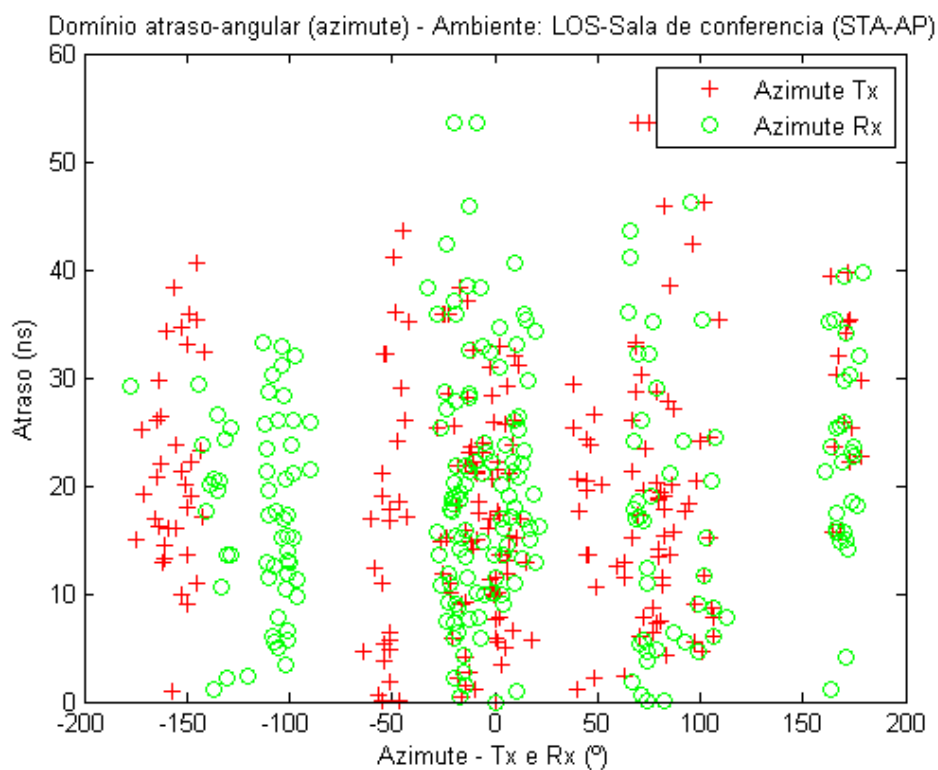


Figura 5.15. Perspectiva Atrasos x Azimute no Tx e Rx. Ambiente Sala de conferência (LOS), STA-AP.

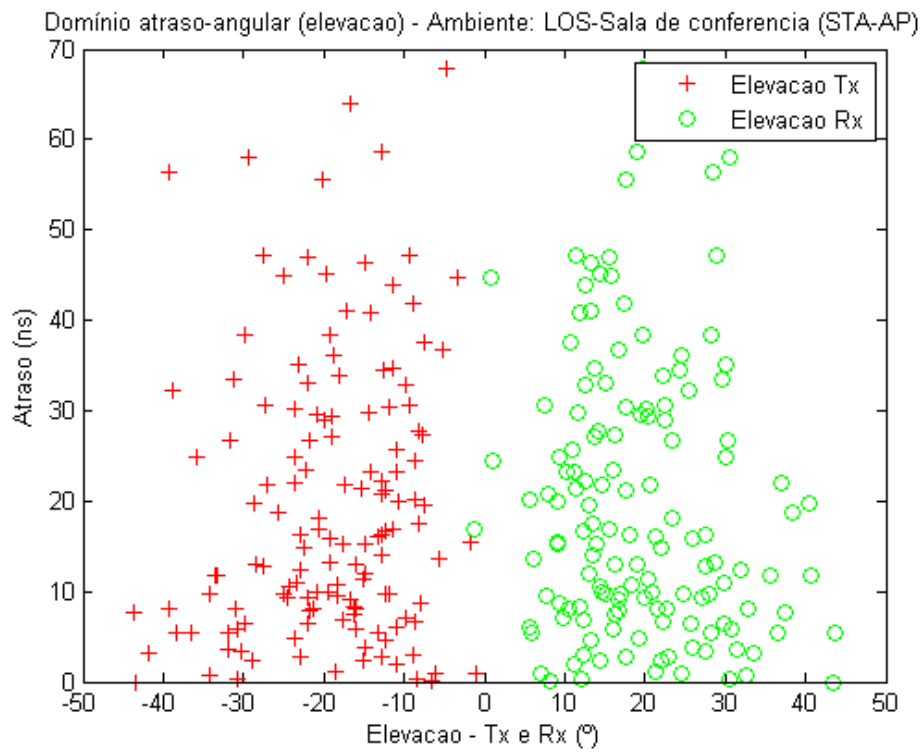


Figura 5.16. Perspectiva Atrasos x Elevação no Tx e Rx. Ambiente Sala de conferência (LOS), STA-AP.

5.4.1.2 Resposta em frequência

As figuras a seguir apresentam as respostas em frequência do canal IEEE 802.11ad para as duas configurações com componente LOS do ambiente sala de conferência: Estação-Estação (STA-STA) e Estação-Ponto de acesso (STA-AP).

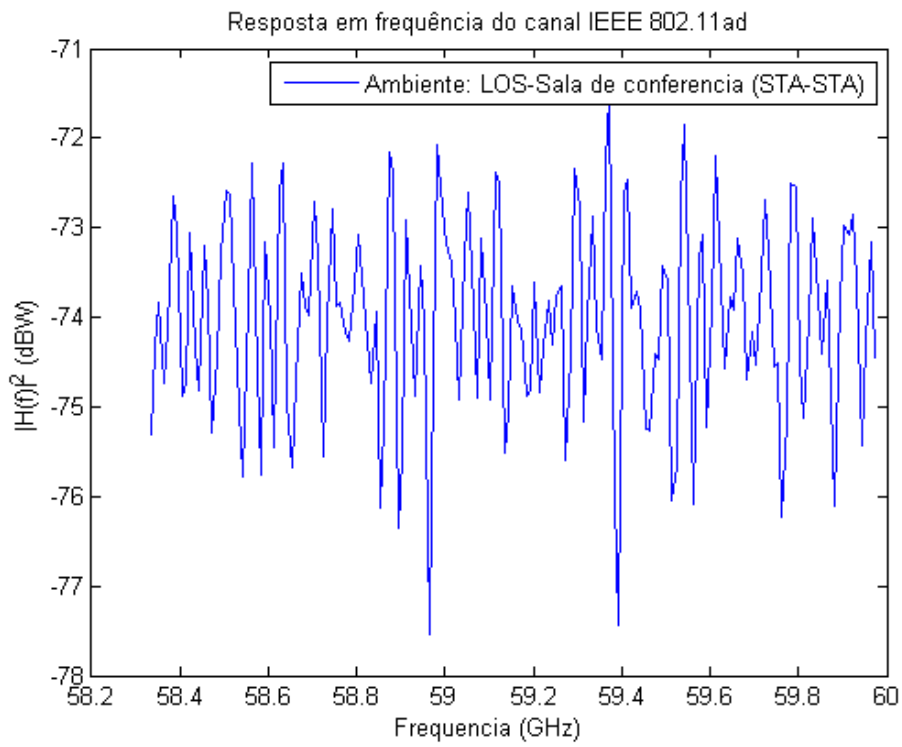


Fig.5.17. Resposta em frequência do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (LOS), STA-STA.

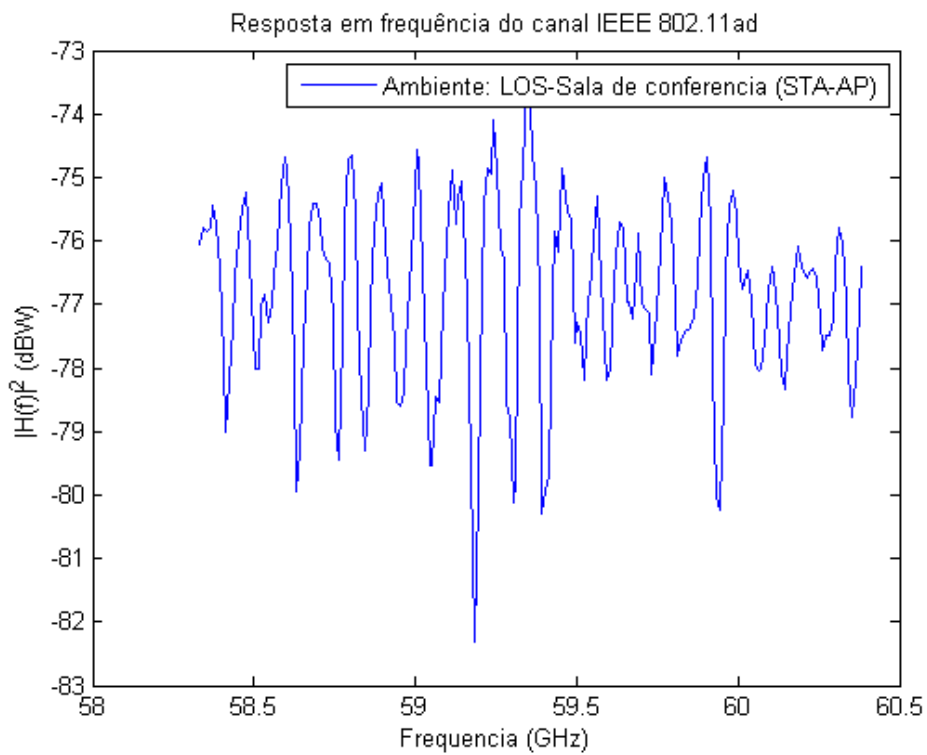


Fig.5.18. Resposta em frequência do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (LOS), STA-AP.

5.4.2 Sala de conferência (NLOS)

O ambiente sala de conferência é caracterizado segundo a Fig. 5.1.

5.4.2.1 Resposta impulsional do canal

As figuras a seguir apresentam as amplitudes e fases da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad para os casos de transmissão Estação-Estação (STA-STA) e Estação-Ponto de Acesso (STA-AP) sem componente LOS. Além disso, trazem também a perspectiva no domínio atraso-angular, caracterizando os atrasos em função dos ângulos no transmissor e no receptor tanto no domínio azimute, como no domínio elevação.

As fases estão representadas no intervalo de $-\pi$ a π .

❖ Caso Estação-Estação (STA-STA)

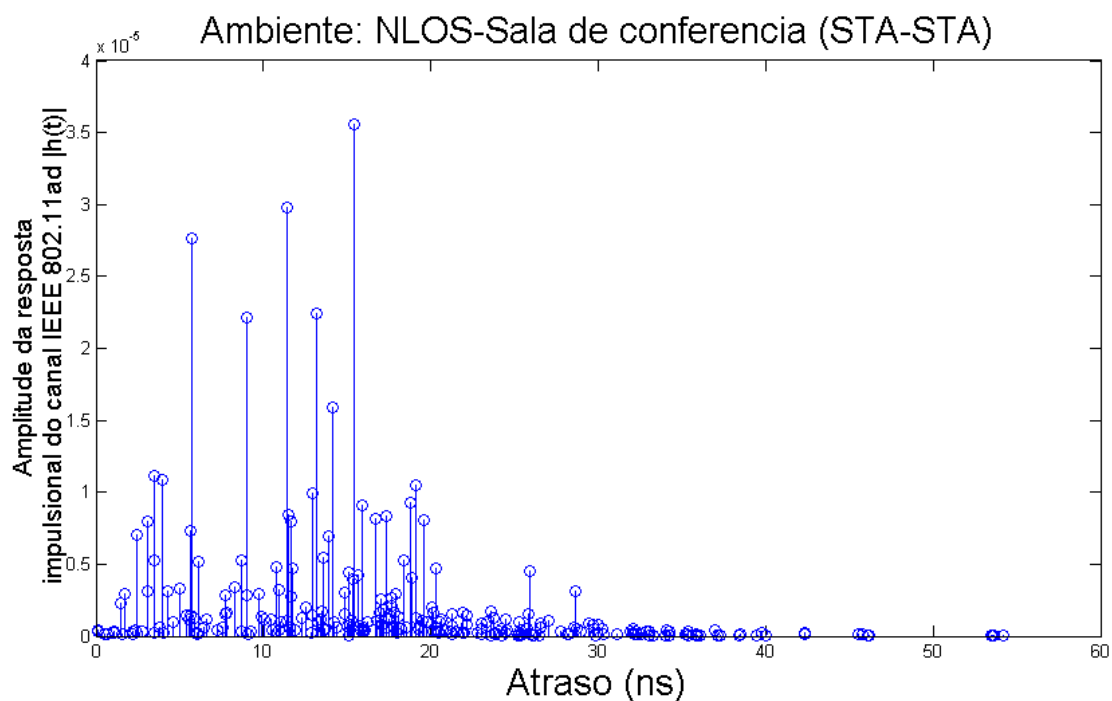


Figura 5.19. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (NLOS), STA-STA.

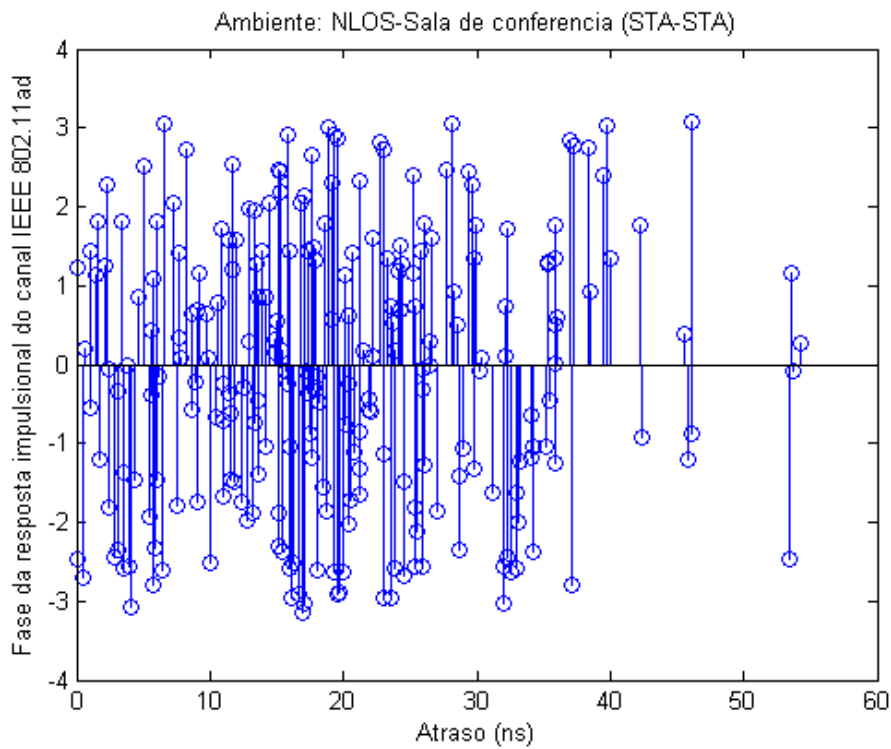


Figura 5.20. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (NLOS), STA-STA.

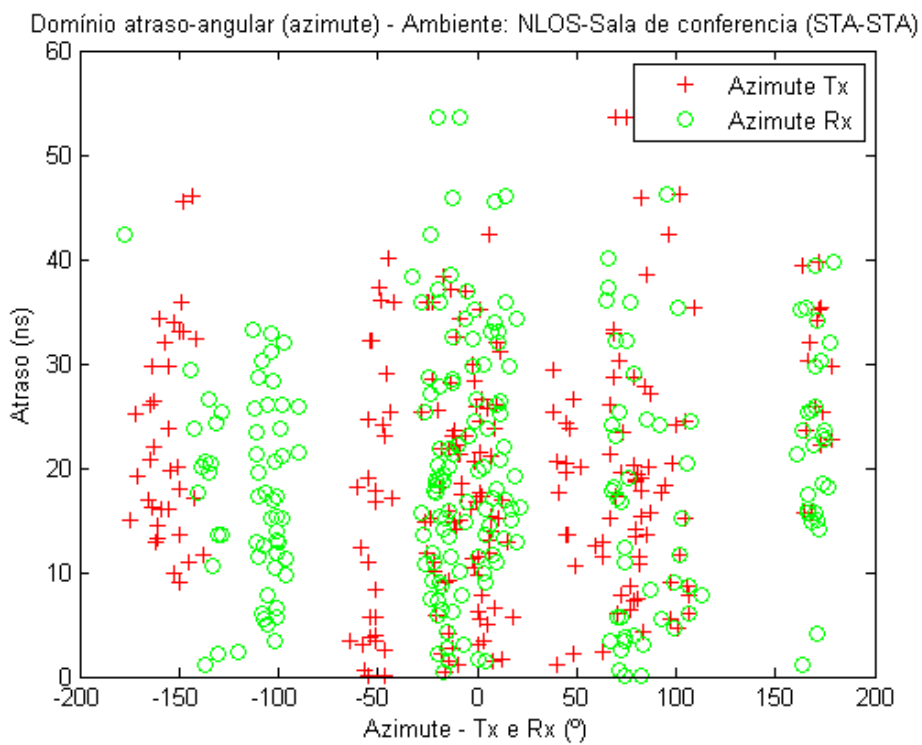


Figura 5.21. Perspectiva Atrasos x Azimute no Tx e Rx. Ambiente Sala de conferência (NLOS), STA-STA.

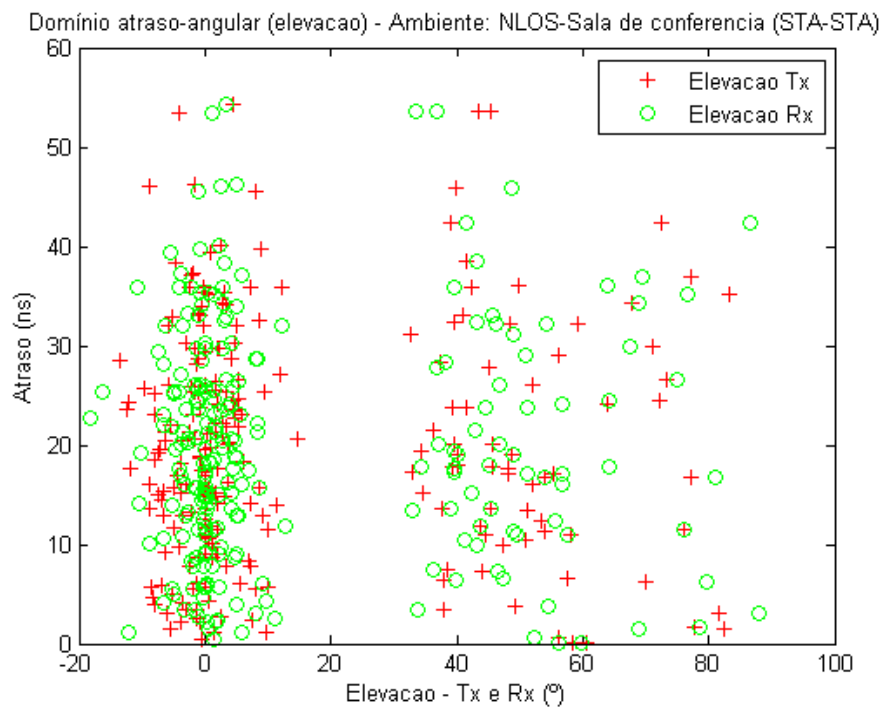


Figura 5.22. Perspectiva Atrasos x Elevação no Tx e Rx. Ambiente Sala de conferência (NLOS), STA-STA.

❖ Caso Estação-Ponto de Acesso (STA-AP)

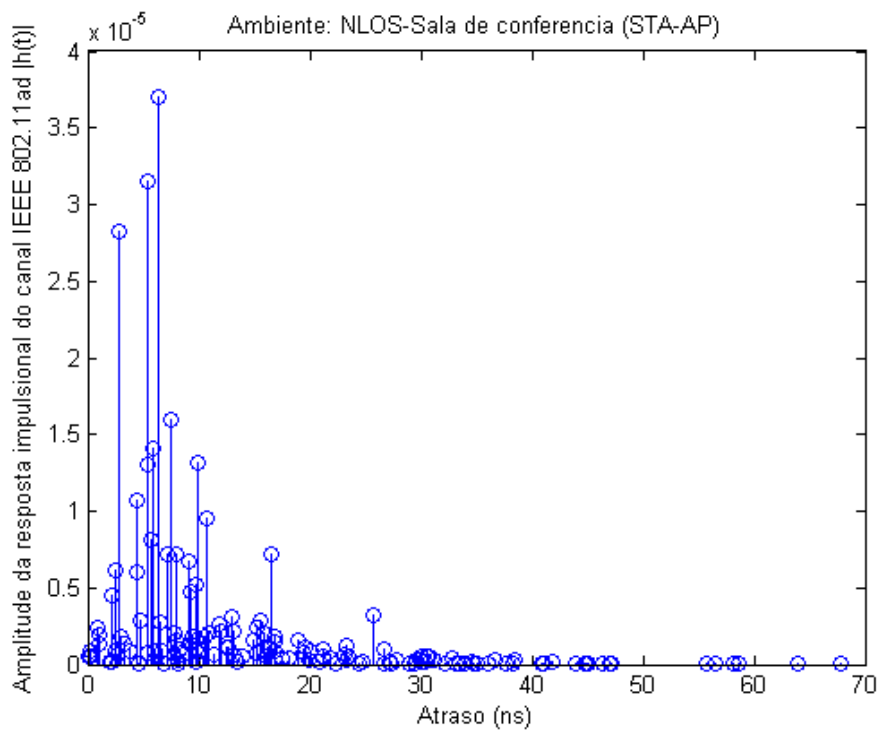


Figura 5.23. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (NLOS), STA-AP.

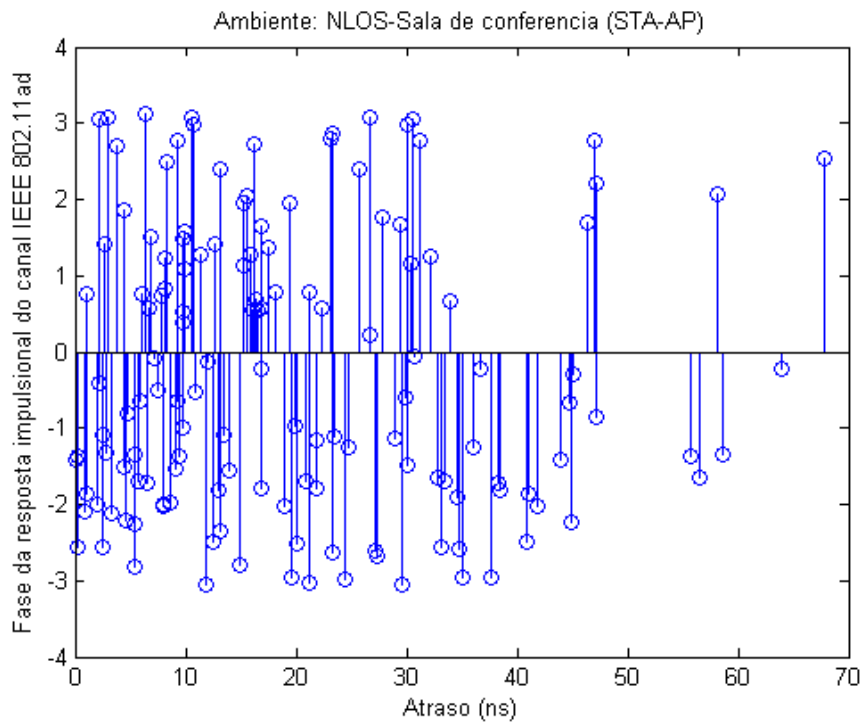


Figura 5.24. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (NLOS), STA-AP.

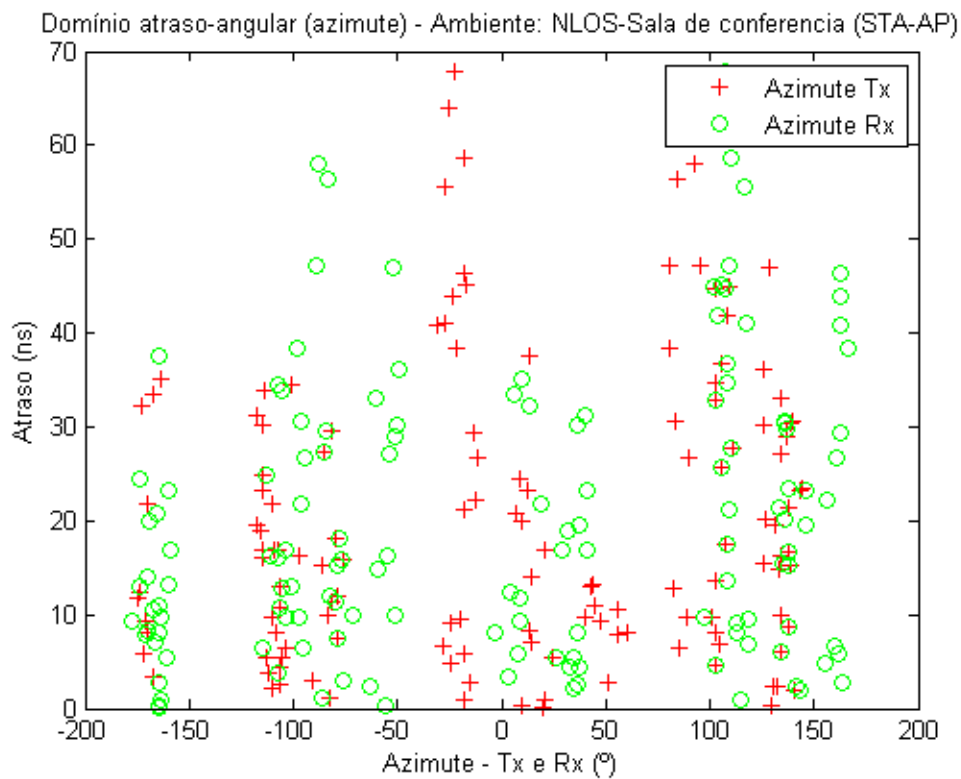


Figura 5.25. Perspectiva Atrasos x Azimute no Tx e Rx. Ambiente Sala de conferência (NLOS), STA-AP.

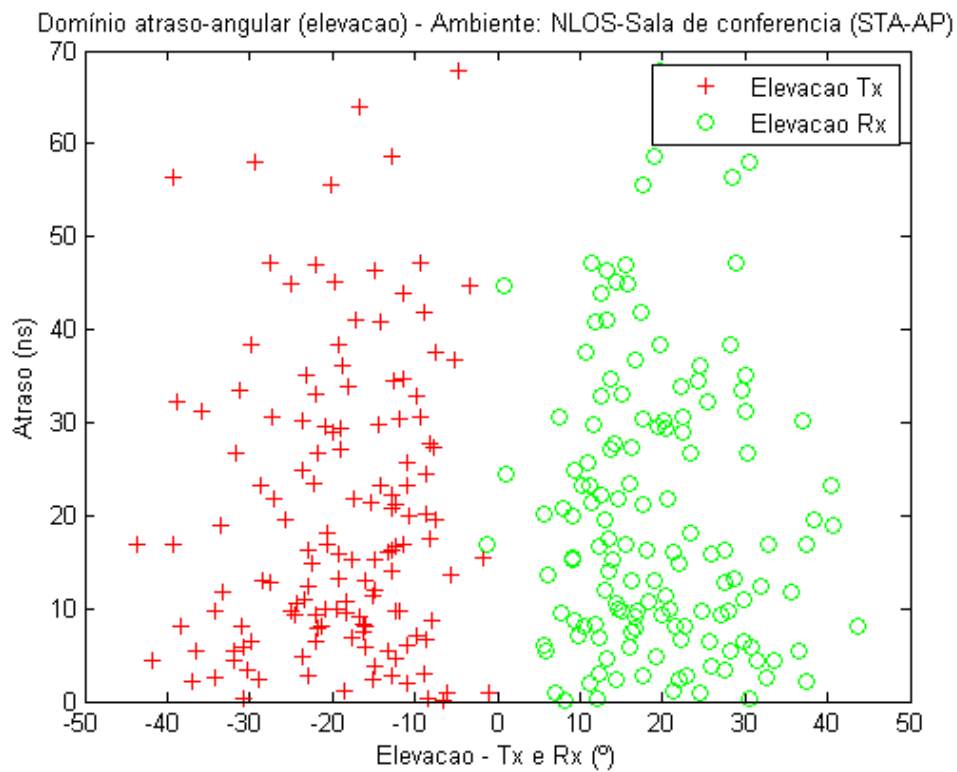


Figura 5.26. Perspectiva Atrasos x Elevação no Tx e Rx. Ambiente Sala de conferência (NLOS), STA-AP.

5.4.2.2 Resposta em frequência

As figuras a seguir apresentam as respostas em frequência do canal IEEE 802.11ad para as duas configurações sem componente LOS do ambiente sala de conferência: Estação-Estação (STA-STA) e Estação-Ponto de acesso (STA-AP).

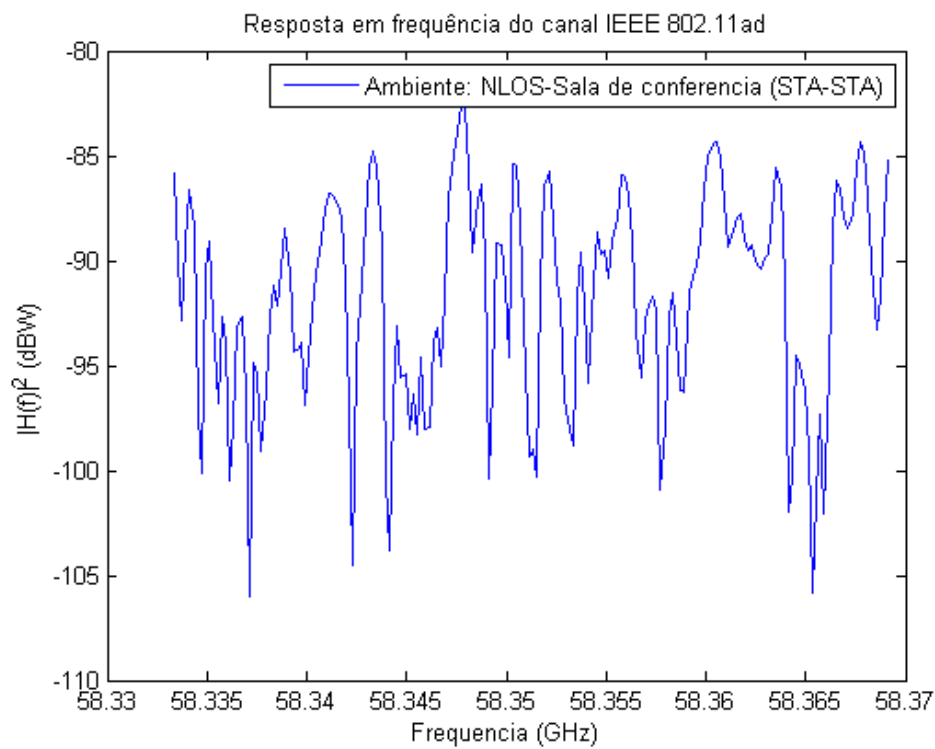


Figura 5.27. Resposta em frequência do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (NLOS), STA-STA.

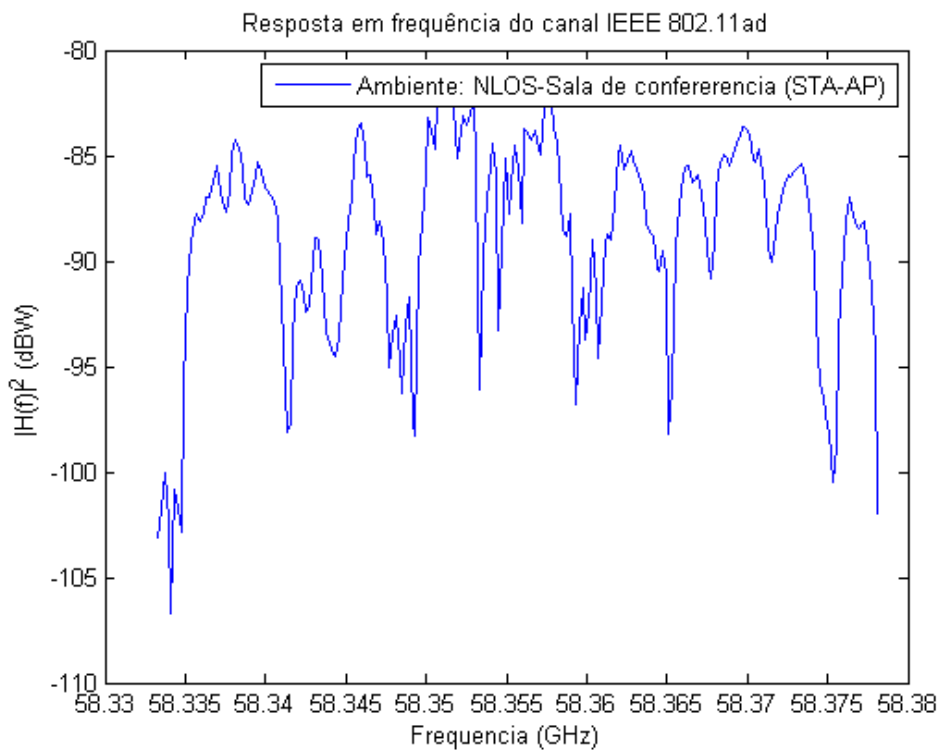


Fig. 5.28. Resposta em frequência do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de conferência (NLOS), STA-AP.

5.4.3 Cubículo (LOS)

O ambiente cubículo é caracterizado segundo a Fig. 5.2. Para a avaliação com linha de visada (LOS) foi considerada a transmissão próxima, entre o ponto de acesso (AP - do inglês, *access point*) e a localização identificada na Fig. 5.2 por “*near location*”.

5.4.3.1 Resposta impulsional do canal

As figuras a seguir apresentam as amplitudes e fases da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad para o ambiente cubículo com componente LOS. Além disso, trazem também a perspectiva no domínio atraso-angular, caracterizando os atrasos em função dos ângulos no transmissor e no receptor tanto no domínio azimute, como no domínio elevação.

As fases estão representadas no intervalo de $-\pi$ a π .

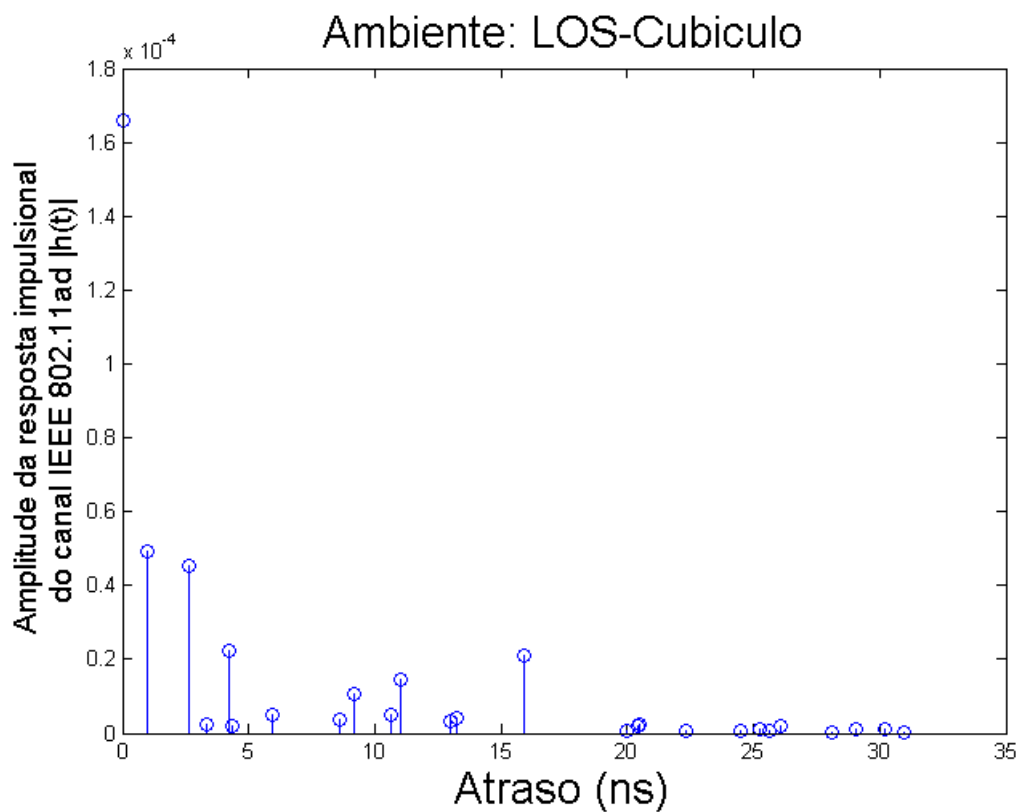


Figura 5.29. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Cubículo (LOS).

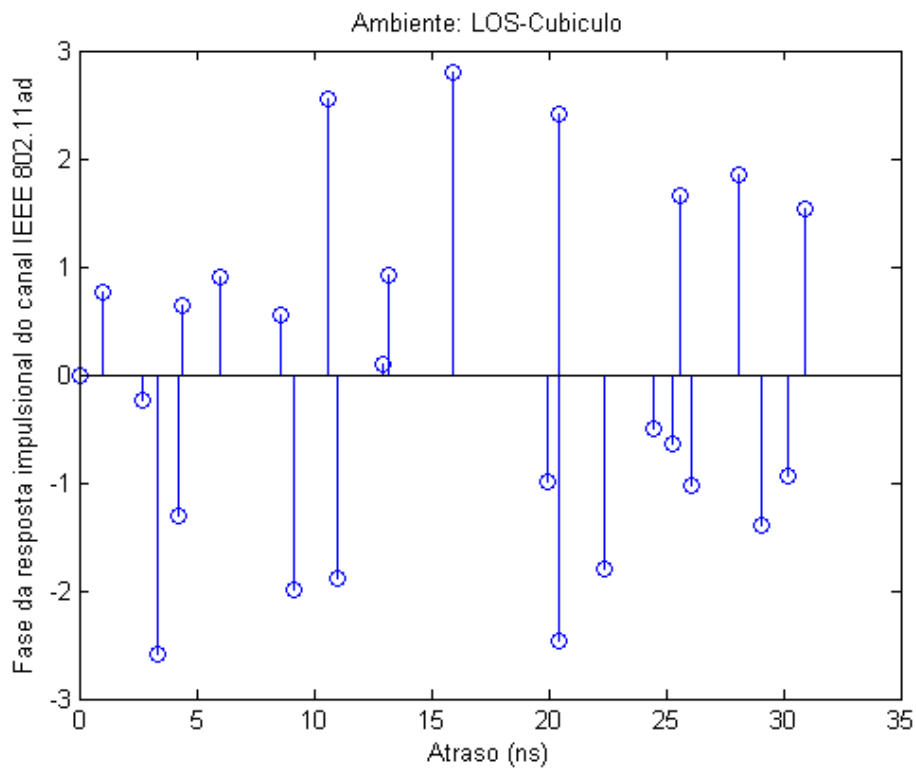


Figura 5.30. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Cubículo (LOS).

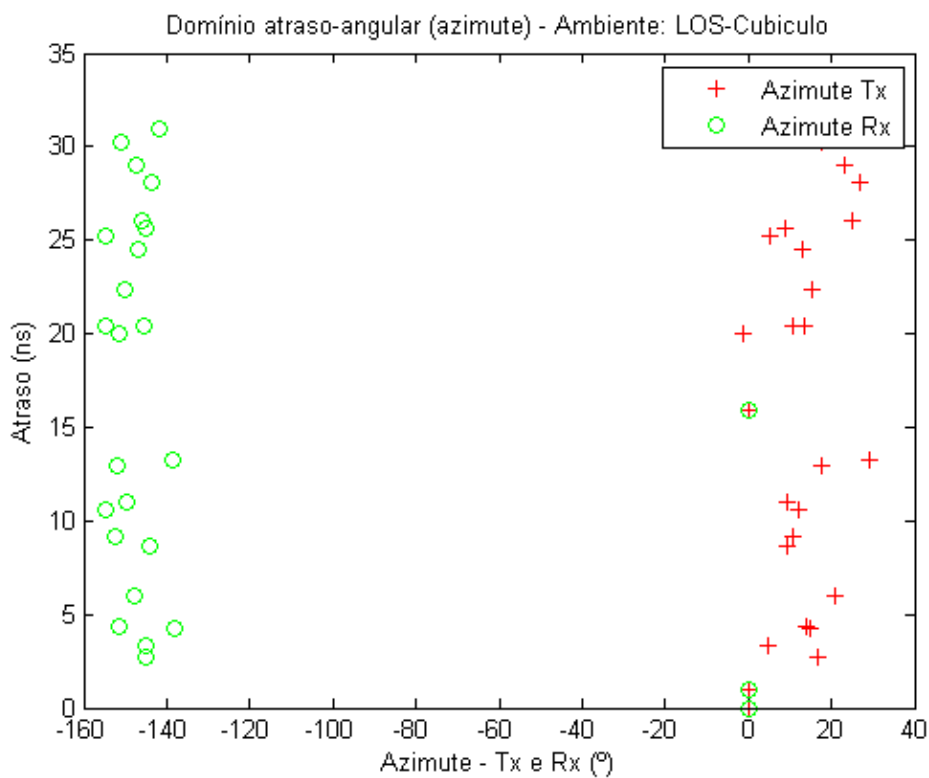


Figura 5.31. Perspectiva Atrasos x Azimute no Tx e Rx. Ambiente Cubiculo (LOS).

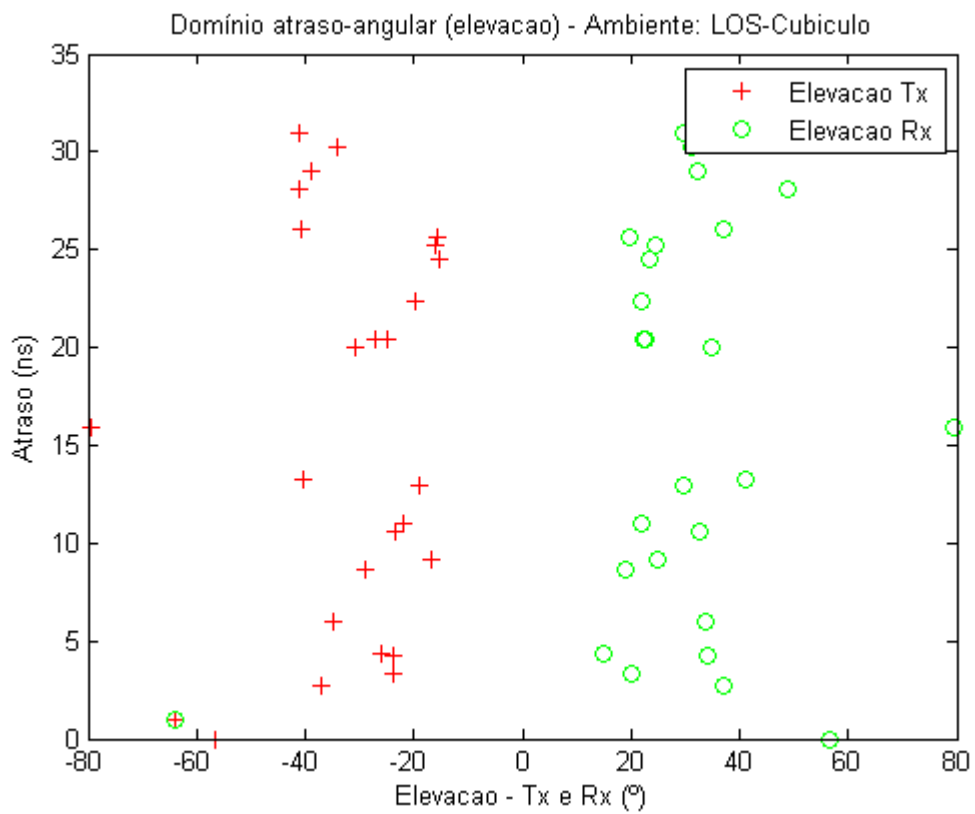


Figura 5.32. Perspectiva Atrasos x Elevação no Tx e Rx. Ambiente Cubículo (LOS).

5.4.3.2 Resposta em frequência

As figuras a seguir apresenta a resposta em frequência do canal IEEE 802.11ad para o ambiente cubículo com componente LOS.

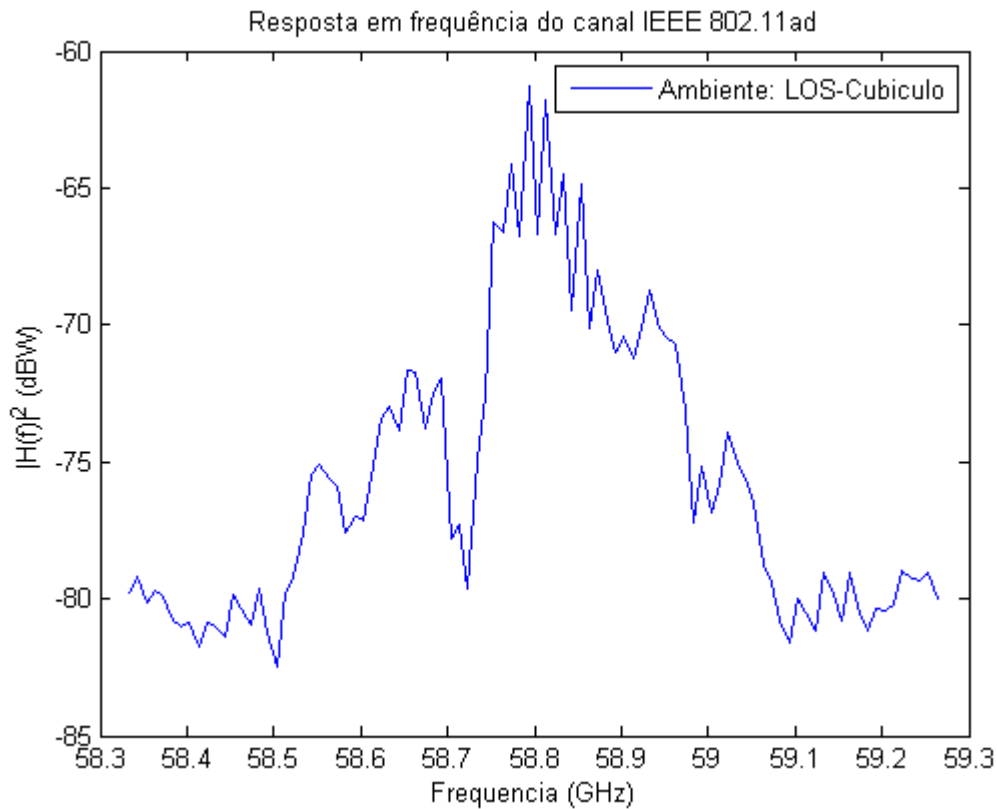


Figura 5.33. Resposta em frequência do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Cubículo (LOS).

5.4.4 Cubículo (NLOS)

O ambiente cubículo é caracterizado segundo a Fig. 5.2. Para a avaliação sem linha de visada (NLOS) foi considerada a transmissão distante, entre o ponto de acesso (AP- do inglês, *access point*) e a localização identificada na Fig. 5.2 por “*far location*”.

5.4.4.1 Resposta impulsional do canal

As figuras a seguir apresentam as amplitudes e fases da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad para o ambiente cubículo sem componente LOS. Além disso, trazem também a perspectiva no domínio atraso-angular, caracterizando os ângulos no transmissor e no receptor tanto no domínio azimute, como no domínio elevação, em função dos atrasos.

As fases estão representadas no intervalo de $-\pi$ a π .

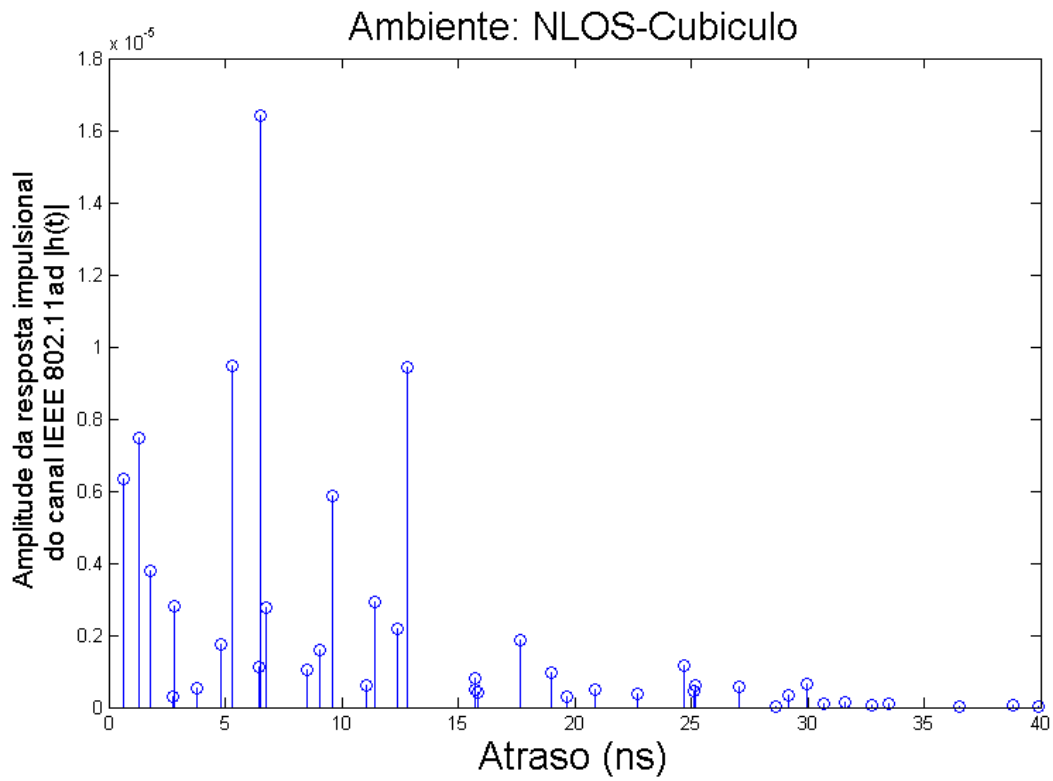


Figura 5.34. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Cubículo (NLOS).

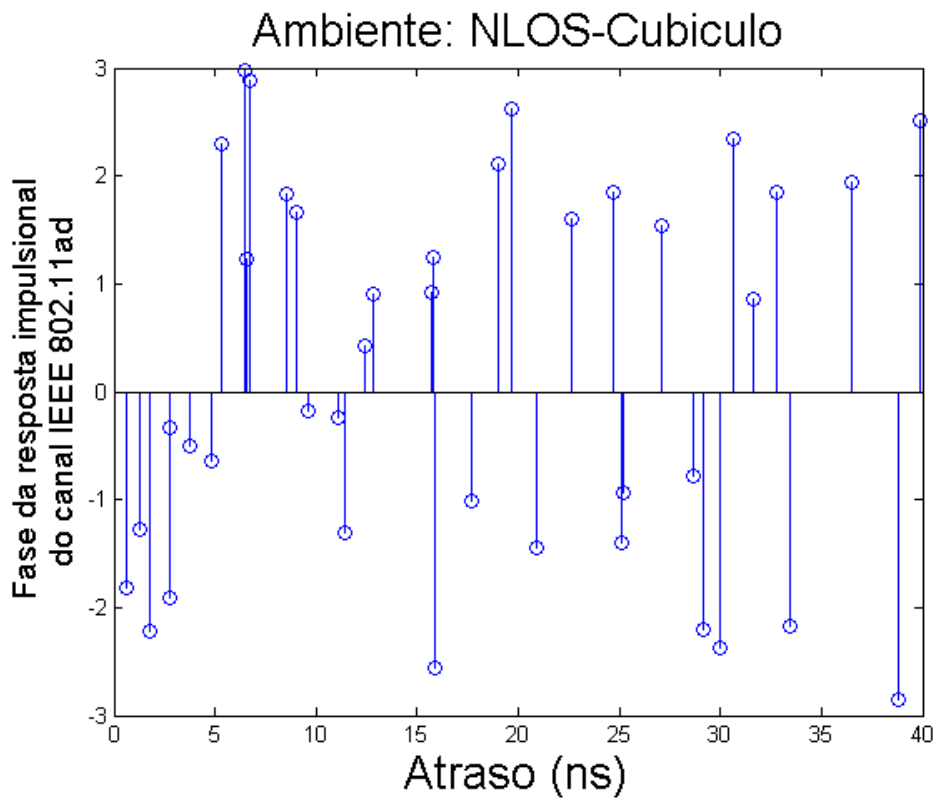


Figura 5.35. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Cubículo (NLOS).

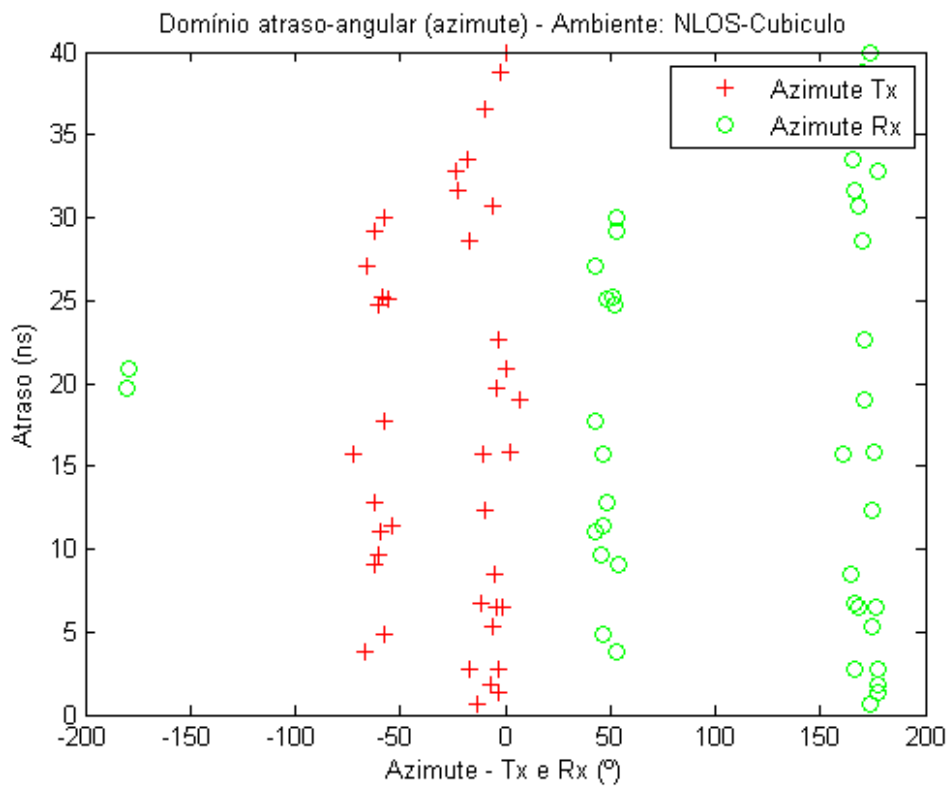


Figura 5.36. Perspectiva Atrasos x Azimute no Tx e Rx. Ambiente Cubículo (NLOS).

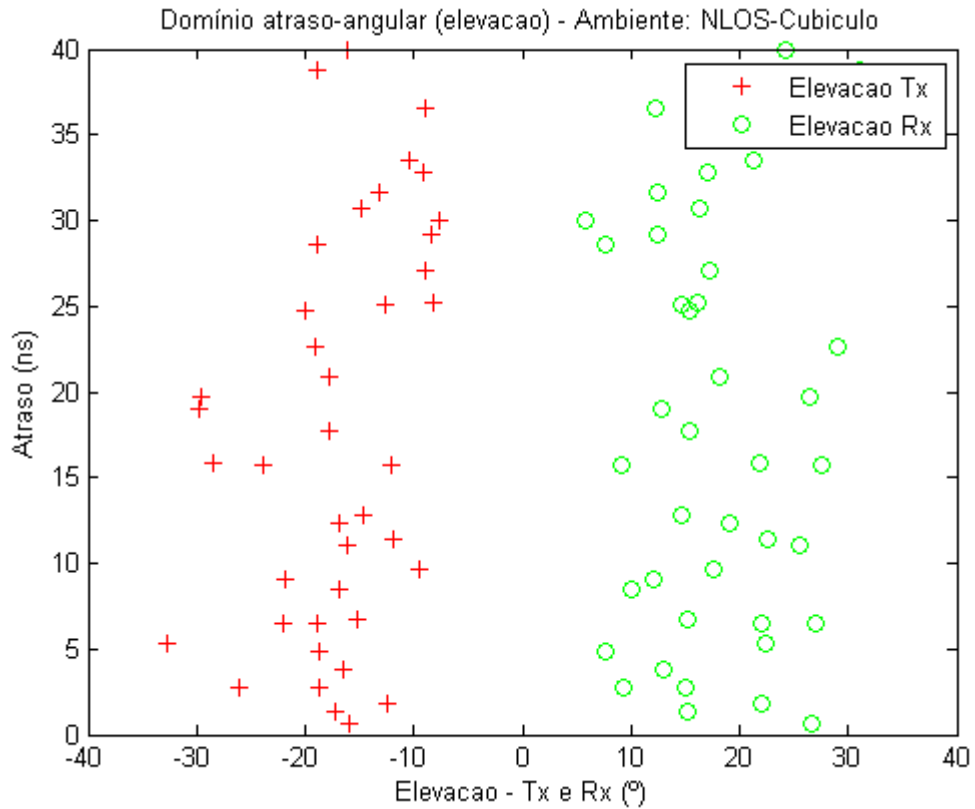


Figura 5.37. Perspectiva Atrasos x Elevação no Tx e Rx. Ambiente Cubículo (NLOS).

5.4.4.2 Resposta em frequência

As figuras a seguir apresenta a resposta em frequência do canal IEEE 802.11ad para o ambiente cubículo sem componente LOS.

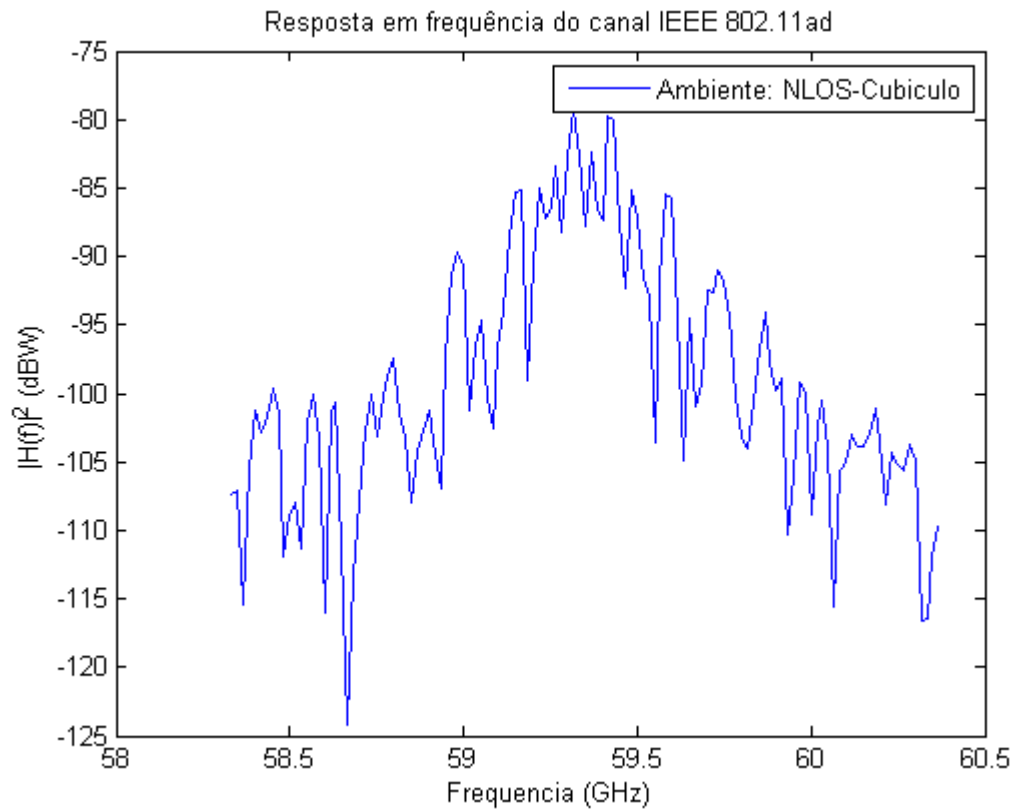


Figura 5.38. Resposta em frequência do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Cubículo (NLOS).

5.4.5 Sala de estar (LOS)

O ambiente sala de estar é caracterizado segundo a Fig. 5.3.

5.4.5.1 Resposta impulsional do canal

As figuras a seguir apresentam as amplitudes e fases da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad para o ambiente sala se estar com componente LOS. Além disso, trazem também a perspectiva no domínio atraso-angular, caracterizando os atrasos em função dos ângulos no transmissor e no receptor tanto no domínio azimute, como no domínio elevação.

As fases estão representadas no intervalo de $-\pi$ a π .

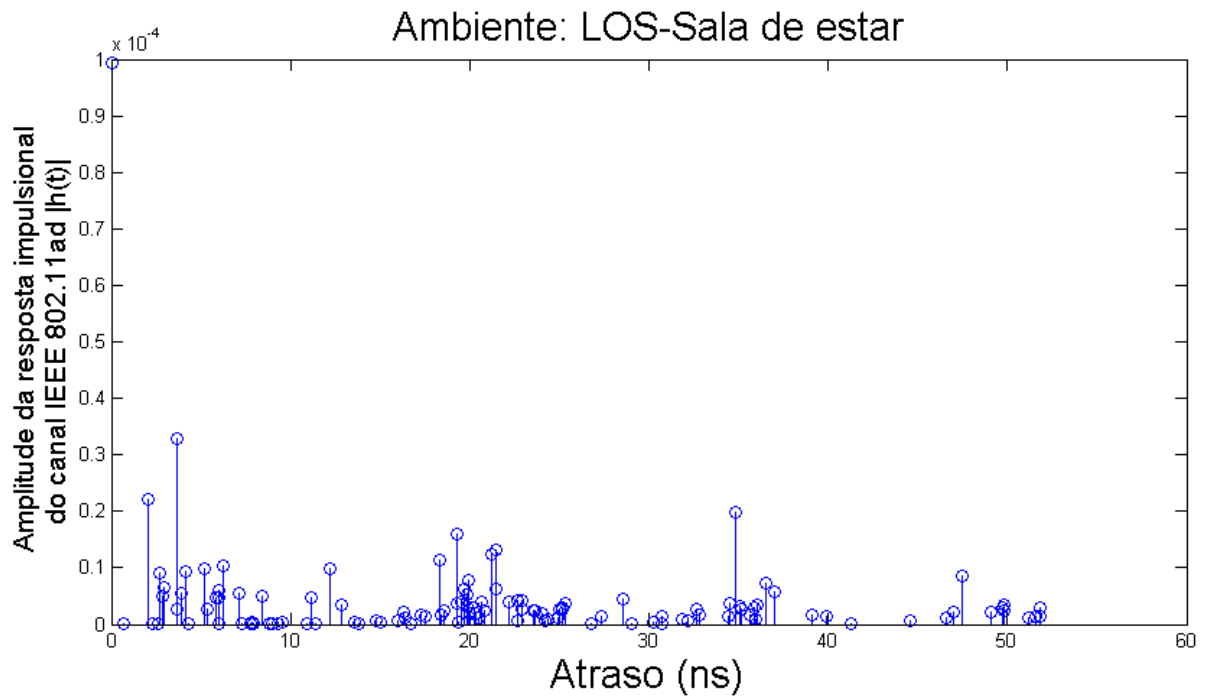


Figura 5.39. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de estar (LOS).

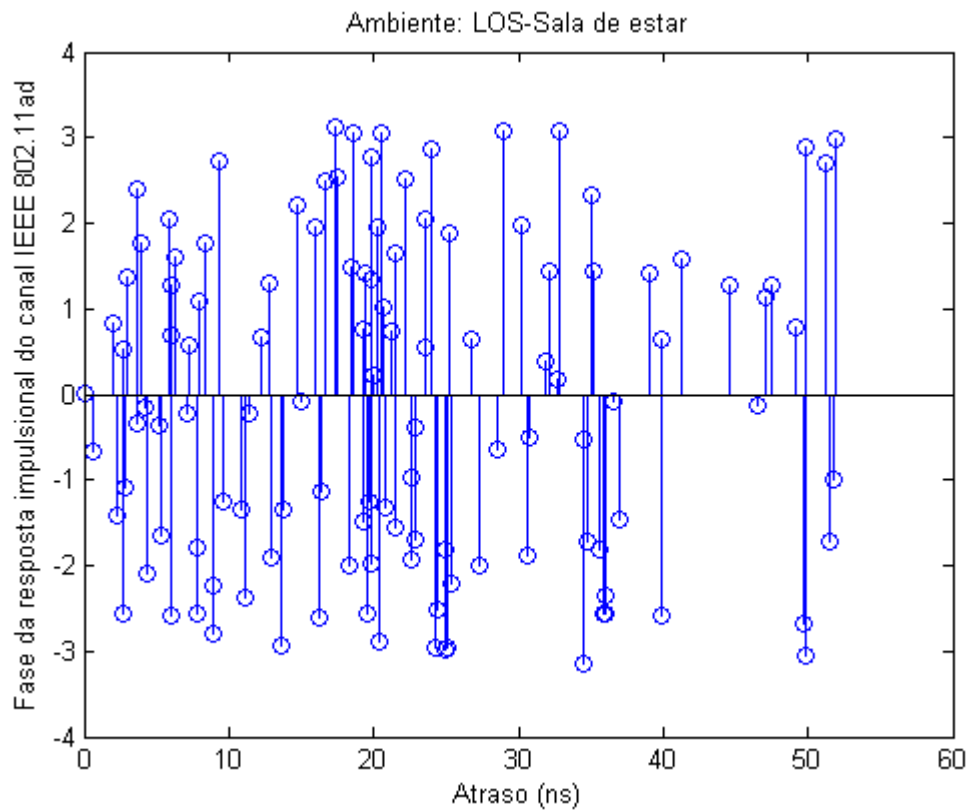


Figura 5.40. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de estar (LOS).

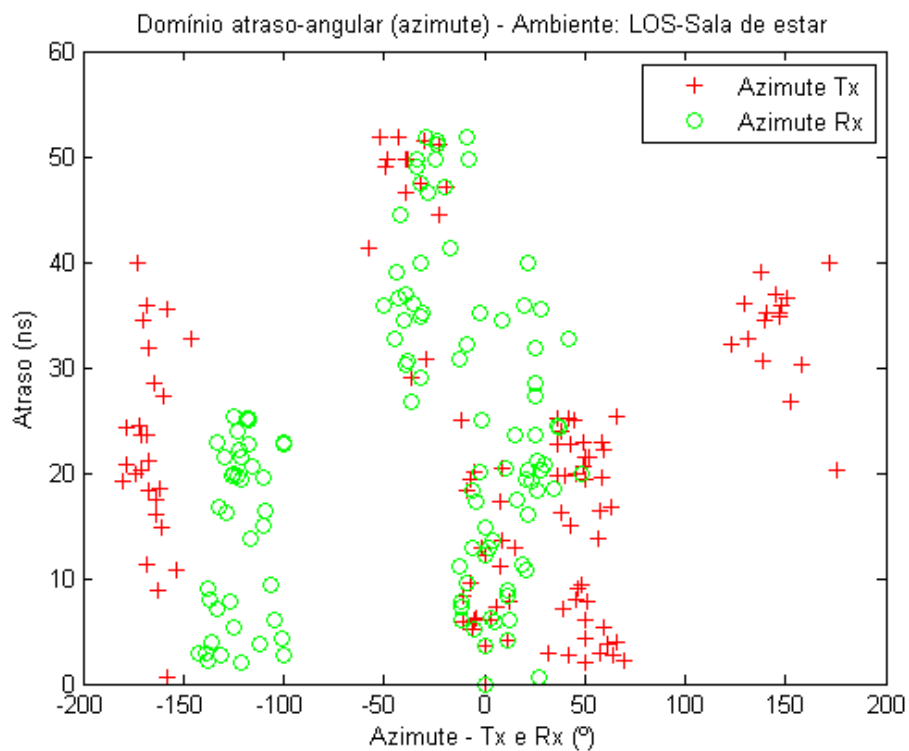


Figura 5.41. Perspectiva Atrasos x Azimute no Tx e Rx. Ambiente Sala de estar (LOS).

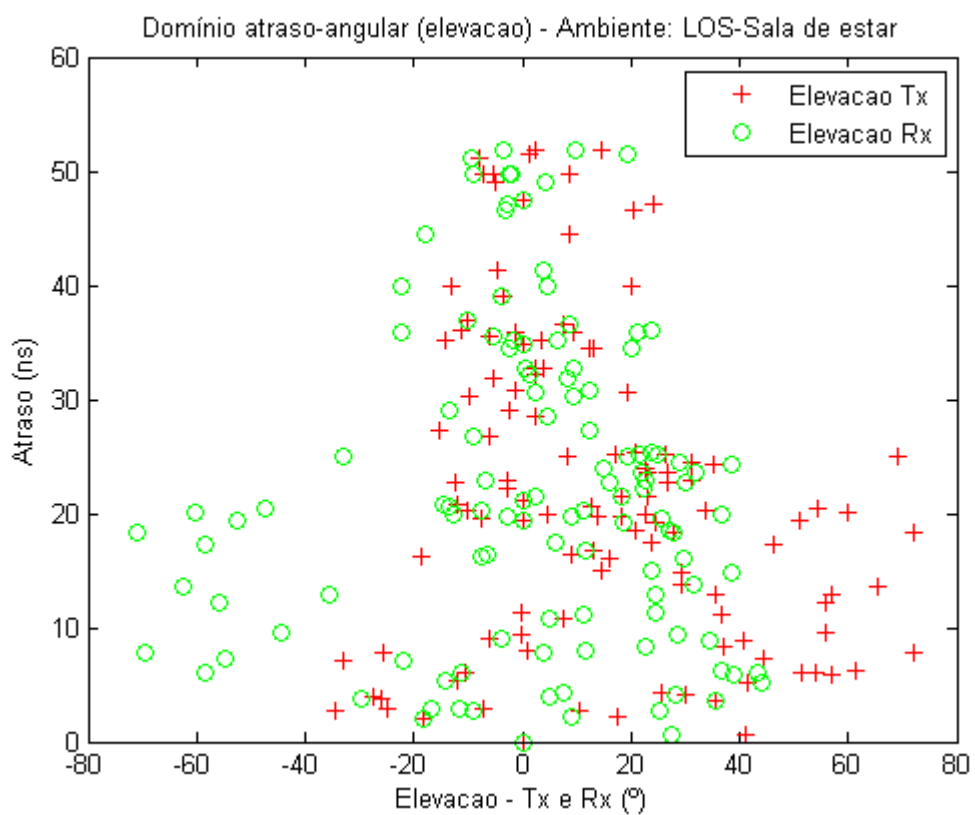


Figura 5.42. Perspectiva Atrasos x Elevação no Tx e Rx. Ambiente Sala de estar (LOS).

5.4.5.2 Resposta em frequência

As figuras a seguir apresenta a resposta em frequência do canal IEEE 802.11ad para o ambiente sala de estar com componente LOS.

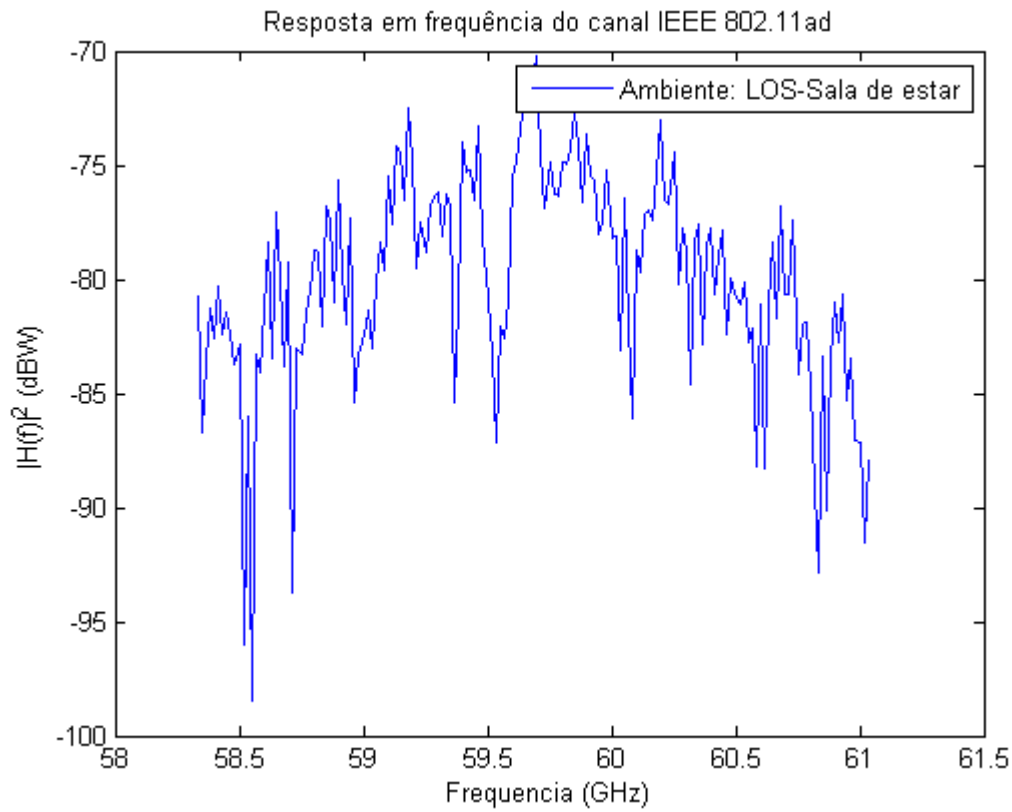


Figura 5.43. Resposta em frequência do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de estar (LOS).

5.4.6 Sala de estar (NLOS)

O ambiente sala de estar é caracterizado segundo a Fig. 5.3.

5.4.6.1 Resposta impulsional do canal

As figuras a seguir apresentam as amplitudes e fases da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad para o ambiente sala se estar sem componente LOS. Além disso, trazem também a perspectiva no domínio atraso-angular, caracterizando os atrasos em função dos ângulos no transmissor e no receptor tanto no domínio azimute, como no domínio elevação.

As fases estão representadas no intervalo de $-\pi$ a π .

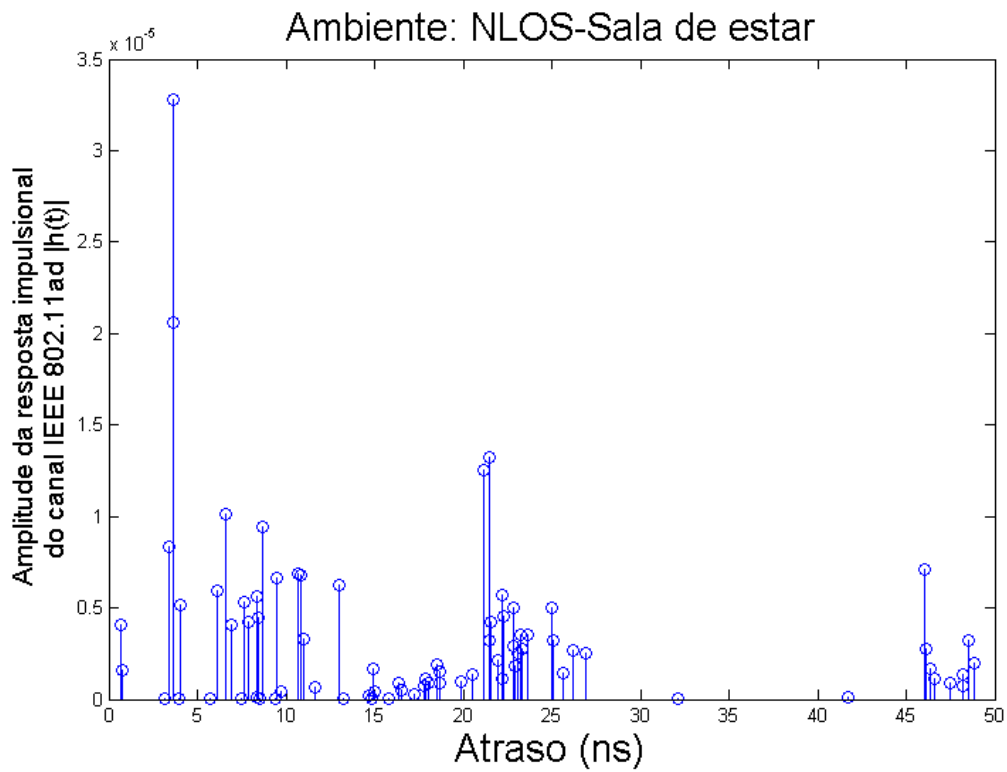


Figura 5.44. Amplitude da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de estar (NLOS).

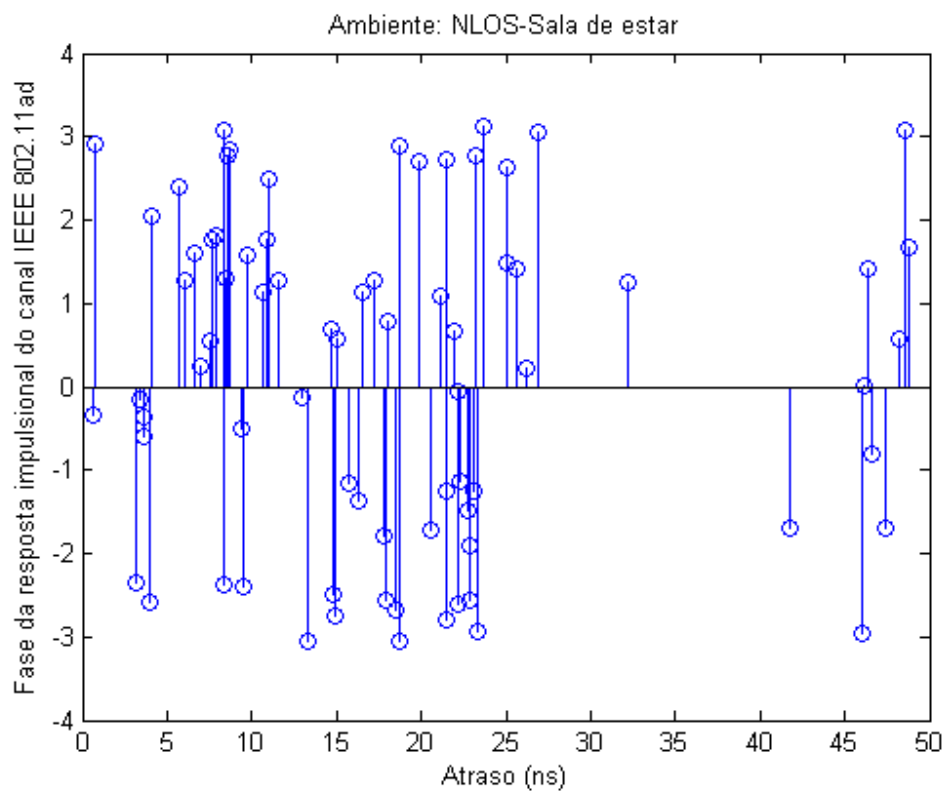


Figura 5.45. Fase da resposta impulsional do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de estar (NLOS).

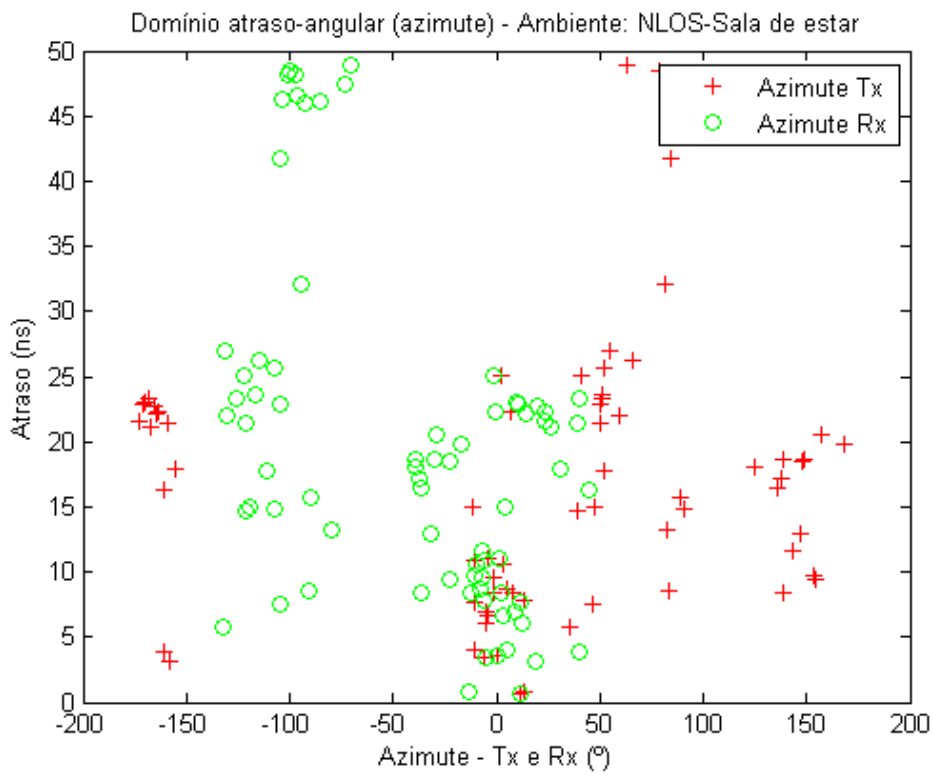


Figura 5.46. Perspectiva Atrasos x Azimute no Tx e Rx. Ambiente Sala de estar (NLOS).

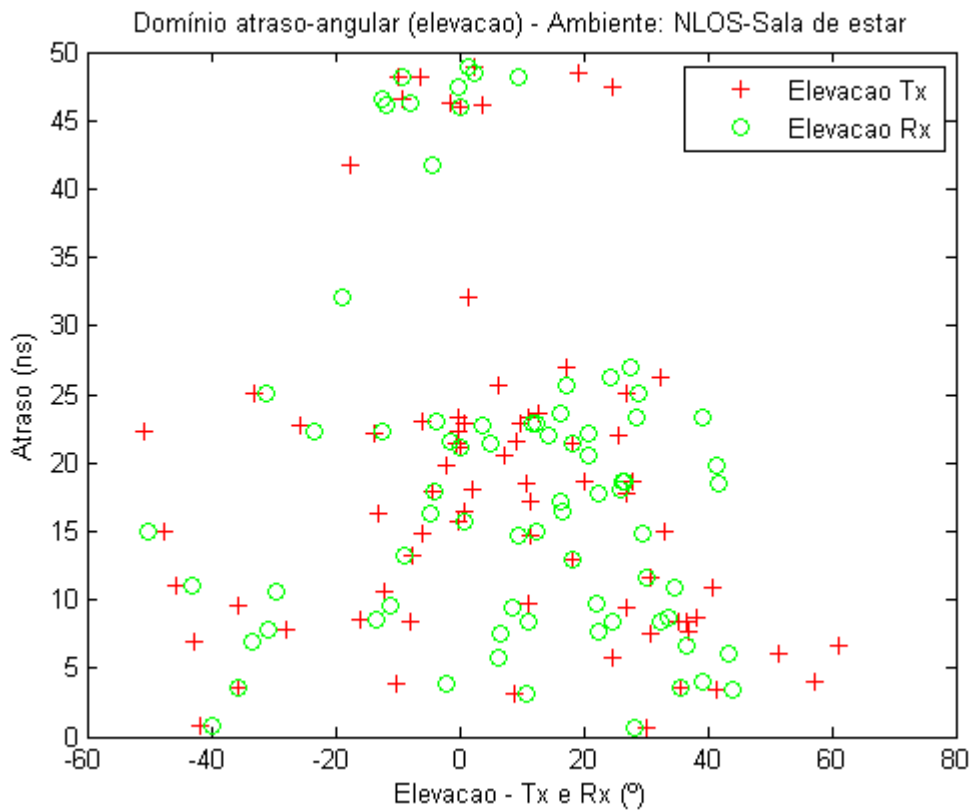


Figura 5.47. Perspectiva Atrasos x Elevação no Tx e Rx. Ambiente Sala de estar (NLOS).

5.5 CONCLUSÕES

É possível observar que as respostas em frequência das simulações do modelo de canal IEEE 802.11.ad são relativamente planas. Isso é reflexo dos atrasos curtos das realizações (menor que 70 ns), que nem chegam a gerar componentes suficientes para apresentar uma variação significativa na resposta em frequência.

As simulações do modelo IEEE 802.11ad consideram um número fixo de clusters por ambiente e por realização de canal. Entretanto, essa abordagem mostrou-se bastante adequada no sentido de que o atraso do canal se mostra dentro do escopo do atraso da maioria das medições nessa faixa, como dito anteriormente [18] [23] [27]. No entanto, a adequação do modelo para outras condições ambientais se torna mais restrita, pois não se trataria de possivelmente aumentar ou diminuir o atraso máximo do canal como no modelo IEEE 802.15.3c.

Para o caso da sala de conferências LOS e NLOS, pode-se comparar as respostas impulsionais das simulações com as das medições em [27]. De fato, o formato da resposta impulsional e os valores das amplitudes da simulação são condizentes com as medições de [27]. Um fato interessante de ser notado e que pode ser observado claramente em algumas medições [17] [18], até mesmo na medição do ambiente kiosk de [21], é que as amplitudes do canal em 60 GHz parecem ter uma variação que decai em média positiva e negativamente em relação a uma amplitude média, conforme a proposta do IEEE 802.11ad. Esse fato faz com que a modelagem das potências e posterior cálculo das amplitudes como é feita no IEEE 802.11ad seja considerada mais adequada à modelagem dos sistemas em 60 GHz.

No melhor do conhecimento da autora, não foram encontradas na literatura caracterizações relevantes de ângulos de partida para essa faixa. O mesmo vale para a avaliação do domínio elevação. Isso sugere que seja reavaliada a importância de se considerar esses parâmetros na modelagem do canal em 60 GHz.

6 CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

O projeto desenvolvido nessa monografia possui o intuito principal de, a partir da simulação computacional dos modelos de canal de comunicações sem fio voltados à faixa milimétrica, constatar o modelo de canal que mais se adequaria às características reais do canal *indoor* sem fio centrado em 60 GHz, comparando-se os resultados das simulações desenvolvidas com medições reais nessa faixa de frequência.

Para isso, foi composta uma extensiva coletânea bibliográfica que fornecesse base ao estudo proposto. Essa coletânea abrange desde conceitos básicos de desvanecimento até relatórios de padronização de modelos de canal voltados à faixa milimétrica (IEEE 802.15.3c e IEEE 802.11ad).

A implementação computacional e simulação dos modelos de canal de Saleh-Valenzuela, IEEE 802.15.3c e IEEE 802.11ad forneceram estatísticas suficientes para que fosse possível avaliar o comportamento do canal em 60 GHz. Dentro do escopo dos objetivos desse trabalho, pode-se afirmar, portanto, que todos foram atingidos de forma satisfatória.

Os três modelos estudados e comparados nesse trabalho são modelos de canal baseados em *clusters*. Essa é, na opinião da autora, a melhor metodologia de modelagem do canal *indoor*, uma vez que o canal *indoor* é composto de inúmeros espalhadores que vão influenciar os atrasos e as potências do sinal no receptor.

Entretanto, diferentemente do que se imaginava no início do desenvolvimento desse projeto, não se alcançou uma resposta definitiva a respeito do melhor modelo de canal que descrevesse o canal em ondas milimétricas e fornecesse os melhores prospectos para a implantação das tecnologias 5G. O que foi constatado é que os dois modelos principais definidos para a faixa milimétrica, o IEEE 802.15.3c e o IEEE 802.11ad, possuem características que podem se adequar à modelagem desse tipo de canal e a adequação de cada um deles ao canal de comunicação na faixa milimétrica é relativo às características cada ambiente.

A modelagem no plano elevação do modelo IEEE 802.11ad gera questionamentos quanto a sua relevância. Não se encontra na literatura vasta bibliografia que explore as características no domínio elevação para o canal de ondas milimétricas. No entanto, a estrutura de decaimento das amplitudes do canal IEEE 802.11ad parece representar melhor a realidade do que a estrutura simples do modelo IEEE 802.15.3c. Por sua vez, o modelo IEEE 802.15.3c possui uma modelagem de canal mais prática que o modelo IEEE 802.11ad, no sentido de condicionar menos variáveis na modelagem do canal. Por exemplo, o IEEE 802.15.3c modela somente um tipo de decaimento de potência dos *clusters* e raios – o decaimento exponencial negativo – e modela as características angulares do canal somente no domínio azimute.

O modelo de Saleh-Valenzuela foi medido e parametrizado considerando dimensões maiores dos ambientes e centrado em 1,5 GHz. Claramente, este foi o modelo que menos se adequou às medições encontradas na literatura. A falta de caracterização no domínio angular/espacial se torna um problema para as aplicações atuais, principalmente na faixa milimétrica que, na busca por compensar as perdas de propagação típicas dessa faixa, investem extensivamente em arranjos de antenas (MIMO). Outro problema associado a esse modelo é a completa falta de caracterização de percursos LOS, algo que, considerando as pequenas distâncias envolvidas nas transmissões na faixa milimétrica pode ser preponderante.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

O próximo passo desse projeto seria a implementação computacional do modelo IEEE 802.11ad pois, dessa forma, poderiam ser explorados melhor as variáveis do canal e extraídas mais estatísticas. Infelizmente, não houve tempo suficiente para que fosse apresentada ainda nesse trabalho a implementação computacional desse modelo.

Para o futuro, a principal expectativa do projeto seria a possibilidade de realizar suas próprias medições, reunindo ainda mais material comparativo para avaliar os modelos existentes. Além disso, as medições poderiam ser direcionadas de forma a otimizar os parâmetros para o contexto do canal de comunicações das robustas tecnologias 5G.

Outro prospecto interessante seria o estudo e desenvolvimento de uma proposta de modelo de canal híbrido para a faixa milimétrica, que agregasse características do modelo IEEE 802.15.3c e IEEE 802.11ad.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ITU,. The world in 2015. [s.l.: s.n.], 2015. (ICT Facts and Figures). Disponível em: <<http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/facts/ICTFactsFigures2015.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2016.
- [2] Pesquisa mostra dados da internet no Brasil em 2015. e-commercebrasil. Disponível em: <<https://www.e-commercebrasil.com.br/noticias/pesquisa-mostra-dados-da-internet-no-brasil-em-2015/>>. Acesso em: 21 jun. 2016.
- [3] Serrano, Filipe. Limitada; telefonia 4G chega ao Brasil. Estadão, 2013. Disponível em: <<http://link.estadao.com.br/noticias/geral,limitada-telefonia-4g-chega-ao-brasil,10000033773>>. Acesso em: 21 jun. 2016.
- [4] Medbo, J. *et al.* Channel Modelling for the Fifth Generation Mobile Communications. *In: The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*. [s.l.: s.n.], 2014.
- [5] Rappaport, Theodore; Roh, Wonil; Cheun, Kyungwhoon. Mobile's millimeter-wave makeover. *IEEE Spectr.*, v. 51, n. 9, p. 34-58, 2014.
- [6] Loea Corporation, 2008. Understanding Millimeter Wave Wireless Communication. [online] San Diego, pp.1-6. Disponível em: <http://www.loecom.com/pdf%20files/L1104WP_Understanding%20MMWCom.pdf>. Acesso em: 11 Sep. 2015.
- [7] Federal Communications Commission,. Millimeter Wave Propagation: Spectrum Management Implications. Washington, DC: [s.n.], 1997. Disponível em: <https://transition.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/Documents/bulletins/oet70/oet70a.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2016.
- [8] Diagrama de blocos de um sistema de comunicação genérico. Disponível em: <http://1.bp.blogspot.com/_nQjew1RNpyU/SZ85BY4ad_I/AAAAAAAAADY/datzeRV7Q9U/s1600/Untitled-3.jpg>. Acesso em: 21 jun. 2016.
- [9] Efeitos de propagação. Disponível em: <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/20538/20538_3.PDF>. Acesso em: 21 jun. 2016.
- [10] Saunders, Simon; Zavala, Alejandro. Antennas and propagation for wireless communications systems. 2. ed. Chichester, West Sussex, UK: Wiley, 2007.
- [11] Machado, Renato. O canal de comunicação radiomóvel. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/gpscom/professores/Renato%20Machado/TopicosAvancados/TopAvanTelecom03.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2016.

- [12] Ávila, Flávio. Aula 10: Desvanecimento em pequena escala - Efeito Doppler. Disponível em: <<http://www.lee.eng.uerj.br/~flavioavila/aula10.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2016.
- [13] Costa, Nelson; Haykin, Simon S. Multiple-input, multiple-output channel models. New York: IEEE, Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2010.
- [14] de Saleh, A.A.M; Valenzuela, R. A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation. IEEE J. Select. Areas Commun., v. 5, n. 2, p. 128-137, 1987.
- [15] Turin, G. L.; Clapp, F. D.; Johnstone, T. L.; Fine, S. B.; Lavry, D. A statistical model of urban multipath propagation. IEEE Trans. Veh. Technol., vol. VT-21, p. 1-9, Fev. 1972.
- [16] Rappaport, Theodore S. Millimeter wave wireless communications. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2014.
- [17] Siamarou, Andreas; Al-Nuaimi, Miqdad. Multipath Delay Spread and Signal Level Measurements for Indoor Wireless Radio Channels at 62.4GHz. 2001.
- [18] Hao, Tran Ngoc *et al.* Measurement of indoor multipath propagation characteristics at 60 GHz with high delay time resolution. *In: International Conference on Advanced Technologies for Communications.* [s.l.: s.n.], 2008.
- [19] Yong, Su-Khiong *et al.* TG3c Channel Modeling Sub-committee Final Report. IEEE 15-07-0584-01-003c. Suwon, Korea: Mar. 2007.
- [20] Foerster, J. Path Loss Proposed Text and S-V Model Information. IEEE P802.15-02/xxxx0-SG3a. Hillsboro, OR: Set. 2002.
- [21] K. Sato *et al.* A new LOS kiosk channel model based on TSV model. IEEE 802.15.07-0607-01-003c. Orlando, USA: Mar. 2007.
- [22] Zwick, T. Beukema; T.J. Haewoon Nam. Wideband channel sounder with measurements and model for the 60 GHz indoor radio channel. IEEE Trans. Veh. Technol., v. 54, n. 4, p. 1266-1277, 2005.
- [23] Peter, M.; Keusgen, W.; Felbecker, R. Measurement and Ray-Tracing Simulation of the 60 GHz Indoor Broadband Channel: Model Accuracy and Parameterization.
- [24] Maltsev, Alexander *et al.* Channel Models for 60 GHz WLAN Systems. IEEE 802.11-09/0334r8. Nizhny Novgorod, Russia: Mai. 2010.
- [25] Yong, Su-Khiong; Xia, Pengfei; Garcia, Alberto Valdes. 60GHz technology for Gbps WLAN and WPAN. Chichester, West Sussex, U.K.: Wiley, 2011.
- [26] Maslennikov, Roman; Lomayev, Artyom. Implementation of 60 GHz WLAN Channel Model. IEEE 802.11-10/0854r3. Nizhny Novgorod, Russia: Mai. 2010.
- [27] Hübner, J. *et al.* Simple channel model for 60 GHz wireless LAN design based on complex wideband measurements. 1997.

[28] Pérez-Fontán, F.; Mariño-Espiñeira, P. Modeling the wireless propagation channel. Chichester, West Sussex, England: Wiley, 2008.

APÊNDICE A

A.1 REALIZAÇÃO DE CANAL ALTERNATIVA DO AMBIENTE RESIDENCIAL TX: 360°, Rx:15° DO MODELO IEEE 802.15.3C

PDP do canal IEEE 802.15.3c: Ambiente LOS-Residencial Tx : 360°, Rx : 15°

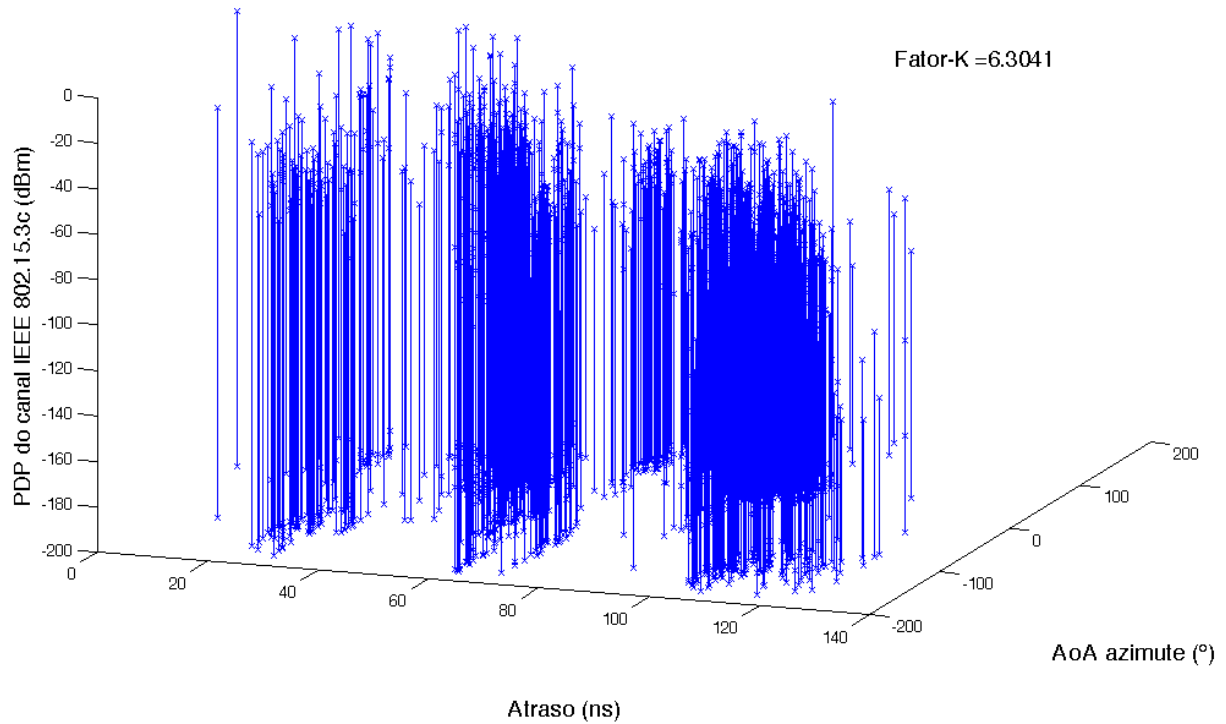


Figura A.1. Perfil de potência do atraso alterantivo do canal IEEE 802.11ad – Ambiente: Sala de estar (NLOS).