

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
CENTRO TECNOLÓGICO
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES**

CHRISTIANO FREITAS DE SOUZA

**ANÁLISE DA DISPERSÃO TEMPORAL DE CANAIS DE BANDA ULTRALARGA
(UWB) ATRAVÉS DE MEDIDAS REALIZADAS EM AMBIENTES INTERNOS E
EXTERNOS**

**NITERÓI
2006**

CHRISTIANO FREITAS DE SOUZA

**ANÁLISE DA DISPERSÃO TEMPORAL DE CANAIS DE BANDA ULTRALARGA
(UWB) ATRAVÉS DE MEDIDAS REALIZADAS EM AMBIENTES INTERNOS E
EXTERNOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. JULIO CESAR RODRIGUES DAL BELLO

Niterói
2006

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

S729 Souza, Christiano Freitas de.

Análise da dispersão temporal de canais de banda ultralarga (UWB) através de medidas realizadas em ambientes internos e externos / Christiano Freitas de Souza – Niterói, RJ : [s.n.], 2006. 251 f.

Orientador: Julio Cesar Rodrigues Dal Bello.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Federal Fluminense, 2006.

1. Engenharia de telecomunicação. 2. Dispersão temporal. 3. Sistemas de comunicação em banda larga. I. Título

CDD 621.3811

CHRISTIANO FREITAS DE SOUZA

**ANÁLISE DA DISPERSÃO TEMPORAL DE CANAIS DE BANDA ULTRALARGA
(UWB) ATRAVÉS DE MEDIDAS REALIZADAS EM AMBIENTES INTERNOS E
EXTERNOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Aprovada em 28 de julho de 2006.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. JULIO CESAR R. DAL BELLO - Orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dra. LENI JOAQUIM DE MATOS
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA
Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC- Rio

Prof. Dr. LUIZ ALENCAR REIS DA SILVA MELLO
Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC- Rio

Prof. M. Sc. LUIZ CARLOS DA SILVA ZAMPROGNO
Instituto Militar de Engenharia - IME

Niterói
2006

A Deus, por minha vida tão repleta de felicidades e bênçãos.

Aos meus sensacionais e queridos pais, Delson e Marilda, por todo o amor e exemplo de vida, responsáveis pela pessoa que eu sou hoje.

A minha irmã Tatiana, pelo apoio, e a minha namorada Nara, pelo amor e companheirismo.

E a todos que acreditaram e acreditam em meus esforços e em minha dedicação.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar agradecendo meu orientador, o Professor Julio Cesar Rodrigues Dal Bello, por ter me conduzido ao longo de minha jornada, iluminado meus passos e me apoiando em cada etapa de elaboração de minha dissertação, fazendo de sua experiência a certeza de meu sucesso. Agradeço, também, por toda confiança e incentivo desde o tempo em que fui seu monitor na disciplina de Propagação e nas inúmeras atividades acadêmicas em que trabalhamos juntos. Também não poderia deixar de agradecer seu empenho e presteza em conseguir todos os equipamentos necessários para a pesquisa, bem como, em me abrir as portas desta Universidade para que eu pudesse desenvolver meu trabalho a qualquer dia e hora da semana.

Estendo os meus profundos agradecimentos ao Professor Gláucio Lima Siqueira, do Centro de Estudos em Telecomunicações (CETUC) da PUC-RJ, por toda a disponibilidade em nos ceder por empréstimo todos os equipamentos de medição e também, por me receber em seu laboratório para quaisquer necessidades. Sua confiança e apoio foram a segurança de permitir que o Mestrado em Telecomunicações da UFF pudesse começar em tão alto nível.

Agradeço, também, a Professora Leni Joaquim de Matos que foi uma segunda orientadora, sempre disposta a ajudar em tudo que fosse preciso e a discutir sobre a ciência dos canais de rádio-propagação.

Os meus agradecimentos, também, a todos os professores que me ajudaram, enriquecendo meus conhecimentos para esta dissertação e para minha vida: Professor Edson Cataldo e Professor Murilo Bresciani, pelas dicas de processamento de sinais e de Matlab; Professor Mauro Assis, pelas árduas aulas de Eletromagnetismo Avançado e fascinantes aulas de Planejamento Celular, no IME; Professor Tarcísio Dantas, pela disponibilidade e interesse em ajudar, sobretudo com os equipamentos do laboratório de microondas.

Não poderia deixar de agradecer, de maneira especial, ao futuro Mestre e, agora, meu amigo Gustavo Bastos, por sua imprescindível ajuda, esforço e dedicação nas campanhas de medidas. Obrigado Gustavo! Agradeço a todos os outros amigos que também ajudaram ns medições, carregando equipamentos pesados e abrindo mão de seus finais de semana, feriados e fins de noite. Obrigado David, Wilyan, Fabio José, Maurílio, Yuri, André, Genivaldo e Val.

Agradeço, também, aos amigos que desenharam as plantas dos ambientes, em AutoCad, Carlos Magno, Rodolfo e Eduardo.

Aos colegas de classe no Mestrado Sérgio Coelho, Roberta Garcia, Frederico Neves, David Godoy e Fiel pelos ótimos momentos compartilhados.

Aos companheiros Robson Vieira e Fabrício Barros, do CETUC, que me apresentaram o tema UWB e me ajudaram bastante na fase inicial de minha pesquisa, o meu sincero obrigado.

A toda a turma da secretaria, Rafael, Jussara, Carmen e ao Coordenador do Mestrado, o Professor Pablo, obrigado por toda a atenção dispensada ao longo deste tempo.

Também gostaria de deixar meus agradecimentos a FAPERJ, que financiou parcialmente todo este trabalho, por meio de uma bolsa de pesquisa, permitindo que eu pudesse me dedicar em tempo integral ao desenvolvimento da ciência brasileira no campo da Engenharia. Aproveitando, agradeço ao Departamento de Estudos de Pessoal do Exército Brasileiro, por me permitir participar de seus projetos de Ensino a Distância e de Radiopropagação para Telecomunicações. Obrigado Cel. Costa Rodrigues, Cel. Guelfi e Ralph Xavier.

Certo de ter imortalizado, nesta seção de agradecimentos, pessoas que levarei para sempre na memória, de uma experiência muito enriquecedora e gratificante na minha vida, que foi esse Mestrado, mais uma vez, obrigado.

RESUMO

Este trabalho objetiva apresentar os resultados de medições e analisar a resposta de canais de banda ultralarga (UWB) com a técnica de sondagem de varredura em frequência. Neste sentido, foram investigados dezoito ambientes diferentes, localizados nos campi do Gragoatá e da Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense. Os parâmetros de dispersão temporal do canal (retardo médio, espalhamento de retardos e banda de coerência) foram calculados e a perda de propagação com a distância, para dois dos dezoito ambientes, foi analisada.

Palavras-chave: Canal UWB. Sondagem em Frequência. Dispersão Temporal.

ABSTRACT

This work aims to show the results of measurements and analyze the ultra wideband (UWB) channel response with the frequency sweep sounding technique. Eighteen different environments were surveyed, placed at Gragoatá and Praia Vermelha *campi* of Fluminense Federal University. The temporal dispersion of the channel parameters (mean delay, delay spread and coherence bandwidth) were evaluated in all environments. The propagation path loss was taken in two of them.

Keywords: UWB Channel. Frequency Sounding. Temporal Dispersion

SUMÁRIO

1	Introdução.....	25
1.1	Histórico.....	25
1.2	Aplicações e Ambientes de Interesse.....	29
1.3	Objetivos.....	30
1.4	Estrutura.....	31
2	Teoria de Canal Banda Larga.....	33
2.1	Considerações Iniciais.....	33
2.2	Funções de Sistema do Canal.....	34
2.2.1	Caracterização de Canais Determinísticos.....	34
2.2.1.1	Espalhamento Temporal.....	35
2.2.1.2	Espalhamento Doppler.....	36
2.2.1.3	Seletividade em Frequência.....	50
2.2.1.4	Espalhamento Espectral.....	41
2.3	Relações entre as Funções de Sistema do Canal.....	42
2.3.1	Canais Aleatoriamente Variantes no Tempo - Canais Reais.....	43
2.3.2	Considerações para Canais Práticos.....	44
2.3.3	Canais WSSUS.....	47
2.4	Caracterização de Canais Rádio-Móveis Reais.....	48
2.4.1	Caracterização em Pequena Escala.....	48
2.4.1.1	Banda de Coerência.....	49
2.4.1.2	Perfil de Retardos de Potência.....	51
2.4.2	Caracterização em Larga Escala.....	54

3	Técnica de Sondagem do Canal UWB	55
3.1	Técnica de Sondagem no Domínio do Tempo.....	55
3.1.1	Sondagem Impulsiva.....	56
3.1.2	Sondagem por DSSS (<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>).....	58
3.2	Técnica de Sondagem no Domínio da Frequência.....	60
3.2.1	Setup de Medição.....	64
3.2.2	Configuração do Analisador Vetorial.....	64
3.2.3	Considerações quanto aos Parâmetros Escolhidos.....	67
4	Cenários de Medidas	69
4.1	Descrição dos Cenários de Medidas.....	69
4.2	Ambientes <i>Indoor-Outdoor</i> e <i>Outdoor-Indoor</i>	72
4.3	Ambientes Próximos a Construções.....	73
4.4	Ambientes mais Amplos, Próximos a Construções e Jardins.....	74
4.5	Ambientes Totalmente Abertos.....	75
5	Ferramentas de Análise	90
5.1	Considerações Iniciais.....	90
5.2	Cuidados com a Aplicação da IFFT.....	91
5.3	Limpeza do Perfil de Retardos de Potência.....	96
5.4	Técnica CLEAN.....	99
5.4.1	Estrutura do Algoritmo CLEAN.....	100
5.5	Considerações sobre os Coeficientes de Correlação e a Função Janela Utilizada.....	106
6	Resultados	108
6.1	Considerações Iniciais quanto à escolha do Limiar de Decisão.....	108

6.2	Relação entre Banda de Coerência e Espalhamento de Retardos.....	112
6.3	Ambientes para Análise em Pequena Escala.....	113
6.3.1	Ambientes <i>indoor-outdoor</i> e <i>vice-versa</i>	113
6.3.1.1	Segundo Andar do Bloco D <i>indoor-outdoor</i> (A1) e <i>outdoor-indoor</i> (A2)	113
6.3.1.2	Terceiro Andar do Bloco D <i>indoor-outdoor</i> (A3) e <i>outdoor-indoor</i> (A4)	118
6.3.1.3	<i>Hall</i> do Bloco D <i>indoor-outdoor</i> (A5) e <i>outdoor-indoor</i> (A6)	120
6.3.1.4	Biblioteca da Engenharia <i>indoor-outdoor</i> (A7).....	121
6.3.1.5	Parede do Terceiro Andar do Bloco E (A8).....	125
6.3.2	Ambientes Próximos a Construções.....	127
6.3.2.1	Ao longo da Saída da Biblioteca da Engenharia (B1)	127
6.3.2.2	Ao longo da Saída do <i>Hall</i> do Bloco D (B2).....	129
6.3.2.3	<i>Pilotis</i> do Prédio da Faculdade de Geociências (B3)	131
6.3.2.4	Estacionamento do Bloco E (B4).....	133
6.3.3	Ambientes mais Amplos, Próximos a Construções e Jardins.....	135
6.3.3.1	Entre os Blocos D e E (C1)	135
6.3.3.2	Entre os Blocos O e N (C2).....	137
6.3.3.3	Pátio da Faculdade de Arquitetura (em frente ao Chalé - C3).....	139
6.3.3.4	Pátio da Faculdade de Arquitetura (em frente ao Casarão - C4).....	140
6.4	Ambientes para Análise em Larga Escala.....	141
6.4.1	Estacionamento da Faculdade de Geociências (D1).....	143
6.4.2	Campo de Futebol do <i>Campus</i> do Gragoatá (D2).....	146
7	Conclusões	151
7.1	Janelamento e Limiar de Decisão.....	152

7.2	Parâmetros de Dispersão do Canal em Pequena Escala.....	153
7.3	Atenuação de Propagação com a Distância.....	154
7.4	Relação entre Banda de Coerência e Espalhamento de Retardos.....	155
7.5	Sugestões de Trabalhos Futuros.....	156
Referências bibliográficas.....		158
Apêndice A – A Campanha de Medidas.....		164
A.1	Ambientes Medidos no Campus da Praia Vermelha.....	164
A.2	Ambientes Medidos no <i>Campus</i> do Gragoatá.....	164
A.3	Total de Ambientes Medidos.....	165
Apêndice B – Programação em Matlab.....		166
B.1	Programa de Aquisição.....	166
B.2	Programa Principal para o Pós-Processamento dos Ambientes Tipo A, B e C.....	167
B.3	Programa Principal para o Pós-Processamento dos Ambientes D1 e D2...	169
B.4	Funções utilizadas no Programa do Item B1.....	171
Apêndice C – Gráficos e Tabelas.....		187
C.1	Resultados para o Ambiente A1: Segundo Andar do Bloco D <i>indoor-outdoor</i>	187
C.2	Resultados para o Ambiente A2: Segundo Andar do Bloco D <i>outdoor-indoor</i>	191
C.3	Resultados para o Ambiente A3: Terceiro Andar do Bloco D <i>indoor-outdoor</i>	196
C.4	Resultados para o Ambiente A4: Terceiro Andar do Bloco D <i>outdoor-indoor</i>	200
C.5	Resultados para o Ambiente A5: Hall do Bloco D <i>indoor-outdoor</i>	204

C.6	Resultados para o Ambiente A6: <i>Hall</i> do Bloco D <i>outdoor-indoor</i>	208
C.7	Resultados para o Ambiente A7: Biblioteca da Engenharia <i>indoor-outdoor</i>	212
C.8	Resultados para o Ambiente A8: Parede do Terceiro Andar do Bloco E....	215
C.9	Resultados para o Ambiente B1: Ao longo da Saída da Biblioteca da Engenharia.....	217
C.10	Resultados para o Ambiente B2: Ao longo da Saída do <i>Hall</i> do Bloco D....	222
C.11	Resultados para o Ambiente B3: <i>Pilotis</i> do Prédio da Faculdade de Geociências.....	225
C.12	Resultados para o Ambiente B4: Estacionamento do Bloco E.....	232
C.13	Resultados para o Ambiente C1: Entre os Blocos D e E.....	235
C.14	Resultados para o Ambiente C2: Entre os Blocos O e N.....	238
C.15	Resultados para o Ambiente C3: Pátio da Faculdade de Arquitetura (em frente ao Casarão).....	241
C.16	Resultados para o Ambiente C4: Pátio da Faculdade de Arquitetura (em frente ao Chalé)	244
C.17	Resultados para o Ambiente D1: Estacionamento da Faculdade de Geociências.....	246
C.18	Resultados para o Ambiente D2: Campo de Futebol do <i>Campus</i> do Gragoatá.....	249

LISTA DE FIGURAS

Fig 1.1 - Comparação entre Espectros.....	27
Fig 2.1 - Modelo do Canal como Filtro Linear.....	35
Fig 2.2 - Elipses de Retardos para Dois Raios.....	36
Fig 2.3 - Surgimento do Efeito Doppler.....	38
Fig 2.4 - Magnitude e Fase de uma Varredura em Freqüência.....	40
Fig 2.5 - Relações entre as Funções de Transferência do Canal.....	42
Fig 2.6 - Relações entre as Funções Autocorrelação do Canal.....	44
Fig 2.7 - Relações entre as Funções Autocorrelação de Canais WSSUS.....	47
Fig 2.8 - Função de Correlação $R_T(\Omega)$ Típica com Indicação das Bandas de Coerência para os Níveis 0,7 e 0,9.....	51
Fig 2.9 - Exemplo de um Perfil de Retardos de Potência Medido.....	53
Fig 3.1 - <i>Setup</i> para Sondagem no Domínio do Tempo.....	57
Fig 3.2 - Trem de Pulsos e Resposta Impulsiva do Canal.....	57
Fig 3.3 - Esquema para Sondagem DSSS.....	59
Fig 3.4 - Medidas de Perda de Retorno nas Antenas: (a) Transmissão; (b) Recepção.....	63
Fig 3.5 - Antenas Utilizadas nas Medições.....	63
Fig 3.6 - Foto do Sistema Utilizado na Sondagem em Freqüência.....	64
Fig 4.1 - <i>Grid</i> de 6 x 6 pontos.....	71
Fig 4.2 - Cenário dos Ambientes A1 e A2: Segundo Andar do Bloco D <i>indoor-outdoor</i> . Planta do Ambiente A1(a); Planta do Ambiente A2 (b); Vista Interna (c); Vista Externa (d).....	76
Fig 4.3 - Cenário do Ambiente A3 e A4: Terceiro Andar do Bloco D <i>indoor-outdoor</i> . Planta do Ambiente A3(a); Planta do Ambiente A4 (b); Vista Interna (c); Vista Externa (d).....	77
Fig 4.4 - Cenário do Ambiente A5 e A6: <i>Hall</i> do Bloco D <i>indoor-outdoor</i> . Planta do Ambiente A5(a); Planta do Ambiente A6 (b); Vista Interna (c)	78

Fig 4.5 - Cenário do Ambiente A7: Biblioteca da Engenharia <i>indoor-outdoor</i> . Planta do Ambiente A7(a); Vista Externa (b).....	79
Fig 4.6 - Cenário do Ambiente A8: Parede do Terceiro Andar do Bloco E. Planta do Ambiente A8(a); Vista Externa (b).....	79
Fig 4.7 - Cenário do Ambiente B1: Ao longo da saída da Biblioteca da Engenharia. Planta do Ambiente B1(a); Vista Frontal (b) e Vista Lateral (c).....	80
Fig 4.8 - Cenário do Ambiente B2: Ao longo da saída do <i>Hall</i> do Bloco D. Planta do Ambiente B2 (a); Vista Lateral (b) e Vista Frontal (c)	81
Fig 4.9 - Cenário do Ambiente B3: <i>Pilotis</i> do Prédio da Faculdade de Geociências. Planta do Ambiente B3 (a); Vista Externa (b).....	82
Fig 4.10 - Cenário do Ambiente B4: Estacionamento do Bloco E. Planta do Ambiente B4 (a); Vista Externa (b).....	83
Fig 4.11 - Cenário do Ambiente C1: Entre os Blocos D e E. Planta do Ambiente C1 (a); Vista Externa (b).....	84
Fig 4.12 - Cenário do Ambiente C2: Entre os Blocos O e N. Planta do Ambiente C2 (a); Vista Externa (b).....	85
Fig 4.13 - Cenário do Ambiente C3: Pátio da Faculdade de Arquitetura (em frente ao Chalé). Planta do Ambiente C3 (a); Vista Externa (b)	86
Fig 4.14 - Cenário do Ambiente C4: Pátio da Faculdade de Arquitetura (em frente ao Casarão). Planta do Ambiente C4 (a); Vista Externa (b)	87
Fig 4.15 - Cenário do Ambiente D1: Estacionamento da Faculdade de Geociências. Planta do Ambiente C1 (a); Vista Externa (b).....	88
Fig 4.16 - Cenário do Ambiente D2: Campo de futebol do <i>Campus</i> do Gragoatá. Planta do Ambiente D2 (a); Vista Externa (b).....	89
Fig 5.1 - Procedimentos para se aplicar a IFFT.....	92
Fig 5.2 - Função <i>Gate</i> (tempo) e <i>Sample</i> (freqüência).....	69
Fig 5.3 - Função Janela de Blackman-Harris de 3 Termos, no Tempo e na Freqüência.....	96
Fig 5.4 - Exemplo de um Perfil de Retardos de Potência Medido.....	96
Fig 5.5 - Modelo Matemático para o Canal Rádio-Móvel.....	97
Fig 5.6 - Perfil de Retardos de Potência de Referência.....	100
Fig 5.7 - Perfis de Retardos de Potência de Referência (a) e a ser limpo (b)	102

Fig 5.8 - Perfil de Retardos de Potência após a Técnica CLEAN (a) e com Zoom (b)	106
Fig 6.1 - Considerações quanto ao Parâmetro X com Indicação do Ruído de Início de Perfil sendo capturado (a) e não sendo capturado (b)	110
Fig 6.2 - Perfil de Retardos Potência com Indicação do Raio Direto e dos Principais Multipercursos, a 10 metros do Receptor, no Ambiente D2..	111
Fig 6.3 - Esquema Geral do Processamento Adotado.....	111
Fig 6.4 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos para o Ambiente A1, Local 4, BC 0,7 (a) e BC 0,9 (b).....	116
Fig 6.5 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos para o Ambiente A2, Local 4, BC 0,7 (a) e BC 0,9 (b).....	116
Fig 6.6 - Perfil de Retardos Potência (PRP), Ambiente A1, Local 2.....	117
Fig 6.7 - Perfil de Retardos Potência para o Ambiente A1, Local 7 (a) e para o Ambiente A2, Local 7 (b)	117
Fig 6.8 - Perfil de Retardos Potência, Ambiente A3, Local 1.....	119
Fig 6.9 - Perfil de Retardos Potência nos Ambientes A3, Local 5 (a) e A4, Local 5 (b)	119
Fig 6.10 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos nos Ambientes A3, Local 1, BC 0,9 (a) e A4, Local 6, BC 0,9 (b)	120
Fig 6.11 - Perfil de Retardos Potência nos Ambientes A5, Local 4 (a) e A6, Local 4 (b)	112
Fig 6.12 - Perfil de Retardos Potência no Ambiente A6, Local 5 (a) e Local 6 (b) .	122
Fig 6.13 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente A5, Local 7, BC 0,7 (a) e BC 0,9 (b).....	123
Fig 6.14 - Perfil de Retardos Potência no Ambiente A7. Local 1 (a), Local 2 (b), Local 3 (c) e Local 4 (d)	124
Fig 6.15 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente A7, Local 1, BC 0,9 (a) e Local 4, BC 0,9 (b).....	125
Fig 6.16 - Perfil de Retardos Potência no Ambiente A8, nas Situações <i>In-Out</i> NLOS (a), <i>Out-Out</i> LOS (b), <i>Out-In</i> NLOS (c) e <i>Out-Out</i> LOS (d)	126
Fig 6.17 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente E1 e BC 0,9 nas Situações <i>In-Out</i> NLOS (a), <i>Out-Out</i> LOS (b), <i>Out-In</i> NLOS (c) e <i>Out-Out</i> LOS (d).....	127

Fig 6.18 - Perfil de Retardos Potência no Ambiente B1, Local 6, sem Zoom (a) e com Zoom (b)	104
Fig 6.19 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente B1, Local 1, BC 0,9 (a) e Local 4, BC 0,9 (b).....	105
Fig 6.20 - Perfil de Retardos de Potência no Ambiente B2, Local 1 (a) e Local 4 (b)	106
Fig 6.21 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente B2, Local 3, BC 0,9 (a) e Local 6, BC 0,9 (b).....	107
Fig 6.22 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente B3, Local 1, BC 0,9 antes do Procedimento (a) e depois do Procedimento (b)	108
Fig 6.23 - Perfil de Retardos de Potência no Ambiente B3, Local 2 antes do Procedimento (a) e depois do Procedimento (b).....	109
Fig 6.24 - Perfil de Retardos de Potência no Ambiente B4, Local 1 (a) e Local 4 (b)	110
Fig 6.25 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente B4, Local 3, BC 0,7 (a) e BC 0,9 (b).....	110
Fig 6.26 - Perfil de Retardos de Potência no Ambiente C1, Local 1 (a) e Local 2 (b)	112
Fig 6.27 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente C1, Local 1, BC 0,9 (a); Local 2 e BC 0,9 (b); Local 4 e BC 0,7 (c); Local 4 e BC 0,9 (d)	113
Fig 6.28 - Perfil de Retardos de Potência no Ambiente C2, Local 1 (a), Local 3 (b), Local 4 (c) e Local 6 (d).....	114
Fig 6.29 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente C2, Local 1, BC 0,9 (a) e Local 6, BC 0,9 (b).....	115
Fig 6.30 - Perfil de Retardos de Potência (a) e Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos (b) no Ambiente C3, Local 2, BC 0,9.....	116
Fig 6.31 - Perfil de Retardos de Potência (a) e Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos (b) no Ambiente C4, Local 3, BC 0,9.....	117
Fig 6.32 - Perda de Propagação ao Longo da Distância para o Ambiente D1 segundo os Cálculos na Frequência (a) e no Tempo (b)	120
Fig 6.33 - Parâmetros do Canal versus a Distância para o Ambiente D1: (a) Retardo Médio; (b) Espalhamento de Retardos; (c) BC 0,7; (d) BC 0,9; (e) Número de Multipercursos; (f) Amplitude do Raio Direto.....	121

Fig 6.34 - Perfil de Retardos de Potência no Ambiente D1, a 1 metro (a), a 17 metros (b) e a 33 metros (c) de Distância TX-RX.....	122
Fig 6.35 - Perda de Propagação ao longo da Distância para o Ambiente D2 segundo os Cálculos na Frequência (a) e no Tempo (b)	123
Fig 6.36 - Parâmetros do Canal versus a Distância para o Ambiente D2: (a) Retardo Médio; (b) Espalhamento de Retardos; (c) BC 0,7; (d) BC 0,9; (e) Número de Multipercursos; (f) Amplitude do Raio Direto.....	125
Fig 6.37 - Perfil de Retardos de Potência no Ambiente D2, a 1 metro (a), a 25 metros (b) e a 49 metros (c) de Distância TX-RX.....	126
Fig C.1 - Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente A1.....	166
Fig C.2 - Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente A1.....	167
Fig C.3 - Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente A2.....	170
Fig C.4 - Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente A2.....	171
Fig C.5 - Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente A3.....	174
Fig C.6 - Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente A3.....	175
Fig C.7 - Banda de Coerência de 0,7 (a) e de 0,9 (b) x o Espalhamento de Retardos e Perfil de Retardos de Potência no Ponto 15 do <i>grid</i> (c).	176
Fig C.8 - Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente A4.....	178
Fig C.9 - Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente A4.....	179
Fig C.10 - Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente A5.....	182
Fig C.11 - Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente A5.....	184
Fig C.12 - Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente A6.....	187
Fig C.13 - Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente A6.....	188
Fig C.14 - Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente A7.....	190
Fig C.15 - Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente A7.....	190

Fig C.16 - Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente A8.....	192
Fig C.17 - Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente A8.....	193
Fig C.18 - Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente B1.....	195
Fig C.19 - Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente B1.....	197
Fig C.20 - Banda de Coerência de 0,7 (a) e de 0,9 (b) x o Espalhamento de Retardos e Perfil de Retardos de Potência no Ponto 15 do <i>grid</i> sem <i>Zoom</i> (c) e com <i>Zoom</i> (d).....	197
Fig C.21 - Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente B2.....	200
Fig C.22 - Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente B2.....	201
Fig C.23 - Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente B3.....	204
Fig C.24 - Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente B3.....	205
Fig C.25 - Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos para o Ambiente B3 para $X = 40$	206
Fig C.26 - Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente B3 para $X = 40$	207
Fig C.27 - Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente B4.....	210
Fig C.28 - Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente B4.....	211
Fig C.29 - Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente C1.....	213
Fig C.30 - Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente C1.....	213
Fig C.31 - Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente C2.....	216
Fig C.32 - Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente C2.....	217
Fig C.33 - Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente C3.....	219
Fig C.34 - Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente C3.....	219
Fig C.35 - Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente C4.....	221

Fig C.36 - Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente C4.....	222
Fig C.37 - Perda de Propagação com a Distância no Ambiente D1. Procedimento na Frequência (a) e Procedimento no Tempo (b).....	223
Fig C.38 - Parâmetros do canal <i>versus</i> a Distância para o Ambiente D1.....	224
Fig C.39 - Perfil de Retardos de Potência a 1 metro (a), 17 metros (b) e 33 metros (c) de Distância TX-RX no Ambiente D1.....	224
Fig C.40 - Perda de Propagação com a Distância no Ambiente D2. Procedimento na Frequência (a) e Procedimento no Tempo (b)	225
Fig C.41 - Parâmetros do Canal x a Distância para o Ambiente D2.....	226
Fig C.42 - Perfil de Retardos de Potência a 1 metro (a), 24 metros (b) e 48 metros (c) de Distância TX-RX no Ambiente D2.....	227

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características do Analisador de Rede.....	37
Tabela 3.2 - Configuração do Analisador de Rede e Parâmetros da Sondagem.....	42
Tabela 5.1 - Características Principais das Janelas.....	71
Tabela 6.1 - Resultados obtidos nos Ambientes A1 e A2.....	90
Tabela 6.2 - Resultados obtidos nos Ambientes A3 e A4.....	94
Tabela 6.3 - Resultados obtidos nos Ambientes A5 e A6.....	97
Tabela 6.4 - Resultados obtidos no Ambiente A7.....	99
Tabela 6.5 - Resultados obtidos no Ambiente A8.....	101
Tabela 6.6 - Resultados obtidos no Ambiente B1.....	104
Tabela 6.7 - Resultados obtidos no Ambiente B2.....	106
Tabela 6.8 - Resultados obtidos no Ambiente B3.....	107
Tabela 6.9 - Resultados obtidos no Ambiente B4.....	109
Tabela 6.10 - Resultados obtidos no Ambiente C1.....	111
Tabela 6.11 - Resultados obtidos no Ambiente C2.....	113
Tabela 6.12 - Resultados obtidos no Ambiente C3.....	115
Tabela 6.13 - Resultados obtidos no Ambiente C4.....	116
Tabela 6.14 - Resultados obtidos no Ambiente D1.....	119
Tabela 6.15 - Resultados obtidos no Ambiente D2.....	123
Tabela 7.1 - Parâmetros de Dispersão do Canal para os Ambientes Sondados.....	130
Tabela A.1 - Resumo das Medições no <i>Campus</i> da Praia Vermelha.....	140
Tabela A.2 - Resumo das Medições no <i>Campus</i> do Gragoatá.....	140
Tabela A.3 - Resumo Geral da Campanha de Medidas.....	141
Tabela C.1 - Resultados obtidos no Ambiente A1.....	163

Tabela C.2 - Resultados obtidos no Ambiente A2.....	168
Tabela C.3 - Resultados obtidos no Ambiente A3.....	172
Tabela C.4 - Resultados obtidos no Ambiente A4.....	176
Tabela C.5 - Resultados obtidos no Ambiente A5.....	180
Tabela C.6 - Resultados obtidos no Ambiente A6.....	184
Tabela C.7 - Resultados obtidos no Ambiente A7.....	188
Tabela C.8 - Resultados obtidos no Ambiente A8.....	191
Tabela C.9 - Resultados obtidos no Ambiente B1.....	193
Tabela C.10 - Resultados obtidos no Ambiente B2.....	198
Tabela C.11 - Resultados obtidos no Ambiente B3.....	202
Tabela C.12 - Resultados obtidos no Ambiente B4.....	208
Tabela C.13 - Resultados obtidos no Ambiente C1.....	211
Tabela C.14 - Resultados obtidos no Ambiente C2.....	214
Tabela C.15 - Resultados obtidos no Ambiente C3.....	218
Tabela C.16 - Resultados obtidos nos Ambientes C4.....	220
Tabela C.17 - Resultados obtidos no Ambiente D1.....	222
Tabela C.18 - Resultados obtidos no Ambiente D2.....	225

LISTA DE SIGLAS

- CETUC Centro de Estudos em Telecomunicações da PUC
- DARPA Defense Advanced Research Projects Agency
- DUT Device Under Test
- DVD Digital Vídeo Disk
- ERB Estação Rádio-Base
- FCC Federal Communication Commission
- GHZ Gigahertz
- GPS Global Positioning System
- HPIB Hewlett Packard Interface Bus
- IDFFT Inverse Discrete Fast Fourier Transform
- IEEE International Electrical and Electronic Engineering
- ITU International Telecommunication Union
- Kbps Kilobits per second
- LNA Low Noise Amplifier
- MIMO Multiple-Input Multiple-Output
- MHZ Megahertz
- mp3 Mpeg layer 3
- Mbps Megabits per second
- OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- PDA Personal Data Assessment
- PL Path Loss
- PN Pseudo Noise
- PPM Pulse Positioning Modulation
- RMS Root Mean Square
- SAGE Space-Alternating Generalized
- SISO Single-Input Single-Output
- UFF Universidade Federal Fluminense
- US Uncorrelated Scatter
- UWB Ultra Wide Band
- VCC Volt Continuous Current

- VLSI Very Large Scale Integration
- WBAN Wireless Body Area Network
- WDEN Wavelet Denoising
- WPAN Wireless Personal Area Network
- WSS Wide Sense Stationary
- WSSUS Wide Sense Stationary with Uncorrelated Scatters
- RF Radio Frequency

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada a tecnologia UWB, suas vantagens e possibilidades de utilização, para fins de contextualização. Os objetivos a serem alcançados com o trabalho serão definidos. A estrutura desta dissertação será apresentada, para que os objetivos propostos possam ser atingidos.

1.1 Histórico

Os sistemas de banda ultralarga (UWB) possibilitaram uma nova gama de aplicações para as comunicações *wireless*, como apresenta Porcino e Hirt [1]. As comunicações em UWB ganharam destaque com os trabalhos de Win e Scholtz [2-4], entre outros, na década de 90, versando sobre a transmissão de pulsos de curta duração em aplicações a baixas taxas. O primeiro artigo sobre modelos de canais estatísticos UWB foi publicado em 2001 por Cassioli, Win e Molisch [5], para ambientes *indoor*.

Com a decisão da FCC [6], em fevereiro de 2002, de permitir a operação de sistemas UWB em faixas de frequências não licenciadas, esta tecnologia recebeu um grande impulso. Deste então, as pesquisas em propagação de sinais UWB cresceram bastante, ganhando o interesse da comunidade científica e industrial. Neste esforço se destacam os grupos de pesquisa IEEE 802.15.3a e IEEE 802.15.4a. O primeiro grupo procura definir uma camada física para aplicações WPANs de curto alcance e altas taxas de transmissão (mínimo de 110 Mbps a 10 metros, para aplicações multimídia). O segundo grupo busca um novo conceito de camada física para aplicações a baixas taxas, mas com longa duração no uso de baterias (sensoriamento e pequenas redes), conforme Oppermann, Hämmäläinen e Linatti [7]. Devido à

sua importância há, atualmente, uma conferência anual dedicada exclusivamente à tecnologia UWB, promovida pelo IEEE.

O interesse em sistemas UWB se concentra, basicamente, nas áreas de radares, conforme Taylor [8] e Sistemas de Comunicações, conforme Qiu, Liu, e Shen [9], com inúmeras aplicações militares e comerciais, sendo potencialmente capazes de atingir altas taxas de transmissão.

O termo “banda ultralarga” foi originalmente utilizado pela DARPA para definir um sinal com uma largura de banda fracional $B/f_c \geq 0,25$, sendo B a largura de banda espectral dada por $B = f_f - f_i$, onde f_f e f_i são as frequências final e inicial, respectivamente, medidas nos pontos de 3 dB do espectro [10], e f_c é a frequência central na banda.

A tecnologia UWB é definida, pela FCC, como qualquer sistema de transmissão *wireless* que ocupe uma largura de banda fracional $B/f_c \geq 0,20$ ou que esta seja, em valor absoluto, maior do que 500 MHz. Neste caso, as frequências inicial e final da banda utilizada são tomadas nos pontos de 10 dB do espectro.

A permissão da FCC, acima citada, representou uma primeira tentativa rumo à padronização de um sistema cujas aplicações serão alocadas em faixas de frequências já utilizadas e licenciadas para outras aplicações. Contudo, certas restrições de densidade espectral de potência emitida devem ser respeitadas, obedecendo a uma máscara espectral definida pela FCC [6]. Esta “máscara em frequência” depende da aplicação e do ambiente (*indoor* ou *outdoor*) em que o dispositivo está operando. Para comunicações *indoor*, uma densidade espectral de potência de -41,3 dBm/MHz é permitida na faixa de frequências de 3,1 GHz a 10,6 GHz. Fora desta banda, nenhuma emissão intencional é permitida, o que proporciona uma proteção especial para as bandas críticas como a do GPS e dos sistemas celulares. Da mesma forma, as comunicações *outdoor* entre dispositivos móveis são permitidas para a mesma faixa de frequências, porém com uma máscara diferente, também definida pela FCC [6].

A União Internacional de Telecomunicações e inúmeros países estão discutindo sobre as permissões para transmissão UWB em bandas não licenciadas, que tendem a ser similares à escolhida pelos EUA, ou um subconjunto desta.

O espectro de RF, como já se sabe, é escasso e se encontra dividido e licenciado para diversos operadores e tipos de serviços. Assim sendo, a tecnologia UWB aparece como uma

resposta a este problema, oferecendo a possibilidade de reuso de frequência e coexistência com os sistemas de banda estreita já existentes. Além disso, avanços na tecnologia VLSI tiram proveito do processamento digital de sinais, permitindo implementações factíveis do *hardware* necessário aos sistemas UWB, como a construção de antenas capazes de irradiar pulsos de curta duração.

As comunicações UWB serão realizadas com potência de transmissão baixa dentro da máscara, se comparada com os sistemas mais convencionais de banda estreita, o que o limita a operar em curtas distâncias.

A Figura 1.1 mostra uma comparação qualitativa entre o espectro UWB e outros dois, considerados de banda estreita e larga.

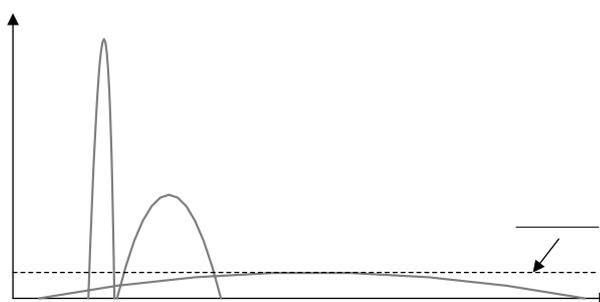


Fig 1.1 - Comparação entre Espectros.

Atualmente, estudos de propagação de sinais de banda ultralarga, visando a estruturação de sistemas de comunicações, vêm sendo realizado de duas maneiras: no domínio do tempo e no domínio da frequência. A partir da sondagem do canal UWB em um destes dois domínios, pode-se caracterizar o comportamento do canal.

No domínio do tempo, considera-se a propagação de um trem de pulsos de curta duração no canal, da ordem de nanosegundos, cada qual ocupando um espectro único, tanto maior quanto menor for sua duração, conforme Lathi [11]. A informação é modulada por estes pulsos, cujo período de repetição deve ser maior que o espalhamento de retardos (retardo RMS) do canal, sendo a PPM (*Pulse Position Modulation*) a principal modulação empregada. Pode-se ter múltiplos usuários no sistema empregando-se, também, o esquema de salto no tempo conforme propõe Scholtz [12].

Amplitude

Banda estreita TDI

Banda

No domínio da frequência, a largura de banda UWB é subdividida em múltiplas bandas, cada uma delas maior que 500 MHz para estar de acordo com a definição da FCC. O esquema de saltos em frequência também pode ser empregado para que o sistema suporte múltiplos usuários. O projeto de um sistema UWB no domínio da frequência é normalmente baseado em OFDM, fazendo uso de técnicas de espalhamento espectral para difundir a informação por toda a banda de frequência disponível. Assim, o canal é dividido em subcanais com subportadoras ortogonais, permitindo a transmissão a diferentes taxas em cada subportadora, conforme Oppermann, Hämäläinen e Linatti [7] e Xu e Liu [13].

A grande maioria das medições de canal UWB, reportada em diversos artigos da literatura [5],[14-20], concentra-se em ambientes *indoor*. Estas publicações tratam, entre outros, de parâmetros de dispersão temporal do canal tais como: retardo médio, espalhamento de retardos, banda de coerência, taxa de chegada e taxa de decaimento de *clusters* e de raios dentro dos *clusters*, sendo que estes representam um conjunto de raios provenientes de um espalhador específico. Outros assuntos que são comumente abordados nas publicações são as distribuições estatísticas que melhor se ajustam aos parâmetros medidos, as formas de se sondar o canal (no domínio do tempo ou no domínio da frequência), as propostas de modelos de canal UWB e os tipos de modulação possíveis. As larguras de banda sondadas variam normalmente de 2 a 6 GHz, para frequências acima de 1GHz.

Ainda são poucas as referências de campanhas de medidas de sinais UWB em ambientes *outdoor*. A primeira delas foi realizada por Win *et al* [21], em 1997. Eles sondaram um canal de 1,3 GHz de largura de banda com pulsos transmitidos a cada 500 ns, em uma área rural. O sinal recebido, resultante de uma média de 32 medições sequenciais, era passado por um filtro casado para produzir o perfil de retardos de potência, a partir do qual os parâmetros do canal eram obtidos.

Outros trabalhos que tratam da sondagem de canais UWB no tempo, em ambientes *outdoor*, são os de Francesco *et al* [22], para um ambiente suburbano, e os de Renzo *et al* [23], para um ambiente de floresta e terrenos montanhosos. Nestes trabalhos foi sondada a banda de 3 a 6 GHz e os dados foram adquiridos utilizando um *grid* de 7x7 posições, mantendo o transmissor fixo e variando a posição do receptor. A técnica de limpeza de perfil de retardos de potência CLEAN foi a utilizada no pós-processamento.

Os esforços de Kannan *et al* [24] e [25] representaram uma importante contribuição ao grupo de pesquisa IEEE 802.15.4a, em julho de 2004, que resultaram no artigo da referência [26], de junho de 2005. Neste trabalho, Kim *et al* sondaram, no domínio da frequência, dois

ambientes *outdoor*, em LOS e em NLOS. O primeiro ambiente é um pátio aberto entre dois edifícios e, o segundo, de uma área aberta, próxima à entrada de outro edifício. A faixa de frequências varrida foi de 3 a 6 GHz, estando as antenas de transmissão e recepção a 1,2 metro do solo. Assim como em [22] e [23], foi utilizado um *grid* de 7x7 posições para aquisição dos dados e a técnica CLEAN para a limpeza dos perfis de retardos de potência.

1.2 Aplicações e Ambientes de Interesse

Os sistemas UWB apresentam uma série de importantes vantagens, conforme relata Molisch [27]:

- Localização de espalhadores mais precisa devido à pequena resolução temporal;
- Maior robustez a desvanecimentos por multipercursos também devido à pequena resolução temporal;
- Múltiplo acesso devido às amplas bandas de transmissão;
- Possibilidade de taxas de transmissão extremamente altas;
- Comunicações sigilosas devido às baixas potências transmitidas; e,
- Possibilidade de penetração mais fácil em certos materiais devido à existência de componentes espectrais em diferentes frequências.

As pesquisas recentes têm dado foco especial para a geração de sinais UWB a altas taxas de transmissão, em redes WPANs de curto alcance, onde os dados são transmitidos em distâncias de 10 metros ou menores. Os ambientes de interesse são, principalmente, os residenciais, de trabalho e de entretenimento, buscando prover serviços em aplicações multimídia de baixo custo e baixo consumo de potência. Um caso especial de WPAN são as WBANs em que a comunicação ocorre entre dispositivos próximos ao corpo do usuário, conforme sugerem Kovacs *et al* [28].

Um caso típico para aplicação da tecnologia UWB é a substituição de cabos entre equipamentos eletrônicos, como entre um computador e seus periféricos, entre computadores, e entre equipamentos eletrônicos, como aparelhos de TV digital, tocadores de mp3 e DVD. As

taxas de transferência poderão variar de valores baixos, como 100 kbps para um *mouse* sem fio, a valores bastante elevados, como 100 Mbps, para o *download* de imagens e compartilhamento de arquivos de multimídia, de forma a se assegurar a qualidade necessária. Outra aplicação importante é a comunicação *peer-to-peer* entre dispositivos móveis, como *laptops* e PDAs que, ocasionalmente, troquem informações, configurando uma rede *ad hoc*. As tarefas que são tradicionalmente realizadas por dispositivos *bluetooth* e infravermelho poderão ser facilmente realizadas com a tecnologia UWB.

Outras aplicações emergentes são relacionadas às redes de sensoriamento, que requerem taxas de dados menores, tipicamente de 1kbps a 1 Mbps, permitindo um alcance maior, da ordem de 100 a 300 metros. Aplicações deste tipo incluem a monitoração e a segurança de ambientes de escritórios, residências, aeroportos, centros de convenções, indoor e outdoor. Desta forma, podem se beneficiar desta tecnologia o departamento de polícia, de bombeiros, de defesa civil e militar, conforme sugere Fontana [29]. Ressalta-se a importância desta tecnologia quando aplicada a missões de salvamento e resgate de vidas, com transmissão através de neve e de entulhos, nas situações de avalanche e desmoronamentos, respectivamente, em que as vítimas ficam soterradas.

Como se não bastassem todas as potenciais aplicações oferecidas pela tecnologia UWB acima citadas, esta poderá estar presente nos futuros sistemas de Quarta Geração de Telefonia Móvel, que resultarão da convergência de várias tecnologias, conforme citam Katz e Fitzek [30].

1.3 Objetivos

Uma série de questões fundamentais ainda não foi respondida de forma satisfatória pela ciência quanto à propagação em canais UWB. Parâmetros típicos de propagação para muitos tipos de ambientes ainda são desconhecidos. Uma extensa pesquisa ainda é necessária para a caracterização dos parâmetros de dispersão temporal do canal UWB em vários ambientes, de forma a se poder chegar no melhor modelo de camada física, identificando os melhores esquemas de múltiplo acesso, as melhores formas de modulação do sinal, as principais taxas de transmissão possíveis, etc...

Assim sendo, este trabalho tem por objetivos, a partir da técnica de sondagem em frequência do canal:

- Caracterizar os parâmetros de dispersão temporal do canal UWB em pequena escala (retardo médio, espalhamento de retardos e banda de coerência) em ambientes *indoor-outdoor*, *outdoor-indoor* e puramente *outdoor*;
- Apresentar a relação entre o espalhamento de retardos e a banda de coerência; e
- Analisar a perda de propagação do sinal em ambientes *outdoor*.

Os tipos de ambientes escolhidos para serem sondados segundo a técnica de varredura em frequência, na faixa de 960 MHz a 1710 MHz, acima descritos, garante o ineditismo deste trabalho.

Para alcançar estes objetivos algumas metas intermediárias foram traçadas, tais como: o detalhamento da técnica de sondagem em frequência do canal, que foi utilizada neste trabalho; a realização de campanhas de medidas para a aquisição dos dados a serem processados posteriormente; e o desenvolvimento de programa em Matlab para a análise do perfil de retardos de potência para cada ponto medido, empregando a técnica CLEAN de limpeza de perfil, para a obtenção dos parâmetros de dispersão temporal.

1.4 Estrutura

Para atingir os objetivos, acima estabelecidos, o Capítulo 1 apresenta, de forma bem sucinta, a tecnologia UWB, suas definições e vantagens, o espectro UWB e os locais de interesse para sua aplicação, de forma a contextualizar o assunto.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos fundamentais sobre canais banda-larga, seu entendimento físico e o já consagrado equacionamento matemático, apresentado inicialmente por Bello em [31].

O Capítulo 3 trata das principais técnicas de sondagem do canal UWB, dando especial destaque à técnica de sondagem em frequência, que foi a utilizada nesta dissertação. Neste capítulo é apresentado, também, o *setup* de medidas e os procedimentos adotados para a realização das medições.

O Capítulo 4 apresenta os ambientes em que as medidas foram realizadas, com uma descrição dos mesmos e a forma como estas medidas foram tomadas.

O Capítulo 5 trata do problema dos espúrios que aparecem no domínio dos retardos, resultantes da aplicação da transformada rápida inversa de Fourier, e da aplicação de funções janelas aos dados medidos. Também é apresentada a técnica de limpeza de perfil de retardos de potência, empregada nesta dissertação.

O Capítulo 6 apresenta os resultados de todo o processamento realizado, bem como os procedimentos adotados para se chegar aos mesmos. Os resultados compreendem os valores dos parâmetros de dispersão do canal em função da janela e da técnica de limpeza empregada.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 TEORIA DE CANAL BANDA LARGA

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os conceitos fundamentais sobre canais banda-larga, seu entendimento físico, e o já consagrado equacionamento matemático apresentado inicialmente por Bello [31].

2.1 Considerações Iniciais

Dá-se o nome de canal à faixa do espectro em que se pretende estabelecer uma comunicação. Desta maneira, em UWB, as bandas dos canais variam de 500 MHz a 7,5 GHz, conforme mencionado no capítulo anterior. Com uma faixa consideravelmente mais extensa que os sistemas móveis em operação atualmente, torna-se evidente o caráter científico e investigativo deste trabalho, na caracterização de um sinal de banda ultralarga nos ambientes analisados.

Nos sistemas de telecomunicações *wireless* modernos, as ERB's que provêm a cobertura de determinada área localizam-se mais próximas dos usuários, criando as micro ou pico células dos sistemas WPAN. Esta situação faz com que a propagação da onda eletromagnética se dê, principalmente, por visibilidade e, também, por reflexões, difrações e transmissões nas estruturas e objetos (*indoor* e *outdoor*). A esse mecanismo se dá o nome de propagação por multipercurso, que é quando a energia chega ao usuário via diferentes percursos de propagação.

O multipercurso é responsável por profundas variações na amplitude e na fase do sinal nas transmissões de faixa estreita. Já nas transmissões de banda larga, o multipercurso causa

uma seqüência de ecos, cópias do sinal original, porém atrasadas e atenuadas. Seja qual for a largura de banda utilizada, o efeito dos multipercursos afeta seriamente o desempenho do sistema, provocando a degradação da qualidade do sinal. Os sistemas UWB por disporem de uma banda ultralarga mostram-se mais robustos aos desvanecimentos seletivos em freqüência.

Com o objetivo de melhor compreender o comportamento do canal durante as transmissões, Bello [31] desenvolveu um estudo por meio de funções de sistema que relacionam o sinal de entrada com o de saída, nos domínios do tempo e da freqüência. Em seu trabalho, Bello considerou o canal rádio móvel como um filtro linear aleatoriamente variante no tempo, sendo seu comportamento regido pelas funções de sistema, que são as respostas do canal quando excitado por um pulso de curta duração em sua entrada. Este estudo pode ser realizado tanto no domínio do tempo quanto no da freqüência, como será explicado nos parágrafos seguintes. Bello, além de realizar todo o equacionamento, concluiu que os canais podem ser caracterizados de forma simétrica por funções que apresentam o mesmo comportamento, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da freqüência, sendo por isso chamadas de funções duais, que serão apresentadas a seguir.

2.2 Funções de Sistema do Canal

Nos parágrafos a seguir serão apresentadas as funções de sistema desenvolvidas por Bello para a caracterização do canal nos domínios do tempo (função espalhamento temporal) e da freqüência (função espalhamento Doppler). Também serão apresentadas duas funções que relacionam estes dois domínios (funções seletividade em freqüência e espalhamento espectral), que complementam a análise, ajudando na visualização dos efeitos físicos gerados pelos multipercursos.

2.2.1 Caracterização de Canais Determinísticos

Com o objetivo de introduzir os conceitos acerca deste estudo, trata-se o canal como um filtro linear com resposta impulsiva deterministicamente variante no tempo. As entrada e saída de tal filtro podem, então, ser descritas nos domínios do tempo e da freqüência, o que conduz a quatro possíveis funções de transmissão usadas na caracterização do canal.



Fig 2.1 - Modelo do Canal como Filtro Linear.

2.2.1.1 Espalhamento Temporal

$z(t)$

No domínio do tempo, a observação do espalhamento temporal causado pelos multipercursos representa uma maneira bem usual de se estudar este fenômeno, em que os sinais recebidos apresentam-se atenuados e defasados em relação ao sinal original.

No modelo de filtro proposto, representa-se o sinal real como:

$$x(t) = \text{Re}[z(t)e^{j2\pi f_0 t}] \quad (2.1)$$

em que $z(t)$ é a envoltória complexa do sinal e f_0 é a frequência da portadora.

A envoltória complexa da resposta impulsiva do filtro equivalente ao canal é dada por $h(t, \tau)$, uma vez que tal resposta impulsiva também é variante no tempo. Desta forma, a envoltória complexa do sinal $z(t)$, de entrada do filtro, se relaciona com a envoltória do sinal $w(t)$, de saída do filtro, através da seguinte relação de convolução:

$$w(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} z(t - \tau)h(t, \tau)d\tau \quad (2.2)$$

Fisicamente, $h(t, \tau)$ pode ser interpretado como a resposta do canal no tempo t devido a uma entrada impulsiva aplicada há τ segundos. Para o canal fisicamente realizável, não existe saída pra $\tau < 0$ e, para um período de observação T , os limites da integração na equação (2.2) são 0 e T .

O conhecimento de $h(t, \tau)$, além de permitir a determinação de certos parâmetros de dispersão temporal do canal, tratados adiante, possibilita a identificação de todos os possíveis

espalhadores no ambiente de medida considerado. Todo retardo que chega com τ segundos de atraso está associado a uma elipse de retardos, cujos focos são o transmissor e o receptor. Conforme pode ser observado na Figura 2.2, cada um dos raios que percorre a mesma distância tem, portanto, o mesmo retardo τ . O registro de todas as amplitudes dos sinais espalhados que chegam ao receptor após a chegada do raio direto fornece $h(t, \tau)$. Vale ressaltar que não é possível distinguir entre diferentes percursos simplesmente pela diferença entre o tempo de chegada. A direção espacial de chegada do raio também deve ser levada em conta, o que pode ser conseguido pelo deslocamento Doppler, conforme será visto a seguir.

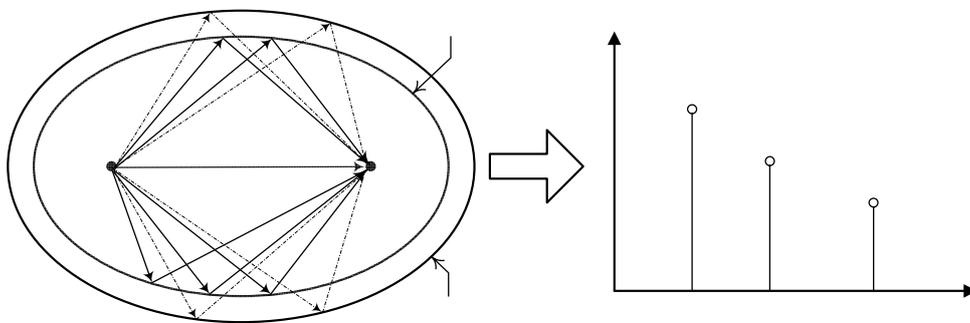


Fig 2.2 - Elipses de Retardos para Dois Raios.

2.2.1.2 Espalhamento Doppler

No domínio da frequência, a caracterização do canal é feita pela função $H(f, \nu)$, que é dual à função $h(t, \tau)$, ou seja, estas representam o mesmo fenômeno físico, porém em domínios diferentes, frequência e tempo, respectivamente. A função espalhamento Doppler $H(f, \nu)$ relaciona o espectro de saída do canal com seu espectro de entrada, de maneira similar a $h(t, \tau)$, que relaciona entrada e saída no domínio do tempo. Assim, o espectro de saída $W(f)$ é obtido como uma superposição de réplicas do espectro de entrada $Z(f)$, filtradas e deslocadas em frequência. Analogamente tem-se:

$$W(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z(f - \nu) H(f - \nu, \nu) d\nu \quad \text{Raio direto} \quad (2.3)$$

RX

A variável v representa o deslocamento em frequência que cada componente sofre devido ao movimento relativo entre o receptor e o transmissor.

A diferença de fase entre componentes de multipercurso é dada por:

$$\Delta\phi = \beta\Delta l = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l \quad (2.4)$$

onde Δl é a diferença entre os percursos destas componentes.

A Figura 2.3 considera que, para pequenos deslocamentos “ d ” do móvel (relativamente à distância ao espalhador), existem dois raios chegando com ângulos aproximadamente iguais. Nota-se que a diferença de percurso entre estes dois raios pode ser considerada

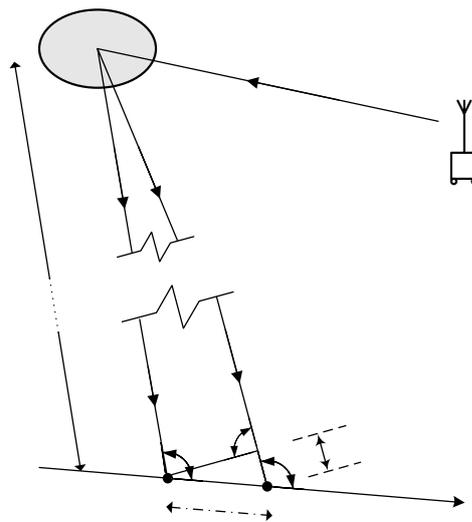
$$\Delta l = d \cdot \cos \alpha \quad (2.5)$$

e como

$$d = v \cdot \Delta t \quad (2.6)$$

obtem-se

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot v \cdot \Delta t \cdot \cos \alpha \text{ [rad]}. \quad (2.7)$$



Espalhador

Fig 2.3 - Surgimento do Efeito Doppler.

Assim, o deslocamento Doppler é definido pela expressão:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cdot \cos \alpha \text{ [Hz]} \quad (2.8)$$

em que a taxa de variação temporal da fase é relacionada a um deslocamento em frequência, para cada componente e cujo valor máximo é v/λ . Na equação (2.8), v é a velocidade do móvel, λ é o comprimento de onda do sinal e α é o ângulo entre a componente recebida e a direção de deslocamento. Os percursos com $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ (raios chegando pela frente do móvel) geram variações positivas, enquanto os percursos com $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ (raios vindo por trás do móvel) geram variações negativas.

Matematicamente, $H(f, v)$ representa o ganho e o deslocamento em frequência ν que cada espalhador, em movimento, insere a uma senóide com frequência f .

2.2.1.3 Seletividade em Frequência

Esta função, proposta por Bello, torna a caracterização do canal mais completa, por englobar os dois domínios, representando as variações em uma banda de frequência ao longo do tempo.

Ao se transmitir um sinal que ocupa uma determinada banda $\Delta f = f_2 - f_1$, pode-se obter informações do canal analisando o comportamento da envoltória (amplitude resultante da soma de vários sinais complexos) que chega ao receptor. Se as frequências f_1 e f_2 forem próximas, as variações de amplitude e fase observadas serão semelhantes, mas à medida em que a distância entre estas frequências aumenta, tem-se variações de amplitude e fase decorrelacionadas. Assim, durante uma transmissão pode-se ter um desvanecimento afetando diferentes componentes do sinal, de forma independente, o que caracteriza o efeito da seletividade em frequência observado.

De forma similar à equação (2.1) anterior, pode-se expressar a envoltória complexa do sinal na saída do filtro em termos do espectro do sinal de entrada deste filtro equivalente ao canal por:

$$w(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z(f)T(f, t) \exp\{j2\pi ft\}df \quad (2.9)$$

onde $Z(f)$ é o espectro de amplitude do sinal de entrada e $T(f,t)$ é a função de transferência variante no tempo.

A função $T(f,t)$ é a transformada de Fourier direta da função $h(t,\tau)$, com relação à variável τ e, também, é a transformada de Fourier inversa da função $H(f,\nu)$, com relação à variável ν , conforme equação (2.10) abaixo:

$$T(f, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \tau) \exp\{-j2\pi f\tau\}d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f, \nu) \exp\{j2\pi \nu t\}d\nu \quad (2.10)$$

Da equação (2.10), conclui-se que as funções $h(t,\tau)$ e $T(f,t)$ se relacionam via transformada direta e inversa de Fourier em τ e f , respectivamente, pelas equações:

$$T(f, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \tau) \exp\{-j2\pi f\tau\}d\tau \quad (2.11)$$

$$h(t, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(f, t) \exp\{j2\pi f\tau\}df \quad (2.12)$$

Da mesma maneira, as funções $H(f, \nu)$ e $T(f, t)$ também se relacionam via transformada direta e inversa de Fourier em t e ν , respectivamente, pelas equações:

$$H(f, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(f, t) \exp\{-j2\pi\nu t\} dt \quad (2.13)$$

$$T(f, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f, \nu) \exp\{j2\pi\nu t\} d\nu \quad (2.14)$$

A Figura 2.4 mostra uma típica resposta em frequência em um ambiente medido, onde se podem notar desvanecimentos profundos em algumas frequências. O gráfico de fase tem um comportamento linear na maior parte do tempo, exceto nas frequências em que houve um profundo desvanecimento.

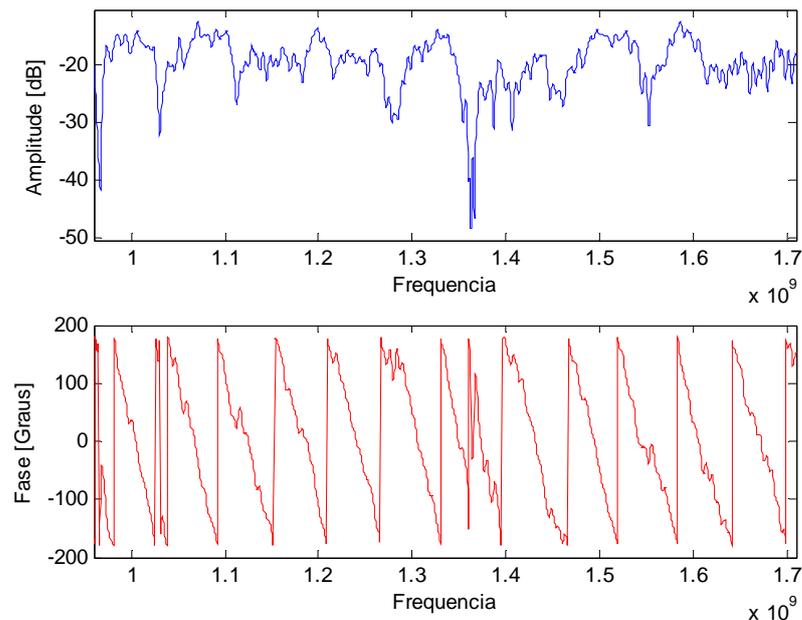


Fig 2.4 - Amplitude e Fase de uma Varredura em Frequência.

Como será explicado no próximo capítulo, a função $T(f, t)$ pode ser obtida diretamente através de medições do canal aplicando-se a técnica de sondagem de varredura em frequência. Conhecendo-se tal função, pode-se fazer estatísticas a respeito dos parâmetros de dispersão temporal do canal. A banda de coerência é um desses parâmetros, que é obtida diretamente de tal função. Por transformação de Fourier os parâmetros retardo médio e espalhamento de retardos (retardo eficaz ou retardo RMS) também podem ser obtidos.

A banda de coerência representa a largura de faixa dentro da qual o canal reage de maneira similar a um sinal sendo transmitido. Desta forma, a transmissão é dita ser de faixa estreita ou de faixa larga, se o sinal transmitido tiver uma largura de banda menor ou maior do que a banda de coerência do canal, respectivamente.

O retardo médio é uma média de todos os retardos que caracterizam os multipercursos. Já o espalhamento de retardos representa o desvio padrão da função de densidade de probabilidade que caracteriza o tempo de chegada dos multipercursos no receptor, provenientes de um sinal transmitido em $t = 0$.

2.2.1.4 Espalhamento Espectral

A função $S(\nu, \tau)$ também engloba os dois domínios, tempo e frequência, relacionando a dispersão temporal do canal com respeito ao deslocamento de frequência ν causado por um espalhador com retardo τ . Desta forma, tem-se de forma explícita o comportamento dispersivo do canal nos dois domínios. Tal função é obtida representando a entrada $h(t, \tau)$ como a transformada inversa de seu espectro $S(\nu, \tau)$, como aparece em:

$$h(t, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, \nu) \exp\{j2\pi\nu t\} d\nu \quad (2.15)$$

Por analogia à equação (2.1), pode-se expressar o envelope complexo do sinal na saída do filtro em termos do espectro, $S(\nu, \tau)$, na saída deste filtro equivalente ao canal, substituindo-se a equação (2.15) na equação (2.2).

$$w(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} z(t - \tau) S(\tau, \nu) \exp\{j2\pi\nu t\} d\nu d\tau \quad (2.16)$$

Como foi dito anteriormente, a identificação dos principais espalhadores por meio da função $S(\nu, \tau)$ só é possível devido à relação existente entre o deslocamento de frequência Doppler e o ângulo de chegada do sinal, apresentado na equação (2.8) que define o desvio de frequência Doppler.

Neste trabalho, como não houve deslocamento do receptor em relação ao transmissor, o sinal recebido na saída do filtro teria uma variação temporal dada somente pelo movimento dos espalhadores, mas este era mínimo, pois as medidas foram realizadas em horários nos quais não havia movimento de pessoas. Isto representa um deslocamento Doppler praticamente nulo no domínio da frequência. Desta forma, esta função $H(f, \nu)$, bem como a função $S(\nu, \tau)$, que levam em conta o deslocamento Doppler, não foram tratadas neste trabalho.

2.3 Relações entre as Funções de Sistema do Canal

Conforme foi mostrado anteriormente, existe uma relação dual entre $h(t, \tau)$ e $H(f, \nu)$, uma vez que ambas representam o mesmo fenômeno físico, apenas em domínios diferentes. A relação entre estas funções se dá via transformada de Fourier:

$$H(f, \nu) = \iint h(t, \tau) e^{-j2\pi f t} e^{-j2\pi \nu \tau} dt d\tau \quad (2.17)$$

A Figura 2.5 mostra o relacionamento entre as quatro funções, já apresentadas através de transformadas de Fourier. Nela, as representações F^d e F^i indicam a aplicação de uma transformada de Fourier direta e inversa, na variável indicada, respectivamente.

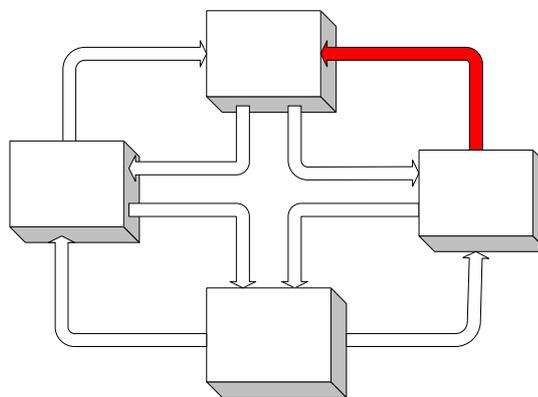


Fig 2.5 - Relações entre as Funções de Sistema do Canal.

2.3.1 Canais Aleatoriamente Variantes no Tempo - Canais Reais

O canal rádio móvel, em situações reais, não é deterministicamente variante no tempo, mas apresenta variação temporal de forma aleatória, sendo caracterizado como um processo estocástico. Assim sendo, o estudo das funções $h(t,\tau)$ e $T(f,t)$ com apenas duas variáveis determinísticas não representa uma situação de canal prático, mas são úteis no entendimento de tais conceitos. O canal, portanto, será tratado estatisticamente. A descrição de uma estatística precisa requer, contudo, o conhecimento da função densidade de probabilidade conjunta de todas as funções de sistema já apresentadas, o que é impraticável. Um método menos preciso, porém mais realista, é se trabalhar com a análise da função autocorrelação das funções de sistema descritas, o que é estatisticamente correto, dadas as características aleatórias do canal, conforme Parsons [32]. Tais funções de autocorrelação são descritas por:

$$\begin{aligned}
 R_h(t,s;\tau_1,\tau_2) &= E\left[h(t,\tau_1)h^*(s,\tau_2)\right] \\
 R_H(f,m;\nu_1,\nu_2) &= E\left[H(f,\nu_1)H^*(m,\nu_2)\right] \\
 R_T(f,m;t,s) &= E\left[T(f,t)T^*(m,s)\right] \\
 R_S(\tau_1,\tau_2;\nu_1,\nu_2) &= E\left[S(\tau_1,\nu_1)S^*(\tau_2,\nu_2)\right]
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

onde $E[\cdot]$ representa o valor esperado e $*$ o conjugado complexo das variáveis. As letras têm o seguinte significado: τ_1 e τ_2 representam retardos no tempo, as variáveis ν_1 e ν_2 são deslocamentos em frequência; t e s são os instantes de tempo; f e m são frequências.

Tais funções de autocorrelação do canal passam a se relacionar via Transformada Dupla de Fourier (direta e inversa) das variáveis tempo (t e s), retardo (τ_1 e τ_2), frequência (f e m) e deslocamento Doppler (ν_1 e ν_2), conforme mostra a Figura 2.6.

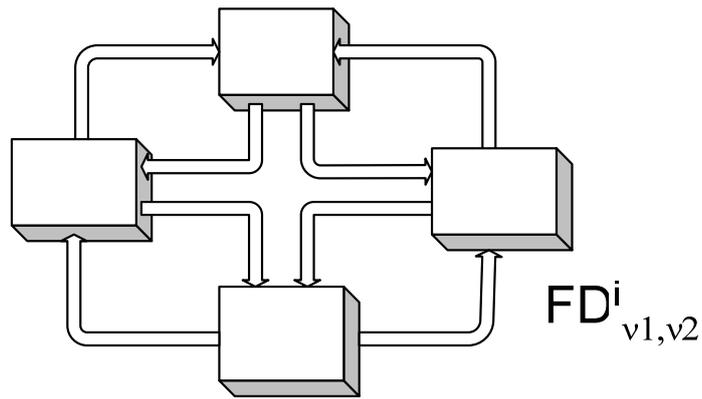


Fig 2.6 - Relações entre as Funções Autocorrelação do Canal.

2.3.2 Considerações para Canais Práticos

As funções de autocorrelação podem ser simplificadas considerando-se duas características próprias aos canais rádio-móveis, que possuem estatísticas de desvanecimento que podem ser assumidas estacionárias para pequenos intervalos de tempo e para pequenas distâncias. Desta maneira, as funções autocorrelação apresentam um comportamento estacionário que depende dos instantes t e s apenas para pequenos intervalos ξ , onde $\xi = s - t$, e não apenas dos instantes absolutos de tempo t e s . Assim, o canal passa a ser dito estacionário no sentido amplo (*WSS – Wide-Sense Stationary*), onde as estatísticas de desvanecimento não mudam dentro de uma pequena janela de tempo de observação ξ . Para estes canais WSS, as funções autocorrelação de $h(t,\tau)$ e $T(t,f)$ podem ser reescritas como:

$$R_h(t, t + \xi; \tau_1, \tau_2) = R_h(\xi; \tau_1, \tau_2) \tag{2.19}$$

$$R_T(f, m; t, t + \xi) = R_T(f, m; \xi) \tag{2.20}$$

Parsons [32] mostra que canais WSS também apresentam espalhadores decorrelacionados. A função autocorrelação de $S(v,\tau)$ é a transformada dupla de Fourier da função autocorrelação de $h(t,\tau)$ e é escrita como:

$$R_s(\tau_1, \tau_2; v_1, v_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} R_h(t, s; \tau_1, \tau_2) \exp\{j2\pi(v_1 t - v_2 s)\} dt ds \tag{2.21}$$

Sabendo que $\xi = s - t$, a expressão fica:

$$R_S(\tau_1, \tau_2; \nu_1, \nu_2) = \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} \exp\{j2\pi t(\nu_1 - \nu_2)\} dt}_{\delta(\nu_1 - \nu_2)} \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} R_h(\xi; \tau_1, \tau_2) \exp\{-j2\pi \nu_1 \xi\} d\xi}_{P_S(\tau_1, \tau_2; \nu_1)}$$

$$R_S(\tau_1, \tau_2; \nu_1, \nu_2) = \delta(\nu_1 - \nu_2) \cdot P_S(\tau_1, \tau_2; \nu_1) \quad (2.22)$$

De forma análoga, obtém-se para a função autocorrelação de $H(f, \nu)$:

$$R_H(f, m; \nu_1, \nu_2) = \delta(\nu_1 - \nu_2) \cdot P_H(f, m; \nu_1) \quad (2.23)$$

onde P_S e P_H representam a densidade espectral de potência dos domínios $S(\nu, \tau)$ e $H(f, \nu)$, respectivamente, e $\delta(\nu_1 - \nu_2)$, um impulso em $\nu_1 = \nu_2$.

Nas funções R_S e R_H observa-se um descorrelacionamento sempre que $\nu_1 \neq \nu_2$, indicando que só existe correlação quando os deslocamentos Doppler associados a duas frequências f e m são idênticos.

A segunda característica, que simplifica as funções autocorrelação, considera que os canais têm espalhadores descorrelacionados (*US – Uncorrelated Scattering*), ou seja, a contribuição de espalhadores com retardos diferentes não é correlata. Assim como nas expressões relativas ao desvio Doppler R_S e R_H , as funções de autocorrelação nas variáveis tempo e retardo serão:

$$R_S(\tau_1, \tau_2; \nu_1, \nu_2) = \delta(\tau_1 - \tau_2) \cdot P_S(\tau_1; \nu_1, \nu_2) \quad (2.24)$$

$$R_h(t, s; \tau_1, \tau_2) = \delta(\tau_1 - \tau_2) \cdot P_h(t, s; \tau_1) \quad (2.25)$$

onde:

$$P_S(\tau_1; \nu_1, \nu_2) = \int R_H(\Omega; \nu_1, \nu_2) e^{j2\pi\Omega\tau_1} d\Omega \quad (2.26)$$

$$P_h(\xi; \tau_1) = \int R_T(\xi; \Omega) e^{j2\pi\Omega\tau_1} d\Omega \quad (2.27)$$

P_S e P_h representam, respectivamente, a densidade espectral de potência dos domínios $S(\nu, \tau)$ e $h(t, \tau)$ e Ω ($\Omega = m - f$) é a variável de deslocamento em frequência.

Com desenvolvimento semelhante ao anterior, aplicando-se uma transformada dupla de Fourier à função autocorrelação de $T(f, t)$, obtém-se a função autocorrelação de $h(t, \tau)$ seguinte:

$$R_h(t, s; \tau_1, \tau_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} R_T(f, m; t, s) \exp\{-j2\pi(f\tau_1 - m\tau_2)\} df dm \quad (2.28)$$

Sabendo que $\Omega = m - f$, ao substituir na equação (2.28), obtém-se:

$$R_h(t, s; \tau_1, \tau_2) = \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} \exp\{j2\pi f(\tau_2 - \tau_1)\} df}_{\delta(\tau_2 - \tau_1)} \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} R_T(\Omega; t, s) \exp\{j2\pi\tau_2\Omega\} d\Omega}_{P_h(t, s; \tau_2)}$$

$$R_h(t, s; \tau_1, \tau_2) = \delta(\tau_2 - \tau_1) \cdot P_h(t, s; \tau_2) \quad (2.29)$$

De forma análoga, obtém-se:

$$R_S(\tau_1, \tau_2; \nu_1, \nu_2) = \delta(\tau_2 - \tau_1) \cdot P_S(\tau_1; \nu_1, \nu_2) \quad (2.30)$$

onde P_S e P_h representam, respectivamente, a densidade espectral de potência dos domínios $S(\nu, \tau)$ e $h(t, \tau)$ e $\delta(\tau_2 - \tau_1)$, um impulso em $\tau_2 = \tau_1$.

Nas funções R_S e R_h o impulso indica que diferentes espalhadores, cada qual contribuindo com um retardo, terão suas contribuições correlacionadas apenas quando

apresentarem os mesmos retardos, o que ocorre quando $\tau_2 = \tau_1$. Desta forma, Bello [31] demonstrou a dualidade tempo-freqüência nas simplificações WSS e US, permitindo que um canal US no domínio dos retardos possa ser considerado um canal WSS no domínio da freqüência.

2.3.3 Canais WSSUS

Considerando o canal simultaneamente estacionário no sentido amplo no domínio do tempo (com espalhamentos Doppler descorrelacionados) e com espalhadores descorrelacionados (descorrelacionamento no domínio dos retardos), chega-se a uma classe de canais conhecidos como WSSUS. Tais canais podem ser representados por:

$$\begin{aligned}
 R_h(t, t + \xi; \tau_1, \tau_2) &= \delta(\tau_2 - \tau_1) P_h(\xi; \tau_1) \\
 R_H(f, f + \Omega; \nu_1, \nu_2) &= \delta(\nu_2 - \nu_1) P_H(\Omega; \nu_1) \\
 R_T(t, t + \xi; f, f + \Omega) &= R_T(\xi; \Omega) \\
 R_S(\tau_1, \tau_2; \nu_1, \nu_2) &= \delta(\tau_2 - \tau_1) \delta(\nu_2 - \nu_1) P_S(\tau_1; \nu_1)
 \end{aligned}
 \tag{2.31}$$

Estas expressões se relacionam via transformada de Fourier da seguinte forma:

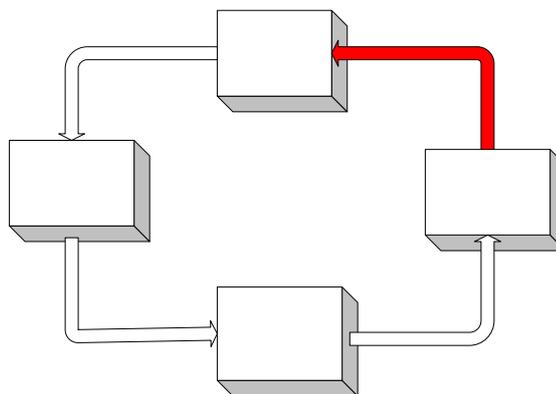


Fig 2.7 - Relações entre as Funções Autocorrelação de Canais WSSUS.

Como interpretação física das autocorrelações anteriores conclui-se que a equação de R_h indica estacionaridade no sentido amplo no domínio do tempo e espalhadores

descorrelacionados no domínio dos retardos; a equação de R_H indica estacionaridade no sentido amplo no domínio da frequência e espalhadores descorrelacionados no domínio dos deslocamentos Doppler; a equação de R_T indica estacionaridade no sentido amplo nos dois domínios, tempo e frequência e é utilizada para se calcular a banda de coerência, como será visto adiante; a equação de R_S indica espalhadores descorrelacionados nos dois domínios, retardo e deslocamento Doppler.

2.4 Caracterização de Canais Rádio-Móveis Reais

A teoria, apresentada anteriormente, faz perceber que a caracterização de canais práticos pode ser muito complexa, caso não seja assumida certa estacionaridade para pequenos intervalos de tempo, conforme foi assumida neste trabalho.

Neste trabalho, para a caracterização do canal é utilizado o modelo de duas etapas proposto por Bello. Em primeiro lugar, o canal é analisado em pequena escala, dentro de um período de tempo ou área geográfica pequenos, em comparação com o período das variações lentas do mesmo, de modo que certas funções características podem ser consideradas como estacionárias. Em segundo lugar, o comportamento do canal em larga escala (grandes áreas) é estudado em função das estatísticas de pequena escala.

2.4.1 Caracterização em Pequena Escala

O primeiro passo para a caracterização de canais em pequena escala consiste em se determinar as funções que caracterizam os efeitos de dispersividade temporal, obtidos via $h(t,\tau)$, e de seletividade em frequência, obtidos via $T(f,t)$. Ambos os efeitos são ocasionados pela propagação por multipercursos e caracterizam completamente a dispersividade temporal do canal.

A técnica de sondagem em frequência utilizada neste trabalho, e descrita no Capítulo 3, permite a obtenção, a partir de $T(f,t)$, da banda de coerência do canal e, a partir de $h(t,\tau)$, do retardo médio e do espalhamento de retardos, todos estes, estatísticas de pequena escala.

2.4.1.1 Banda de Coerência

A banda de coerência é a menor separação em frequência para a qual a função de autocorrelação $R_T(\xi, \Omega)$ corresponda a um determinado nível de correlação (normalmente 0,9 e 0,7). Como na técnica de sondagem em frequência as informações são gravadas em um determinado tempo t fixo, correspondente a uma varredura, tem-se $\xi = 0$.

Conforme Shenoi [33], para funções periódicas determinísticas, o valor da autocorrelação é dado por:

$$R_X(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} X(t) \cdot X(t + \tau) dt \quad (2.32)$$

Já para funções não periódicas determinísticas, a expressão que define a autocorrelação é:

$$R_X(\tau) = \int_{-T}^{+T} X(t) \cdot X(t + \tau) dt \quad (2.33)$$

A função $T(f, t)$ da forma como foi obtida não é determinística, sendo função do ambiente de medidas e podendo ser considerada um processo estocástico, com amostras aleatórias. Foram estas considerações que nortearam toda a teoria de canal apresentada anteriormente.

Desta forma, segundo Shenoi [33], para estes tipos de sinais, a autocorrelação entre amostras deve ser tomada como uma estimativa pela seguinte expressão:

$$R_T(\Omega) = E \left[T(f) \cdot T^*(f + \Omega) \right] = \int_{-\infty}^{+\infty} T(f) \cdot T^*(f + \Omega) df \quad (2.34)$$

Considerando a natureza discreta da sondagem, a equação (2.34) pode ser reescrita como:

$$[R_T(\Omega)]_p = \sum_{n=1}^{N-p} [T]_n \times [T]_{n+p}^* \quad (2.35)$$

onde:

- $[T]_n$ é o vetor contendo as amostras da função $T(f,t)$;
- N é o número de amostras discretas utilizadas na sondagem;
- p é o índice de posição do vetor $[R_T(\Omega)]_p$, variando de 0 a $N-1$, representando o espaçamento em frequência entre as amostras de $T(f,t)$;

Vale destacar neste ponto que em muitos trabalhos científicos, como em [34], é comum adquirir o sinal à medida que o móvel se desloca. Desta maneira, o cálculo da banda de coerência do sinal deve levar em conta este tempo de medição. Assim, tem-se uma matriz $[T]_{f \times t}$ e não mais apenas um vetor $[T]_{f \times t_{\text{fixo}}}$ como foi considerado neste trabalho. Neste caso, a banda de coerência deve ser calculada, a partir da matriz $[T]_{f \times t}$, segundo uma estimativa, dada pela seguinte expressão:

$$[R_T(\Omega)]_p = \frac{1}{N-p} \sum_{n=1}^{N-p} [T]_n \times [T]_{n+p}^* \quad (2.36)$$

Considerando a expressão (2.35), a separação em frequência Ω , para cada amostra que define o vetor R_T é:

$$\Omega = p \times \Delta f \quad (2.37)$$

em que Δf é constante, representando a diferença entre duas frequências discretas consecutivas, obtida de acordo com a teoria apresentada no Capítulo 3. Quando $\Omega = 0$ ($p = 0$), tem-se o máximo de correlação, à qual vai diminuindo a medida que o espaçamento entre frequências Ω vai aumentando ($p = 1, 2, \dots, N-1$).

A determinação da banda de coerência do canal permite que se saiba que tipo de sinal está trafegando: se é de banda estreita ou de banda larga; e que tipo de desvanecimento presente está afetando o canal: seletivo em frequência ou plano. O sinal é considerado de banda estreita quando sua banda é menor do que a banda de coerência do canal e é considerado de banda larga quando sua banda é maior do que a banda de coerência do canal.

A Figura 2.8 exemplifica a função R_T com a indicação dos níveis 0,7 e 0,9, para um dos ambientes medidos.

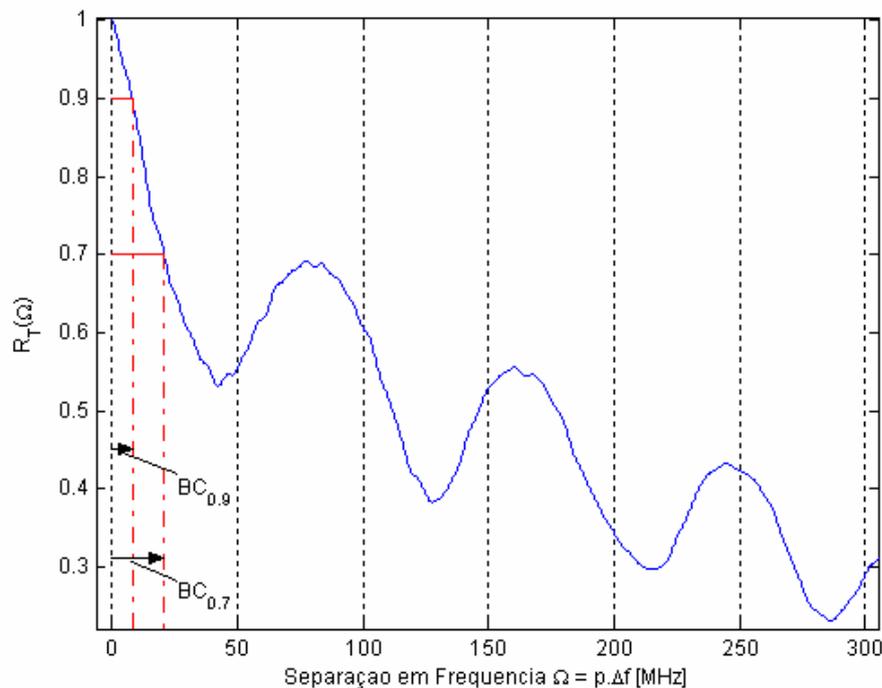


Fig 2.8 - Função de Correlação $R_T(\Omega)$ Típica com Indicação das Bandas de Coerência para os Níveis de Correlação 0,7 e 0,9.

2.4.1.2 Perfil de Retardos de Potência

Este perfil representa o nível de potência recebida em cada componente de multipercurso, no domínio dos retardos. Ele é obtido através da densidade de potência $P_h(\xi; \tau_1)$. Como as informações são gravadas em um valor de tempo t fixo, correspondendo a uma varredura, tem-se $\xi = 0$. Então:

$$P_h(\tau) = P_h(\tau; \xi = 0) = h(t, \tau) \cdot h^*(t, \tau) = |h(t, \tau)|^2 \quad (2.38)$$

onde $|h(t, \tau)|$ é o módulo da resposta impulsiva.

Na técnica de sondagem em frequência utilizada neste trabalho e explicada no Capítulo 3, a obtenção da resposta impulsiva $h(t, \tau)$, para um determinado valor de t , foi feita aplicando-se uma transformada inversa discreta de Fourier à função $T(f, t)$ medida.

$$h(t, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(f, t) e^{j2\pi f \tau} df \quad (2.39)$$

O perfil de retardos de potência P_h também pode ser obtido da seguinte maneira, conforme a equação (2.40) a seguir:

$$P_h(\tau; \xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_T(\Omega; \xi) e^{j2\pi \tau \Omega} d\Omega \quad (2.40)$$

Deste perfil de retardos de potência são inferidos o retardo médio $\bar{\tau}$ e o espalhamento de retardos σ_τ , também chamado de retardo RMS, que é o desvio padrão do retardo médio. As equações a seguir permitem retirar de $P_h(\tau)$ as estatísticas de primeira e segunda ordem, média e variância, respectivamente.

$$\bar{\tau} = \frac{\int \tau P_h(\tau) d\tau}{\int P_h(\tau) d\tau} \quad (2.41)$$

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{\int (\tau - \bar{\tau})^2 P_h(\tau) d\tau}{\int P_h(\tau) d\tau}} \quad (2.42)$$

Uma vez que, na técnica de sondagem do canal, os dados adquiridos são discretos, as equações acima podem ser reescritas como:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \tau_i \times P_h(\tau_i)}{\sum_{i=0}^{N-1} P_h(\tau_i)} \quad (2.43)$$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} (\tau_i - \bar{\tau})^2 \times P_h(\tau_i)}{\sum_{i=0}^{N-1} P_h(\tau_i)}} \quad (2.44)$$

Vale ressaltar que o conhecimento do espalhamento de retardos (retardo RMS) é importante para a definição da taxa de transmissão de bits do sinal que trafega pelo canal [35].

A Figura 2.9 mostra um exemplo de um perfil de retardos de potência para um dos ambientes medidos.

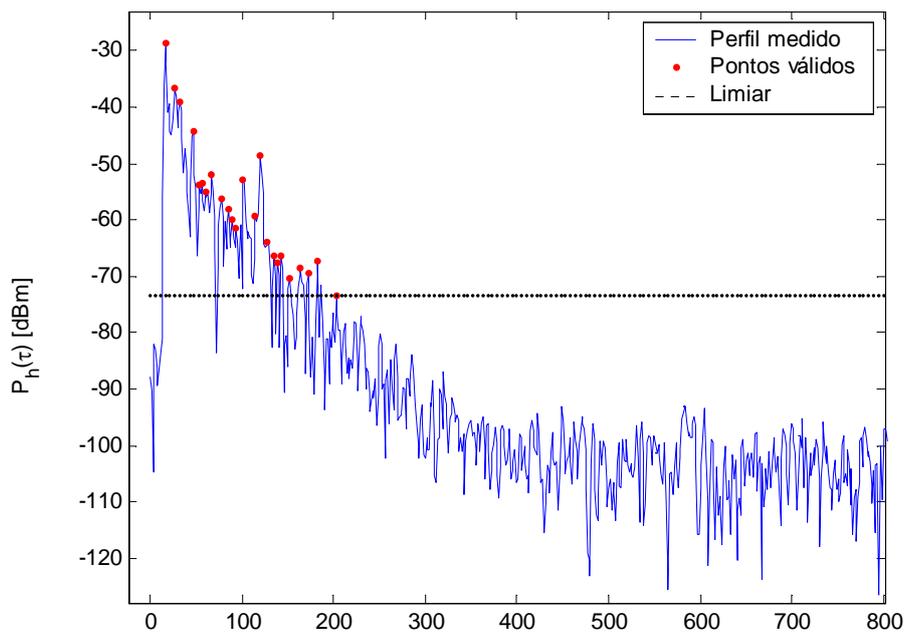


Fig 2.9 – Exemplo de um Perfil de Retardos de Potência Medido.

2.4.2 Caracterização em Larga Escala

Em áreas maiores, as mudanças no ambiente local propiciam a não estacionaridade do canal. Assim, o levantamento dos parâmetros estatísticos não pode mais ser realizado diretamente das funções de autocorrelação do canal. Um procedimento a ser adotado é se estudar o comportamento estatístico dos parâmetros em áreas homogêneas e consecutivas. A análise deste comportamento é feita pelo levantamento de uma função de distribuição de probabilidade, de forma a conhecer a percentagem de tempo (ou área), onde determinado parâmetro excede determinado valor.

Este método é desvantajoso já que essas funções de probabilidade são limitadas a ambientes de características semelhantes. Para diversificar a análise, relações entre os parâmetros podem tentar ser obtidas, como por exemplo a relação entre a banda de coerência e o espalhamento de retardos e, também, entre o retardo médio e o espalhamento de retardos.

Não é objetivo deste trabalho fazer a caracterização do canal UWB em larga escala, motivo pelo qual esta caracterização não será abordada.

3 TÉCNICA DE SONDAGEM DO CANAL UWB

Este capítulo trata das principais técnicas de sondagem do canal UWB, dando especial destaque à técnica de sondagem de varredura em frequência, que foi a utilizada neste trabalho. Serão apresentados, também, o *setup* de medidas e os procedimentos adotados para a realização das medições.

3.1 Técnica de Sondagem no Domínio do Tempo

Apesar de apenas a técnica de sondagem no domínio da frequência ter sido utilizada neste trabalho, uma breve explicação da técnica de sondagem no domínio do tempo será apresentada, dada à equivalência entre ambas, [36] e [37].

No domínio do tempo, a sondagem do canal UWB vem sendo realizada, conforme Oppermann, Hämäläinen e Linatti [7]: pela transmissão de uma seqüência de pulsos de duração muito curta (sondagem impulsiva) ou de uma seqüência pseudo-aleatória (Sondagem por DSSS - *Direct Sequence Spread Spectrum*).

No primeiro caso, um pulso de curtíssima duração é transmitido pelo canal e a sua resposta impulsiva é medida com o auxílio de um Osciloscópio de Amostragem Digital. No segundo caso, uma seqüência de pulsos é enviada, sendo a resposta impulsiva obtida através de um receptor de correlação. Em ambos os casos tem-se que a resolução temporal é inversamente proporcional à largura de banda medida.

Os grandes inconvenientes da sondagem no tempo são a complexidade na geração destes pulsos e os problemas decorrentes da deconvolução do sinal transmitido a partir do sinal recebido, conforme relatam Foerster, Pendergrass e Molisch [38].

As duas técnicas de sondagem no tempo serão apresentadas a seguir.

3.1.1 Sondagem Impulsiva

O objetivo da maioria das campanhas de medidas é a determinação da resposta impulsiva do canal que, no domínio do tempo, é medida diretamente do sinal recebido. No caso mais simples isto pode ser conseguido excitando-se o canal com um pulso de duração muito curta e armazenando o sinal recebido com um Osciloscópio de Amostragem Digital. Apesar da simplicidade, esta técnica não é das mais utilizadas por causa da dificuldade de se gerar pulsos curtos com grande energia e da sensibilidade das medidas quanto às fontes de interferência impulsiva e de banda estreita, conforme Molisch [27]. A largura de banda da sondagem depende da forma e da largura do pulso gerado. Assim sendo, mudando-se tal largura, a alocação espectral também é alterada. Quanto mais simples for o formato do pulso, mais fácil será fazer a deconvolução do sinal recebido, em que a resposta impulsiva do canal é obtida removendo-se, do sinal recebido, a forma de onda do pulso transmitido.

Segundo este método, um pulso de RF é transmitido, periodicamente, a uma taxa baixa e com uma elevada relação potência de pico / potência média, para que réplicas distorcidas de baixa amplitude do pulso transmitido sejam detectadas.

A Figura 3.1 ilustra os principais equipamentos utilizados na sondagem do canal no domínio do tempo.

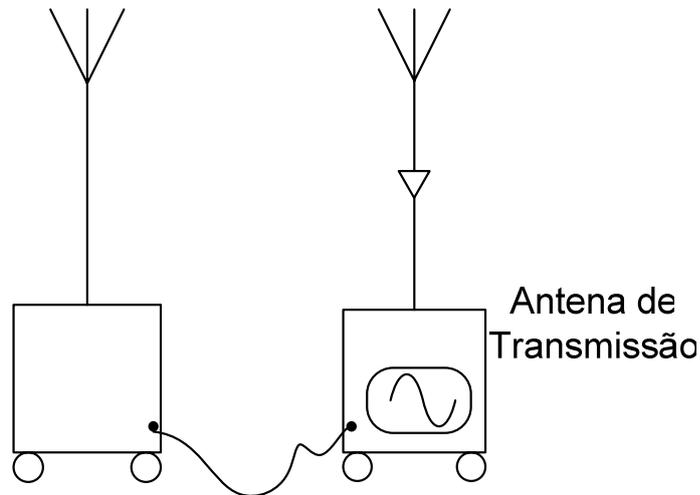


Fig 3.1 - Setup para Sondagem no Domínio do Tempo.

A antena transmissora envia um pulso, periodicamente, que é amplificado e capturado pelo osciloscópio na recepção. Para haver sincronismo entre o pulso transmitido e o recebido, o gerador de pulsos é conectado ao osciloscópio [14], [15], [39]. A obtenção da resposta impulsiva devido a um único pulso, de largura T_{bb} , é obtida pela deconvolução do pulso transmitido com o pulso recebido. O período de repetição no envio do pulso, T_{REP} , após várias deconvoluções sucessivas, determinar a resposta impulsiva do canal.

A Figura 3.2 mostra um trem de pulsos e a resposta impulsiva do canal. Pode ser observado, também, a indicação da largura de cada pulso (T_{bb}), o período de repetição (T_{REP}) e o tempo máximo de cada resposta impulsiva (τ_{max}).

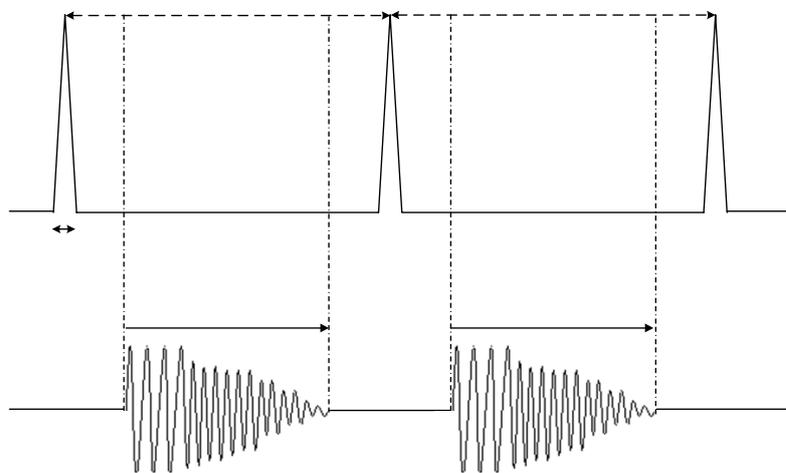


Fig 3.2 - Trem de Pulsos e Resposta Impulsiva do Canal.

A resolução da sonda, que é o menor intervalo de tempo para que componentes de multipercurso diferentes possam ser distinguidas, é função da escolha do valor T_{bb} . Assim, quanto menor for este valor, maior será o número de componentes de multipercurso detectadas no receptor.

A escolha do valor T_{REP} determina o tempo máximo de observação da resposta do canal a um único pulso sem que haja sobreposição com o pulso seguinte, conforme propõe Rappaport [40]. Logo, T_{REP} deve ser pequeno o suficiente para permitir a caracterização da resposta temporal do canal a um único pulso, mas grande o suficiente para assegurar que tal resposta tenha se extinguido antes da transmissão do próximo pulso.

3.1.2 Sondagem por DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*)

Medidas mais robustas da resposta impulsiva do canal são conseguidas transmitindo-se um sinal banda larga com uma relação baixa de potência de pico / potência média e fazendo-se a correlação do sinal recebido com a seqüência transmitida. Esta correlação será uma boa aproximação da resposta impulsiva se a autocorrelação do sinal transmitido se aproximar de uma função delta conforme explica Parsons [32], como ocorre no caso em que o sinal transmitido é uma seqüência PN. A resolução mínima no domínio dos retardos em tal sistema é função da largura de banda do sinal transmitido como, por exemplo, o inverso da taxa de chip da seqüência PN. A geração de uma seqüência de pulsos de curta duração pode ser mais difícil do que a geração de um único pulso. Por esta razão, a largura de banda máxima realizável limita-se a cerca de 3 GHz, conforme Cassioli e Durantini [16].

Teoricamente, o trem de impulsos pode ser gerado utilizando um código de máximo comprimento (seqüência m) e calculando-se a sua função autocorrelação na recepção. A seqüência m , de comprimento N , é utilizada para espalhar a energia do sinal da portadora transmitida na banda de interesse, cuja faixa é duas vezes a taxa de chip, que por sua vez é a taxa de bit da seqüência m .

A saída do correlator é amostrada na taxa de chip e cada valor representa um certo retardo causado pelo canal. A amplitude da amostra está relacionada com a intensidade do percurso de propagação correspondente. A resolução de retardos é inversamente proporcional à taxa de chip, fazendo com que o retardo máximo seja NT_C , onde T_C é o comprimento do chip.

Em princípio, esta técnica de sondagem pode ser aplicada ao contexto UWB. Como visto, a largura de banda do sinal que sonda o canal depende diretamente da taxa de chips usada. A faixa mínima de 500 MHz, que caracteriza um sinal UWB, é conseguida com uma taxa de chip de 250 MHz. Para larguras de sondagem acima de 1 GHz, a taxa de chip precisará ser maior que 500 MHz, aumentando muito a complexidade do gerador da seqüência m , o que limita a utilização desta técnica. Porém, se a faixa de freqüência a ser sondada estiver na parte inferior da banda UWB, definida pela máscara da FCC, esta técnica poderá ser implementada mais facilmente.

A Figura 3.3 procura esquematizar o sistema de sondagem do canal baseado na transmissão de um trem de pulsos.

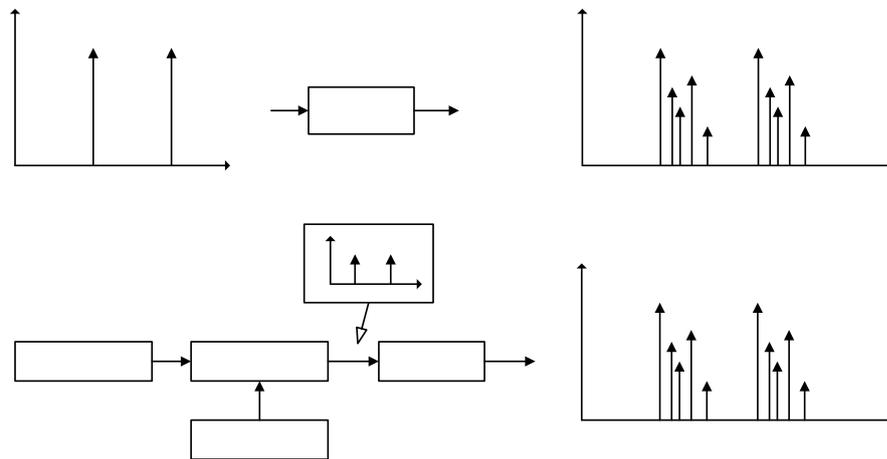


Fig 3.3 - Esquema para Sondagem DSSS.

Na técnica de sondagem no domínio do tempo a utilização de pulsos de curtíssima duração para a excitação do canal requer antenas muito complexas, que sejam capazes de irradiar os rápidos transientes do pulso de excitação, sob pena do pulso transmitido ser severamente espalhado e distorcido no tempo. Exemplos de antenas especiais que foram desenvolvidas para a caracterização do canal UWB no domínio do tempo são apresentadas por Yazdandoost e Kohono [41] e Qing, Xia e Wu [42].

$s(t)$

Canal - $h(t)$

t

3.2 Técnica de Sondagem no Domínio da Frequência

A técnica de sondagem no domínio da frequência utiliza um Analisador de Rede Vetorial como transceptor para a aquisição das amplitudes e fases de pontos discretos, tomados dentro de uma banda de frequência, previamente estabelecida, excitando-se uma portadora senoidal sobre tais pontos. A medição desta banda em vários pontos do ambiente permite a determinação da função $T(f,t)$ do canal, da forma indicada na equação (3.1).

$$[T]_{f \times t} = [A]_{f \times t} \times \left[\cos \left([F]_{f \times t} \times \frac{\pi}{180} \right) + j \cdot \sin \left([F]_{f \times t} \times \frac{\pi}{180} \right) \right] \quad (3.1)$$

em que $[A]_{f \times t}$ e $[F]_{f \times t}$ representam as amplitudes e fases para cada ponto de frequência discreta dentro da banda utilizada na sondagem. Os produtos na equação (3.1) são feitos termo a termo e são mantidos na forma matricial por questões de facilidade computacional. Neste trabalho, todavia, o tempo t foi mantido fixo, correspondendo a uma “varredura”. Assim, a função $T(f,t)$ obtida é composta apenas de amostras em frequências discretas dentro da banda sondada.

3.2.1 Setup de Medição

O *setup* de medidas foi composto pelos seguintes equipamentos, cedido, por empréstimo, pelo Centro de Estudos em Telecomunicações (CETUC) da PUC/RJ: um analisador de rede vetorial, um amplificador de baixo ruído, duas antenas discônicas, um computador, uma fonte de tensão de 12VCC, cabos coaxiais e conectores.

O Analisador de Rede Vetorial é um equipamento que permite a medição de dispositivos de microondas. O Analisador gera um sinal de RF que é aplicado ao dispositivo sob análise (DUT - *Device Under Test*), permitindo que uma série de testes de transmissão/reflexão sejam realizados, o que possibilita a caracterização do dispositivo através de informações como: função transferência, perdas de retorno, atenuações e ganhos.

O sinal gerado pelo Analisador de Rede Vetorial (fazendo uma varredura em frequência) é aplicado na porta de entrada do DUT sendo, então, colhido na sua porta de

saída, para ser processado pelo Analisador. Como o sinal gerado é conhecido, *a priori*, informações de amplitude, fase e retardo de grupo podem ser obtidas a partir do parâmetro S, conforme a equação (3.2) abaixo:

$$S = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (3.2)$$

Assim sendo, os valores de amplitudes aquisitados representam uma relação entre as potências de entrada e de saída, o que caracteriza a função de transferência T do canal.

Neste trabalho foi utilizado um Analisador de Rede Vetorial da *Hewlett Packard* modelo HP8714ET, cujas especificações estão apresentadas na Tabela 3.1.

Analisador de Rede Vetorial HP 8714ET	Especificação
Resolução Máxima	1Hz
Potência de Saída Máxima	+16 dBm
Potência de Entrada Máxima	+26 dBm
Range Dinâmico Máximo	100 dB

Tabela 3.1 - Características do Analisador de Rede.

No procedimento de medidas, uma senóide gerada pelo Analisador é aplicada, através de sua porta de saída, ao dispositivo que se quer caracterizar. Este sinal é, então, gerado sucessivamente em cada uma das frequências discretas que compõem a banda de interesse, “varrendo-a”, sendo aplicado ao dispositivo sob análise. É por este motivo que esta técnica de sondagem é também conhecida como Técnica de Varredura em Frequência. Após a propagação pelo canal, o sinal é aquisitado por uma antena receptora conectada a um LNA, que está ligado na porta de entrada (porta de recepção) do Analisador, para ser processado e analisado. Desta forma, informações de amplitude e fase do sinal na recepção podem ser aquisitadas formando o vetor de amostras $[T]_{f \times t}$. Em cada varredura da banda de interesse, tais informações são disponibilizadas em canais diferentes do analisador, sendo esta uma funcionalidade típica deste equipamento, o que facilita o pós-processamento dos dados adquiridos, uma vez que estes são armazenados separadamente, um para amplitude e o outro para a fase.

Com o objetivo de se estudar os fenômenos de propagação, diversos autores [43-45] propuseram que o dispositivo a ser analisado fosse o canal rádio-móvel, com o uso das antenas conectadas aos terminais do analisador.

Além do Analisador, foram incorporados ao *setup* final: um computador para armazenar os dados medidos e controlar as varreduras; um amplificador de baixo ruído (LNA) para dar ganho ao sinal na recepção; uma fonte de 12 VCC para alimentar o LNA; e duas antenas discônicas, além dos cabos coaxiais e conectores utilizados na interconexão dos equipamentos de RF.

O computador é conectado ao analisador por meio de um cabo GPIB (*Hewlett Packard Interface Bus*) e uma placa de aquisição específica, também da HP, cujo protocolo de comunicação foi criado via um programa em Matlab[®] rodando no computador. Este programa, portanto, é o responsável pelo controle das varreduras e pela aquisição e armazenamento dos dados, uma vez que o analisador não é capaz de armazenar internamente as respostas em frequência discretas do canal. O Apêndice B contém toda a programação desenvolvida para a aquisição e processamento dos dados.

As antenas banda-larga utilizadas são similares às desenvolvidas por Bergman [46]: antenas do tipo discônicas, omnidirecionais no plano horizontal, a fim de permitir que a energia se propague e atinja os espalhadores existentes, de tal sorte que réplicas do sinal provenientes de todas as direções possam ser capturadas. Algumas variações do dielétrico e da distância entre o plano de terra e a carga de topo da antena foram realizadas nas antenas que foram utilizadas nos testes de propagação. Esta distância foi mantida em 1 cm, para um dielétrico de $\epsilon_r \approx 1$ (cedido pelo CETUC), pois com ela a perda de retorno foi a mais constante possível, dentro da banda de interesse (960 MHz a 1710 MHz). Nesta banda, o ganho das antenas é de 2,14 dBi e a perda de retorno, em média, abaixo de -15 dB. A perda de retorno indica o quanto de energia, entregue à antena, está sendo refletida de volta no cabo, e valores de perda de retorno abaixo de -15 dB são considerados bons. As antenas foram mantidas a 1,50 metro do solo, em todas as medidas.

Na Figura 3.4 são apresentados os gráficos obtidos com o auxílio do analisador de redes vetorial e representam a perda de retorno nas antenas utilizadas.

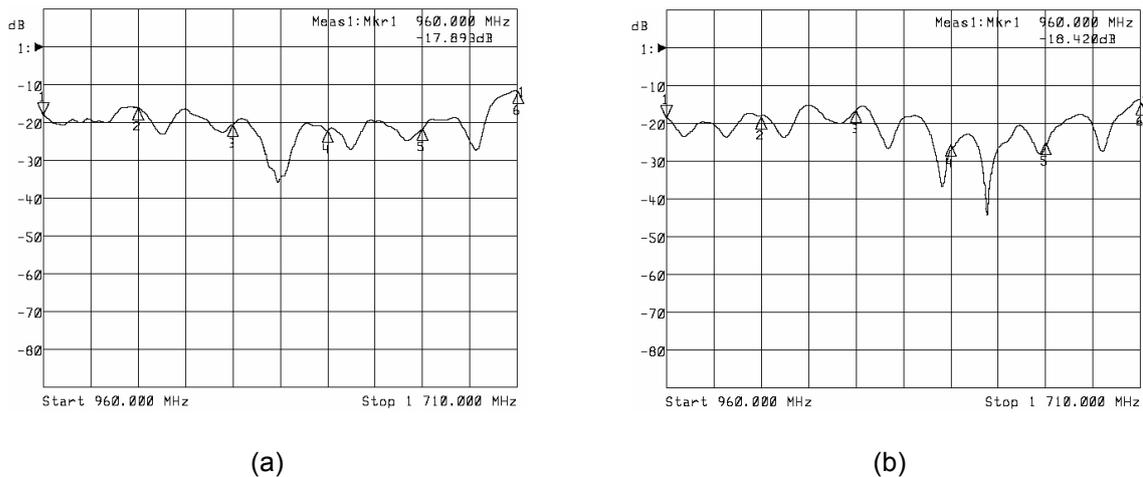


Fig 3.4 – Medidas de Perda de Retorno nas Antenas: (a) Transmissão; (b) Recepção.

A Figura 3.5 mostra as antenas utilizadas nos testes de propagação.



Fig 3.5 - Antenas Utilizadas nas Medições.

O LNA utilizado, fabricado pela MINI-Circuits, modelo ZLR-2150, tem faixa de amplificação de 950 MHz a 2150 MHz, ganho de 25 dB na faixa de 950 MHz a 1800 MHz e funciona com uma tensão de alimentação contínua de 12 VCC. O LNA é um elemento importante para se ter um sinal mais forte na recepção, sobretudo devido à atenuação de espaço livre e perdas em conectores e cabos coaxiais.

Os cabos coaxiais utilizados são do tipo RG-213 e RG-58U interligados ao restante do *setup* por meio de conectores tipo N e SMA.

A Figura 3.6 mostra a foto tirada do *setup*, montado no laboratório de Propagação da Universidade Federal Fluminense.



Fig 3.6 – Foto do Sistema Utilizado na Sondagem em Freqüência.

3.2.2 Configuração do Analisador Vetorial

Como foi visto no item 3.2.1, para utilização do Analisador de Rede Vetorial como sonda, são necessários cabos e conectores para ligá-lo ao conjunto de transmissão e recepção, que serão acoplados através do canal rádio-móvel. Como o analisador está sempre comparando um sinal transmitido, conhecido à *priori*, com o sinal recebido do canal, os efeitos dos dispositivos a ele ligados não devem influenciar na medida final. Isto é conseguido através do processo de calibração, no qual o analisador incorpora os efeitos destes dispositivos, compensando suas perdas, sendo esta uma funcionalidade já disponível internamente no analisador, denominada *Enhanced Calibration*. Desta forma, a calibração é de fundamental importância, e deve ser feita antes e de se iniciar a medição de qualquer ambiente.

A calibração se faz através de uma ligação direta, entre todos os equipamentos que compõem o *setup*, ao analisador. Contudo, não é possível tal ligação em um sistema ligado por duas antenas. A calibração realizada, sugerida por Zaghloul, Fattouche e Morrison [47],

foi feita com a ligação direta de todos os cabos e conectores utilizados, entre as portas de entrada e saída de RF do analisador, sem as antenas. Vale ressaltar que, em uma situação ideal, esta calibração poderia ser realizada com os equipamentos da Figura 3.7, colocando-se as duas antenas em uma câmara anecóica, separadas suficientemente para que os efeitos de campo próximo pudessem ser desconsiderados. Contudo, na falta de uma câmara anecóica, o processo de calibração foi realizado como explicado anteriormente.

O processo de calibração, portanto, incorpora a perda de propagação nos cabos e conectores utilizados para ligar as antenas de transmissão e recepção nas respectivas portas de saída e entrada do analisador. Com a calibração, há uma mudança nos pontos de referência de tempo, da porta do analisador para os pontos de calibração localizados no final dos cabos (conectores) que são ligados às antenas. Assim sendo, as informações de amplitude e fase recebidas passam a ser exclusivamente do canal rádio-móvel.

O atraso percebido nos sinais medidos, de aproximadamente 2 ns, confirma o retardo introduzido pela propagação de sinal através das antenas de transmissão e de recepção, uma vez que as mesmas não foram incluídas no processo de calibração.

Em todas as medidas realizadas, a potência de saída do analisador foi mantida em 10 dBm, que foi suficiente para difundir o sinal pelo ambiente em análise, e ser recebido com a intensidade necessária para o pós-processamento. Este valor (10dBm) foi também utilizado na calibração e não comprometeu a integridade do analisador, cuja potência máxima de entrada é de 26 dBm.

Estando o *setup* devidamente pronto para a medição, a varredura de uma banda B com N pontos igualmente espaçados era iniciada, sendo o espaçamento em frequência dado por $\Delta f = B/N - 1$. Nesta técnica, as medidas são realizadas no domínio da frequência, $T(f,t)$, e as respostas no domínio dos retardos, $h(t,\tau)$, são obtidas, indiretamente, através de uma Transformada de Fourier Inversa, aplicada ao vetor dado pela equação (3.1) que define $[T]_{f \times t}$.

O retardo máximo τ_{MAX} e a resolução temporal $\Delta\tau$ conseguidos são resultantes da configuração do analisador, adotada durante as medidas. O retardo máximo representa o maior valor de retardo que se consegue medir, e está associado ao sinal resultante do somatório dos multipercursos, que resultam na maior distância entre os pontos de transmissão e recepção. Já a resolução temporal, indica a diferença mínima no tempo de chegada entre dois raios, para que estes possam ser distinguidos pelo analisador. Em outros termos,

representa a distância mínima percorrida por dois raios, para a qual o analisador ainda consegue diferenciá-los.

Pelas propriedades da Transformada de Fourier [48], temos as seguintes correspondências entre os domínios da frequência e dos retardos.

$$\Delta\tau = \frac{1}{B} \quad (3.3)$$

$$\tau_{MAX} = \frac{1}{\Delta f} = \frac{N-1}{B} \quad (3.4)$$

Os valores configurados no analisador e parâmetros resultantes adotados nas campanhas de medidas realizadas encontram-se resumidos na Tabela 3.2.

Parâmetros	Valor	Unidade
Faixa de Frequência	960 a 1710	MHz
Largura de Banda	750	MHz
Espaçamento em Frequência entre Amostras - Δf	0,46875	MHz
Número de Amostras Varridas	1601	-
Resolução Temporal - $\Delta\tau$	1,33	ns
Retardo Máximo - τ_{MAX}	2133	ns
Tempo de varredura	696	ms
Potência de Transmissão	+10	dBm
Ganho do LNA	25	dB
Ganho das Antenas	2,14	dBi

Tabela 3.2 - Configuração do Analisador de Rede e Parâmetros da Sondagem.

A largura de banda de 750 MHz foi dividida em 1601 amostras discretas, espaçadas de 0,47 MHz. Assim, para cada varredura, tinha-se 1601 senóides com 10 dBm de amplitude cada, cujas frequências valiam $[960 + n.\Delta f]$ MHz, com $n=1,2,3,\dots,1600$.

A resolução $\Delta\tau = 1,33$ ns significa que componentes de multipercursos separadas de 40 cm podem ser distinguidas pela sondagem. Já o tempo máximo de observação da resposta impulsiva, ou seja, o retardo máximo observado, $\tau_{MAX} = 2133$ ns permite que percursos com até 640 m possam ser detectados.

Desta forma, para cada varredura em frequência obteve-se, no domínio dos retardos, uma resposta impulsiva com 1601 amostras separadas de τ , sendo a primeira amostra em $\tau = 0$ e a última em $\tau = \tau_{MAX}$.

O tempo de varredura no Analisador Vetorial, configurado através da função *auto sweep*, foi mantido em 696 ms, representando o menor tempo de varredura que o equipamento consegue fornecer para a faixa de frequências varrida e número de pontos tomados.

3.2.3 Considerações quanto aos Parâmetros Escolhidos

A faixa de frequências, bem como todo o procedimento geral das medições realizadas, foi escolhida de tal sorte que se pudesse gerar comparações com alguns resultados encontrados por Barros [49]. Neste trabalho, a faixa de frequência foi de 950 MHz a 1800 MHz, o que resultou em uma banda de 800 MHz, e a técnica de sondagem utilizada foi em frequência, com o objetivo de medir os parâmetros de dispersão temporal do canal em ambientes indoor.

A faixa de 960 MHz a 1710 MHz foi aqui escolhida por compreender uma banda não utilizada pelas empresas operadoras de telefonia móvel que operam na banda E (a faixa de 957,5-960 MHz é utilizada para *downlink*) e na banda D (a faixa de 1710-1725 MHz é utilizada para o *uplink*). Como as medidas foram realizadas em ambientes de transição *indoor-outdoor* e *outdoor* puramente, estas ficavam sujeitas a interferências destes sistemas.

Para se assegurar a inexistência de qualquer sinal interferente de outros sistemas de telecomunicações foi feito um levantamento da utilização do espectro de frequência nos ambientes medidos, na faixa em questão, utilizando um Analisador Espectral, cedido por empréstimo, pelo CETUC.

O tempo de varredura (696 ms) e o espaçamento em frequência entre as amostras (0,47 MHz), resultantes da escolha da faixa de frequências (750 MHz) e do número de pontos amostras (1601), mostraram-se adequados para o não comprometimento das estatísticas de

banda de coerência e de estacionaridade do canal durante as medidas. Em outras palavras, nem o espaçamento de frequências foi muito grande, de forma a não comprometer o cálculo da banda de coerência, nem o número de pontos (amostras) adotado gerou um tempo de varredura que prejudicasse as premissas de estacionaridade do canal.

A técnica de sondagem do canal em frequência é, contudo, criticada por não apresentar uma medida de tempo real conforme observa Rappaport [40]. O argumento é que a completa varredura da banda de interesse exigiria um determinado tempo, durante o qual a resposta em frequência do canal, sabido ser variante no tempo, poderia mudar rapidamente, resultando em uma medida errônea da resposta ao impulso. No entanto, tal técnica está de acordo com a teoria apresentada no Capítulo 2 e vem sendo utilizada por diversos autores, [17], [20], [22-23], [26], [37], [50-53]. Conforme foi apresentado anteriormente, para pequenos intervalos de tempo ou para pequenos deslocamentos do móvel, o canal pode ser considerado estacionário no sentido amplo.

4 CENÁRIOS DE MEDIDAS

Este capítulo apresenta uma descrição dos ambientes em que as medidas foram realizadas, que estão localizados nos *Campi* da Praia Vermelha e do Gragoatá, da Universidade Federal Fluminense (UFF). Serão apresentados, também, os procedimentos adotados para realizar estas medidas.

4.1 Descrição dos Cenários de Medidas

Conforme foi apresentado no Capítulo 1, um sistema UWB operando comercialmente pode prover cobertura em ambientes indoor oferecendo boa qualidade de serviço a altas taxas de transmissão. Contudo, vislumbrando um cenário futuro de convergência entre as tecnologias *wireless*, é de se esperar que haja manutenção da cobertura e da qualidade de serviço quando o terminal estiver em movimento, passando de um ambiente *indoor* para outro *outdoor*.

É no contexto da futura convergência das tecnologias *wireless* que os cenários foram escolhidos para realização das campanhas de medidas e são constituídos por ambientes *indoor-outdoor*, *outdoor-indoor*, *indoor-outdoor-indoor* e puramente *outdoor*.

Quando o móvel passa de um ambiente *indoor* para outro *outdoor* ele passa de uma região de cobertura menor (picocélula) para outra de cobertura maior (microcélula), num processo que é, atualmente, denominado de *handoff* vertical. Um dos maiores desafios no desenvolvimento das redes de quarta geração (4G) é a criação de um protocolo de *handoff* vertical capaz de permitir que os usuários se movimentem entre os diferentes tipos de redes,

mantendo a comunicação ininterrupta e com a qualidade necessária, conforme McNair e Zhu [54].

Este trabalho objetiva levantar os parâmetros de dispersão temporal do canal UWB, nos ambientes acima citados, que possam ser válidos para a compreensão de alguns fenômenos de propagação, para a faixa de frequência sondada e para o tipo de sondagem realizada. Vale ressaltar que os estudos sobre UWB ainda são recentes, e que este trabalho, da forma como foi proposto e realizado, encontra poucas referências em que se basear, contribuindo para a ciência, sobretudo pela comparação com o trabalho realizado por Barros [49], que adotou conduta semelhante, mas para ambientes unicamente *indoor*.

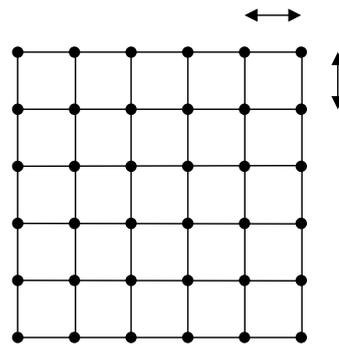
As medidas foram realizadas em 18 locais diferentes nos *Campi* da Praia Vermelha e do Gragoatá, da Universidade Federal Fluminense (UFF), à noite (depois do expediente de serviço) e nos finais de semana, para evitar a contaminação das mesmas pelo deslocamento das pessoas. Cuidados especiais foram adotados para que os pesquisadores que estavam no ambiente de medição não obstruíssem a linha de visada e nem interferissem na estacionaridade do ambiente, ao se movimentarem. No que pese a movimentação de pessoas ser uma situação mais real de prestação de um serviço de telecomunicações sem fio, esta condição não foi avaliada neste trabalho para que se pudesse considerar o canal estacionário, conforme a teoria apresentada no Capítulo 2.

As medidas foram tomadas em visada, pois além de sugerir uma possível cobertura para sistemas UWB em tais ambientes, assegura o bom funcionamento da técnica de limpeza de perfil CLEAN, tratada no capítulo seguinte.

Os ambientes foram divididos em quatro grupos, assim definidos:

- Ambientes *indoor-outdoor* e *outdoor-indoor*;
- Ambientes próximos a construções;
- Ambientes mais amplos, próximos a construções e jardins;
- Ambientes totalmente abertos;

Com exceção dos ambientes totalmente abertos, nos quais as medidas foram realizadas em linha reta, nas outras situações as medidas foram realizadas utilizando-se um *grid* de 36 posições, como mostra a Figura 4.1.

Fig 4.1 - *Grid* de 6 x 6 pontos.

Este procedimento, que também foi adotado em outros trabalhos [14], [19], [49] e [53], permite o levantamento das estatísticas de pequena escala, uma vez que em cada ponto do *grid* o sinal é recebido de forma descorrelacionada dos demais. Este critério é fundamental para que as considerações sobre espalhamento descorrelacionado, apresentadas no capítulo anterior, sejam válidas.

Segundo Parsons [32], a distância de $0,38\lambda$ entre dois sinais medidos representa o primeiro zero de correlação entre os mesmos. Na prática, $0,5\lambda$ é uma distância considerada com folga para se conseguir uma baixa correlação.

Para que as dimensões do *grid* utilizado não fossem muito grandes e para que a situação de descorrelação fosse alcançada, um valor de compromisso de 15 cm entre os pontos do *grid* foi adotado. Como a faixa de frequência sondada é muito larga, os valores de λ em seus extremos são diferentes, variando de 17,54 cm na frequência superior a 31,25 cm na frequência inferior. Assim, $0,38\lambda$ destes valores fornece, respectivamente, 6,7 cm e 11,9 cm. Desta forma, conclui-se que o espaçamento de 15 cm entre os pontos do *grid* é suficiente para assegurar a descorrelação entre os sinais medidos.

Nas seções a seguir serão apresentados os mapas dos cenários de testes, com os respectivos posicionamentos do transmissor e do receptor, e uma breve descrição do local.

O Apêndice A apresenta um resumo dos locais medidos, com os dias e horários em que as medições foram realizadas.

4.2 Ambientes *Indoor-Outdoor* e *Outdoor-Indoor*

Os ambientes em que a situação de transitoriedade foi configurada foram os seguintes, representando cenários em que o usuário sai de um ambiente *indoor* para outro *outdoor*:

- No *campus* da Praia Vermelha: segundo e terceiro andares do Bloco D (Prédio Novo da Faculdade de Engenharia da UFF) e o *hall* de entrada deste mesmo prédio, nas situações *indoor-outdoor* e *outdoor-indoor*; biblioteca da Faculdade de Engenharia, na situação *indoor-outdoor*; parede do terceiro andar do Bloco E, nas situações *indoor-outdoor*, *outdoor-indoor* e *outdoor*. Estes ambientes estão representados pelas Figuras 4.2 a 4.6.
- No *campus* do Gragoatá: entre os Blocos O e N, na situação *indoor-outdoor*. Este ambiente está representado pela Figura 4.12.

As medições nos dois sentidos (*indoor-outdoor* e *outdoor-indoor*) foram particularmente interessantes, uma vez que o posicionamento do transmissor influencia diretamente na quantidade de multipercursos. Estando a antena de transmissão localizada internamente, o sinal estará mais “confinado”, provendo cobertura para aquele local interno e para pontos exteriores nas proximidades. Assim, espera-se que existam mais multipercursos nos pontos medidos internos e que estes sejam mais fortes e que uma maior quantidade de sinal possa se propagar através da porta de saída do local para o exterior. Por outro lado, estando a antena transmissora na parte de fora, o sinal estará sujeito a menos espalhadores e mais distantes, espera-se que o raio direto chegue mais forte nos pontos medidos no exterior e que menos energia penetre no prédio. A energia que penetra no prédio, estará mais fraca e, portanto, contribuirá com menos multipercursos.

O Bloco D encontra-se construído ao lado do Bloco E, criando um corredor entre eles, havendo uma passarela ligando os dois, com intenso fluxo de pessoas. Por estarem construídos em terrenos com diferentes alturas, o segundo e terceiro andares do Bloco D se comunicam com o terceiro e quarto Andares do Bloco E, respectivamente. Os *halls* de saída deste Bloco D para o E, tanto no segundo quanto no terceiro andares, possuem, basicamente, mesas, cadeiras, poltronas, plantas de decoração e bebedouros. Já a entrada pelo Bloco E, através da passarela, é pequena, na forma de um curto corredor.

O *hall* de entrada do Bloco D, no primeiro andar, é uma área grande com algumas pilastras de sustentação do prédio. Já no lado de fora, existe um jardim com plantas, árvores, bancos de pedra, alguns postes de ferro de iluminação e apresenta-se como um grande corredor, por estar próximo ao prédio vizinho, o Bloco E.

Medidas também foram tomadas próximas a uma parede do terceiro Andar do Bloco E, na passarela que o interliga ao quarto Andar do Bloco D, em direção a uma sala de administração do curso de Engenharia Elétrica, no Bloco E. No interior desta sala havia um armário de madeira, mesas e cadeiras. Neste cenário, receptor e transmissor ficaram próximos a uma janela, que foi a responsável pela entrada e saída de sinal da sala.

Entre os Blocos O e N, apenas as medidas nos locais 5 e 6 foram realizadas na situação *indoor-outdoor*. As demais medidas foram tomadas no exterior, próximas aos jardins.

4.3 Ambientes Próximos a Construções

Estes ambientes representam cenários em que, potencialmente, haverá pessoas consumindo serviços de telecomunicações *wireless*, devendo, pois, ser uma área com cobertura de sinal. Como foi apresentado no Capítulo 1, sistemas UWB oferecem altas taxas a curtas distâncias. Assim, procurou-se medir pontos próximos às construções, simulando um ambiente comercialmente atrativo. Sendo uma área mais aberta, com menos espalhadores e mais distantes uns dos outros e com alguma vegetação presente, espera-se um sinal mais fraco na recepção, e menos multipercursos.

- No *campus* da Praia Vermelha foram realizadas medições: no estacionamento, atrás do Bloco E (Prédio Velho de Engenharia); ao longo do Bloco D, próximo à saída do *hall* de entrada; em frente à biblioteca da faculdade de Engenharia e nos *pilotis* do prédio da Faculdade de Geociências. Estes ambientes estão representados nas Figuras 4.7 a 4.10.

O estacionamento, atrás do Bloco E, foi medido na ausência de qualquer veículo. Próximo a este ambiente localiza-se o prédio do Bloco E, com uma parede bem alta e com janelas de vidro em toda sua extensão. O lugar é cercado de plantas baixas e algumas árvores.

O ambiente ao longo do Bloco D é caracterizado por plantas baixas, sendo que as medidas foram tomadas bem próximas da parede deste prédio. À direita da porta do *hall*, a parede do prédio é de tijolos furados, dando vista para o interior do *hall*. Sendo os furos de pequena dimensão comparados ao menor comprimento de onda da faixa (17,5 cm), esta parede pôde ser considerada contínua. A parede ao longo da saída pela esquerda é de tijolos, com pilastras de concreto.

O ambiente em frente à biblioteca da faculdade de Engenharia é amplo com árvores bem espalhadas e plantas de pequena altura e com pilastras sustentando uma varanda. As paredes são de tijolos e há janelas de vidro em toda sua extensão.

Nos *pilotis* do prédio da faculdade de Geociências, além das pilastras de sustentação há um *trailer*-lanchonete, configurando um local aberto nas laterais, porém coberto.

4.4 Ambientes mais Amplos, Próximos a Construções e Jardins

Estes ambientes representam cenários em que pessoas possam requerer serviços de telecomunicações *wireless*, seja para fins de trabalho ou de entretenimento. Sua característica de ser um local mais amplo e com bastante vegetação, também sugere menos espalhadores e sinal mais fraco na recepção. Além disso, representam locais passíveis de receberem uma rede de sensoriamento, para fins de segurança, como foi mencionado anteriormente.

- No *campus* do Gragoatá foram realizadas medições: entre os Blocos D e E e entre os Blocos O e N. O primeiro ambiente está representado pela Figura 4.11 e o segundo, é o mesmo representado pela Figura 4.12.
- No *campus* da Praia Vermelha, houve medições: no pátio, em frente aos dois prédios da Faculdade de Arquitetura, um conhecido como Casarão e o outro como Chalé. Estes ambientes estão representados pelas Figuras 4.13 e 4.14.

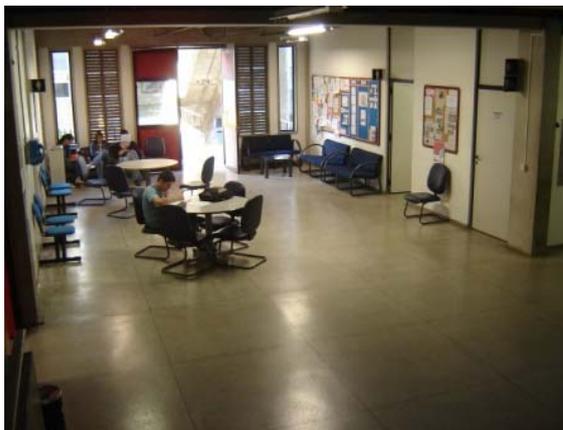
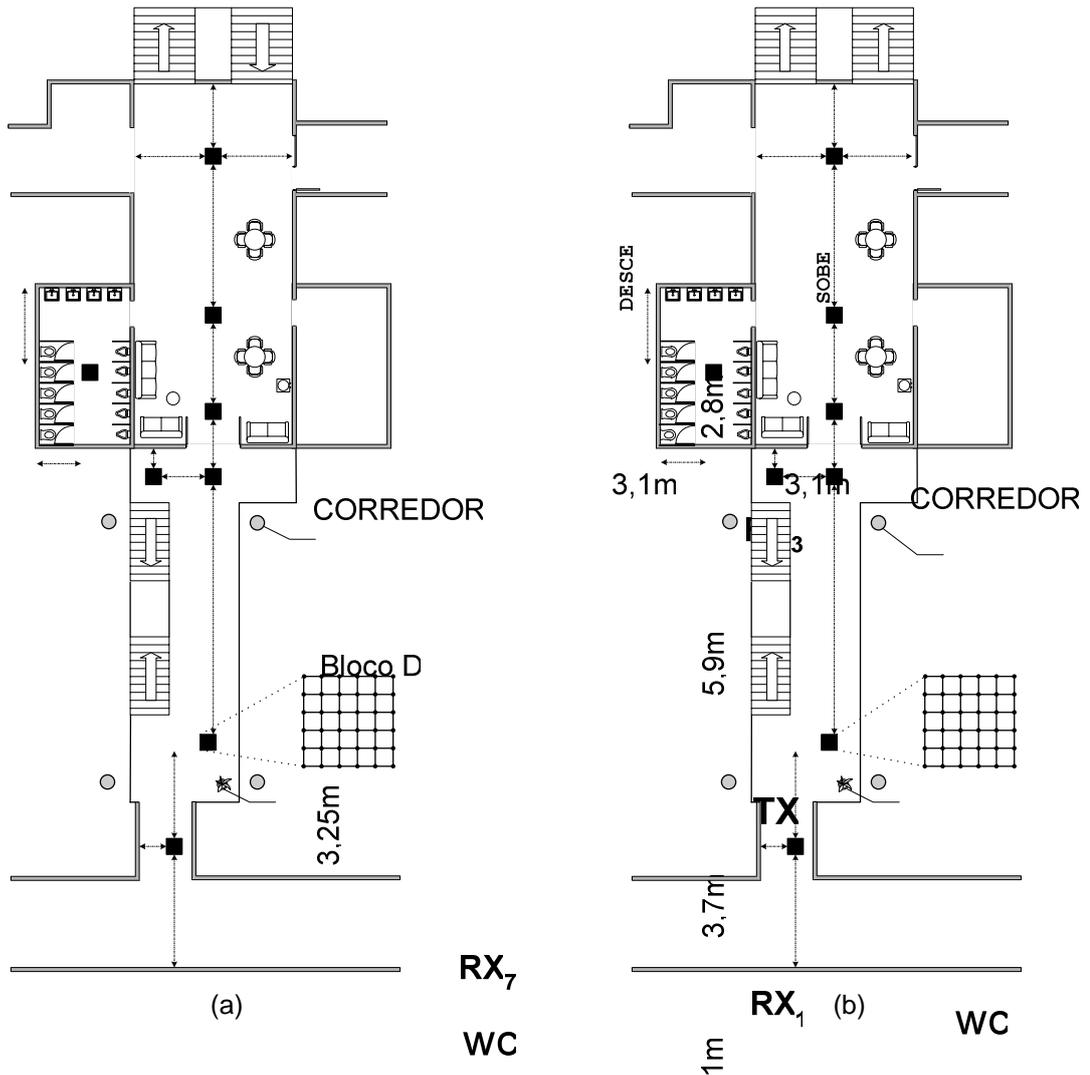
Em frente ao Casarão, a área apresenta-se aberta cercada de plantas mais altas e de algumas árvores grandes, e o piso é feito de pedras de paralelepípedo. Já em frente ao Chalé, tem-se um jardim mais denso com muitas árvores grandes e pequenas plantas.

Os cenários tanto entre os Blocos D e E quanto O e N diferem basicamente na quantidade de plantas em seus jardins, que ficam bem próximos às paredes do prédio. As medidas, no entanto, foram tomadas entre estes jardins.

4.5 Ambientes Totalmente Abertos

Estes cenários, apesar de não serem tão propícios ao sistema UWB tal como foi idealizado, foram úteis em uma abordagem mais científica onde se buscou medir o índice de decaimento do sinal com a distância e a influência de solos diferentes.

- No *campus* da Praia Vermelha foi medido um estacionamento com piso de cimento, e está representado na Figura 4.15. O estacionamento é cercado por um muro e prédios a uma distância de aproximadamente 50 m de um dos lados. Do outro lado e atrás fica a Baía de Guanabara e à frente, e muito distante, está o prédio da Faculdade de Geociências.
- No *campus* do Gragoatá foi medido um campo de futebol, com piso de grama, e está representado na Figura 4.16. As medidas, no campo de grama do Gragoatá, foram tomadas ao longo de uma direção que ia da lateral do campo em direção à Baía de Guanabara, representando um ambiente bastante amplo.



(c)



Ponto 1 2 3 4 5 6 7

(d)

Fig 4.2 - Cenário dos Ambientes A1 e A2: Segundo Andar do Bloco D *indoor-outdoor*. Planta do Ambiente A1(a); Planta do Ambiente A2 (b); Vista Interna (c); Vista Externa (d).

RX₅

5,3m

Ponto 36

Planta

1,5m

RX₆

4,4m

Bloco E

CORREDOR

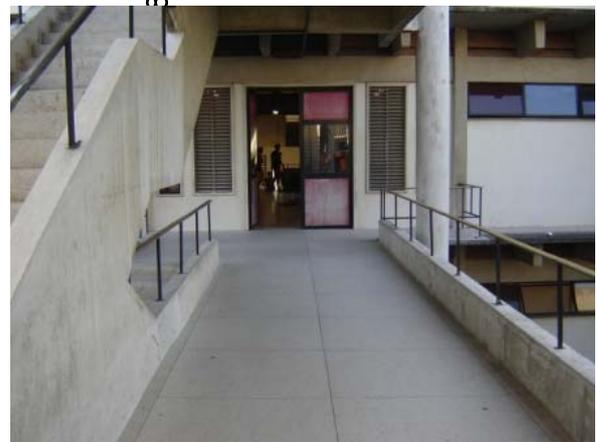
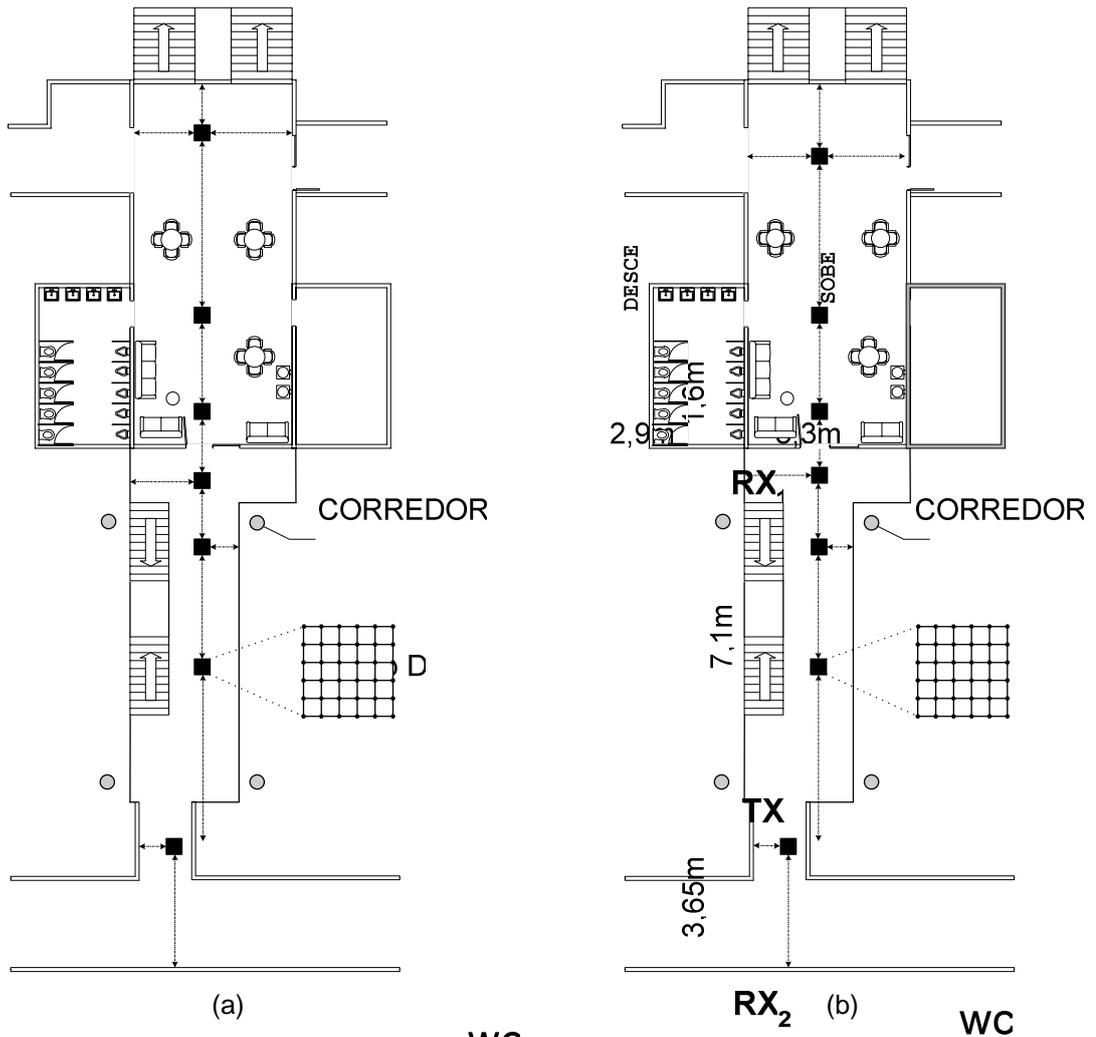


Fig 4.3 - Cenário do Ambiente A3 e A4: Terceiro Andar do Bloco D *indoor-outdoor*. Planta do Ambiente A3(a); Planta do Ambiente A4 (b); Vista Interna (c); Vista Externa (d).

Ponto 36

Bloco E

1,6m

RX₆

4,1m

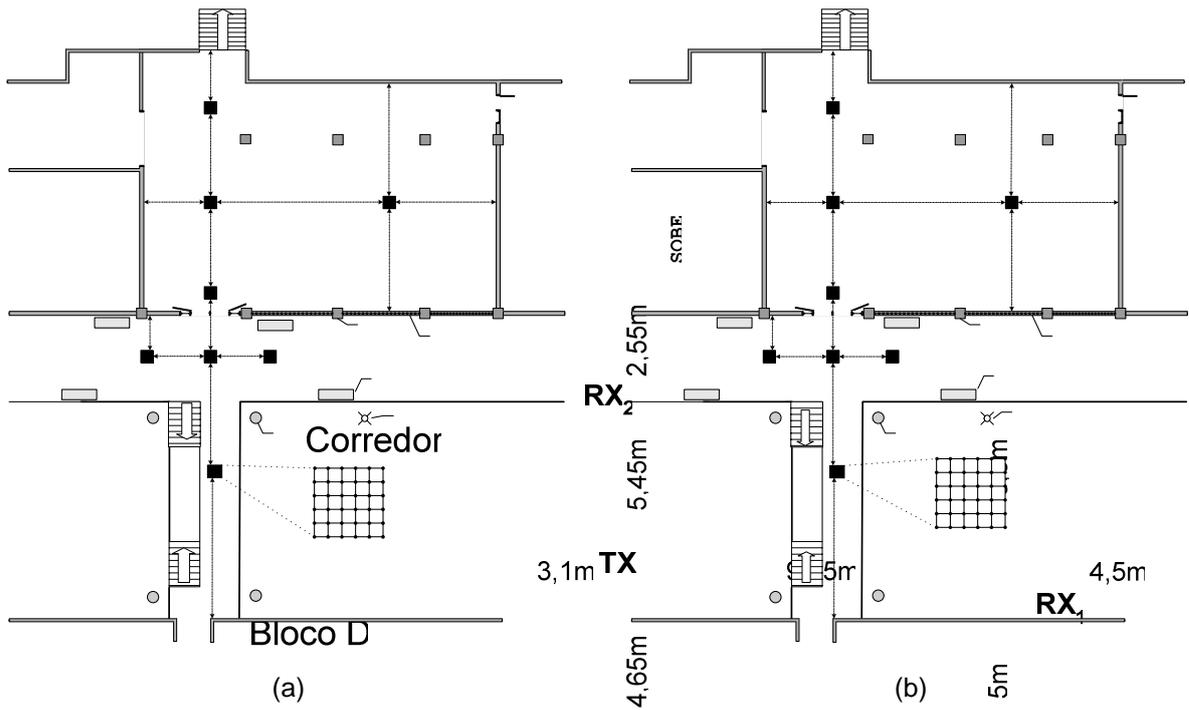
CORREDOR

10,5m

Passagem

3m

SOBE



PY

Hall

Pilastra

Parede de tijolos vazados

Banco de Pedra

Poste

Jardim em declive

Ponto 36

(c)

Fig 4.4 - Cenário do Ambiente A5 e A6: *Hall* do Bloco D *indoor-outdoor*. Planta do Ambiente A5(a); Planta do Ambiente A6 (b); Vista Interna (c).

Bloco E

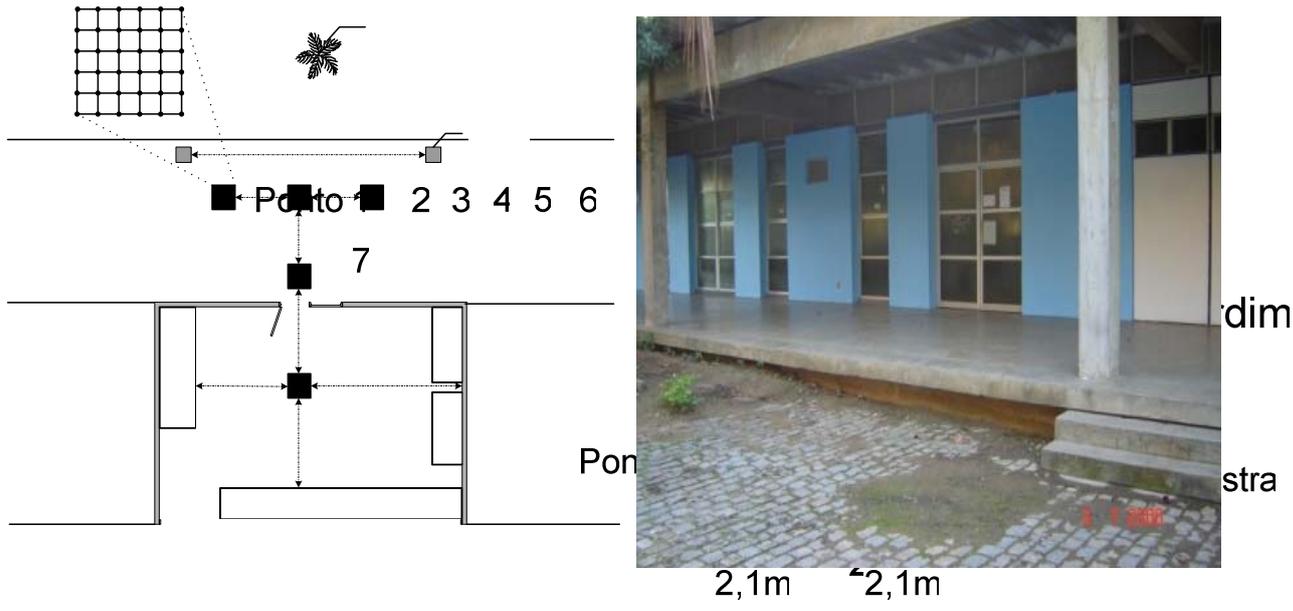


Fig 4.5 - Cenário do Ambiente A7: Biblioteca da Engenharia indoor/outdoor. Planta do Ambiente A7(a); Vista Externa (b).

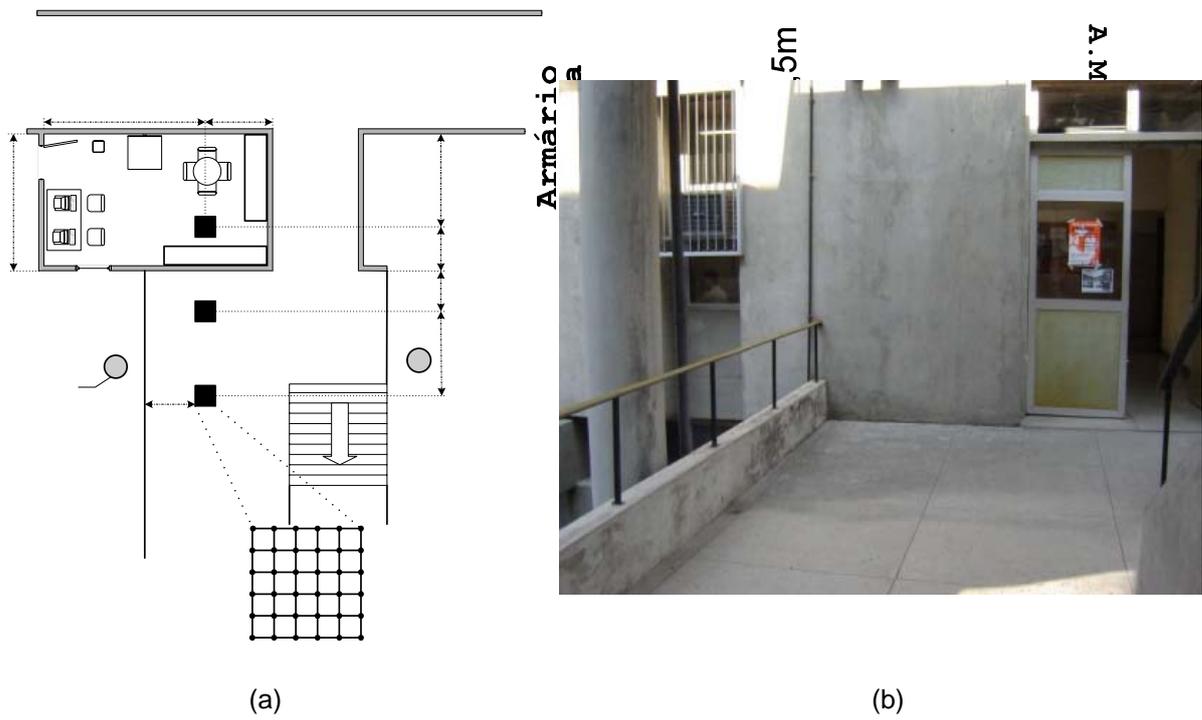


Fig 4.6 - Cenário do Ambiente A8: Parede do Terceiro Andar do Bloco E. Planta do Ambiente A8(a); Vista Externa (b).

Bloco E

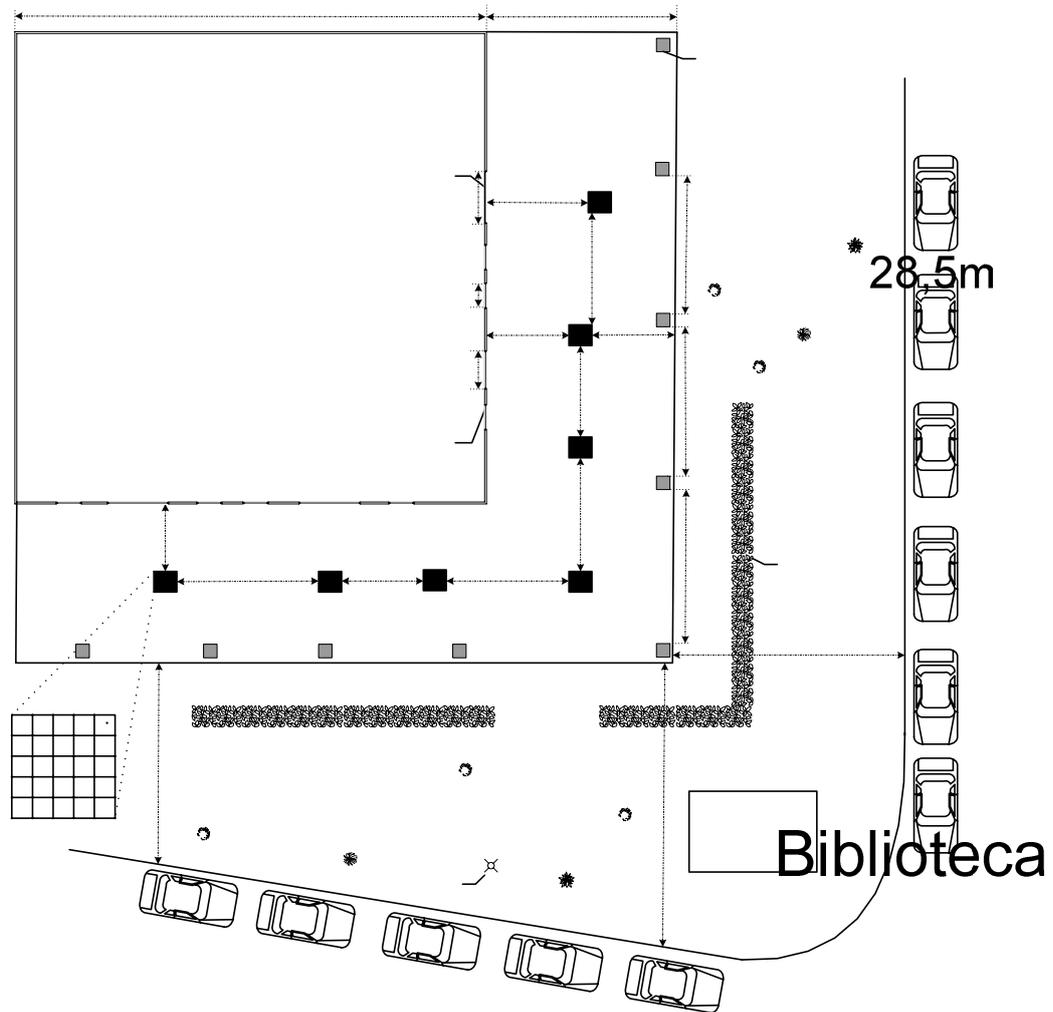
CORREDOR

dim
stra

Vara

Bibliote

RX₃ 2,1m RX₁
RX₁



(a)



(b)



(c)

Fig 4.7 - Cenário do Ambiente B1: Ao longo da saída da Biblioteca da Engenharia. Planta do Ambiente B1(a); Vista Frontal (b); Vista Lateral (c)

7

13,7m

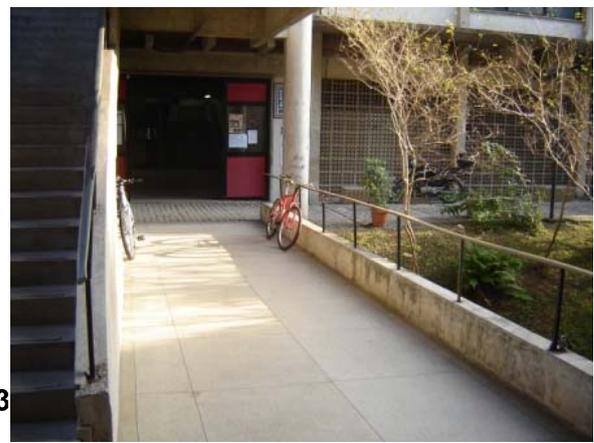
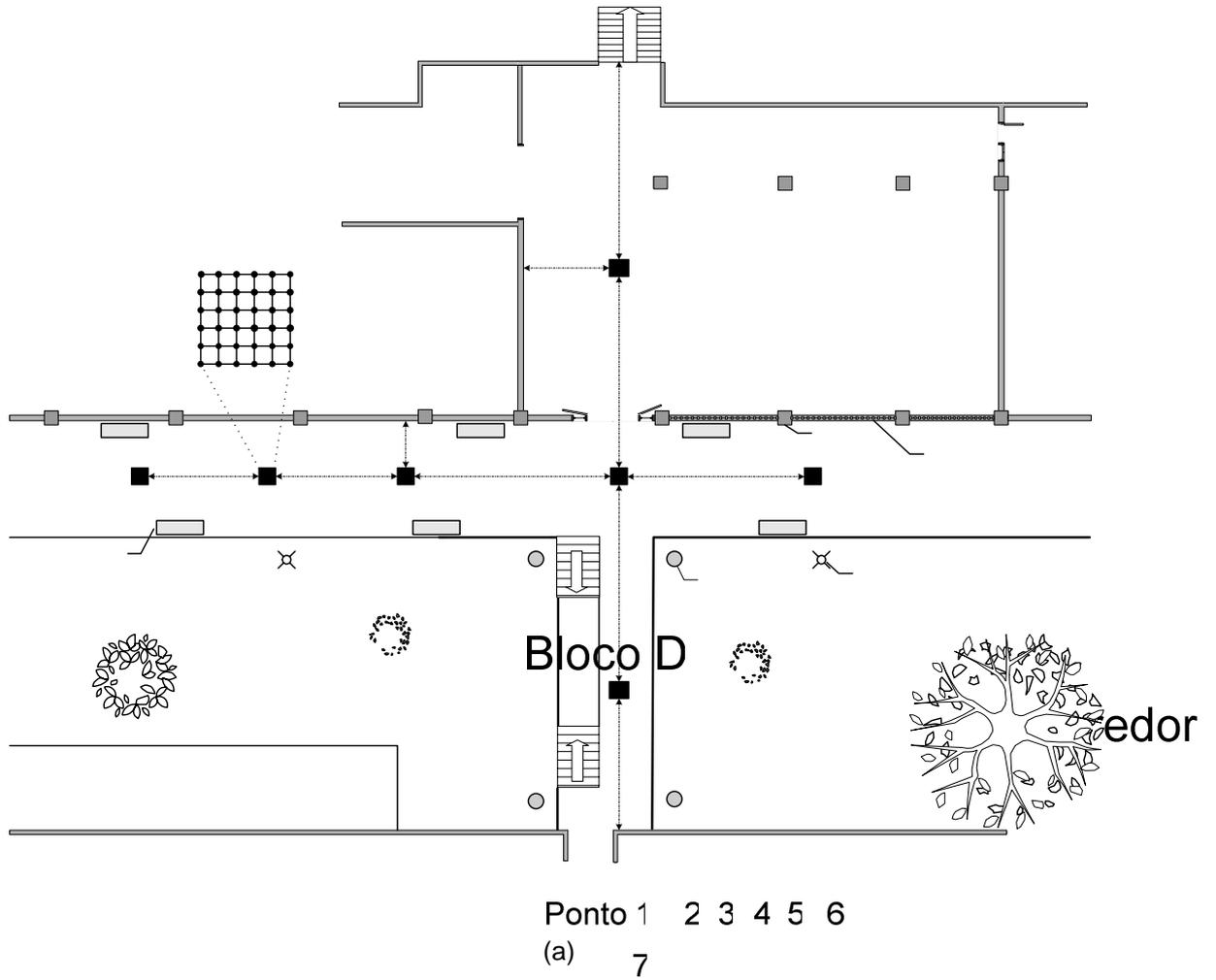
Ponto 36 c

anelas de v

6m

X₂

Jardi



(b) Banco de Pedra

(c)

Fig 4.8 - Cenário do Ambiente B2: Ao longo da saída do Hall do Bloco D. Planta do Ambiente B2 (a); Vista Lateral (b) e Vista Frontal (c).

8,5m

a

Jardim
em
declive

c

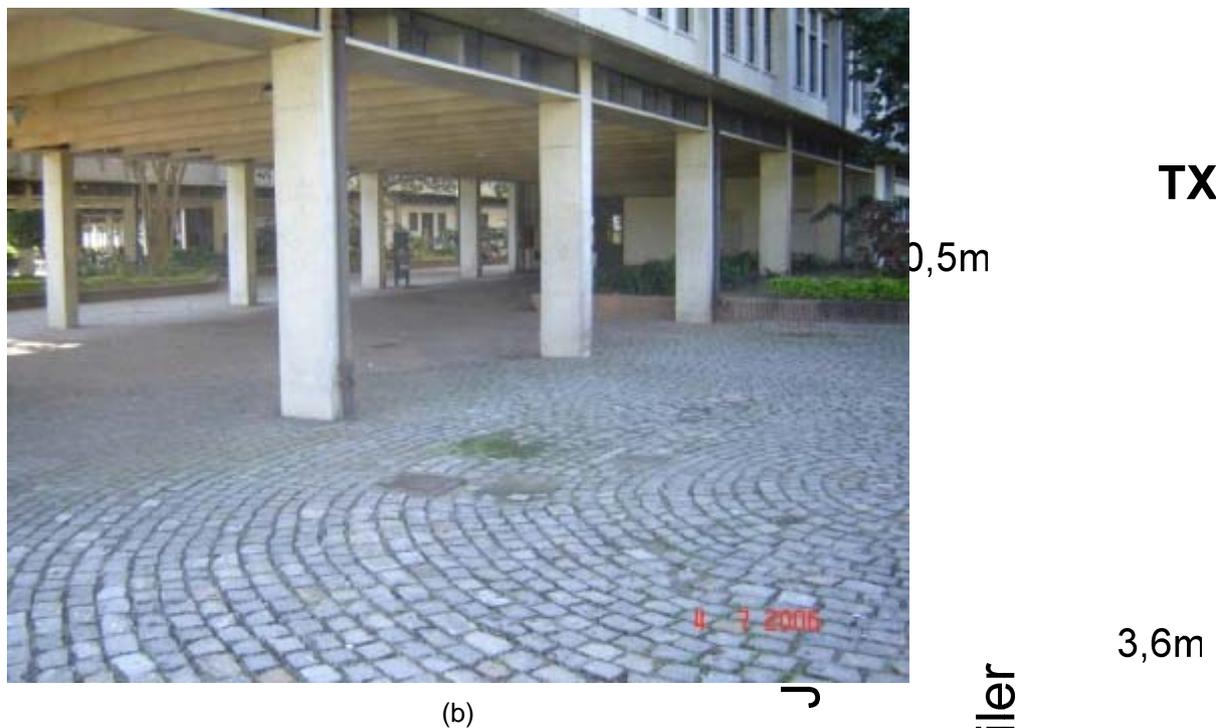
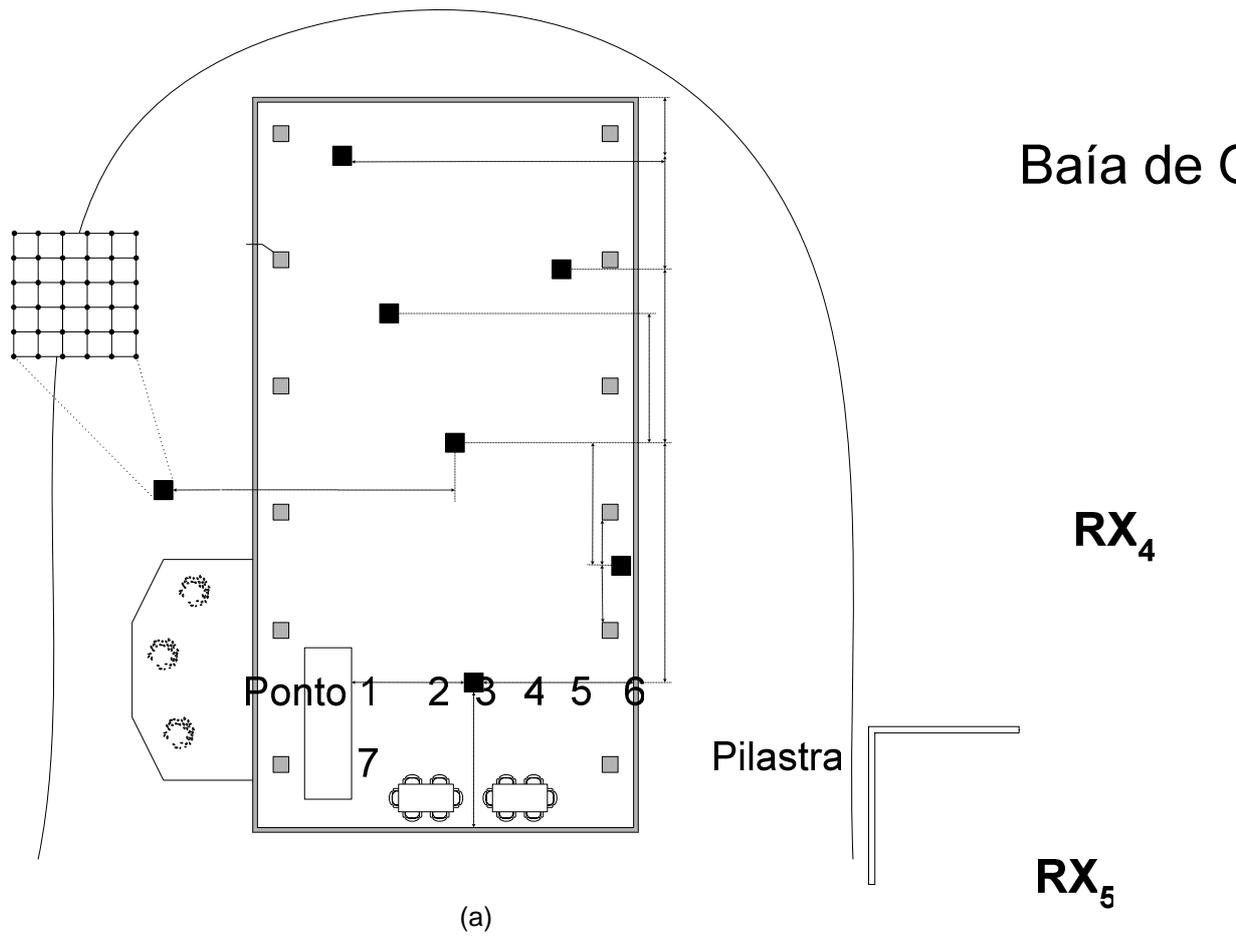


Fig 4.9 - Cenário do Ambiente B3: *Pilotis* do Prédio da Faculdade de Geociências. Planta do Ambiente B3 (a); Vista Externa (b).

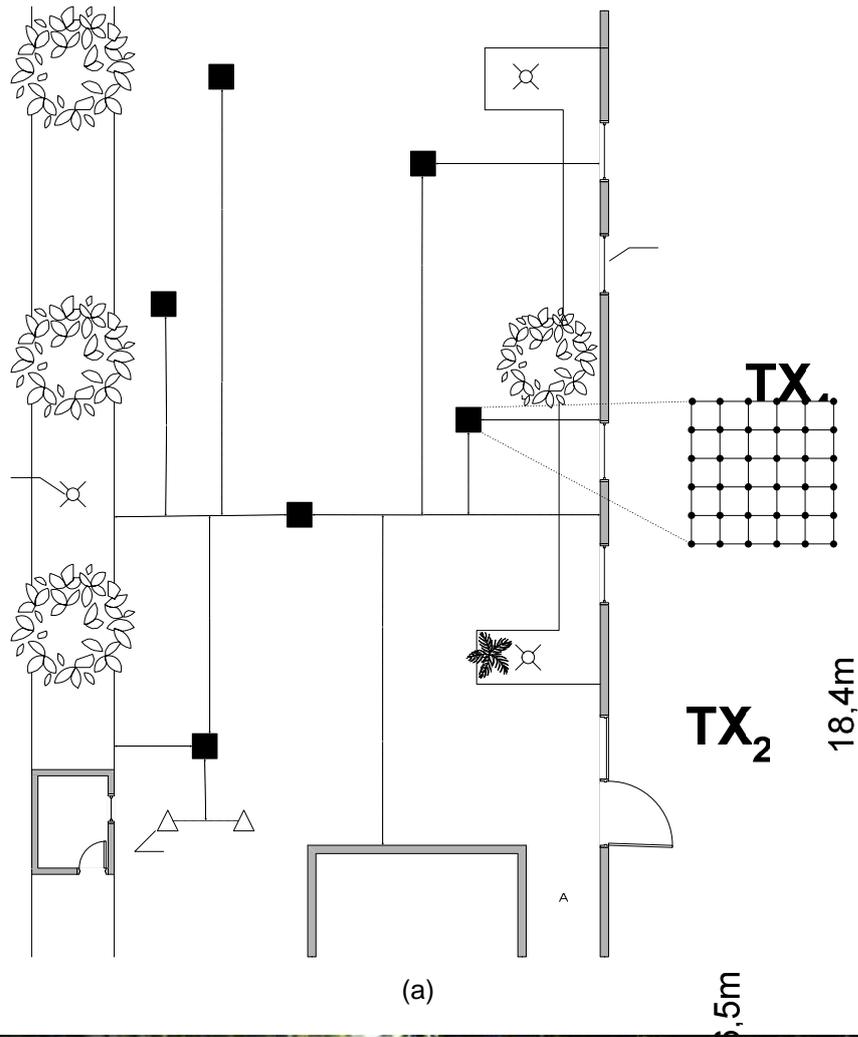
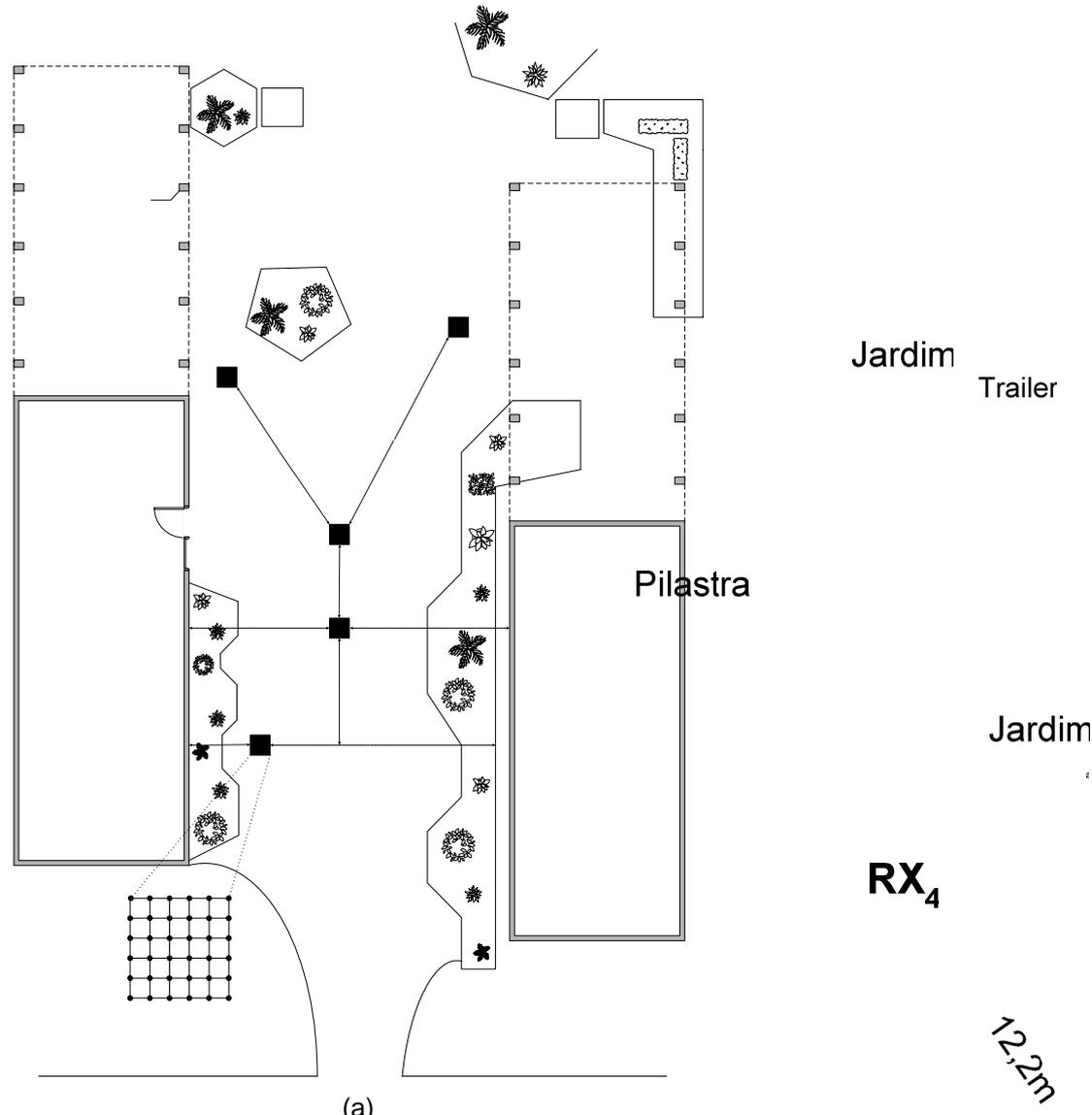


Fig 4.10 - Cenário do Ambiente B4: Estacionamento do Bloco E. Planta do Ambiente B4 (a); Vista Externa (b).

Guarita

Barra de Ferro

Co

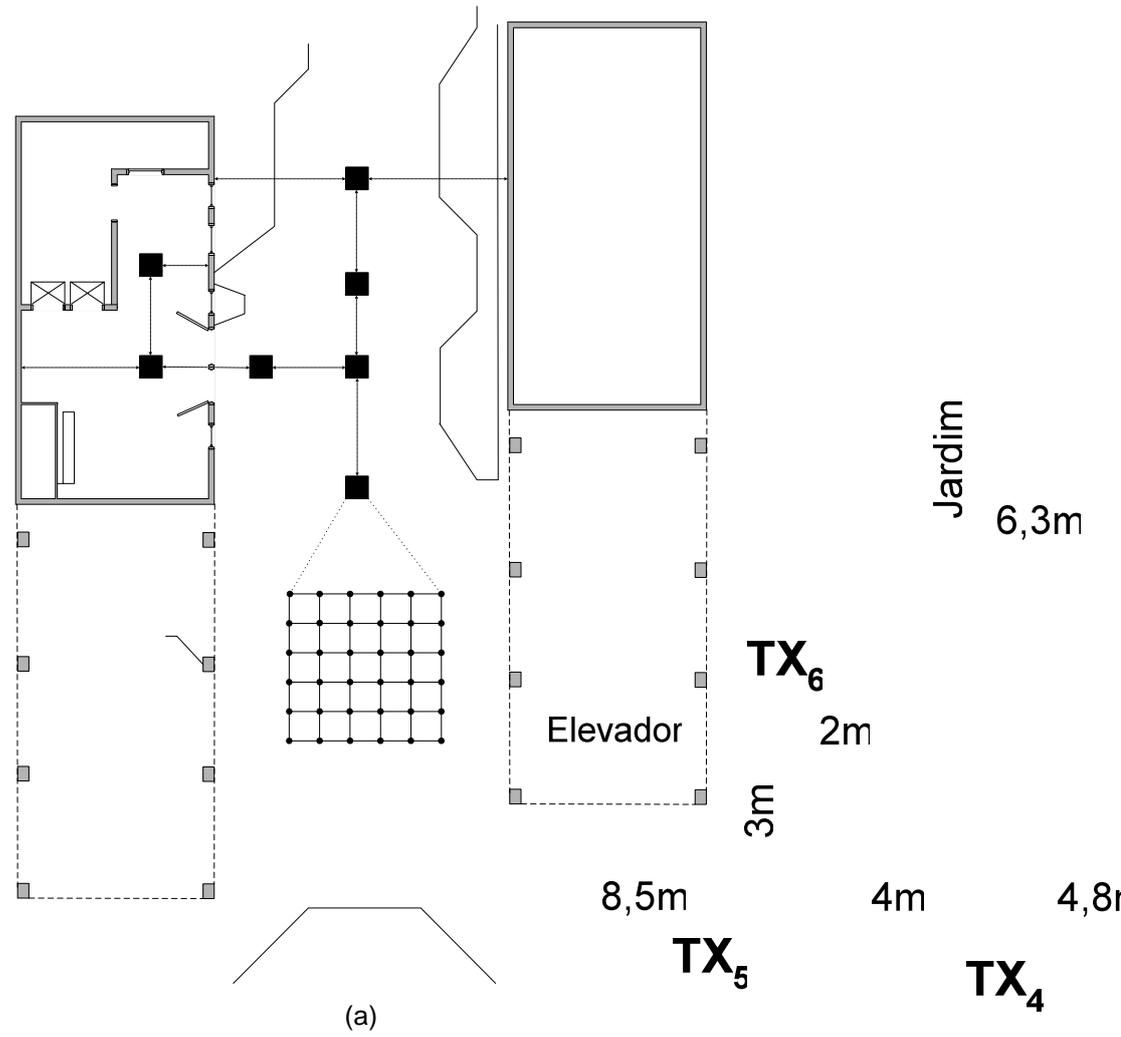


(a)

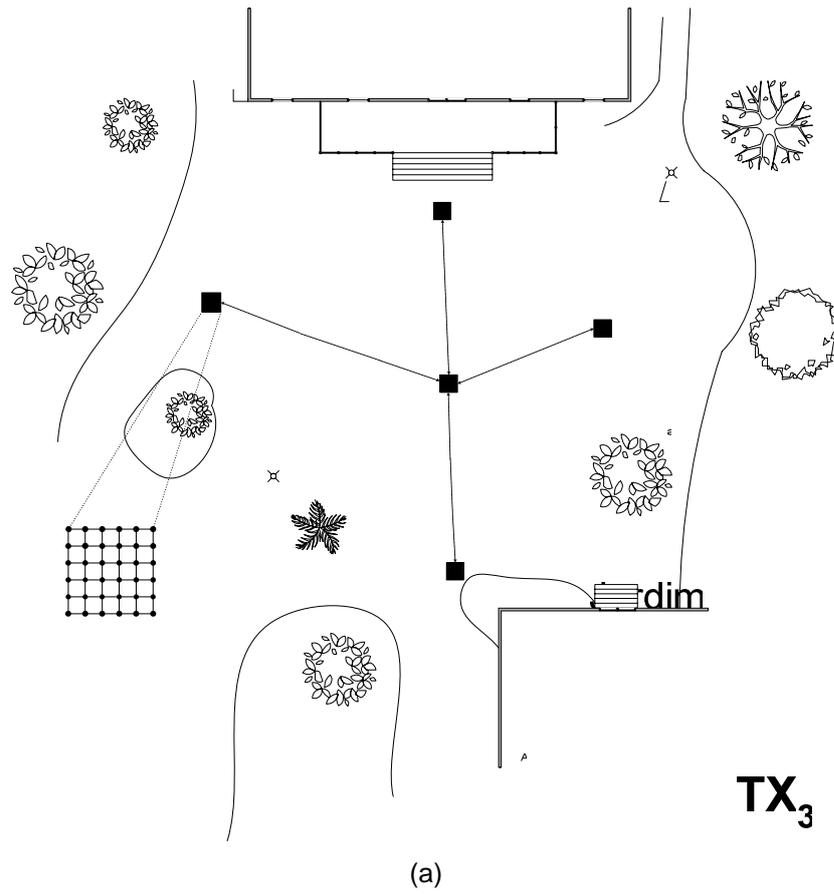


(b)

Fig 4.11 - Cenário do Ambiente C1: Entre os Blocos D e E. Planta do Ambiente C1 (a); Vista Externa (b).

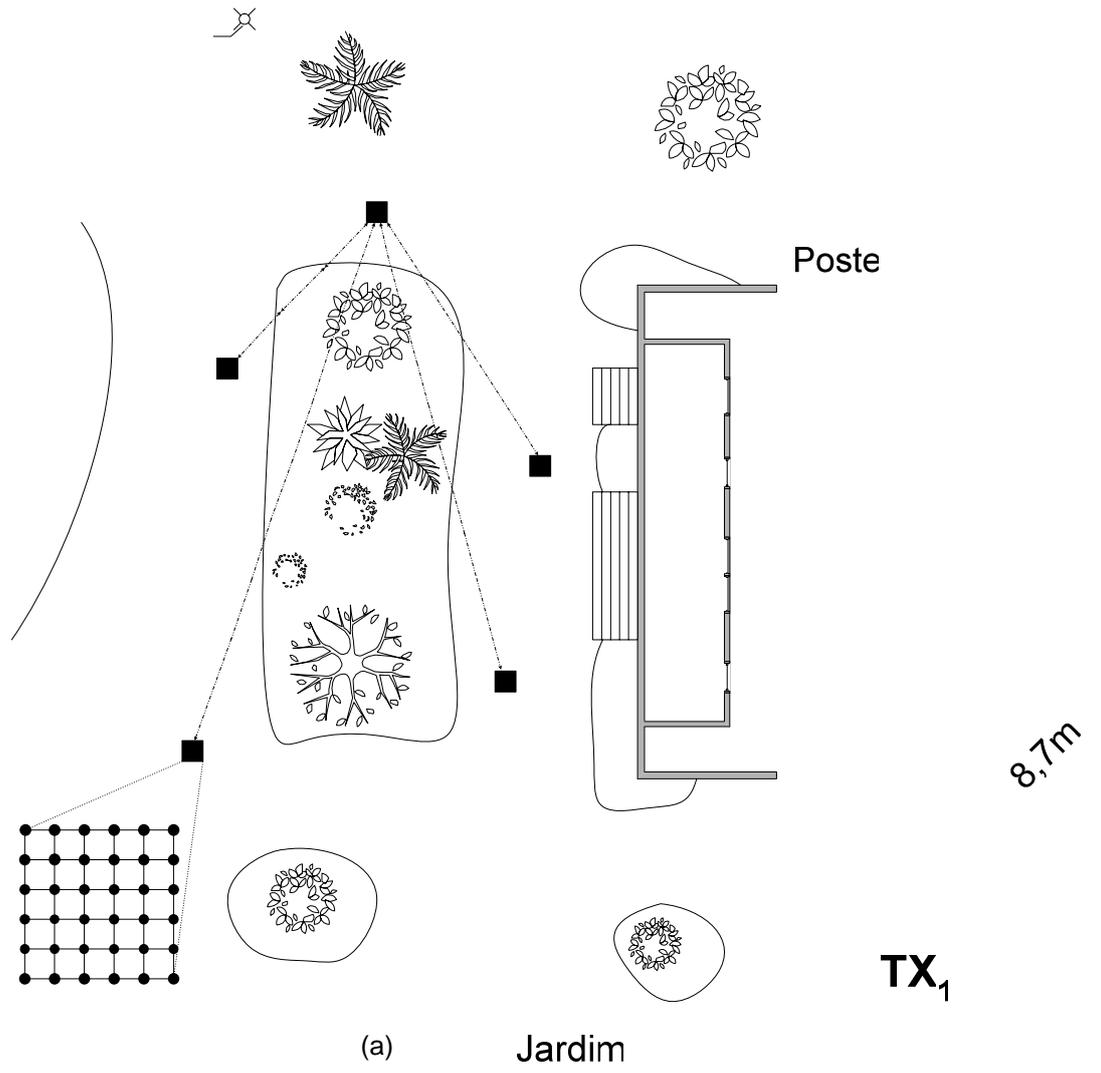


(a) (b)
Fig 4.12 - Cenário do Ambiente C2: Entre os Blocos O e N. Planta do Ambiente C2 (a); Vista Externa (b).



Jardim

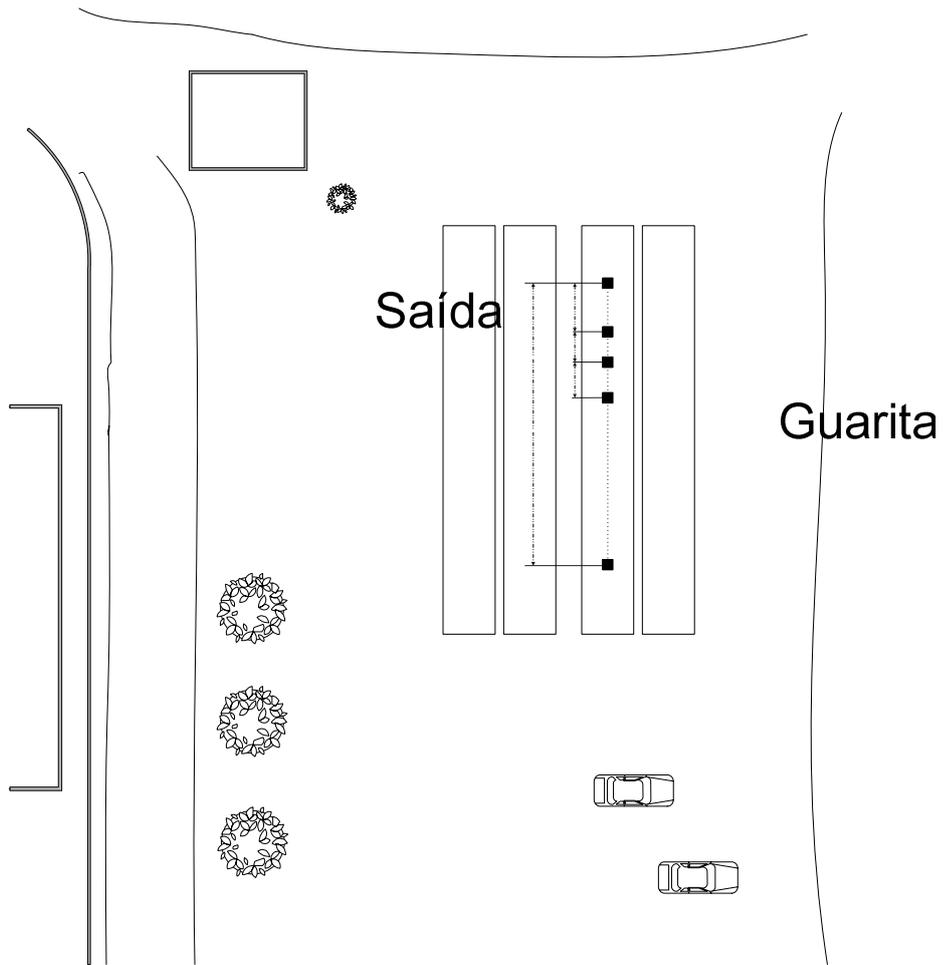
Fig 4.13 - Cenário do Ambiente C3: Pátio da Faculdade de Arquitetura (em frente ao chalé). Planta do Ambiente C3 (a); Vista Externa (b).



(b)

Fig 4.14 - Cenário do Ambiente C4: Pátio da Faculdade de Arquitetura (em frente ao casarão). Planta do Ambiente C4 (a); Vista Externa (b).

Ponto 1 2 3 4 5 6

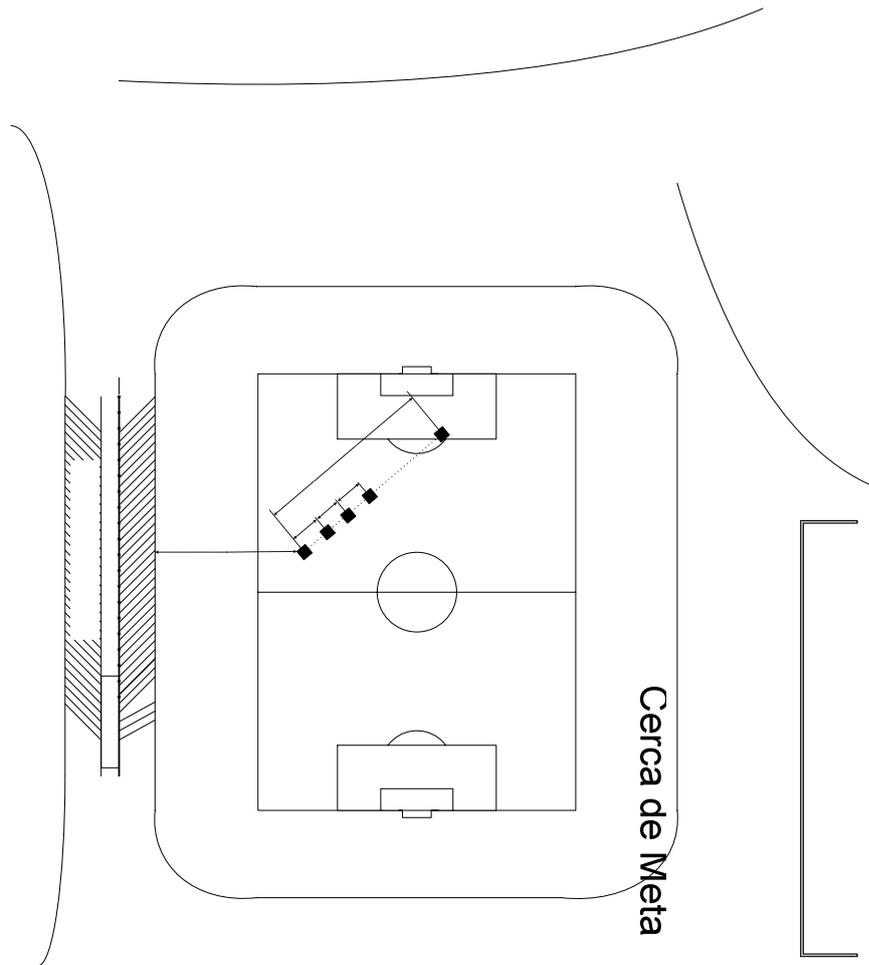


(a)



(b)

Fig 4.15 - Cenário do Ambiente D1: Estacionamento da Faculdade de Geociências. Planta do Ambiente C1 (a); Vista Externa (b).



(a)



(b)

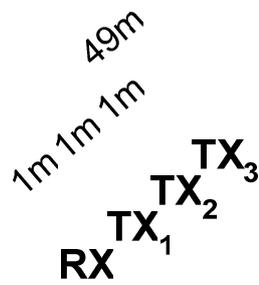


Fig 4.16 - Cenário do Ambiente D2: Campo de futebol do *Campus* do Gragoatá. Planta do Ambiente D2 (a); Vista Externa (b).

Pista de
(as

5 FERRAMENTAS DE ANÁLISE

Este capítulo trata do problema dos espúrios, que aparecem no domínio dos retardos, resultantes da aplicação da Transformada Discreta Inversa de Fourier (IDFFT) a $T(f,t)$, e da aplicação de funções janelas aos dados medidos, com a finalidade de tornar mais precisa a IDFT. Também é apresentada a técnica de limpeza de perfil de retardos de potência, empregada neste trabalho.

5.1 Considerações Iniciais

Nos capítulos anteriores foram vistos os fundamentos teóricos e toda a configuração de *setup* adotada para a sondagem do canal UWB no domínio da frequência. Nos parágrafos seguintes, serão apresentados os procedimentos necessários para transformar os dados adquiridos pelo analisador vetorial em informações que permitam calcular os parâmetros de dispersão temporal do canal.

Para cada varredura da banda de 750 MHz e para cada um dos 36 pontos do *grid*, foram tomados 1601 pontos discretos de frequência resultando, então, para cada ponto do *grid*, uma resposta de amplitude, no canal 1 do analisador, e uma resposta de fase, no canal 2. O mesmo procedimento foi adotado para os pontos tomados em linha reta, com a exceção de que, nesta situação, o *grid* não era utilizado. As respostas de amplitude e fase juntas formavam a resposta complexa $[T]_{f \times t}$, aquisitada via HPIB, por um programa em Matlab.

Como já foi discutido no Capítulo 2, as funções de sistema do canal se relacionam via transformadas de Fourier. Assim, chega-se ao perfil de retardos de potência, a partir de uma

Transformada Discreta Inversa de Fourier (IDFFT) aplicada ao vetor $[T]_{f \times t}$, adquirido pela sonda de acordo com as equações (2.39) e (2.38). Estas equações são usadas em detrimento da equação (2.40), pois esta requer o cálculo de uma autocorrelação para, então, se aplicar a transformada inversa. Já a obtenção do perfil $P_h(\tau)$ a partir da equação (2.38) requer apenas a aplicação da transformada inversa, devido ao fato de a sondagem fornecer diretamente a função $[T]_{f \times t}$. Desta forma, quanto menos cálculos computacionais existirem antes da aplicação da IFFT menores serão os erros, lembrando que a própria ferramenta IFFT tem seus erros intrínsecos. Vale destacar que o perfil que se quer obter deverá ser submetido a alguma técnica de limpeza, antes de ser utilizado para a determinação dos parâmetros de dispersão do canal, sendo fundamental que a função a ser submetida à IFFT esteja o mais livre possível de erros computacionais.

No mais, este procedimento não pode ser feito de forma direta, como mencionado, requerendo o tratamento mais aprofundado, que será visto a seguir.

5.2 Cuidados com a Aplicação da IFFT

Na técnica de varredura em frequência, as informações de amplitude e fase do sinal, emitido pelo analisador de rede vetorial, são tomadas dentro de uma faixa de frequências limitada, de 960 MHz a 1710 MHz. Como foi visto no Capítulo 2, o sinal recebido e armazenado era formado de um conjunto finito de 1601 amostras, dentro da banda em questão. Estas amostras formam a função $[T]_{f \times t}$ que, por sua vez, é submetida a uma IDFFT, com o auxílio da ferramenta IFFT do Matlab, para se obter o perfil $P_h(\tau)$ desejado. Este processo causa um truncamento no domínio dos retardos. Assim, retardos que vão de 0 a τ_{MAX} , espaçados de Δf MHz na frequência são observados.

O primeiro cuidado que se deve ter com a aplicação da IFFT é que esta considera que o sinal começa na frequência zero. Neste trabalho, o sinal $[T]_{f \times t}$ encontra-se deslocado e limitado entre as frequências 960 MHz e 1710 MHz. Sabe-se que o deslocamento de uma função na frequência faz aparecer uma fase na função temporal [11].

$$f(t)e^{-j\omega_0 t} \leftrightarrow F(\omega - \omega_0) \quad (5.1)$$

Da teoria de processamento de sinais [11] é sabido que a transformada direta de um sinal real (FFT) tem um gráfico espectral de amplitude par e um gráfico espectral ímpar. Como foi apresentado no Capítulo 2, a IFFT de $[T]_{f \times t}$ fornece $h(t, \tau)$. Portanto, caso $h(t, \tau)$ fosse real, dever-se-ia completar a função $[T]_{f \times t}$ com zeros até a frequência de 960 MHz e fazer um espelhamento com o conjugado deste resultado. Só então poder-se-ia aplicar a IFFT.

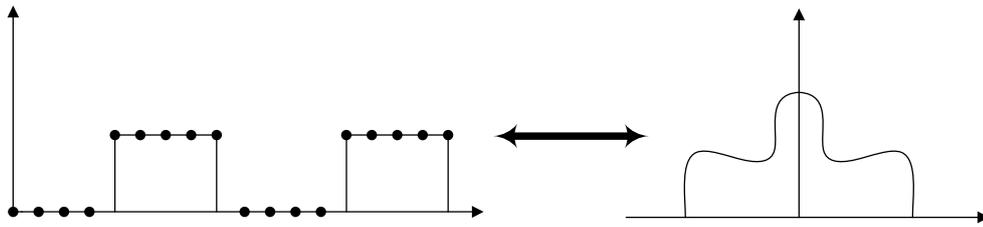


Fig 5.1 - Procedimentos para se aplicar a IFFT.

A aplicação direta da IFFT sobre a função $[T]_{f \times t}$ medida, no entanto, pode ser feita sabendo-se que sua resposta $h(t, \tau)$ aparecerá com uma fase correspondente à frequência deslocada do início da banda, que neste caso é 960 MHz. Todavia, é objetivo deste trabalho apenas levantar parâmetros de dispersão temporal do canal que não requerem a informação de fase da resposta impulsiva. Desta maneira, trabalha-se nas técnicas de limpeza vistas a seguir, unicamente com o módulo da resposta complexa da resposta impulsiva, resultante da aplicação da IFFT sobre a função $[T]_{f \times t}$. Vale destacar que a resposta impulsiva do canal $h(t, \tau)$ é complexa, resultado dos vários multipercursos que chegam com fases aleatórias no receptor.

O segundo cuidado diz respeito ao fato de que a Transforma Discreta de Fourier, de um sinal limitado em banda, ocasiona um fenômeno conhecido como Vazamento Espectral de Potência (*Spectral Leakage*), que pode ser mais facilmente observado no domínio da frequência, conforme Harris [55].

Para se entender melhor o aparecimento deste problema é suficiente analisar a transformada discreta de Fourier de um pulso (função *gate*). O resultado é uma função *sample*, com concentração de potência no lóbulo principal e um “espalhamento” de energia representado pelos lóbulos laterais que aparecem, como se pode notar na Figura 5.2 abaixo.

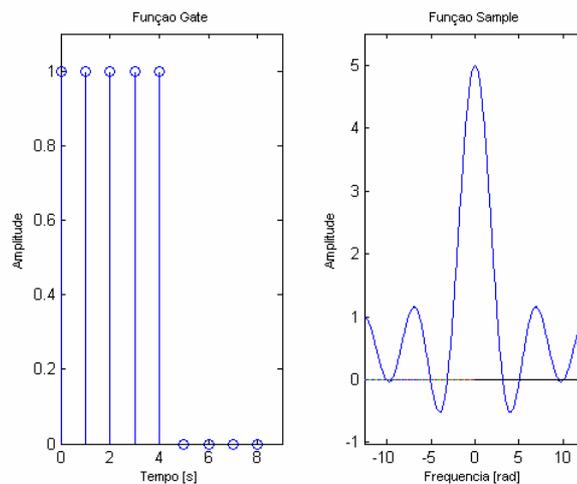


Fig 5.2 - Função *Gate* (tempo) e *Sample* (freqüência).

A função $[T]_{f \times t}$ medida neste trabalho, no entanto, já representa uma função discretizada no domínio da freqüência, cujo modelo matemático equivale à multiplicação do espectro de um sinal por uma função janela retangular, representando um filtro passa-banda. Assim, quando se aplica a IDFFT na função $[T]_{f \times t}$, não há vazamento espectral de potências, uma vez que $[T]_{f \times t}$ já se encontra no domínio da freqüência. Contudo, a aplicação da IDFFT nos 1601 pontos discretos que compõem a função $[T]_{f \times t}$, que representa os pontos de freqüência medidos, vai gerar espúrios de sinal indesejáveis no domínio dos retardos: obtém-se a amplitude da amostra no retardo τ e amplitudes laterais localizadas em outros valores de retardo. Para uma resolução temporal de τ , os espúrios de duas amostras adjacentes na freqüência separadas por Δf (pontos adjacentes na função $[T]_{f \times t}$) poderão até se somar, resultando em uma determinada amplitude que dê a falsa impressão de se tratar de um multipercurso, mascarando a informação original que se quer obter.

Com o objetivo de se minimizar o efeito destas componentes indesejáveis, o sinal complexo medido $[T]_{f \times t}$ é multiplicado por uma Função Janela antes de se realizar a IDFFT para se obter o Perfil de Retardos de Potência $P_h(\tau)$. Esta Função Janela atua como um filtro, reduzindo os lóbulos laterais. Contudo, a multiplicação pela Função Janela a cada ponto discreto de informação do sinal complexo medido (função $[T]_{f \times t}$), apesar de reduzir consideravelmente os lóbulos laterais, causa um aumento no valor da resolução no domínio dos retardos. Este aumento de resolução faz com que alguns pontos, adjacentes ao sinal

medido, a depender de suas amplitudes, não sejam diferenciados. A consequência disto é a perda de alguns multipercursos do perfil de retardos de potência.

Segundo Turin [56], um conjunto de possíveis janelas são analisadas quanto à sua eficiência sob dois aspectos: diminuição do vazamento espectral e aumento da resolução. Assim, percebe-se que deve haver uma relação de compromisso entre estes dois aspectos para que a janela mais adequada seja a escolhida. Segundo Harris [55], as janelas de Blackman-Harris e de Kaiser-Bessel são as de melhor desempenho no estudo de sinais de RF.

Antes de se escolher uma determinada janela, em detrimento das outras, para a aplicação neste trabalho, os dados foram processados segundo quatro janelas diferentes: Blackman-Harris de 3 e 4 termos, Hanning e Retangular. O Matlab já possui internamente algumas das janelas propostas por Harris [55], o que facilitou o processamento e comparação.

Uma exaustiva comparação entre as janelas de Blackman-Harris de 3 e de 4 termos, de Hanning e Retangular foi realizada neste trabalho, pelo autor, com o objetivo de avaliar o impacto do uso destas nos resultados finais dos parâmetros de dispersão temporal do canal. Como já foi visto, as características de redução de lóbulo lateral e resolução foram as condições mais importantes levadas em consideração na tomada de decisão de qual janela implementar e para a comparação de suas eficiências, diante dos dados medidos. Estes apresentavam amostras em frequência muito próximas e com valores de amplitude que variavam bastante em função do desvanecimento rápido imposto pelo canal, o que justifica o cuidado na escolha da função janela.

Um resultado inicial mostrou que a janela retangular, de melhor resolução, é a que permite que mais multipercursos sejam considerados. Já as outras janelas (Blackman-Harris de 3 e 4 termos e Hanning) permitiam a captura de uma quantidade de multipercursos aproximadamente igual. Aplicar uma janela retangular equivale a multiplicar o sinal a ser “janelado” por 1, o que não é tão eficiente para a retirada dos efeitos de borda de um sinal truncado. Desta forma, ruídos presentes no início do perfil são frequentemente capturados e interpretados como percursos válidos, sobretudo pela técnica CLEAN, que correlaciona a forma de onda (ruído, no caso) com a onda de referência. E como a janela retangular é a que menos aumenta a resolução do sinal, há casos em que a forma do ruído se assemelha à do sinal padrão. Este fato requer o aumento do limiar de ruído, o que impede que multipercursos, em retardos maiores e de menor amplitude, sejam capturados. Já as outras janelas são mais eficientes com respeito a estes ruídos no início do perfil, apesar de piorarem a resolução, ao impedirem com que multipercursos próximos sejam diferenciados.

Ao mesmo tempo em que não se quer que este aumento de resolução gere valores subestimados para os parâmetros dispersivos do canal, não se quer que ruídos sejam erroneamente considerados percursos válidos e nem que sejam tomados valores de limiares de decisão maiores do que o nosso senso de engenharia indica, o que eliminaria parte do perfil com sinais válidos.

Guiado por estas razões e pela limitação dos equipamentos utilizados no *setup*, optou-se pela janela de Blackman-Harris de 3 termos. Esta janela, dentre as listadas em [55], é a que apresenta a maior redução de lóbulo lateral para uma menor perda de resolução entre multipercursos.

Janela	Redução de Lóbulo Lateral (dB)	Aumento de Resolução (<i>bins</i>)
Blackman-Harris (3 termos)	-67	1,81
Blackman-Harris (4 termos)	-92	2,72
Hanning	-32	2,00
Retangular	-13	1,21

Tabela 5.1 - Características Principais das Janelas.

O aumento de resolução da Janela de Blackman-Harris de 3 termos não representou uma perda tão significativa para a análise, uma vez que para ambientes mais amplos, os espalhadores estão mais dispersos e distantes uns dos outros, permitindo se ter uma resolução temporal maior.

A função Janela de Blackman-Harris de 3 termos é dada pela fórmula abaixo e é exemplificada na Figura 3.5, nos domínios do tempo e da frequência.

$$w(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{N} \cdot n\right) + a_2 \cos\left(\frac{2\pi}{N} \cdot 2n\right), \quad n = 1, 2, 3, \dots, N-1 \quad (5.2)$$

onde

$$a_0 = 0,35875, \quad a_1 = 0,48829, \quad a_2 = 0,14128 \quad \text{e} \quad N = 1601$$

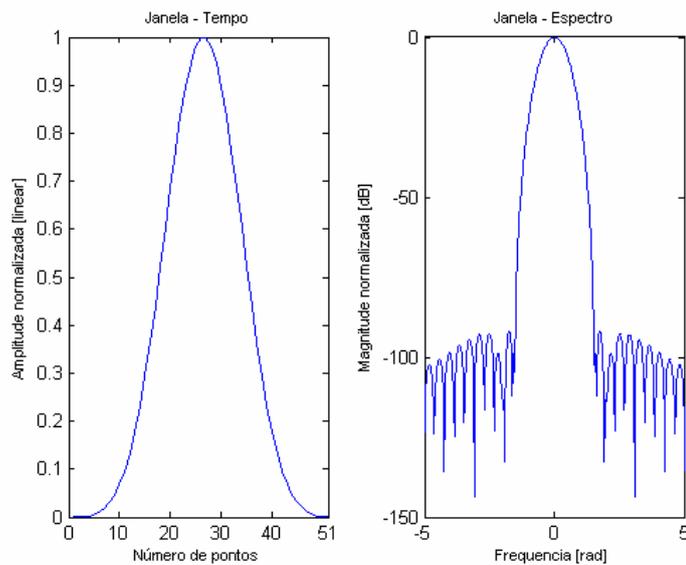


Fig 5.3 - Função Janela de Blackman-Harris de 3 Termos, no Tempo e na Freqüência.

5.3 Limpeza do Perfil de Retardos de Potência

Como foi visto nas seções anteriores, a IDFFT aplicada em $[T]_{f \times t}$ estima, para cada varredura, a densidade espectral de potência no domínio dos retardos. A Figura 5.4 mostra um perfil de retardos de potência para um dos ambientes medidos (Ambiente A1).

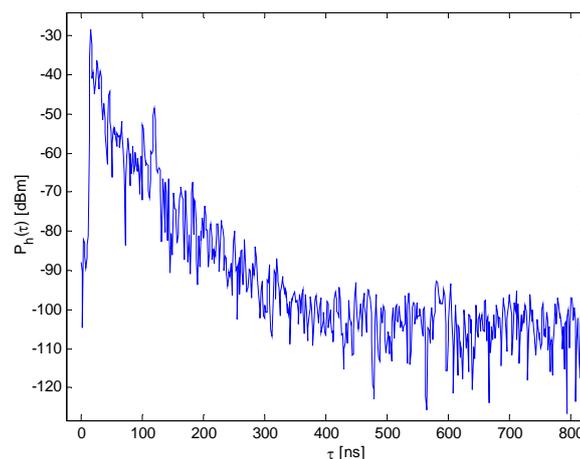


Fig 5.4 – Exemplo de um Perfil de Retardos de Potência Medido.

Contudo, apesar de todo o cuidadoso procedimento de calibração explicado antes, este perfil ainda apresenta algum ruído intrínseco aos equipamentos de medidas, mascarando as informações que são realmente válidas. Assim, para calcular os parâmetros de dispersão

temporal do canal, que é o objetivo deste trabalho, é necessário, antes, obter um perfil de retardos de potência limpo, em que fique evidenciado apenas os percursos válidos, suas amplitudes e retardos. No passado, quando estas técnicas de limpeza não eram estudadas e implementadas, os valores dos parâmetros do canal acabavam sendo superestimados.

Como foi mencionado anteriormente, o canal de propagação é normalmente modelado como sendo um filtro linear variante no tempo [19], cuja resposta impulsiva é dada por:

$$h(t, \tau) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k(t) \delta[\tau - \tau_k(t)] e^{j\theta_k(t)} \quad (5.3)$$

onde t e τ são o tempo de observação e aplicação do impulso, respectivamente. As outras variáveis são as aleatórias variantes no tempo: amplitude, $a_k(t)$; retardo de propagação, $\tau_k(t)$; e a fase, $\theta_k(t)$. N é o número de multipercursos e δ é a função delta de Dirac.

O canal é completamente caracterizado por estas variáveis, cujo modelo matemático é o da Figura 5.5.

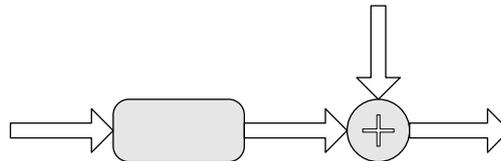


Fig 5.5 - Modelo Matemático para o Canal Rádio-Móvel.

Em que:

$$y(t) = n(t) + \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) h(t, \tau) d\tau \quad (5.4)$$

sendo $n(t)$ o ruído gaussiano aditivo.

Neste trabalho é assumido que o canal é estacionário durante o período de observação, que corresponde ao tempo de varredura. Assim, a resposta impulsiva do canal é da forma [3] [4]:

$$h(t) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \delta(t - t_k) e^{j\theta_k} \quad (5.5)$$

A saída do canal, devido a um sinal transmitido $s(t)$ é, então:

$$y(t) = n(t) + \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (5.6)$$

Para o modelo acima, se o sinal $x(t) = \text{Re}\{s(t)\exp[j\omega_0 t]\}$ for transmitido por este canal, o sinal recebido será $y(t) = \text{Re}\{\rho(t)\exp[j\omega_0 t]\}$, onde:

$$\rho(t) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k s(t - t_k) e^{j\theta_k} + n(t) \quad (5.7)$$

Para extrair a resposta impulsiva do canal a partir da forma de onda recebida $y(t)$, é preciso que os multipercursos válidos sejam detectados, o que só será possível pela aplicação de uma técnica de limpeza de perfil.

Conforme já foi apresentado no Capítulo 2, a resposta impulsiva do canal é dada por $h(t, \tau)$ e o perfil de retardos de potência, por $|h(\tau)|^2$. O resultado imediato obtido pela aplicação da IDFFT à função $[T]_{f \times t}$ representa a envoltória complexa do sinal na recepção, cujo módulo foi submetido à técnica de limpeza.

Diversas técnicas de limpeza de perfil no domínio do tempo vêm sendo utilizadas conforme Macedo [34] e Barros [49]. Dentre elas destacam-se a de Sousa [57], a CLEAN [15], a SAGE [58] e as que utilizam *wavelets* [59]. Um estudo comparativo destas quatro técnicas se faz necessário ao estudo dos modernos sistemas UWB. Com o objetivo de complementar o trabalho de Barros [49], apenas a técnica CLEAN foi utilizada neste trabalho. As comparações entre as diversas técnicas de limpeza são sugeridas para trabalhos futuros.

5.4 Técnica CLEAN

O algoritmo CLEAN é um algoritmo de cancelamento seqüencial de interferências no canal, conforme Cassioli, Win e Molisch [14] e de erros inerentes aos equipamentos do *setup*, que se apresentam como um ruído dentro do perfil medido, obtido via IDFFT da função $[T]_{\text{fxt}}$. Ele parte da premissa básica de que o sinal medido é uma soma de pulsos, com formas conhecidas, e foi apresentado inicialmente por Keignart e Daniele [53], em um contexto de estudo do canal UWB. Em outras palavras, ele assume que o canal é uma série de impulsos, o que é consistente com o modelo de canal por linha de retardos [27]. A técnica CLEAN é uma técnica já há algum tempo utilizada em rádio-astronomia para o processamento de imagens, e foi proposta inicialmente por Hogbörn [60]. Atualmente, esta técnica vem sendo bastante utilizada por diversos autores [1], [2], [15], [20], [22], [23] e [53], nos estudos sobre medições de canais UWB, por sua capacidade, já verificada, em gerar respostas impulsivas confiáveis do canal.

Resumidamente, o algoritmo encontra o sinal mais forte através da correlação do sinal recebido com uma forma de onda padrão de referência, identificando o maior pico nesta correlação. A amostra que gerou este pico de correlação é subtraída do sinal total, e o pulso é novamente correlacionado com o sinal “limpo”, resultante desta subtração. Este procedimento é repetido, iterativamente, até que o nível de sinal no perfil que está sendo limpo fique abaixo de um determinado limiar, como destaca Molisch [27]. No Apêndice B, encontra-se disponibilizada a programação, escrita em Matlab, que executa a técnica CLEAN empregada neste trabalho.

A medida para estabelecimento da referência deve ser feita em visibilidade, em um ambiente externo, de preferência sem espalhadores, onde a resposta impulsiva possa conter apenas os efeitos do aparelho transceptor, praticamente sem a contribuição de sinais refletidos. Neste trabalho, esta medida foi realizada no campo de futebol do campus do Gragoatá, um local bastante amplo, praticamente sem espalhadores, que fica de frente para a Baía de Guanabara. As antenas de transmissão e recepção foram colocadas a um metro de distância uma da outra. A Figura 5.6 mostra o perfil de retardos de potência, de referência, medido.

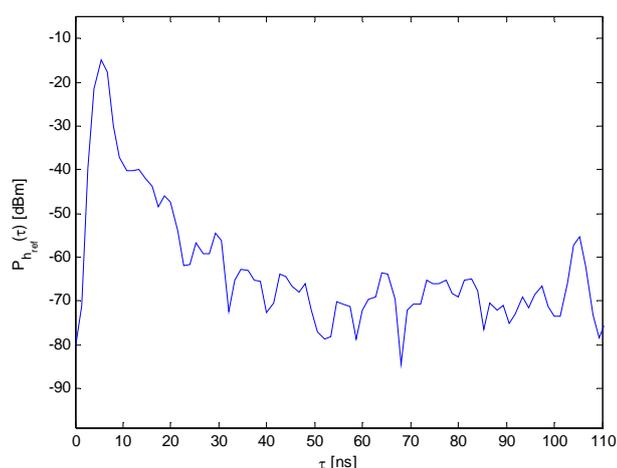


Fig 5.6 - Perfil de Retardos de Potência de Referência.

5.4.1 Estrutura do Algoritmo CLEAN

Considerando o modelamento que trata o canal como um filtro linear variante no tempo, busca-se, com a técnica CLEAN, os percursos válidos (seus respectivos retardos e amplitudes) dentro do perfil de retardos de potência obtido, via IDFFT, da função $[T]_{f \times t}$.

O primeiro procedimento exigido pela técnica CLEAN consiste em se obter a medida de referência tirada em visada, tida como padrão, que será chamada de perfil de referência (Perfil de Retardos de Potência de Referência).

O algoritmo, então, busca o sinal recebido, iterativamente, em relação à medida padrão, de forma a obter o máximo de correlação [15].

Os passos envolvidos no algoritmo CLEAN, proposto inicialmente, são os seguintes [61]: primeiro calcula-se a autocorrelação do sinal de referência, medido em visada direta, $r_{ss}(t)$, e a correlação cruzada entre o sinal recebido e este sinal de referência, $r_{sy}(t)$. Um processo iterativo, então, busca o máximo de correlação em $r_{sy}(t)$. Assim, encontra-se o retardo τ_k associado a este máximo de correlação. Sua respectiva amplitude é normalizada pelo máximo de correlação de $r_{ss}(t)$, gerando o fator a_k . A autocorrelação, $r_{ss}(t)$, é, então, multiplicada por a_k e subtraída de $r_{sy}(t)$ no instante τ_k . Uma segunda iteração é feita para se encontrar e remover o próximo máximo de correlação em $r_{sy}(t)$. Este processo de iteração continua até que o pico máximo de correlação em $r_{sy}(t)$ esteja abaixo de um determinado limiar, quando, então, o algoritmo termina.

A fim de que este trabalho possa ser utilizado para futuras comparações com o trabalho realizado por Barros [49] a mesma técnica CLEAN foi escolhida para a limpeza dos perfis de retardos de potência, que envolve os seguintes passos:

1. Inicie a variável PERFILSUJO fazendo $\text{PERFILSUJO}(\tau)=|h(\tau)|$;

Comentário:

$|h(\tau)|$ é o módulo da envoltória complexa da resposta impulsiva que se quer limpar, um vetor de 1601 posições. Cada amostra tem uma amplitude e um retardo característico, o qual varia de 0 a τ_{MAX} .

2. Encontre o maior valor no vetor $\text{PERFILSUJO}(\tau)$ e o atribua a uma variável K;

Comentário:

Este valor de K servirá como um dos critérios para a parada do algoritmo. O outro, vai se referir ao esvaziamento do vetor de coeficientes de correlação, explicado a seguir.

3. Obtenha uma matriz $[A]$ da forma:

$$[A] = \begin{bmatrix} |h_{\text{ref}}(\tau_{\text{pico}} - 2)| & |h(\tau_{\text{pico}_1} - 2)| & |h(\tau_{\text{pico}_2} - 2)| & \cdots & |h(\tau_{\text{pico}_n} - 2)| \\ |h_{\text{ref}}(\tau_{\text{pico}} - 1)| & |h(\tau_{\text{pico}_1} - 1)| & |h(\tau_{\text{pico}_2} - 1)| & \cdots & |h(\tau_{\text{pico}_n} - 1)| \\ |h_{\text{ref}}(\tau_{\text{pico}})| & |h(\tau_{\text{pico}_1})| & |h(\tau_{\text{pico}_2})| & \cdots & |h(\tau_{\text{pico}_n})| \\ |h_{\text{ref}}(\tau_{\text{pico}} + 1)| & |h(\tau_{\text{pico}_1} + 1)| & |h(\tau_{\text{pico}_2} + 1)| & \cdots & |h(\tau_{\text{pico}_n} + 1)| \\ |h_{\text{ref}}(\tau_{\text{pico}} + 2)| & |h(\tau_{\text{pico}_1} + 2)| & |h(\tau_{\text{pico}_2} + 2)| & \cdots & |h(\tau_{\text{pico}_n} + 2)| \end{bmatrix}$$

Comentário:

Na primeira coluna desta matriz têm-se as amostras do vetor $|h_{\text{ref}}(\tau)|$ de referência e, nas demais colunas, têm-se as amostras retiradas do vetor $|h(\tau)|$ que se quer limpar.

Cada elemento na terceira linha desta matriz representa um valor máximo na resposta impulsiva, dentro de uma janela deslizante de 5 amostras.

Para a primeira coluna, calcula-se o pico máximo de $|h_{\text{ref}}(\tau_{\text{pico}})|$. Assim, faz-se coincidir a terceira amostra da janela (amostra central) com este valor. As outras 4 amostras da janela $|h_{\text{ref}}(\tau_{\text{pico}} - 1)|$, $|h_{\text{ref}}(\tau_{\text{pico}} - 2)|$, $|h_{\text{ref}}(\tau_{\text{pico}} + 1)|$ e $|h_{\text{ref}}(\tau_{\text{pico}} + 2)|$ são as duas amostras imediatamente anteriores e posteriores à amostra $|h_{\text{ref}}(\tau_{\text{pico}})|$, e menores em amplitude. O mesmo procedimento é aplicado ao vetor $|h(\tau)|$, que se quer limpar. Neste caso, a janela percorre todos os 1601 pontos, sempre se fazendo coincidir a amostra central da janela a um pico de amplitude, em que as duas amostras vizinhas tenham, asseguradamente, amplitudes menores. Desta forma, da segunda coluna em diante, tem-se amostras do perfil “sujo”, que serão correlacionadas com as amostras da primeira coluna de forma a avaliar o quanto aquela parte deste perfil se assemelha à forma de onda de referência. Assim, as amostras poderão ser consideradas como pertencentes a um multipercurso ou não.

A Figura 5.7 mostra os elementos da matriz para a forma de onda de referência e para aquela a ser limpa, respectivamente. Neste último, os pontos vermelhos indicam os picos consecutivos que obedecem ao critério anterior.

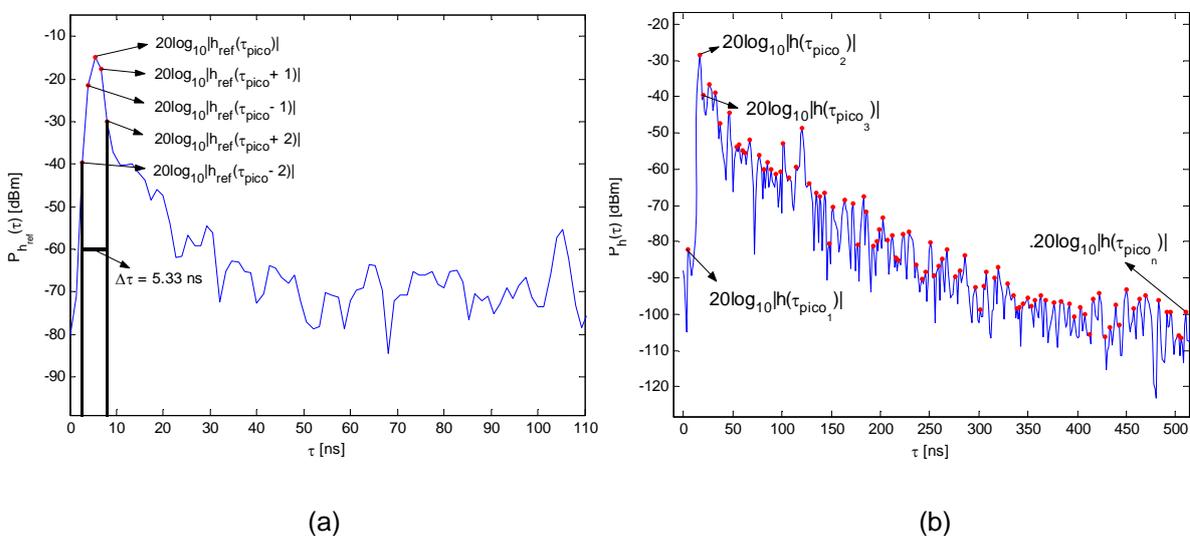


Fig 5.7 - Perfis de Retardos de Potência de Referência (a) e a ser limpo (b).

4. Com a matriz $[A]$ obtenha a matriz de coeficientes de correlação $\rho_{h_{ref},h}$ e os valores de retardo τ_i em PERFILSUJO(τ);

Comentário:

A obtenção da matriz de coeficientes de correlação é feita aplicando-se a função `corrcoef` do Matlab. A primeira linha desta matriz de coeficientes de correlação é, então, atribuída a um vetor R. Exclui-se o primeiro elemento, que representa a correlação da primeira coluna da matriz $[A]$ com ela mesma, sendo que esta pertence ao perfil de referência, o que resulta em um coeficiente de correlação igual a 1. Os outros coeficientes representam a correlação de cada coluna da matriz $[A]$ (a partir da segunda, que representam amostras do perfil que se quer limpar) com a primeira. Em outras palavras, representam a correlação de amostras do perfil sujo com o perfil de referência. Quanto maior for este valor que, por definição, está no intervalo $-1 \leq \rho_{h_{ref},h} \leq 1$, maiores serão as chances da amostra que o gerou ser um percurso válido, que é todo multipercurso considerado como uma amostra pertencente ao perfil de retardos de potência ao final do processamento.

5. Obtenha o valor de PERFILSUJO(τ_i) da amostra que gere o máximo de correlação presente no vetor R.

Comentário:

No algoritmo implementado, adotou-se que apenas correlações maiores do que 0,8 seriam consideradas. Julgou-se que este valor representa um nível de correlação forte o suficiente para se capturar os multipercursos. Valores menores do que este levaria a aquisição de alguns percursos menos correlacionados com o perfil de referência, os quais poderiam não ser multipercursos verdadeiros. Além do mais, este valor igual a 0,8 permite comparações com os resultados obtidos por Barros [49], por ter sido o mesmo valor por ele utilizado. Toda vez que um pico de correlação for detectado, sua posição é zerada no vetor R para que ela não volte a ser detectada pelo programa e o valor desta posição, isto é, seu retardo τ_i é armazenado em um vetor de POSIÇÃO. Vale ressaltar que é este vetor com as posições de retardo τ que é utilizado para se gerar o perfil de retardos de potência limpo, ao final do processamento.

6. Obtenha um fator de escala F de modo a deixar o valor de pico do perfil de referência $\left| h_{\text{ref}}(\tau_{\text{pico}}) \right|$ na mesma escala de amplitude da amostra obtida no passo 5, de acordo com a equação:

$$F = \frac{\text{PERFILSUJO}(\tau_i)}{\max \left[\left| h_{\text{ref}}(\tau) \right| \right]}$$

Comentário:

Este valor reduz a amplitude de todo o vetor dado por PERFILSUJO e permite a eliminação de uma componente de multipercurso, como será visto no passo seguinte. Esta redução iterativa nas amplitudes do perfil que está sendo limpo permite o controle de saída, como será visto no passo 8, e faz com que componentes mais fracas sejam ainda mais reduzidas, até que todas estejam abaixo de certo limiar, quando o algoritmo termina.

7. Multiplique $\left| h_{\text{ref}}(\tau_{\text{pico}}) \right|$ deslocada de $(\tau_i - \tau_{\text{pico_ref}})$ pelo fator F e subtraia o resultado de PERFILSUJO para que uma componente de multipercurso desapareça, de acordo com a equação:

$$\text{PERFILSUJO}(\tau) = \text{PERFILSUJO}(\tau) - \left| h_{\text{ref}}(\tau_{\text{pico}} - \tau_i) \right| \times \underbrace{\frac{\text{PERFILSUJO}(\tau_i)}{\max \left[\left| h_{\text{ref}}(\tau) \right| \right]}}_F$$

Comentário:

A cada vez que o algoritmo entra neste passo, uma componente de multipercurso desaparece, ou seja, é zerada. Observe que, quando $\tau = \tau_i$, pela equação acima, tem-se que, a amostra $\text{PERFILSUJO}(\tau_i)$ será eliminada, já que nesta posição

$$\left| h_{\text{ref}}(\tau_{\text{pico}} - \tau_i) \right| = \max \left[\left| h_{\text{ref}}(\tau) \right| \right] = \left| h_{\text{ref}}(\tau_{\text{pico}}) \right|.$$

8. Caso todas as amplitudes do vetor $\text{PERFILSUJO}(\tau)$ estiveram X dB abaixo do valor K (encontrado no passo 2), ou se o vetor de coeficientes de correlação R estiver todo zerado, o algoritmo deve ser parado. X representa a diferença, em dB, entre o maior valor de amplitude no perfil de retardos de potência que se está limpando e o valor de amplitude da amostra que está sendo analisada. A Figura 5.8 (a) ilustra a variável X. Caso contrário, volta-se para o passo 5.

Comentário:

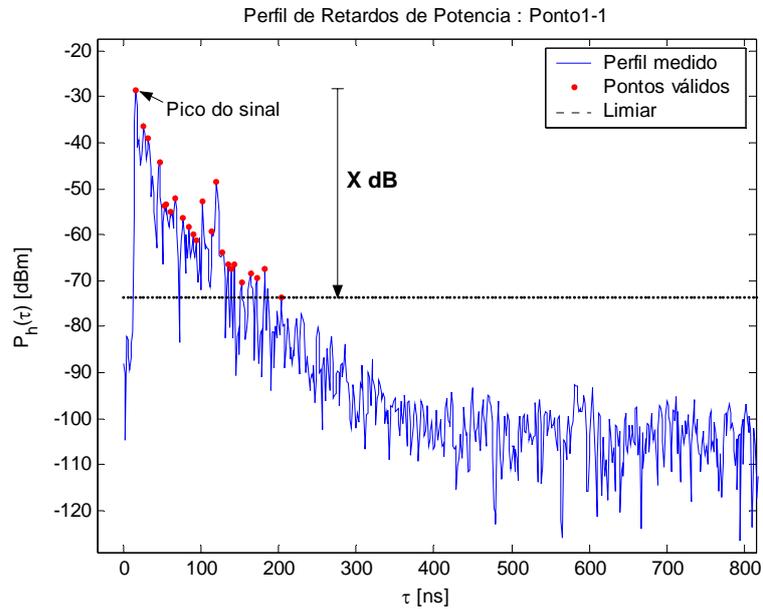
O primeiro critério de parada assegura que nenhuma amostra com uma relação sinal-ruído menor do que “X” dB, seja capturada. A escolha deste valor de X dB de margem se respalda no “sentimento de engenharia” do autor para que seja possível diferenciar o que é sinal do que é ruído.

Vale ressaltar que X dB neste trabalho foi escolhido, criteriosamente, para cada local medido. Alguns autores, no entanto, preferem mantê-lo fixo.

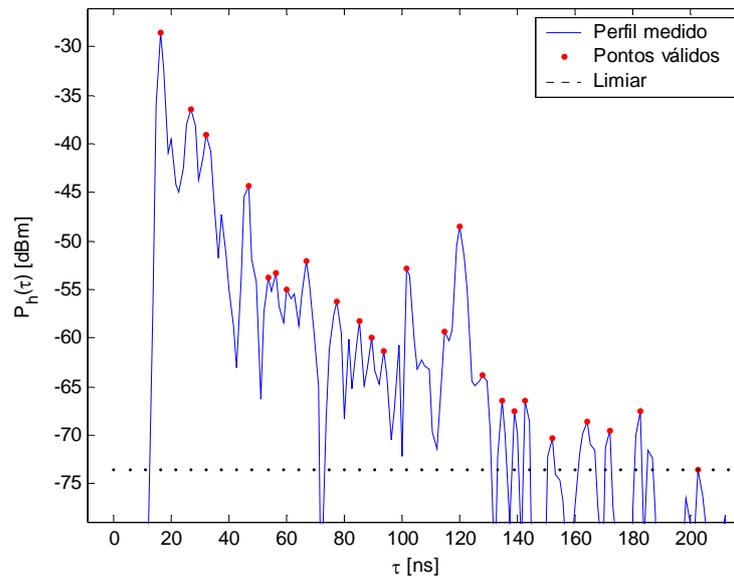
A escolha de um valor fixo para todos os ambientes e para todos os pontos medidos pode, no entanto, conduzir a erros de interpretação nos resultados. Tal valor pode ser escolhido baixo demais para determinado local, o que acarretaria mais amostras do perfil como percursos válidos, muitas das quais situadas em elipses de retardos que não refletiriam as dimensões físicas do ambiente sob análise. Este valor de margem também pode ser escolhido alto demais para um dado local. Neste caso, menos percursos válidos seriam capturados, subestimando os cálculos de retardo médio e espalhamento de retardos, por exemplo.

O segundo critério ocorre na eventual possibilidade de todos os percursos, que gerem coeficientes de correlação maiores do que 0,8, serem considerados como válidos no perfil sendo, então, zerados, para não serem considerados no *loop* seguinte. Em outras palavras, à medida que os elementos do vetor R são utilizados, eles vão sendo zerados, para que todos os elementos de R sejam considerados uma única vez.

A Figura 5.8 mostra um perfil de retardos de potência, depois da aplicação da técnica CLEAN. Na Figura 5.8(b), é apresentada a parte que contém apenas os percursos capturados pelo algoritmo.



(a)



(b)

Fig 5.8 - Perfil de Retardos de Potência após a Técnica CLEAN (a) e com Zoom (b).

5.5 Considerações sobre os Coeficientes de Correlação e a Função Janela Utilizada

O vetor de coeficientes de correlação R sofre influência do tipo de função janela empregada o que afeta, diretamente, os percursos serem capturados ou não pelo algoritmo

CLEAN. A função janela, como explicada anteriormente, ao multiplicar a função $[T]_{f \times t}$ para se calcular a IDFFT em seguida, gera amostras com amplitudes que são função da janela utilizada. O resultado da IDFFT, então, apresenta vazamentos espectrais que podem influenciar as amostras do vetor R, que são comparados ao valor de 0,8 para serem ou não aproveitadas pelo algoritmo.

Foi observado que a aplicação da Função Janela influencia no valor dos coeficientes de correlação. Para algumas amostras importantes, como o raio direto, o valor do coeficiente de correlação ficou abaixo do limiar de 0,8 adotado, deixando, pois, de aparecer no perfil limpo. Faz-se destacar que estas ocorrências foram raras, mas existiram. O mesmo ocorreu para outras amostras, dentro de um mesmo perfil, e para pontos diferentes do *grid*. Este fato é consequência direta do princípio de funcionamento da técnica CLEAN, que compara uma forma de onda, tomada como padrão, com uma que se quer limpar. Também, deve ser observada a natureza experimental das medidas tomadas.

Um estudo mais detalhado, no sentido de se avaliar quais as características de sondagem (tempos de varredura, número de amostras discretas e diferentes espaçamentos do *grid*) e os tipos de ambiente medidos que mais se adequam à Janela de Blackman-Harris de 3 termos, exporia melhor o comportamento desta. Contudo, este não é o objetivo deste trabalho.

6 RESULTADOS

Este capítulo visa apresentar os resultados de todo o processamento realizado, bem como os procedimentos adotados para se chegar aos mesmos. Os resultados compreendem os valores dos parâmetros de dispersão do canal, em função da janela e técnica de limpeza empregada. O Apêndice C reúne o conjunto completo dos resultados de todos os locais medidos de forma mais detalhada, na forma de gráficos e tabelas.

6.1 Considerações Iniciais quanto à Escolha do Limiar de Decisão

Primeiramente, foi feita uma investigação visual dos perfis de retardos de potência, em cada local de determinado ambiente medido, a fim de se escolher o melhor valor de limiar a ser adotado na técnica de limpeza. É certo que a distância TX-RX influencia nesta escolha. Distâncias menores permitem o uso de limiares menores, já que o sinal medido tende a ser mais forte. Distâncias maiores pedem o uso de limiares superiores, uma vez que o sinal se apresenta menos intenso e mais ruidoso. O objetivo inicial era estabelecer um limiar único que pudesse ser utilizado em todo o ambiente medido (em todos os locais deste ambiente, em LOS e NLOS) de forma a se universalizar as comparações. Contudo, esta abordagem inicial não se mostrou a mais apropriada para se caracterizar as peculiaridades de cada local medido. A escolha de um limiar fixo subestimaria os valores dos parâmetros dispersivos do canal, dada a diversidade dos locais medidos dentro de um mesmo ambiente.

Nos ambientes em que o *grid* foi utilizado, a escolha deste limiar foi feita de acordo com o seguinte critério: o tempo que vai do momento em que a antena de RX está disponível para receber sinais até o momento em que chega o raio direto é composto apenas de ruídos, já

que não há outro sinal sendo transmitido no local. Assim, o limiar é estabelecido de tal sorte a eliminar estes valores do perfil. É importante esclarecer que, antes da aplicação do limiar, estes ruídos podem ser considerados como percursos válidos, devido à técnica CLEAN. Como foi explicado no Capítulo 5, um trecho do perfil que se “pareça” com o perfil de referência é capturado pela técnica. Daí, então, a necessidade de se aplicar um limiar e deixar no perfil apenas as amostras que, sugestivamente, são sinais refletidos, e não ruído. Para os locais com distância TX-RX menor, este tempo mencionado antes é também menor, deixando o perfil com menos ruídos neste intervalo. Este fato levaria a um limiar mais baixo, o que, contudo, prejudicaria a análise de todos os locais medidos, sobretudo aqueles com distâncias TX-RX maiores.

A determinação efetiva do limiar foi feita ajustando-se, adequadamente, o valor numérico “X” de acordo com a equação (6.1) seguinte, também utilizada por Barros [49], de forma a atender ao critério acima sugerido:

$$\text{LIMIAR} = \max(\text{perfil}_{\text{dBm}}) - X \quad (6.1)$$

O valor X foi escolhido convenientemente de maneira a eliminar os ruídos do início do perfil para todos os perfis medidos em cada local, e foi mantido fixo para este local em questão. Assim sendo, este valor X é único para cada local considerado, podendo variar conforme as características dos locais analisados e distâncias TX-RX tomadas.

A Figura 6.1 ilustra o que foi explicado. Nela, observa-se que com X alguns ruídos de início de perfil são capturados, havendo, então, a necessidade de se escolher valor menor para X neste local específico. Este procedimento refletiu bem o tamanho do ambiente com os multipercursos nele encontrados.

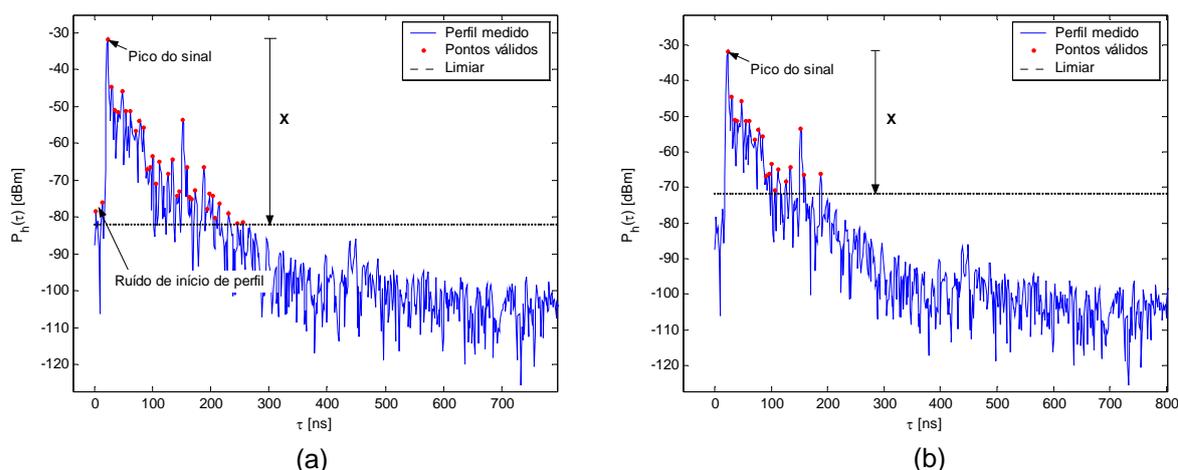


Fig 6.1 - Considerações quanto ao Parâmetro X com Indicação do Ruído de Início de Perfil sendo capturado (a) e não sendo capturado (b).

Nos dois ambientes em que se buscou avaliar a atenuação com a distância, um valor para o limiar foi adequadamente escolhido e mantido fixo por trechos, de forma a se capturar percursos notadamente válidos no perfil. Outros métodos foram tentados, mas não se mostraram tão eficientes quanto este. A escolha de um limiar fixo prejudicaria muito a análise dos perfis obtidos mais próximos do receptor, comparativamente àqueles mais distantes. A utilização do critério dado pela equação (6.1) também se mostrou tarefa difícil para que todos os multipercursos visivelmente válidos fossem capturados. A escolha do parâmetro X individual para cada ponto medido resolveria este problema. Contudo, este procedimento equivale a se escolher um limiar fixo por trechos, como foi feito. Aqui, vale esclarecer que o caráter prático das medidas, como eventos fora de controle (movimentação aleatória de veículos, árvores *etc*) muitas vezes faziam surgir os ruídos de início de perfil tal como explicado antes. Para estes casos, tais ruídos foram descartados computacionalmente e, portanto, excluídos dos cálculos, sem qualquer prejuízo para os resultados.

A Figura 6.2 ilustra o que foi feito. Nela, observa-se que o limiar foi estabelecido em -85 dBm de forma que todos os multipercursos principais fossem levados em conta. Se este fosse marcado em -75 dBm ou -80 dBm, certamente alguns multipercursos importantes seriam deixados de fora dos cálculos.

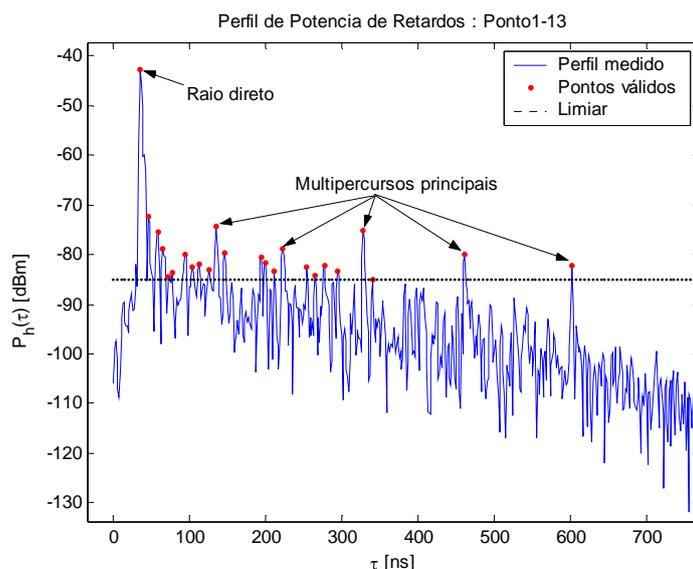


Fig 6.2 - Perfil de Retardos Potência com Indicação do Raio Direto e dos Principais Multipercursos, a 10 metros do Receptor, no Ambiente D2.

Outro ponto que sempre mereceu atenção na determinação do limiar, em qualquer dos ambientes medidos, foi a posição dos últimos retardos. Houve-se a preocupação de que estes retardos não fossem maiores que as dimensões físicas do local medido. O produto da velocidade da luz por este retardo define a distância percorrida, que deve ser tal que “caiba” no ambiente. Esta distância, na verdade, não é tão simples de se avaliar, visto que ela depende, também, do número de reflexões ocorridas no ambiente. Aqui, novamente, valeu-se do bom senso de Engenharia.

Tal como será apresentado nas tabelas seguintes, os valores dos parâmetros “X” e dos limiares foram escolhidos como números inteiros e múltiplos de 5, sem casas decimais. Um ajuste mais fino para cada perfil medido mostrou-se desnecessário. Para os locais medidos com o *grid*, uma variação de 1 a 5 dB não alterava significativamente o número de multipercursos capturados, nem tampouco alterava muito os valores dos parâmetros dispersivos do canal. Para os locais medidos sem o *grid*, em linha reta, o ajuste do limiar como múltiplos de 5 dB mostrou-se suficiente e simples para a captura dos multipercursos que se quis que fossem levados em conta.

No mais, o processamento seguiu o esquema a seguir:

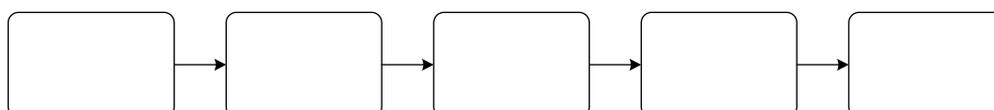


Fig 6.3 - Esquema Geral do Processamento Adotado.

O Apêndice B reúne toda a programação computacional, escrita em linguagem Matlab, empregada para se obter os resultados apresentados neste capítulo.

6.2 Relação entre Banda de Coerência e Espalhamento de Retardos

Para que se possa compreender melhor os resultados que serão apresentados, antes de iniciar a apresentação dos mesmos serão feitas algumas considerações quanto ao relacionamento entre banda de coerência e o espalhamento de retardos.

Muitos autores [34],[50] já tentaram relacionar banda de coerência e espalhamento de retardos em banda larga, sem que tenham conseguido um modelamento mais preciso. Estas tentativas foram feitas, sobretudo para ambientes *indoor*, tidos como de maior potencial para aplicação de tecnologias de banda larga.

Neste trabalho será aplicada a relação de Gans [62] e o já bastante utilizado limiar de Fleury [63], para cada um dos locais medidos quando da análise em pequena escala.

Gans [62] propôs uma relação da forma:

$$B_C = \frac{1}{\alpha \cdot \tau_{\text{rms}}} \quad (6.2)$$

sendo α uma constante numérica.

Fleury [63], por outro lado, propôs um limiar inferior na relação entre banda de coerência e espalhamento de retardos, segundo o qual todas as amostras medidas estariam acima deste limiar. O limiar de Fleury é dado por:

$$B_C \geq \frac{\arccos(C)}{2 \cdot \pi \cdot \tau_{\text{rms}}} \quad (6.3)$$

sendo C o nível de correlação utilizado na definição de banda de coerência e dado pela função de correlação $R_T(\Omega)$.

Na literatura sobre banda larga, onde foi aplicada a equação de Gans, os valores de α obtidos foram bem variados, dificultando um ajuste ideal. Com relação ao limiar de Fleury constata-se, na literatura, uma grande quantidade de dados desrespeitando tal limiar, em função da aquisição de valores imprecisos de banda de coerência e espalhamento de retardos por técnicas de sondagem em banda larga de resolução limitada. Neste trabalho, com a técnica de sondagem em frequência, em uma banda ultralarga, consegue-se reduzir a resolução melhorando a estimativa de α .

Vale destacar que ainda não se sabe a exata relação entre banda de coerência e espalhamento de retardos, e que os valores encontrados para α neste trabalho são uma contribuição científica acerca deste assunto, sobretudo pela massificação de valores encontrados para 16 ambientes diferentes dentre os 18 ambientes sondados.

6.3 Ambientes para Análise em Pequena Escala

Como foi explicado no Capítulo 2, a análise em pequena escala visa o levantamento dos parâmetros dispersivos do canal, que são importantes para o modelamento do mesmo. Os ambientes considerados neste caso foram os seguintes, conforme classificação apresentada no Capítulo 4: ambientes *indoor-outdoor* e *outdoor-indoor*; ambientes próximos a construções e ambientes mais amplos, próximos a construções e jardins. As informações que caracterizam estes ambientes serão apresentadas em tabelas, de forma a facilitar as comparações. Alguns gráficos, mais representativos dos cenários, também são apresentados. No Apêndice C, podem ser encontrados os resultados completos de todos os locais medidos. Informações mais detalhadas de cada ambiente podem ser encontradas no Capítulo 4.

6.3.1 Ambientes *indoor-outdoor* e *vice-versa*

6.3.1.1 Segundo Andar do Bloco D *indoor-outdoor* (A1) e *outdoor-indoor* (A2)

As medidas nestes ambientes foram feitas de acordo com a Figura 4.2, do Capítulo 4. Pode-se notar, conforme mostra a Tabela 6.1, que os valores medidos são bem comportados, reproduzindo bem as características dos ambientes em questão. A tabela apresenta os valores

médios dos ambientes A1 e A2, visto que no primeiro é o transmissor que está fixo dentro do prédio e no segundo é o receptor. Para o entendimento do texto, faz-se claro que, nesta tabela e em todo o restante deste capítulo, BC significa banda de coerência.

	Local 1		Local 2		Local 3		Local 4		Local 5		Local 6		Local 7	
	LOS		LOS		LOS		NLOS		LOS		LOS		NLOS	
	A1	A2												
$\bar{\tau}$ [ns]	40,28	42,08	49,89	51,68	46,77	51,96	50,93	37,97	89,50	90,65	103,57	111,09	42,95	60,31
σ_{τ} [ns]	37,97	41,28	35,23	42,39	36,45	45,68	33,85	14,95	40,76	41,86	31,77	45,38	33,80	59,15
Razão	0,05	0,05	0,07	0,07	0,06	0,06	0,11	0,38	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,04
BC 0,7 [MHz]	32,66	24,32	35,47	46,85	28,44	28,88	18,98	2,85	18,68	18,76	51,43	17,80	28,05	20,30
BC 0,9 [MHz]	8,75	8,63	4,30	12,46	7,43	7,43	6,68	1,26	8,15	6,30	6,20	2,36	7,59	6,07
NMP	27	32	19	28	20	36	21	6	28	15	18	17	33	41
X [dB]	50	55	40	50	40	55	35	20	45	30	35	30	55	50
Limiar [dBm]	-77,20	-82,09	-72,39	-80,28	-71,41	-85,50	-72,86	-59,37	-86,78	-56,51	-83,17	-78,59	-89,21	-84,61
$\alpha_{BC0,7}$	0,82	1,00	0,81	0,51	0,98	0,77	1,57	26,73	1,33	1,28	0,62	1,24	1,06	0,83
$\alpha_{BC0,9}$	3,02	2,82	6,55	1,90	3,73	2,96	4,43	63,98	3,04	3,84	5,13	9,47	3,92	2,79

Tabela 6.1 - Resultados obtidos nos Ambientes A1 e A2.

A coluna razão, na primeira tabela, é o quociente entre o desvio padrão e a média do espalhamento de retardos. Observa-se que tais valores obtidos são baixos, o que leva a uma confirmação da estacionaridade do canal nos locais medidos, como foi suposto no desenvolvimento teórico apresentado no Capítulo 2.

Na Figura 4.2 (a) e (b), do Capítulo 4, observa-se que o transmissor e o receptor estão fixos e localizados dentro do prédio, respectivamente. Os locais 1, 3 e 7 estão dentro do mesmo prédio, numa configuração *indoor-indoor*. Os locais 2, 4 e 5 estão no lado de fora, numa configuração *indoor-outdoor*. O local 6 está dentro de outro prédio, mas em visada com o transmissor colocado no primeiro, numa configuração *indoor-outdoor-indoor*.

A coluna NMP significa o número de multipercursos válidos capturados pela técnica CLEAN e pelo limiar estabelecido, que é função do parâmetro “X” explicado anteriormente.

Os retardos médios normalmente refletem a distância de separação entre TX-RX, através do produto entre retardo médio e velocidade da luz. Os valores de retardo foram acrescidos de 2 ns, aproximadamente, devido ao atraso de propagação nas antenas e conectores, que não puderam ser levadas em conta na calibração do *setup*, conforme foi apresentado no Capítulo 2.

Os valores de espalhamento de retardos ficaram em torno de 36 ns em A1 e 41,5 ns em A2. Os perfis de retardos para o ambiente A1 apresentaram o mesmo comportamento, a mesma forma decrescente, em cada um dos locais e apenas um ponto do local 2, para a banda de coerência de 0,9, ficou abaixo do limiar de Fleury.

Graças à simetria obtida nas medições, pode-se agora tirar mais conclusões quanto aos parâmetros do canal nas duas configurações: *indoor-outdoor* e *outdoor-indoor*. Como já foi mencionado antes, a localização do transmissor dentro ou fora do prédio, em cada momento, permite que um sinal mais forte incida sobre diferentes espalhadores em cada situação, contribuindo de forma significativa para o sinal na recepção.

Nota-se que o espalhamento de retardos do local 4 em A2 já ficou um pouco prejudicado (razão = 0,38). Neste local, todos os pontos ficaram abaixo do limiar de Fleury. Nos outros locais de A2 o limiar de Fleury foi respeitado.

Em relação ao ambiente A1 tanto o espalhamento de retardos quanto o retardo médio aumentaram em A2, conseqüência do menor vazamento de potência para dentro do prédio. A exceção foi justamente o local 4 medido *outdoor-indoor*.

As bandas de coerência de 0,9 dos pontos internos (1, 3 e 7) não mudaram muito. Já para os pontos externos (4, 5 e 6), com exceção do local 2, as banda de coerência de 0,9 diminuíram.

A Figura 6.4, obtida com os parâmetros do local 4 de A1, ilustra o relacionamento entre as bandas de coerência e o espalhamento de retardos. Os pontos representam os dados medidos; a curva tracejada representa o limiar de Fleury e a contínua, a curva de melhor ajuste dada pelo modelo proposto por Gans. Para os outros locais obteve-se comportamento semelhante.

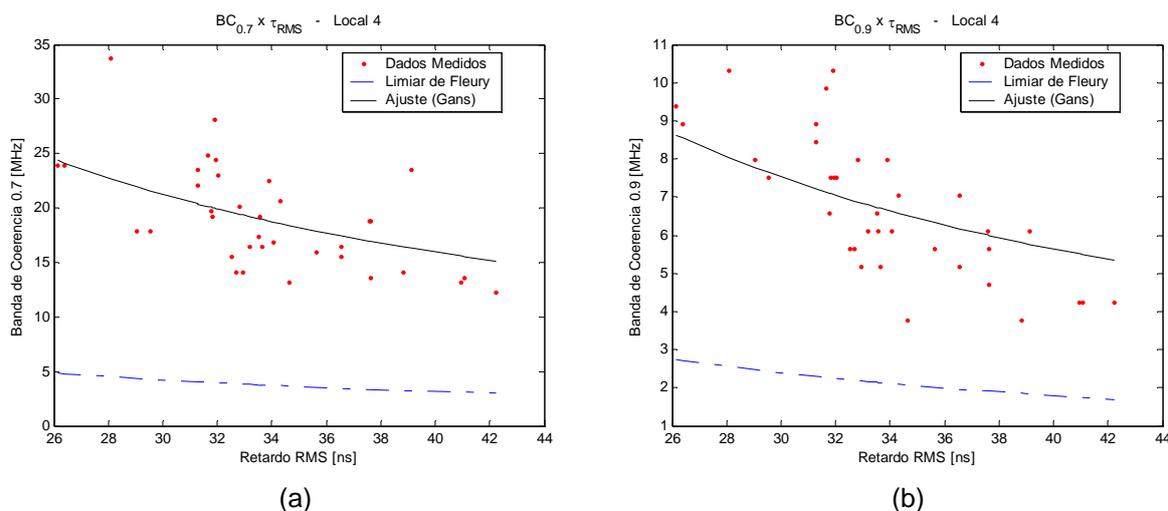


Fig 6.4 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos para o Ambiente A1, Local 4, BC 0,7 (a) e BC 0,9 (b).

Já os gráficos da Figura 6.5 mostram um caso que o limiar de Fleury foi desrespeitado. Trata-se do local 4 de A2.

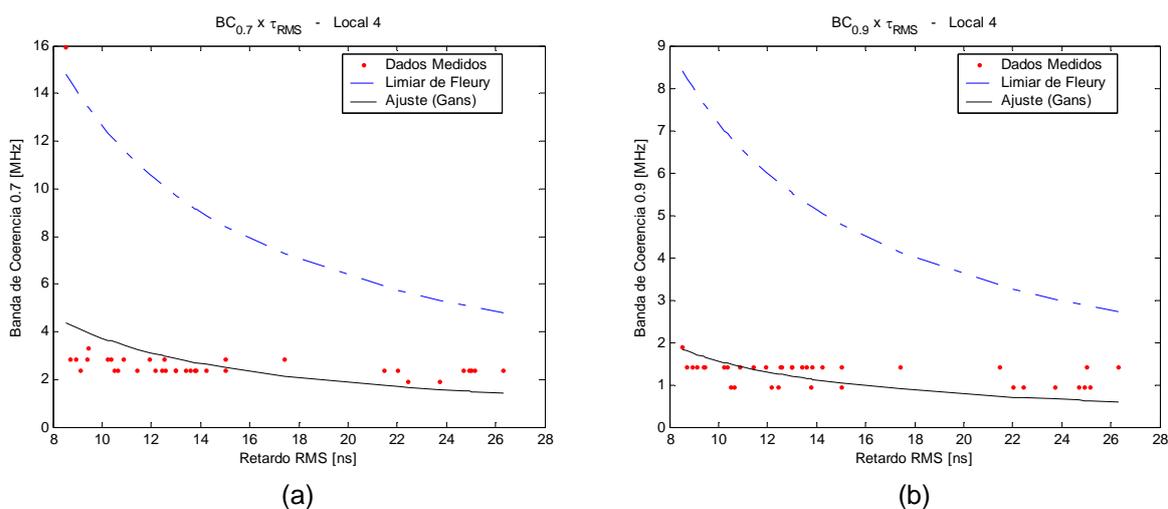


Fig 6.5 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos para o Ambiente A2, Local 4, BC 0,7 (a) e BC 0,9 (b) .

Para os locais de A2 em que o limiar não foi excedido, o comportamento foi similar aos gráficos de A1, apresentados acima.

Quanto aos perfis de retardos de potência, observa-se que os gráficos apresentaram uma mesma aparência. Em cada um deles se pode notar a presença de algum espalhador em especial. O sinal mais forte sai do transmissor e é espalhado, ao longo do percurso, até o receptor e está diretamente ligado às distâncias até os espalhadores vizinhos.

A Figura 6.6 ilustra um perfil do local 2 de A1 em que se pode notar um multipercurso em torno de 115 ns, que representa o sinal refletido na parede em frente a este local.

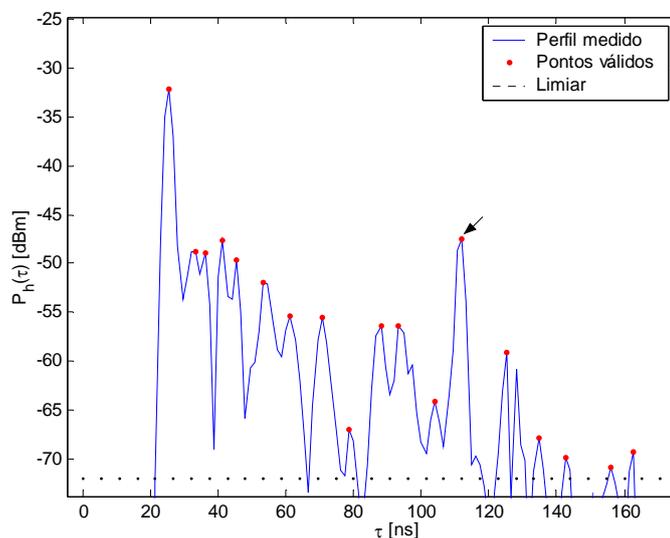


Fig 6.6 - Perfil de Retardos Potência (PRP), Ambiente A1, Local 2.

As Figuras 6.7 (a) e (b) ilustram o comportamento do perfil de retardos de potência para o local 7 (o interior do banheiro masculino, no segundo andar do Bloco D) nas configurações A1 e A2, com o receptor dentro do banheiro e o transmissor do lado de fora, em frente a entrada deste banheiro e, ao contrário, respectivamente. Em A2, pode-se notar claramente dois conjuntos de multipercursos bem destacados.

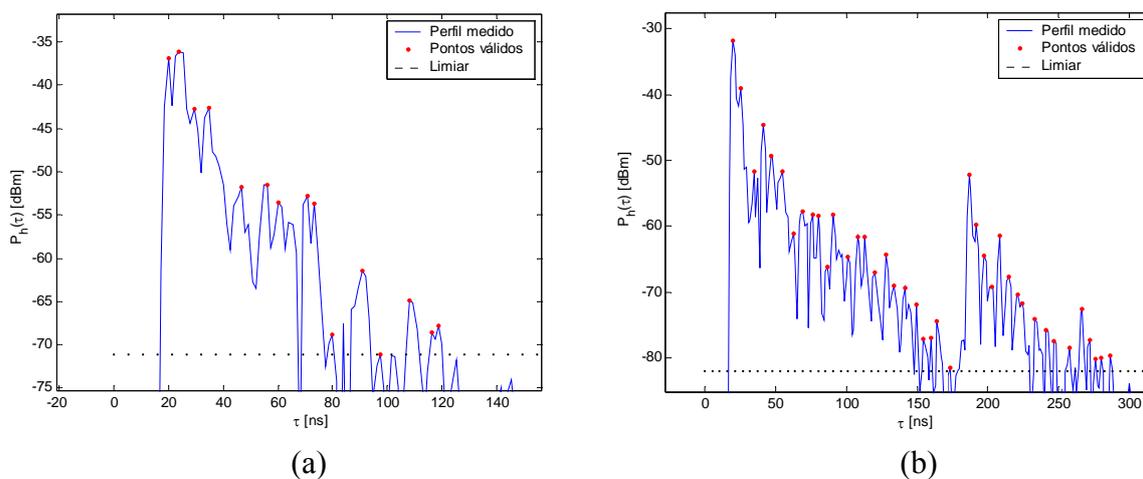


Fig 6.7 - Perfil de Retardos Potência para o Ambiente A1, Local 7 (a) e para o Ambiente A2, Local 7 (b).

Todas as figuras apresentadas no Capítulo 4 têm suas distâncias relativas TX-RX referenciadas ao ponto central do *grid*. Por este motivo, optou-se em apresentar como figuras de perfil deste trabalho, a título ilustrativo e explicativo, aquelas obtidas no ponto 15 do *grid*, por ser um ponto situado na região central do mesmo.

6.3.1.2 Terceiro Andar do Bloco D *indoor-outdoor* (A3) e *outdoor-indoor* (A4)

Estes ambientes referem-se à Figura 4.3, do Capítulo 4. A Tabela 6.2 apresenta os resultados encontrados para estes ambientes.

	Local 1			Local 2		Local 3		Local 4		Local 5		Local 6	
	LOS			LOS									
	A3	A3'	A4	A3	A4								
$\bar{\tau}$ [ns]	45,45	69,17	49,84	40,70	40,67	50,01	48,05	62,81	59,41	76,46	76,00	116,82	110,00
σ_{τ} [ns]	23,63	45,48	39,67	38,15	38,35	48,39	42,63	48,16	44,46	48,78	46,00	57,76	43,78
Razão	0,13	0,12	0,05	0,07	0,07	0,07	0,09	0,06	0,08	0,07	0,08	0,07	0,05
BC 0,7 [MHz]	16,50	16,50	20,81	21,13	23,96	46,08	45,46	44,96	39,52	93,79	71,91	30,14	33,39
BC 0,9 [MHz]	2,36	2,36	7,30	6,68	8,54	12,60	12,59	12,59	10,63	13,79	13,42	5,17	5,01
NMP	9	24	28	18	25	33	30	35	31	33	31	32	25
X [dB]	25	40	50	40	50	50	50	50	50	50	50	45	40
Limiar [dBm]	-47,30	-62,30	-80,50	-56,49	-75,84	-79,52	-79,33	-84,22	-83,70	-84,84	-85,23	-94,84	-87,63
α (BC 0,7)	2,58	1,36	1,22	1,26	1,10	0,44	0,52	0,45	0,57	0,21	0,30	0,58	0,68
α (BC 0,9)	18,16	9,52	3,47	3,98	3,09	1,62	1,87	1,61	2,09	1,45	1,59	3,38	4,57

Tabela 6.2 - Resultados obtidos nos Ambientes A3 e A4.

Para o local 1 de A3, a condição de se estabelecer o limiar de forma a se eliminar os ruídos de início de perfil foi parcialmente considerada. Para alguns pontos do *grid* deste local a ocorrência de tais ruídos levou a um limiar maior, impedindo que percursos notadamente válidos fossem capturados. Assim, o limiar foi diminuído para um nível que contemplasse os multipercursos que se queria, sendo que os ruídos de início de perfil foram descartados. Esta consideração se mostrou significativa como se pode ver na tabela em A3'. O limiar de Fleury, que havia sido desrespeitado no primeiro caso, passou a ser obedecido no segundo caso. As bandas de coerência não se alteram, uma vez que são calculadas independentemente do valor do limiar, conforme foi explicado no Capítulo 2. Aqui se observa a importância do cuidado que se deve ter quando da análise de cada local e determinação do limiar de decisão. A diminuição do limiar no local 1 de -47 dBm para -62 dBm e o conseqüente aumento dos

valores de retardo médio e espalhamento de retardos pareceu ser o procedimento correto a ser adotado, uma vez que compatibilizou bem com o local 1 do ambiente A3, que não apresentou o problema dos ruídos de início de perfil. A Figura 6.8 mostra como ficou o perfil para o local 1 de A3.

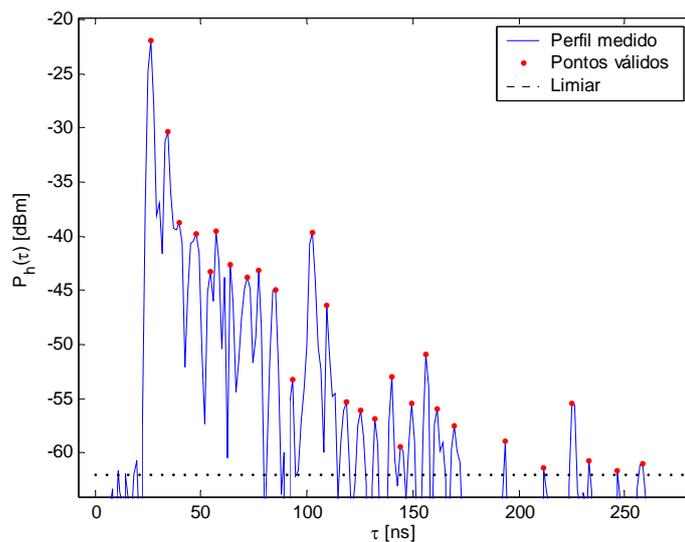


Fig 6.8 - Perfil de Retardos Potência, Ambiente A3, Local 1.

Os demais perfis tiveram um comportamento bem próximo do apresentado na Figura 6.9, em que se pode notar trechos do eixo dos retardos sem multipercursos acima de 250 ns. O mesmo não ocorreu para os locais do ambiente A4.

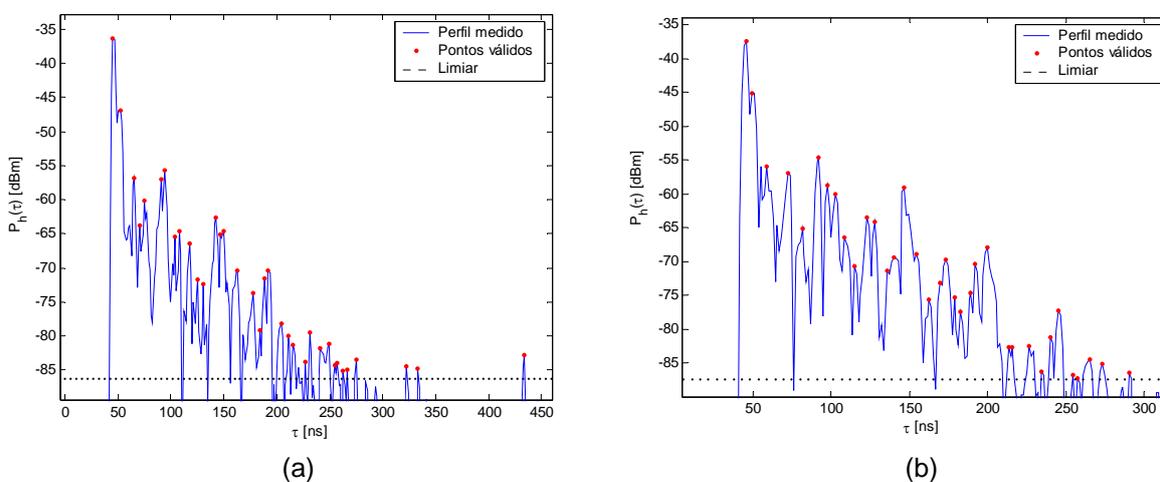


Fig 6.9 - Perfil de Retardos Potência nos Ambientes A3, Local 5 (a) e A4, Local 5 (b).

Para todos os locais do ambiente A3, incluindo o procedimento adotado para o local 1, nenhum ponto ficou abaixo do limiar de Fleury. No ambiente A4, apenas um ponto ficou abaixo do limiar, no local 6, com banda de coerência de 0,9, como se vê nos gráficos da Figura 6.10.

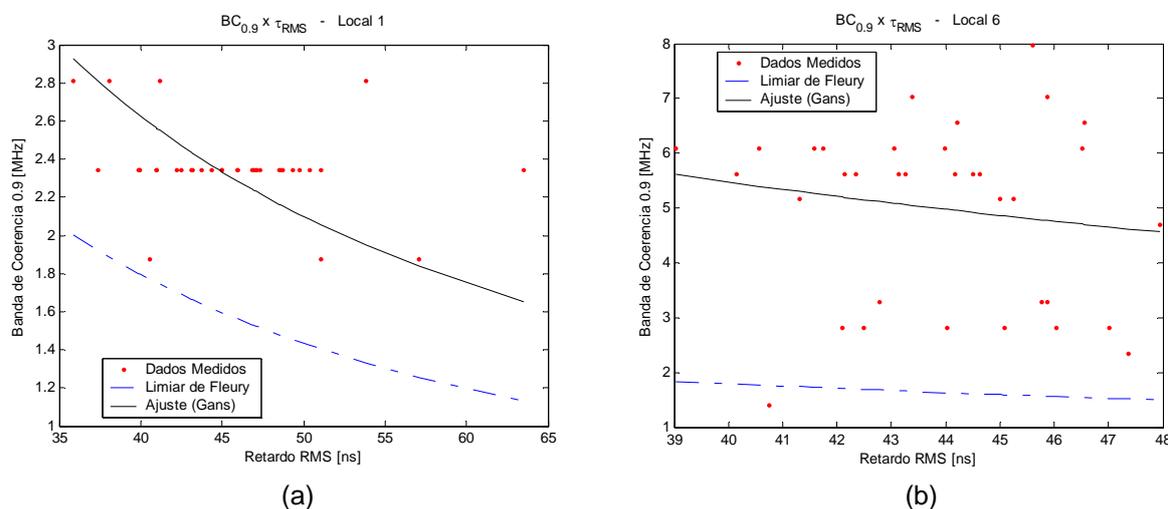


Fig 6.10 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos nos Ambientes A3, Local 1, BC 0,9 (a) e A4, Local 6, BC 0,9 (b).

De uma maneira geral, os valores de retardo médio e espalhamento de retardos tenderam a diminuir no ambiente A4, em comparação com o A3. Apesar do número de multipercursos ter sido aproximadamente o mesmo para cada local nos dois ambientes, o ambiente A3 apresentou valores de retardos maiores. O transmissor fixo, dentro do prédio (situação do ambiente A3), permite que as reflexões internas saiam pela porta com mais intensidade, o que faz aparecer multipercursos em retardos maiores. Já o transmissor fora do prédio e o receptor fixo do lado de dentro (situação do ambiente A4) favorece com que os sinais refletidos se espalhem mais no ambiente *outdoor*, e cheguem menos intensos no receptor, resultando em multipercursos em retardos menores que os que apareceram no ambiente A3. Os valores de α foram, aproximadamente, os mesmos para o mesmo local nos dois ambientes.

6.3.1.3 Hall do Bloco D *indoor-outdoor* (A5) e *outdoor-indoor* (A6)

Este foi o ambiente de transição medido mais espaçoso, tanto pela parte interna quanto pela externa, conforme pode ser observado nas Figuras 4.4, do Capítulo 4. Pela Tabela 6.3, pode-se notar que foram muito poucas as diferenças entre as situações *indoor-outdoor* e

outdoor-indoor. Alguns pontos do *grid* nos locais 5 e 6 estavam em visada, outros parcialmente encobertos pelas paredes que delimitam a porta de saída do *hall* e outros completamente em visada. Enfim, houve um misto de LOS e NLOS nestes dois locais, influenciando certamente nos valores obtidos.

	Local 1		Local 2		Local 3		Local 4		Local 5		Local 6		Local 7	
	LOS		LOS		LOS		LOS		(N)LOS		(N)LOS		LOS	
	A5	A6												
$\bar{\tau}$ [ns]	78,65	73,66	59,27	55,15	53,35	51,42	67,67	65,75	74,42	71,15	66,50	73,92	80,66	80,38
σ_{τ} [ns]	56,56	47,45	49,93	48,50	47,35	48,02	47,39	48,03	49,05	51,57	38,40	50,32	45,86	45,40
Razão	0,03	0,05	0,08	0,05	0,03	0,05	0,05	0,05	0,12	0,05	0,14	0,07	0,05	0,04
BC 0,7 [MHz]	11,58	8,50	33,70	35,08	35,16	44,77	67,24	59,48	26,58	22,41	9,67	9,62	59,43	59,32
BC 0,9 [MHz]	3,49	3,68	6,24	7,15	4,24	9,51	3,50	4,56	2,97	3,41	2,72	2,79	3,37	4,05
NMP	33	35	22	30	26	33	26	32	28	34	19	37	25	32
X [dB]	40	50	35	50	40	55	40	50	35	45	25	45	40	50
Limiar [dBm]	-76,46	-77,68	-74,63	-72,55	-82,89	-75,96	-87,61	-75,62	-90,63	-79,02	-81,79	-78,58	-89,38	-78,37
α (BC0,7)	1,53	2,49	0,60	0,59	0,60	0,47	0,31	0,35	0,73	0,86	2,67	2,02	0,37	0,37
α (BC 0,9)	5,08	5,75	3,31	2,89	4,98	2,21	6,04	4,59	6,89	5,69	9,77	7,12	6,48	5,46

Tabela 6.3 - Resultados obtidos nos Ambientes A5 e A6.

Pela coluna razão pede-se notar que o desvio padrão do espalhamento de retardos foi bem baixo o que indica que seus valores médios não oscilaram muito.

Os valores encontrados para a banda de coerência de 0,9, em todos os locais do ambiente A6, foram maiores do que os encontrados para o ambiente A5.

Os gráficos dos perfis de retardos de potência apresentaram multipercursos localizados, aproximadamente, nos mesmos valores de retardo, para as duas configurações (LOS e NLOS). A diferença principal ficou por conta do nível de potência, em torno de 20 dB mais forte nas medições do ambiente A6. A Figura 6.11 ilustra os perfis para dois locais simétricos, em A5 e A6.

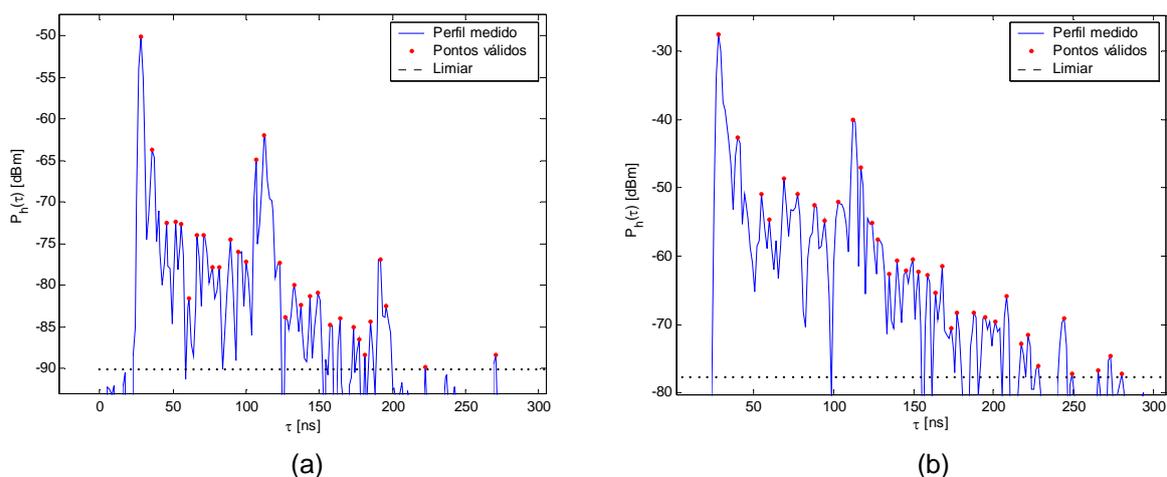


Fig 6.11 - Perfil de Retardos Potência nos Ambientes A5, Local 4 (a) e A6, Local 4 (b).

Tanto para o local 5 quanto para o local 6, em A5 e A6, os perfis apresentaram raios refletidos chegando com menor retardo do que o raio mais forte, o que se deve, sem dúvida, ao fato de a posição central do *grid* ter sido colocada em uma posição que tangenciava a parede da porta de entrada do *hall*. A Figura 6.12 mostra isso.

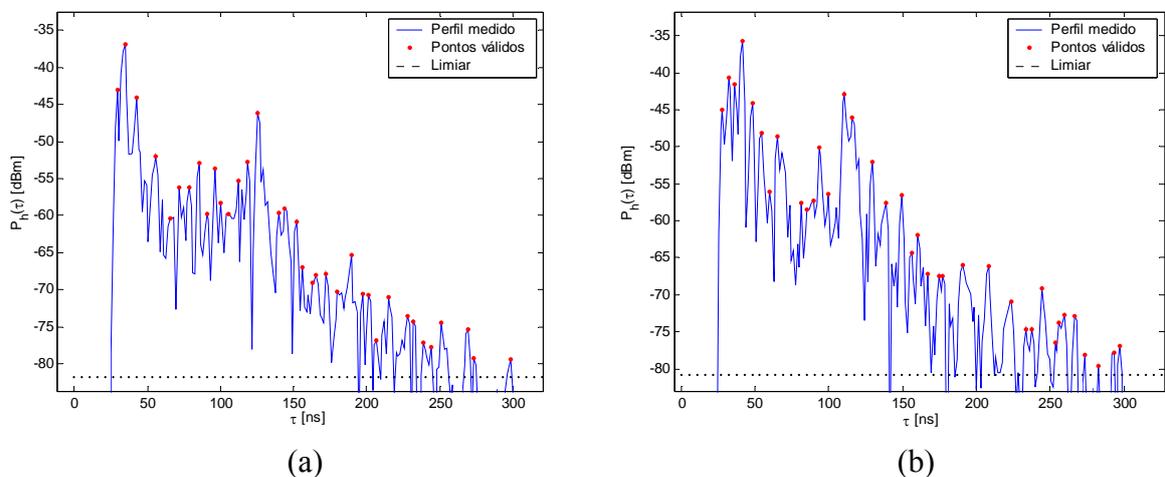


Fig 6.12 - Perfil de Retardos Potência no Ambiente A6, Local 5 (a) e Local 6 (b).

Nenhum local teve o limiar de Fleury desrespeitado. O que pôde ser percebido foi um aumento do parâmetro X e α no ambiente A6 em relação ao A5. Os gráficos que relacionam banda de coerência e espalhamento de retardos apresentaram, em muitos dos locais medidos, vários valores de retardo associados a uma única banda de coerência, para os dois níveis de correlação que vêm sendo tomados. Esta característica se destacou sobretudo para o nível de 0,9. Os gráficos da Figura 6.13 mostram melhor este fato.

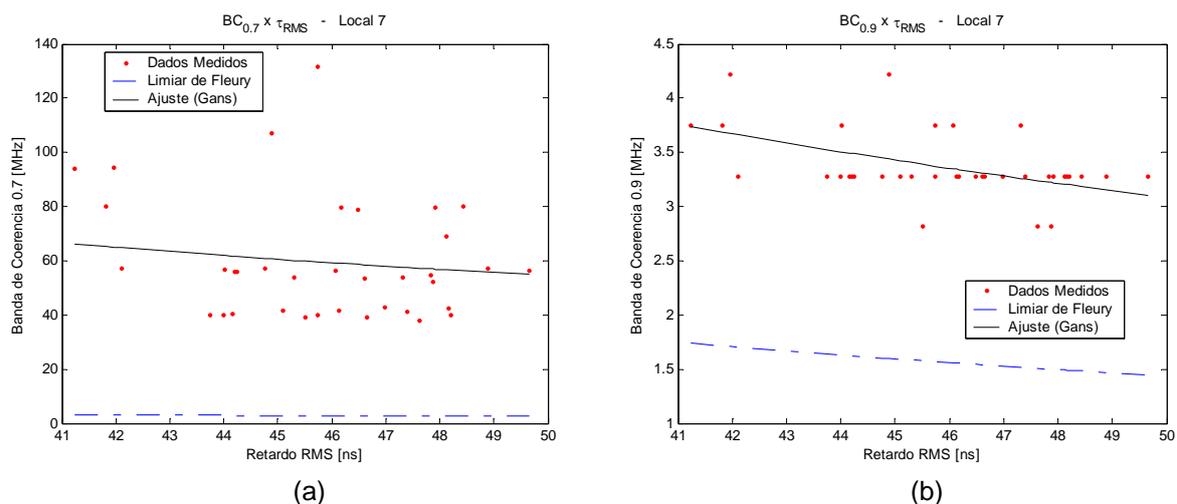


Fig 6.13 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente A5,Local 7, BC 0,7 (a) e BC 0,9 (b).

6.3.1.4 Biblioteca da Engenharia *indoor-outdoor* (A7)

Este cenário contou com apenas quatro locais medidos, na configuração *indoor-outdoor*. Estando o transmissor fixo do lado de dentro da biblioteca pode-se notar o quanto um percurso obstruído faz aumentar o espalhamento de retardos e diminuir a banda de coerência, como se observa pela Tabela 6.4. Em uma situação real de prestação de serviços UWB, a cobertura de uma antena interna seria fortemente afetada à medida que o receptor se colocasse em posição de obstrução com relação ao transmissor. A Figura 4.5, do Capítulo 4, ilustra o ambiente medido.

	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4
	LOS	LOS	NLOS	NLOS
$\bar{\tau}$ [ns]	32,55	38,36	63,11	53,07
σ_{τ} [ns]	35,85	35,80	49,69	40,51
Razão	0,14	0,07	0,09	0,14
BC 0,7 [MHz]	118,65	120,33	8,88	32,50
BC 0,9 [MHz]	31,48	27,70	3,03	6,09
NMP	27	25	30	26
X [dB]	55	50	40	45
Limiar [dBm]	-77,25	-76,57	-81,32	-76,29
α (BC0,7)	0,24	0,23	2,29	0,75
α (BC 0,9)	0,88	1,01	6,73	4,07

Tabela 6.4 - Resultados obtidos no Ambiente A7.

Os perfis de retardos de potência mostram um comportamento esperado, de um sinal que vai ficando mais fraco, quando o receptor se afasta do transmissor. Também pode ser notado um aumento do número de multipercursos quando receptor está fora de visada para o transmissor. A seqüência de gráficos da Figura 6.14 ilustra o ocorrido.

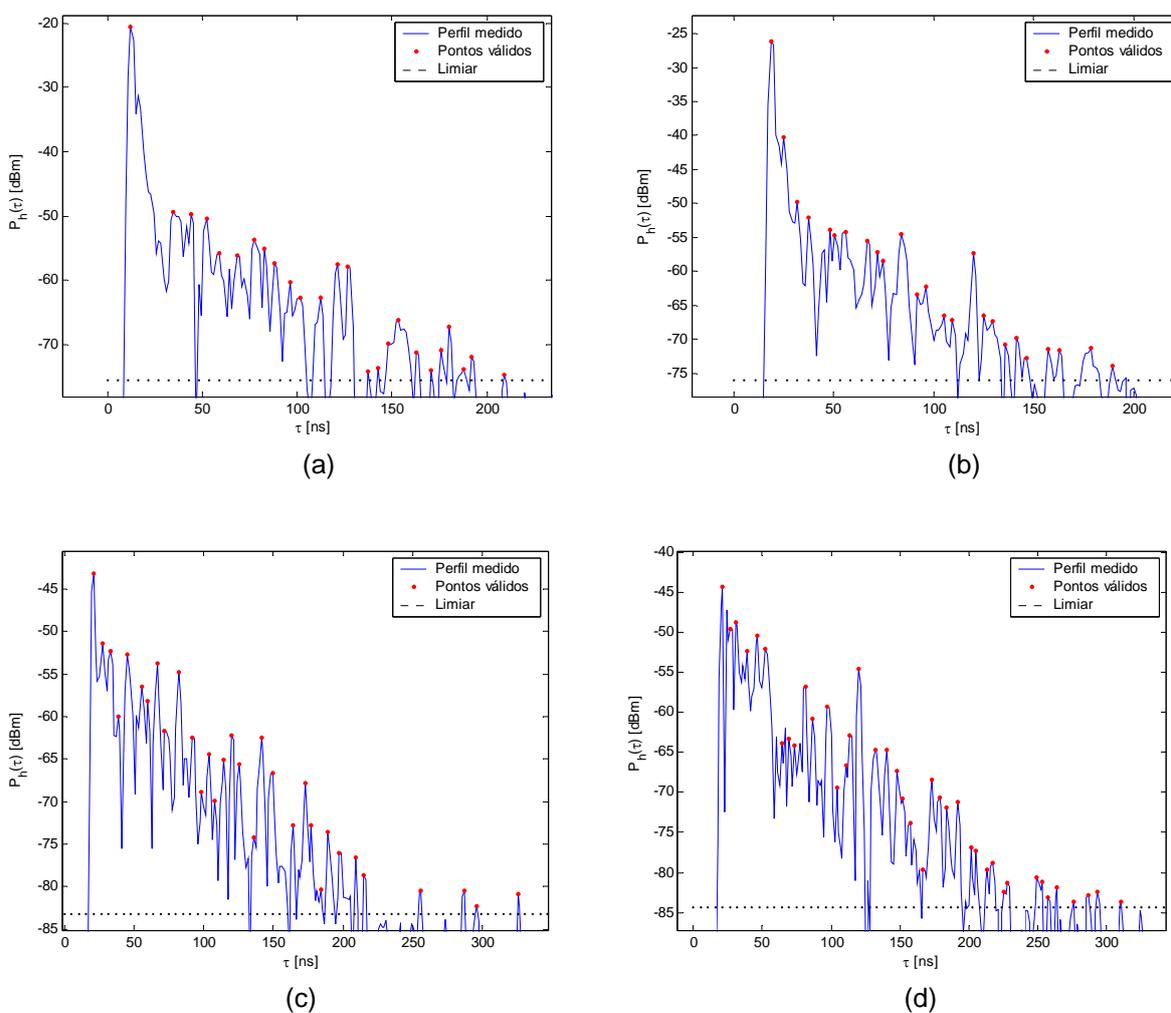


Fig 6.14 - Perfil de Retardos Potência no Ambiente A7. Local 1 (a), Local 2 (b), Local 3 (c) e Local 4 (d).

Em nenhum dos locais o limiar de Fleury foi ultrapassado. Os gráficos mostraram uma banda de coerência que diminuía com o aumento do espalhamento de retardos. Pela Tabela 6.4 pode ser visto, também, que os valores de α sofreram um aumento considerável nas situações onde não havia visada direta. A Figura 6.15 confirma esta conclusão.

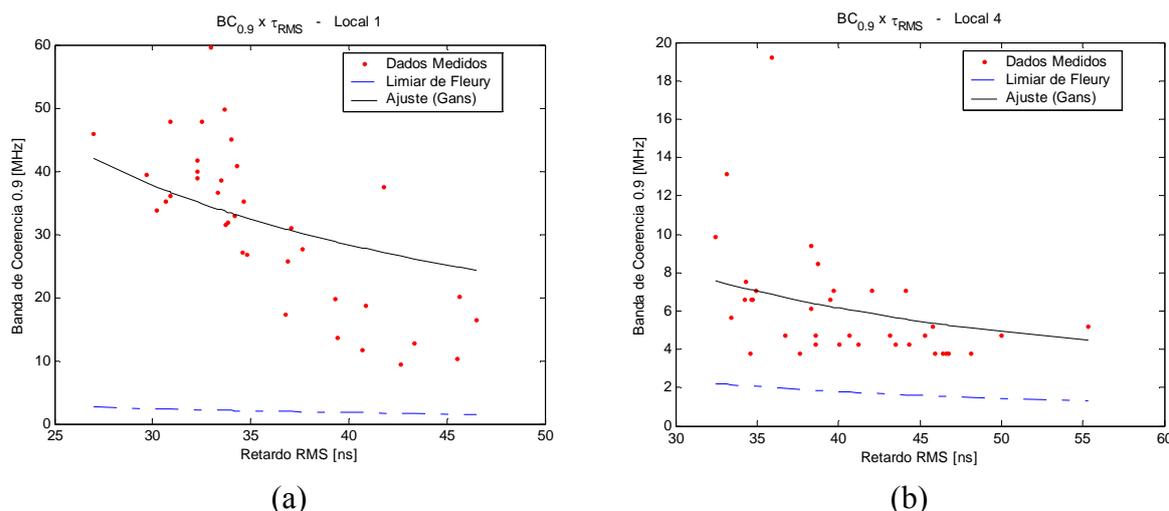


Fig 6.15 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente A7, Local 1, BC 0,9 (a) e Local 4, BC 0,9 (b).

6.3.1.5 Parede do Terceiro Andar do Bloco E (A8)

Como está ilustrado na Figura 4.6, do Capítulo 4, mediu-se o sinal utilizando-se o *grid*, antes de uma parede de concreto (*outdoor-outdoor*). A experiência foi repetida transmitindo-se de dentro para fora (*indoor-outdoor*) e de fora para fora (*outdoor-outdoor*). Neste último caso o transmissor, que estava do lado de dentro, foi mantido mais próximo à parede externa, ficando o receptor mais afastado, mas também do lado de fora.

A Tabela 6.5 indica o comportamento dos parâmetros do canal.

	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4
	In-Out	Out-Out	Out-In	Out-Out
	NLOS	LOS	NLOS	LOS
$\bar{\tau}$ [ns]	43,68	25,69	29,11	26,59
σ_{τ} [ns]	33,25	35,11	12,12	33,64
Razão	0,17	0,19	0,26	0,12
BC 0,7 [MHz]	21,68	103,13	18,37	47,06
BC 0,9 [MHz]	7,58	22,37	4,54	15,35
NMP	23	23	5	24
X [dB]	40	50	20	50
Limiar [dBm]	-81,65	-70,34	-58,35	-69,11
α (BC0,7)	1,43	0,29	5,07	0,65
α (BC 0,9)	4,11	1,35	20,64	1,99

Tabela 6.5 - Resultados obtidos no Ambiente A8.

A presença de sinal nos locais 1 e 3 deveu-se, certamente, a fenômenos de reflexão e difração pela janela próxima à parede. Quando se transmitiu de dentro para fora, os raios

difratados e refletidos na janela foram responsáveis por elevar o número de multipercursos capturados. O sinal, sendo transmitido de dentro, sofre mais reflexões e sai pela janela para, então, atingir o receptor. O sinal que é transmitido de fora para dentro se espalha mais no ambiente exterior, o que contribui com menos multipercursos para o receptor localizado internamente. Apesar de se espalhar mais, este sinal entra pela janela com intensidade maior, já que não sofreu tantas perdas por reflexão. Com exceção do retardo médio, tanto o espalhamento de retardos quanto as bandas de coerência apresentaram valores maiores na situação LOS do que na NLOS.

No local 1 pode ser observado um perfil com mais multipercursos do que no local 3. Para os locais 2 e 4 é marcante a presença de multipercursos representando reflexões nas paredes do bloco E e do bloco D, do mesmo andar. A primeira, logo após o raio direto e a segunda, próxima ao retardo de 100 ns. A Figura 6.16 seguinte ilustra o que foi explicado.

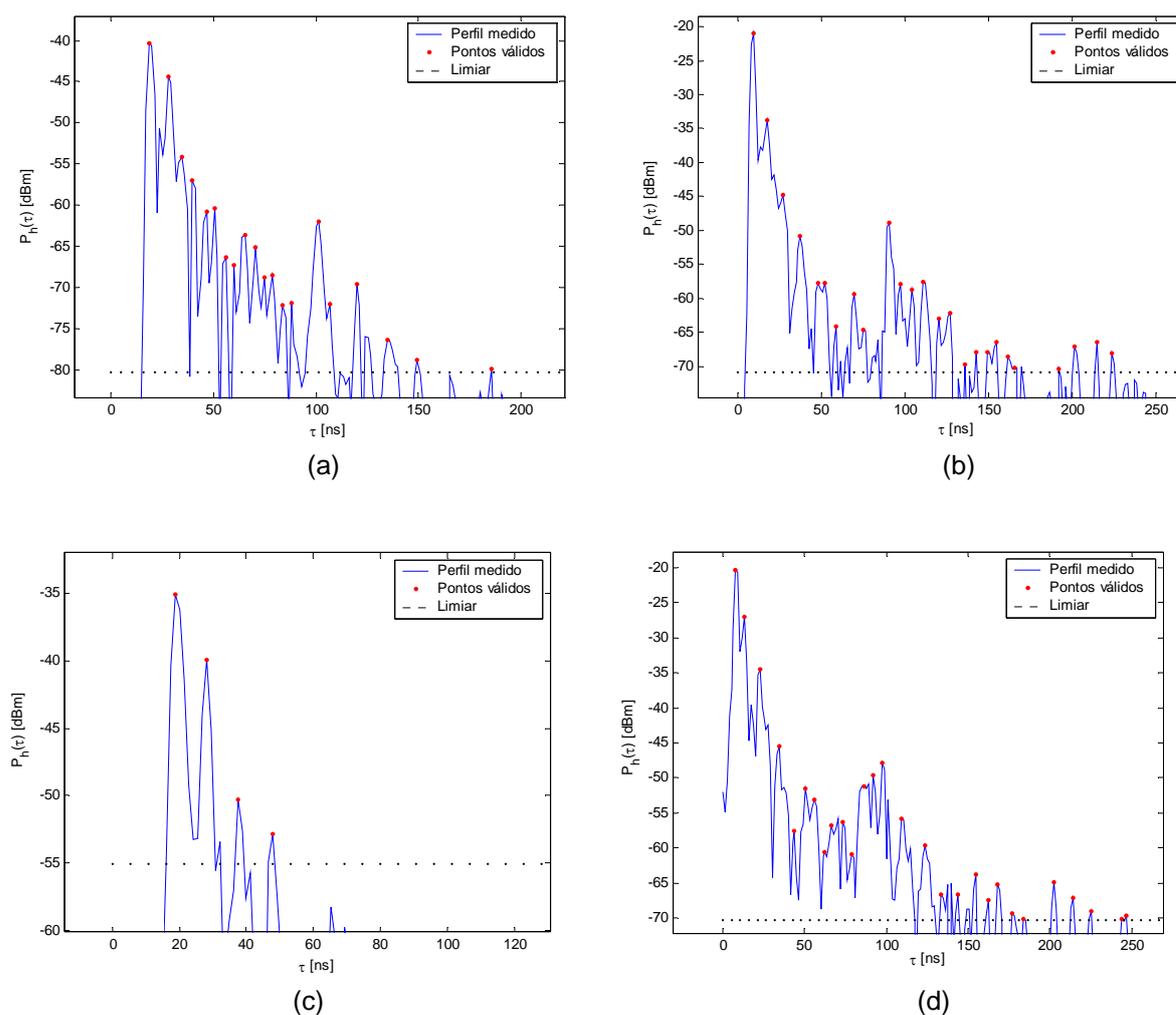


Fig 6.16 - Perfil de Retardos Potência no Ambiente A8, nas Situações *Indoor-Outdoor* NLOS (a), *Outdoor-Outdoor* LOS (b), *Outdoor-Indoor* NLOS (c) e *Outdoor-Outdoor* LOS (d).

O relacionamento banda de coerência *versus* espalhamento de retardos apontou o local 3 como o único a desrespeitar o limiar de Fleury. Inclusive, a reta de ajuste do modelo de Gans ficou abaixo da curva dada pelo limiar de Fleury. Nota-se, também, que os valores de banda de coerência tenderam a diminuir com o aumento do retardo. Os gráficos da Figura 6.17 abaixo mostram estes comportamentos.

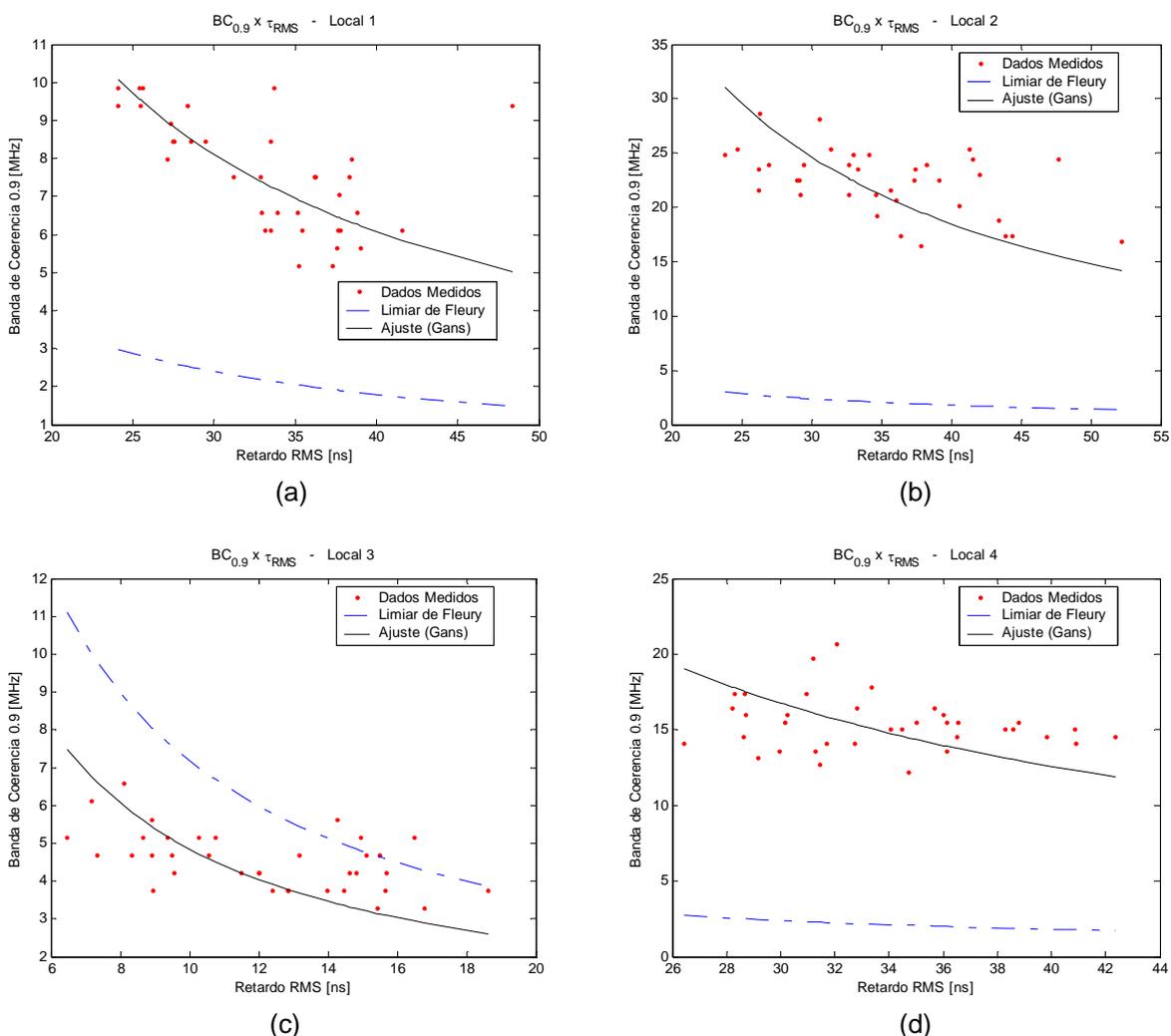


Fig 6.17 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente E1 e BC 0,9 nas Situações *Indoor-Outdoor* NLOS (a), *Outdoor-Outdoor* LOS (b), *Outdoor-Indoor* NLOS (c) e *Outdoor-Outdoor* LOS (d).

6.3.2 Ambientes Próximos a Construções

6.3.2.1 Ao longo da Saída da Biblioteca da Engenharia (B1)

Os principais resultados obtidos neste ambiente, esquematizado na Figura 4.7, do Capítulo 4, estão apresentados na Tabela 6.6.

	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4	Local 5	Local 6	Local 6'
	LOS						
$\bar{\tau}$ [ns]	49,61	69,95	89,32	46,21	72,81	82,91	129,43
σ_{τ} [ns]	40,09	37,02	42,05	40,11	44,07	32,45	53,33
Razão	0,08	0,09	0,09	0,12	0,11	0,37	0,08
BC 0,7 [MHz]	24,67	44,89	59,74	22,70	45,07	62,85	62,85
BC 0,9 [MHz]	26,78	42,42	40,48	39,87	41,16	19,34	19,34
NMP	27	20	25	16	13	6	23
X [dB]	45	40	40	35	30	20	35
Limiar [dBm]	-75,35	-75,40	-82,09	-65,72	-73,57	-69,22	-84,22
α (BC0,7)	0,95	0,65	0,60	0,65	0,56	4,03	0,97
α (BC 0,9)	2,60	2,83	2,46	2,55	4,20	41,77	9,58

Tabela 6.6 - Resultados obtidos no Ambiente B1.

No local 6, novamente teve-se que lançar mão do procedimento adotado no local 1 do ambiente A3. O ruído no início do perfil era alto. Estabelecendo o limiar acima dele, multipercursos notadamente válidos no perfil seriam eliminados. Baixando-se o limiar, descartou-se os ruídos de início de perfil. O resultado, indicado por Local 6' foi suficiente para que o limiar de Fleury passasse a ser respeitado, à custa de um aumento do retardo médio, do espalhamento de retardos e do número de multipercursos. Para os outros locais o limiar de Fleury foi respeitado.

A Figura 6.18 deixa bem claro o que foi feito, mostrando ser este um procedimento válido para fins de estimação dos parâmetros dispersivos do canal de banda ultralarga.

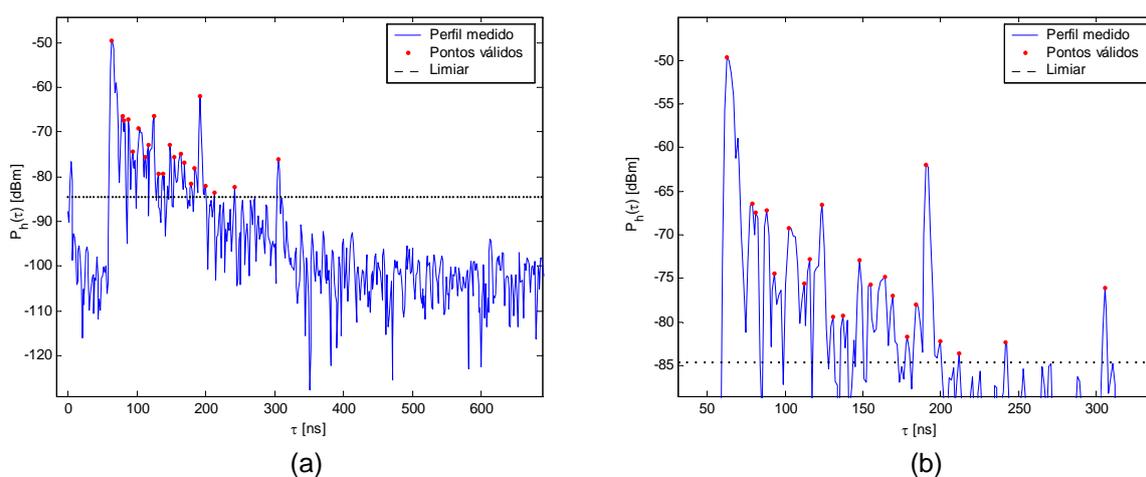


Fig 6.18 - Perfil de Retardos Potência no Ambiente B1, Local 6, sem Zoom (a) e com Zoom (b).

Nos outros gráficos de perfil pode-se notar uma diminuição do nível de potência à medida que se vai do local 1 ao 3 e do 4 ao 6. Para o conjunto de locais medidos na rota que

vai do local 1 ao 3 notou-se um maior número de multipercursos do que na rota que vai do local 4 ao 6. A rota de 4 a 6 tem a forma de um corredor: de um lado está a parede da biblioteca e do outro pilastras, arbustos e árvores. A outra rota, de 1 a 3, era mais aberta, não existindo os arbustos e árvores presentes na primeira. Esse fato pode ser apontado como o responsável por fazer a banda de coerência aumentar nos três primeiros locais medidos e não diminuir, como nos locais 4 a 6, como era o esperado.

A Figura 6.19 ilustra o relacionamento entre banda de coerência de 0,9 e espalhamento de retardos, para os primeiros locais das rotas configuradas pelos locais de 1 a 3 e de 4 a 6. Nelas, pode-se observar um comportamento bem semelhante, inclusive pelos valores de α bem próximos.

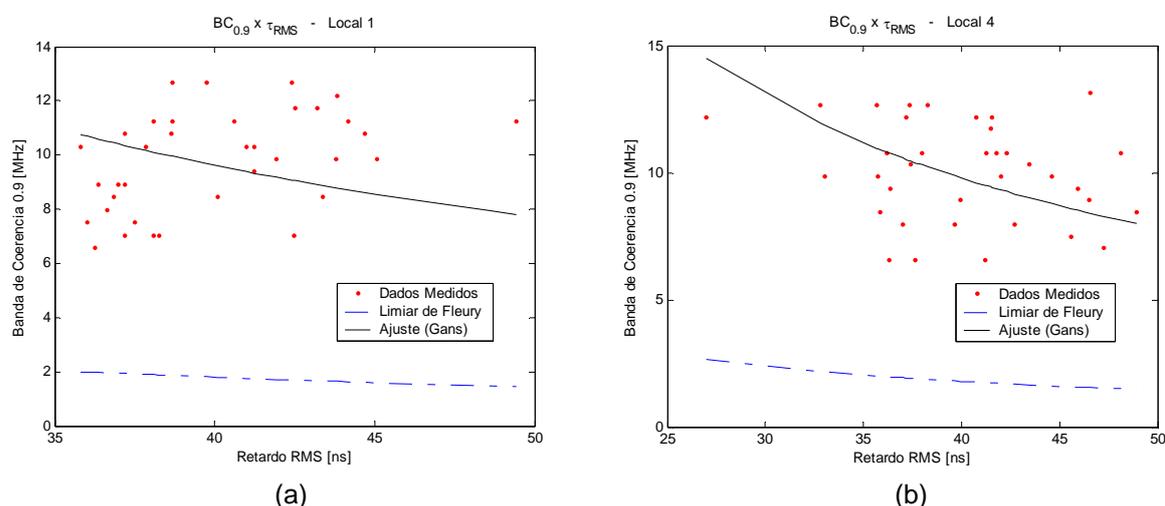


Fig 6.19 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente B1, Local 1, BC 0,9 (a) e Local 4, BC 0,9 (b).

6.3.2.2 Ao longo da Saída do *Hall* do Bloco D (B2)

Este ambiente está representado na Figura 4.8, do Capítulo 4. Este foi um cenário que apresentou um número de multipercursos abaixo de 20 para todos os locais medidos, mostrando que os poucos espalhadores presentes no local estão afastados. A Tabela 6.7 retrata o ambiente medido em questão.

	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4	Local 5	Local 6
	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS
$\bar{\tau}$ [ns]	59,05	76,47	88,87	57,83	56,29	53,79
σ_{τ} [ns]	40,02	40,13	31,15	27,30	40,39	32,84
Razão	0,06	0,10	0,16	0,15	0,07	0,08
BC 0,7 [MHz]	60,43	81,63	31,37	35,18	60,78	49,54
BC 0,9 [MHz]	10,23	7,85	3,16	4,58	4,66	5,12
NMP	19	19	12	8	19	13
X [dB]	35	35	25	25	35	30
Limiar [dBm]	-85,93	-86,79	-83,55	-77,40	-83,66	-80,98
α (BC0,7)	0,42	0,30	1,04	1,08	0,40	0,62
α (BC 0,9)	2,48	3,14	10,45	8,27	5,37	5,99

Tabela 6.7 - Resultados obtidos no Ambiente B2.

Os valores de retardo médio espelham muito bem as separações físicas entre TX-RX. Uma característica interessante ocorreu entre os locais 1 e 4, em que o retardo médio foi aproximadamente o mesmo, mas o espalhamento de retardos foi bem menor no local 4. Isto se deve ao menor número de multipercursos capturados bem como à constituição dos espaços vizinhos aos dois locais.

A Figura 6.20 ilustra os perfis dos locais 1 e 4, em que se observa o raio direto, com um nível de potência em torno dos -50 dBm, nos dois casos.

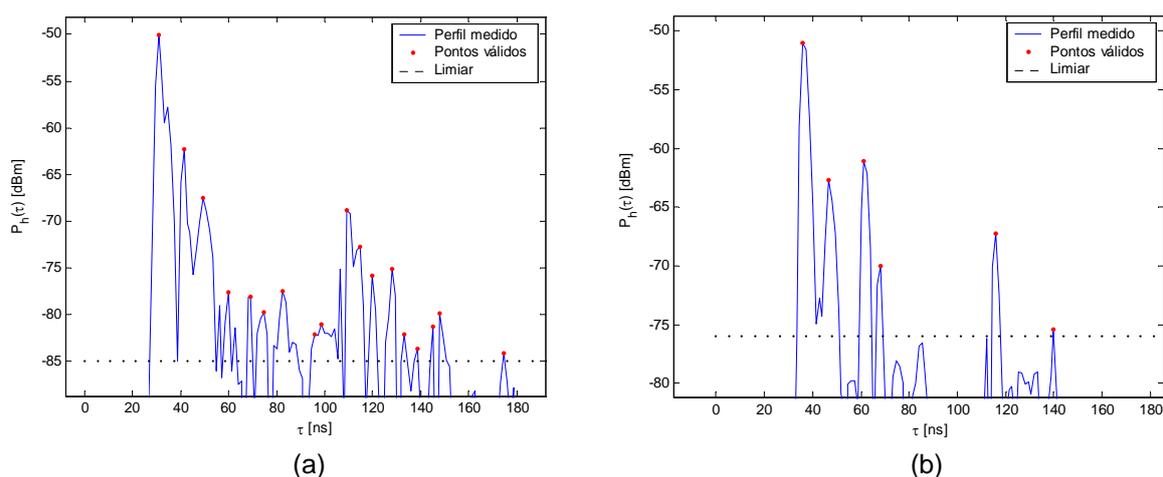


Fig 6.20 - Perfil de Retardos Potência no Ambiente B2, Local 1 (a) e Local 4 (b).

As bandas de coerência tiveram um comportamento de diminuir com o aumento da distância. Com respeito ao relacionamento entre as bandas de coerência e o espalhamento de

retardos todos os locais respeitaram o limiar de Fleury. A Figura 6.21 ilustra este relacionamento para dois dos locais.

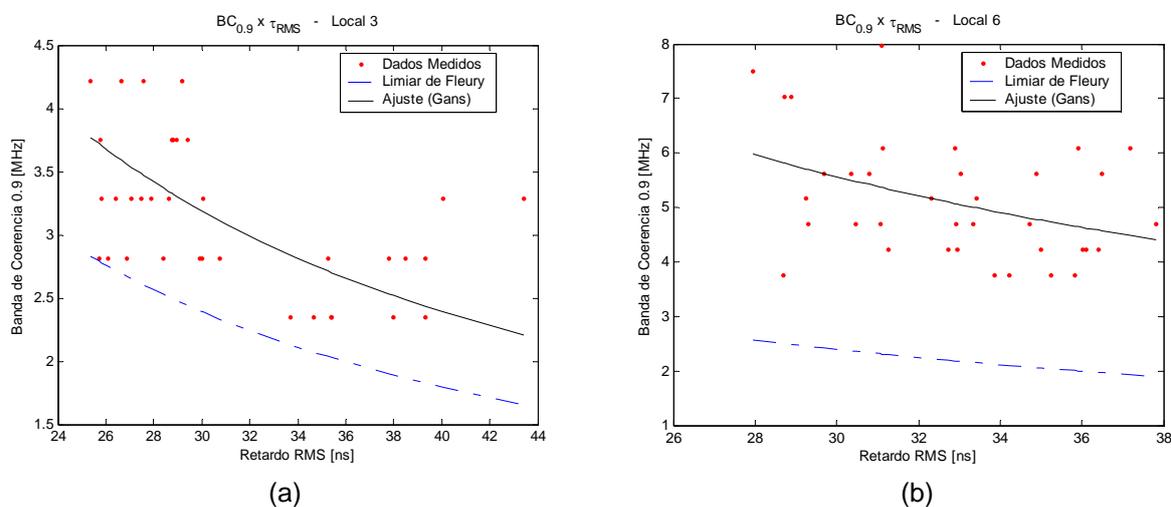


Fig 6.21 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente B2, Local 3, BC 0,9 (a) e Local 6, BC 0,9 (b).

6.3.2.3 Pilotis do Prédio da Faculdade de Geociências (B3)

Neste ambiente, ilustrado na Figura 4.9, do Capítulo 4, optou-se por aplicar o mesmo procedimento realizado nos locais 1 de A3 e 6 de B1, como já foi explicado anteriormente. A Tabela 6.8 mostra os valores obtidos.

	Local 1	Local 1'	Local 2	Local 2'	Local 3	Local 3'	Local 4	Local 4'	Local 5	Local 6	Local 6'
	LOS		LOS		LOS		LOS		LOS	LOS	
$\bar{\tau}$ [ns]	60,90	70,57	35,61	66,44	47,81	80,67	56,50	101,01	37,70	52,53	86,52
σ_{τ} [ns]	29,63	41,16	24,10	45,03	28,44	42,17	22,86	42,64	34,71	18,16	36,65
Razão	0,15	0,10	0,11	0,12	0,18	0,07	0,18	0,10	0,10	0,14	0,12
BC 0,7 [MHz]	76,12	76,12	105,73	105,73	123,68	123,68	164,91	164,91	114,30	75,94	75,94
BC 0,9 [MHz]	5,60	5,60	23,29	23,29	23,96	23,96	20,31	20,31	25,14	12,77	12,77
NMP	14	22	6	16	7	19	7	20	21	7	19
X [dB]	35	40	30	40	30	40	30	40	45	30	40
Limiar [dBm]	-70,37	-75,37	-60,35	-70,35	-63,97	-73,97	-65,85	-75,85	-73,65	-65,09	-75,09
α (BC0,7)	0,46	0,32	0,40	0,22	0,31	0,19	0,28	0,15	0,26	0,74	0,36
α (BC0,9)	6,26	4,41	1,82	0,99	1,59	1,00	2,30	1,18	1,17	4,38	2,14

Tabela 6.8 - Resultados obtidos no Ambiente B3.

Como neste trabalho se propôs que todos os multipercursos notadamente válidos dos perfis fossem levados em conta nos cálculos, os limiares para os locais 1, 2, 3, 4 e 6 foram diminuídos e os ruídos de início de perfil foram descartados. Apenas para o local 5 isso não foi necessário. As colunas Local 1', Local 2', Local 3', Local 4' e Local 6' contêm os novos valores para os parâmetros após os limiares terem sido diminuídos. Vale destacar que, mesmo antes de se aplicar o procedimento em questão, todos os locais tinham seus gráficos de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos respeitando o limiar de Fleury. E assim continuaram, após o limiar ser diminuído, como se nota nos gráficos da Figura 6.22.

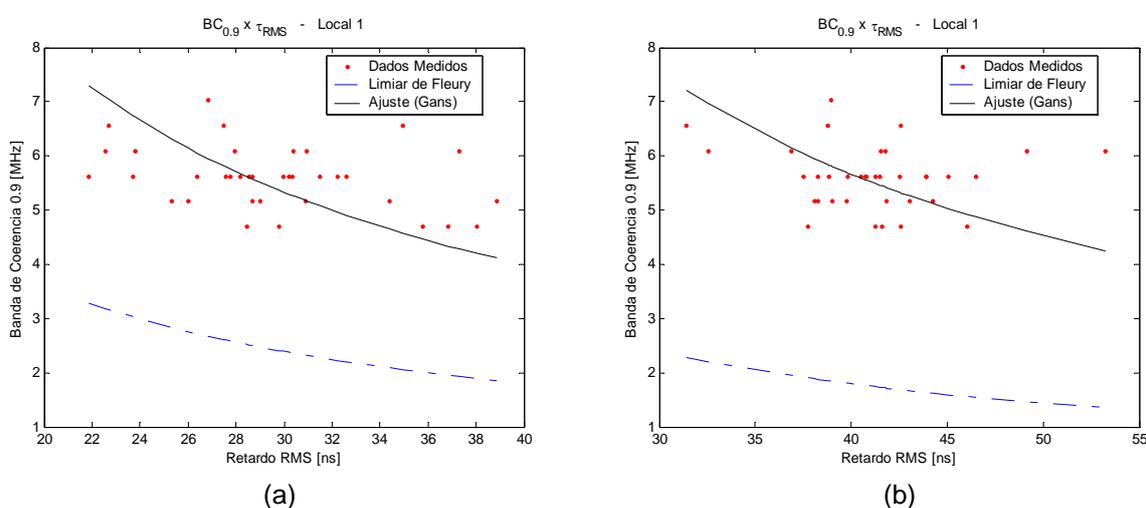


Fig 6.22 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente B3, Local 1, BC 0,9 antes do Procedimento (a) e depois do Procedimento (b).

A diminuição do limiar trouxe, como consequência direta, o aumento do número de multipercursos, do retardo médio e do espalhamento de retardos. As bandas de coerência dos locais 1 e 6 foram as menores e, coincidentemente, representavam locais que não estavam debaixo do *pilotis*. O local 1 estava na margem do *pilotis* e o local 6, completamente afastado. Para os outros locais, a banda de coerência de 0,9 ficou um pouco acima dos 20 MHz.

Os gráficos de perfil da Figura 6.23 ilustram o que se quis com a diminuição do limiar para o local em questão, que foi levar em conta multipercursos notadamente válidos, situados em retardos maiores. Lembra-se que este ambiente era amplo, o que permitia sinais refletidos a maiores distâncias.

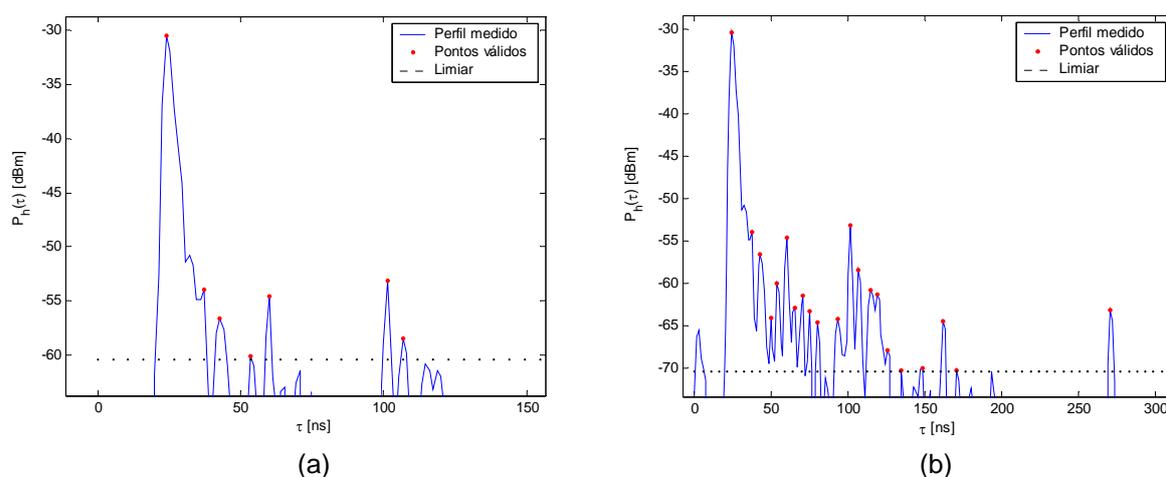


Fig 6.23 - Perfil de Retardos Potência no Ambiente B3, Local 2 antes do Procedimento (a) e depois do Procedimento (b).

6.3.2.4 Estacionamento do Bloco E (B4)

Este ambiente está representado pela Figura 4.10, do Capítulo 4. Trata-se de um cenário bem amplo, com espalhadores localizados somente nas laterais no ambiente, o que trouxe aos perfis um comportamento semelhante. Foi possível também, manter o parâmetro X fixo em 50 dB, ocasionando um número de multipercursos entre 30 e 60. A Tabela 6.9 resume os valores encontrados para cada local.

	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4	Local 5
	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS
$\bar{\tau}$ [ns]	53,78	67,73	112,08	126,41	65,56
σ_{τ} [ns]	50,87	60,14	76,33	87,73	57,29
Razão	0,04	0,07	0,06	0,04	0,07
BC 0,7 [MHz]	89,28	126,88	10,57	16,86	107,46
BC 0,9 [MHz]	6,91	15,53	2,90	3,45	7,11
NMP	34	42	55	64	41
X [dB]	50	50	50	50	50
Limiar [dBm]	-80,47	-82,90	-90,71	-94,59	-83,15
α (BC0,7)	0,22	0,13	1,25	0,68	0,16
α (BC 0,9)	2,85	1,09	4,55	3,31	2,47

Tabela 6.9 - Resultados obtidos no Ambiente B4.

Os gráficos de perfil apresentados nas Figuras 6.24 (a) e (b) ilustram os locais 1 e 4, respectivamente. Neste último, pode-se notar um multipercurso localizado perto de 700ns, o

que corresponde a uma distância percorrida de, aproximadamente, 210 metros, e uma maior quantidade de multipercursos.

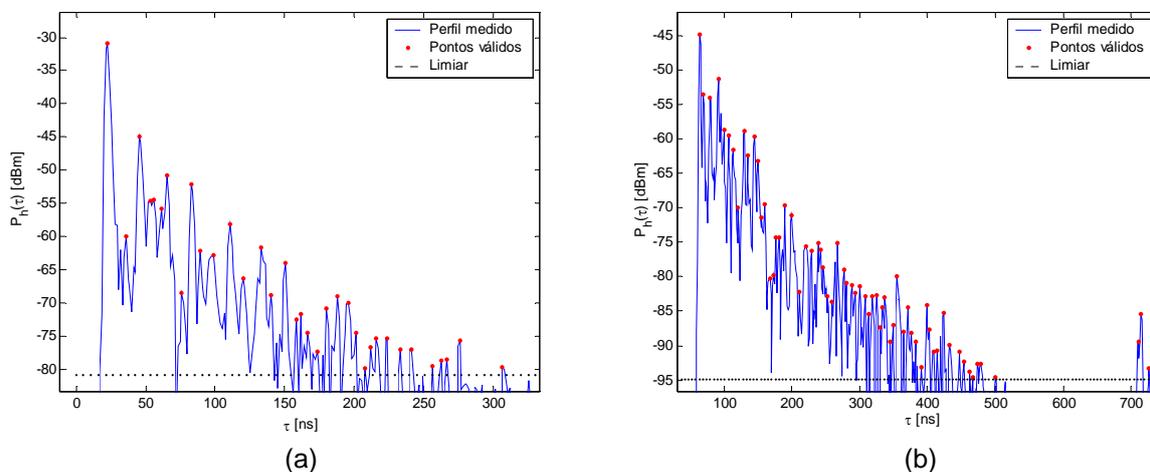


Fig 6.24 - Perfil de Retardos Potência no Ambiente B4, Local 1 (a) e Local 4 (b).

Nenhum ponto, de nenhum local, ficou abaixo do limiar de Fleury, seja para a banda de coerência de 0,7 ou para a de 0,9. Para os locais 2 e 3, os valores de banda de coerência de 0,9 apresentaram apenas dois valores diferentes para todo o conjunto de espalhamento de retardos de cada local. A Figura 6.25 mostra o gráfico banda de coerência *versus* espalhamento de retardos para o local 3.

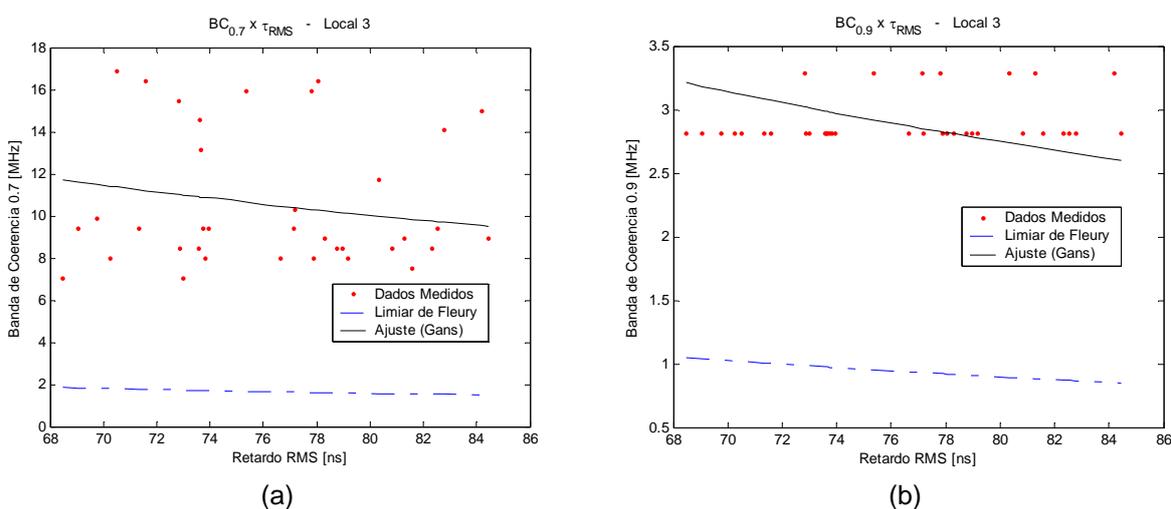


Fig 6.25 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente B4, Local 3, BC 0,7 (a) e BC 0,9 (b) .

6.3.3 Ambientes mais Amplos, Próximos a Construções e Jardins

6.3.3.1 Entre os Blocos D e E (C1)

As medidas tomadas neste ambiente referem-se àquelas das Figuras 4.11, do Capítulo 4, e apresentaram-se bastante ruidosas. Um dos locais medidos precisou ser desconsiderado, pois apenas alguns poucos pontos dos *grid* apresentaram perfis que podiam ser trabalhados. A Tabela 6.10 resume os principais valores encontrados para este cenário.

	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4
	LOS	LOS	LOS	LOS
$\bar{\tau}$ [ns]	82,32	85,57	79,01	74,09
σ_{τ} [ns]	64,05	36,36	38,10	39,75
Razão	0,04	0,17	0,17	0,16
BC 0,7 [MHz]	20,22	10,59	2,17	7,53
BC 0,9 [MHz]	2,79	1,54	0,44	1,30
NMP	33	8	8	6
X [dB]	40	20	20	20
Limiar [dBm]	-73,87	-64,81	-73,60	-66,04
α (BC0,7)	0,78	2,66	13,36	3,50
α (BC 0,9)	5,62	18,21	64,68	20,42

Tabela 6.10 - Resultados obtidos no Ambiente C1.

Os perfis de retardos de potência dos locais 2, 3 e 4 apresentaram poucos multipercursos, um mesmo valor para o parâmetro X e um banda de coerência de 0,9 bem menor do que as obtidas nos outros ambientes, sobretudo no local 2. O local 1, medido a uma menor distância, foi o que apresentou um perfil com mais multipercursos e uma maior banda de coerência de 0,9, mas inferior a 3 MHz. A Figura 6.26 mostra perfis para dois dos locais medidos.

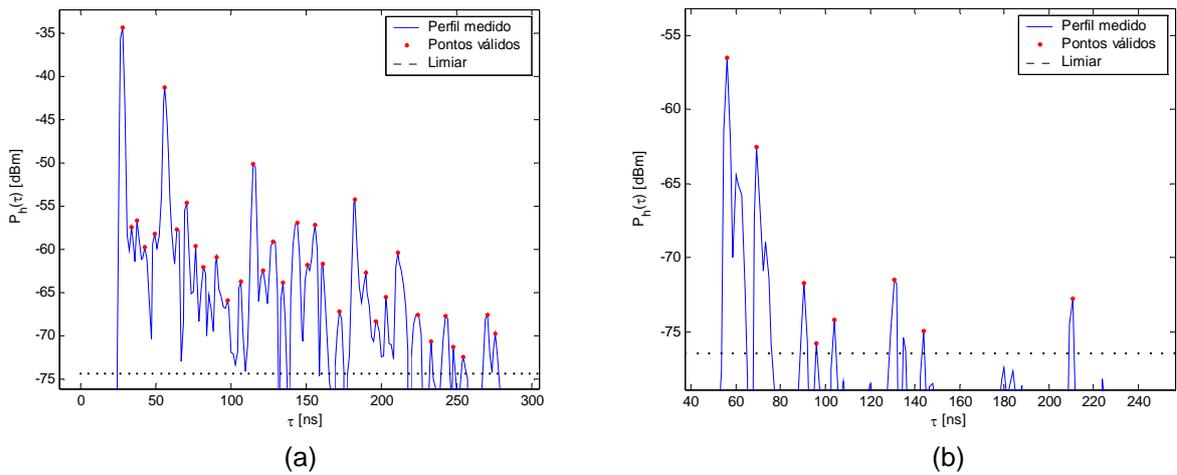
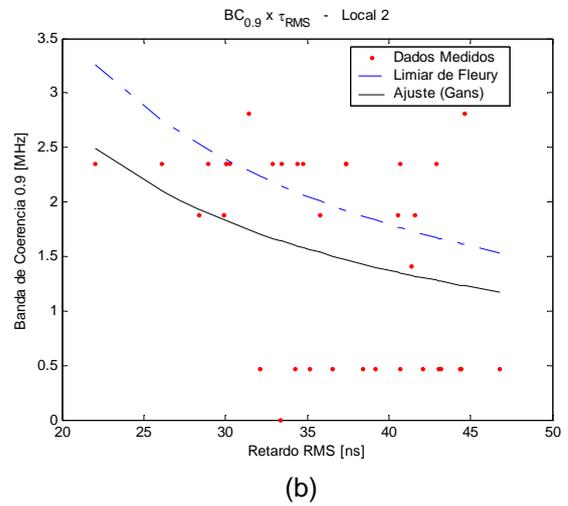
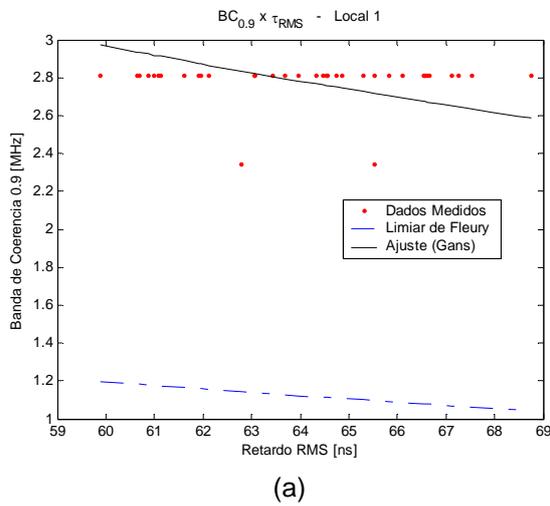


Fig 6.26 - Perfil de Retardos Potência no Ambiente C1, Local 1 (a) e Local 2 (b).

Apenas para o local 1 o limiar de Fleury foi respeitado. No local 2 houve muitos pontos inferiores a este limiar. Nos locais 3 e 4, nenhum ponto ficou acima do limiar de Fleury. Com exceção do local 1 e do local 4, com banda de coerência de 0,7, nos outros locais a curva do modelo proposto por Gans ficou abaixo da curva do limiar de Fleury, conforme se observa nos gráficos da Figura 6.27.



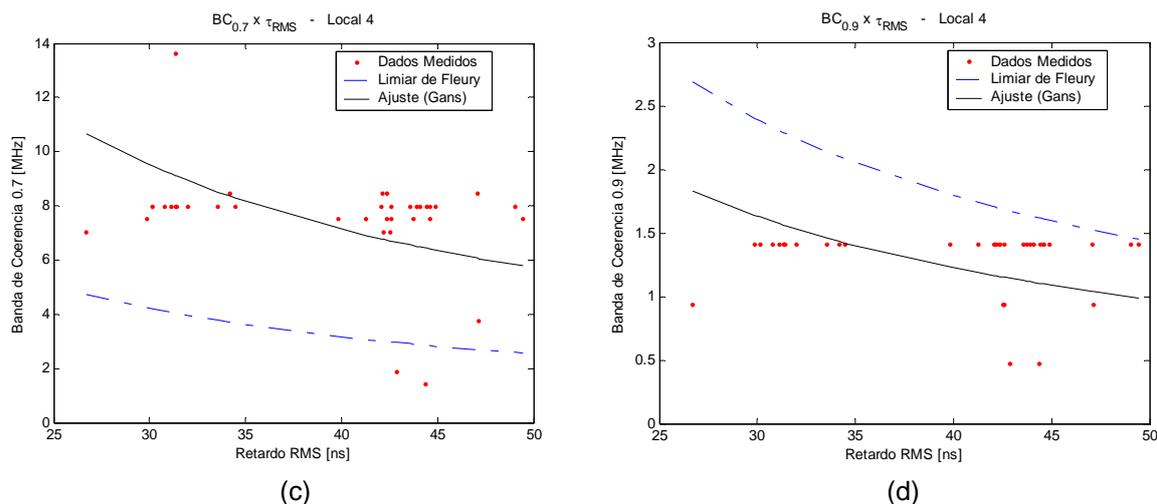


Fig 6.27 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente C1, Local 1, BC 0,9 (a); Local 2 e BC 0,9 (b); Local 4 e BC 0,7 (c); Local 4 e BC 0,9 (d).

6.3.3.2 Entre os Blocos O e N (C2)

Este ambiente, apesar de muito parecido com o C1, como mostra a Figura 4.12, do Capítulo 4, apresentou gráficos de perfil com um número maior de multipercursos, as bandas de coerência não foram tão pequenas e nenhum local teve o limiar de Fleury desrespeitado.

Os locais 5 e 6 foram medidos na configuração *outdoor-indoor*, estando o local 6 fora de visada (NLOS). A Tabela 6.11 reúne as informações deste cenário.

	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4	Local 5	Local 6
	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	NLOS
$\bar{\tau}$ [ns]	49,57	83,20	42,65	49,68	63,32	78,84
σ_{τ} [ns]	48,73	60,29	34,41	45,68	42,28	52,67
Razão	0,05	0,05	0,08	0,05	0,11	0,08
BC 0,7 [MHz]	43,68	18,61	92,85	94,41	71,02	17,27
BC 0,9 [MHz]	5,72	3,40	13,37	8,06	3,71	2,59
NMP	29	28	15	24	19	29
X [dB]	45	45	35	40	35	35
Limiar [dBm]	-75,15	-81,26	-64,76	-69,78	-69,20	-80,78
α (BC0,7)	0,47	0,90	0,31	0,23	0,33	1,10
α (BC 0,9)	3,60	4,90	2,15	2,73	6,41	7,37

Tabela 6.11 - Resultados obtidos no Ambiente C2.

Os gráficos de perfil para os locais 1, 2 e 3 mostram multipercursos em torno dos retardos de 50 ns e 100 ns. Os locais 4 e 5, na entrada e dentro do prédio, respectivamente,

mostram multipercursos mais destacados apenas para os retardos em torno dos 100 ns. Para o local 6, *indoor*, há percursos que se destacam próximos a 50 ns, 100 ns e 150 ns. A Figura 6.28 ilustra o parágrafo acima.

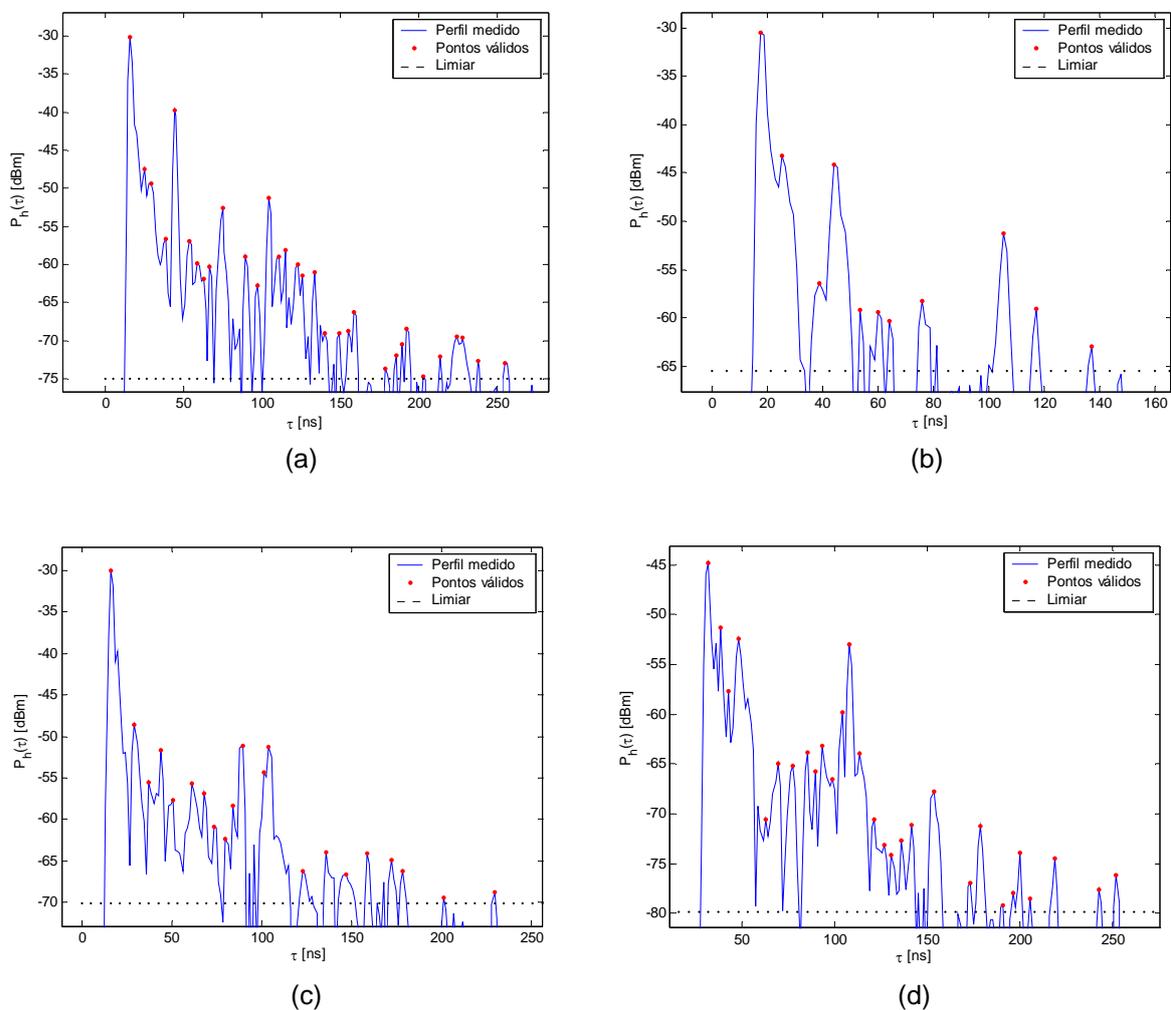


Fig 6.28 - Perfil de Retardos Potência no Ambiente C2, Local 1 (a), Local 3 (b), Local 4 (c) e Local 6 (d).

Como já foi dito, todos os pontos do gráfico que relaciona banda de coerência *versus* espalhamento de retardos ficaram acima do limiar de Fleury, conforme ilustra a Figura 6.29.

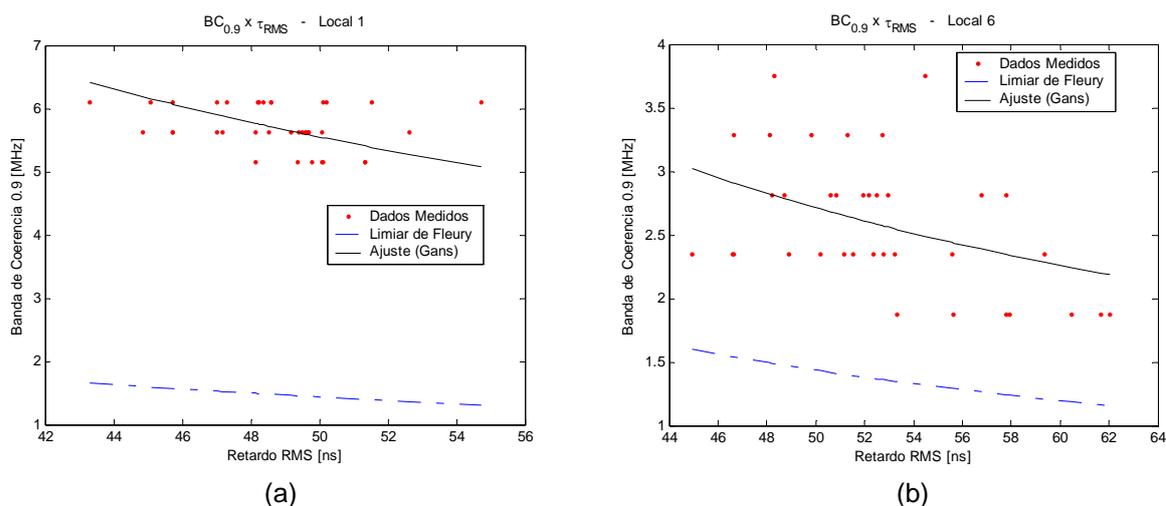


Fig 6.29 - Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos no Ambiente C2, Local 1, BC 0,9 (a) e Local 6, BC 0,9 (b).

6.3.3.3 Pátio da Faculdade de Arquitetura (em frente ao Chalé – C3)

As medidas deste ambiente referem-se à Figura 4.13, do Capítulo 4, um espaço bem amplo, ao redor de um jardim, com arbustos esparsos e poucas árvores. A medida do local 2 foi a que teve uma maior parcela do sinal atravessando este jardim. Apesar de a distância TX-RX do local 3 ser um pouco maior do que a do local 2, este apresentou maiores valores de retardo médio, espalhamento de retardos e um valor de banda de coerência de 0,9 bem menor do que no local 3. A Tabela 6.12 mostra os resultados deste cenário.

	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4
	LOS	LOS	LOS	LOS
$\bar{\tau}$ [ns]	77,52	126,39	93,52	61,24
σ_{τ} [ns]	68,86	77,91	65,52	57,66
Razão	0,07	0,10	0,06	0,04
BC 0,7 [MHz]	139,17	66,25	97,28	83,87
BC 0,9 [MHz]	31,16	3,02	16,58	16,74
NMP	49	51	41	36
X [dB]	55	45	50	50
Limiar [dBm]	-88,65	-91,24	-88,07	-82,60
α (BC0,7)	0,10	0,19	0,16	0,21
α (BC 0,9)	0,47	4,24	0,92	1,04

Tabela 6.12 - Resultados obtidos no Ambiente C3.

Os perfis de retardos de potência apresentaram retardos perto de 400 ns, correspondendo a uma distância de 120 metros e o número médio de multipercursos ficou em

torno dos 45. Tanto os gráficos de perfil, quanto os que relacionam banda de coerência e espalhamento de retardos, tiveram um comportamento similar nos quatro locais medidos e nenhum local teve o limiar de Fleury desrespeitado. A Figura 6.30 abaixo serve de exemplo para o local 2.

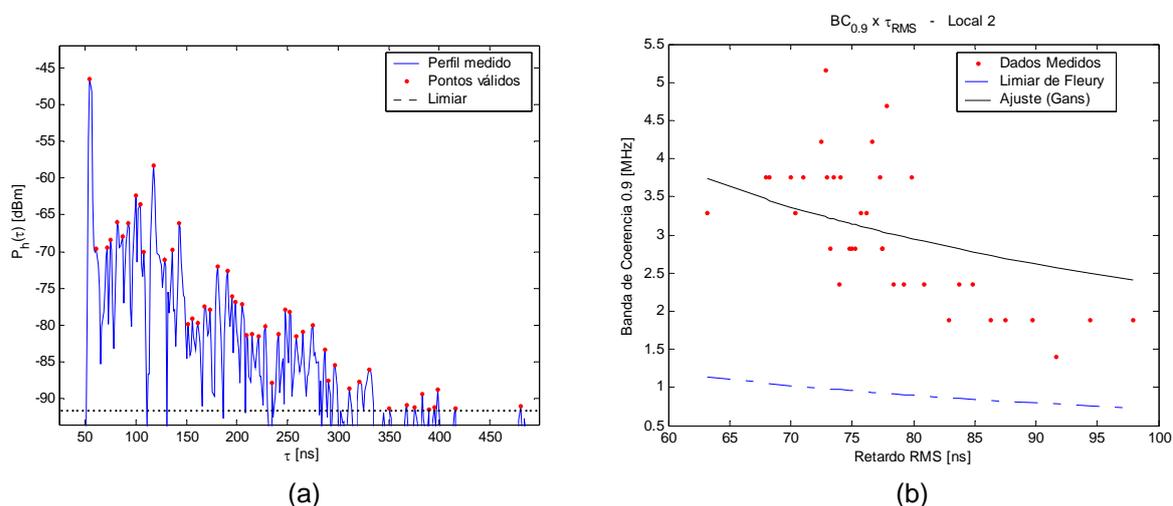


Fig 6.30 - Perfil de Retardos de Potência (a) e Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos (b) no Ambiente C3, Local 2, BC 0,9.

6.3.3.4 Pátio da Faculdade de Arquitetura (em frente ao Casarão – C4)

Este cenário, representado pela Figura 4.14, do Capítulo 4, teve um comportamento bem parecido com o C3, conforme pode ser visto na Tabela 6.13 e nos gráficos de perfil e de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos, apresentados a seguir.

	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4
	LOS	LOS	LOS	LOS
$\bar{\tau}$ [ns]	70,51	73,05	92,97	81,41
σ_{τ} [ns]	50,81	58,18	61,66	63,52
Razão	0,05	0,06	0,04	0,04
BC 0,7 [MHz]	112,96	62,68	120,91	135,12
BC 0,9 [MHz]	21,97	10,29	5,40	27,67
NMP	29	39	40	41
X [dB]	45	50	50	50
Limiar [dBm]	-79,78	-84,61	-87,36	-86,03
α (BC0,7)	0,17	0,28	0,13	0,12
α (BC 0,9)	0,90	1,69	3,01	0,57

Tabela 6.13 - Resultados obtidos no Ambiente C4.

Por ser uma área mais aberta, próxima ao prédio da Faculdade de Arquitetura e estando os jardins mais afastados, nos gráficos de perfil podem ser notados multipercursos mais destacados em determinados valores de retardos. Novamente, para nenhum dos locais medidos o limiar de Fleury foi ultrapassado. A Figura 6.31 abaixo ilustra estas informações para o local 3.

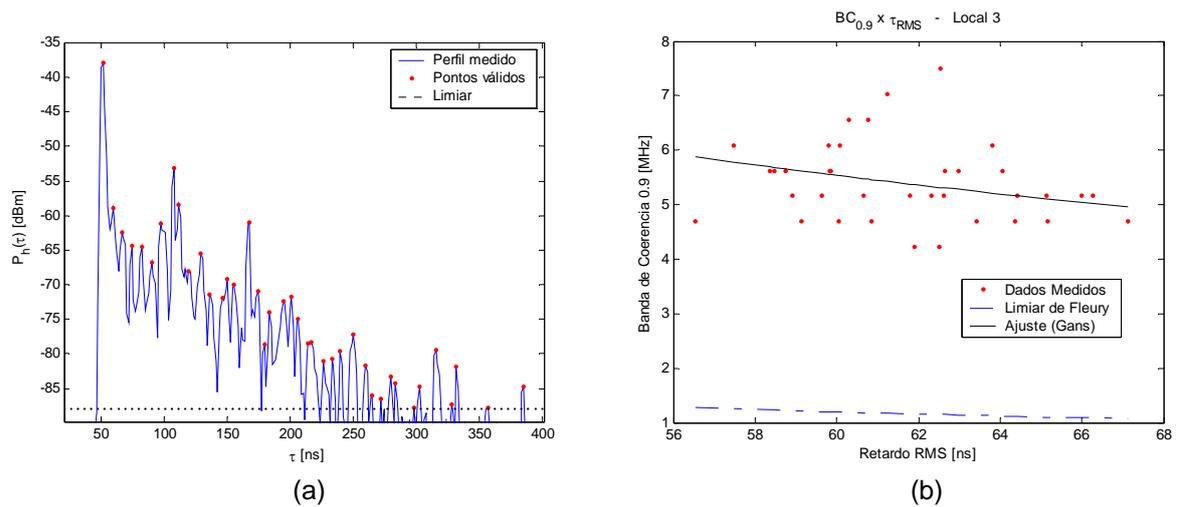


Fig 6.31 - Perfil de Retardos de Potência (a) e Relação Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos (b) no Ambiente C4, Local 3, BC 0,9.

6.4 Ambientes para Análise em Larga Escala

Na análise em larga escala, dois ambientes foram selecionados: um campo de futebol (piso de grama) e um estacionamento (piso de cimento). Ambos os lugares são bem abertos, com poucos espalhadores. Neles, buscou-se apenas avaliar o comportamento do sinal banda larga com a distância, através do expoente de decaimento γ .

A obtenção da curva de atenuação do sinal ao longo da distância foi feita segundo dois procedimentos: no domínio da frequência e no domínio do tempo.

No primeiro caso, utilizou-se o mesmo método adotado em Barros [49], através da equação (6.4) [17]:

$$PL_1(d) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [T(f_i, t; d)]^2 \quad (6.4)$$

sendo T a função transferência variante no tempo do canal para uma banda de 750 MHz e N , o número de frequências discretas tomadas dentro desta banda. Ambos os conceitos foram apresentados no Capítulo 2.

No segundo caso, utilizou-se a média dos percursos válidos obtidos do perfil de retardos de potência, conforme sugere Rappaport [40], através da seguinte relação:

$$PL_2(d) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M P_h(\tau_j) \quad (6.5)$$

sendo $P_h(\tau_j)$ o valor em unidade de potência do perfil de retardos de potência, nos pontos válidos do perfil, e M , o número de percursos válidos.

Vale destacar que as equações (6.4) e (6.5) são válidas em pequena escala, mas se aplicam adequadamente nesta análise. Os valores obtidos para $PL_{1,2}$ representam uma média obtida a uma distância fixa do receptor, não havendo, pois, variação do sinal com a distância. Para cada distância fixa destas, apenas um perfil foi capturado para se calcular a perda de propagação. O conjunto dos valores de $PL_{1,2}$ tomados ao longo de uma rota permitem, portanto, o cálculo do coeficiente de atenuação coma a distância. No Ambiente D1 e D2, foram 66 e 49 pontos medidos, espaçados de 50 centímetros e de 1 metro, respectivamente.

Observa-se, também, que a equação (6.4) é uma média para os 1601 pontos medidos pela sondagem, dentro dos quais, se encontram os ruídos. Já a equação (6.5), é uma média em um perfil já limpo, sem os efeitos do ruído, o que faz os valores encontrados para PL_1 serem maiores do que aqueles encontrados para PL_2 .

Para ambos os casos foi utilizada a relação [14], [17], [22], [23], [40]:

$$PL_{1,2}(d) = PL_0 + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right), \quad d \geq d_0 \quad (6.6)$$

Na equação (6.6) acima, PL_0 representa a queda do nível de potência a 1 metro ($d_0 = 1\text{m}$) do transmissor, em espaço livre. O segundo termo do lado direito da equação fornece a

perda de potência média em relação à distância d_0 de referência. Tem-se, ainda, que γ é o coeficiente de atenuação com a distância, fortemente dependente do ambiente.

O valor de PL_0 foi obtido no campo de futebol do *Campus* do Gragoatá, da Universidade Federal Fluminense. Trata-se de uma área bem ampla, com poucos espalhadores e próxima à Baía de Guanabara, o que dá a PL_0 a característica de ser uma medida próxima de espaço livre.

6.4.1 Estacionamento da Faculdade de Geociências (D1)

Este ambiente está ilustrado na Figura 4.15, do Capítulo 4. O receptor foi mantido fixo e o transmissor foi deslocado em linha reta sobre um piso de cimento a uma distância de 33,5 metros. A primeira medida foi tomada a 1 metro de distância e, as seguintes, foram feitas de meio em meio metro.

A Tabela 6.14 procura resumir os valores medidos.

	Média	Razão
Retardo Médio [ns]	540,17	
Espalhamento de Retardos [ns]	124,10	0,20
Banda Coerência 0,7 [MHz]	95,80	
Banda Coerência. 0,9 [MHz]	23,08	
PL₁ [dBm]	-19,42	
PL₂ [dBm]	-49,45	
PL₀ [dBm]	-14,8	
Distância [m]		
	Limiar [dBm]	X médio [dB]
1,0 – 4,0	-70	46,27
4,5 – 7,5	-75	45,23
8,0 – 10,0	-80	48,27
10,5 – 28,5	-85	44,70
29,5 – 33,5	-90	49,04
Índice de atenuação com a distância γ		
	PL₁ = -1,73	PL₂ = -2,38
Nº Médio de Multipercursos	25	

Tabela 6.14 - Resultados obtidos no Ambiente D1.

Os gráficos da Figura 6.32 mostram a perda de propagação, ao longo da rota, com a indicação da reta de melhor ajuste e seu coeficiente, para os dois procedimentos.

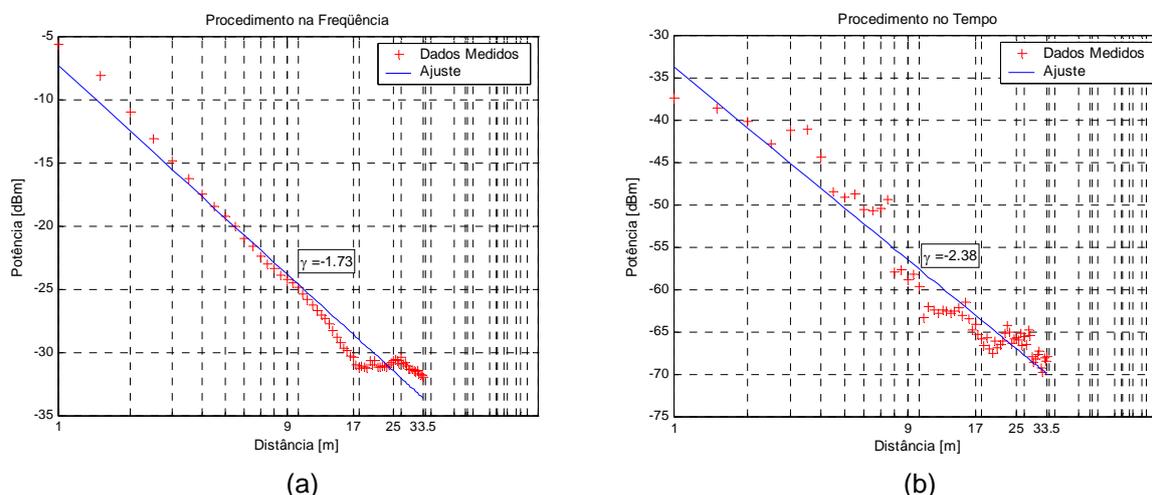


Fig 6.32 - Perda de Propagação ao Longo da Distância para o Ambiente D1 segundo os Cálculos na Freqüência (a) e no Tempo (b).

No primeiro caso, o somatório dado pela equação de PL_1 , em todas as amostras da função T, gerou pontos no gráfico com amplitudes maiores do que no segundo caso, no qual o somatório foi feito somente nas amostras do perfil P_h . O coeficiente de $-2,38$ do segundo caso está mais de acordo com o que se espera de um ambiente amplo, como este em questão. Além do mais, pela fórmula de Friis o valor de potência para as distâncias tomadas é melhor representado pelos pontos do procedimento no tempo, o que também sugere que este é o mais adequado no tratamento deste ambiente. O fato de não se estar considerando o ruído, nos cálculos com a equação (6.5), também demonstra que este é o procedimento mais indicado. Deixa-se claro que, o valor de $-1,73$ encontrado para PL_1 está abaixo do valor de espaço livre que é igual a -2 , o que confirma que a equação (6.4) não fornece uma indicativa correta do coeficiente de decaimento γ .

Os parâmetros medidos *versus* a distância foram transformados em gráficos para que se pudesse ter uma melhor visão do comportamento de tais parâmetros, neste ambiente. Estes gráficos são apresentados na Figura 6.33.

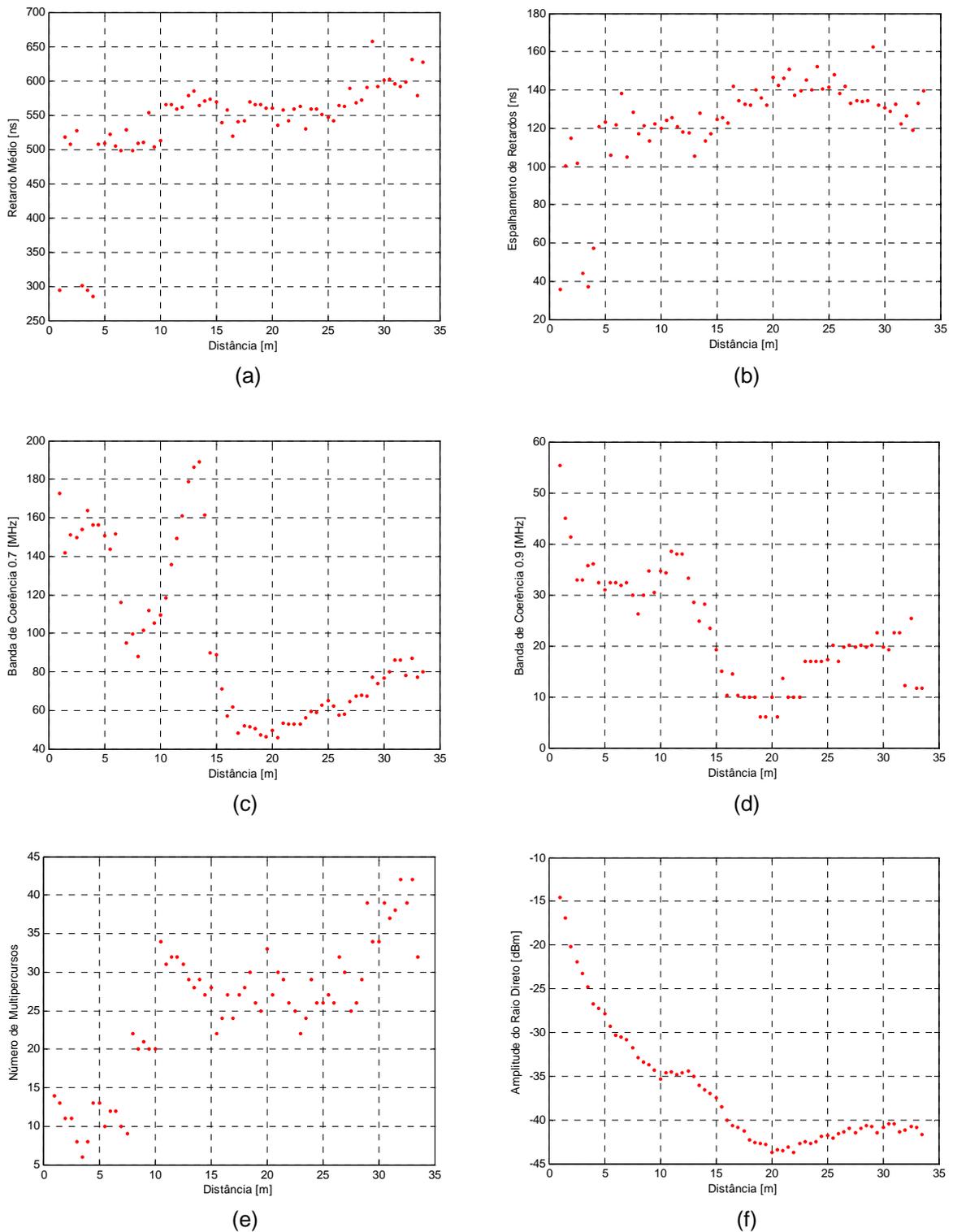


Fig 6.33 - Parâmetros do Canal versus a Distância para o Ambiente D1: (a) Retardo Médio; (b) Espalhamento de Retardos; (c) BC 0,7; (d) BC 0,9; (e) Número de Multipercursos; (f) Amplitude do Raio Direto.

Os perfis de retardos de potência tiveram, como principal espalhador, o próprio solo. A Figura 6.34 procura exemplificar tais perfis. Foram escolhidos 3 pontos: no começo, no meio e no final da rota de 33,5 metros.

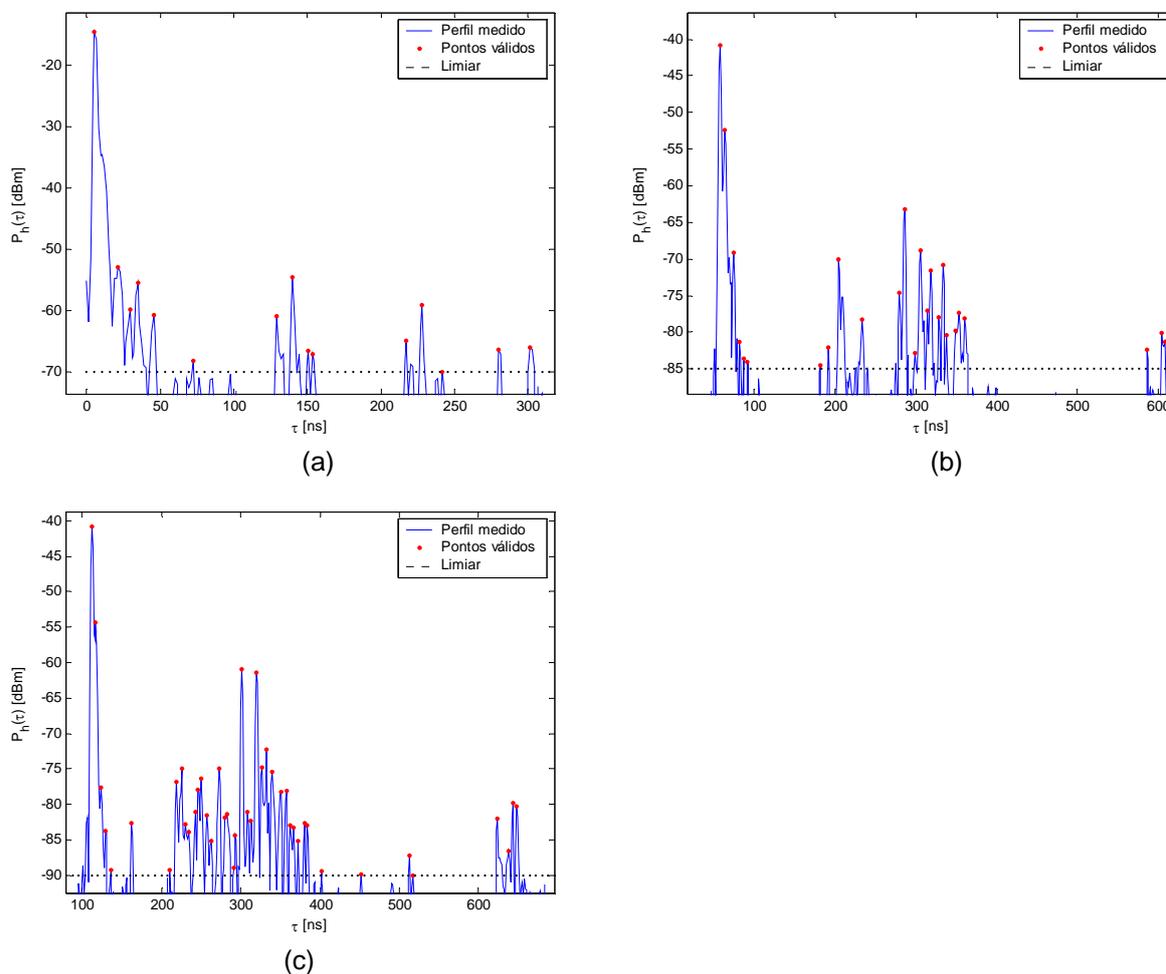


Fig 6.34 - Perfil de Retardos Potência no Ambiente D1, a 1 metro (a), a 17 metros (b) e a 33 metros (c) de Distância TX-RX.

6.4.2 Campo de Futebol do *Campus* do Gragoatá (D2)

Este ambiente está ilustrado na Figura 4.16, do Capítulo 4. O receptor foi mantido fixo e o transmissor foi deslocado, em linha reta, sobre um piso de grama, a uma distância de 49 metros. As medida foram tomadas de 1 em 1 em metro.

A Tabela 6.15 resume os valores medidos.

	Média	Razão
Retardo Médio [ns]	632,21	
Espalhamento de Retardos [ns]	202,01	0,30
Banda Coerência 0,7 [MHz]	89,37	
Banda Coerência. 0,9 [MHz]	13,30	
PL ₁ [dBm]	-22,68	
PL ₂ [dBm]	-57,30	
PL ₀ [dBm]	-14,8	
Distância [m]		
	Limiar [dBm]	X médio [dB]
1,0 – 3,0	-70	44,31
4,0 – 7,0	-80	46,84
8,0 – 16,0	-85	40,41
17,0 – 38,0	-95	44,64
39,0 – 49,0	-100	47,89
Índice de atenuação com a distância γ		
	PL₁ = -1,94	PL₂ = -2,64
Nº Médio de Multipercursos		
	51	

Tabela 6.15 - Resultados obtidos no Ambiente D2.

Para este ambiente, os gráficos de atenuação com a distância, com a indicação da reta de melhor ajuste e seu coeficiente, para os procedimentos na frequência e no tempo são apresentados na Figura 6.35:

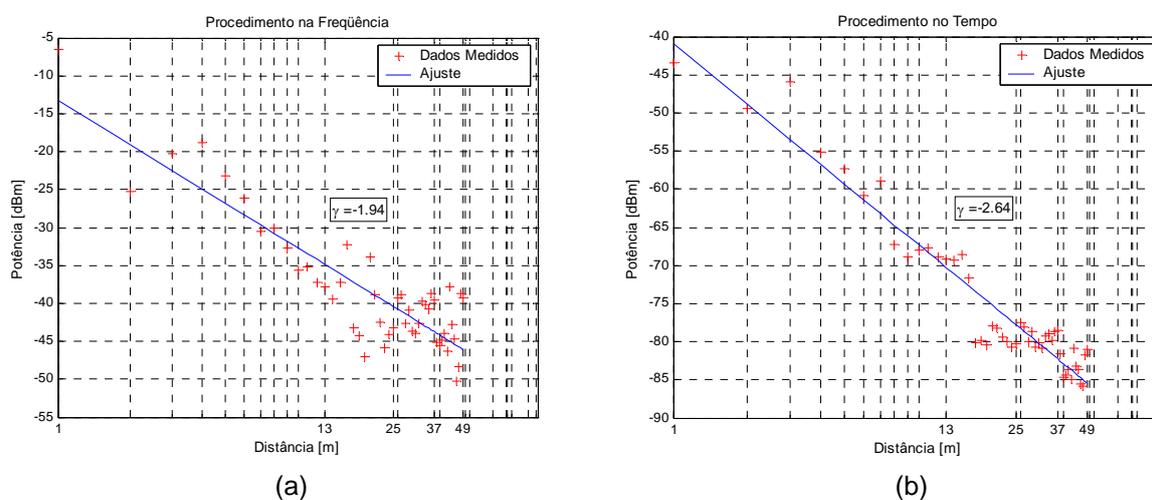
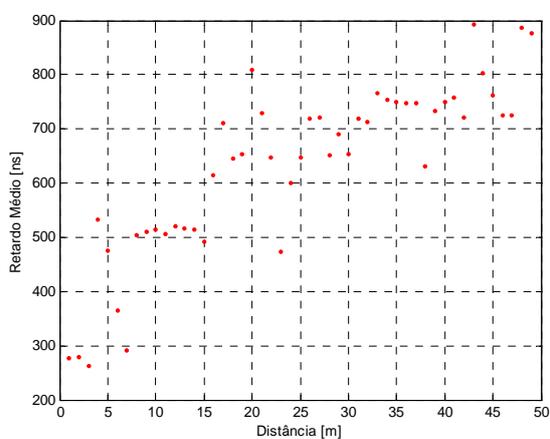


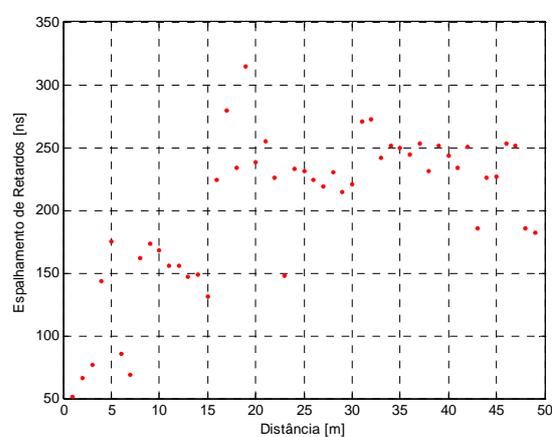
Fig 6.35 – Perda de Propagação ao longo da Distância para o Ambiente D2 segundo os Cálculos na Frequência (a) e no Tempo (b).

As explicações dadas para os gráficos semelhantes no ambiente D1 também se aplicam aqui. Tanto os valores de potência, quanto o coeficiente de perda de propagação com a distância, estão mais de acordo com o ambiente medido para o procedimento no tempo. Novamente, destacasse que o valor de $-1,94$ encontrado para PL_1 está abaixo do valor de espaço livre que é igual a -2 .

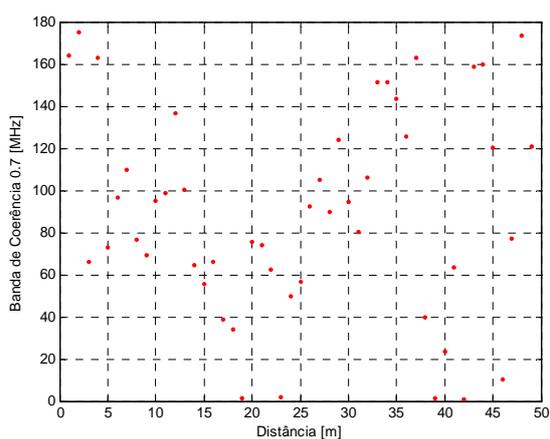
Como foi feito para o ambiente anterior, os gráficos da Figura 6.36 representam a relação dos parâmetros medidos *versus* a distância, de forma a facilitar a compreensão de tais parâmetros neste ambiente.



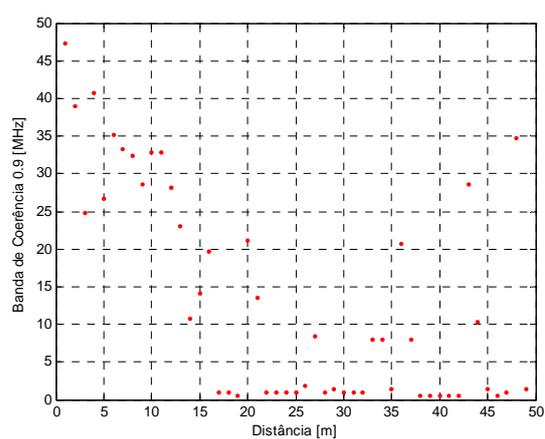
(a)



(b)



(c)



(d)

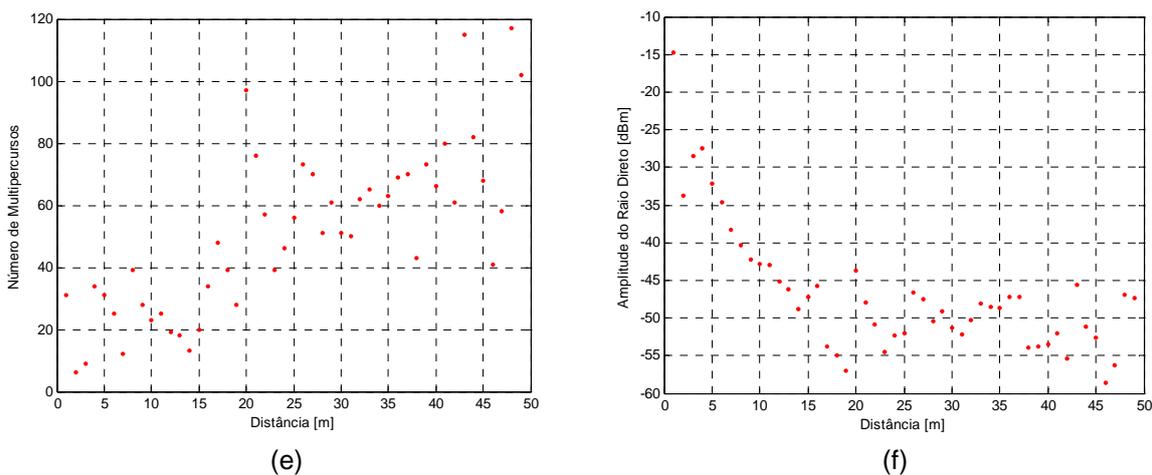
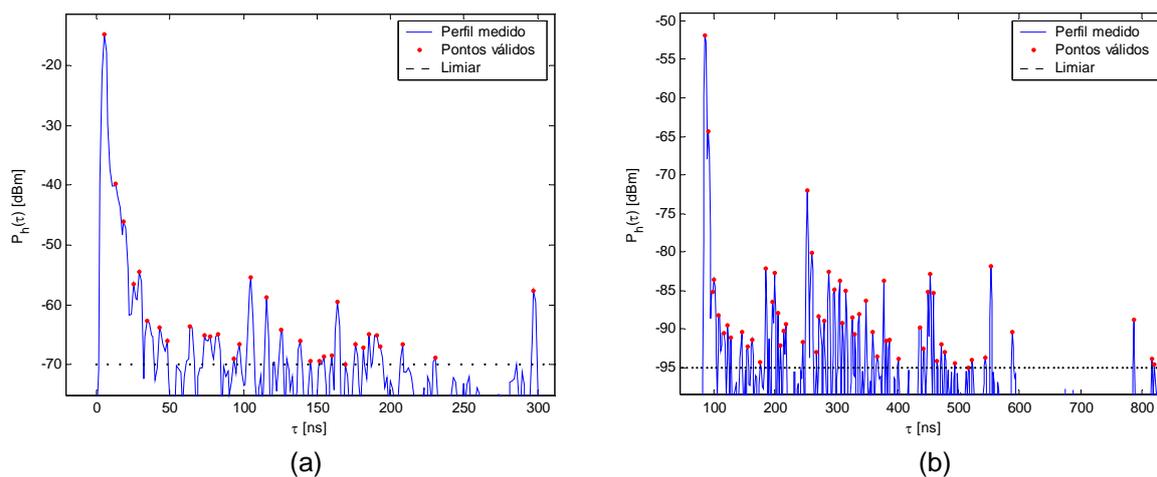
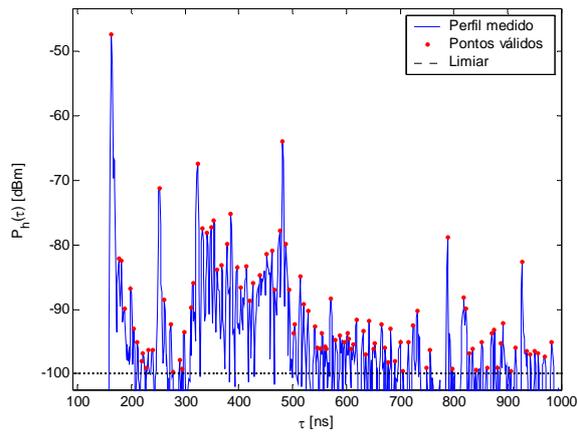


Fig 6.36 - Parâmetros do Canal versus a Distância para o Ambiente D2: (a) Retardo Médio; (b) Espalhamento de Retardos; (c) BC 0,7; (d) BC 0,9; (e) Número de Multipercursos; (f) Amplitude do Raio Direto.

Os perfis de retardos de potência neste ambiente tiveram como principais espalhadores os próprios equipamentos de medidas, o solo e as traves de ferro do campo de futebol, localizadas próximo do final da rota. A Figura 6.37 procura exemplificar tais perfis. Novamente foram escolhidos 3 pontos: no começo, no meio e no final da rota de 49 metros. Ao se aproximar do final da rota, o transmissor estava também se aproximando das traves de metal, as quais contribuíram de maneira significativa para o sinal na recepção.





(c)

Fig 6.37 - Perfil de Retardos Potência no Ambiente D2, a 1 metro (a), a 25 metros (b) e a 49 metros (c) de Distância TX-RX.

7 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi a caracterização do canal em banda ultralarga (UWB), através dos parâmetros de dispersão temporal, em pequena escala (retardo médio, espalhamento de retardos e banda de coerência), obtidos por processamento de medidas realizadas em ambientes *indoor-outdoor*, *outdoor-indoor* e puramente *outdoor*. Além disso, foram observadas a relação entre o espalhamento de retardos e a banda de coerência e, também, a análise da perda de propagação do sinal em ambientes *outdoor*.

A caracterização dos parâmetros de dispersão temporal do canal, em pequena escala, nos ambientes de transição *indoor-outdoor* e vice-versa, é de especial importância para os estudos científicos relativos à convergência da tecnologia que estão sendo realizados em nível mundial, particularmente nas situações que exigem o *handoff* vertical.

As pesquisas mais recentes concentram-se na geração de sinais UWB, com altas taxas de transmissão, para aplicações em redes WPANs de curto alcance, com cobertura de 10 metros ou menos. Um caso especial de WPAN utilizando canais UWB são as WBANs (*Body Area Networks*), onde a comunicação ocorre entre dispositivos próximos ao corpo do usuário.

Para atingir os objetivos acima descritos foram realizadas, ao longo do ano de 2005, campanhas de medidas nos *campi* do Gragoatá e Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense, em dezoito tipos de ambientes, nas configurações já citadas (*indoor-outdoor*, *outdoor-indoor* e puramente *outdoor*). Em dezesseis deles (Ambientes tipo A, B e C) foram escolhidos de 4 a 7 locais para serem medidos, nos quais foi utilizado um *grid* com 36 pontos. Em cada ponto do *grid* foram aquisitados e gravados 1601 amostras de amplitude e de fase que, em conjunto, formavam a função de Seletividade em Frequência $T(f,t)$. Para os dois

ambientes tipo D analisados, as medidas foram tomadas ao longo de um percurso em linha reta (de 66 pontos totalizando 33,5 metros para o ambiente D1 e de 49 pontos totalizando 49 metros para o ambiente D2) e o *grid* não foi utilizado. Assim sendo, o banco de dados analisado é composto de um total de 3355 perfis de retardos de potência.

A técnica de sondagem empregada foi a de varredura em frequência, para uma banda de frequências de 750 MHz.

Neste trabalho, todos os procedimentos teóricos e de medição, aquisição e análise de resultados foram cuidadosamente relatados e esclarecidos, em todas as suas etapas, com o propósito de se ter fonte de consulta tão completa quanto possível, para futuros trabalhos científicos a serem realizados nesta linha de pesquisa.

7.1 Janelamento e Limiar de Decisão

A janela de Blackman-Harris de 3 termos foi a que melhor se adequou aos dados, em função de sua resolução e da redução de lóbulo lateral obtida.

Para a determinação do limiar de ruído em cada perfil, alguns autores adotam o procedimento de estabelecer um valor fixo acima do patamar de ruído (7,5 dB [34] e 10 dB [26]) ou abaixo do valor de pico no perfil de retardos de potência (10 dB [23] e 25 dB [20],[49]). Neste trabalho, entretanto, ficou demonstrado que a escolha deste limiar é mais correta quando é feita criteriosamente em função de cada local, em cada ambiente analisado, no que pese o aumento substancial de trabalho para o seu estabelecimento. Vale destacar que o número de ambientes diferentes, comumente investigados, e apresentados na literatura técnica, varia de 2 a 7. Neste trabalho, foram investigados 18 ambientes, um número substancialmente maior.

Com o objetivo de não subestimar ou superestimar os valores dos parâmetros de dispersão temporal do canal e de se ter um conjunto de resultados dos locais medidos o mais verossímil possível foi utilizado, neste trabalho, um limiar criteriosamente e cuidadosamente foi escolhido para cada local medido, em função das distâncias TX-RX e dos espalhadores existentes nas vizinhanças do ponto medido. Isto acarretou um maior trabalho de processamento, o que não chega a ser uma desvantagem.

Ensaio exaustivos, feitos com um limiar fixo escolhido em torno da média apresentaram, basicamente, os mesmos resultados obtidos com o “limiar móvel”. Entretanto, a conduta de escolha de um limiar diferenciado, para cada local, mostrou-se bastante útil para uma melhor compreensão do comportamento do canal em estudo, através da interpretação dos seus parâmetros de dispersão temporal. Foi verificado que, na média, uma alteração de 1 a 5 dB para mais ou para menos na definição do limiar, não altera significativamente os valores dos parâmetros de dispersão temporal do canal. Este fato reforça a idéia de se escolher, adequadamente, de acordo com os 36 perfis de retardos de potência medidos para cada ponto do *grid*, um valor de limiar adequado para cada local.

7.2 Parâmetros de Dispersão do Canal em Pequena Escala

Os parâmetros de dispersão temporal do canal examinados neste trabalho foram: retardo médio, espalhamento de retardos e bandas de coerência para níveis de correlação de 0,7 e 0,9.

De uma maneira geral, o número médio de multipercursos está diretamente ligado às distâncias de separação TX-RX e às situações de LOS (com linha de visada) e NLOS (sem linha de visada). Distâncias maiores e percursos obstruídos tendem a aumentar os valores de retardo médio e espalhamento de retardos e a diminuir os valores de banda de coerência.

Nos radioenlaces *indoor-outdoor* (Ambientes A1, A3, A5 e A7) e nos radioenlaces *outdoor-indoor* (Ambientes A2, A4, e A6), os valores dos parâmetros de dispersão do canal determinados mostraram-se, aproximadamente, os mesmos, sinalizando um mesmo comportamento do canal.

As medidas realizadas próximo a construções e na saída de prédios (Ambientes B1 a B4) apresentaram valores maiores para os parâmetros de dispersão do canal em relação aos Ambientes de A1 a A7, o que acarreta numa degradação da qualidade da comunicação nos primeiros ambientes (B1 a B4).

As medidas realizadas em locais próximos a construções e com uma presença de vegetação, caracterizada por arbustos e árvores (Ambientes C1 a C4), apresentaram os maiores valores de retardo médio e de espalhamento de retardos. Tais valores e a banda de

coerência de 0,7 se aproximaram mais daqueles encontrados nos ambientes de B1 a B4. A banda de coerência de 0,9 ficou mais próxima daquelas encontradas nos ambientes de A1 a A8, o que confirma que as folhagens difundem o sinal, induzindo mais perdas.

Os gráficos de perfil de retardos de potência tiveram um comportamento bem parecido em todos os ambientes analisados. Na maioria das vezes, podia-se notar a presença de um raio dominante (o raio direto), seguido de ecos com amplitudes menores, os quais refletem os espalhadores presentes nos locais medidos.

A Tabela 7.1 apresenta os valores médios dos parâmetros de dispersão temporal do canal, encontrados para os ambientes sondados.

Ambiente	Retardo Médio (ns)	Espalhamento de Retardos (ns)	BC 0,7 (MHz)	BC 0,9 (MHz)
A1,A3,A5,A7	62,8	42,9	44,4	9,2
A2,A4,A6	65,0	44,2	32,1	7,0
A8 (LOS)	26,1	34,4	75,1	18,9
A8 (NLOS)	36,4	22,7	20,0	6,1
B1 a B4	75,1	46,2	70,0	16,7
C1 a C4	77,6	54,5	67,7	10,2

Tabela 7.1 - Parâmetros de Dispersão do Canal para os Ambientes Sondados.

Os valores médios obtidos, em LOS, para os parâmetros retardo médio, espalhamento de retardos, banda de coerência de 0,7 e banda e coerência de 0,9 foram 65,4 ns, 44,9 ns, 66,0 MHz e 14,2 MHz, respectivamente. Na situação NLOS os valores de retardo médio, espalhamento de retardos, banda de coerência de 0,7 e banda e coerência de 0,9 foram 58,6 ns, 40,6 ns, 18,5 MHz e 4,3 MHz, respectivamente.

7.3 Atenuação de Propagação com a Distância

Dois ambientes foram selecionados para se avaliar a atenuação do sinal com a distância: um estacionamento amplo (Ambiente D1) e um campo de futebol (Ambiente D2). Em ambos os ambientes as medidas foram tomadas em LOS ao longo da distância de 33,5 metros (D1) e 49 metros (D2).

Dos dois procedimentos adotados para se calcular o expoente de decaimento com a distância (γ), no domínio da frequência e do tempo, somente neste último (no domínio do tempo) os valores de γ encontrados foram satisfatórios, -2,38 (D1) e -2,64 (D2), e estão de acordo com o comportamento típico da atenuação do sinal num ambiente *outdoor*. No domínio de frequência, as varreduras tinham ruído embutido nas mesmas e não foram reduzidos. No domínio do tempo, antes de se efetuar o cálculo de potência de sinal em cada ponto, o perfil de potências sofria uma suavização do ruído nele embutido, acarretando resultados mais reais para a potência medida em cada ponto. É importante ressaltar que não há, na literatura técnica, registro de medições em UWB em ambientes semelhantes a D1 e D2 tratando-se, portanto, de um procedimento científico inédito.

7.4 Relação entre Banda de Coerência e Espalhamento de Retardos

A utilização da expressão proposta por Gans (6.2) em sistemas de banda ultralarga parece fornecer valores verossímeis para α , devido à melhor resolução temporal proporcionada por sinais UWB. Como foi visto no Capítulo 6, α é a constante numérica que permite verificar o quanto a banda de coerência é inversamente proporcional ao espalhamento de retardos. A utilização da equação (6.3), que define o limiar de Fleury, abaixo do qual não se espera obter valores, mostrou um ajuste similar ao encontrado por Barros [49] e melhor que o obtido, em banda larga, por Macedo [34].

Os valores de α , em LOS, para as bandas de coerência de 0,7 e 0,9 ficaram abaixo de 1 e entre 1 e 6, respectivamente. A exceção foi o ambiente C1, cujos valores médios de α , para os locais 2, 3 e 4 foram 5 e 27, para as bandas de coerência de 0,7 e 0,9, respectivamente. Observou-se, também, que a razão entre o desvio padrão e a média dos espalhamentos de retardos foi de 0,04 para o Local 1 e 0,17 para os outros locais, o que levou o limiar de Fleury a ser respeitado apenas naquele local. Conclui-se, portanto, que, neste ambiente, uma falta de estacionaridade nas medidas foi a responsável pelas exceções apresentadas no Ambiente C1.

Os valores de α , em NLOS, para as bandas de coerência de 0,7 e 0,9 ficaram entre 1 e 3 e entre 4 e 12, respectivamente. A exceção ocorreu para o ambiente A2, no qual o Local 4 teve o Limiar de Fleury desrespeitado. Assim sendo, conclui-se que os valores de α obtidos em NLOS são maiores do que os encontrados em LOS.

Os valores médios de α encontrados para a banda de coerência de 0,7 foram 0,58, em LOS e 3,69, em NLOS. Para a banda de coerência de 0,9 os valores médios de α encontrados foram 3,31, em LOS e 7,15, em NLOS.

A grande quantidade de medidas realizadas possibilitou que os valores de α fossem levantados para vários ambientes diferentes. Como ainda não é conhecida a exata relação entre banda de coerência e espalhamento de retardos, os valores encontrados para α neste trabalho são uma contribuição importante do autor para a ciência.

7.5 Sugestões de Trabalhos Futuros

- O extenso banco de dados adquirido nas campanhas de medidas pode proporcionar a determinação de outros parâmetros que fogem ao objetivo deste trabalho, tais como a taxa de chegada de *cluster* e a de chegada de raios dentro do *cluster* [26]. Os tempos de decaimento *intercluster* e *intracluster* podem também ser obtidos, de forma a tornar mais rica a caracterização dos ambientes medidos.
- Seria de grande importância, para a compreensão do comportamento global dos canais UWB, o levantamento das distribuições estatísticas que melhor representem os parâmetros de dispersão temporal do canal que foram medidos.
- O banco de dados adquirido poderia ser utilizado no sentido de que modelos de canal UWB para a faixa de 960 MHz a 1710 MHz fossem propostos e comparados com os propostos pelos grupos de pesquisa IEEE 802.15.3a e IEEE 802.15.4a.
- A comparação entre diferentes técnicas de limpeza de sinal de maneira que as mais eficientes pudessem servir como base para as futuras pesquisas, seria de grande valor científico.
- A investigação do efeito de diferentes tempos de varredura do Analisador Vetorial, na estacionaridade das medidas, seria de grande importância.

- A realização de uma nova campanha de medidas, utilizando-se a sondagem no tempo, criaria uma base de dados bastante significativa para estudo e comparação com os resultados apresentados neste trabalho.
- A aquisição de um novo banco de dados por um sistema MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) para a mesma faixa de frequências, para comparar com os resultados do sistema SISO (*Single-Input Single-Output*) utilizado neste trabalho, seria de grande valor científico [64].
- Repetir a campanha de medidas, mas considerando a dinâmica do ambiente, com pessoal circulando e, avaliar o efeito *Doppler*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 PORCINO, D.; HIRT, W. **Ultra-wideband radio technology: Potential and challenges ahead**. IEEE Communications Magazine, v.41, p. 66-74, Julho 2003.
- 2 SCHOLTZ, R. A., **Multiple access with time-hopping impulse modulation**, Military Communications Conference, MILCOM, v.02, p. 447-450, Outubro 1993.
- 3 WIN, M.Z.; SCHOLTZ, R. A. **Impulse Radio: How it works**. IEEE Communications Letters, v.02, n.02, p. 36-38, Fevereiro 1998.
- 4 WIN, M. Z.; SCHOLTZ, R. A. **Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications**. IEEE Transactions on Communications, v.48, n.04, p. 679-689, Abril 2000.
- 5 CASSIOLI, D.; WIN, M. Z.; MOLISCH, A. F. **A statistical model for the UWB indoor channel**. IEEE Vehicular Technology Conference, v.02, p. 1159-1163, Maio 2001.
- 6 FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION. **FCC 02-48: First Report and Order**. Washington, Fevereiro 2002. 118p.
- 7 OPPERMANN, I.; HÄMÄLÄINEN, M.; LINATTI, J. **UWB Theory and Applications**. 1.ed. Inglaterra: John Wiley & Sons, 2004. 248p.
- 8 TAYLOR, J. D. **Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems**. 1.ed. Boca Raton: CRC Press, 1994. 688p.
- 9 QIU, R. C.; LIU, H.; SHEN, X. **Ultra-wideband for multiple access communications**. IEEE Communications Magazine, v.43, n.02, p. 80-87, Fevereiro 2005.
- 10 DEFENSE ADVANCED RESEARCH PROJECTS AGENCY. **Assessment of Ultra-Wideband (UWB) Technology**. Columbus, Julho 1990. 32p.
- 11 LATHI, B. P. **An Introduction to Random Signals and Communications Theory**. Scranton, Pennsylvania: International Textbook Company, 1968. 488p.
- 12 SCHOLTZ, R. **Multiple access with time-hopping impulse modulation**. IEEE Military Communications Conference, v.02, p. 447-450, Outubro 1993.

- 13 XU, Z.; LIU, L. **Power Allocation for Multi-band OFDM UWB Communication Networks**. IEEE Vehicular Technology Conference, v.01, p. 368-372, Setembro 2004.
- 14 CASSIOLI, D., WIN, M. Z.; MOLISCH, A.F. **The ultra-wideband bandwidth indoor channel: from statistical model to simulations**. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, v.20, n.06, p. 1247-1257, Agosto 2002.
- 15 YANO, S. M. **Investigating the Ultra Wideband Indoor Wireless Channel**. IEEE Vehicular Technology Conference, v.03, p. 1200-1204, Maio 2002.
- 16 CASSIOLI, D.; DURANTINI, A. **A time domain propagation model of the UWB indoor channel in the FCC-compliant band 3,6 - 6 GHz based on PN sequence channel measurements**. Vehicular Technology Conference, v.01, p. 213-217, Maio 2004.
- 17 GHASSEMZADEH, S. S. et al. **Measurement and modeling of an ultra-wide bandwidth indoor channel**. IEEE Transactions on Communications, v.52, n.10, p. 1786-1796, Outubro 2004.
- 18 HOVINEN, V.; HAMALAINEN, M.; PATSI, T. **Ultra wideband indoor radio channel models: preliminary results**. IEEE Conference on Ultra Wideband System and Technologies, Digest of Papers, p. 75-79, Maio 2002.
- 19 WIN, M. Z.; SCHOLTZ, R. A. **Characterization of Ultra-Wide Bandwidth Wireless Indoor Channels: A Communication-Theoretic View**. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, v.20, n.09, p. 1613-1627, Dezembro 2002.
- 20 CHONG, C. C.; YONG, S. K. **A Generic Statistical-Based UWB Channel Model for High-Rise Apartments**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, v.53, n.08, p. 2389-2399, Agosto 2005.
- 21 WIN, M. Z. et al. **Ultra-wide Bandwidth (UWB) Signal Propagation for Outdoor Wireless Communications**. IEEE Vehicular Technology Conference, v.01, p. 251-255, Maio 1997
- 22 FRANCESCO, A. Di. et al. **Sounding and Modelling of the Ultra Wide-Band Channel in Outdoor Scenarios**. IEEE Networking with Ultra Wide Band and Workshop on Ultra Wide Band for Sensor Networks. Networking with UWB. 2nd International Workshop, p. 20-24, Julho 2005.

- 23 RENZO, M. Di. et al. **The Ultrawide Bandwidth Outdoor Channel: From Measurement Campaign to Statistical Modeling**. 14th IST Mobile and Wireless Communications Summit, IST Summit 2005. Dresden, Germany. 19-23 Junho 2005.
- 24 KANNAN, B. *et al* **Characterization of UWB Channels: Large-Scale Parameters for Indoor and Outdoor Office Environments**. IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE 802.15-04-0383-00-04a, Julho 2004.
- 25 KANNAN, B. *et al.* et al. **Characterization of UWB Channels: Small-Scale Parameters for Indoor and Outdoor Office Environments**. IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE 802.15-04-0385-00-04a, Julho 2004.
- 26 KIM, C.W. et al. **Characterization of ultra-wideband channels for outdoor office environment**. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, v.02, p. 950- 955, Março 2005.
- 27 MOLISCH, A. F. **Ultra Wideband Propagation Channels – Theory, Measurements and Modeling**. IEEE Transactions on Vehicular Technology, v. 54, n.5, p. 1528-1545, Setembro 2005.
- 28 KOVACS, I. et al. **Ultra wideband radio propagation in body area network scenarios**. IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, p. 102-106, 30 Agosto – 02 Setembro 2004.
- 29 FONTANA, R. J. **Recent system applications of short-pulse ultra-wideband (UWB) technology**. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, v.52, n.09, p. 2087–2104, Setembro 2004.
- 30 KATZ, M.; FITZEK, F.H.P. **On the Definition of the Fourth Generation Wireless Communications Networks: The Challenges Ahead**. International Workshop on Convergent Technologies (IWCT), Oulu, Finland, p. 1-8, Junho 2005.
- 31 BELLO, P. A. **Characterization of randomly time variant linear channels**. IEEE Transactions on Communications, v.11, n.04, p. 360-393, Dezembro 1963.
- 32 PARSONS, D. **The Mobile Radio Propagation Channel**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1992. 418p.
- 33 SHENOI, K. **Digital Signal Processing in Telecommunications**. 1.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 592p.

- 34 MACEDO, L.H.G. **Sondagem em frequência do canal indoor faixa larga.** 112 f. Dissertação de Mestrado - PUC-RJ, Fevereiro 2002.
- 35 LORENZ, R. W. **Impact of frequency-selective fading on binary and quadrature phase modulation in mobile radio communication demonstrated by computer simulations using the WSSUS channel model.** COST207: Digital Land Mobile Radio Communications. Technical Document, n.01, 1986.
- 36 ULTRA LAB. **U.S.S. Curtis Propagation Measurements.** Disponível em: <<http://ultra.usc.edu/experiments/uss-curtiss.htm>> Acesso em: 27 jun. 2005.
- 37 RUSCH, L. et al. **Characterization of UWB propagation from 2 to 8 GHz in a residential environment.** Disponível em <http://www.intel.com/technology/comms/uwb/download/Channel_JSAC02_sub_LR.pdf> Acesso em: 01 jun. 2005.
- 38 FOERSTER, J. R.; PENDERGRASS, M.; MOLISCH, A. F. **A channel Model for Ultrawideband Indoor Communication.** International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communication. Mitsubishi Electric Research Laboratories. Outubro 2003. Disponível em: <<http://www.merl.com/reports/docs/TR2004-074.pdf>> Acesso em 01 de jun. 2005.
- 39 CRAMER, R.M.; SCHOLTS, R.A.; WIN, R. Z. **Evaluation of an ultra-wide-band propagation channel.** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, v.50, n.05, p. 561-570, Maio 2002.
- 40 RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communication Principles and Practice.** 1.ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1996. 641p.
- 41 YAZDANDOOST, K. Y.; KOHNO, R. **Ultra wideband antenna.** IEEE Radio Communications, v.42, n.06, p. S29-S32, Junho 2004.
- 42 QING, X.; CHIA, M. Y. W.; WU, X. **Wide-slot antenna for UWB applications.** IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium , v.01, p. 834-837, Junho 2003.
- 43 SALEH, A.; RUSTAKO, A.; ROMAN, R.S. **Distributed antennas for indoor radio communication.** IEEE Transactions on Communications, v.35, n.12, p. 1245-1251, Dezembro 1987.

- 44 HOWARD, S.; PAHLAVAN, K. **Frequency domain measurements of indoor radio channel**. Electronics Letters, v.25, n.24, p. 1645-1647, Novembro 1989.
- 45 HOWARD, S. J.; PAHLAVAN, K. **Measurements and analysis of the indoor radio channel in the frequency domain**. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v.39, n.05, p. 751-755, Outubro 1990.
- 46 BERGMAN, JR. **On the design of broadband omnidirectional compact antennas**. IEEE Microwave and Optical Technology Letters, v.39, n.05, p. 418-422, Dezembro 2003.
- 47 ZAGHLOUL, H.; FATTOUCHE, M.; MORRISON, G. **Frequency response and path loss measurements of indoor channel**. Electronics Letters, v.27, n.12, p. 1021-1022, Junho 1991.
- 48 CARLSON, G.E. **Signal and Linear System Analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1998. 768p.
- 49 BARROS, F. J. B. **Medidas e análise da dispersão temporal do canal de propagação UWB indoor em vários tipos de ambientes**. 123 f. Dissertação de Mestrado - PUC-RJ, Abril, 2005.
- 50 VARELA, M. S.; SANCHEZ, M. **RMS delay and coherence bandwidth measurements in indoor radio channels in the UHF band**. IEEE Transactions on Vehicular Technology, v.50, n.02, p. 515-525, Março 2001.
- 51 JANSEN, G. J. M.; STIGTER, P. A.; PRASAD, R. **Wideband indoor channel measurements and BER analysis of frequency selective multipath channels at 2.4, 4.75 and 11.5 GHz**. IEEE Transactions on Communications, v.44, p. 1272-1288, Outubro 1996.
- 52 KUNISCH, J., PAMP, J. **Measurements results and modeling aspects for the UWB radio channel**. IEEE Conference on Ultra Wideband System and Technologies, Digest of Papers, p. 19-23, Maio, 2002.
- 53 KEIGNART, J.; DANIELE, N. **Subnanosecond UWB channel sounding in frequency and temporal domain**. IEEE Conference on Ultra Wideband System and Technologies, Digest of Papers, p. 25-30, Maio 2002.
- 54 McNAIR, J.; ZHU, F. **Vertical Handoffs in Forth-Generation Multinetwork Environments**. IEEE Wireless Communications, v.11, n.03, p. 8-15, Junho 2004.

- 55 HARRIS, F. J. **On the use of windows for analysis with the Discrete Fourier Transform.** Proceedings of the IEEE, v.66, n.01, p. 51-83, Janeiro 1978.
- 56 TURIN, G. L. **Communication through noisy, random-multipath channels.** IRE Convention Record, v.04, p. 154-166, Março 1956.
- 57 SOUSA, E. S.; JOVANOVIĆ, V. M.; DAIGNEAULT, C. **Delay Spread Measurements for the Digital Cellular Channel in Toronto.** IEEE Transactions on Vehicular Technology, v.43, n.04, p. 837-847, Novembro 1994.
- 58 FLEURY, B. H. et al. **Channel parameter estimation in mobile Radio environments using the SAGE Algorithm.** IEEE Journal on Selected Areas in Communications, v.17, n.03, p. 434-450, Março 1999.
- 59 DIAS, M. H. C. **Estimação das respostas do canal real de propagação rádio-móvel nos domínios espacial e temporal.** 260 f. Tese de Doutorado - PUC-RJ, Abril 2003.
- 60 HOGBÖRN, J. A. **Aperture Synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines.** Astronomy and Astrophysics, v.15, p. 417-426, Junho 1974.
- 61 CRAMER, R. J. M.; SCHOLTZ, R. A.; WIN, M. Z. **Spatio-Temporal Diversity in Ultra-wideband Radio.** IEEE Wireless Communications and Networking Conference, v.02, p. 888-892, Setembro 1999.
- 62 GANS, M. J. **A power-spectral theory of propagation in the mobile-radio environment.** IEEE Transactions on Vehicular Technology, v.21, n. 01, p. 27-38, Fevereiro 1972.
- 63 FLEURY, B. H. **An uncertainly relation for WSS process and its application to WSSUS system.** IEEE Transactions on Communications, v.44, n.12, p. 1632-1634, Dezembro 1963.
- 64 FOSCHINI, G. J.; GANS, M. J. **On the limits of wireless communications in fading environment when using multiple antennas.** Wireless Personal Communications, v.06, n.03, p. 311-335, Março 1998.

APÊNDICE A A CAMPANHA DE MEDIDAS

A.1 Ambientes Medidos no *Campus* da Praia Vermelha

Ambientes Investigados	Nº locais	Dia	Horário
A1 - Segundo andar do bloco D <i>indoor-outdoor</i>	7	10/09/05 05/10/05	09:30 – 17:50 (locais:1a 6) 23:20 – 23:30 (local: 7)
A2 - Segundo andar do bloco D <i>outdoor-indoor</i>	7	15/09/05 21/09/05	22:30-11:20 (locais:1a3) 22:30-23:50 (locais:4 a7)
A3 - Terceiro andar do bloco D <i>indoor-outdoor</i>	6	14/09/05 24/09/05 05/10/05	20:20-22:30 (locais: 1 e 2) 20-20:40 (locais: 3 a 5) 22:50-23 (local: 6)
A4 - Terceiro andar do bloco D <i>indoor-outdoor outdoor-indoor</i>	6	09/09/05	09:10-12:10
A5 - <i>Hall</i> do Bloco D <i>indoor-outdoor</i>	7	29/09/05	23:20-01:30
A6 - <i>Hall</i> do Bloco D <i>indoor-outdoor outdoor-indoor</i>	7	10/09/05	18:10-20:10
A7 - Biblioteca da Engenharia <i>indoor-outdoor</i>	4	09/09/05	19:15-20
A8 - Parede do terceiro andar do bloco E	4	20/09/05	19:50-21:30
B1 - Ao longo da saída da Biblioteca da Engenharia	6	07/10/05	15:40-18:10
B2 - Ao longo da saída do <i>Hall</i> do bloco D	6	30/09/05	01:40-03:00
B3 - Pilotis do Prédio da Faculdade de Geociências	6	12/10/05	16-17:45
B4 - Estacionamento do Bloco E	5	25/09/05	09:30-10:50
C3 - Pátio da Faculdade de Arquitetura (em frente ao Casarão)	4	25/09/05	14:40-16
C4 - Pátio da Faculdade de Arquitetura (em frente ao Chalé)	4	25/09/05	13-13:50
D1 - Estacionamento da Faculdade de Geociências	66	15/09/05	18:20-19:40

Tabela A.1 - Resumo das Medições no *Campus* da Praia Vermelha.

A.2 Ambientes Medidos no *Campus* do Gragoatá

Ambientes Investigados	Nº de locais	Dia	Horário
C1 - Entre os blocos D e E	5	13/10/05	17-19:10
C2 - Entre os blocos O e N	6	16/09/05	18:10-20:10
D2 - Campo de futebol do <i>Campus</i> do Gragoatá	49	06/10/05	12:40-13:30

Tabela A.2 - Resumo das Medições no *Campus* do Gragoatá.

A.3 Total de Ambientes Medidos

18 Ambientes	90 medidas com o grid (90*36=3240 arquivos)
	115 medidas em linha reta
	3240+115 = 3355 arquivos

Tabela A.3 - Resumo Geral da Campanha de Medidas.

As medidas foram tiradas nos meses de setembro e outubro de 2005, nos seguintes dias:

- Setembro: 9 -10 -14 – 15 – 16 – 20 - 21 – 24 – 25 – 29 - 30 (11 dias)
- Outubro: 5 – 6 - 7 – 12 - 13 (5 dias)

Total de horas efetivamente realizando as medições: 44 horas

Total de dias em que as medições foram realizadas: 16 dias

APÊNDICE B

PROGRAMAÇÃO EM MATLAB

B.1 Programa de Aquisição

```
% Programa de Aquisição
% Fabricante: Agilent
% Placa de controle: VISA-GPIB
% Nome: GPIB0
% Endereço Primário: 16

close all,clear ,clc; % Limpa a área de trabalho do matlab e a tela de comandos

out = instrfind;

if isempty(out) == 0
    fclose(out);
    delete(out);
    clear;
    clc;
end

na=visa('agilent','GPIB0::16::INSTR'); % Cria o objeto Network Analyzer
set(na,'InputBufferSize',2000000); % Aumenta o buffer de entrada para 2 Mbytes. O default é 512
fopen(na); % Estabelece comunicação com o instrumento
if (isequal(get(na,'status'),'open')==1)
    disp('A COMUNICACAO FOI ABERTA COM SUCESSO.')
end

for u=1:36
    disp(sprintf('PONTO DO GRID: %d\n',u))
    b=int2str(u);
    arquivo=['ponto5_',b]; % Nome do arquivo de saída. Trocar a cada novo local

    [amp,fase]=acq(na); % Função que faz a aquisição gravando a amplitude e a fase
    figure
    plotar(na,amp,fase); % Função que gera os gráficos de amplitude e fase medidos
    varre(:,w)=[amp.'; fase.']; % Armazena os resultados

    PDP(varre); % Função que gera o perfil de retardos de potencia
    pause;close all
    saida='varre';
    save (arquivo,saida); % Salvando os dados medidos
    clear varre
    disp('PASSE PARA O PROXIMO PONTO DO GRID')
    pause
end

fclose(na); % Desconecta o instrumento
delete(na); % Apaga o objeto criado
disp('FIM')
```

B.2 Programa Principal para o Pós-Processamento dos Ambientes Tipo A, B e C.

```

% Programa de Detecção de Multipercursos utilizando a técnica CLEAN
% OBS: Copiar os arquivos pontox_y.mat para a pasta raiz
clear all,close all,clc;
disp('--> CLEAN GRID <--')
% Leitura dos Arquivos de medidos % Sao os locais onde o grid foi colocado
numlocais=input('--> Entre com o numero de LOCAIS deste arquivo: ');

for kp=1:numlocais % Varre o numero de locais medidos em um determinado ambiente
    pontogrid=36;
    pp=int2str(kp);
    nome=['ponto',pp];
    for ki=1:1:pontogrid % Varre os 36 pontos do grid
        rr=int2str(ki);
        arquivo=[nome,'_',rr]; % Ponto do grid
        disp(sprintf('=>%s',arquivo));

load(arquivo); % Abertura do arquivo para um determinado ambiente
Amp2(1,:)=varre(1,:); % Amp em dB;representa a relação 20log10(Vrx/Vtx) medida pelo VNA
Fase2(1,:)=varre(2,:);
clear varre;
load ponto_referencia; % Abertura do arquivo referencia ("espaço livre")
Amp1(1,:)=varre(1,:);
Fase1(1,:)=varre(2,:);
clear varre;

% Parametros da Sonda
[B,pontos,deltaF,RetardoMax,deltaT,retardo]=fc_parametros_sonda;

%Composicao dos dados em numeros complexos
[Tref,T]=fc_geraT(Amp1,Fase1,Amp2,Fase2);

% Aplicando a Funcao Janela de Blackman Harris
% Função janela para reduzir espúrios no domínio dos retardos devido a ifft
PBH=fc_BHarrisW(pontos);

%Realizando a IFFT dos dados medidos
[PPRref,CX,PPR,CY,CYoriginal,PPRref_dop,PPR_dop]=fc_ifft(Tref,PBH,pontos,T);

% Determinacao do limiar para a detecção de multipercurso
[janela,in,limiardB,limiar]=fc_limiar(CY,kp);
limiaries(kp,ki)=limiardB; % Vetor com o limiar p cada ponto medido

% Deteccao dos picos maximos da resposta impulsiva
[lin,maximos,tamanho,CYauxiliar,m,teste]=fc_picos(PPR,retardo);

% Plotagem da resposta impulsiva de referencia
% fc_graf_PPRref(retardo,PPRref);

%Preparando a Matriz a ser usada na Correlacao
[CXmatriz,CYmatriz,en1,en2,a]=fc_matriz_corr(PPRref,tamanho,m,CX,teste);

% Obtendo os Coeficientes de Correlacao
[teste3]=fc_coef_corr(CXmatriz,CYmatriz,en1,a);

```

%Aplicacao da Tecnica CLEAN

```
[amplitudeoriginal,atrasos]=fc_teq_clean(PPRref,teste3,pontos,CY,limiar,CX,CYoriginal,CYauxiliar,retardo);
```

% Captura dos Multipercursos Válidos

```
[cleanpoints,cleanatrasos,retardos,magnitudes,retardo_direto,soma,amp_raio_direto]=fc_multivalidos(atrasos,janela,amplitudeoriginal,limiar);
```

```
raio_direto_retardo(kp,ki)=retardo_direto;
```

```
raio_direto_magnitude(kp,ki)=10*log10(amp_raio_direto.^2);
```

% Numero de Multipercursos Validos em cada ponto do grid

```
[num]=fc_conta_percursos_validos(retardos);
```

```
numero(kp,ki)=num;
```

% Calculo do retardo medio e do desvio padrao

```
[taumedio1,desvio1]=fc_tau_desvio(cleanatrasos,cleanpoints);
```

```
taumedio(kp,ki)=taumedio1;
```

```
desvio(kp,ki)=desvio1;
```

% Calculo da Banda de Coerencia

```
[aa,bb]=fc_BandaCoerencia_2(T,pontos,deltaF,pp,rr);
```

```
% Função que faz o gráfico da BC
```

```
banda.coerencia07(kp,ki)=aa;
```

```
banda.coerencia09(kp,ki)=bb;
```

% Plotagem do perfil de potencia com seus multipercursos validos

```
fc_graficoPPRlimpo(CYoriginal,retardo,cleanpoints,cleanatrasos,in,pp,rr,arquivo,limiardB);
```

```
pause
```

% Cálculos para o nível de sinal em dBm

```
PLmodelo=fc_aten_dist(pontos,T);
```

```
PL(kp,ki)=10*log10(PLmodelo);
```

```
% PL1
```

```
PL_Rappaport=fc_aten_dist_Rapp(magnitudes);
```

```
PL_Rapp(kp,ki)=20*log10(PL_Rappaport);
```

```
% PL2
```

```
disp(sprintf('\n--> Proximo ponto do grid'))
```

% Limpando as variaveis para que o processamento sequencial nao apresente problemas

```
clear B pontos deltaF RetardoMax deltaT retardo Tref T PPRref CX
```

```
clear janela in limiardB limiar lin maximos tamanho CYauxiliar m teste
```

```
clear CXmatriz CYmatriz en1 en2 a teste3 amplitudeoriginal atrasos cleanpoints cleanatrasos
```

```
clear taumedio1 desvio1 aa bb PPR CY CYoriginal PBH magnitudes retardos
```

```
end
```

```
% Fim do for que varre o grid de 36 pontos
```

```
disp(sprintf('\n** Proximo local medido **'))
```

```
end
```

```
% Fim do for que varre os locais medidos
```

```
disp('-->Fim<--')
```

% Apresentação dos Resultados

```
clc, disp('TABELA 1')
```

```
[retardomedio,retardorms,banda07grid,banda09grid,retardosdirtostrgrid]=fc_med_mediana_desvio(numlocais,taumedio,desvio,banda,raio_direto_retardo);pause,clc
```

```
disp('Numero medio de multipercursos validos em cada local medido:');for i=1:numlocais, n(i)=sum(numero(i,:))/36;end,round(n)',pause
```

```
disp('TABELA 2')
```

```
[ampmedia_indoordBm,ampmedia_RappdBm,ampmedia_diretodBm,ampmedia_limiardBm]=fc_med_mediana_desvio_amp(numlocais,PL,PL_Rapp,raio_direto_magnitude,limiares);pause
```

```
disp('ALFA')
[rr,tt]=fc_banda_retardoRMS_2(desvio,banda);
```

B.3 Programa Principal para o Pós-Processamento dos Ambientes D1 e D2

```
% Programa de Detecção de Multipercursos utilizando a técnica CLEAN
% OBS: p o processamento colocar os arquivos pontox_y.mat na pasta raiz
% ALGORITMO PARA ESPAÇO LIVRE
clear all,close all,clc;
disp('--> CLEAN ESPAÇO LIVRE <--')
%Leitura dos Arquivos de medidas
% numlocais=input('--> Entre com o numero de LOCAIS deste arquivo: ');
% São os locais onde o grid foi colocado.Em D1 e D2 o grid não foi usado, faz-se numlocais=1.
% A variável numlocais foi mantida por uma questão de padronização: numlocais=1; Apenas dois locais foram
medidos em linha reta (Campo Gragoatá e Geociências)

for kp=1:numlocais
    pontogrid=input('--> Entre com o numero de pontos medidos: ');
    pp=int2str(kp);
    nome=['ponto',pp];
    for ki=4:1:pontogrid % A rota medida em linha reta começa no arquivo ponto1_4
        rr=int2str(ki);
        arquivo=[nome,'_',rr]; % Ponto do grid
        disp(sprintf('=>%s',arquivo));

load(arquivo); % Abertura do arquivo para um determinado ambiente
Amp2(1,:)=varre(1,:); % Amp em dBm
Fase2(1,:)=varre(2,:);
clear varre;

load ponto_referencia; % Abertura do arquivo referencia (espaço livre)
Amp1(1,:)=varre(1,:);
Fase1(1,:)=varre(2,:);
clear varre;

%Parametros da Sonda
[B,pontos,deltaF,RetardoMax,deltaT,retardo]=fc_parametros_sonda;

% Composicao dos dados em numeros complexos
[Tref,T]=fc_geraT(Amp1,Fase1,Amp2,Fase2);

% Aplicando a Funcao Janela de Blackman Harris
PBH=fc_BHarrisW(pontos)'; % Fç janela para reduzir espúrios no dom dos retardos devido a ifft

% Realizando a IFFT dos dados medidos
[PPRref,CX,PPR,CY,CYoriginal]=fc_ifft(Tref,PBH,pontos,T);
PPRref_aux=PPRref; % P ser usada na função "fc_graf_aten_dist";PPRref_aux em volt

% Determinacao do limiar para a deteccao de multipercurso
[janela,in,limiardB,limiar]=fc_limiar_2(CY,ki);
limiares(kp,ki-3)=limiardB; % limiares em dBm; eh um vetor com o limiar p cada ponto medido
ins(kp,ki-3)=in; % ins e um vetor com a diferenca do máx no perfil para o limiar em cada ponto
% Deteccao dos picos maximos da resposta impulsiva
[lin,maximos,tamanho,CYauxiliar,m,teste]=fc_picos(CY);

% Plotagem da resposta impulsiva de referencia
```

```

% fc_graf_PPRref(retardo,PPRref,janela); title('\fontsize{8}Perfil de Potencia de Retardos Referencia');
% fc_graf_PPRref(retardo,PPR,janela); titulo=['\fontsize{8}Perfil de Potencia de Retardos',' ':','Ponto','pp','-
',rr];title(titulo);pause

% Preparando a Matriz a ser usada na Correlacao
[CXmatriz,CYmatriz,en1,en2,a]=fc_matriz_corr(PPRref,tamanho,m,CX,teste);

% Obtendo os Coeficientes de Correlacao
[teste3]=fc_coef_corr(CXmatriz,CYmatriz,en1,a);

% Aplicacao da Tecnica CLEAN
[amplitudeoriginal,atrasos]=fc_teq_clean(PPRref,teste3,pontos,CY,limiar,CX,CYoriginal,CYauxiliar,retardo);

% Captura dos Multipercursos Validos
[cleanpoints,cleanatrasos,retardos,magnitudes,retardo_direto,soma,amp_raio_direto]=fc_multivalidos(atrasos,jan
ela,amplitudeoriginal,limiar);
raio_direto_retardo(kp,ki-3)=retardo_direto;
raio_direto_magnitude(kp,ki-3)=10*log10(amp_raio_direto.^2);    % raio_direto_magni em dBm
dois_raios(kp,ki-3)=soma;                                       % dois_raios em dBm

% Numero de Multipercursos Validos em cada ponto do grid
[num]=fc_conta_percursos_validos(retardos);
numero(kp,ki-3)=num;      % Vetor com o numero de multi. válidos p cada ponto medido

% Calculo do retardo medio e do desvio padrao
[taumedio1,desvio1]=fc_tau_desvio(retardos,magnitudes);
taumedio(kp,ki-3)=taumedio1;
desvio(kp,ki-3)=desvio1;

% Calculo da Banda de Coerencia
[aa,bb]=fc_BandaCoerencia_2(T,pontos,deltaF,pp,rr);    % Função que faz o gráfico da BC
banda.coerencia07(kp,ki-3)=aa;
banda.coerencia09(kp,ki-3)=bb;

% Plotagem do perfil de potencia com seus multipercursos validos
fc_graficoPPRlimpo(CYoriginal,retardo,cleanpoints,cleanatrasos,in,pp,rr,arquivo,limiardB)
pause;

% Calculos para a Atenuacao com a Distancia
PLmodelo=fc_aten_dist(pontos,T);                                % PLmodelo em watt
PL(kp,ki-3)=10*log10(PLmodelo);                                % PL: eq 8.1[Fab]; em dBm; PL1

PL_Rappaport=fc_aten_dist_Rapp(magnitudes);                    % PL_Rappaport em volt;
PL_Rapp(kp,ki-3)=10*log10((PL_Rappaport).^2);                  % PL_Rapp em dBm; PL2

PL_dois_raios=dois_raios;                                       % PL_dois_raios em dBm

disp(sprintf('\n--> Proximo ponto medido'))

% Limpando as variaveis para que o processamento sequencial nao apresente problemas
clear B pontos deltaF RetardoMax deltaT retardo Tref T PPRref CX
clear janela in limiardB limiar lin maximos tamanho CYauxiliar m teste
clear CXmatriz CYmatriz en1 en2 a teste3 amplitudeoriginal atrasos cleanpoints cleanatrasos
clear taumedio1 desvio1 aa bb PPR CY CYoriginal
end                                                                % Fim do for que varre numero de pontos da rota medida
end                                                                % Fim do for que varre os pontos medidos, neste caso, um (1)
disp('!-->Fim<--')

% Apresentação dos Resultados

```

```

[retardomedio,retardorms,banda07grid,banda09grid,retardosdirtosgrid]=fc_med_mediana_desvio_2(numlocais,t
aumedio,desvio,banda,raio_direto_retardo);
pause

disp('Numero medio de multipercursos validos ao longo da rota:');for i=1:numlocais,
n(i)=sum(numero(i,:))/length(numero);end,round(n)
pause

[ampmedia_modelodBm,ampmedia_RappdBm,ampmedia_2raiosdBm,ampmedia_diretodBm,ampmedia_limiard
Bm]=fc_med_mediana_desvio_amp(numlocais,PL,PL_Rapp,PL_dois_raios,raio_direto_magnitude,limiares);
pause

[coef1,pas1]=fc_graf_aten_dist(PL,pontogrid,PPRref_aux); title('\fontsize{8}PL Modelo Indoor')
[coef2,pas2]=fc_graf_aten_dist(PL_Rapp,pontogrid,PPRref_aux); title('\fontsize{8}PL Modelo Outdoor')
[coef3,pas3]=fc_graf_aten_dist(raio_direto_magnitude,pontogrid,PPRref_aux); title('\fontsize{8}PL Raios
Diretos')
[coef4,pas4]=fc_graf_aten_dist(PL_dois_raios,pontogrid,PPRref_aux); title('\fontsize{8}PL Dois Raios')
pause

sprintf('\t%.2f \t%.2f \t%.2f \t%.2f',-coef1(1,1),-coef2(1,1),-coef3(1,1),-coef4(1,1)),pause

fc_graf_estatisticas_dist(taumedio,desvio,banda,numero,raio_direto_retardo,raio_direto_magnitude,limiares,PL,
PL_Rapp,PL_dois_raios,pontogrid,0.5); %passo=1 ou 0.5

```

B.4 Funções utilizadas no Programa do Item B1

```
function [amp,fase] = acq(obj)
```

```

clrdevice(obj) % Limpa o barramento
fprintf(obj,'abor;:init1:cont off;*wai') % Coloca no modo de espera
fprintf(obj,'init1;*wai') % Inicializa a varredura
fprintf(obj,'form:bord swap') % Troca a ordem dos bytes (compatibilidade com PC)
fprintf(obj,'form:data real,32') % Altera o formato de saída para blocos de floats
fprintf(obj,'trace:data? ch1fdata') % Poe dados de saída no barramento
amp=binblockread(obj,'float32'); % Pega os dados
clrdevice(obj)
fprintf(obj,'trace:data? ch2fdata')
fase=binblockread(obj,'float32');
clrdevice(obj)

```

```
function plotar(obj,amp,fase)
```

```

clrdevice(obj);
fprintf(obj,'sens1:swe:poin?;*wai');
n=str2num(fscanf(obj));
fprintf(obj,'sens1:freq:star?');
fi=str2num(fscanf(obj));
fprintf(obj,'sens1:freq:stop?');
ff=str2num(fscanf(obj));
freq=linspace(fi,ff,n);
subplot(2,1,1),plot(freq,amp) % Gráfico de Amplitude versus Frequência
subplot(2,1,2),plot(freq,fase) % Gráfico de Fase versus Frequência

```

```

function PDP(varre)

disp ('PERFIL DE RETARDOS DE POTENCIA');
% Leitura dos Arquivos de medidas
Amp=varre(1,:);
Fase=varre(2,:);
[varreduras, pontos]=size(Amp);

% Composição dos dados em números complexos
Amp=10.^(Amp/20);
T=Amp(1:varreduras,1:pontos).*cos(Fase(1:varreduras,1:pontos)*pi/180)+i*Amp(1:varreduras,1:pontos).*sin(F
ase(1:varreduras,1:pontos)*pi/180);

% Aplicando a Função Janela
PBH=BHarrisW(pontos).';

% Realizando a IFFT nos dados Medidos
aux=ifft(T.*PBH.', pontos);
PPR=10*log10((abs(aux).^2)*1000);

% Calculo auxiliar para controle no local de medição
B=750; % Banda de frequência varrida.
deltaF=B/(pontos-1); % Retardo Maximo [ns]
RetardoMax=10^3/deltaF; % Resolução Temporal [ns]
resolucao=10^3/B;
retardo=0:resolucao:RetardoMax;
disp('DISTANCIA TEORICA DO RAI0 DIRETO')
[posy,posx]=max(PPR);
dist = (retardo(posx)*3e8)*1e-9
figure
plot(retardo,PPR) % Perfil de Retardos de Potencia
grid on, zoom on

```

B.5 Funções utilizadas nos programas dos itens B3 e B4

```

function [B,pontos,deltaF,RetardoMax,deltaT,retardo]=fc_parametros_sonda

B=750; % Banda utilizada em MHz
pontos=1601; % Numero de pontos na sondagem em frequência
deltaF=B/(pontos-1); % Espaçamento entre as amostras de frequência em MHz
RetardoMax=10^3/deltaF; % Retardo Maximo em nano segundos
deltaT=10^3/B; % Resolução no domínio do tempo
retardo=0:deltaT:RetardoMax;

function [Tref,T]=fc_geraT(Amp1,Fase1,Amp2,Fase2)

% Função de transferência variante no tempo referencia (Reposta em Frequência referencia)
Ampr(1,:)=10.^(Amp1(1,:)/20);
Tref(1,:)=Ampr(1,:).*cos(Fase1(1,:)*pi/180)+i*Ampr(1,:).*sin(Fase1(1,:)*pi/180);

% Função de transferência variante no tempo referencia (Reposta em Frequencia de um local)
Amp(1,:)=10.^(Amp2(1,:)/20);
T(1,:)=Amp(1,:).*cos(Fase2(1,:)*pi/180)+i*Amp(1,:).*sin(Fase2(1,:)*pi/180);

```

% OBS: Ampr, Amp, Tref e T represntam uma relação de tensao
 % OBS: Amp foi aquisitada em dB (nao dBW ou dBm!) pelo VNA como sendo a relação $20\log_{10}(V_{rx}/V_{tx})$

function [Vetor]=**fc_BHarrisW** (Nptos)

% Esta Função implementa uma janela de no mínimo 3 termos de Blackman-Harris.
 % Nptos é um parâmetro de entrada, indica o tamanho da janela, e deve ser impar.
 % Vetor é a saída da Função
 % Os coeficientes são:

```
a0=0.42323; a1=0.49755; a2=0.07922;
for n=0:(Nptos-1)
  Vetor(n+1)=a0-a1*cos(2*pi*n/Nptos)+a2*cos(2*pi*2*n/Nptos);
End
```

function [PPRref,CX,PPR,CY,CYoriginal,PPRref_dop,PPR_dop]=**fc_ifft**(Tref,PBH,pontos,T)

```
aux2=ifft((Tref).*PBH,pontos); % Tref em volt
PPRref=abs(aux2); % PPRref em volt
CX=aux2.'; % Resposta impulsiva de referencia
```

```
aux=ifft((T).*PBH,pontos); % T em volt
PPR=abs(aux); % PPR em volt
CY=aux; % Resposta impulsiva suja de um determinado local
CY=abs(CY);
CYoriginal=CY;
```

% OBS: aux2,PPRref,CX,aux,PPR,CY,CYoriginal representam uma relação de
 % tensão (entre entrada e saída do canal)

function [janela,in,limiardB,limiar]=**fc_limiar**(CY,kp)

```
janela=1000; % Somente os retardos ate 1000 ns serao computados
q=0; % q=0 para in fixo; q=1 para in variando conforme os perfis
if q==0
  in=50; % in dB abaixo do maior pico do perfil de retardos de potencia
  limiardB=max(10*log10((abs(CY).^2))-in; % CY em volt; Limiar em dBW
  % limiardB=-80-30; % Caso se queira fazer limiardB fixo em -80dBm
  limiar=sqrt(10.^((limiardB)/10)); % Limiar em volt
end
```

% OBS: $10.^((limiardB)/10)$ --> em watt e $\sqrt{10.^((limiardB)/10)}$; --> em volt

```
if q==1
  if kp==1
    in=40;
    limiardB=max(10*log10((abs(CY).^2))-in;
    limiar=sqrt(10.^((limiardB)/10));
  end
  if kp==2
    in=50;
    limiardB=max(10*log10((abs(CY).^2))-in;
    limiar=sqrt(10.^((limiardB)/10));
  end
  if kp==3
    in=20;
```

```

    limiardB=max(10*log10((abs(CY).^2))-in;
    limiar=sqrt(10.^((limiardB)/10));
end
if kp==4
    in=50;
    limiardB=max(10*log10((abs(CY).^2))-in;
    limiar=sqrt(10.^((limiardB)/10));
end
if kp==5
    in=55;
    limiardB=max(10*log10((abs(CY).^2))-in;
    limiar=sqrt(10.^((limiardB)/10));
end
if kp==6
    in=35;
    limiardB=max(10*log10((abs(CY).^2))-in;
    limiar=sqrt(10.^((limiardB)/10));
end
if kp==7
    in=30;
    limiardB=max(10*log10((abs(CY).^2))-in;
    limiar=sqrt(10.^((limiardB)/10));
end
end
end

```

% OBS1: caso $q=1$ (linha 4), faz-se o limiar ser diferente para cada local medido (local=espaço aonde o grid foi colocado). O objetivo foi aproveitar melhor os perfis medidos, sem levar a uma subestimação no número de multipercursos capturadas.

% OBS2: Outra possibilidade a ser avaliada é fazer o limiar fixo em -80dBm (por exemplo) para todos os casos. Neste caso, faço $q=0$, comento a linha 7 e desabilito a linha 8. Este valor de -80 é escolhido por observação visual dos perfis gerados

```
function [lin,maximos,tamanho,CYauxiliar,m,teste]=fc_picos(CY,retardo)
```

```

teste=CY; % CY em volt
[col,lin]=size(CY);
for h=3:lin-3
    posterior=teste(h+1);
    anterior=teste(h-1);
    if ( teste(h) > anterior ) & ( teste(h) > posterior )
        maximos(h)=teste(h);
    end
end
m=find(maximos~=0); % Índices dos picos máximos da resposta impulsiva suja
[linha,tamanho]=size(m);

for t=1:tamanho
    CYauxiliar(t)=CY(m(t)); % Variável aux c/ as amplitudes máximas da resposta impulsiva suja
end % CYauxiliar em volt

```

% Apresentação do gráfico mostrando os picos que geram a matriz [A]

```
%fc_grafico_picos_matrizA(CY,retardo,m,tamanho)
```

```
function fc_grafico_picos_matrizA(CY,retardo,m,tamanho)
```

```
CYdB=10*log10(abs(CY).^2); % CY em volt; CYdB em dBm
```

```

figure
plot(retardo,CYdB),hold on                                % Apresentação do grafico da fig 10 [Fabrício]
plot(retardo(m),CYdB(m),'.r'),zoom on
axis([0 retardo(tamanho) min(CYdB) max(CYdB)+10])
xlabel('\fontsize{9}\tau [ns]');ylabel('\fontsize{9}P_h(\tau) [dBm]');
set(gcf,'color','w'),set(gca,'fontsize',8)
title('\fontsize{8}Picos no Perfil Medido')

gtext('\fontsize{8}20log_{10}|h(\tau_{pico_1})|')
gtext('\fontsize{8}20log_{10}|h(\tau_{pico_2})|')
gtext('\fontsize{8}20log_{10}|h(\tau_{pico_3})|')
gtext('\fontsize{8}20log_{10}|h(\tau_{pico_n})|')
zoom on
pause

function fc_graf_PPRref(retardo,PPRref)

figure
PPRrefdB=10*log10(PPRref.^2);                             % PPRref em volt; PPRrefdB em dBm
plot(retardo,PPRrefdB,'b'),zoom on
axis([0 110 min(PPRrefdB)+30 max(PPRrefdB)+10])
xlabel('\fontsize{9}\tau [ns]');ylabel('\fontsize{9}P_{h_{ref}}(\tau) [dBm]');
hold on

e=find(PPRref==max(PPRref));
plot(retardo(e-2:e+2),PPRrefdB(e-2:e+2),'.r')           % PPRrefdB(e-2:e+2) em dBm
hold on

plot(retardo(e-2),min(PPRrefdB)-5:0.01:PPRrefdB(e-2),'k')
plot(retardo(e+2),min(PPRrefdB)-5:0.01:PPRrefdB(e+2),'k')
plot(retardo(e-2):0.001:retardo(e+2),-60,'k')
set(gcf,'color','w'),set(gca,'fontsize',8)

gtext('\fontsize{8}20log_{10}|h_{ref}(\tau_{pico}- 2)|');
gtext('\fontsize{8}20log_{10}|h_{ref}(\tau_{pico}- 1)|');
gtext('\fontsize{8}20log_{10}|h_{ref}(\tau_{pico})|');
gtext('\fontsize{8}20log_{10}|h_{ref}(\tau_{pico}+ 1)|');
gtext('\fontsize{8}20log_{10}|h_{ref}(\tau_{pico}+ 2)|');

dif=retardo(e+2)-retardo(e-2);dife=num2str(dif,3);aux=['\fontsize{8}\Delta\tau = ',dife,' ns'];
gtext(aux)

auxt1=['\fontsize{8}',num2str(retardo(e-2),3)];
auxt2=['\fontsize{8}',num2str(retardo(e+2),3)];
gtext(auxt1)
``gtext(auxt2)
title('\fontsize{8}Perfil de Retardos de Potencia de Referencia')

pause
function [CXmatriz,CYmatriz,en1,en2,a]=fc_matriz_corr(PPRref,tamanho,m,CX,teste)

% Nº de amostras da resposta impulsiva utilizadas na correlação compondo uma janela de amostras
en1=5;

% Posição da amostra central na janela do perfil de ref, com duas amostras vizinhas, a dir e a esq
en2=find(PPRref==max(PPRref));

if en1==7

```

```

n=1;
for k=1:tamanho
    teste2(n)=teste(m(k)-3); n=n+1;
    teste2(n)=teste(m(k)-2); n=n+1;
    teste2(n)=teste(m(k)-1); n=n+1;
    teste2(n)=teste(m(k)); n=n+1;
    teste2(n)=teste(m(k)+1); n=n+1;
    teste2(n)=teste(m(k)+2);n=n+1;
    teste2(n)=teste(m(k)+3); n=n+1;
end
end
if en1==5
    n=1;
    for k=1:tamanho
        teste2(n)=teste(m(k)-2); n=n+1;
        teste2(n)=teste(m(k)-1); n=n+1;
        teste2(n)=teste(m(k));n=n+1;
        teste2(n)=teste(m(k)+1); n=n+1;
        teste2(n)=teste(m(k)+2);n=n+1;
    end
end
if en1==3
    n=1;
    for k=1:tamanho
        teste2(n)=teste(m(k)-1); n=n+1;
        teste2(n)=teste(m(k));n=n+1;
        teste2(n)=teste(m(k)+1);n=n+1;
    end
end

[Y,a]=size(teste2);
a=a/en1;
teste2=reshape(teste2,en1,a);
CYmatriz=teste2;

CX=abs(CX)';

switch en1
    case 3
        CXmatriz(1,:)=CX(1,en2(1)-1:en2(1)+1);
    case 5
        CXmatriz(1,:)=CX(1,en2(1)-2:en2(1)+2);
    case 7
        CXmatriz(1,:)=CX(1,en2(1)-3:en2(1)+3);
end
CXmatriz=CXmatriz'; % CXmatriz em volt

```

% OBS: Mantive os valores en1 e en2 fixos. en1=5 é um numero de amostras o suficiente para caracterizar os picos dos perfis medidos,de forma que a correlação entre os picos dos perfis medidos com o perfil de referencia seja satisfatória para caracterizar a amostra como sinal valido ou não. en1=7 representaram muitos pontos, fazendo com que o tamanho do vetor teste2 fique pequeno.Ha poucas amostras tais que exista uma amostra central maior e duas ou três outras amostras menores, imediatamente a direita e a esquerda desta amostra central.Já en1=3, são poucos pontos, podendo levar a uma baixa correlação com perfil de referência

```
function [teste3]=fc_coef_corr(CXmatriz,CYmatriz,en1,a)
```

```
M=[CXmatriz CYmatriz]; % Matriz com colunas utilizadas na correlação, em volt
```

```

% Matriz dos coeficientes de correlação
[n,p]=size(M);
X=M-ones(n,1)*mean(M);
Matrizcovariancia=X'*X/(n-1);
[r,p]=corrcoef(Matrizcovariancia);
matrizcorrelacao=r(1,:);

% Matriz covariância
% r -> matriz correlação
% Primeira linha da matriz correlação

switch en1
case 3
    teste3=matrizcorrelacao(1,en1-1:a+1); % Primeira linha da matriz correlação excluindo o elemento (1,1).
case 5
    teste3=matrizcorrelacao(1,en1-3:a+1); % Primeira linha da matriz correlação excluindo o elemento (1,1) e
(1,2).
case 7
    teste3=matrizcorrelacao(1,en1-5:a+1); % Primeira linha da matriz correlação excluindo o elemento (1,1),
(1,2) e (1,3).
end

```

% Este elemento (1,1) representa a correlação dos elementos da primeira coluna com eles mesmos, dando como resultado o valor de coef de correlação de 1. Lembrando que esta primeira coluna e formada por amostras do perfil padrão. O que interessa saber e a correlação entre as outras colunas(perfis q se quer limpar) com esta primeira coluna. Ja os elementos (1,2) e (1,3) fornecem justamente esse coeficiente de corr igual a 1.

function

```

[amplitudeoriginal,atrasos]=fc_teq_clean(PPRref,teste3,pontos,CY,limiar,CX,CYoriginal,CYauxiliar,retardo)

posicao=find(PPRref==max(PPRref)); % Encontrar a posição do maior pico da resposta impulsiva; PPRref
em volt
teste3auxiliar=teste3;
e=find(teste3>=0);
for kk=1:length(e) % k=1, acha o maior coef corr; k=2, acha o segundo maior; ...
    posicaooy=find(teste3==max(teste3)); % teste3 é a matriz de correlação
    if teste3auxiliar(posicaooy)>0.8 % Captura somente picos com correlação maior que 0.8
        teste3(posicaooy(1))=0; % Para se poder achar o imediatamente menor q o anterior, o qual havia
        sido considerado o maior
        posicaooy1=find(CYoriginal==CYauxiliar(posicaooy(1)));
        [va,lei]=size(posicaooy1);
        posicao(kk)=posicaooy1(1);
        fator=CX(posicaooy1(1))/CX(posicaooy(1)) % Fator de escala
        amplitudeoriginal(kk)=abs(CYoriginal(posicaooy1(1))); % CYoriginal e amplitudeoriginal em volt
        atrasos(kk)=retardo(posicaooy1(1));
        d=abs(posicaooy1(1)-posicaooy(1));

        z(1,1:pontos)=0;
        z(1,1+d:pontos)=CX(1:pontos-d)';

        cleanmap = CY - z*fator;

        CY=cleanmap;

%Gerenciando a saída do programa
if sum(teste3)==0
    disp('Saiu pq todos os coef corr foram zerados')
    break
end
if (max(abs(CY))<limiar)
    disp('Saiu pq era menor q o limiar')
    break
end
end

```

```

end
clear posicaooy
end
% disp('saiu pq a correlacao era menor do que 0.8')

```

% OBS: a variável “e” foi inserida em caráter corretivo a referência [Fabricio] pois teste3 (vetor com as correlações) apresenta valores negativos. Como o algoritmo zera valores de teste3, a variável posicaooy sempre estava sempre acusando como máximo estes valores de zero em comparação com os valores negativos.

function

```

[cleanpoints,cleanatrasos,retardos,magnitudes,retardo_direto,soma,amp_raio_direto]=fc_multivalidos(atrasos,janela,amplitudeoriginal,limiar)

```

```

e=find(atrasos<=janela); % Somente os retardos ate 1000 ns serão computados
[c,t]=size(e);
for u=1:t
    if amplitudeoriginal(e(u))>limiar % amplitudeoriginal e limiar em volt
        cleanpoints(u)=amplitudeoriginal(e(u)); % Amplitude dos multipercursos validos; cleanpoints em volt
        cleanatrasos(u)=atrasos(e(u)); % Retardos dos multipercursos validos
    end
end
%=====
% Ha perfis muito ruidosos entre retardo=0 e retardo=retardo do raio direto
% As linhas abaixo retiram esses ruidos, permitindo aproveitar mais o perfil
entra=0; % Fazendo entra~=1, vai-se direto para a variável w
if entra==1
    p=find(cleanatrasos~=0);tau=cleanatrasos(p);amps=cleanpoints(p); % cleanpoints em volt
    aux1=sort(tau);flag=0;aux5_clean=0;aux6_atrasos=0;
    for ki=1:length(aux1),ordem(ki)=find(aux1(ki)==tau);end
    aux2=amps(ordem);a=find(aux2==max(aux2));aux4_tau_direto=aux1(a);
    for y=1:a % Qdo ha ruidos no inicio do perfil sendo considerados ptos validos
        if (aux1(y)<aux4_tau_direto)
            clear aux5_clean aux6_atrasos
            aux5_clean(1,:)=aux2(1,y+1:end); % Excluindo os ruídos considerados validos
            aux6_atrasos(1,:)=aux1(1,y+1:end); % Excluído os retardos dos ruídos considerados validos
            flag=1;
        end
    end
    if flag==1
        clear cleanpoints cleanatrasos
        cleanpoints=aux5_clean;
        cleanatrasos=aux6_atrasos;
    end
end
%=====

w=find(cleanatrasos~=0);
retardos=sort(cleanatrasos(w));

q=find(cleanpoints~=0);
magnitudes=sort(cleanpoints(q)); % magnitudes em volt

we=find(max(magnitudes)==cleanpoints);
amp_raio_direto=cleanpoints(we);
retardo_direto=cleanatrasos(we); % O primeiro retardo eh o raio direto

if length(magnitudes)~=1

```

```

    soma=sum(magnitudes(1:2))/2; % soma em volt
    soma=10*log10((soma).^2); % soma em dBW
else
    soma=10*log10(magnitudes(1)); % soma em dBW
end
% OBS: soma representa a media do raio direto com o primeiro multipercurso (qdo houver)

```

```
function [num]=fc_conta_percursos_validos(retardos)
```

```
num=length(retardos)-1; % -1 pois o raio direto não é multipercurso
```

```
function [taumedio1,desvio1]=fc_tau_desvio(retardos,magnitudes)
```

```

ta=length(retardos)-1; % -1 pois o raio direto não é multipercurso
tau=retardos(2:end); % começa-se de 2 pois o raio direto não é multipercurso
amp=magnitudes(2:end); % Magnitudes em volt
soma1=0;soma2=0;
for q=1:ta
    soma1=soma1 + tau(q).*amp(q);
    soma2= soma2 + amp(q);
end
taumedio1=soma1./soma2; % Retardo médio

soma3=0;
for w=1:ta
    soma3 = soma3 + ((tau(w)-taumedio1).^2).*amp(w);
end
desvio1=sqrt(soma3./soma2); % Desvio padrão

```

```
function [valor_bc7,valor_bc9]=fc_BandaCoerencia_2(T,pontos,deltaF,cont1,cont2)
```

```

clear banda;clear omega;clear pp; clear omega;clear maxbanda;clear bandaC;
clear banda;
soma4=0;
y=1;
Tconj=conj(T); % T em volt
for p=0:pontos-1
    for i=1:pontos-p
        soma4 = soma4 + T(i).*Tconj(i+p);
    end
    banda(y)=abs(soma4);
    y=y+1;
    soma4=0;
end

passo=0:1601-1;
omega=passo.*deltaF;

maxbanda=max(banda);
bandaC=banda/maxbanda;

% Calculando a Banda de Coerencia
i=1;
while bandaC(i) > 0.7
    i=i+1;
end
aux7=bandaC(i);

```

```

if i==1
    valor7=bandaC(i);
else
    if (bandaC(i-1) - 0.7) < (0.7 - bandaC(i))           % Pegando o valor mais próximo de 0.7
        valor7=bandaC(i-1);
    else
        valor7=bandaC(i);
    end
end
end

```

```

e=find(bandaC==valor7);
valor_bc7=omega(e);

```

% Processamento para BC09

```

u=1;
while bandaC(u) > 0.9
    u=u+1;
end
aux9=bandaC(u);

```

```

if u==1
    valor9=bandaC(u);
else
    if (bandaC(u-1) - 0.9) < (0.9 - bandaC(u))           % Pegando o valor mais próximo de 0.9
        valor9=bandaC(u-1);
    else
        valor9=bandaC(u);
    end
end
ee=find(bandaC==valor9);
valor_bc9=omega(ee);

```

% Plotando o Grafico da Banda de Coerência x Delta (frequência)

```

% fc_grafico_BC(omega,bandaC,cont1,cont2,e,ee);

```

```

function fc_grafico_BC(omega,bandaC,cont1,cont2,e,ee)

```

```

figure
BC7=0.7; BC9=0.9;
plot(omega,bandaC,omega(1:e),BC7,'r',omega(1:ee),BC9,'r'),zoom on,hold on

```

```

set(gca,'XGrid','on')
xlabel('\fontsize{8}Separação em Frequencia \Omega = p.\Deltaf [MHz]')
ylabel('\fontsize{8}R_{T}(\Omega)')
titulo=['\fontsize{8}Banda de Coerencia',' : ','Ponto',cont1,'-',cont2];title(titulo)
set(gcf,'color','w'),set(gca,'fontsize',8),pause

```

```

function fc_graficoPPRlimpo(CYoriginal,retardo,cleanpoints,cleanatrasos,in,pp,rr,arquivo,limiardB)

```

```

warning off           % Tirando os avisos de log de zero da tela
figure
b=10*log10((abs(CYoriginal)).^2);   % CYoriginal em volt; b em dBm;Eh o perfil de retardos original com
todas as amostras
L=10*log10((abs(cleanpoints)).^2);   % Ptos do perfil capturados, ie, validos, em dBm
plot(retardo(1:1000),b(1:1000),'b'),zoom on,hold on
plot(cleanatrasos,L,'r'),zoom on,hold on

```

```
plot(retardo(1:1000),limiardB,'k'),zoom on % limiardB em dBW
%plot(retardo(1:1000),f,'k'),zoom on % Caso seja escolhido um valor fixo p in em na função fc_limiar
```

```
xlabel('\fontsize{9}\tau [ns]');ylabel('\fontsize{9}P_h(\tau) [dBm]');
titulo=['\fontsize{8}Perfil de Potencia de Retardos',' : ','Ponto',pp,'-',rr];title(titulo)
legend('\fontsize{7}Perfil medido','\fontsize{7}Pontos validos','\fontsize{7}Limiar')
set(gcf,'color','w'),set(gca,'fontsize',8)
```

```
function [PLmodelo]=fc_aten_dist(pontos,T)
```

```
PLmodelo=sum(abs(T).^2)/pontos; % Expressão 8.1, p59,[ Fabrício], PL1 em Watt,T em volt
```

```
function Pot_media=fc_aten_dist_Rapp(magnitudes)
```

```
ta=length(magnitudes); % O raio direto entra no calculo
amp=magnitudes(1:end); % magnitudes em volt
num=sum(amp);
Pot_media=num/ta; % Potencia Media em função do raio direto e dos multipercurso; em volt
```

```
function
```

```
[retardomedio,retardorms,banda07grid,banda09grid,retardosdiretosgrid]=fc_med_mediana_desvio(numlocais,tau
medio,desvio,banda,raio_direto_retardo)
```

```
%OBS: Usar o Excel para abrir os arquivos e gerar as tabelas
```

```
[retardomedio] = fc_mediagrid(numlocais,taumedio);
[retardorms] = fc_mediagrid (numlocais,desvio);
[banda07grid] = fc_mediagrid (numlocais,banda.coerencia07);
[banda09grid] = fc_mediagrid (numlocais,banda.coerencia09);
[retardosdiretosgrid] = fc_mediagrid (numlocais,raio_direto_retardo);
```

```
clc
```

```
for i=1:numlocais
```

```
 a=int2str(i);b=['-->Local ',a,'- MEDIA DO GRID - media/mediana/desvio/razao'];disp(b)
 disp('Retardo medio[ns] Delay spread[ns] Retardos diretos[ns] BC 0.7[MHz] BC 0.9[MHz]')
 sprintf('\t%.2f \t%.2f \t%.2f \t%.2f \t%.2f', retardomedio(i,1:3),retardorms(i,:), retardosdiretosgrid(i,1:3)',
 banda07grid(i,1:3)', banda09grid(i,1:3)')
 pause
 end
```

```
% Obtendo a media do grid
```

```
% Função que obtém o retardo médio, o desvio padrão, a banda de coerência
```

```
% 07 e 09 de um local medido
```

```
function [estatistica]= fc_mediagrid (numlocais,vetor)
```

```
for e=1:numlocais
```

```
 i=1;
 estatistica(e,i) = mean(vetor(e,:));% nanmean !!!
 i=i+1;
 estatistica(e,i) = median(vetor(e,:));
 i=i+1;
 estatistica(e,i) = std(vetor(e,:));
 i=i+1;
 estatistica(e,i) = estatistica(e,i-1)/estatistica(e,i-3);
```

end

function

[ampmedia_indoordBm,ampmedia_RappdBm,ampmedia_direto dBm,ampmedia_limiar dBm]=fc_med_mediana_desvio_amp(numlocais,PLa,PL_Rappa,raio_direto_amp,limiardBm)

PL_miliwatt=10.^(PLa/10); % PLa em dBm;PL_miliwatt esta em miliwatt
ampmedia_indoor = fc_mediagrid(numlocais,PL_miliwatt); % ampmedia_indoor em miliwatt
ampmedia_indoordBm = 10*log10(ampmedia_indoor); % ampmedia_indoor em dBm

PL_miliwatt_Rapp=10.^(PL_Rappa/10); % PL_Rappa em dBm
ampmedia_Rapp = fc_mediagrid(numlocais,PL_miliwatt_Rapp); % ampmedia_Rapp em miliwatt
ampmedia_RappdBm = 10*log10(ampmedia_Rapp); % ampmedia_Rapp em dBm

amp_direto_miliwatt=10.^(raio_direto_amp/10); % raio_direto_amp em dBm
ampmedia_direto = fc_mediagrid(numlocais,amp_direto_miliwatt); % ampmedia_direto em mW
ampmedia_direto dBm = 10*log10(ampmedia_direto); % ampmedia_direto dBm em dBm

limiar_miliwatt=10.^(limiardBm/10); % limiardBm em dBm
ampmedia_limiar = fc_mediagrid(numlocais,limiar_miliwatt); % ampmedia_limiar em miliwatt
ampmedia_limiar dBm = 10*log10(ampmedia_limiar); % ampmedia_limiar dBm em dBm

% PL_2raios_miliwatt=10.^(PL_dois_raios/10); % PL_dois_raios em dBm;PL_2raios_miliwatt esta em mW
% ampmedia_2raios = fc_mediagrid(numlocais,PL_2raios_miliwatt); % ampmedia_2raios em mW
% ampmedia_2raios dBm = 10*log10(ampmedia_2raios); % ampmedia_2raios dBm em dBm

for i=1:numlocais

a=int2str(i);b=['->Local ',a,'- MEDIA DO GRID - media/mediana/desvio/razao'];disp(b)
disp('Amp Indoor[dBm] - Amp Rapp[dBm] - Amp Rai Direto[dBm] - Limiar [dBm]')
sprintf('%t%.2f \t%.2f \t%.2f \t%.2f, -ampmedia_indoordBm(i,1:3),-ampmedia_RappdBm(i,1:3),-ampmedia_direto dBm(i,1:3),-ampmedia_limiar dBm(i,1:3))
pause
end

% OBS: na função sprintf, os vetores foram multiplicados por -1 para facilitar na hora de recortar e colar em uma tabela no Word.

function [rr,tt]=fc_banda_retardoRMS_2(desvio,banda)

% Esta função permite plotar o Limiar de Fleury, o ajuste de Gans e os pontos medidos num gráfico retardo RMS x banda de coerência

[lin,col]=size(desvio);

a=0;
for i=1:lin
for k=1:col-1
if (desvio(i,k)-desvio(i,k+1))==0 && a==0)
desvio(i,k)=desvio(i,k)+0.1;
a=1;
end
end
end

for i=1:lin

%----- Processamento para o Limiar de Fleury -----
BCf7(i,:)=(acos(0.7)./(2*pi*desvio(i,:)))*1e3; % BCf em MHz
BCf9(i,:)=(acos(0.9)./(2*pi*desvio(i,:)))*1e3; % BCf em MHz

```

desvio_ordenado(i,:)=sort(desvio(i,:)); % Colocando em ordem crescente

p=1;
for k=1:col
    aux=find(desvio_ordenado(i,k)==desvio(i,:));
    aux2(i,1:2)=find(desvio_ordenado(i,k)==desvio(i,:)); % Tem local q o valor do desvio esta sendo o
    mesmo em 2 ptos diferentes!
    if length(aux)==1
        ordem(i,k)=aux;
    else
        ordem(i,k)=aux2(p);
        desvio_ordenado(i,k)=desvio_ordenado(i,k)+0.35;
        p=p+1;
    end
end
for g=1:col
    BCf7_ordenado7(i,g)=BCf7(i,ordem(i,g)); % Refazendo a indexação em ordem crescente
    BCf9_ordenado9(i,g)=BCf9(i,ordem(i,g)); % Refazendo a indexacao em ordem crescente
end

%Processamento para o Modelo de Gans - Ajuste de Curvas
curva7=fit(desvio(i,:),banda.coerencia07(i,:),'ajuste07./x','startpoint',desvio_ordenado(i,1)),
alfa7(i)=1/curva7.ajuste07;

curva9=fit(desvio(i,:),banda.coerencia09(i,:),'ajuste09./x','startpoint',desvio_ordenado(i,1))
alfa9(i)=1/curva9.ajuste09;

BCg7(i,:)=1./(alfa7(i).*desvio(i,:));
BCg9(i,:)=1./(alfa9(i).*desvio(i,:));

for gg=1:col
    BCg7_ordenado7(i,gg)=BCg7(i,ordem(i,gg)); % Refazendo a indexação em ordem crescente
    BCg9_ordenado9(i,gg)=BCg9(i,ordem(i,gg)); % Refazendo a indexação em ordem crescente
end

end % Fim do for que varre os locais

% Gerando os Gráficos

for j=1:lin
    figure
    plot(desvio(j,:),banda.coerencia07(j,:),'r'),hold on
    plot(desvio_ordenado(j,:),BCf7_ordenado7(j,:),'b'),hold on
    plot(desvio_ordenado(j,:),BCg7_ordenado7(j,:),'k'),zoom on
    xlabel('\fontsize{8}Retardo RMS [ns]');ylabel('\fontsize{8}Banda de Coerencia 0.7 [MHz]')
    legend('\fontsize{7}Dados Medidos','Limiar de Fleury','Modelo',0),%legend boxoff
    titulo=['\fontsize{9}BC_{0.7} x \tau_{RMS}'] - Local ',int2str(j)];title(titulo)
    set(gcf,'color','w');set(gca,'fontsize',8)

    disp(sprintf('O valor de ALFA para o Modelo de Gans [0.7] vale: %.2f,1e3*alfa7(j)))

    aux1=['\fontsize{8}\alpha=',num2str(1e3*alfa7(j),3)];

    pause

    figure
    plot(desvio(j,:),banda.coerencia09(j,:),'r'),hold on
    plot(desvio_ordenado(j,:),BCf9_ordenado9(j,:),'b'),hold on
    plot(desvio_ordenado(j,:),BCg9_ordenado9(j,:),'k'),zoom on
    xlabel('\fontsize{8}Retardo RMS [ns]');ylabel('\fontsize{8}Banda de Coerencia 0.9 [MHz]')

```

```

legend('\fontsize{7}Dados Medidos','Limiar de Fleury','Modelo',0),%legend boxoff
titulo=['\fontsize{9}BC_{0.9} x \tau_{RMS}'],' - Local ',int2str(j)];title(titulo)
set(gcf,'color','w');set(gca,'fontsize',8)

disp(sprintf('O valor de ALFA para o Modelo de Gans [0.9] vale: %.2f,1e3*alfa9(j)))

aux2=['\fontsize{8}\alpha=',num2str(1e3*alfa9(j),3)];

end
clear ordem desvio_ordenado

rr=1e3*alfa7; tt=1e3*alfa9;
disp('Alpha para BC de 0.7:');sprintf('\n%.2f',rr)
disp('Alpha para BC de 0.9:');sprintf('\n%.2f',tt)

function [janela,in,limiardB,limiar]=fc_limiar_2(CY,ki)

janela=1000; % Somente os retardos ate 1000 ns serão computados
q=1; % q=1 trata os casos 1,2 e 3.q=0 é para limiar fixo ou SNRpico fixa em "in"
if q==0
    in=40; % in dB abaixo do maior pico do perfil de retardos de potencia
    %limiardB=max(10*log10((abs(CY)).^2))-in; % CY em volt; Limiar em dBW
    limiardB=-95; % Para o caso de se querer manter o limiar fixo em -80dBm
    limiar=sqrt(10.^((limiardB)/10)); % Limiar em volt
end

% OBS: 10.^((limiardB)/10) --> em watt e sqrt(10.^((limiardB)/10)); --> em volt

if q==1
switch ki
case {4,5,6}
    limiardB=-70;
    limiar=sqrt(10.^((limiardB)/10));
    in=max(10*log10((abs(CY)).^2))-limiardB;
case {7,8,9,10}
    limiardB=-80;
    limiar=sqrt(10.^((limiardB)/10));
    in=max(10*log10((abs(CY)).^2))-limiardB;
case {11,12,13,14,15,16,17,18,19}
    limiardB=-85;
    limiar=sqrt(10.^((limiardB)/10));
    in=max(10*log10((abs(CY)).^2))-limiardB;
case {20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41}
    limiardB=-95;
    limiar=sqrt(10.^((limiardB)/10));
    in=max(10*log10((abs(CY)).^2))-limiardB;
case {42,43,44,45,46,47,48,48,49,50,51,52}
    limiardB=-100;
    limiar=sqrt(10.^((limiardB)/10));
    in=max(10*log10((abs(CY)).^2))-limiardB;
end
end

function fc_graf_PPRref(retardo,PPRref,janela)

figure
plot(retardo(1:janela),10*log10(PPRref(1:janela).^2),'b'),hold on % PPrref em volt
plot(retardo(1:janela),10*log10(PPRref(1:janela).^2),'r'),grid on,zoom on

```

```
xlabel('\fontsize{8}\tau [ns]');ylabel('\fontsize{8}P_h(\tau)[dBm]');
set(gcf,'color','w'),set(gca,'fontsize',8)
```

function

```
[retardomedio,retardorms,banda07grid,banda09grid,retardosdiretosgrid]=fc_med_mediana_desvio_2(numlocais,
taumedio,desvio,banda,raio_direto_retardo)
```

%OBS: Usar o Excel para abrir os arquivos e gerar as tabelas

```
[retardomedio] = fc_mediagrid_2 (numlocais,taumedio);
[retardorms] = fc_mediagrid_2 (numlocais,desvio);
[banda07grid] = fc_mediagrid_2 (numlocais,banda.coerencia07);
[banda09grid] = fc_mediagrid_2 (numlocais,banda.coerencia09);
[retardosdiretosgrid] = fc_mediagrid_2 (numlocais,raio_direto_retardo);
```

```
clc
```

```
for i=1:numlocais
    a=int2str(i);b=['-->Local ',a,'- MEDIA DO GRID - media/mediana/desvio/razao'];disp(b)
    disp('Retardo medio[ns] Delay spread[ns] BC 0.7[MHz] BC 0.9[MHz] Retardos diretos[ns] ')
    sprintf('\t%.2f\t%.2f\t%.2f\t%.2f\t%.2f', retardomedio(i,1:3),retardorms(i,:),
retardosdiretosgrid(i,1:3),banda07grid(i,1:3), banda09grid(i,1:3))
    pause
end
```

```
function [coef,passo]=fc_graf_aten_dist(PLx,pontogrid,PPRref_aux)
```

```
passo=input('De quantos em quantos metros as medidas foram tomadas? (1m ou 0.5m): ');
% Para o arquivo "campo geociências" as medidas foram tomadas de 0.5 em 0.5 metro
% Para o arquivo "campo grama Gragoatá" as medidas foram tomadas de 1 em 1 metro
```

```
PL0=10*log10((max(PPRref_aux)).^2); % Valor de referencia, em dBm, a 1 metro de TX
```

```
if passo==1
    distancia=1:passo:1*(pontogrid-3); % -3 pois comecei a medir do ponto1_4
else
    distancia=1:passo:1*(((pontogrid-3)+1)/2); % -3 pois comecei a medir do ponto1_4
end
```

```
amp=PLx; % PL já esta em dBm
X=10*log10(distancia/1);
```

```
coef=polyfit(X,amp,1); % Ajustando por uma curvo do tipo: y=aX+b --> y=coef*X+PL0
curva=polyval(coef,X);
```

```
disp(sprintf('\n--> O coeficiente de atenuacao com a distancia vale: %.3g',coef(1,1)))
disp(sprintf('--> PL0 do modelo vale: %.3g',PL0))
```

```
figure
```

```
semilogx(distancia,amp,'+r'),grid on, zoom on,hold on
semilogx(distancia,curva,'b'),hold on,grid on,zoom on
xlabel('\fontsize{8}Distancia [m]'),ylabel('\fontsize{8}Potencia [dBm]');
legend('\fontsize{8}Dados Medidos','Ajuste')
%title('\fontsize{8}Atenuação do sinal com a distancia')
set(gcf,'color','w'),set(gca,'fontsize',7),set(gca,'xtick',linspace(1,distancia(1,end),5))
gamma=['\fontsize{8}\gamma = ' num2str(coef(1,1),3)];gtext(gamma)
PL0modelo=['\fontsize{7}' num2str(PL0,3)];
```

```

function fc_graf_estatisticas_dist(taumedio,desvio,banda,numero,...
    raio_direto_retardo,raio_direto_magnitude,limiares,PL,PL_Rapp,PL_dois_raios,pontogrid,passo)

% Para o arquivo "campo geociencias" as medidas foram tomadas de 0.5 em 0.5 metro
% Para o arquivo "campo grama Gragoatá" as medidas foram tomadas de 1 em 1 metro

if passo==1
    distancia=1:passo:1*(pontogrid-3);           % -3 pois comecei a medir do ponto1_4
else
    distancia=1:passo:1*(((pontogrid-3)+1)/2);   % -3 pois comecei a medir do ponto1_4
end

figure
plot(distancia,taumedio,'.r');xlabel('\fontsize{8}Distancia [m]'),ylabel('\fontsize{8}Retardo Medio [ns]'),
grid on,zoom on; set(gcf,'color','w'),set(gca,'fontsize',7)

pause,figure
plot(distancia,desvio,'.r');xlabel('\fontsize{8}Distancia [m]'),ylabel('\fontsize{8}Retardo RMS [ns]'),
grid on,zoom on; set(gcf,'color','w'),set(gca,'fontsize',7)

pause,figure
plot(distancia,banda.coerencia07,'.r');xlabel('\fontsize{8}Distancia [m]'),ylabel('\fontsize{8}Banda de Coerencia
0.7 [MHz]'),
grid on,zoom on; set(gcf,'color','w'),set(gca,'fontsize',7)

pause,figure
plot(distancia,banda.coerencia09,'.r');xlabel('\fontsize{8}Distancia [m]'),ylabel('\fontsize{8}Banda de Coerencia
0.9 [MHz]'),grid on,zoom on
set(gcf,'color','w'),set(gca,'fontsize',7)

pause,figure
plot(distancia,numero,'.r');xlabel('\fontsize{8}Distancia [m]'),ylabel('\fontsize{8}Numero de
Multipercursos'),grid on,zoom on
set(gcf,'color','w'),set(gca,'fontsize',7)

pause,figure
plot(distancia,raio_direto_magnitude,'.r');xlabel('\fontsize{8}Distancia [m]'),ylabel('\fontsize{8}Amplitude do
Raio Direto [dBm]'),
grid on,zoom on, set(gcf,'color','w'),set(gca,'fontsize',7)

pause,figure
plot(distancia,limiares,'.r');xlabel('\fontsize{8}Distancia [m]'),ylabel('\fontsize{8}Limiar [dBm]'),
grid on,zoom on, set(gcf,'color','w'),set(gca,'fontsize',7)

```

APÊNDICE C GRÁFICOS E TABELAS

Para que não ficasse muito árdua a leitura do Capítulo 6, sobrecarregada com gráficos e tabelas, e para que se pudesse deixar registrado em maiores detalhes os resultados dos processamentos realizados nesta dissertação, este apêndice reúne tabelas e gráficos para todos os locais medidos.

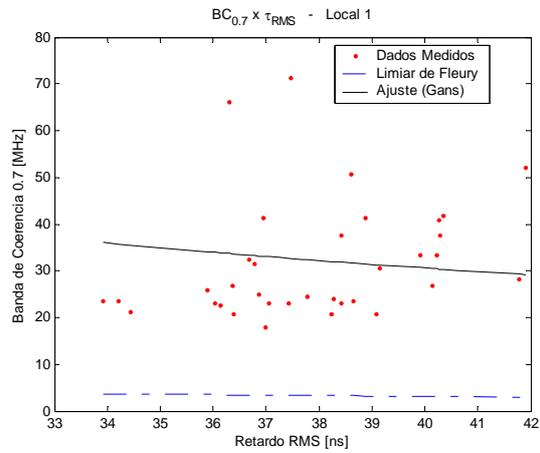
C.1 Resultados para o Ambiente A1: Segundo Andar do Bloco D *indoor-outdoor*

Ambiente	Situação	Retardo Médio [ns]			Espalhamento de Retardos [ns]			
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio	Razão
Local 1	LOS	40,28	40,20	4,87	37,97	38,02	2,01	0,05
Local 2	LOS	49,89	49,78	4,50	35,23	35,00	2,63	0,07
Local 3	LOS	46,77	46,66	1,96	36,45	36,95	2,31	0,06
Local 4	NLOS	50,93	50,84	5,44	33,85	33,36	3,85	0,11
Local 5	LOS	89,50	88,21	5,04	40,76	40,96	2,51	0,06
Local 6	LOS	103,57	104,17	3,63	31,77	31,33	2,28	0,07
Local 7	NLOS	42,95	43,27	3,73	33,80	33,13	2,77	0,08

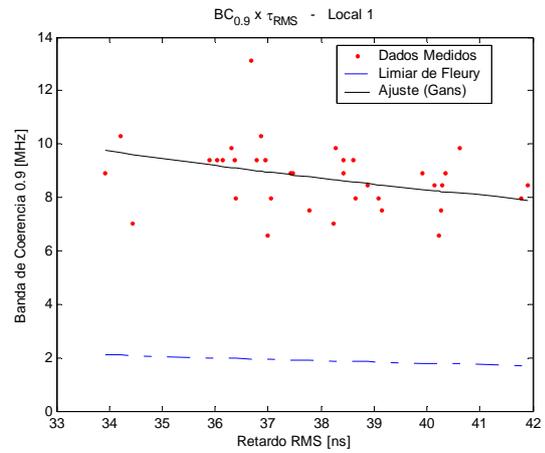
Ambiente	Situação	Banda Coer. 0,7 [MHz]			Banda Coer. 0,9 [MHz]		
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
Local 1	LOS	32,66	26,72	13,98	8,75	8,91	1,25
Local 2	LOS	35,47	37,50	9,88	4,30	2,81	2,51
Local 3	LOS	28,44	27,19	5,04	7,43	7,50	1,02
Local 4	NLOS	18,98	18,28	4,80	6,68	6,33	1,83
Local 5	LOS	18,68	17,81	4,75	8,15	8,44	1,40
Local 6	LOS	51,43	47,81	9,46	6,20	6,09	0,82
Local 7	NLOS	28,05	22,50	17,66	7,59	7,50	1,37

Ambiente	Situação	NMP	X [dB]	Limiar [dBm]	α para BC 0,7	α para BC 0,9
Local 1	LOS	27	50	-77,20	0,82	3,02
Local 2	LOS	19	40	-72,39	0,81	6,55
Local 3	LOS	20	40	-71,41	0,98	3,73
Local 4	NLOS	21	35	-72,86	1,57	4,43
Local 5	LOS	28	45	-86,78	1,33	3,04
Local 6	LOS	18	35	-83,17	0,62	5,13
Local 7	NLOS	33	55	-89,21	1,06	3,92

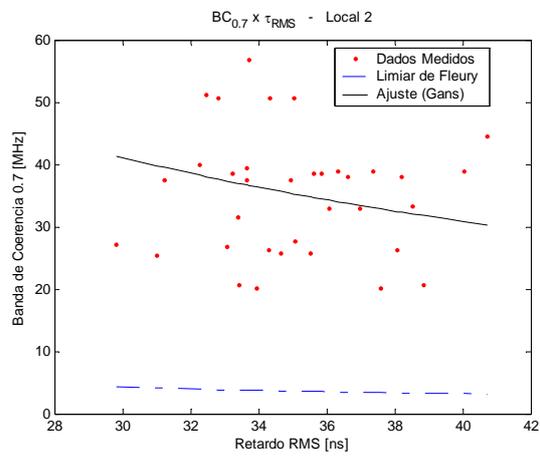
Tabela C.1 - Resultados obtidos nos Ambientes A1.

Gráficos de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos:

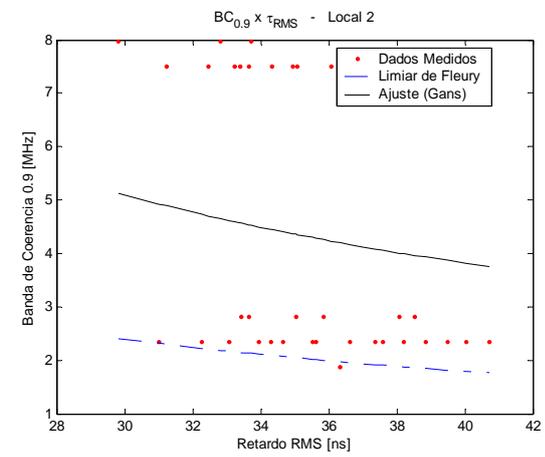
(a)



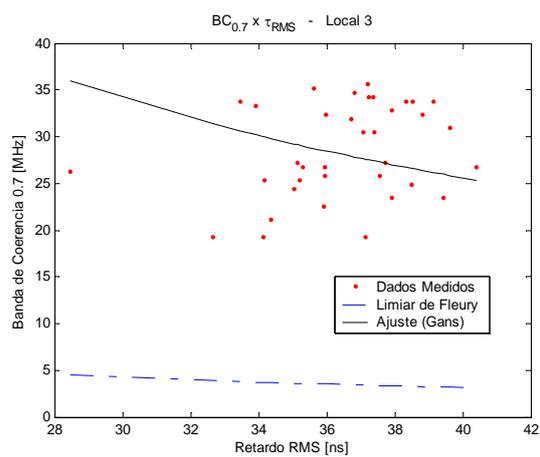
(b)



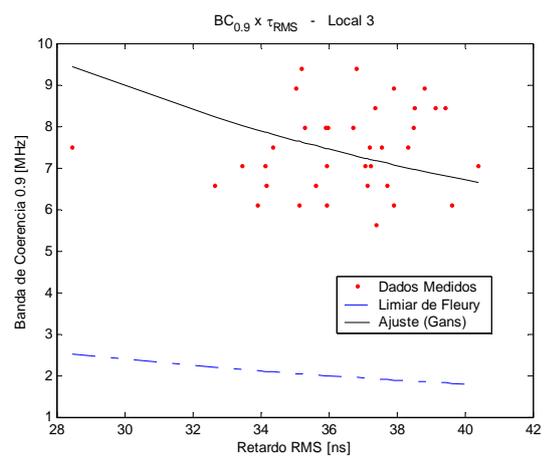
(e)



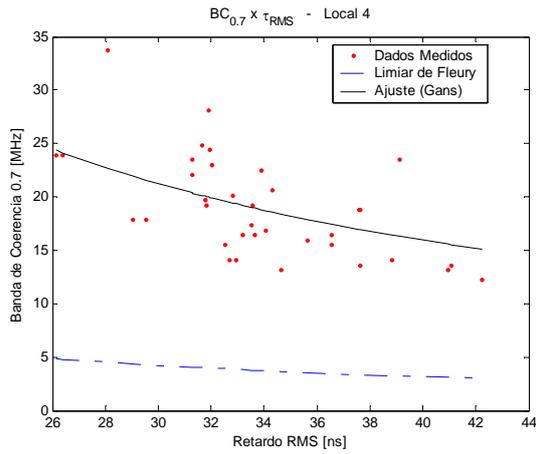
(f)



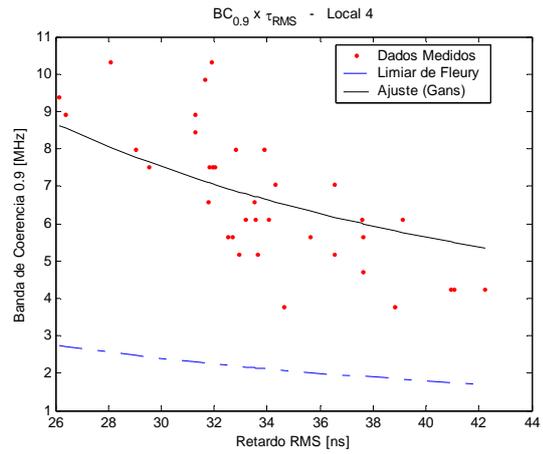
(g)



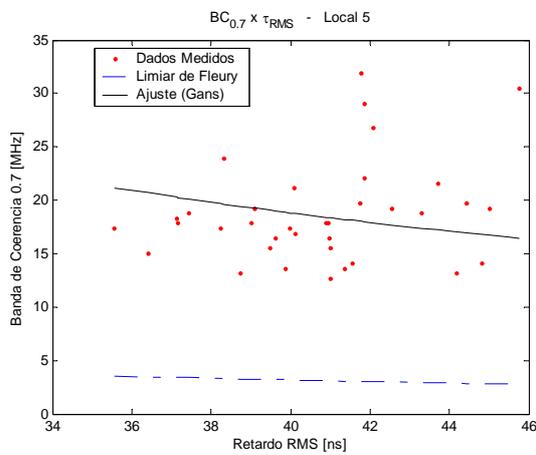
(h)



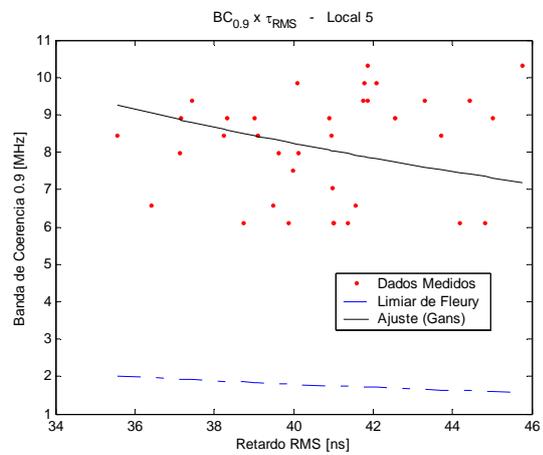
(i)



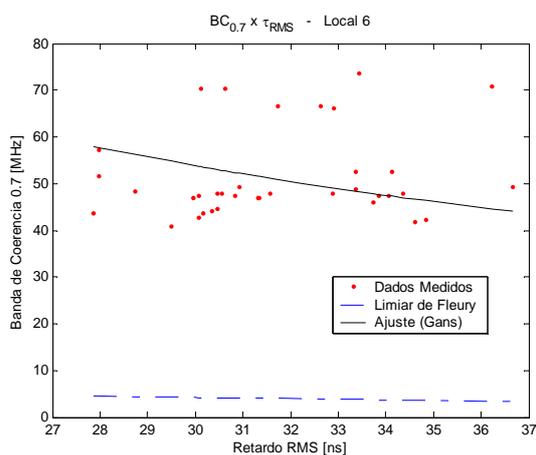
(j)



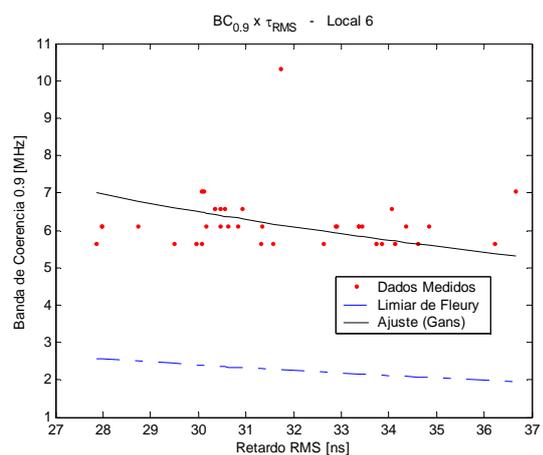
(l)



(m)



(n)



(o)

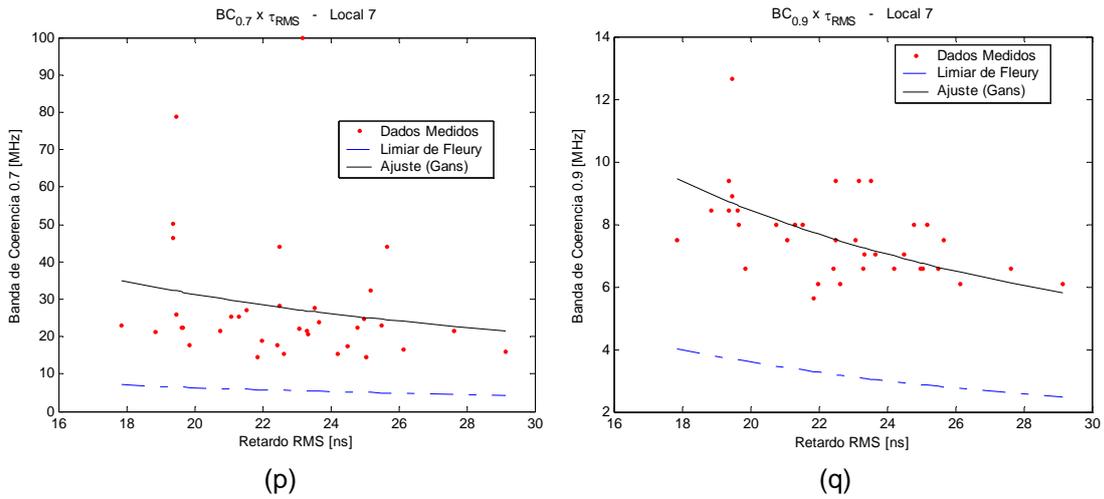
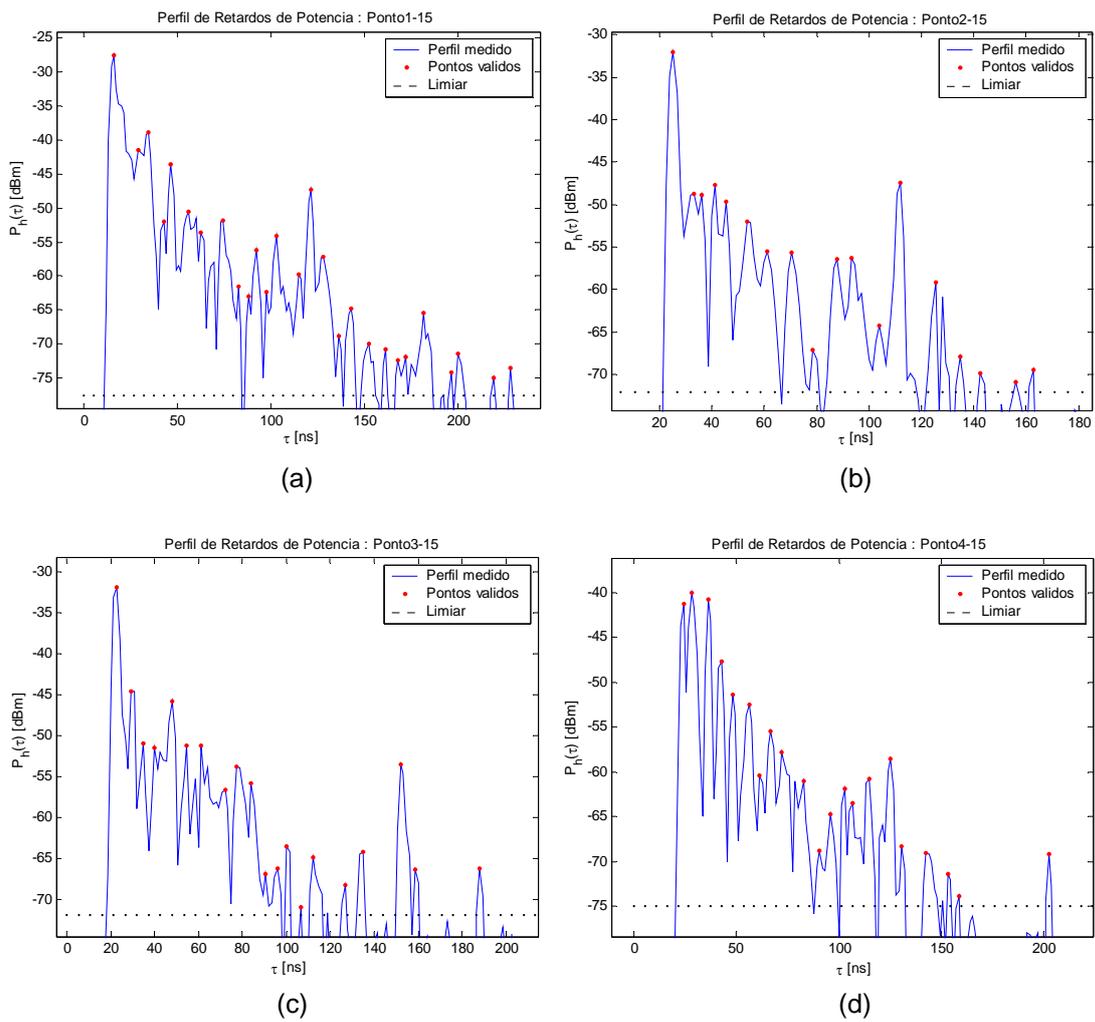


Fig C.1 – Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente A1.

Gráficos de perfil de retardos de potência:



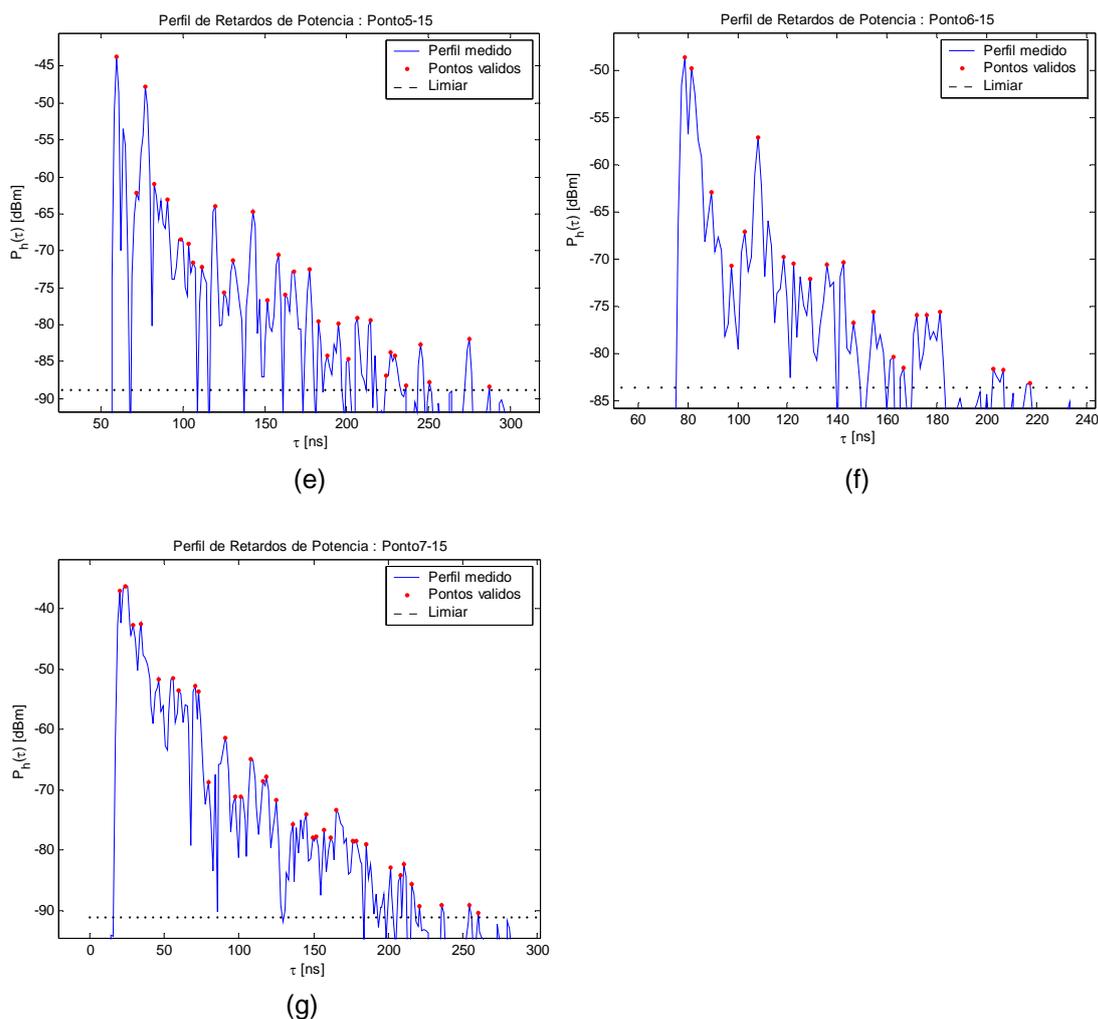


Fig C.2 – Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente A1.

C.2 Resultados para o Ambiente A2: Segundo Andar do Bloco D *outdoor-indoor*

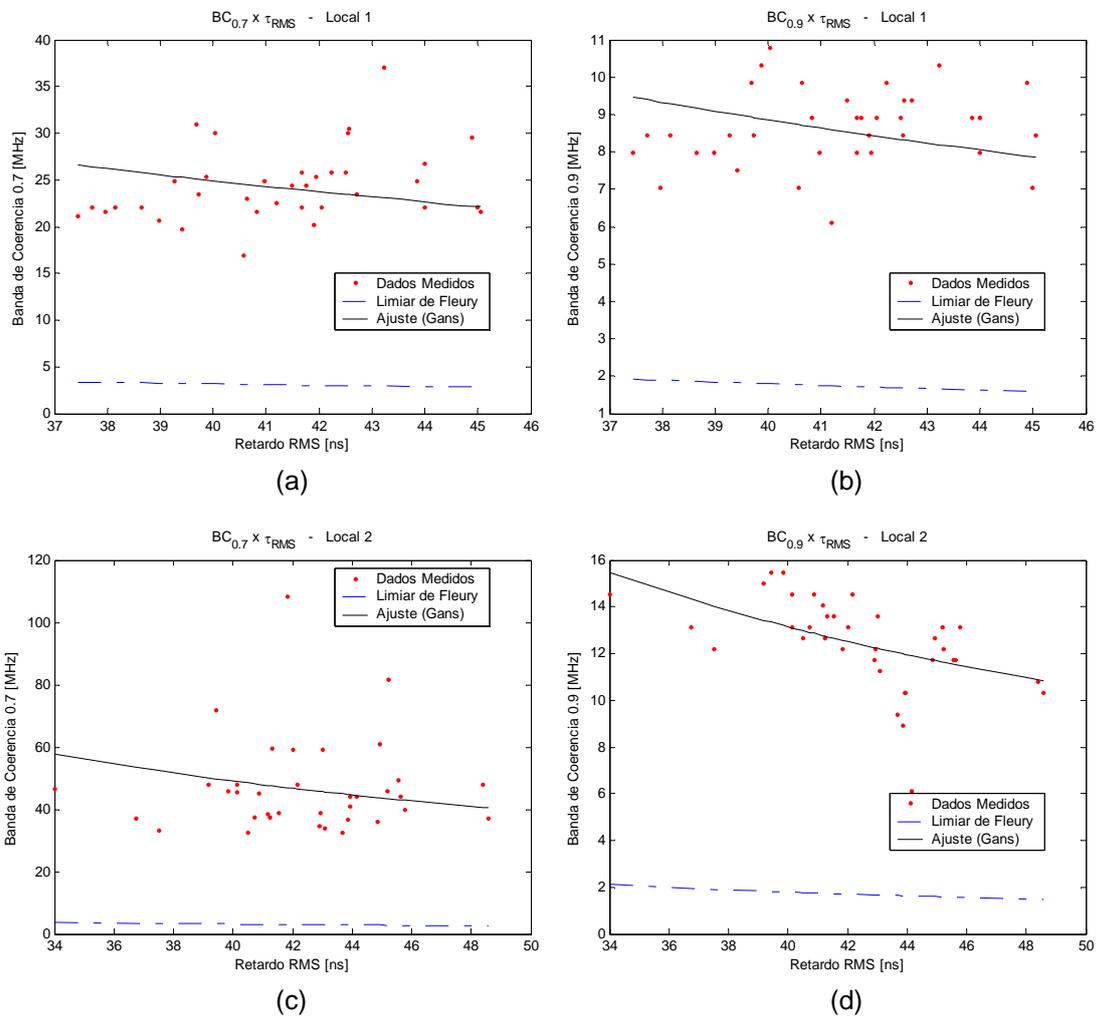
Ambiente	Situação	Retardo Médio [ns]			Espalhamento de Retardos [ns]			
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio	Razão
Local 1	LOS	42,08	41,37	4,88	41,28	41,58	2,10	0,05
Local 2	LOS	51,68	52,44	4,22	42,39	42,53	3,04	0,07
Local 3	LOS	51,96	50,66	6,05	45,68	45,39	2,59	0,06
Local 4	NLOS	37,97	37,75	5,67	14,95	13,00	5,69	0,38
Local 5	LOS	90,65	89,76	4,00	41,86	41,83	2,80	0,07
Local 6	LOS	111,09	109,94	4,98	45,38	45,43	3,02	0,07
Local 7	NLOS	60,31	60,27	4,72	59,15	58,95	2,57	0,04

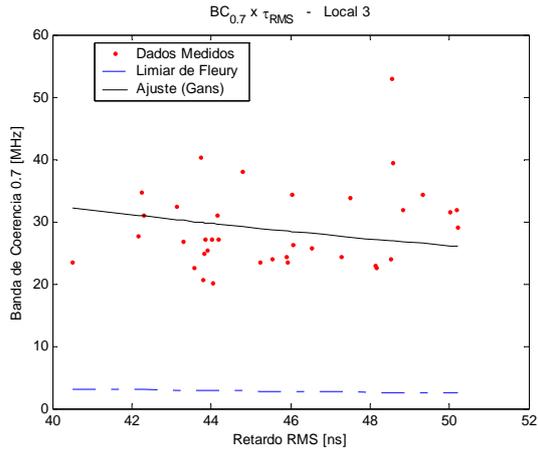
Ambiente	Situação	Banda Coer. 0,7 [MHz]			Banda Coer. 0,9 [MHz]		
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
Local 1	LOS	24,32	23,44	3,91	8,63	8,44	1,03
Local 2	LOS	46,85	44,06	15,20	12,46	12,66	1,96
Local 3	LOS	28,88	27,19	6,68	7,43	7,50	0,71
Local 4	NLOS	2,85	2,34	2,26	1,26	1,41	0,25
Local 5	LOS	18,76	17,81	3,91	6,30	6,80	1,30
Local 6	LOS	17,80	16,41	7,40	2,36	2,34	0,26
Local 7	NLOS	20,30	19,45	9,39	6,07	6,56	1,32

Ambiente	Situação	NMP	X [dB]	Limiar [dBm]	α para BC 0,7	α para BC 0,9
Local 1	LOS	32	55	-82,09	1,00	2,82
Local 2	LOS	28	50	-80,28	0,51	1,90
Local 3	LOS	36	55	-85,50	0,77	2,96
Local 4	NLOS	6	20	-59,37	26,73	63,98
Local 5	LOS	15	30	-56,51	1,28	3,84
Local 6	LOS	17	30	-78,59	1,24	9,47
Local 7	NLOS	41	50	-84,61	0,83	2,79

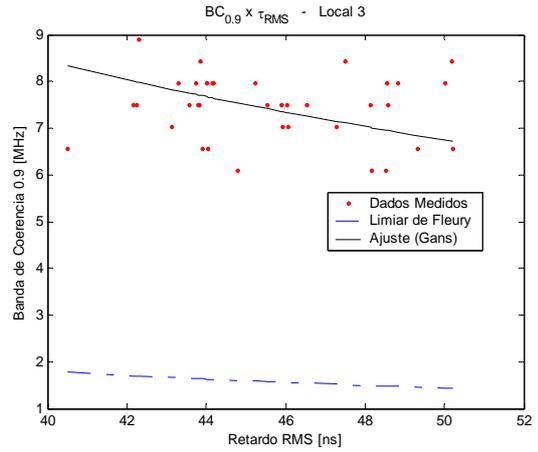
Tabela C.2 - Resultados obtidos nos Ambientes A2.

Gráficos de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos:

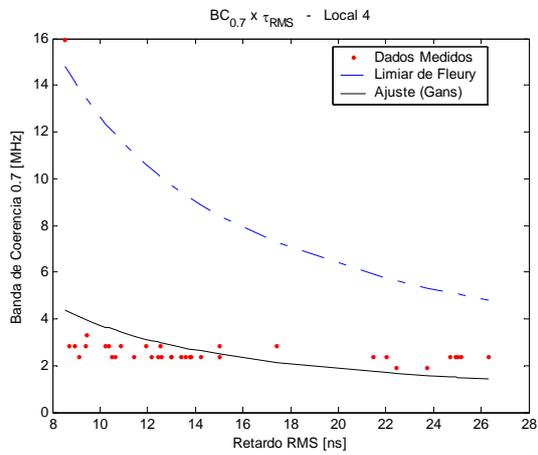




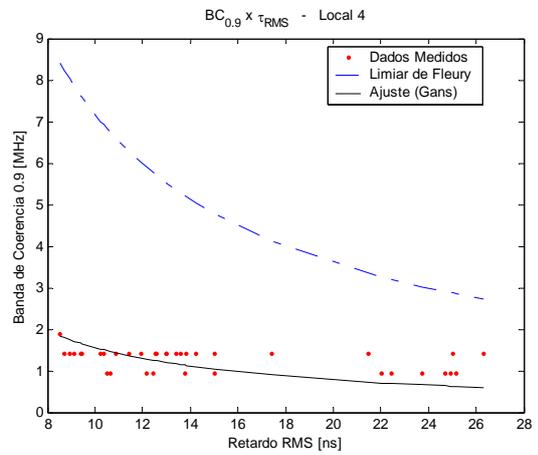
(e)



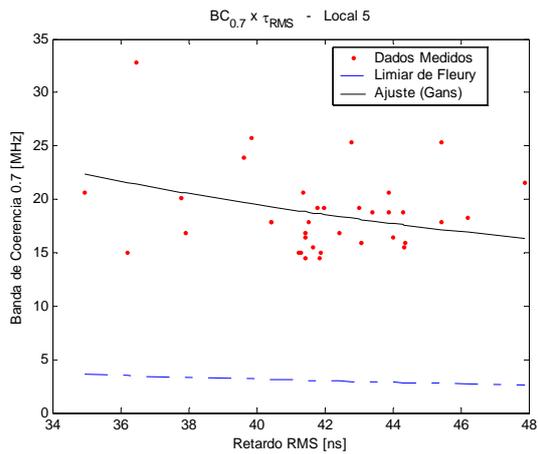
(f)



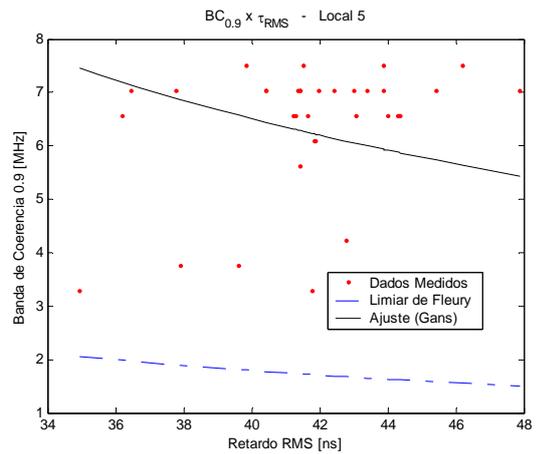
(g)



(h)



(i)



(j)

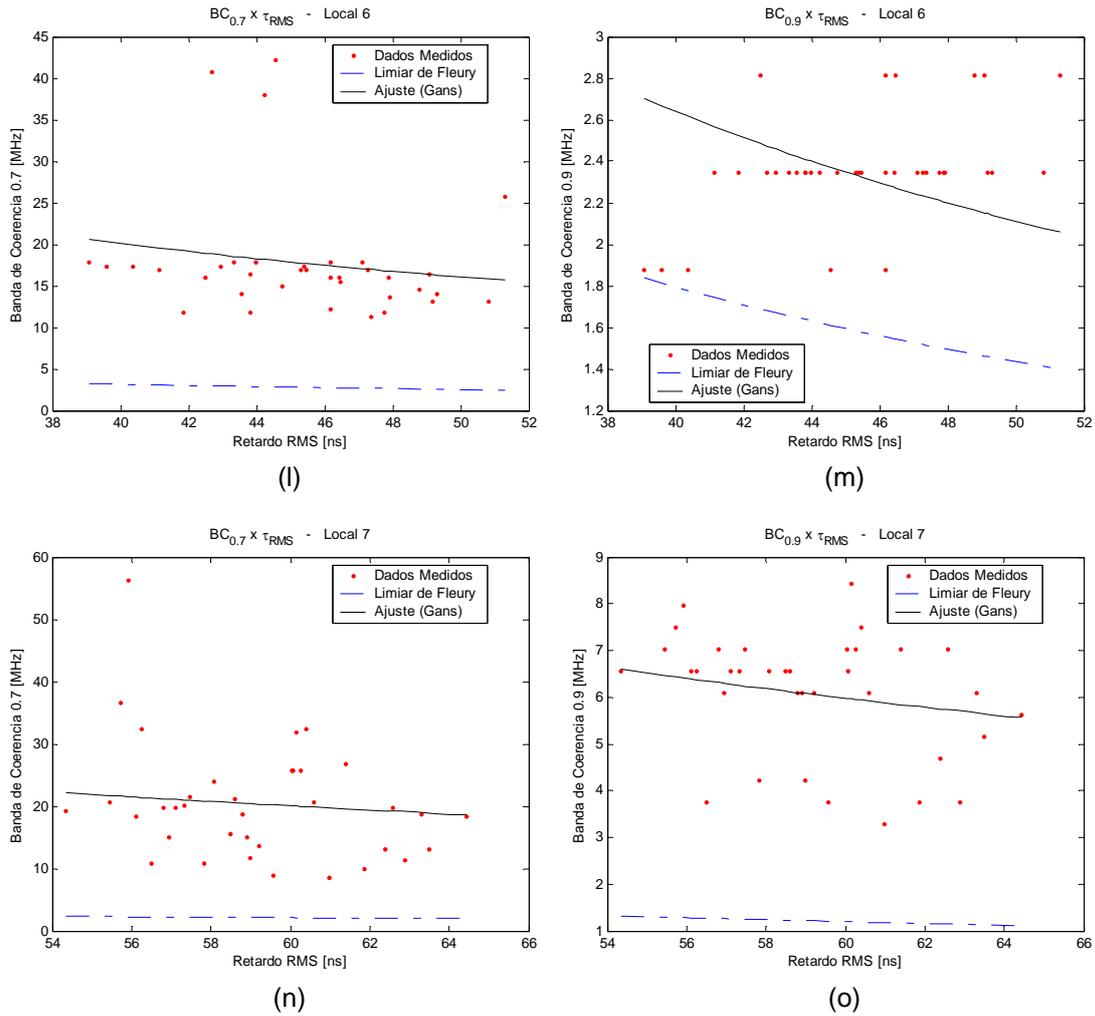
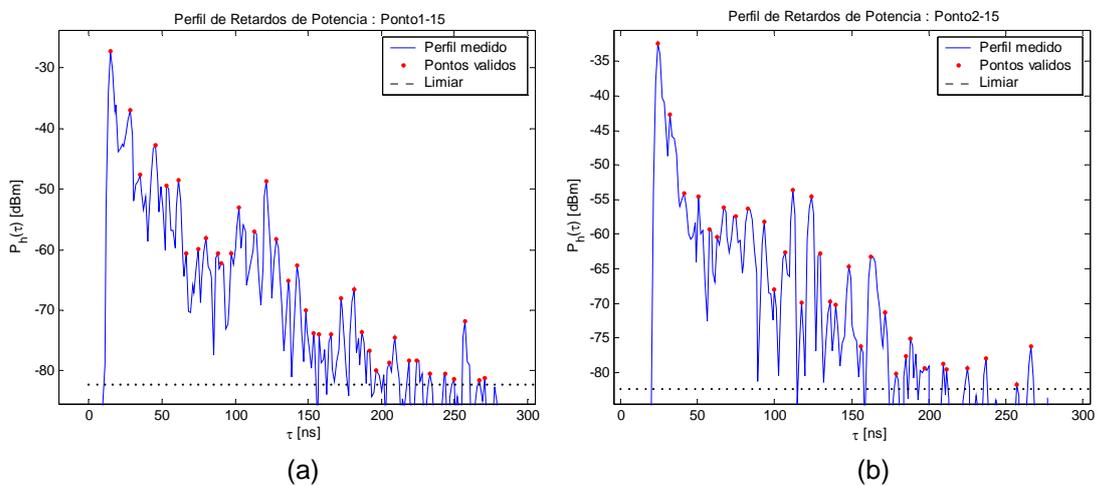
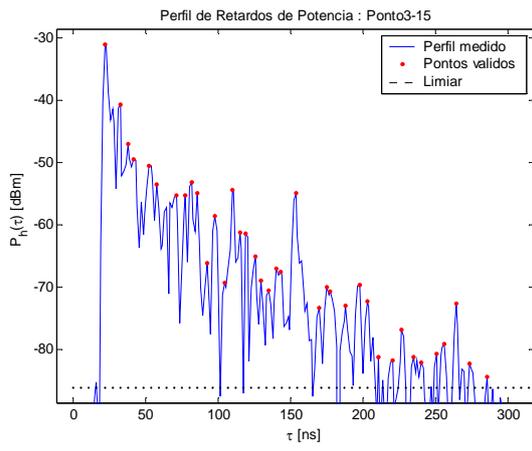


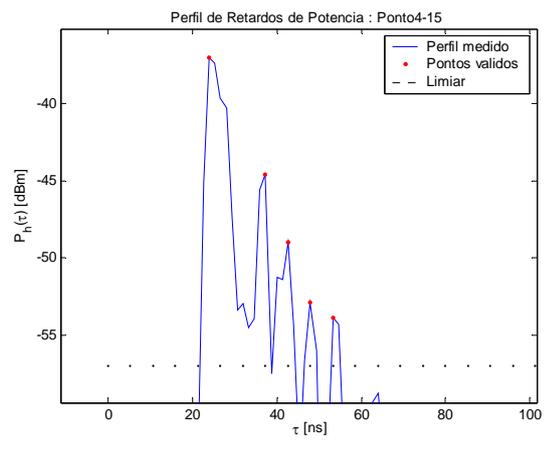
Fig C.3 – Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente A2.

Gráficos de perfil de retardos de potência:

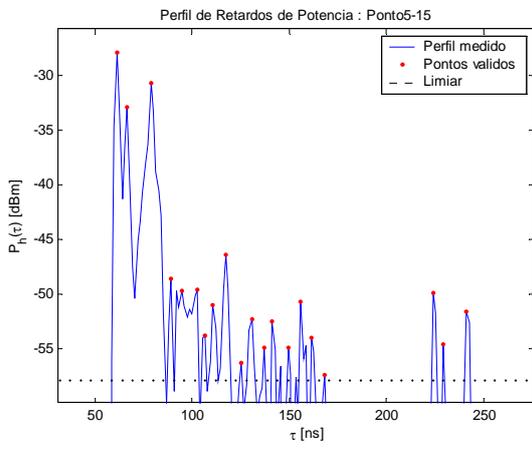




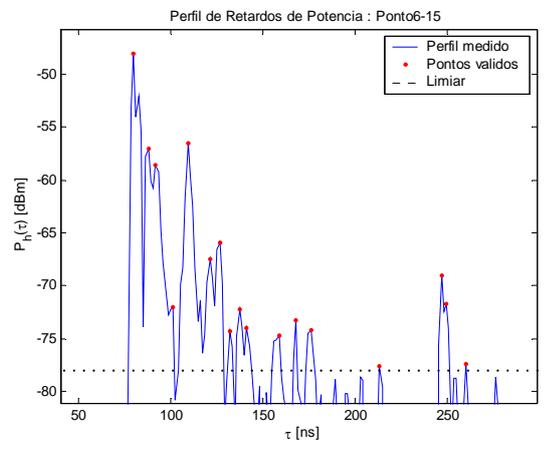
(c)



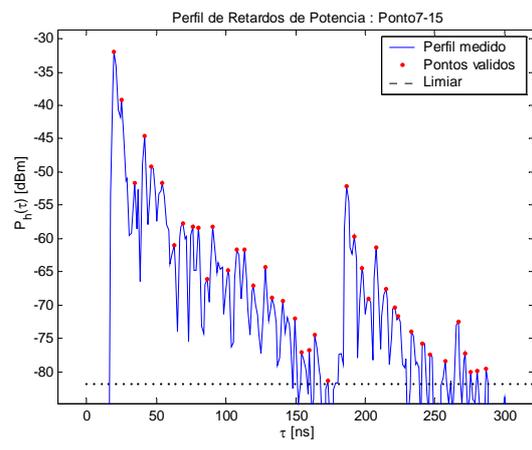
(d)



(e)



(f)



(g)

Fig C.4 – Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente A2.

C.3 Resultados para o Ambiente A3: Terceiro Andar do Bloco D *indoor-outdoor*

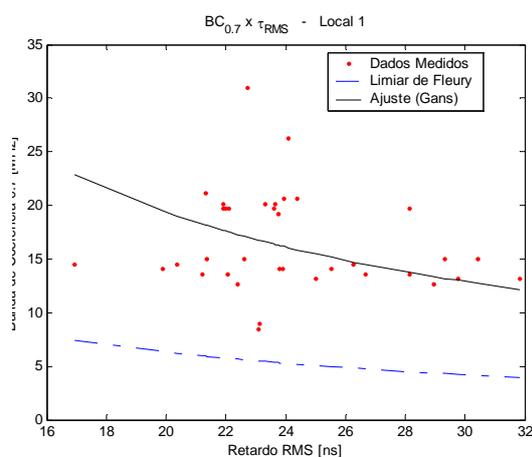
Ambiente	Situação	Retardo Médio [ns]			Espalhamento de Retardos [ns]			
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio	Razão
Local 1	LOS	45,45	44,54	3,91	24,16	23,63	3,25	0,13
Local 1'		69,17	73,20	10,27	45,64	45,48	5,65	0,12
Local 2	LOS	40,70	40,10	5,49	38,00	38,15	2,71	0,07
Local 3	LOS	50,01	49,38	5,85	48,51	48,39	3,37	0,07
Local 4	LOS	62,81	62,00	5,11	49,22	48,16	2,96	0,06
Local 5	LOS	76,46	73,65	10,34	49,73	48,78	3,72	0,07
Local 6	LOS	116,82	116,52	3,86	57,95	57,76	4,28	0,07

Ambiente	Situação	Banda Coer. 0,7 [MHz]			Banda Coer. 0,9 [MHz]		
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
Local 1	LOS	16,50	14,77	4,54	2,36	2,34	0,21
Local 2	LOS	21,13	19,69	4,62	6,68	6,56	0,93
Local 3	LOS	46,08	33,52	33,31	12,60	11,02	4,73
Local 4	LOS	44,96	42,19	17,55	12,59	13,36	4,17
Local 5	LOS	93,79	93,75	39,78	13,79	9,38	8,62
Local 6	LOS	30,14	33,28	8,14	5,17	4,69	1,28

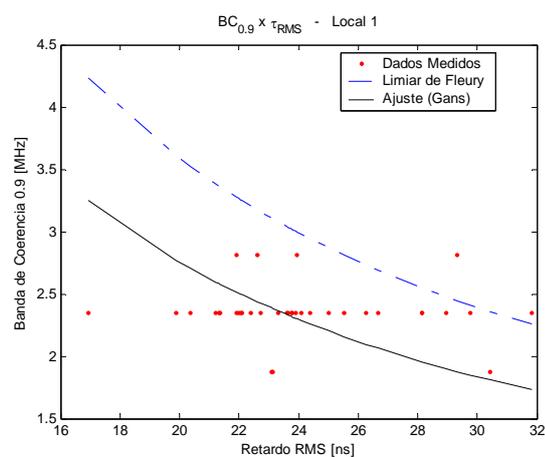
Ambiente	Situação	NMP	X [dB]	Limiar [dBm]	α para BC 0,7	α para BC 0,9
Local 1	LOS	9	25	-47,30	2,58	18,16
Local 1'		24	40	-62,30	1,36	9,52
Local 2	LOS	18	40	-56,49	1,26	3,98
Local 3	LOS	33	50	-79,52	0,44	1,62
Local 4	LOS	35	50	-84,22	0,45	1,61
Local 5	LOS	33	50	-84,84	0,21	1,45
Local 6	LOS	32	45	-94,84	0,58	3,38

Tabela C.3 - Resultados obtidos nos Ambientes A3.

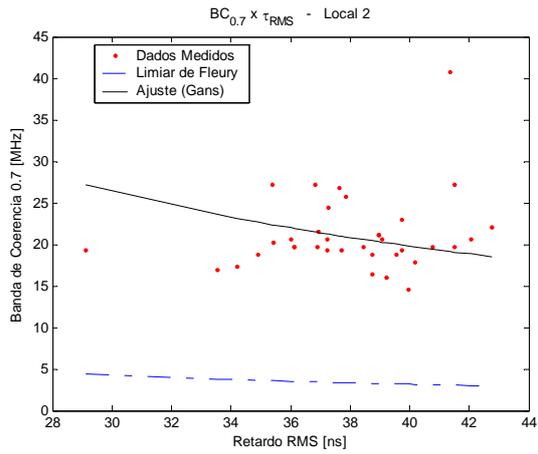
Gráficos de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos:



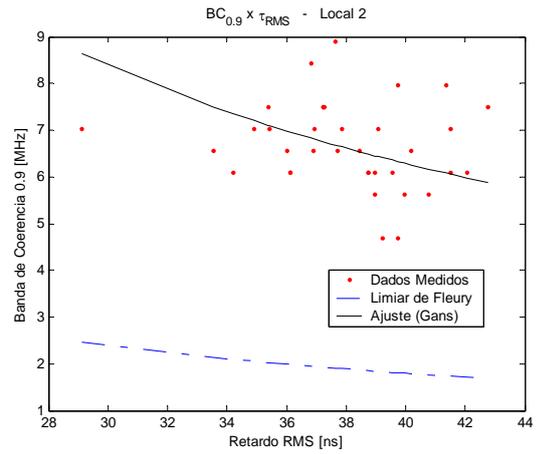
(a)



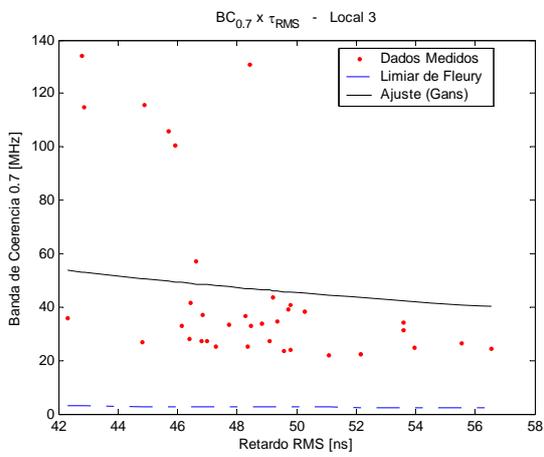
(b)



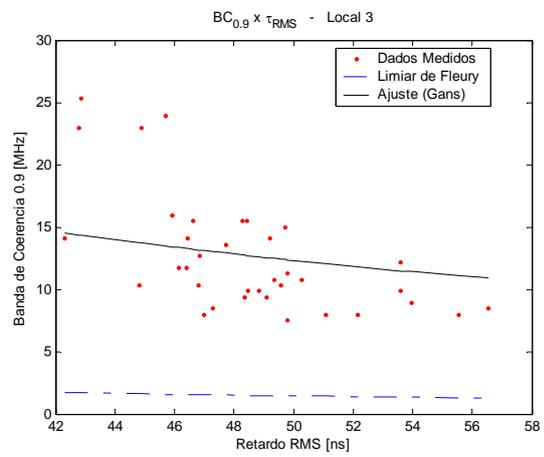
(c)



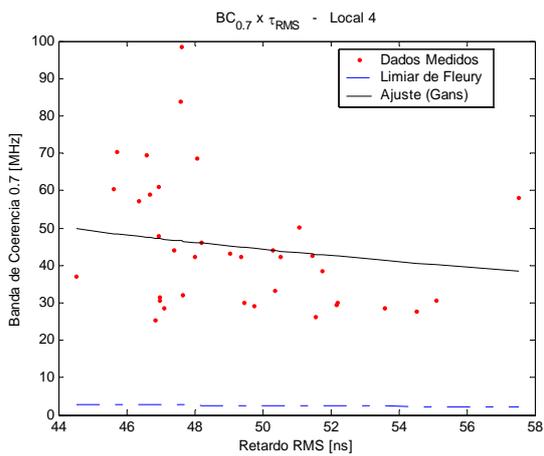
(d)



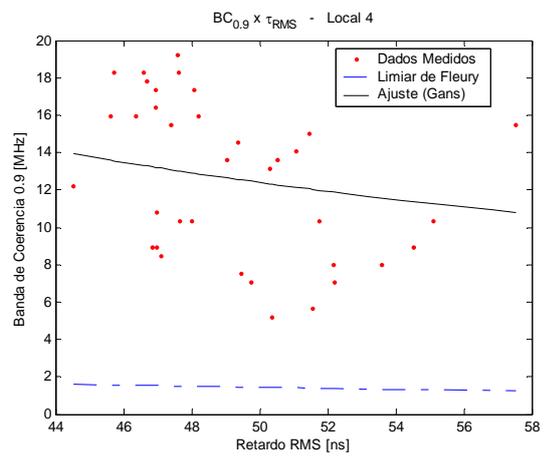
(e)



(f)



(g)



(h)

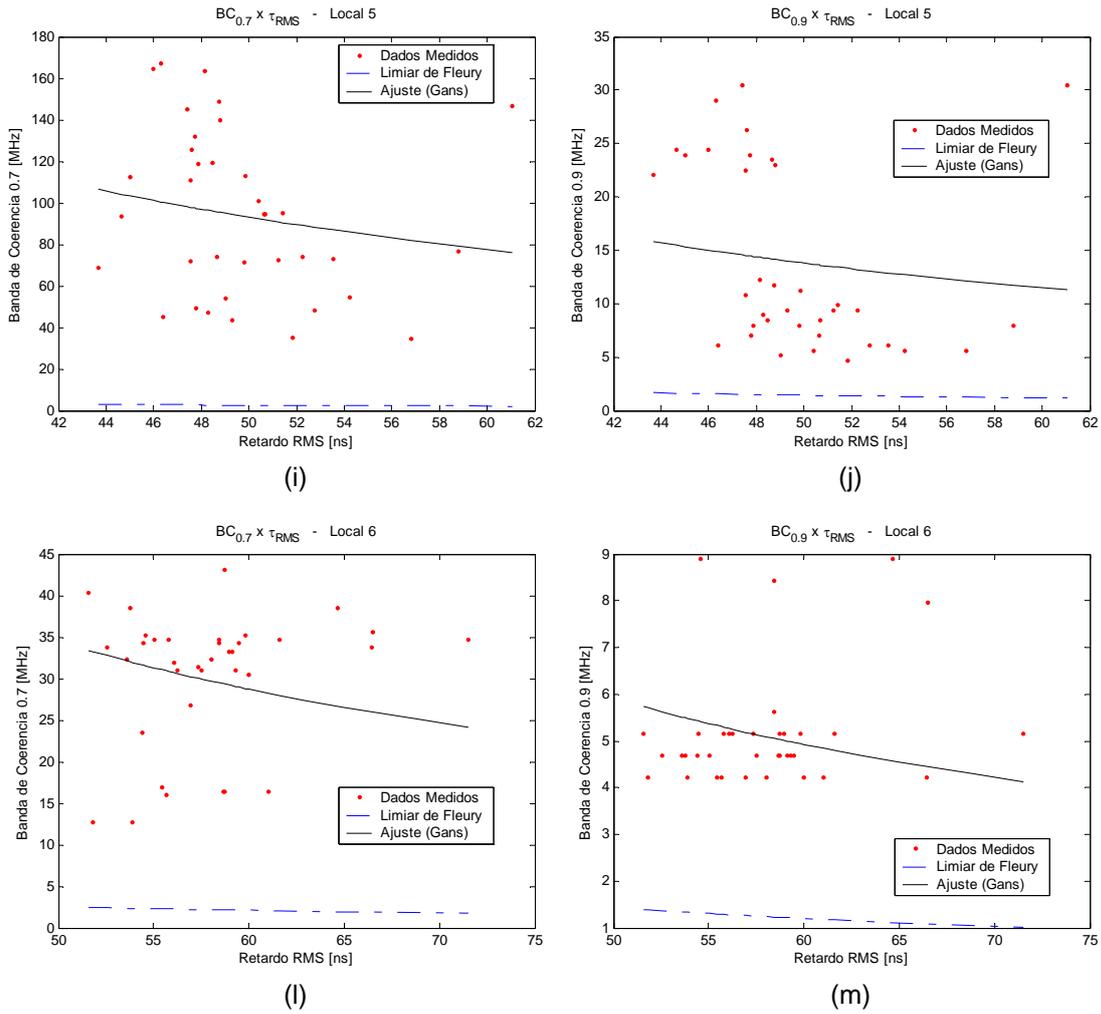
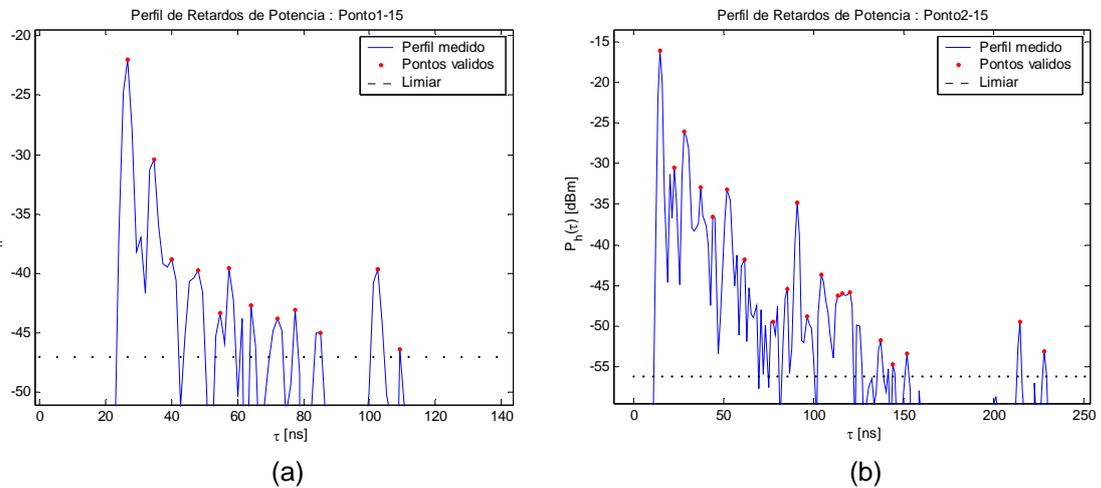


Fig C.5 – Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente A3.

Gráficos de perfil de retardos de potência:



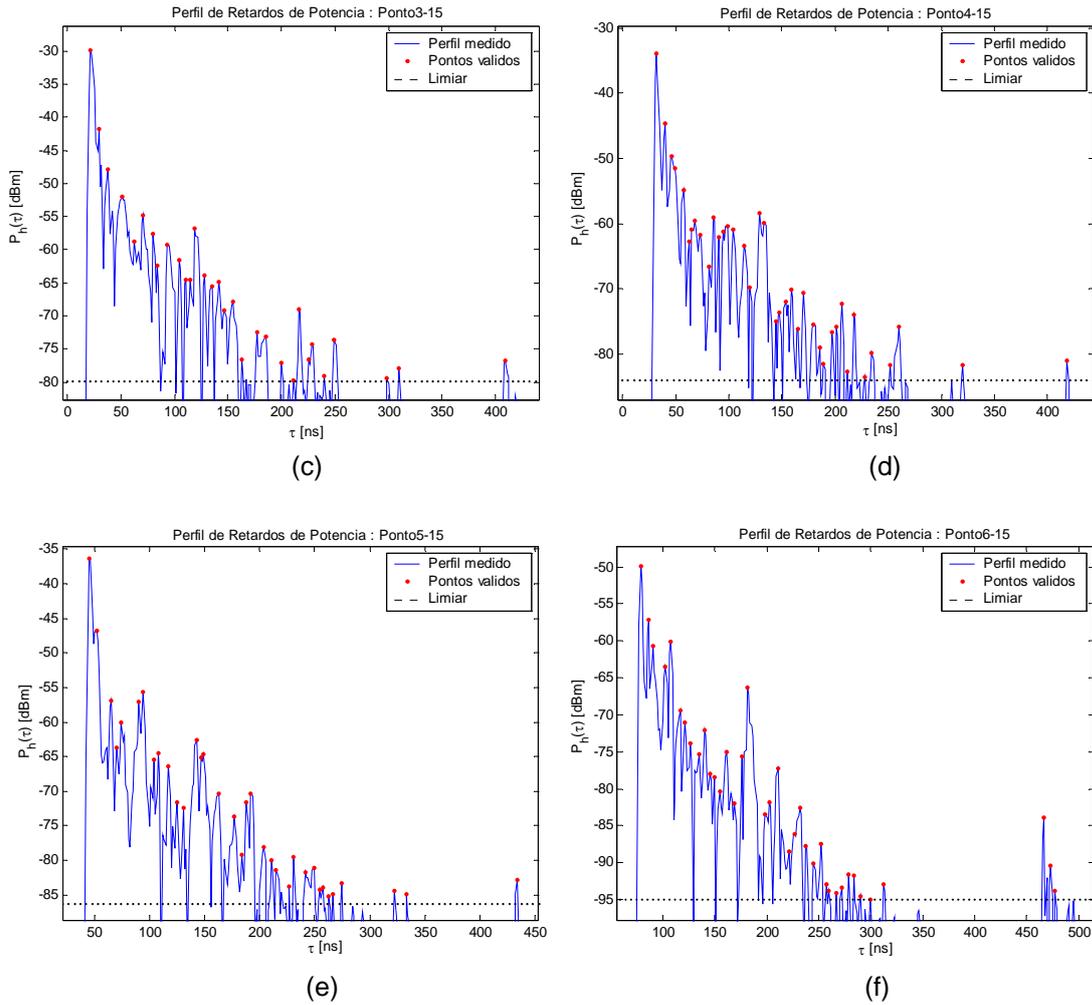
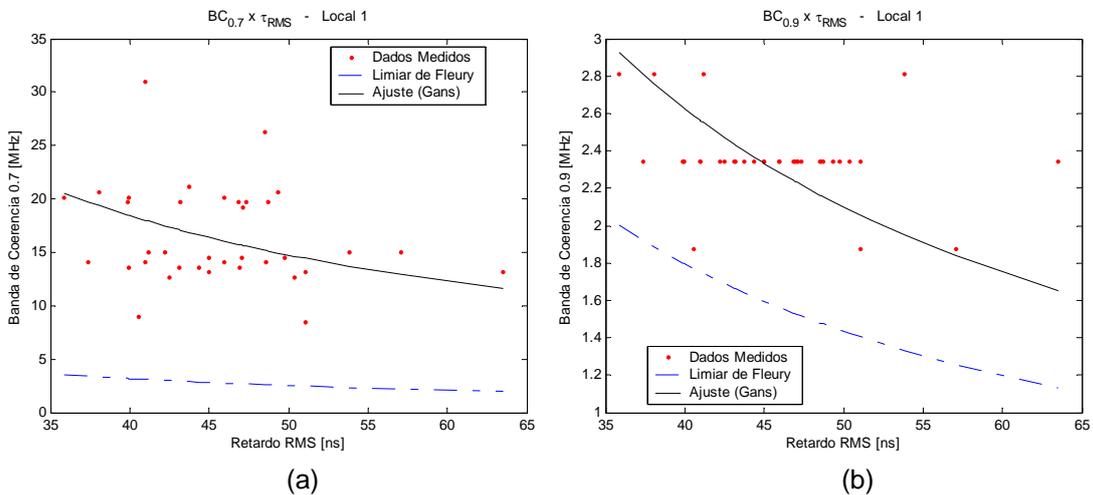


Fig C.6 – Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente A3.

As figuras seguintes são para o Local 1, fazendo-se $X = 40$ (ao invés de 25), mas descartando-se o ruído de início de perfil.



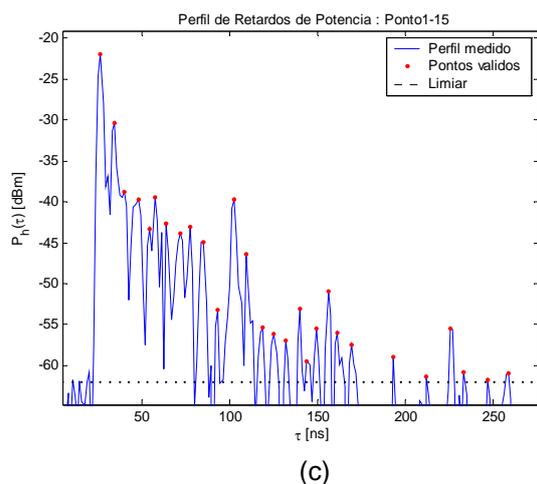


Fig C.7 – Banda de coerência de 0,7 (a) e de 0,9 (b) x o Espalhamento de Retardos e Perfil de Retardos de Potência no Ponto 15 do grid (c).

C.4 Resultados para o Ambiente A4: Terceiro Andar do Bloco D *outdoor-indoor*

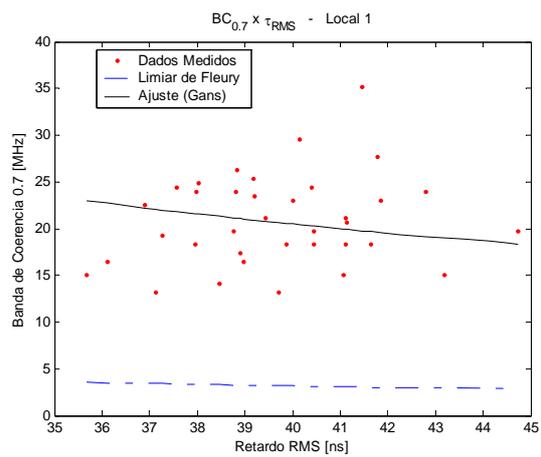
Ambiente	Situação	Retardo Médio [ns]			Espalhamento de Retardos [ns]			
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio	Razão
Local 1	LOS	49,84	49,18	4,13	39,67	39,56	2,01	0,05
Local 2	LOS	40,67	38,03	7,62	38,35	37,89	2,84	0,07
Local 3	LOS	48,05	46,51	5,87	42,63	42,50	3,77	0,09
Local 4	LOS	59,41	58,18	6,57	44,46	44,34	3,47	0,08
Local 5	LOS	76,00	73,97	9,45	46,00	45,87	3,74	0,08
Local 6	LOS	110,00	108,84	3,40	43,78	44,00	2,23	0,05

Ambiente	Situação	Banda Coer. 0,7 [MHz]			Banda Coer. 0,9 [MHz]		
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
Local 1	LOS	20,81	20,16	4,85	7,30	7,50	1,03
Local 2	LOS	23,96	23,20	4,10	8,54	8,44	0,88
Local 3	LOS	45,46	35,86	28,45	12,59	12,19	3,66
Local 4	LOS	39,52	36,09	14,61	10,63	10,31	4,04
Local 5	LOS	71,91	56,72	41,18	13,42	10,08	7,77
Local 6	LOS	33,39	34,22	11,77	5,01	5,63	1,65

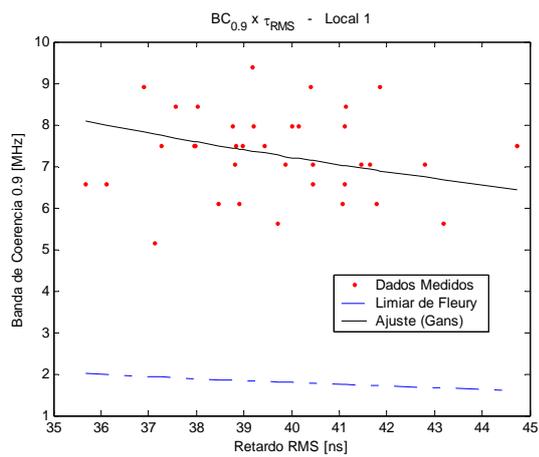
Ambiente	Situação	NMP	X [dB]	Limiar [dBm]	α para BC 0,7	α para BC 0,9
Local 1	LOS	28	50	-80,50	1,22	3,47
Local 2	LOS	25	50	-75,84	1,10	3,09
Local 3	LOS	30	50	-79,33	0,52	1,87
Local 4	LOS	31	50	-83,70	0,57	2,09
Local 5	LOS	31	50	-85,23	0,30	1,59
Local 6	LOS	25	40	-87,63	0,68	4,57

Tabela C.4 - Resultados obtidos nos Ambientes A4.

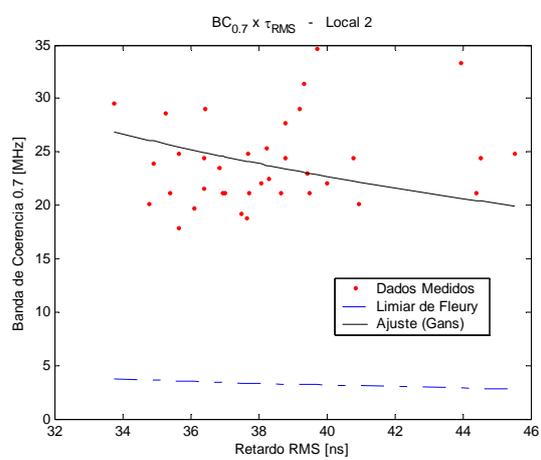
Gráficos de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos:



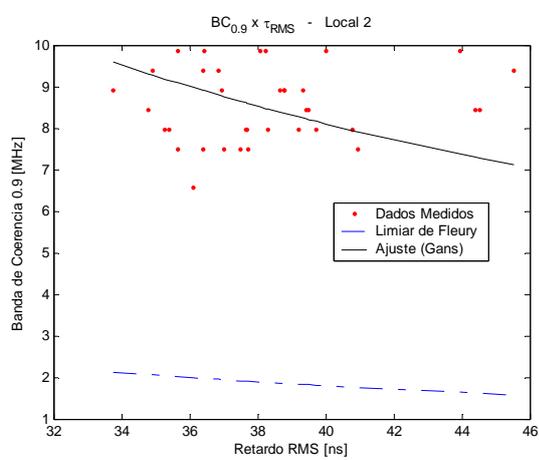
(a)



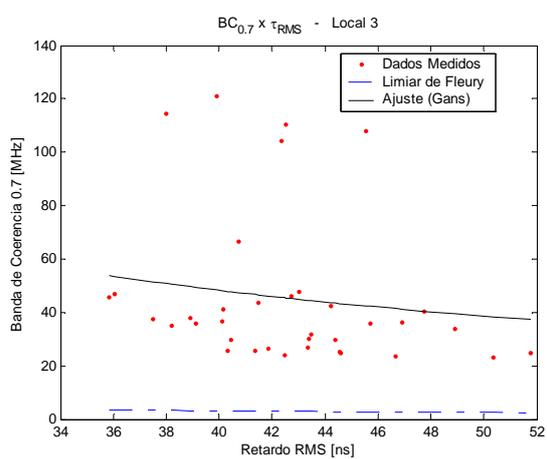
(b)



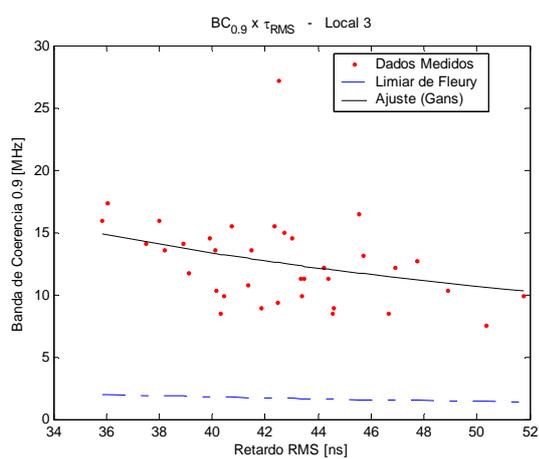
(c)



(d)



(e)



(f)

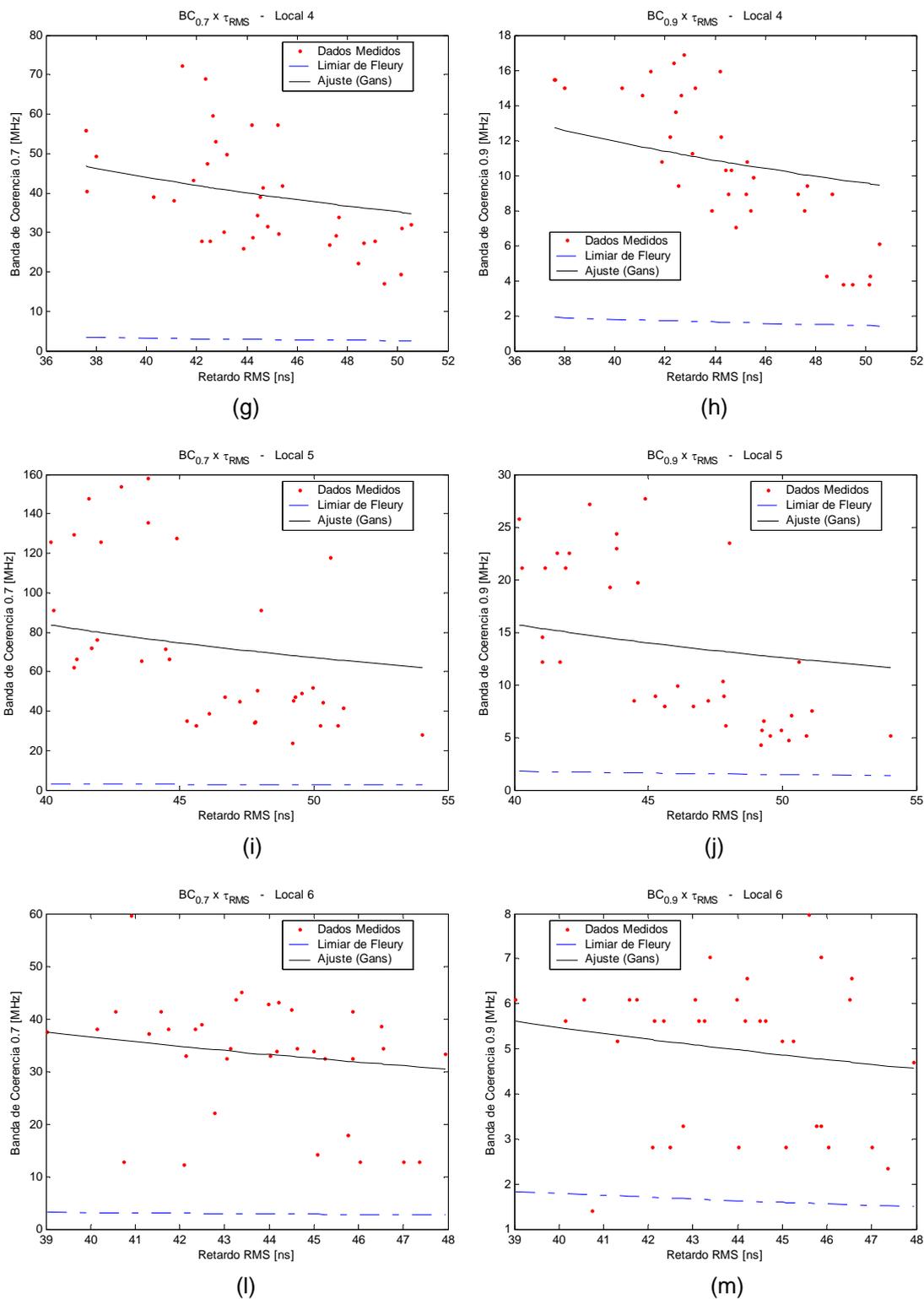


Fig C.8 – Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente A4.

Gráficos de perfil de retardos de potência:

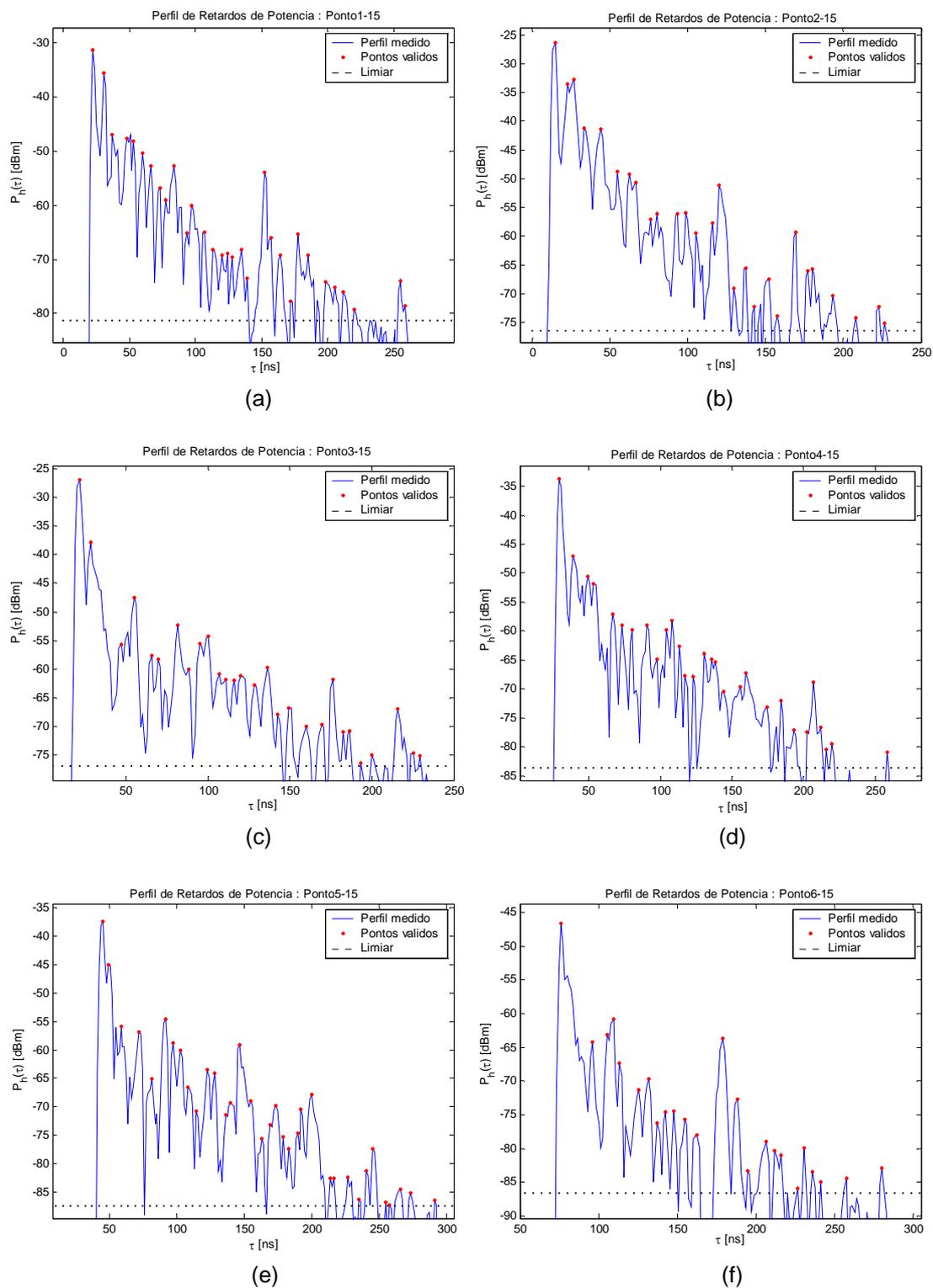


Fig C.9 – Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente A4.

C.5 Resultados para o Ambiente A5: *Hall do Bloco D indoor-outdoor*

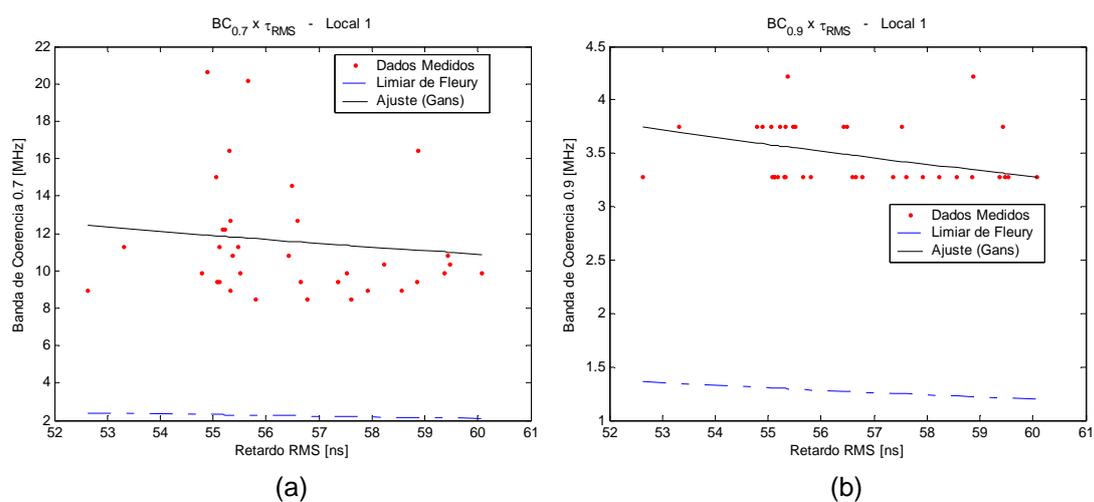
Ambiente	Situação	Retardos Médio [ns]			Espalhamento de Retardos [ns]			
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio	Razão
Local 1	LOS	78,65	78,32	4,78	56,56	56,12	1,87	0,03
Local 2	LOS	59,27	58,74	3,05	49,93	50,24	4,00	0,08
Local 3	LOS	53,35	52,69	4,46	47,35	47,56	1,62	0,03
Local 4	LOS	67,67	67,24	5,23	47,39	47,30	2,24	0,05
Local 5	(N)LOS	74,42	74,65	10,63	49,05	49,29	6,03	0,12
Local 6	(N)LOS	66,50	66,24	8,61	38,40	38,61	5,31	0,14
Local 7	LOS	80,66	81,18	7,10	45,86	46,10	2,13	0,05

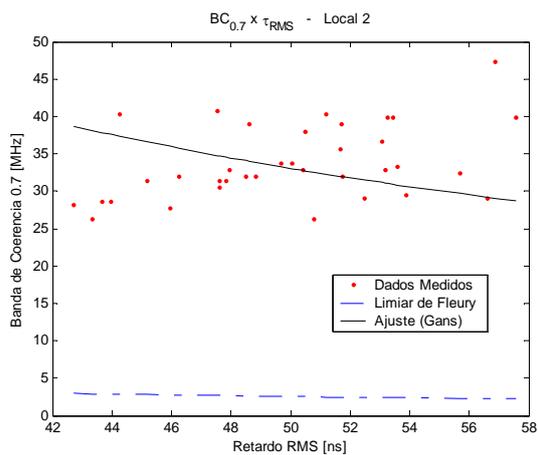
Ambiente	Situação	Banda Coer. 0,7 [MHz]			Banda Coer. 0,9 [MHz]		
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
Local 1	LOS	11,58	10,31	3,39	3,49	3,28	0,28
Local 2	LOS	33,70	32,58	4,95	6,24	6,80	1,65
Local 3	LOS	35,16	31,17	8,87	4,24	4,22	0,35
Local 4	LOS	67,24	63,98	22,36	3,50	3,28	0,40
Local 5	(N)LOS	26,58	18,75	22,67	2,97	2,81	0,80
Local 6	(N)LOS	9,67	6,80	4,89	2,72	2,81	0,50
Local 7	LOS	59,43	55,31	22,03	3,37	3,28	0,31

Ambiente	Situação	NMP	X [dB]	Limiar [dBm]	α para BC 0,7	α para BC 0,9
Local 1	LOS	33	40	-76,46	1,53	5,08
Local 2	LOS	22	35	-74,63	0,60	3,31
Local 3	LOS	26	40	-82,89	0,60	4,98
Local 4	LOS	26	40	-87,61	0,31	6,04
Local 5	(N)LOS	28	35	-90,63	0,73	6,89
Local 6	(N)LOS	19	25	-81,79	2,67	9,77
Local 7	LOS	25	40	-89,38	0,37	6,48

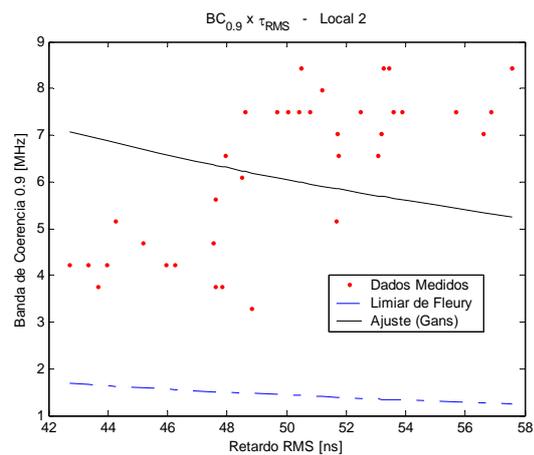
Tabela C.5 - Resultados obtidos nos Ambientes A5.

Gráficos de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos:

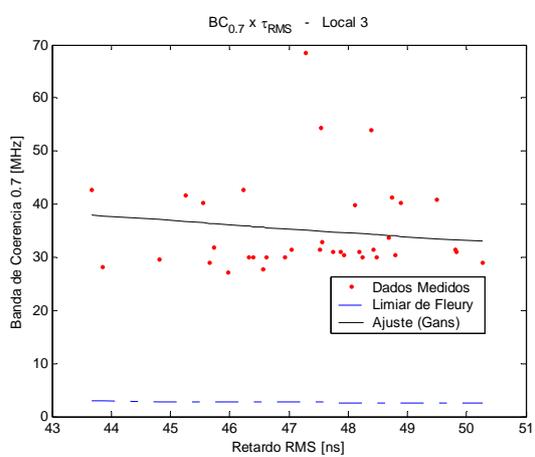




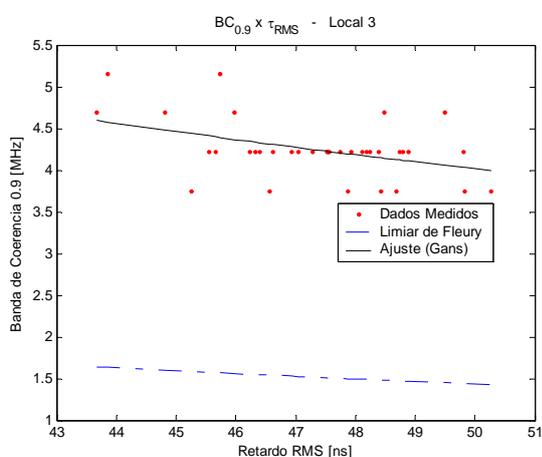
(c)



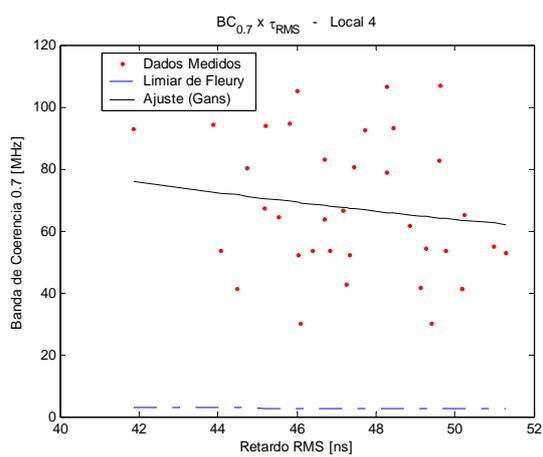
(d)



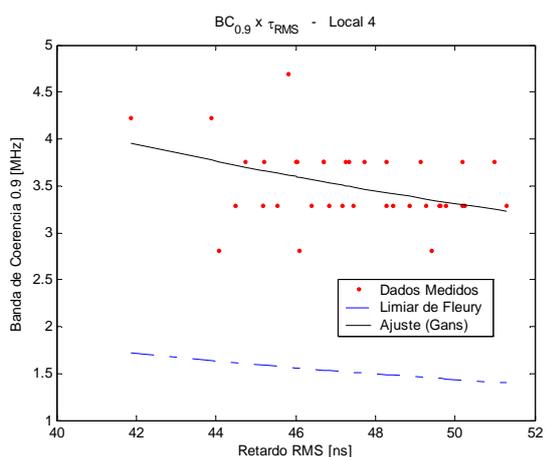
(e)



(f)



(g)



(h)

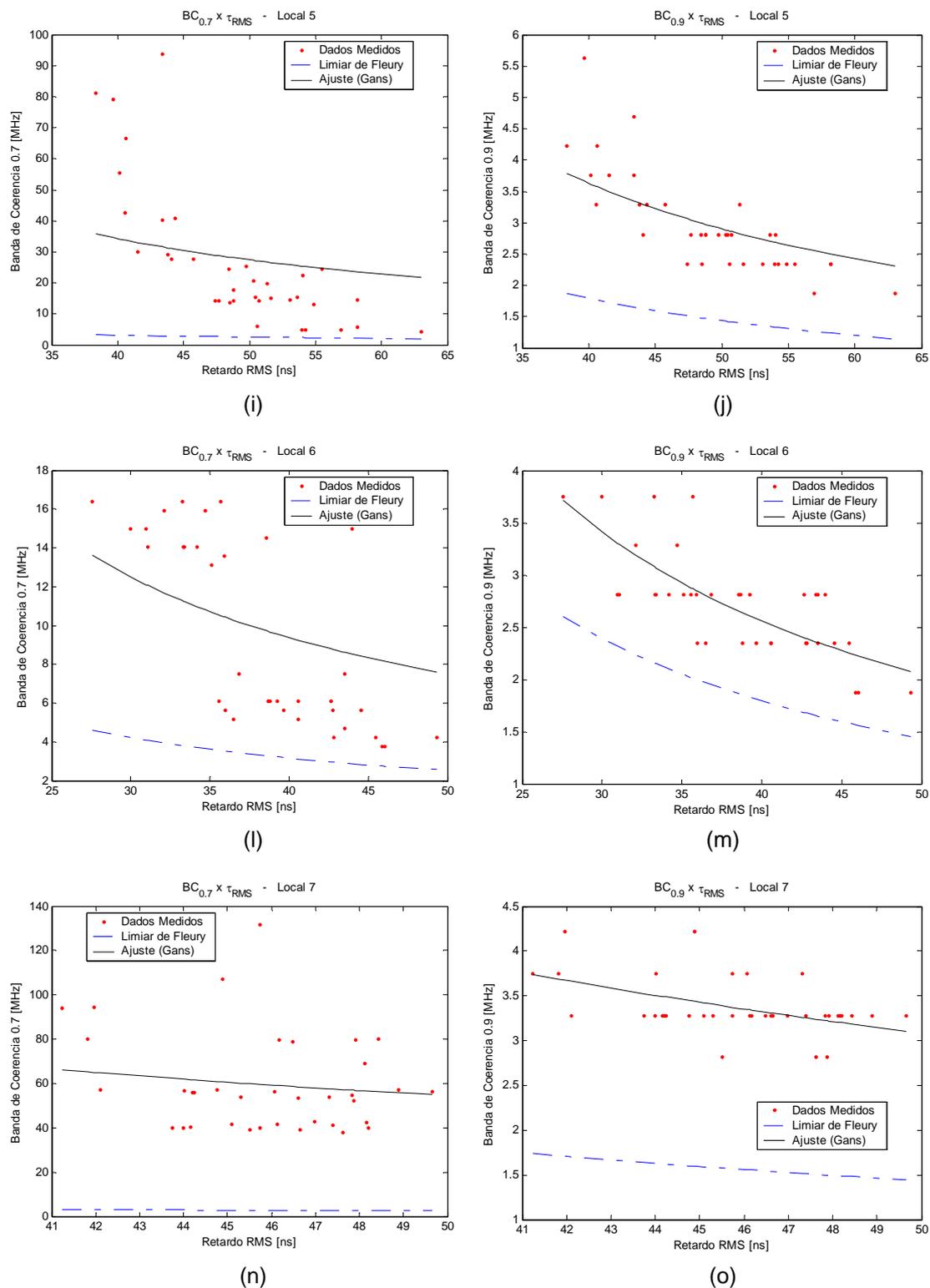
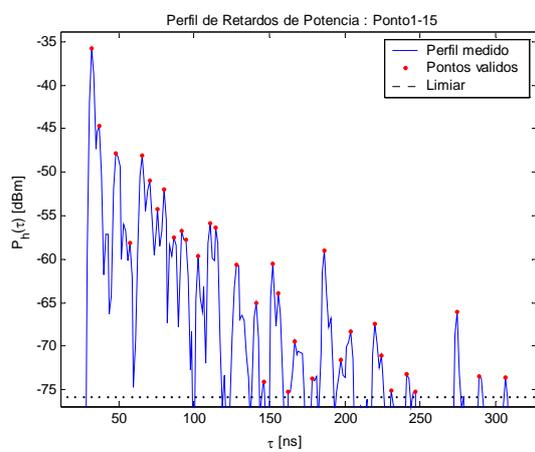
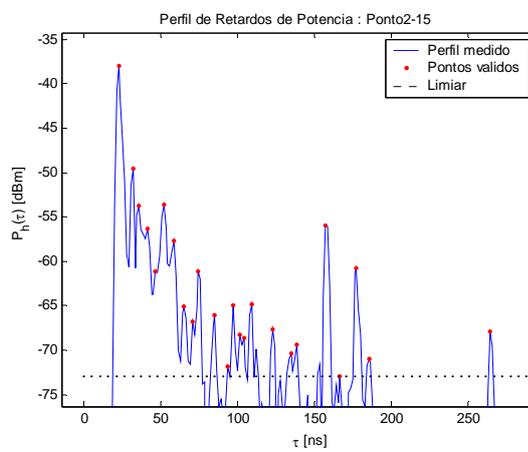


Fig C.10 – Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente A5.

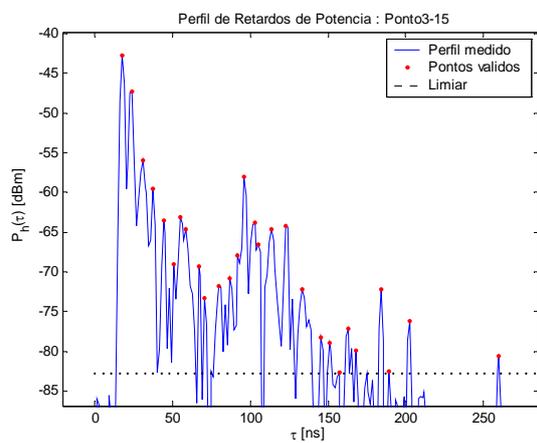
Gráficos de perfil de retardos de potência:



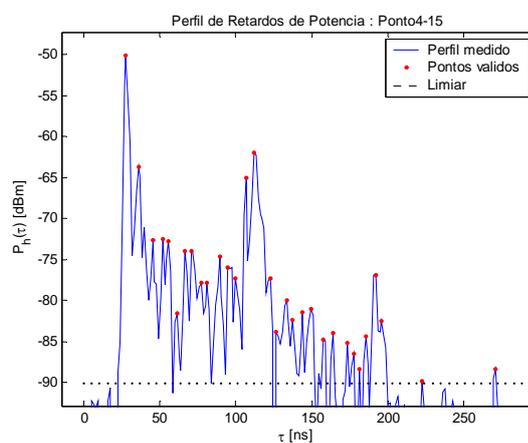
(a)



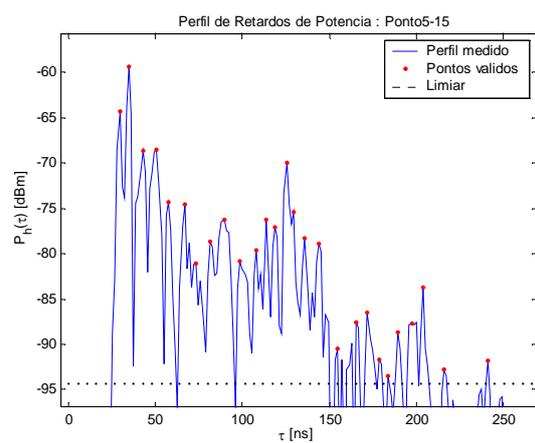
(b)



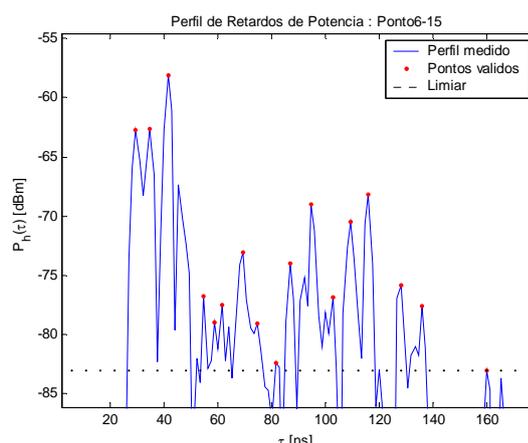
(c)



(d)



(e)



(f)

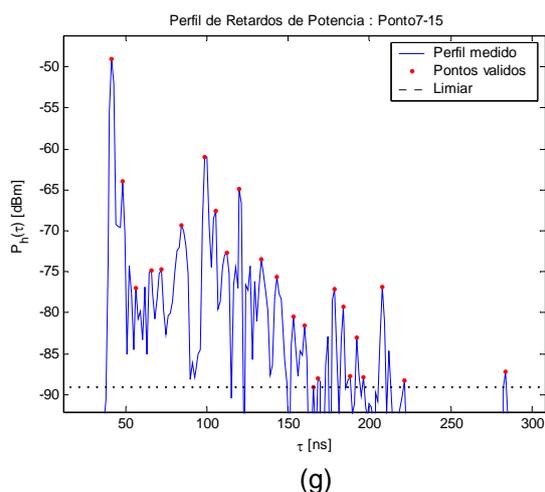


Fig C.11 – Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente A5.

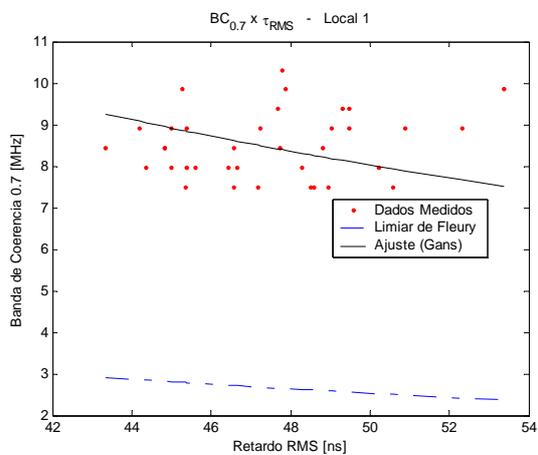
C.6 Resultados para o Ambiente A6: *Hall do Bloco D outdoor-indoor*

Ambiente	Situação	Retardo Médio [ns]			Espalhamento de Retardos [ns]			
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio	Razão
Local 1	LOS	73,66	72,43	5,43	47,45	47,46	2,37	0,05
Local 2	LOS	55,15	54,94	4,50	48,50	48,45	2,45	0,05
Local 3	LOS	51,42	50,19	6,25	48,02	47,89	2,42	0,05
Local 4	LOS	65,75	64,72	8,09	48,03	48,18	2,26	0,05
Local 5	(N)LOS	71,15	70,89	5,73	51,57	51,66	2,80	0,05
Local 6	(N)LOS	73,92	72,60	9,09	50,32	50,46	3,66	0,07
Local 7	LOS	80,38	77,41	9,46	45,40	45,36	1,92	0,04

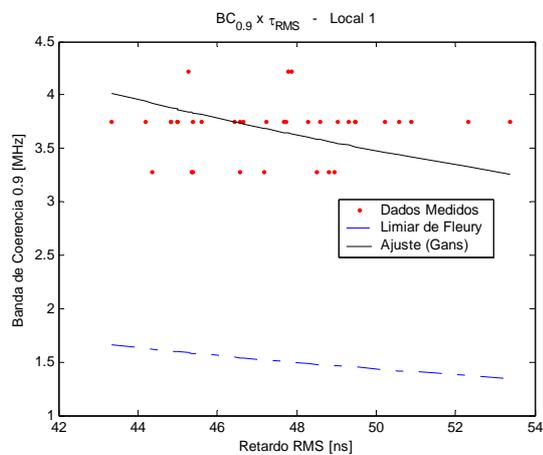
Ambiente	Situação	Banda Coer. 0,7 [MHz]			Banda Coer. 0,9 [MHz]		
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
Local 1	LOS	8,50	8,44	0,79	3,68	3,75	0,25
Local 2	LOS	35,08	31,41	13,08	7,15	7,27	1,15
Local 3	LOS	44,77	37,50	19,01	9,51	10,55	2,80
Local 4	LOS	59,48	51,80	17,98	4,56	4,22	1,63
Local 5	(N)LOS	22,41	23,91	5,68	3,41	3,28	0,60
Local 6	(N)LOS	9,62	6,09	5,39	2,79	2,81	0,68
Local 7	LOS	59,32	57,42	18,48	4,05	3,98	0,53

Ambiente	Situação	NMP	X [dB]	Limiar [dBm]	α para BC 0,7	α para BC 0,9
Local 1	LOS	35	50	-77,68	2,49	5,75
Local 2	LOS	30	50	-72,55	0,59	2,89
Local 3	LOS	33	55	-75,96	0,47	2,21
Local 4	LOS	32	50	-75,62	0,35	4,59
Local 5	(N)LOS	34	45	-79,02	0,86	5,69
Local 6	(N)LOS	37	45	-78,58	2,02	7,12
Local 7	LOS	32	50	-78,37	0,37	5,46

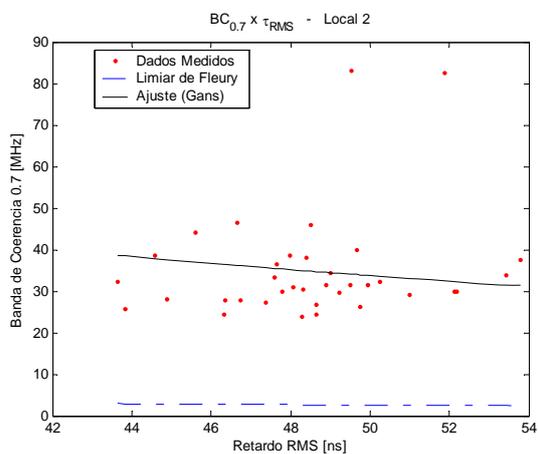
Tabela C.6 - Resultados obtidos nos Ambientes A6.

Gráficos de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos:

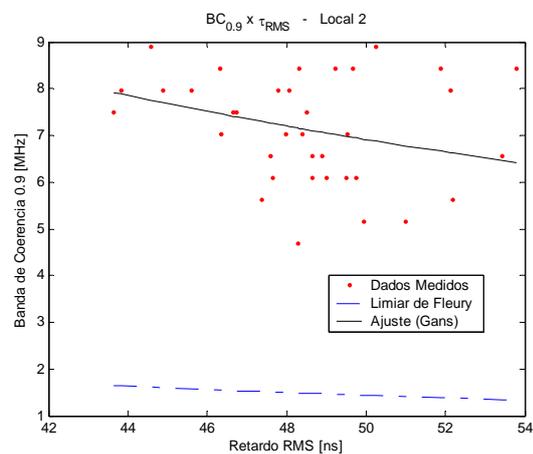
(a)



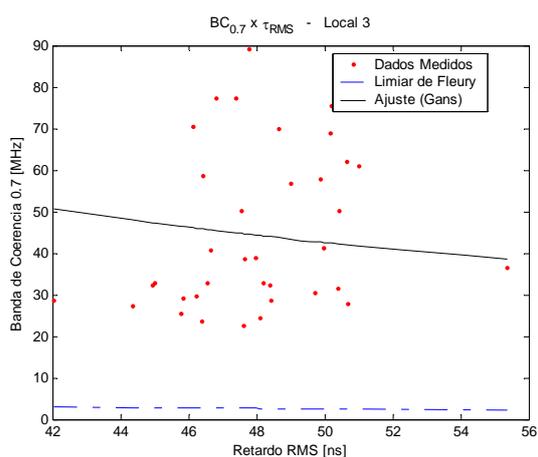
(b)



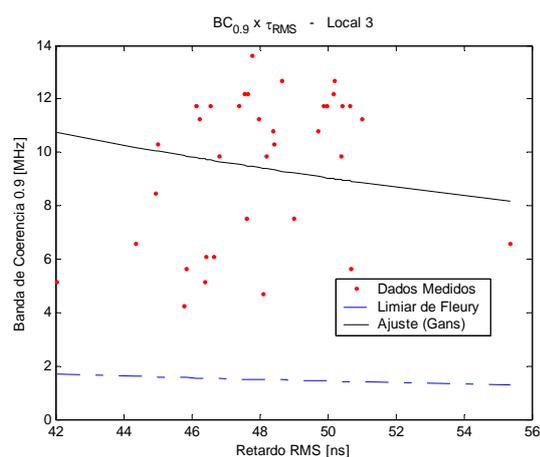
(c)



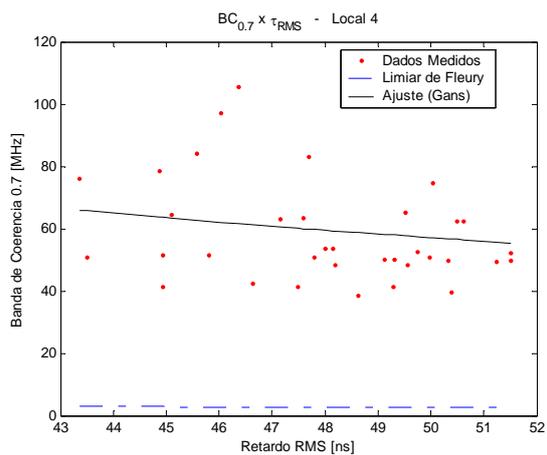
(d)



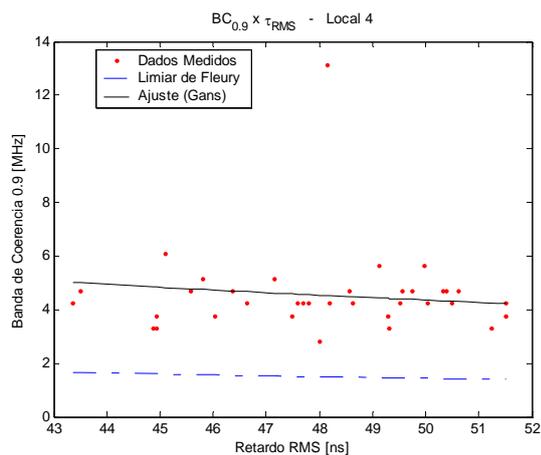
(e)



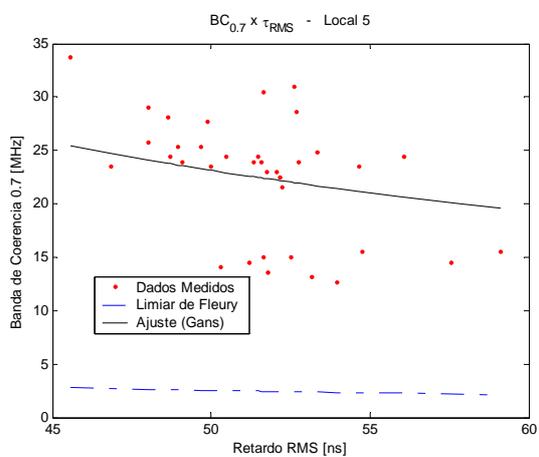
(f)



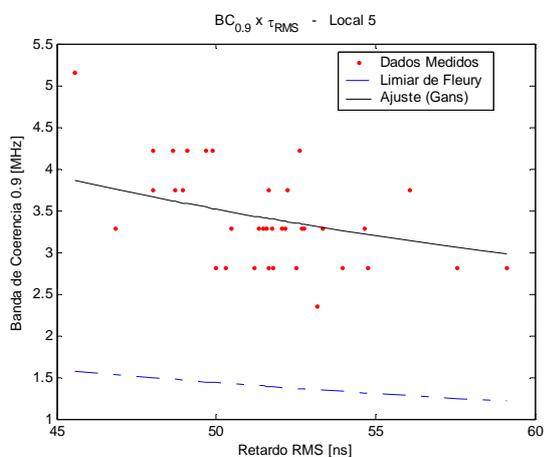
(g)



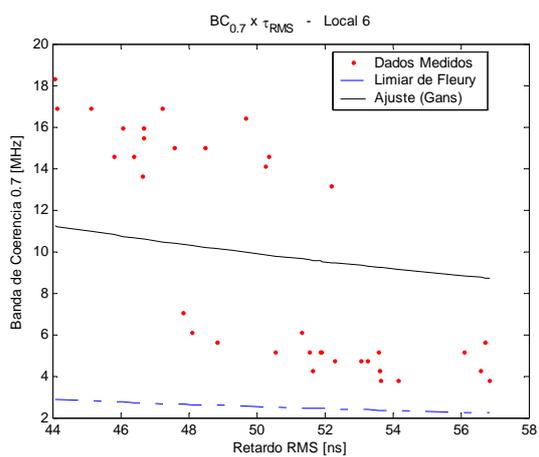
(h)



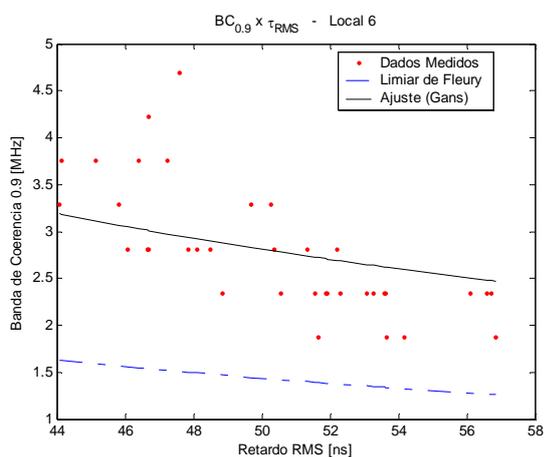
(i)



(j)



(l)



(m)

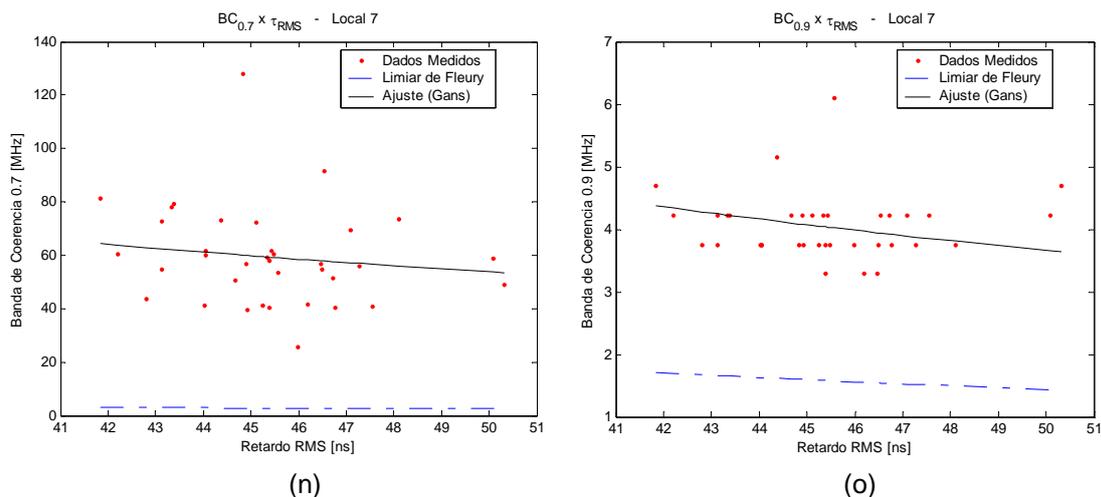
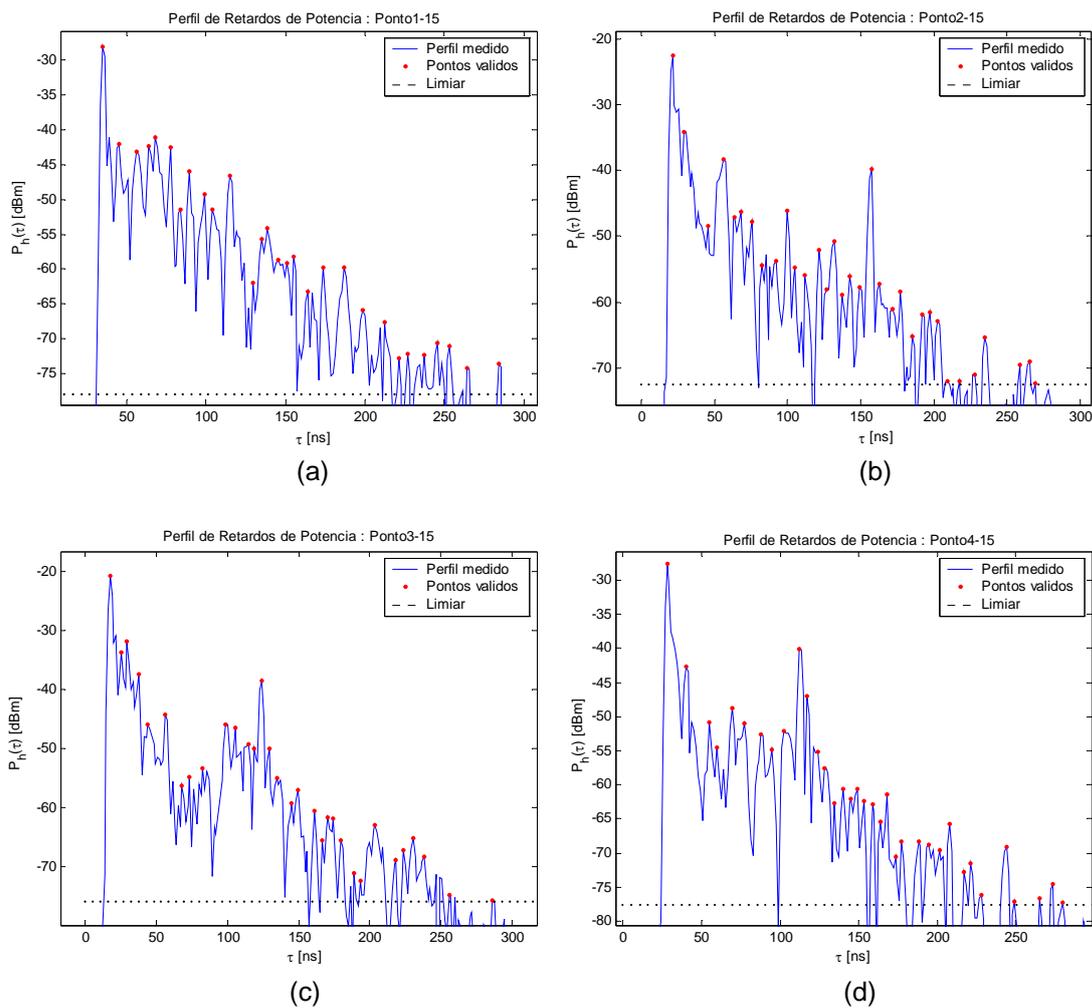


Fig C.12 – Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente A6.

Gráficos de perfil de retardos de potência:



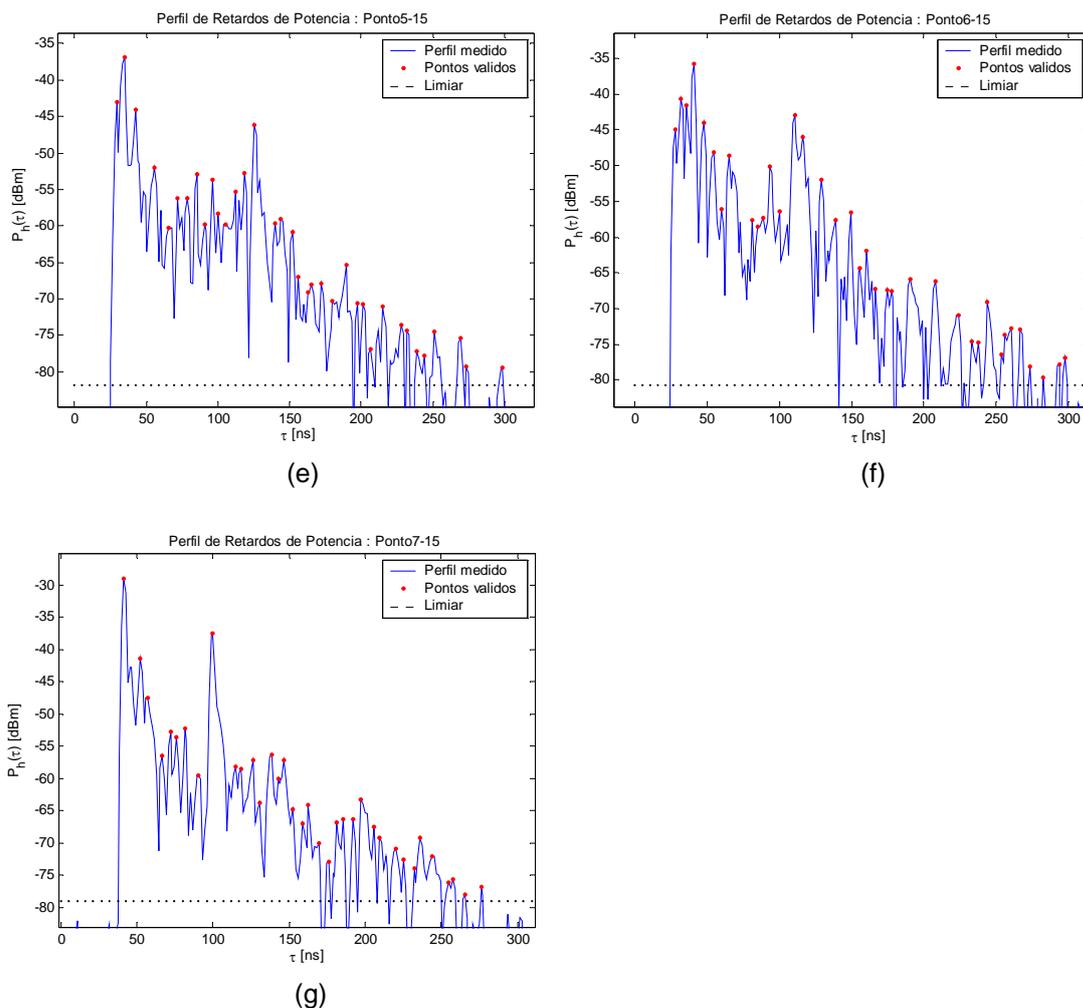


Fig C.13 – Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente A6.

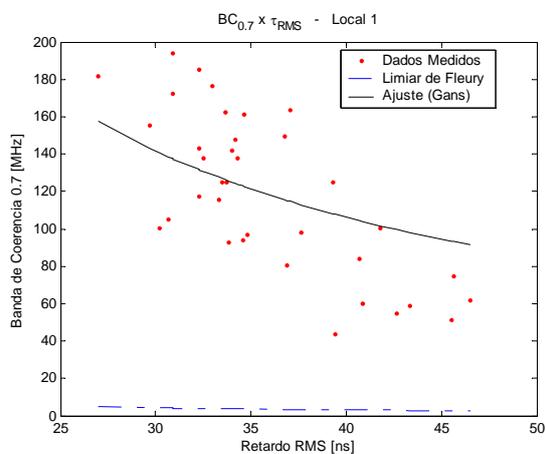
C.7 Resultados para o Ambiente A7: Biblioteca da Engenharia *indoor-outdoor*

Ambiente	Situação	Retardo Médio [ns]			Espalhamento de Retardos [ns]			
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio	Razão
Local 1	LOS	32,55	29,02	10,64	35,85	34,24	4,90	0,14
Local 2	LOS	38,36	38,20	3,09	35,80	35,48	2,58	0,07
Local 3	NLOS	63,11	63,02	5,14	49,69	49,11	4,55	0,09
Local 4	NLOS	53,07	51,73	6,31	40,51	39,58	5,49	0,14

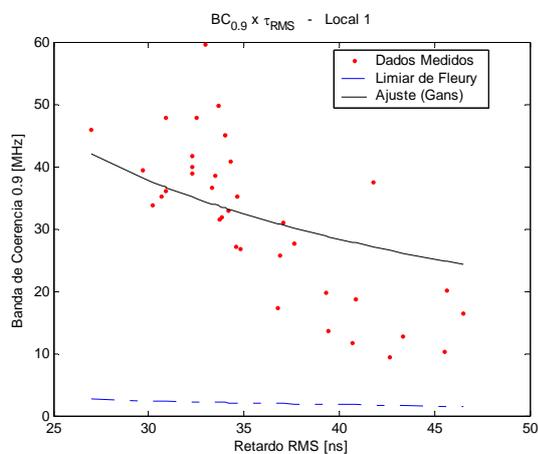
Ambiente	Situação	Banda Coer. 0,7 [MHz]			Banda Coer. 0,9 [MHz]		
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
Local 1	LOS	118,65	120,94	42,51	31,48	33,28	12,58
Local 2	LOS	120,33	124,22	20,28	27,70	25,08	8,16
Local 3	NLOS	8,88	8,20	2,81	3,03	2,81	0,31
Local 4	NLOS	32,50	29,06	18,24	6,09	4,92	3,06

Ambiente	Situação	NMP	X [dB]	Limiar [dBm]	α para BC 0,7	α para BC 0,9
Local 1	LOS	27	55	-78,01	0,24	0,88
Local 2	LOS	25	50	-76,86	0,23	1,01
Local 3	NLOS	30	40	-81,73	2,29	6,73
Local 4	NLOS	26	40	-77,47	0,75	4,07

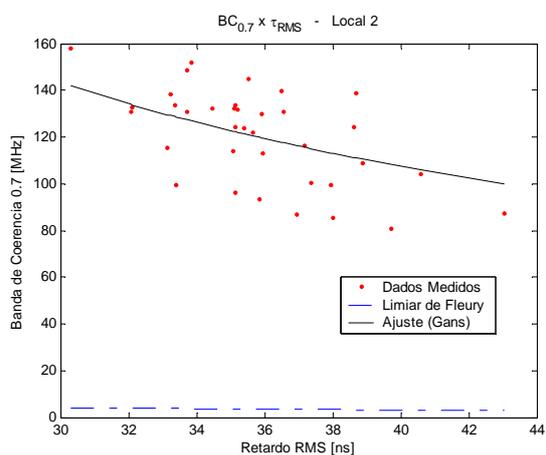
Tabela C.7 - Resultados obtidos nos Ambientes A7.

Gráficos de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos:

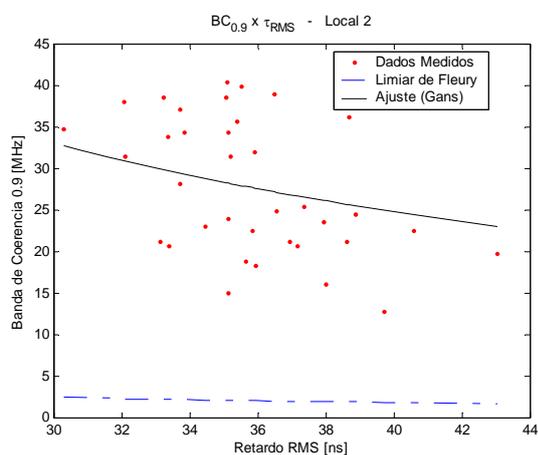
(a)



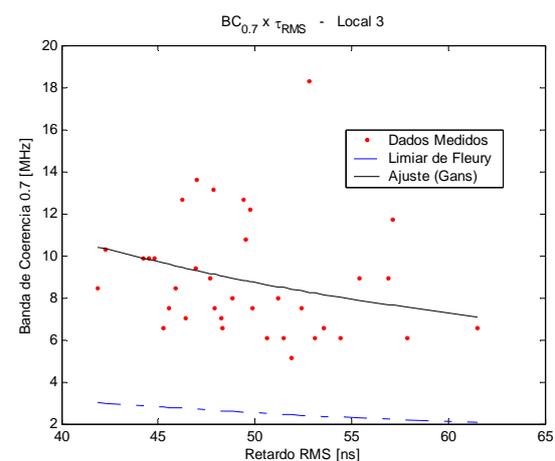
(b)



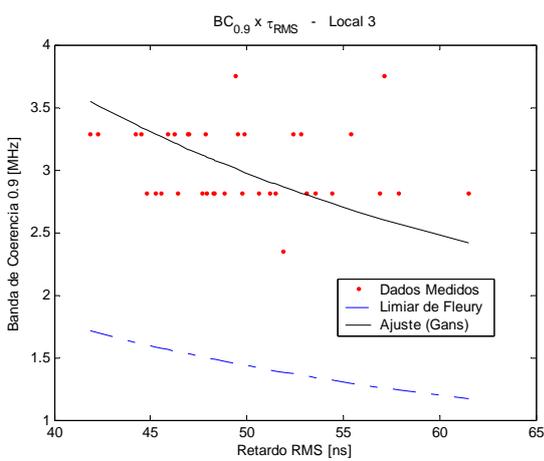
(c)



(d)



(e)



(f)

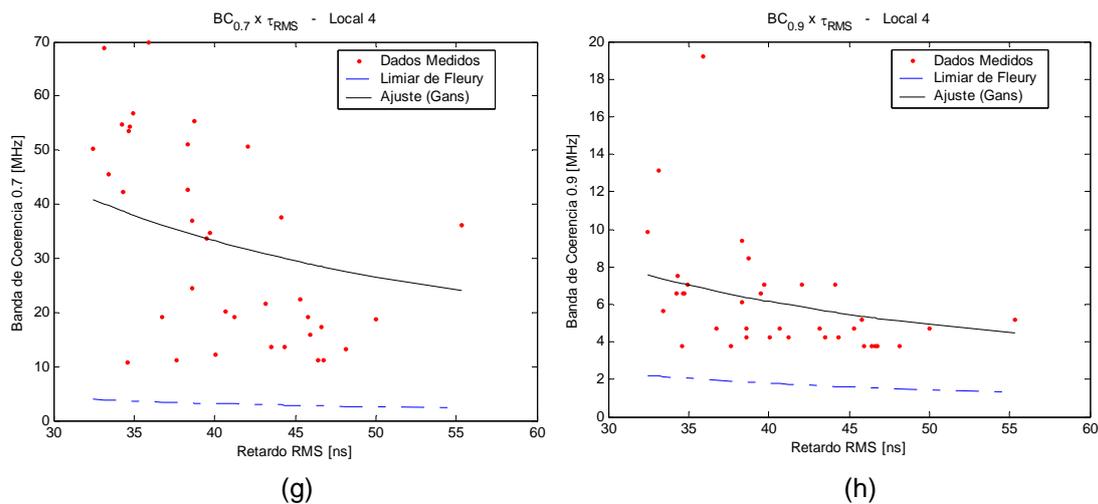


Fig C.14 – Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente A7.

Gráficos de perfil de retardos de potência:

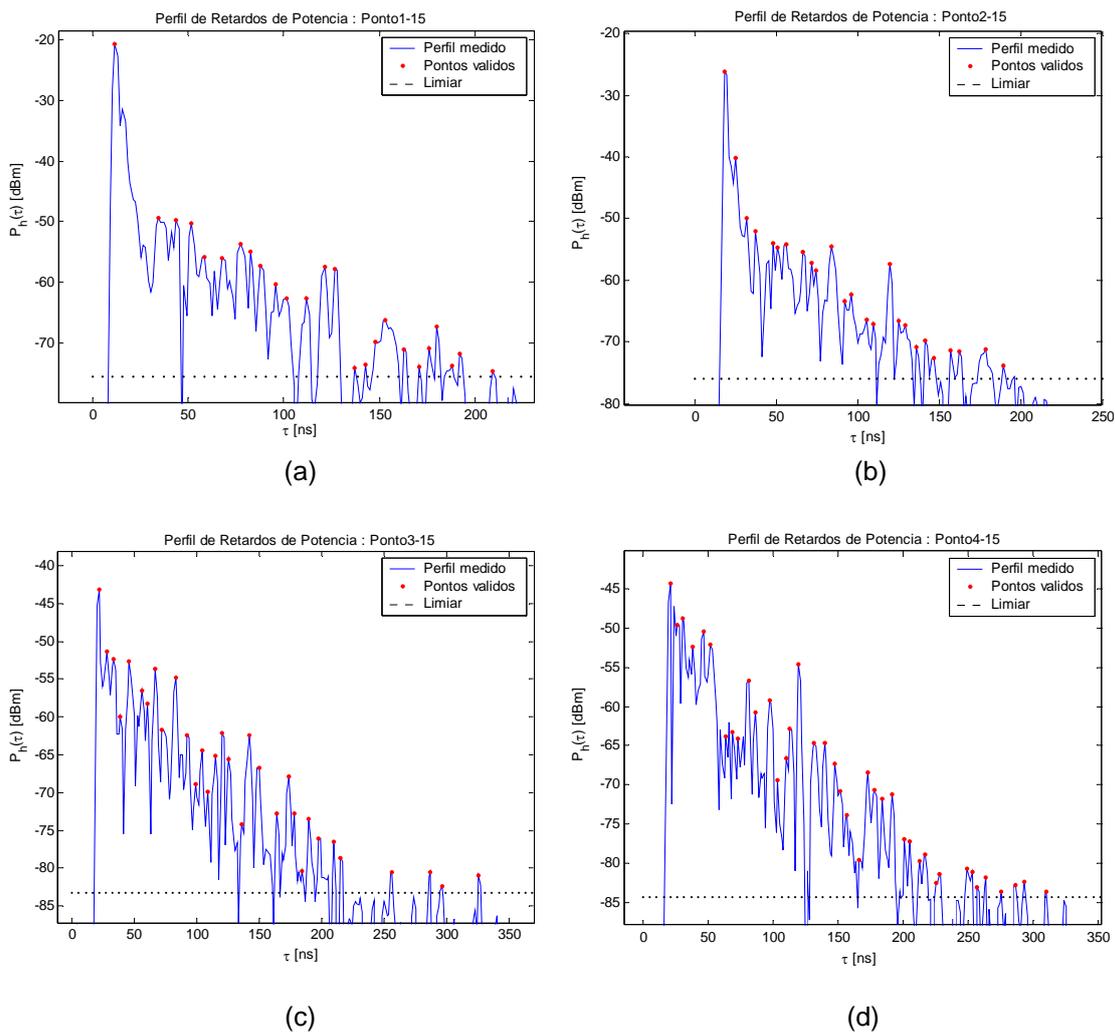


Fig C.15 – Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente A7.

C.8 Resultados para o Ambiente A8: Parede do Terceiro Andar do Bloco E

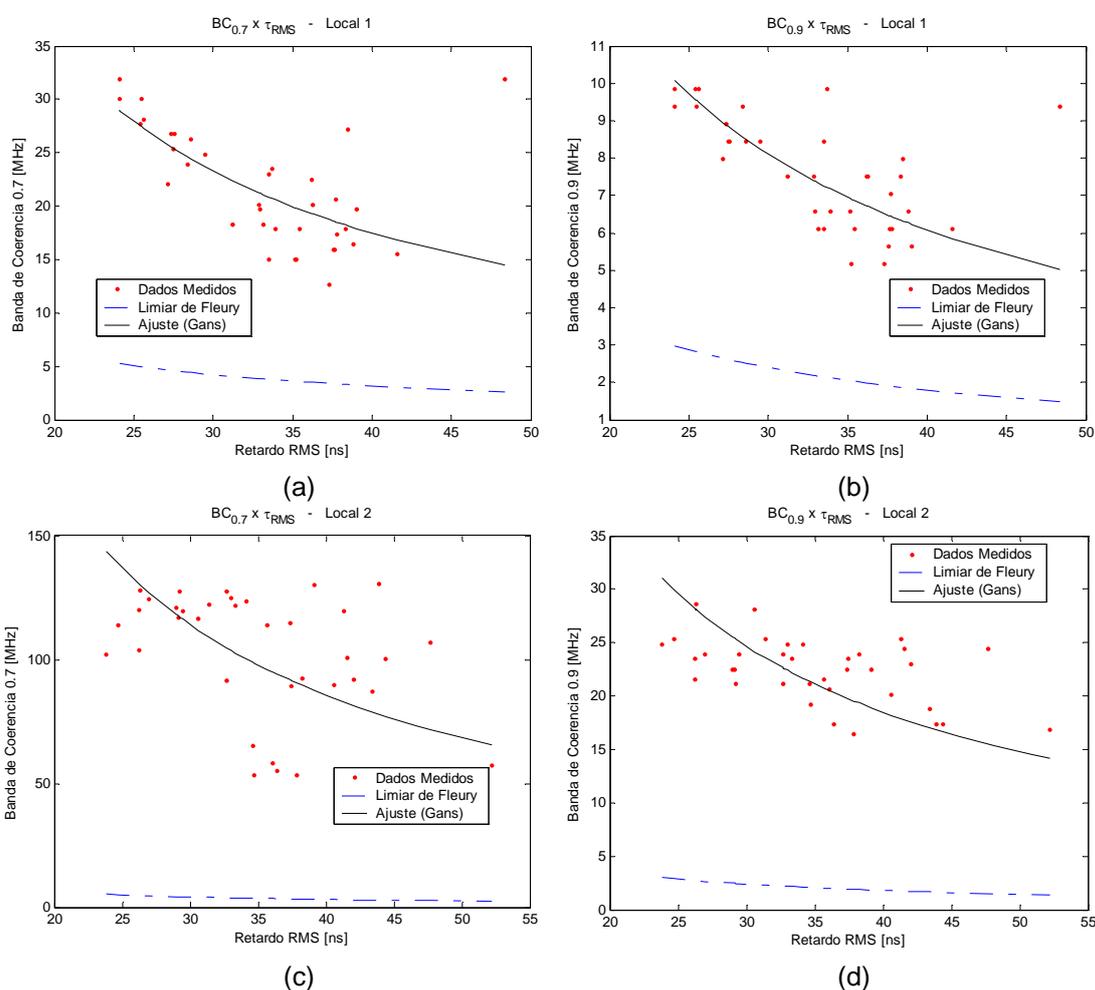
Ambiente	Situação	Retardo Médio [ns]			Espalhamento de Retardos [ns]			
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio	Razão
In-Out	NLOS	43,68	44,96	6,35	33,25	33,64	5,58	0,17
Out-Out	LOS	25,69	23,74	9,17	35,11	34,68	6,80	0,19
Out-In	NLOS	29,11	29,58	3,80	12,12	12,21	3,20	0,26
Out-Out	LOS	26,59	25,50	6,62	33,64	33,08	4,16	0,12

Ambiente	Situação	Banda Coer. 0,7 [MHz]			Banda Coer. 0,9 [MHz]		
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
In-Out	NLOS	21,68	20,39	5,36	7,58	7,50	1,48
Out-Out	LOS	103,13	113,91	24,53	22,37	22,73	3,01
Out-In	NLOS	18,37	19,69	5,03	4,54	4,69	0,77
Out-Out	LOS	47,06	41,25	18,97	15,35	15,00	1,78

Ambiente	Situação	NMP	X [dB]	Limiar [dBm]	α para BC 0,7	α para BC 0,9
In-Out	NLOS	23	40	-81,65	1,43	4,11
Out-Out	LOS	23	50	-70,34	0,29	1,35
Out-In	NLOS	5	20	-58,35	5,07	20,64
Out-Out	LOS	24	50	-69,11	0,65	1,99

Tabela C.8 - Resultados obtidos nos Ambientes A8.

Gráficos de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos:



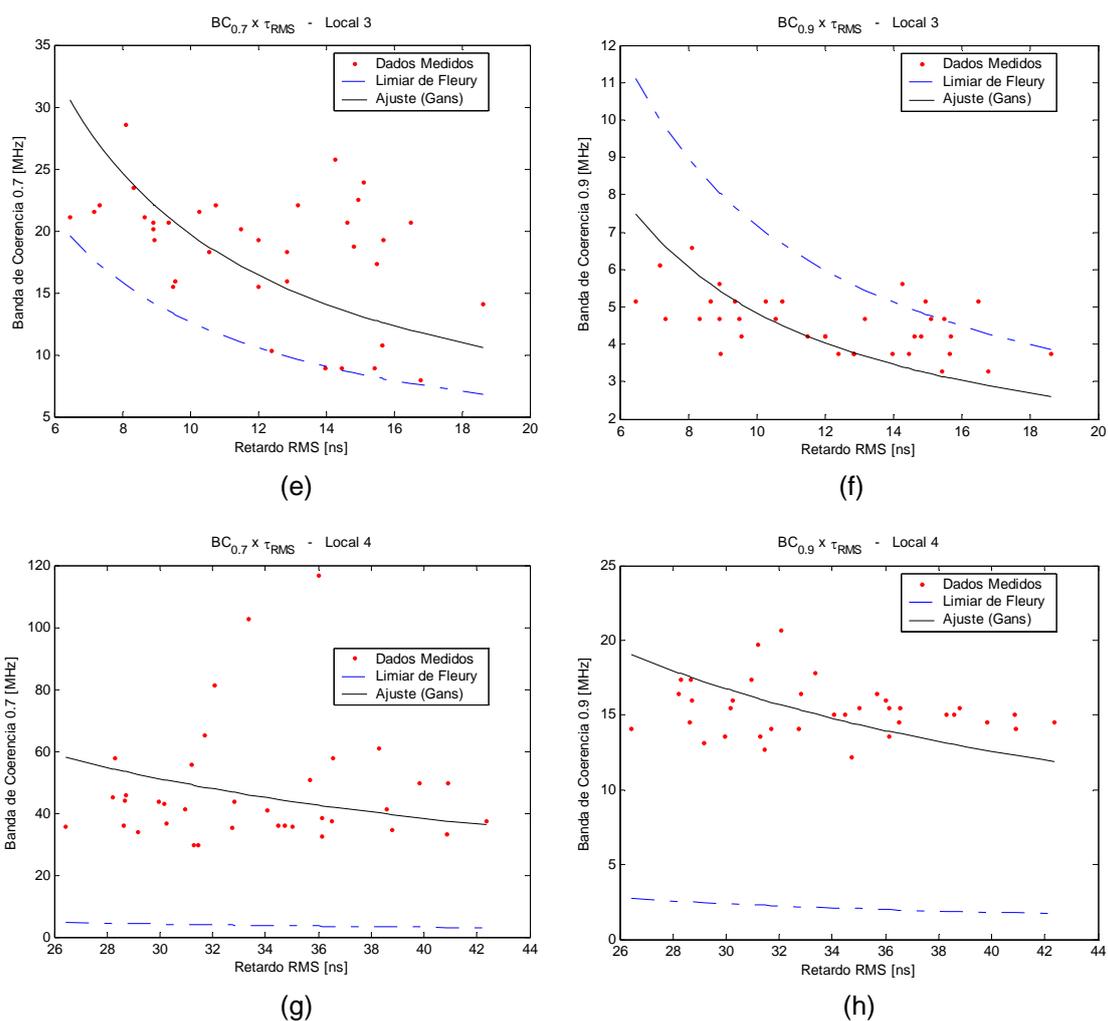
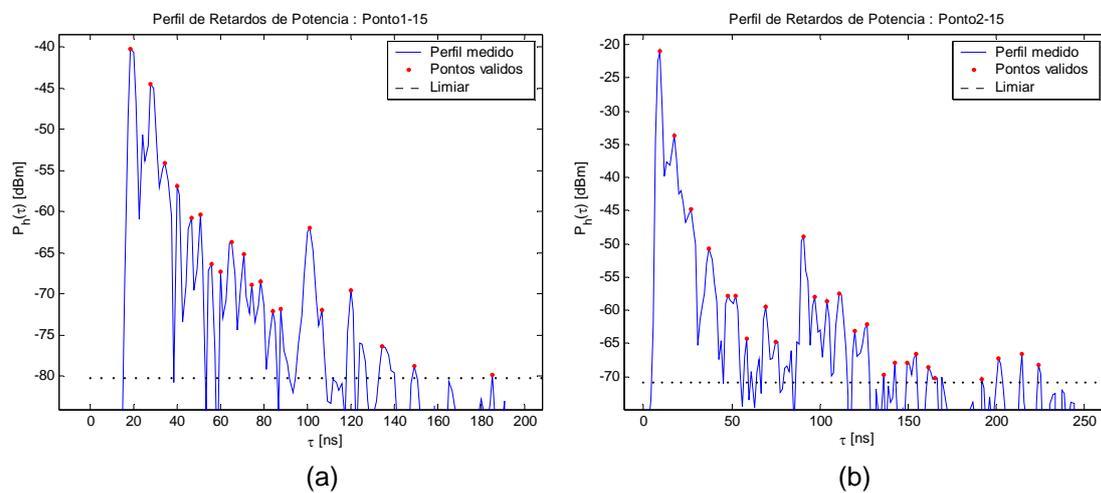


Fig C.16 – Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente A8.

Gráficos de perfil de retardos de potência:



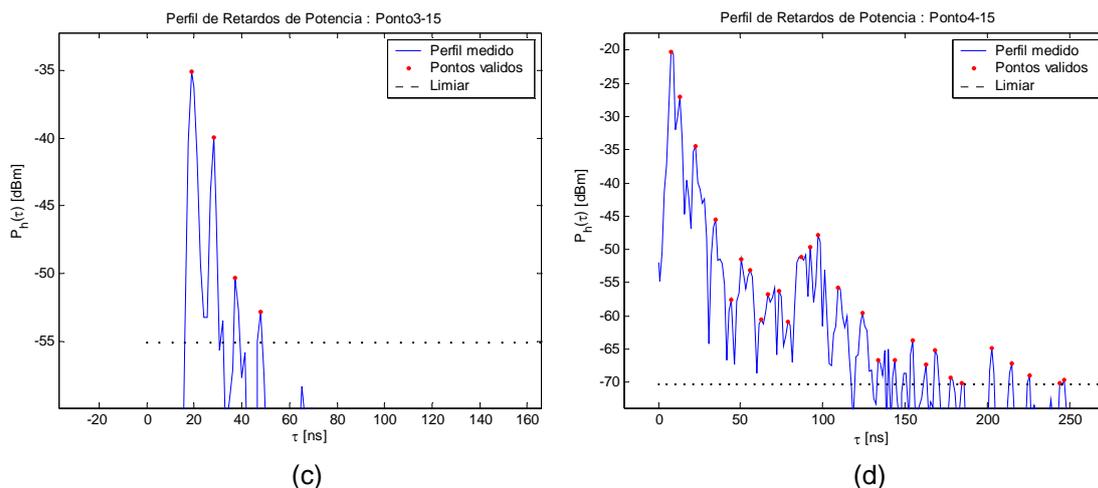


Fig C.17 – Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente A8.

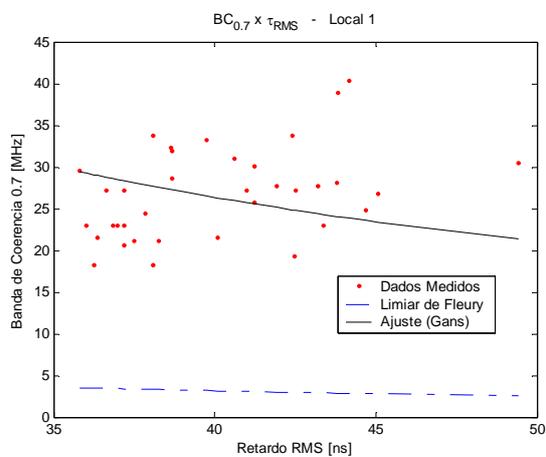
C.9 Resultados para o Ambiente B1: Ao longo da Saída da Biblioteca da Engenharia

Ambiente	Situação	Retardo Médio [ns]			Espalhamento de Retardos [ns]			
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio	Razão
Local 1	LOS	49,61	48,46	3,97	40,09	39,23	3,26	0,08
Local 2	LOS	69,95	70,32	3,29	37,02	37,43	3,46	0,09
Local 3	LOS	89,32	88,73	4,15	42,05	41,98	3,89	0,09
Local 4	LOS	46,21	45,08	4,27	40,11	40,37	4,84	0,12
Local 5	LOS	72,81	71,96	5,30	44,07	42,74	4,86	0,11
Local 6	LOS	82,91	83,05	9,21	32,45	38,13	11,91	0,37
Local6'		129,43	129,38	7,22	53,33	53,11	4,40	0,08

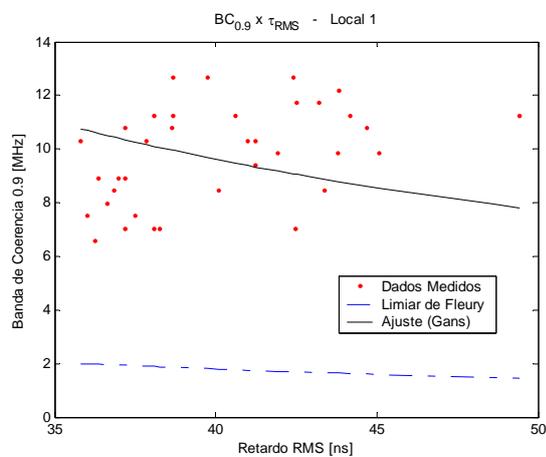
Ambiente	Situação	Banda Coer. 0,7 [MHz]			Banda Coer. 0,9 [MHz]		
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
Local 1	LOS	24,67	24,67	0,68	26,78	27,19	5,41
Local 2	LOS	44,89	45,33	0,96	42,42	43,13	12,21
Local 3	LOS	59,74	59,33	1,74	40,48	41,25	5,82
Local 4	LOS	22,70	22,67	1,08	39,87	39,61	8,34
Local 5	LOS	45,07	45,33	1,00	41,16	36,09	14,86
Local 6	LOS	62,85	62,67	0,96	19,34	16,64	10,18

Ambiente	Situação	NMP	X [dB]	Limiar [dBm]	α para BC 0,7	α para BC 0,9
Local 1	LOS	27	45	-75,35	0,95	2,60
Local 2	LOS	20	40	-75,40	0,65	2,83
Local 3	LOS	25	40	-82,09	0,60	2,46
Local 4	LOS	16	35	-65,72	0,65	2,55
Local 5	LOS	13	30	-73,57	0,56	4,20
Local 6	LOS	6	20	-69,22	4,03	41,77
Local6'		23	35	-84,22	0,97	9,58

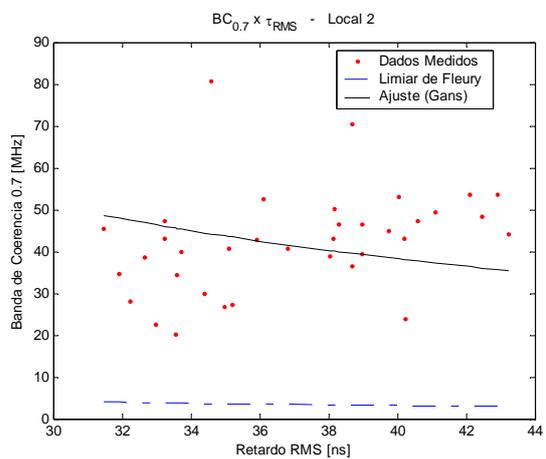
Tabela C.9 - Resultados obtidos nos Ambientes B1.

Gráficos de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos:

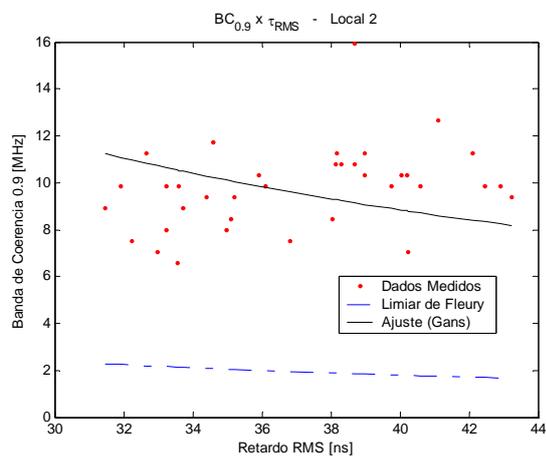
(a)



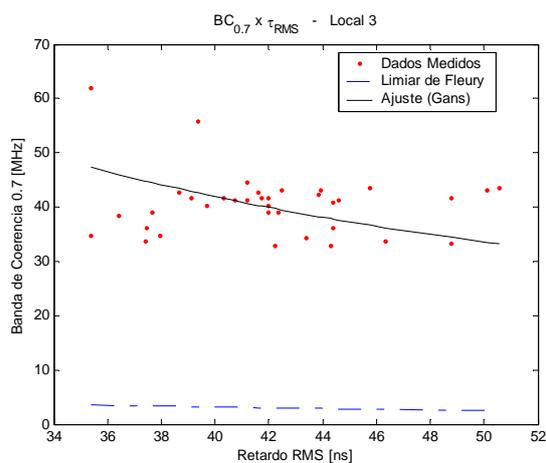
(b)



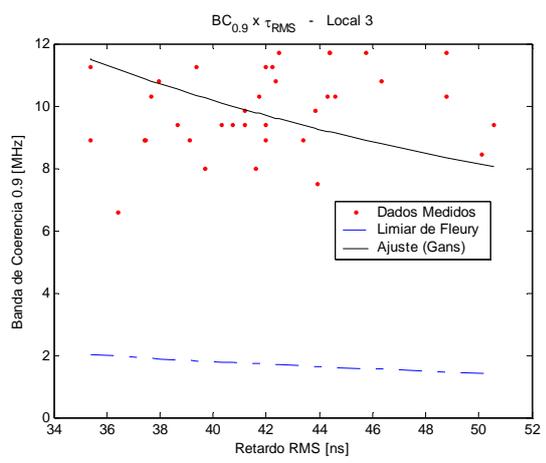
(c)



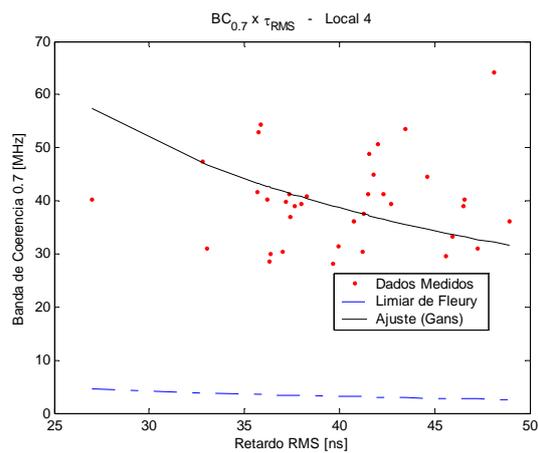
(d)



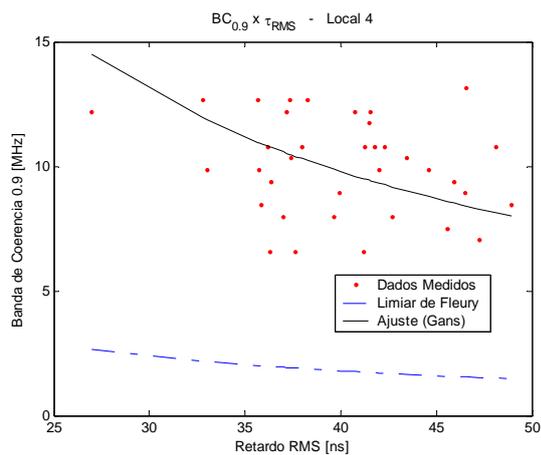
(e)



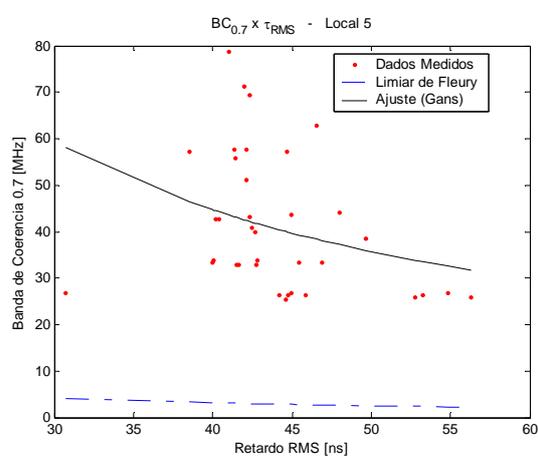
(f)



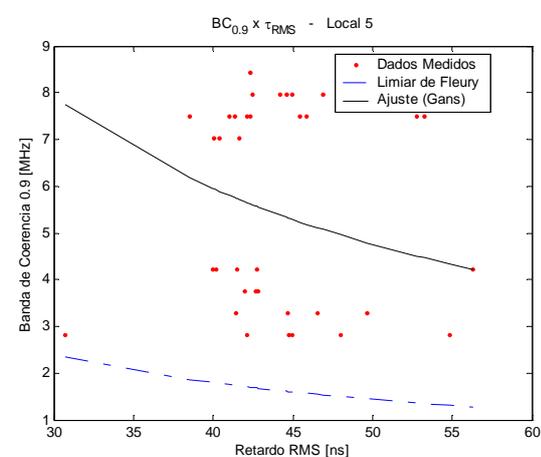
(g)



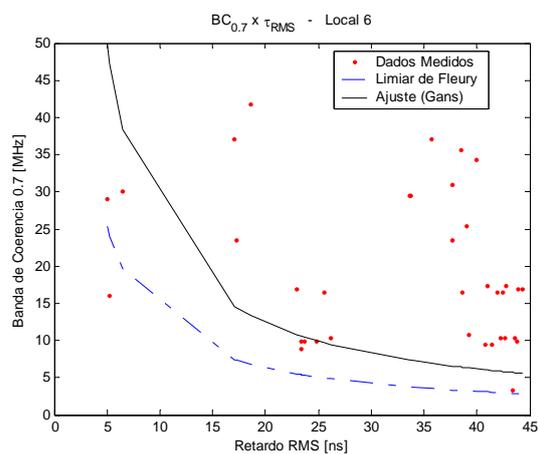
(h)



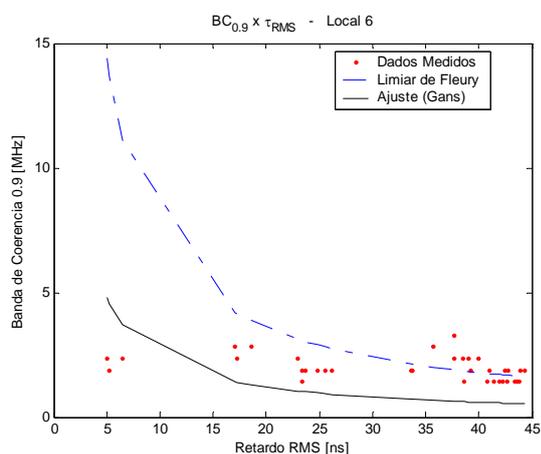
(i)



(j)



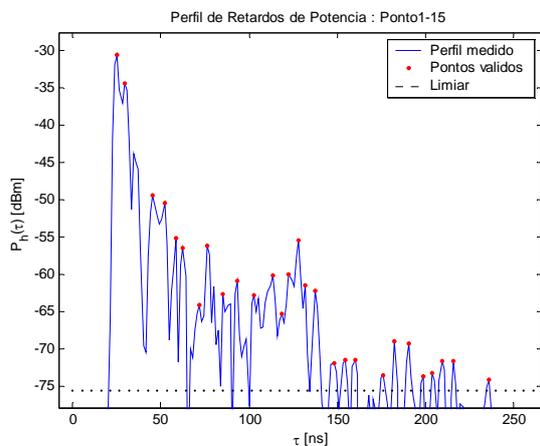
(l)



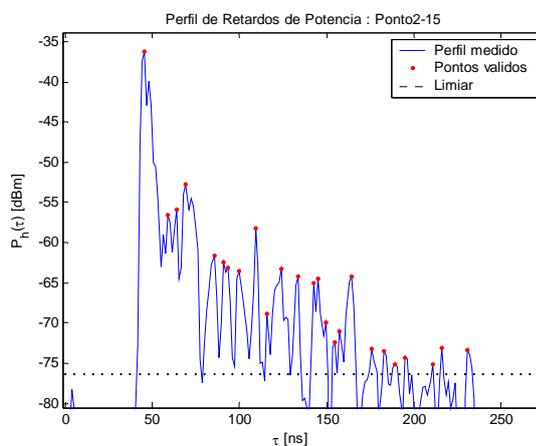
(m)

Fig C.18 – Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente B1.

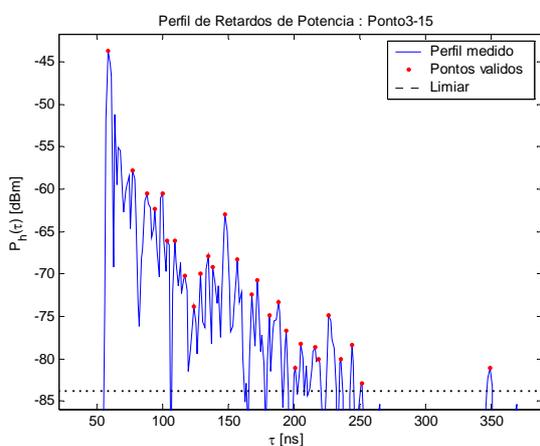
Gráficos de perfil de retardos de potência:



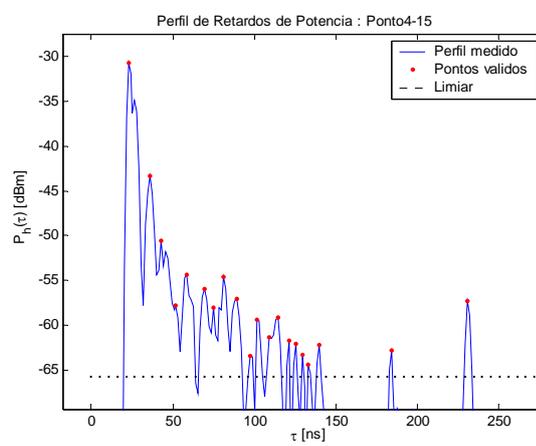
(a)



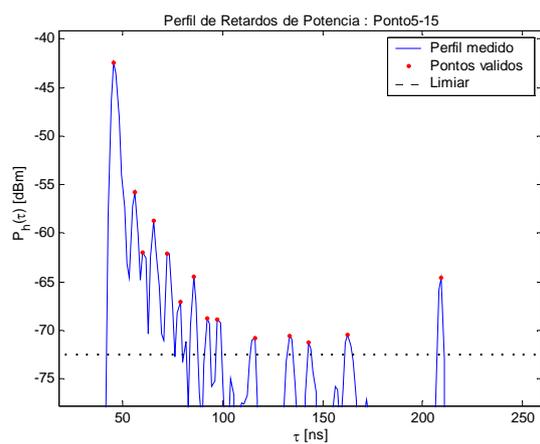
(b)



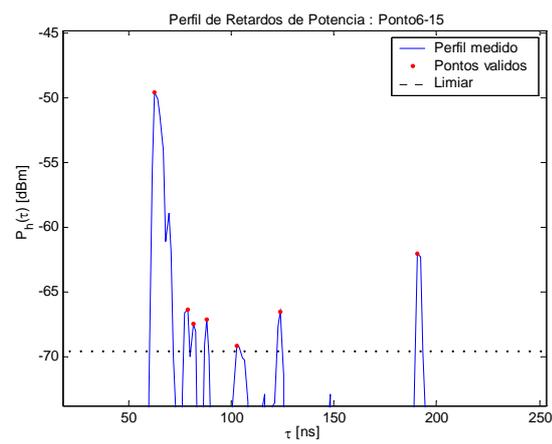
(c)



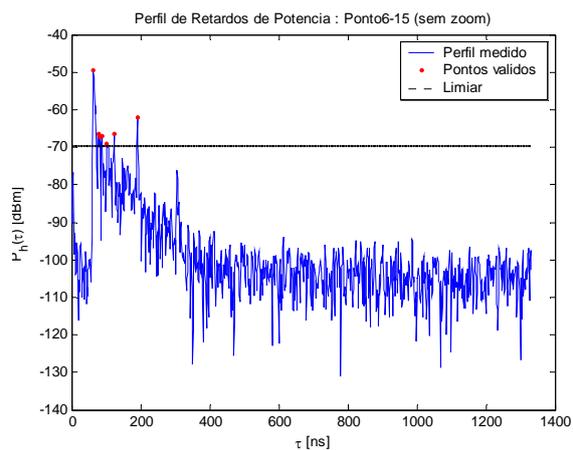
(d)



(e)



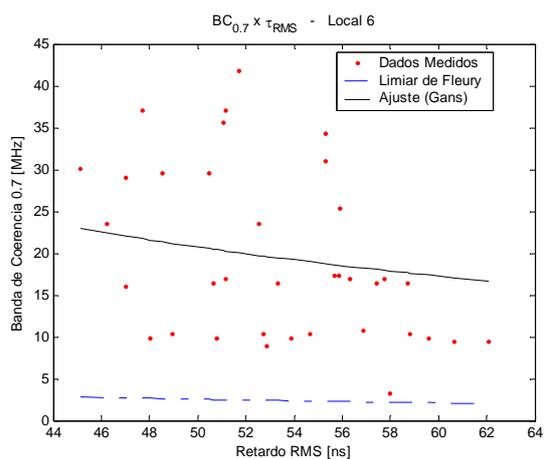
(f)



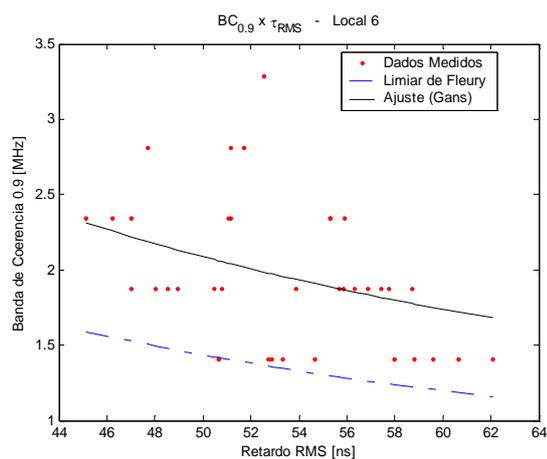
(g)

Fig C.19 – Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente B1.

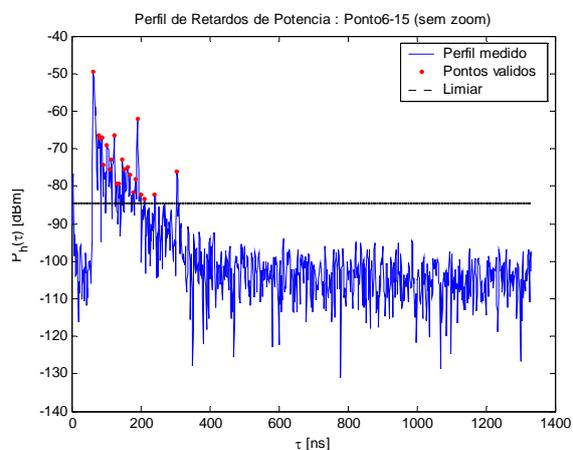
As figuras seguintes são para o Local 1, fazendo-se $X = 35$ (ao invés de 20), mas descartando-se o ruído de início de perfil.



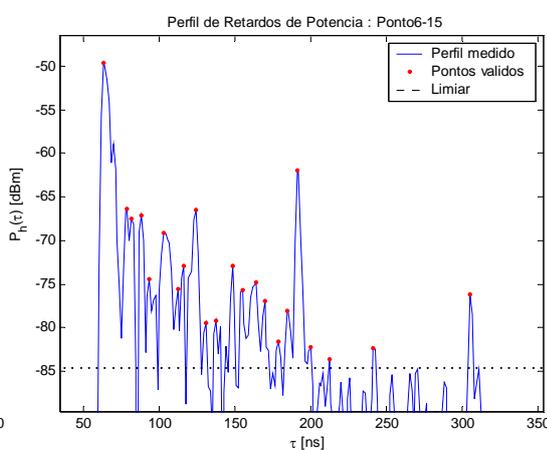
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig C.20 – Banda de coerência de 0,7 (a) e de 0,9 (b) x o espalhamento de retardos e perfil de retardos de potência no ponto 15 do grid sem zoom (c) e com zoom (d).

C.10 Resultados para o Ambiente B2: Ao longo da Saída do *Hall* do Bloco D

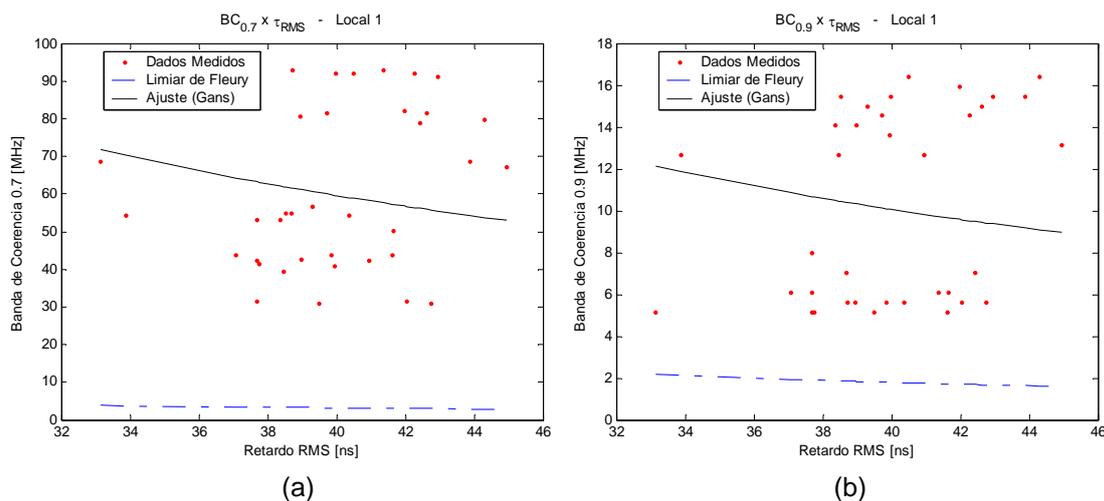
Ambiente	Situação	Retardo Médio [ns]			Espalhamento de Retardos [ns]			
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio	Razão
Local 1	LOS	59,05	59,15	3,08	40,02	39,90	2,60	0,06
Local 2	LOS	76,47	74,72	8,69	40,13	39,87	3,96	0,10
Local 3	LOS	88,87	85,87	7,98	31,15	29,07	5,04	0,16
Local 4	LOS	57,83	55,53	7,31	27,30	27,12	4,02	0,15
Local 5	LOS	56,29	56,19	5,02	40,39	40,66	3,00	0,07
Local 6	LOS	53,79	54,23	3,34	32,84	32,95	2,77	0,08

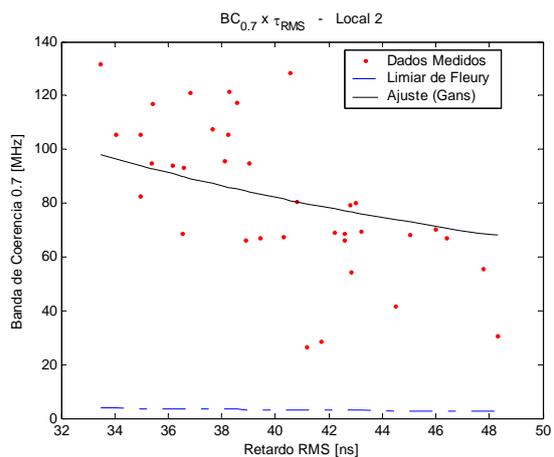
Ambiente	Situação	Banda Coer. 0,7 [MHz]			Banda Coer. 0,9 [MHz]		
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
Local 1	LOS	60,43	54,61	21,02	10,23	10,31	4,53
Local 2	LOS	81,63	79,69	27,84	7,85	5,63	4,83
Local 3	LOS	31,37	28,36	16,53	3,16	3,28	0,59
Local 4	LOS	35,18	39,84	18,25	4,58	4,69	0,63
Local 5	LOS	60,78	55,31	25,47	4,66	4,69	0,49
Local 6	LOS	49,54	51,80	13,62	5,12	4,69	1,11

Ambiente	Situação	NMP	X [dB]	Limiar [dBm]	α para BC 0,7	α para BC 0,9
Local 1	LOS	19	35	-85,93	0,42	2,48
Local 2	LOS	19	35	-86,79	0,30	3,14
Local 3	LOS	12	25	-83,55	1,04	10,45
Local 4	LOS	8	25	-77,40	1,08	8,27
Local 5	LOS	19	35	-83,66	0,40	5,37
Local 6	LOS	13	30	-80,98	0,62	5,99

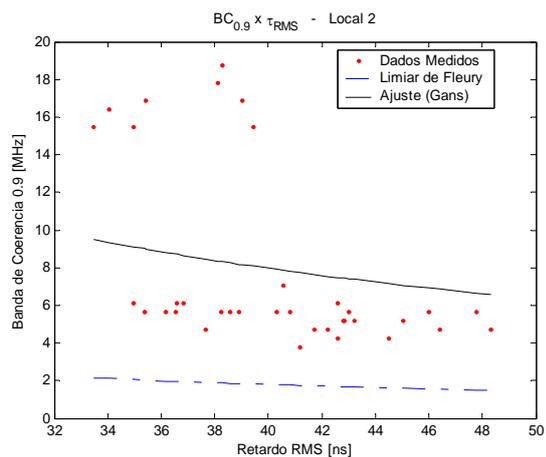
Tabela C.10 - Resultados obtidos nos Ambientes B2.

Gráficos de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos:

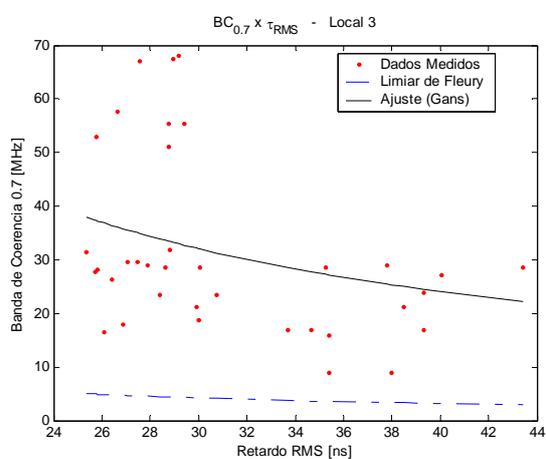




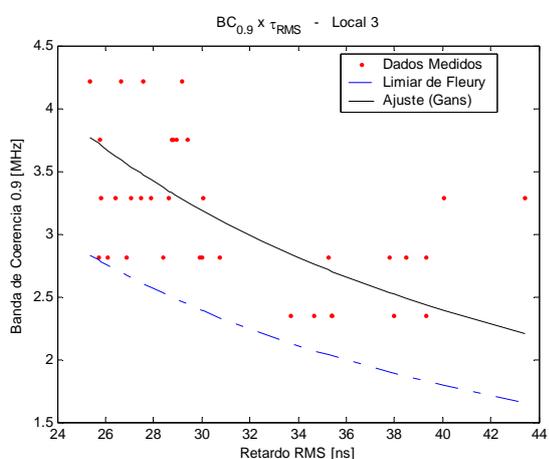
(c)



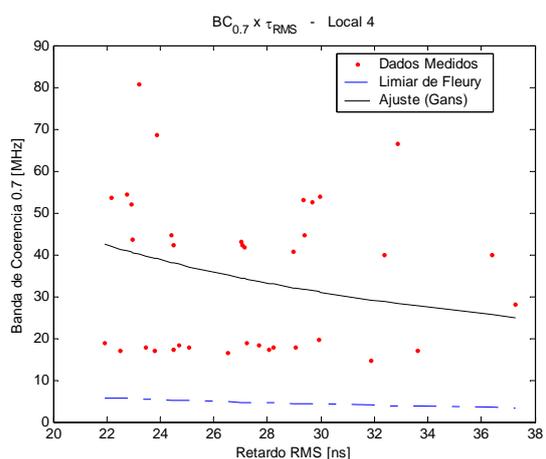
(d)



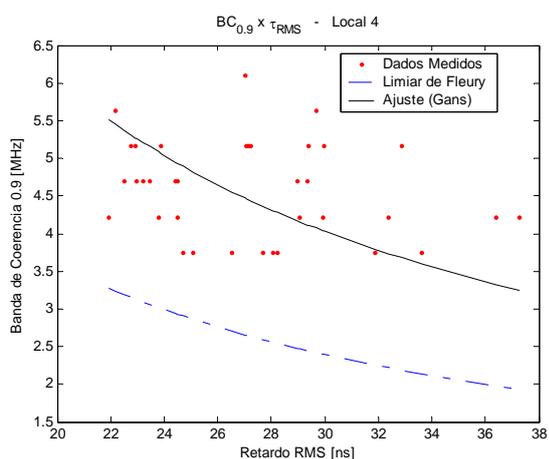
(e)



(f)



(g)



(h)

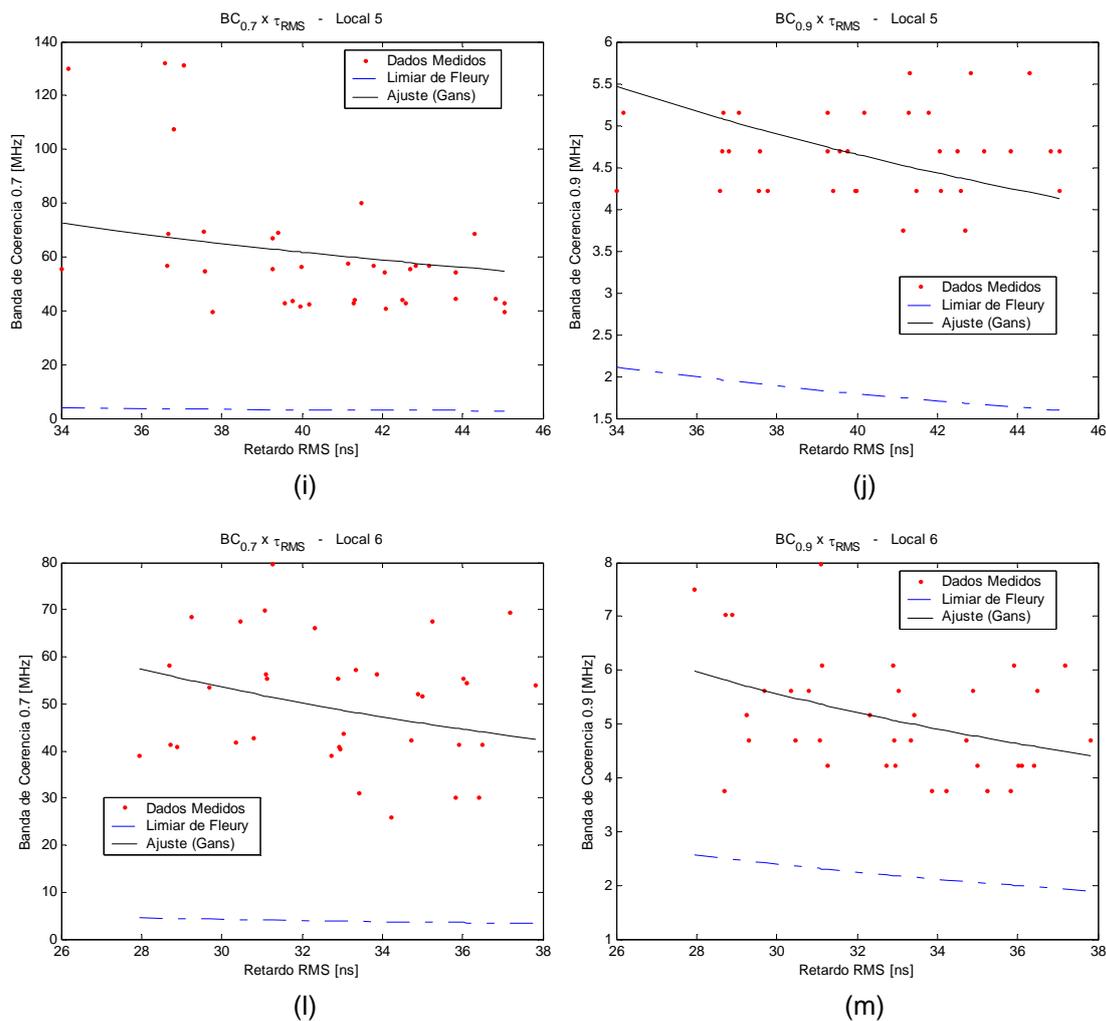
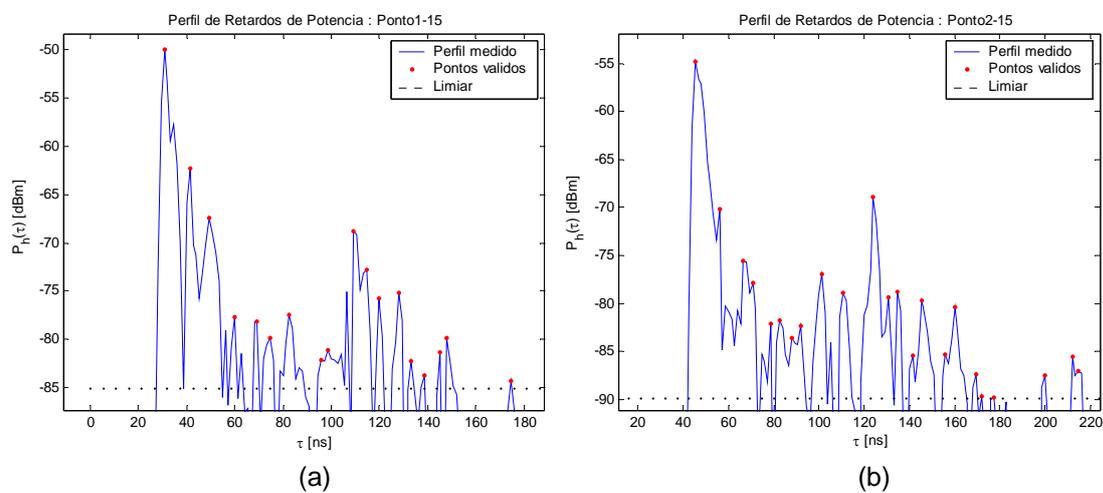


Fig C.21 – Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente B2.

Gráficos de perfil de retardos de potência:



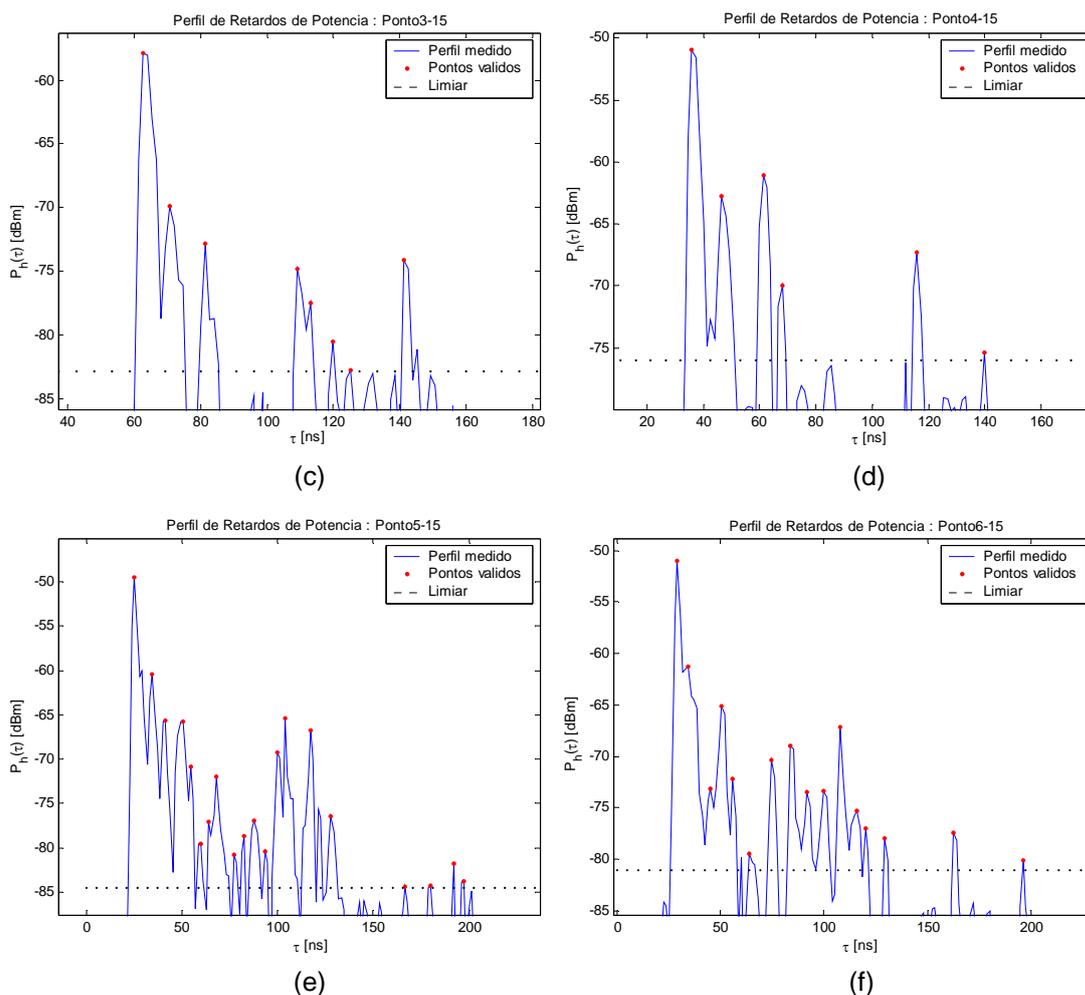


Fig C.22 – Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente B2.

C.11 Resultados para o Ambiente B3: *Pilotis* do Prédio da Faculdade de Geociências

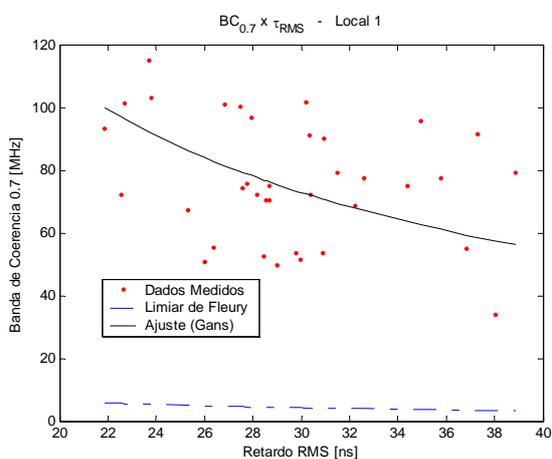
Ambiente	Situação	Retardo Médio [ns]			Espalhamento de Retardos [ns]			
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio	Razão
Local 1	LOS	60,90	59,95	6,25	29,63	28,86	4,40	0,15
Local 1'		70,57	66,21	11,52	41,16	41,27	4,06	0,10
Local 2	LOS	35,61	36,02	2,03	24,10	24,42	2,72	0,11
Local 2'		66,44	62,00	22,27	45,03	46,18	5,23	0,12
Local 3	LOS	47,81	42,81	13,37	28,44	28,84	5,15	0,18
Local 3'		80,67	80,32	8,88	42,17	42,32	2,91	0,07
Local 4	LOS	56,50	56,01	2,75	22,86	22,85	4,12	0,18
Local 4'		101,01	99,92	7,63	42,64	42,16	4,15	0,10
Local 5	LOS	37,70	36,80	6,14	34,71	34,15	3,62	0,10
Local 6	LOS	52,53	51,21	6,94	18,16	18,90	2,59	0,14
Local 6'		86,52	86,23	5,21	36,65	35,86	4,30	0,12

Ambiente	Situação	Banda Coer. 0,7 [MHz]			Banda Coer. 0,9 [MHz]		
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
Local 1	LOS	76,12	75,00	19,24	5,60	5,63	0,58
Local 2	LOS	105,73	104,53	17,40	23,29	25,31	5,81
Local 3	LOS	123,68	123,98	9,58	23,96	21,09	7,76
Local 4	LOS	164,91	167,11	11,78	20,31	20,63	2,97
Local 5	LOS	114,30	111,80	13,92	25,14	22,03	5,68
Local 6	LOS	75,94	71,48	24,48	12,77	12,89	5,64

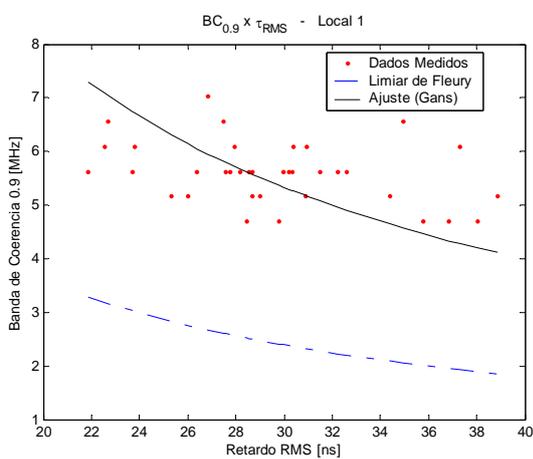
Ambiente	Situação	NMP	X [dB]	Limiar [dBm]	α para BC 0,7	α para BC 0,9
Local 1	LOS	14	35	-70,37	0,46	6,26
Local 1'		22	40	-75,37	0,32	4,41
Local 2	LOS	6	30	-60,35	0,40	1,82
Local 2'		16	40	-70,35	0,22	0,99
Local 3	LOS	7	30	-63,97	0,31	1,59
Local 3'		19	40	-73,97	0,19	1,00
Local 4	LOS	7	30	-65,85	0,28	2,30
Local 4'		20	40	-75,85	0,15	1,18
Local 5	LOS	21	45	-73,65	0,26	1,17
Local 6	LOS	7	30	-65,09	0,74	4,38
Local 6'		19	40	-75,09	0,36	2,14

Tabela C.11 - Resultados obtidos nos Ambientes B3.

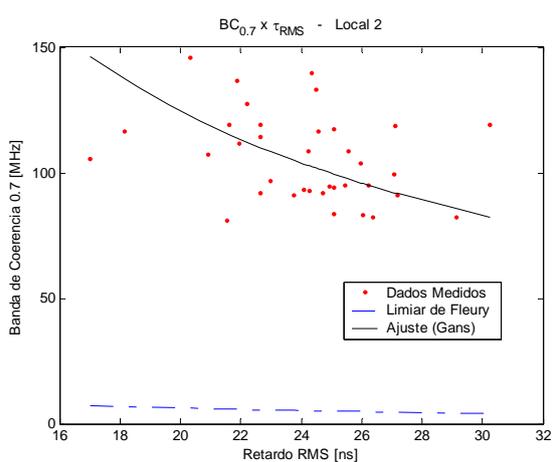
Gráficos de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos:



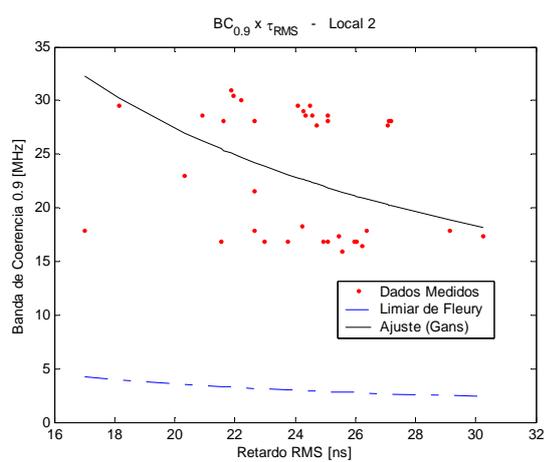
(a)



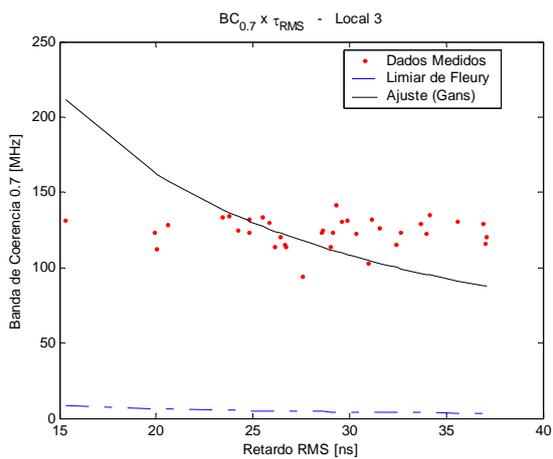
(b)



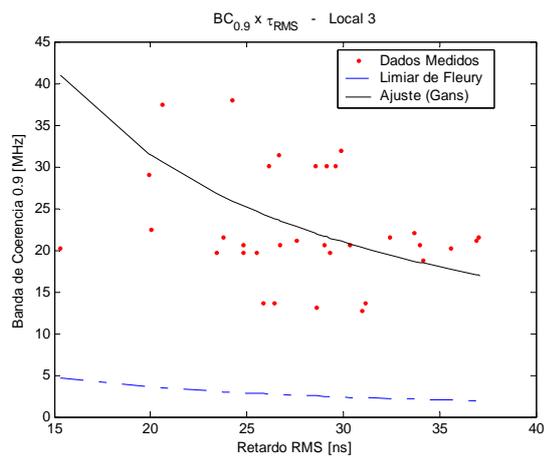
(c)



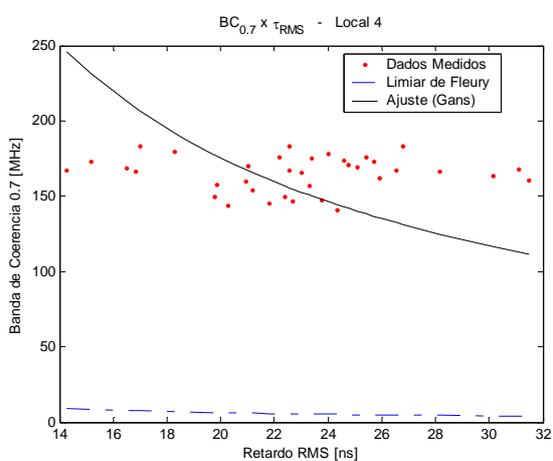
(d)



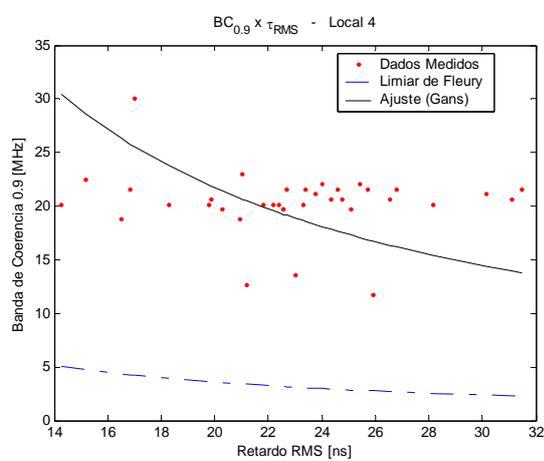
(e)



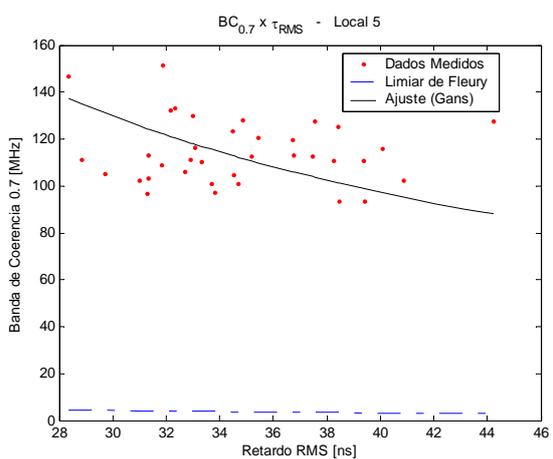
(f)



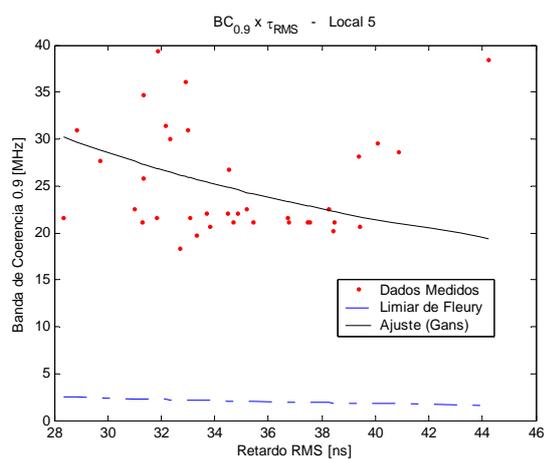
(g)



(h)



(i)



(j)

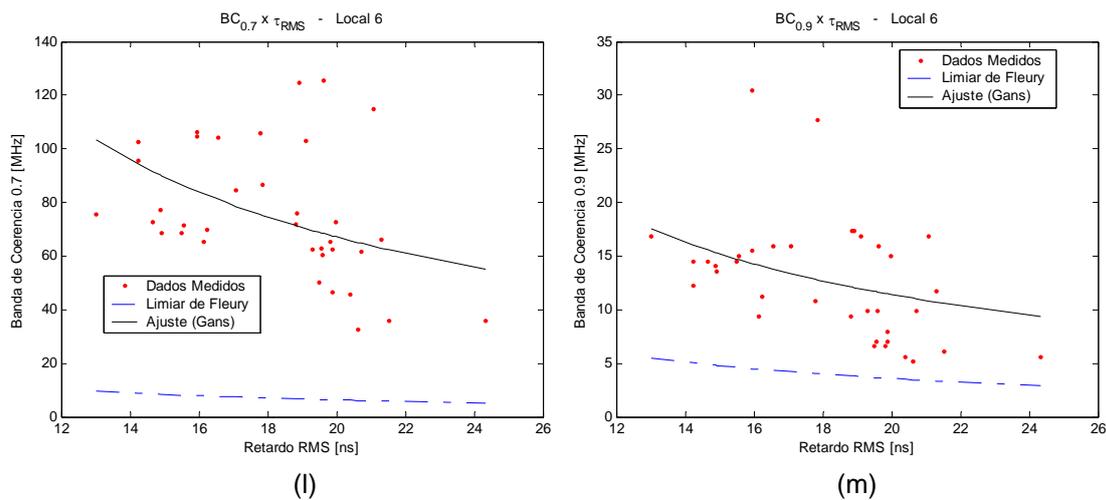
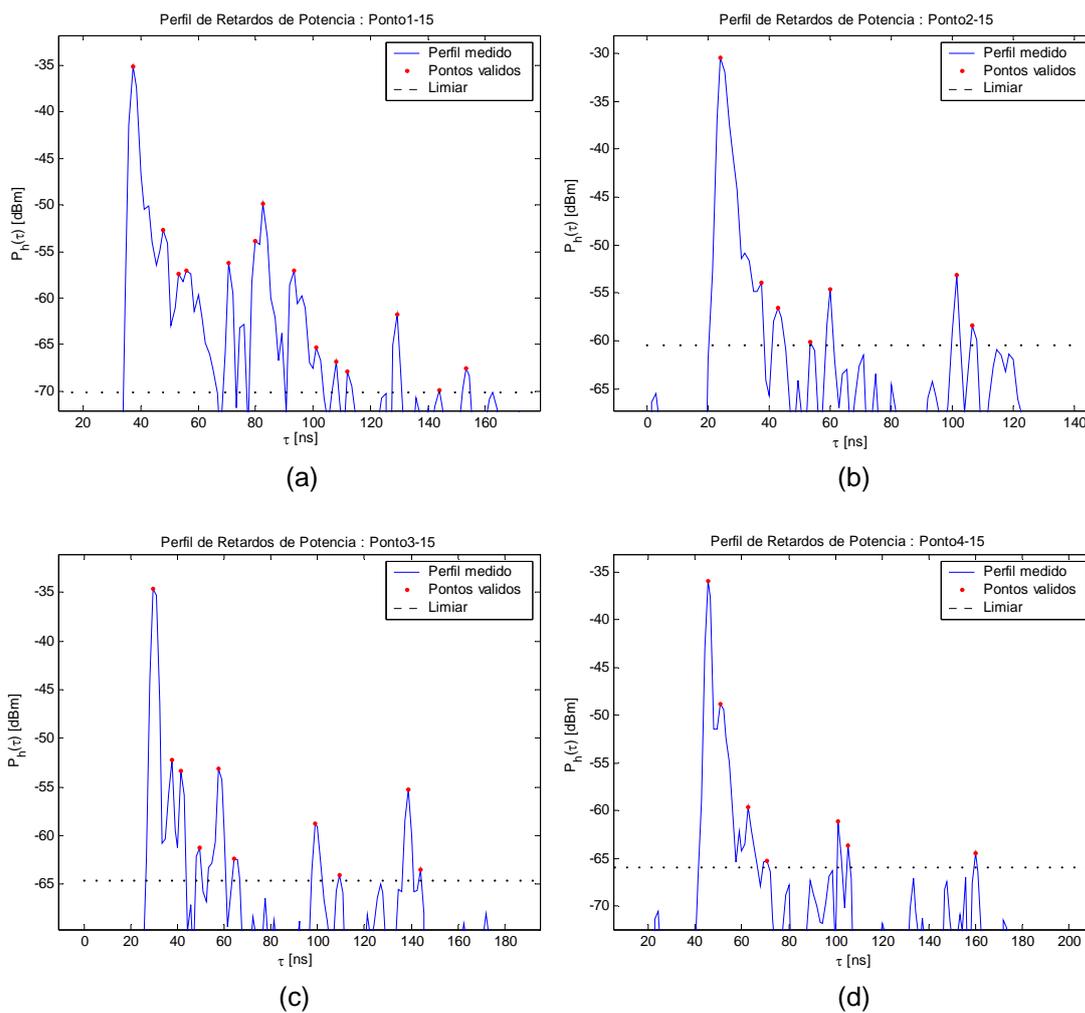


Fig C.23 – Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente B3.

Gráficos de perfil de retardos de potência:



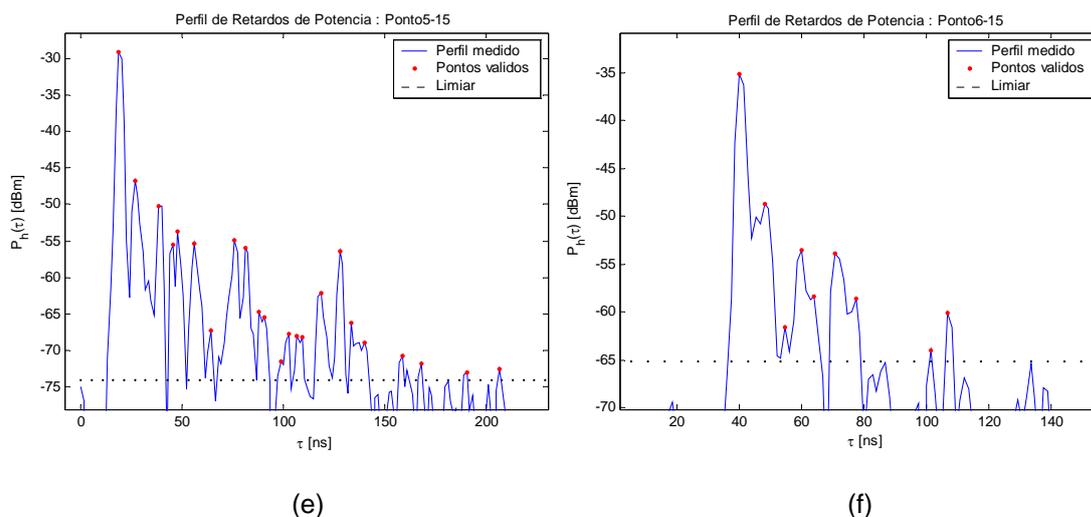
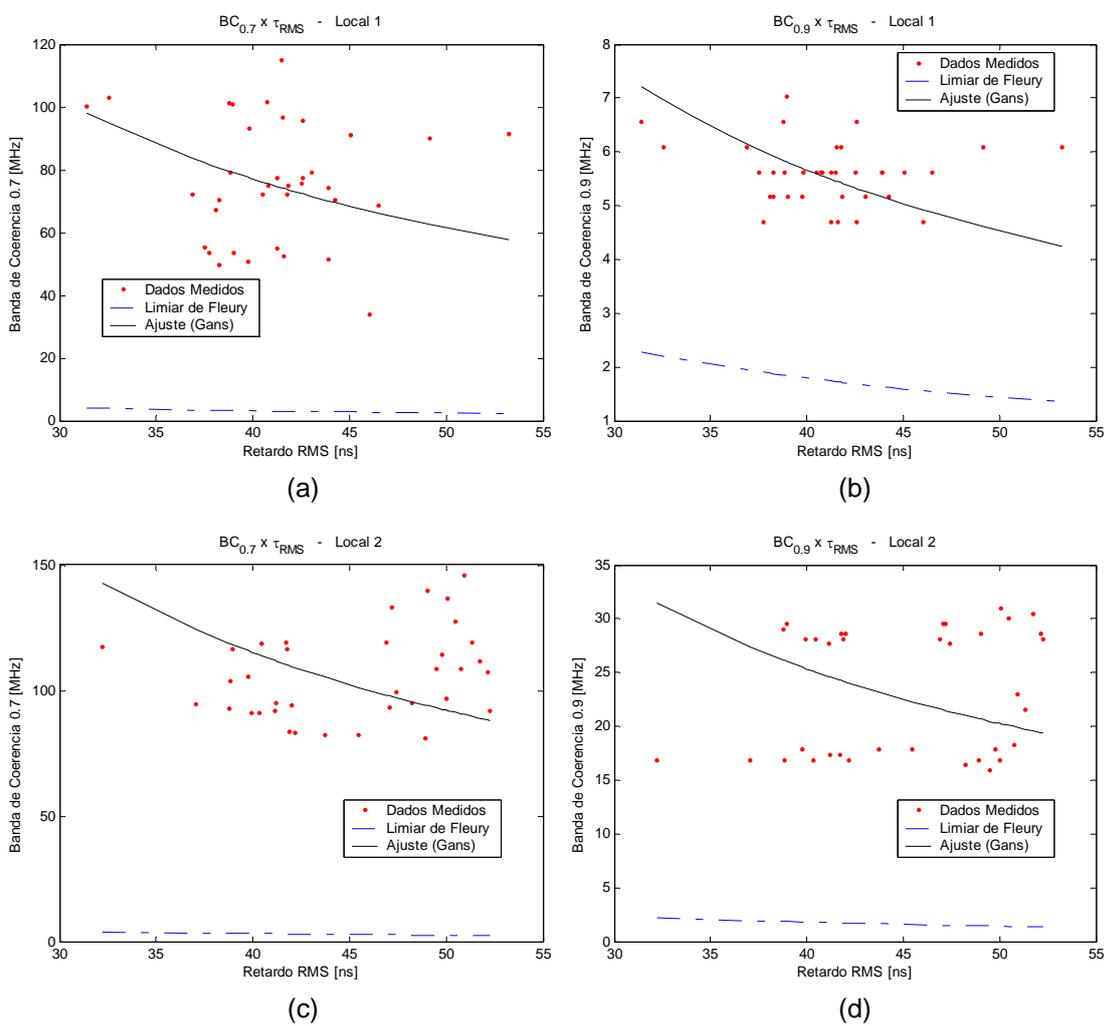


Fig C.24 – Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente B3.

As figuras seguintes são para os Locais 1, 2, 3, 4 e 6, fazendo-se $X = 40$ (ao invés de 35 e 30), mas descartando-se o ruído de início de perfil.



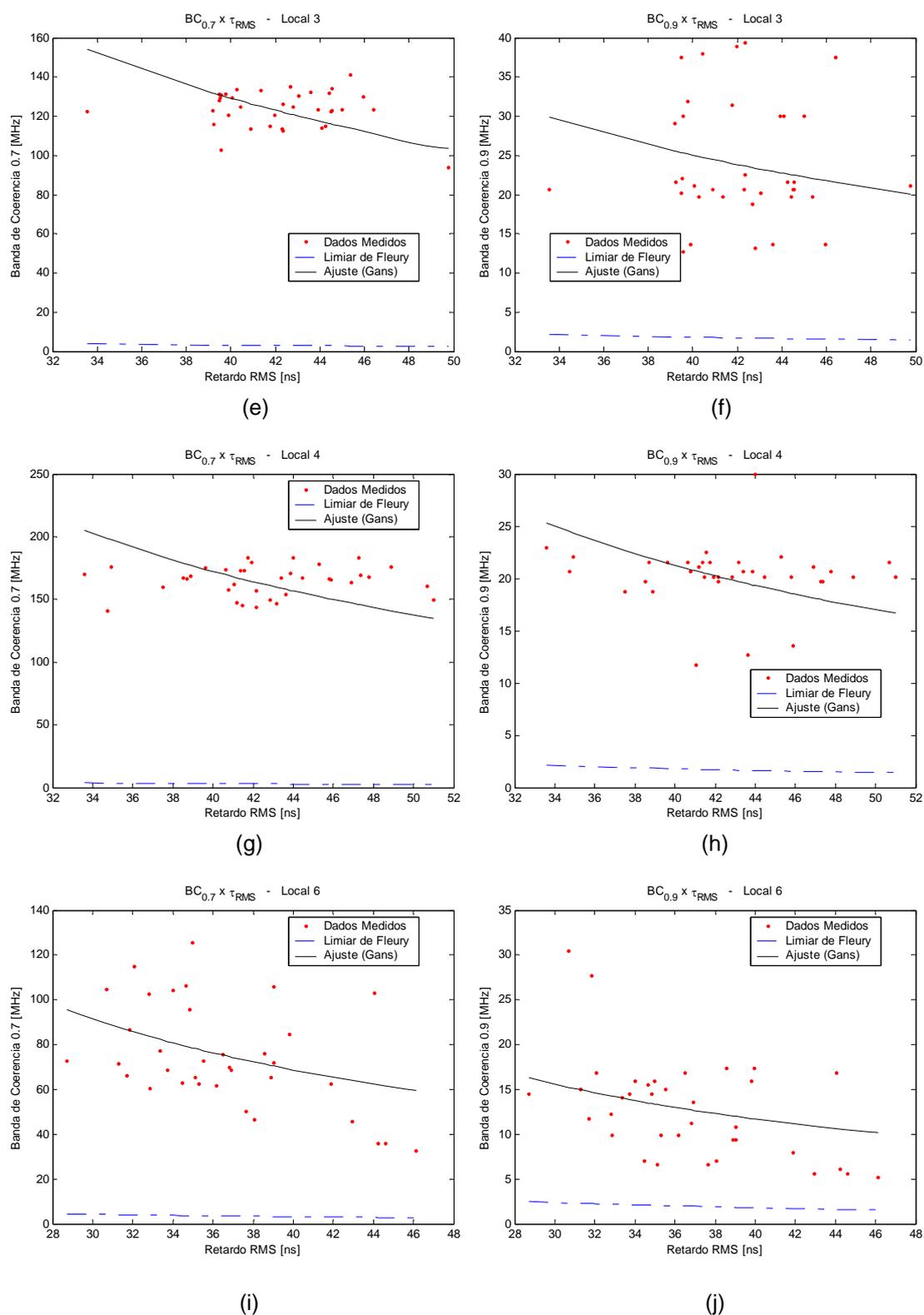


Fig C.25 – Banda de Coerência x Espalhamento de Retardos para o Ambiente B3 para $X = 40$.

Gráficos de perfil de retardos de potência:

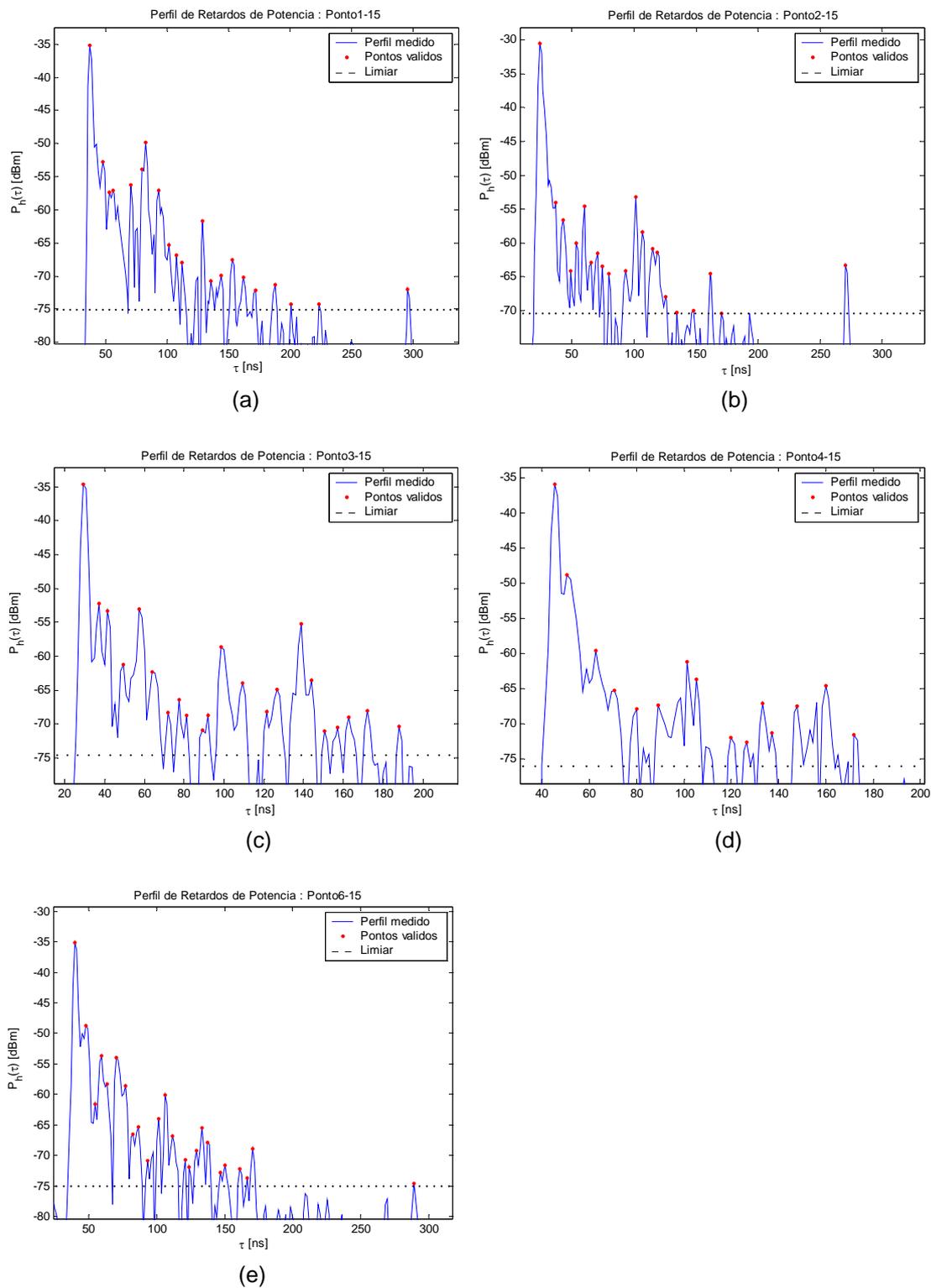


Fig C.26 – Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente B3 para X = 40.

C.12 Resultados para o Ambiente B4: Estacionamento do Bloco E

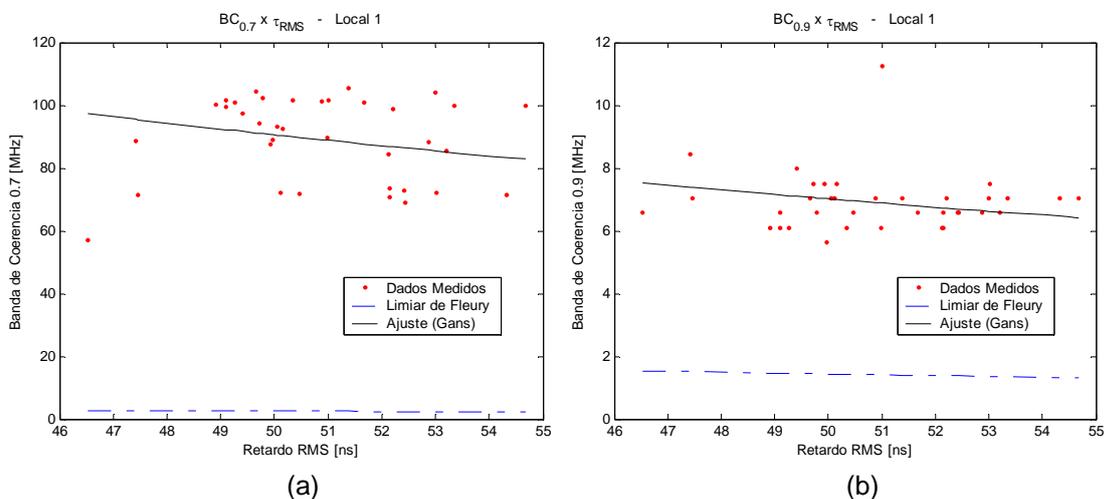
Ambiente	Situação	Retardo Médio [ns]			Espalhamento de Retardos [ns]			
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio	Razão
Local 1	LOS	53,78	53,72	2,40	50,87	50,69	1,92	0,04
Local 2	LOS	67,73	64,66	11,31	60,14	59,79	3,97	0,07
Local 3	LOS	112,08	110,25	7,82	76,33	76,89	4,53	0,06
Local 4	LOS	126,41	125,72	5,70	87,73	87,87	3,21	0,04
Local 5	LOS	65,56	62,90	9,96	57,29	57,54	3,77	0,07

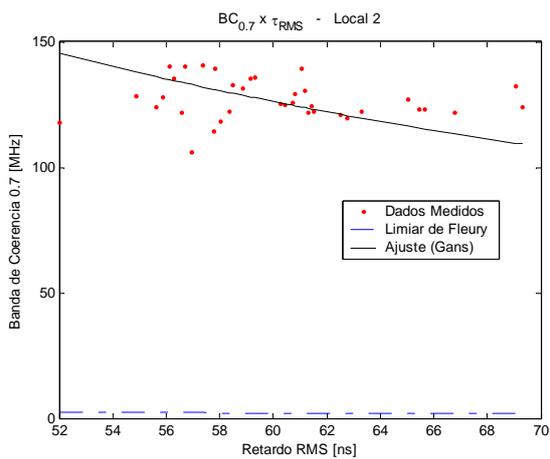
Ambiente	Situação	Banda Coer. 0,7 [MHz]			Banda Coer. 0,9 [MHz]		
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
Local 1	LOS	89,28	92,81	13,42	6,91	6,80	0,95
Local 2	LOS	126,88	124,92	7,98	15,53	15,23	7,21
Local 3	LOS	10,57	9,38	3,20	2,90	2,81	0,19
Local 4	LOS	16,86	15,94	5,63	3,45	3,28	0,23
Local 5	LOS	107,46	104,77	10,54	7,11	7,03	0,90

Ambiente	Situação	NMP	X [dB]	Limiar [dBm]	α para BC 0,7	α para BC 0,9
Local 1	LOS	34	50	-80,47	0,22	2,85
Local 2	LOS	42	50	-82,90	0,13	1,09
Local 3	LOS	55	50	-90,71	1,25	4,55
Local 4	LOS	64	50	-94,59	0,68	3,31
Local 5	LOS	41	50	-83,15	0,16	2,47

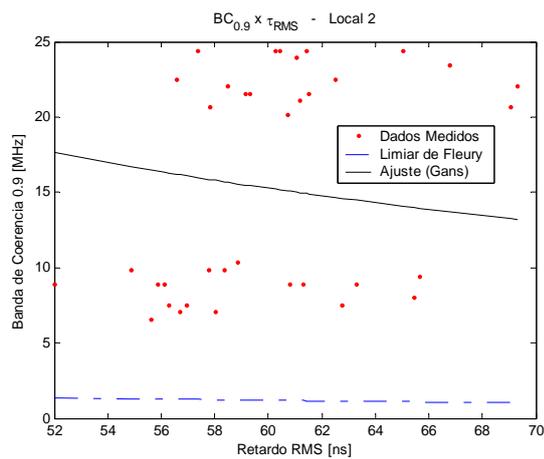
Tabela C.12 - Resultados obtidos nos Ambientes B4.

Gráficos de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos:

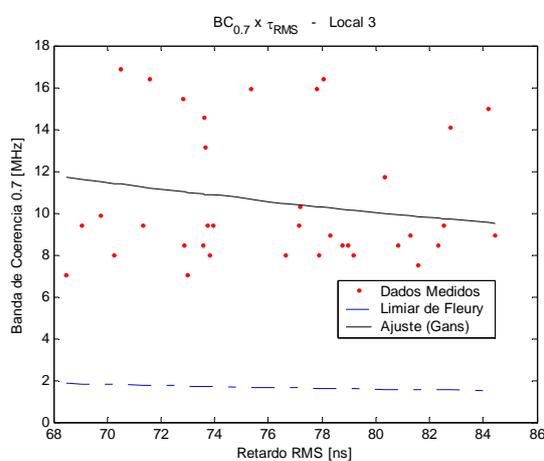




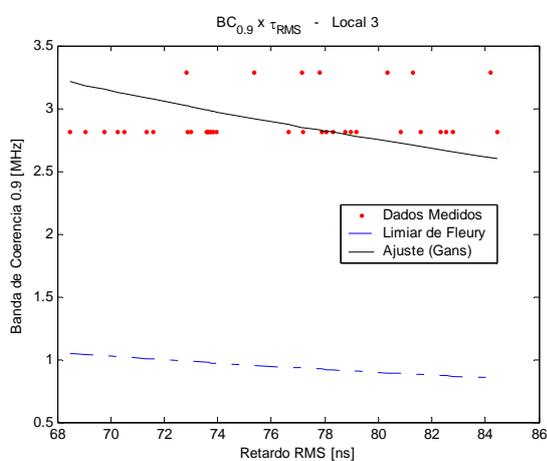
(c)



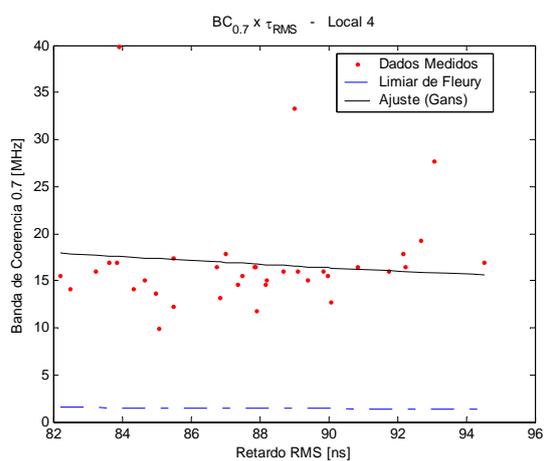
(d)



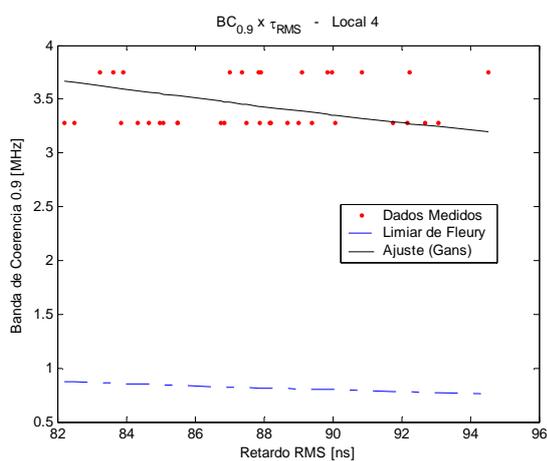
(e)



(f)



(g)



(h)

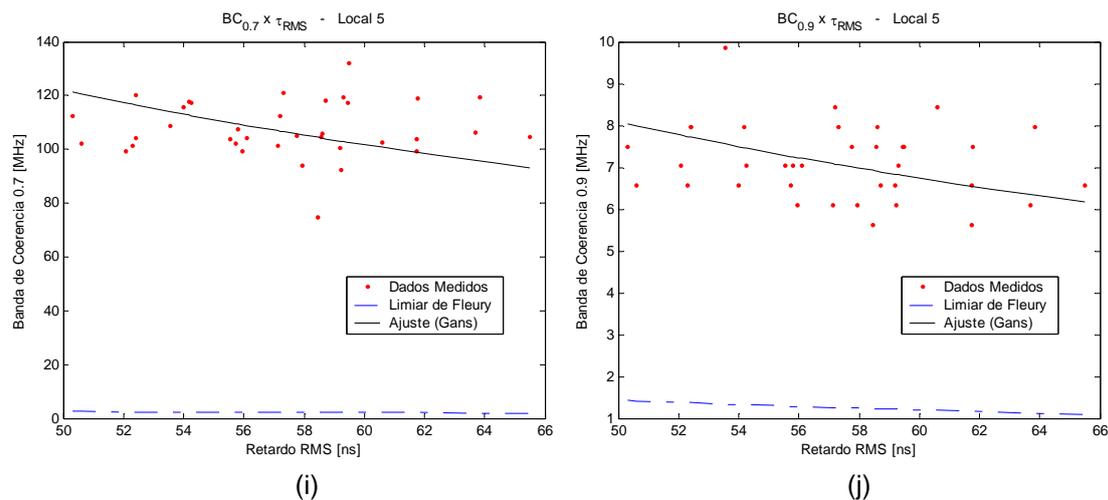
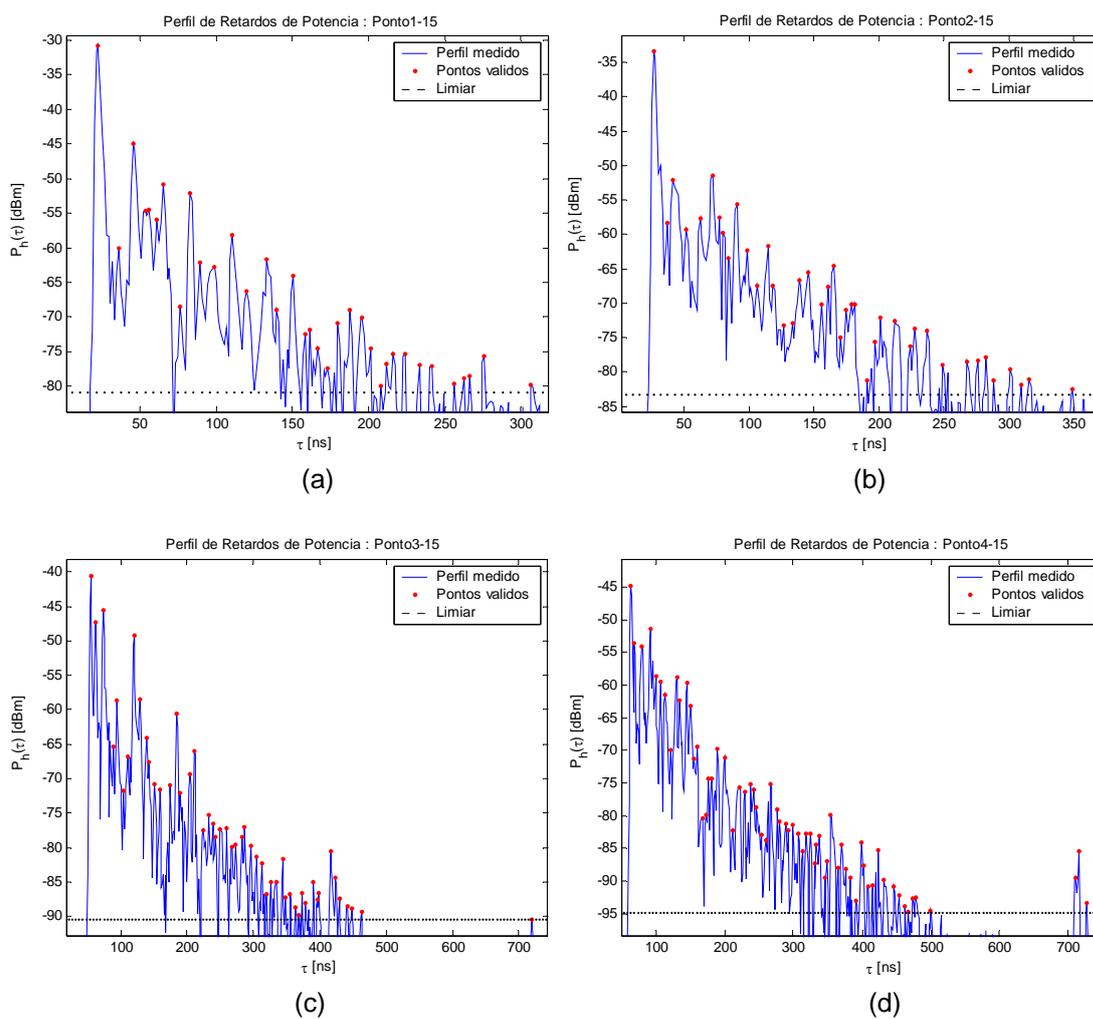


Fig C.27 – Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente B4.

Gráficos de perfil de retardos de potência:



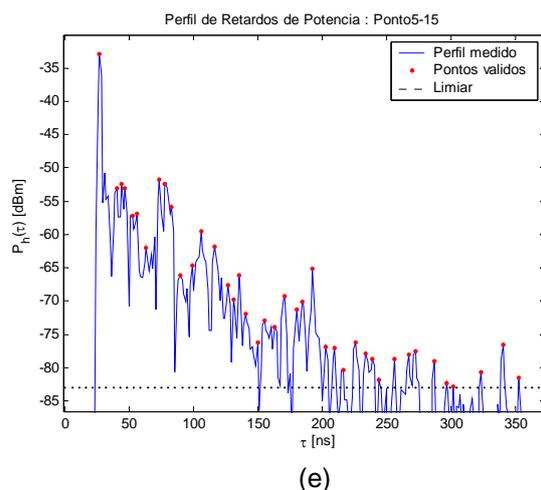


Fig C.28 – Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente B4.

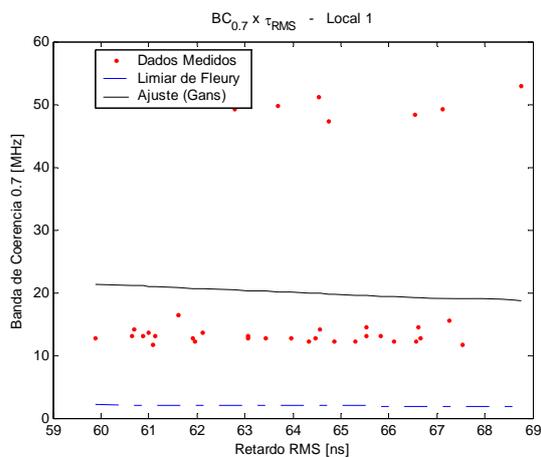
C.13 Resultados para o Ambiente C1: Entre os blocos D e E

Ambiente	Situação	Retardo Médio [ns]			Espalhamento de Retardos [ns]			
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio	Razão
Local 1	LOS	82,32	81,35	6,85	64,05	64,40	2,36	0,04
Local 2	LOS	85,57	82,33	10,72	36,36	36,16	6,02	0,17
Local 3	LOS	79,01	78,69	14,78	38,10	40,77	6,62	0,17
Local 4	LOS	74,09	72,28	12,04	39,75	42,36	6,37	0,16

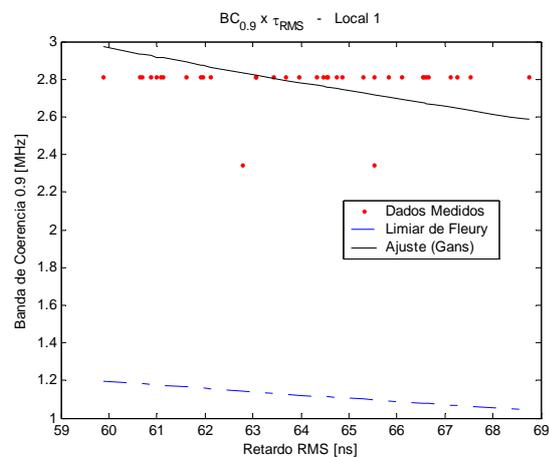
Ambiente	Situação	Banda Coer. 0,7 [MHz]			Banda Coer. 0,9 [MHz]		
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
Local 1	LOS	20,22	13,13	14,73	2,79	2,81	0,11
Local 2	LOS	10,59	13,59	5,99	1,54	1,88	0,93
Local 3	LOS	2,17	2,34	0,88	0,44	0,47	0,16
Local 4	LOS	7,53	7,97	1,91	1,30	1,41	0,25

Ambiente	Situação	NMP	X [dB]	Limiar [dBm]	α para BC 0,7	α para BC 0,9
Local 1	LOS	33	40	-73,87	0,78	5,62
Local 2	LOS	8	20	-64,81	2,66	18,21
Local 3	LOS	8	20	-73,60	13,36	64,68
Local 4	LOS	6	20	-66,04	3,50	20,42

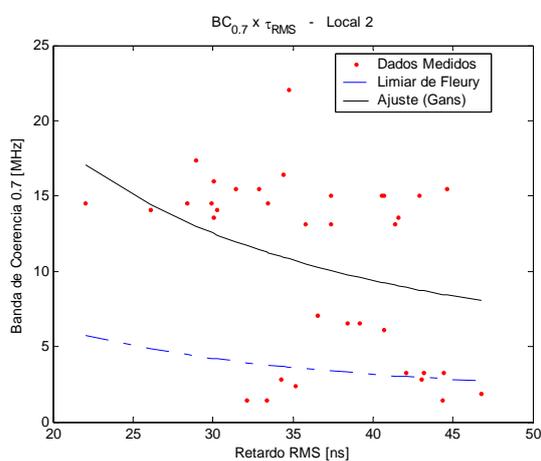
Tabela C.13 - Resultados obtidos nos Ambientes C1.

Gráficos de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos:

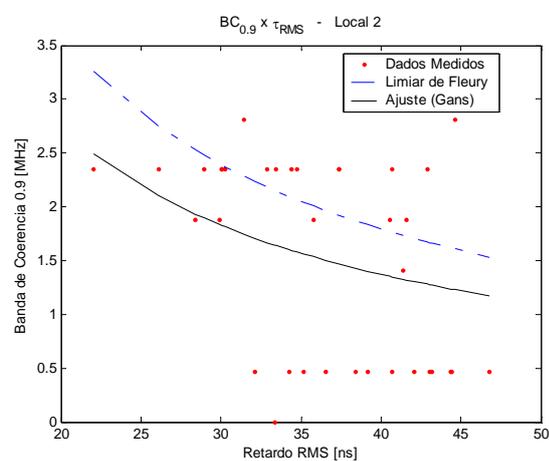
(a)



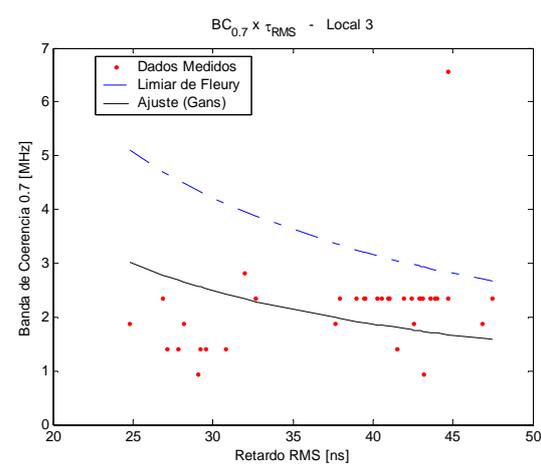
(b)



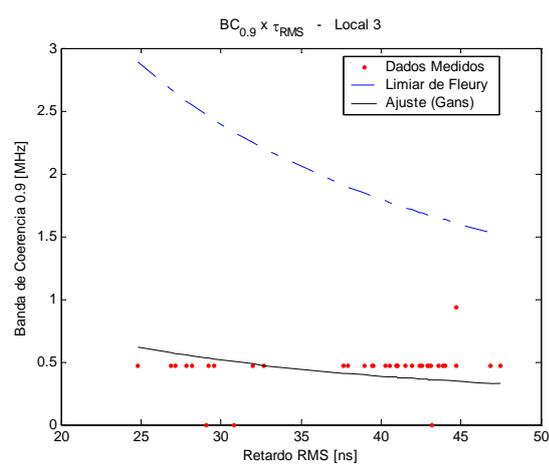
(c)



(d)



(e)



(f)

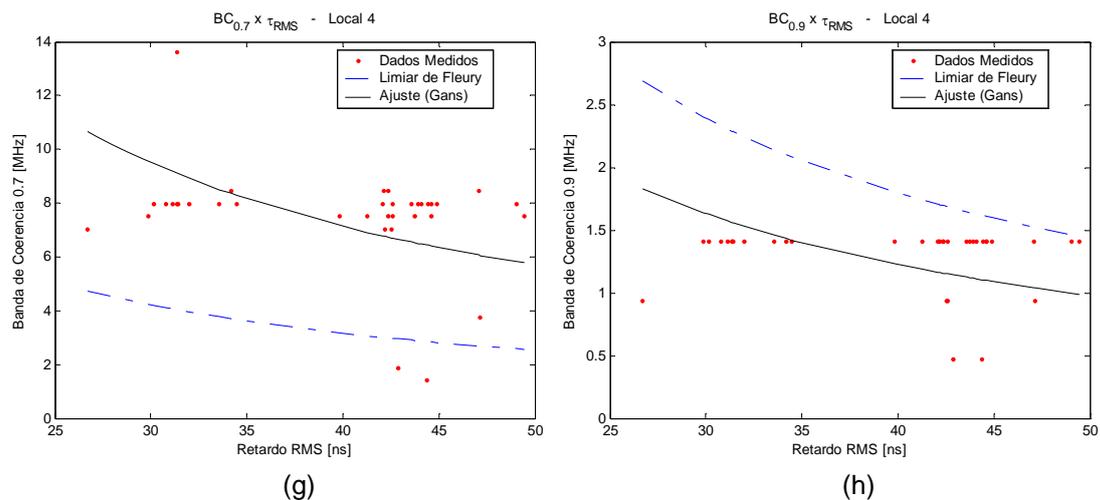


Fig C.29 – Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente C1.

Gráficos de perfil de retardos de potência:

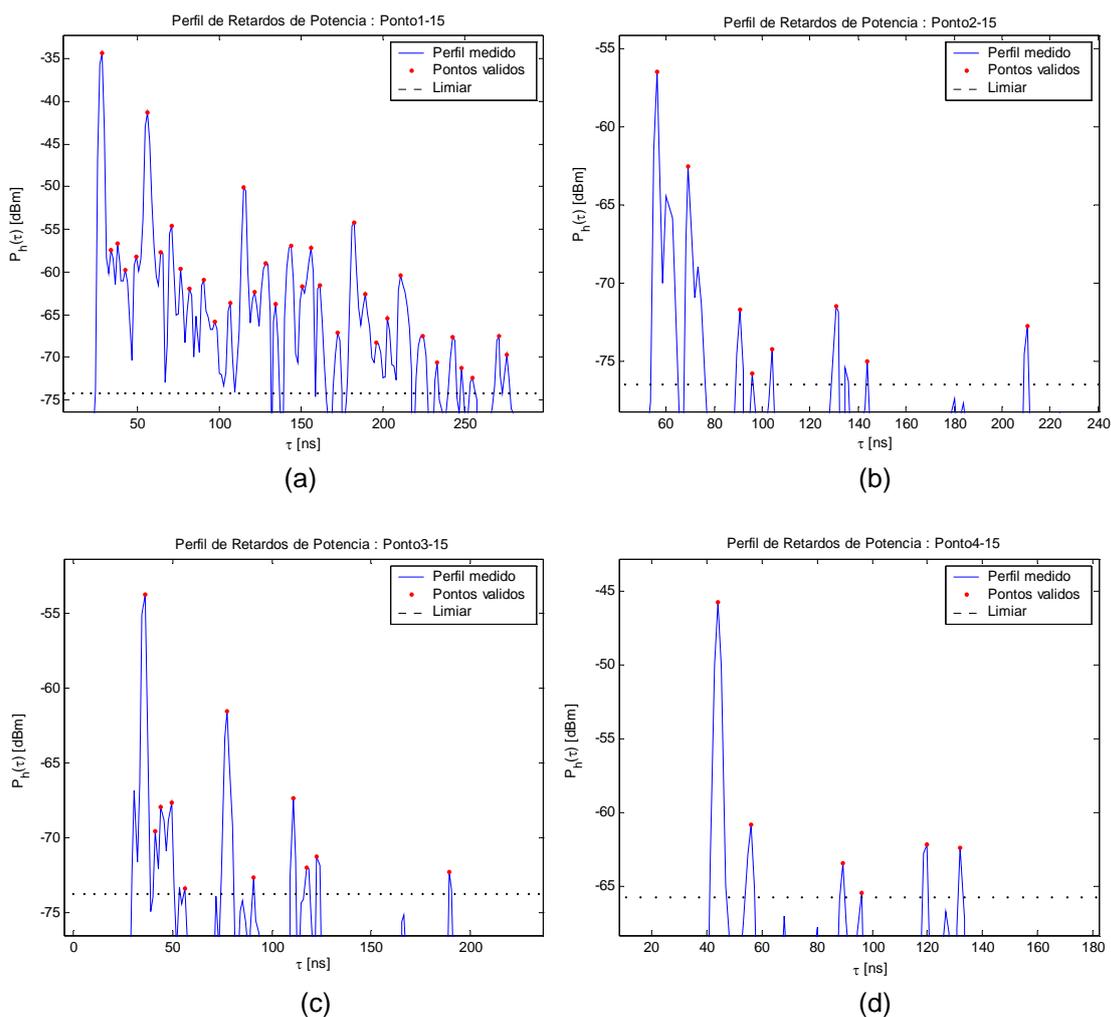


Fig C.30 – Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente C1.

C.14 Resultados para o Ambiente C2: Entre os Blocos O e N

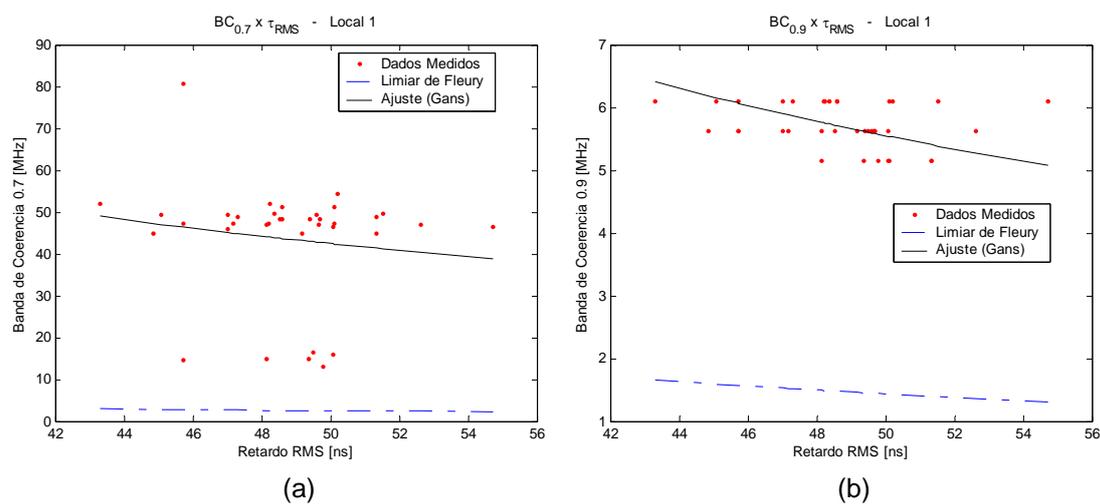
Ambiente	Situação	Retardo Médio [ns]			Espalhamento de Retardos [ns]			
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio	Razão
Local 1	LOS	49,57	49,37	4,55	48,73	48,89	2,29	0,05
Local 2	LOS	83,20	82,14	5,19	60,29	60,47	2,84	0,05
Local 3	LOS	42,65	40,47	9,42	34,41	34,45	2,81	0,08
Local 4	LOS	49,68	47,85	7,81	45,68	46,05	2,44	0,05
Local 5	LOS	63,32	61,54	6,67	42,28	43,17	4,70	0,11
Local 6	NLOS	78,84	77,09	7,26	52,67	52,27	4,40	0,08

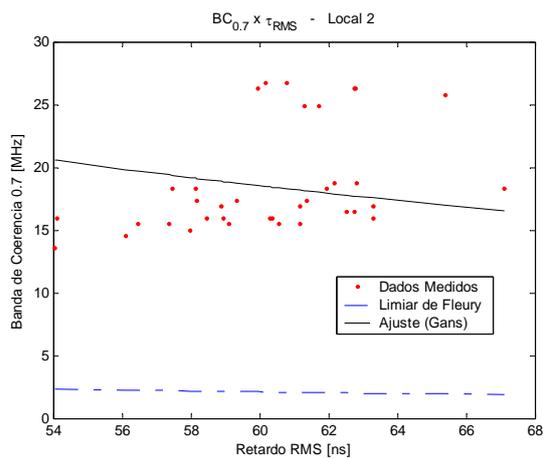
Ambiente	Situação	Banda Coer. 0,7 [MHz]			Banda Coer. 0,9 [MHz]		
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
Local 1	LOS	43,68	47,34	14,22	5,72	5,63	0,35
Local 2	LOS	18,61	16,88	4,16	3,40	3,28	0,23
Local 3	LOS	92,85	89,53	22,24	13,37	11,48	6,25
Local 4	LOS	94,41	88,13	21,13	8,06	5,16	4,94
Local 5	LOS	71,02	73,13	39,29	3,71	3,52	0,91
Local 6	NLOS	17,27	18,05	8,18	2,59	2,34	0,53

Ambiente	Situação	NMP	X [dB]	Limiar [dBm]	α para BC 0,7	α para BC 0,9
Local 1	LOS	29	45	-75,15	0,47	3,60
Local 2	LOS	38	45	-81,26	0,90	4,90
Local 3	LOS	15	35	-64,76	0,31	2,15
Local 4	LOS	24	40	-69,78	0,23	2,73
Local 5	LOS	19	35	-69,20	0,33	6,41
Local 6	NLOS	29	35	-80,78	1,10	7,37

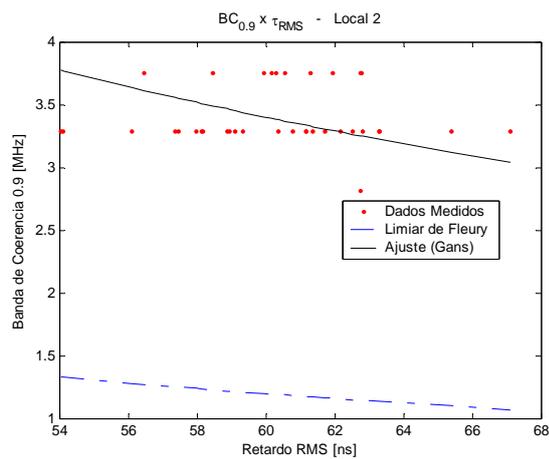
Tabela C.14 - Resultados obtidos nos Ambientes C2.

Gráficos de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos:

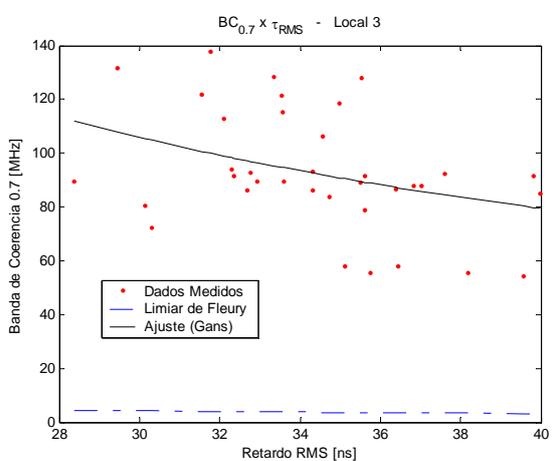




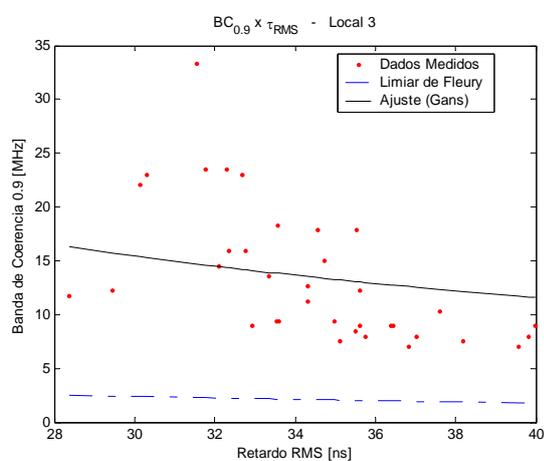
(c)



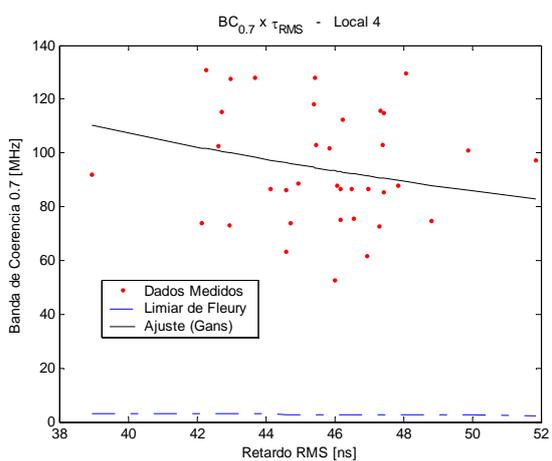
(d)



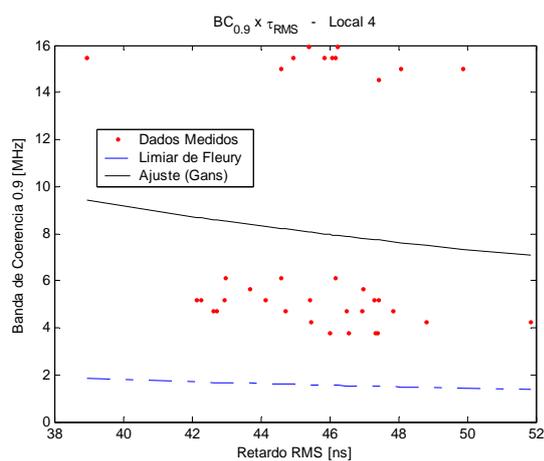
(e)



(f)



(g)



(h)

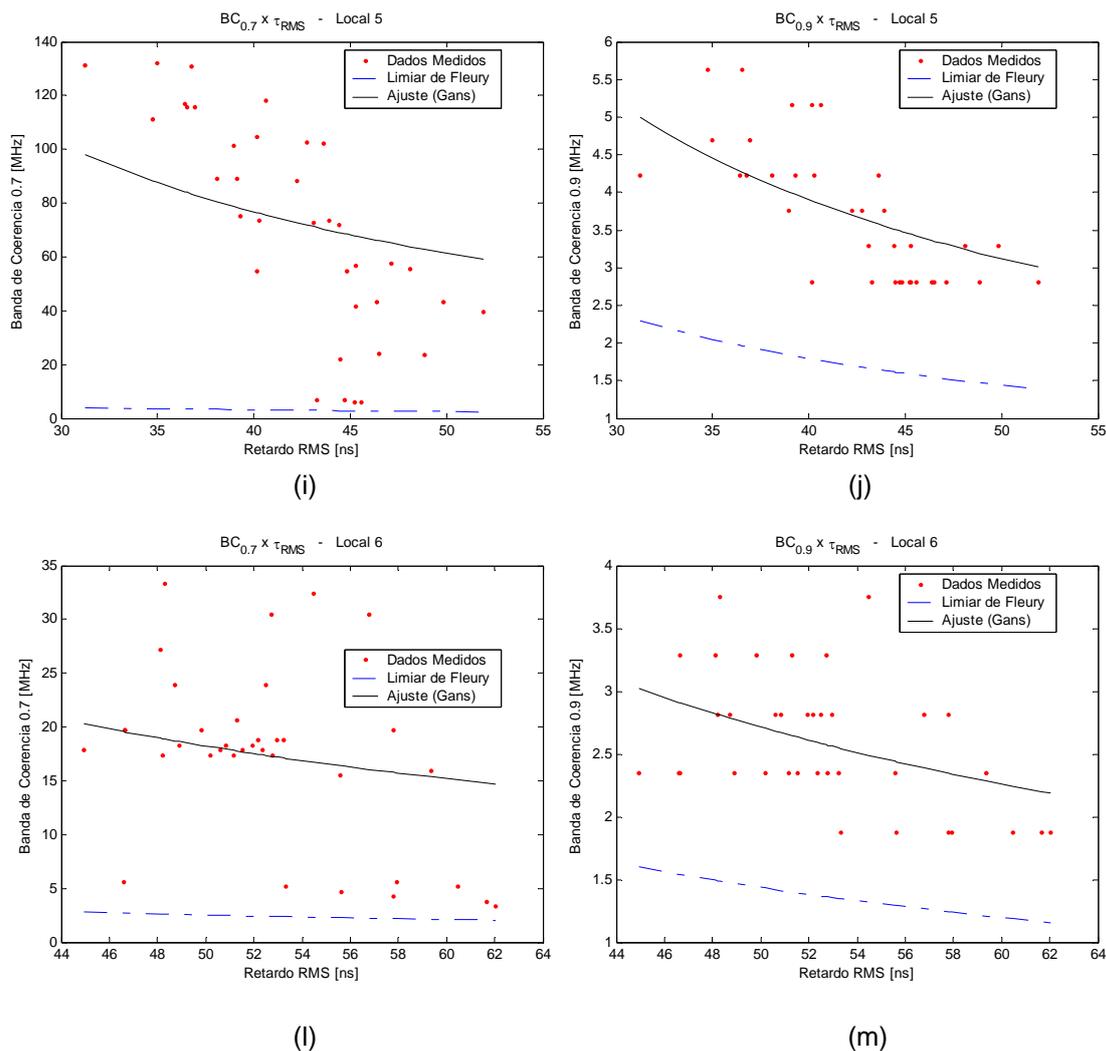
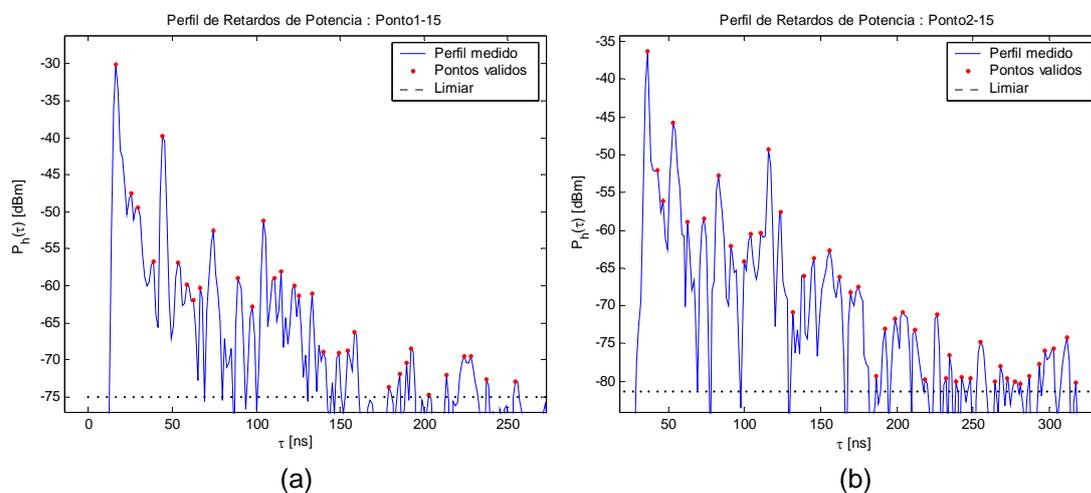


Fig C.31 – Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente C2.

Gráficos de perfil de retardos de potência:



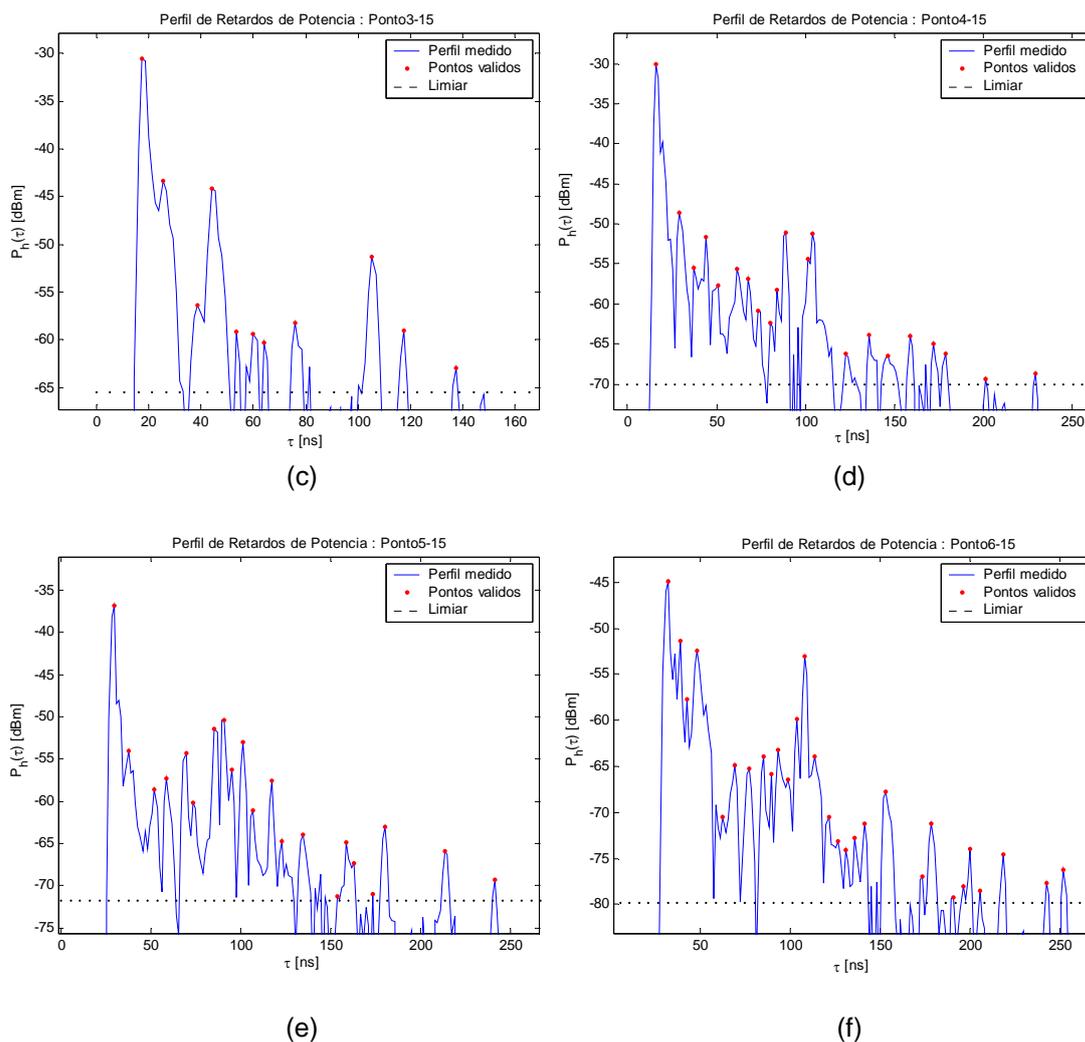


Fig C.32 – Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente C2.

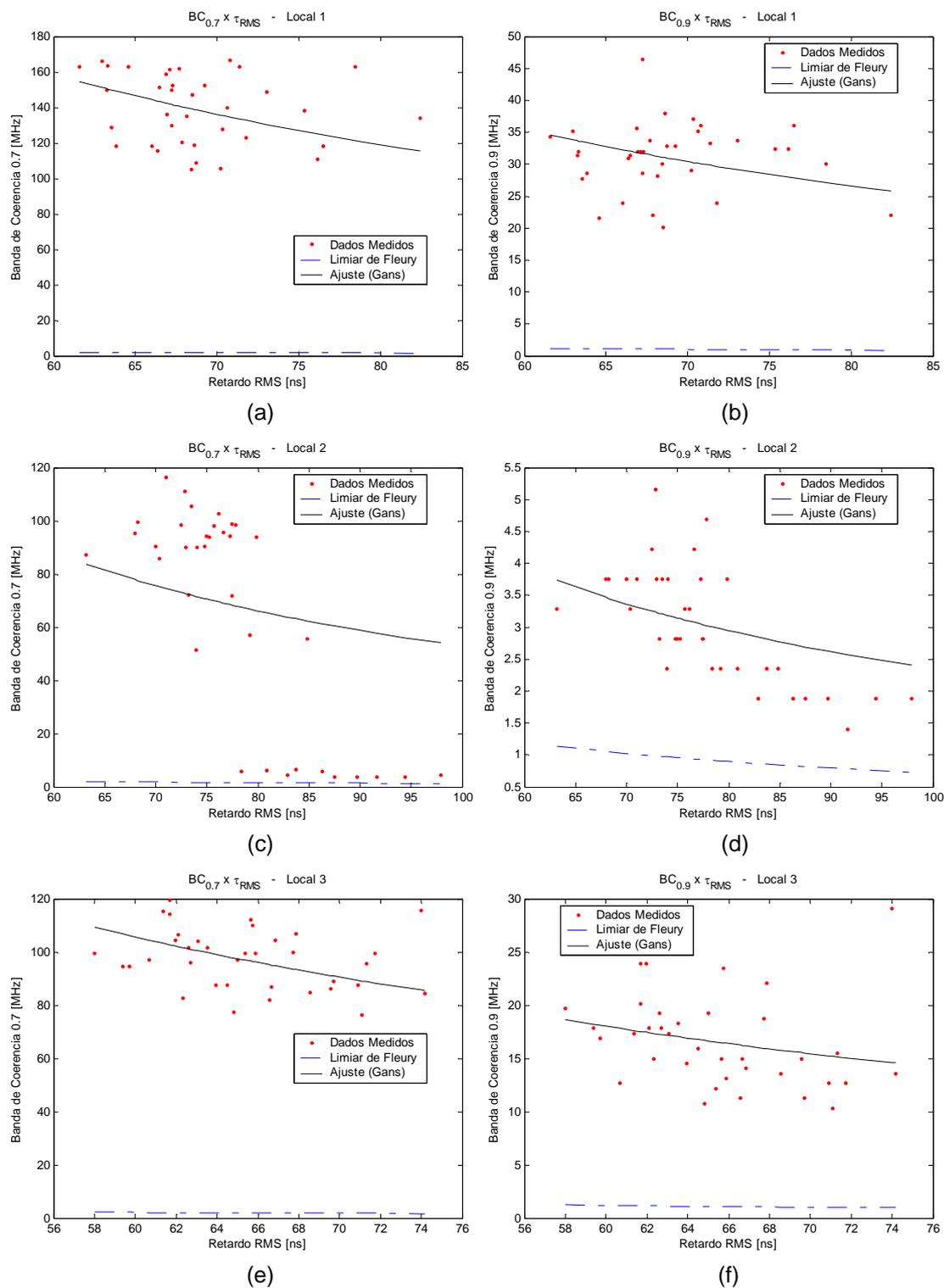
C.15 Resultados para o Ambiente C3: Pátio da Faculdade de Arquitetura (em frente ao Casarão)

Ambiente	Situação	Retardo Médio [ns]			Espalhamento de Retardos [ns]			
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio	Razão
Local 1	LOS	77,52	71,57	16,94	68,86	68,00	4,59	0,07
Local 2	LOS	126,39	119,45	17,62	77,91	76,37	7,66	0,10
Local 3	LOS	93,52	91,39	9,42	65,52	65,21	4,14	0,06
Local 4	LOS	61,24	61,37	1,52	57,66	57,77	2,16	0,04

Ambiente	Situação	Banda Coer. 0,7 [MHz]			Banda Coer. 0,9 [MHz]		
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
Local 1	LOS	139,17	138,98	19,93	31,16	31,88	5,29
Local 2	LOS	66,25	90,00	41,00	3,02	2,81	0,91
Local 3	LOS	97,28	98,20	11,25	16,58	15,70	4,27
Local 4	LOS	83,87	81,80	11,54	16,74	15,47	3,98

Ambiente	Situação	NMP	X [dB]	Limiar [dBm]	α para BC 0,7	α para BC 0,9
Local 1	LOS	49	55	-88,65	0,10	0,47
Local 2	LOS	51	45	-91,24	0,19	4,24
Local 3	LOS	41	50	-88,07	0,16	0,92
Local 4	LOS	36	50	-82,60	0,21	1,04

Tabela C.15 - Resultados obtidos nos Ambientes C3.

Gráficos de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos:

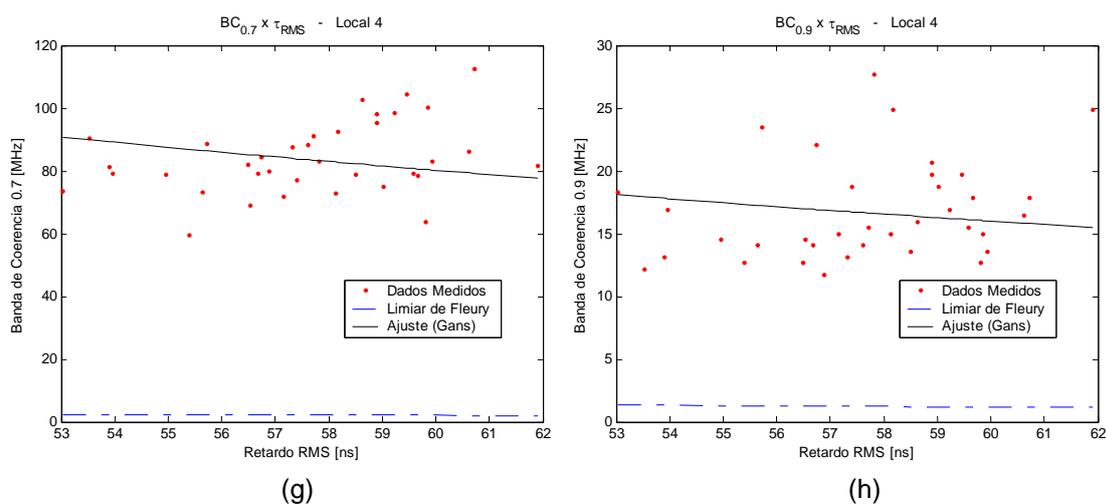


Fig C.33 – Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente C3.

Gráficos de perfil de retardos de potência:

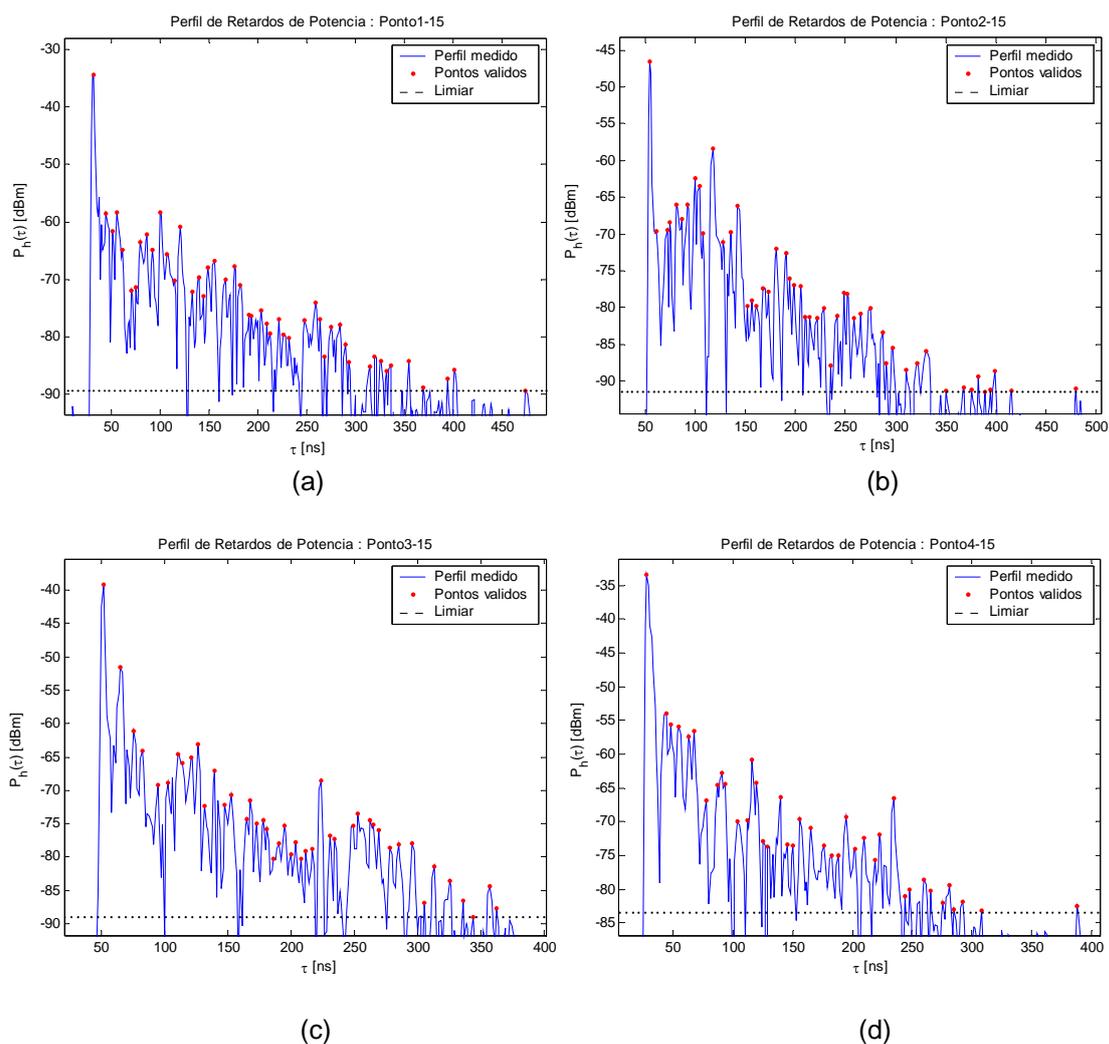


Fig C.34 – Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente C3.

C.16 Resultados para o Ambiente C4: Pátio da Faculdade de Arquitetura (em frente ao Chalé)

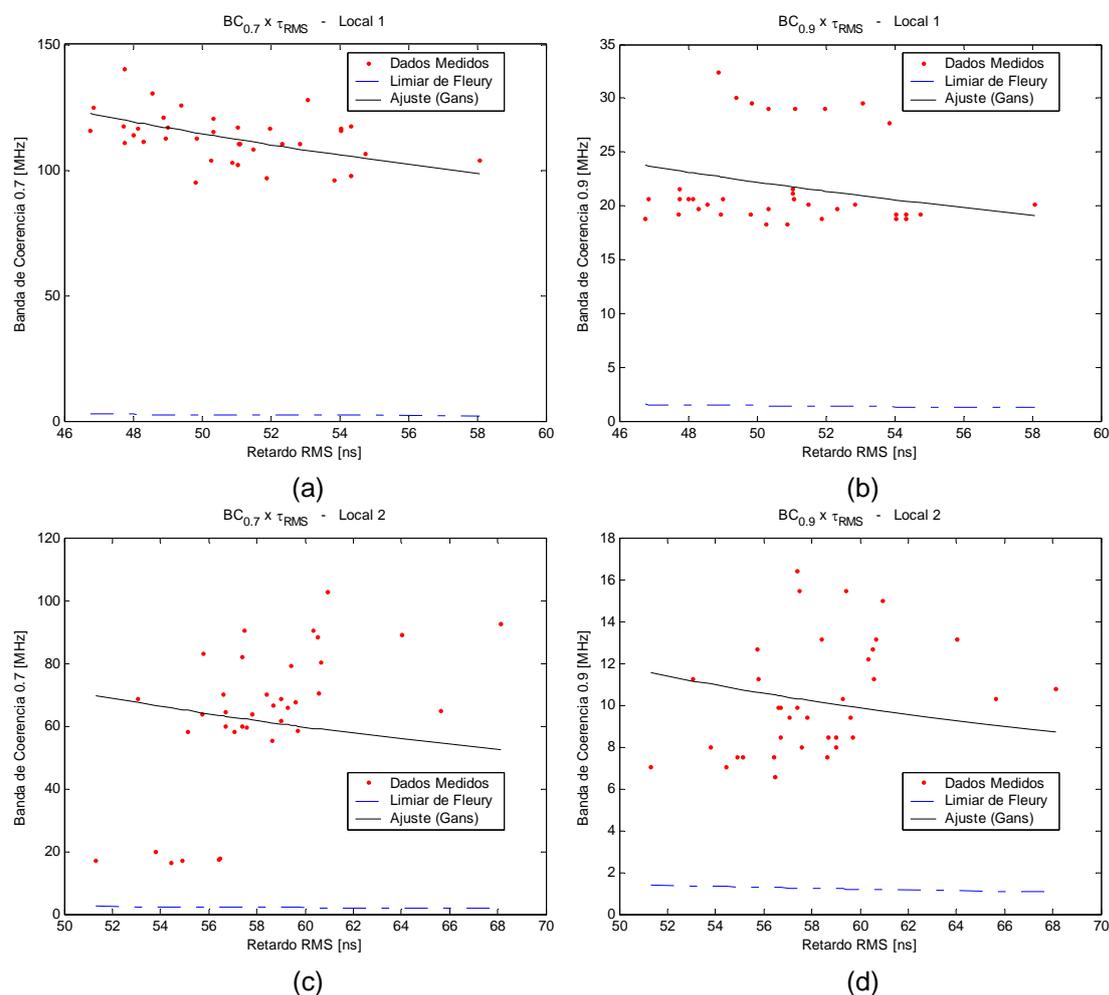
Ambiente	Situação	Retardo Médio [ns]			Espalhamento de Retardos [ns]			
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio	Razão
Local 1	LOS	70,51	66,73	12,73	50,81	50,61	2,62	0,05
Local 2	LOS	73,05	70,69	9,53	58,18	57,68	3,30	0,06
Local 3	LOS	92,97	93,36	2,37	61,66	61,52	2,61	0,04
Local 4	LOS	81,41	81,45	2,35	63,52	63,22	2,50	0,04

Ambiente	Situação	Banda Coer. 0,7 [MHz]			Banda Coer. 0,9 [MHz]		
		Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
Local 1	LOS	112,96	113,20	9,90	21,97	20,16	4,22
Local 2	LOS	62,68	65,16	23,55	10,29	9,84	2,70
Local 3	LOS	120,91	121,41	25,30	5,40	5,16	0,75
Local 4	LOS	135,12	133,13	11,15	27,67	30,00	7,67

Ambiente	Situação	NMP	X [dB]	Limiar [dBm]	α para BC 0,7	α para BC 0,9
Local 1	LOS	29	45	-79,78	0,17	0,90
Local 2	LOS	39	50	-84,61	0,28	1,69
Local 3	LOS	40	50	-87,36	0,13	3,01
Local 4	LOS	41	50	-86,03	0,12	0,57

Tabela C.16 - Resultados obtidos nos Ambientes C4.

Gráficos de banda de coerência *versus* espalhamento de retardos:



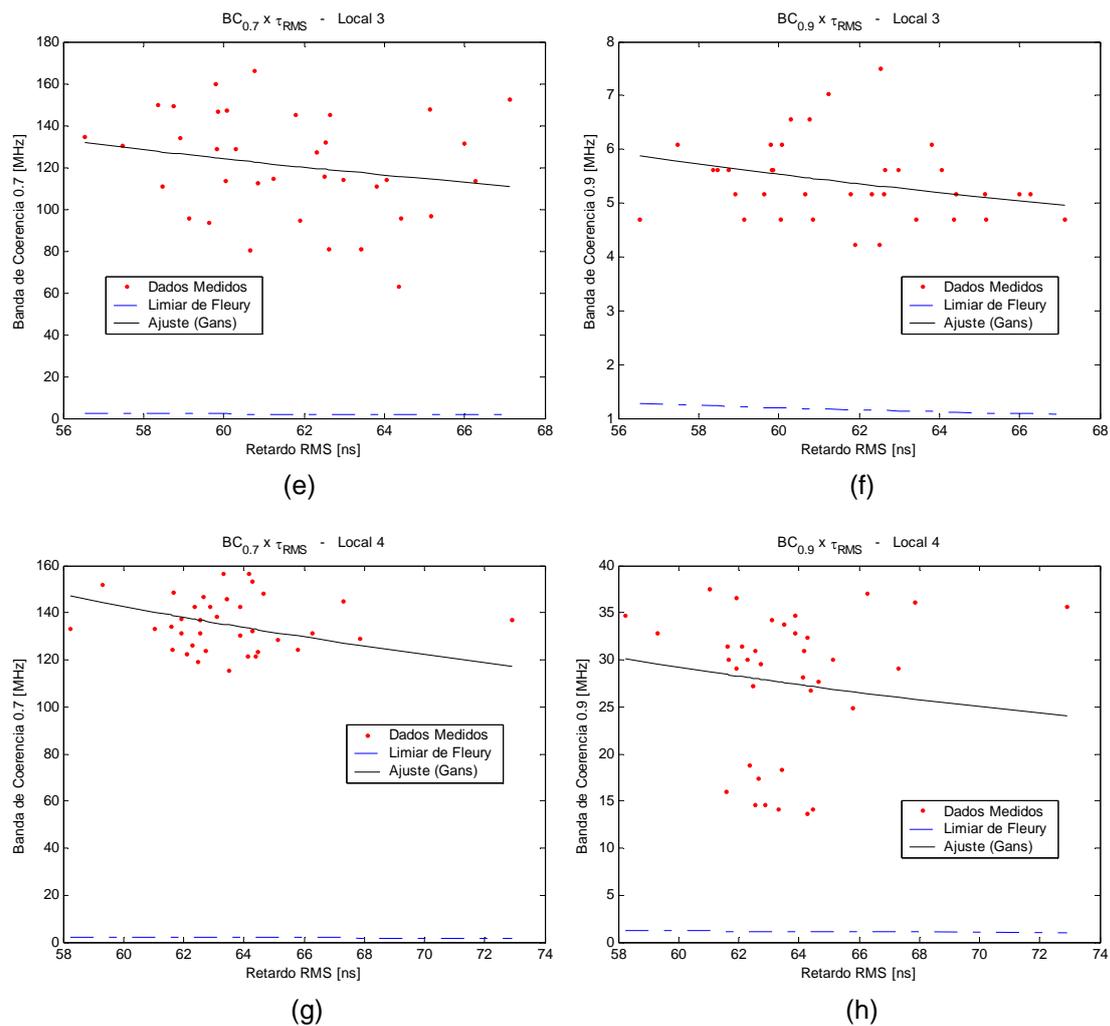
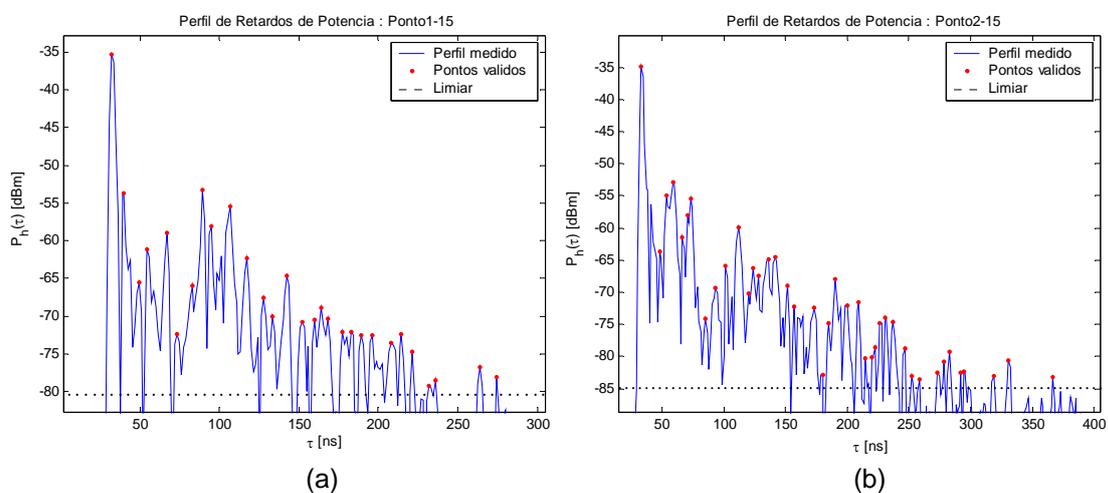


Fig C.35 – Banda de Coerência (0,7 e 0,9) x Espalhamento de Retardos no Ambiente C4.

Gráficos de perfil de retardos de potência:



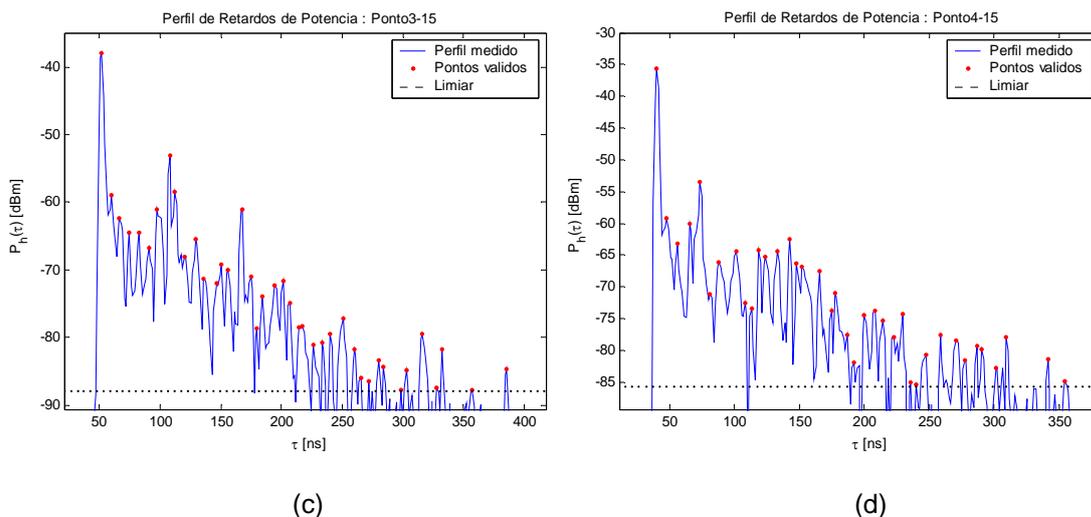


Fig C.36 – Perfis de Retardos de Potência para o Ambiente C4.

C.17 Resultados para o Ambiente D1: Estacionamento da Faculdade de Geociências

	Média	Mediana	Desvio	Razão
Retardo Médio [ns]	540,17	559,03	71,21	
Espalhamento de Retardos [ns]	124,10	128,47	24,27	0,20
Banda Coer. 0,7 [MHz]	95,80	80,16	42,97	
Banda Coer. 0,9 [MHz]	23,08	20,16	10,82	
PL ₁ [dBm]	-19,42	-30,41	-14,10	
PL ₂ [dBm]	-49,45	-64,55	-44,92	

	Distância (m)	Limiar (dBm)	X médio (dB)
Ponto 04 – ponto 10	1,0 – 4,0	-70	46,27
Ponto 11 – ponto 17	4,5 – 7,5	-75	45,23
Ponto 18 – ponto 22	8,0 – 10,0	-80	48,27
Ponto 23 – ponto 59	10,5 – 28,5	-85	44,70
Ponto 60 – ponto 69	29,5 – 33,5	-90	49,04

PL ₀ [dBm]	Índice de atenuação com a distância γ		Nº médio de multipercursos
-14,8	PL ₁ = -1,73	PL ₂ = -2,38	25

Tabela C.17 - Resultados obtidos nos Ambientes D1.

Gráficos de perda de atenuação com a distância:

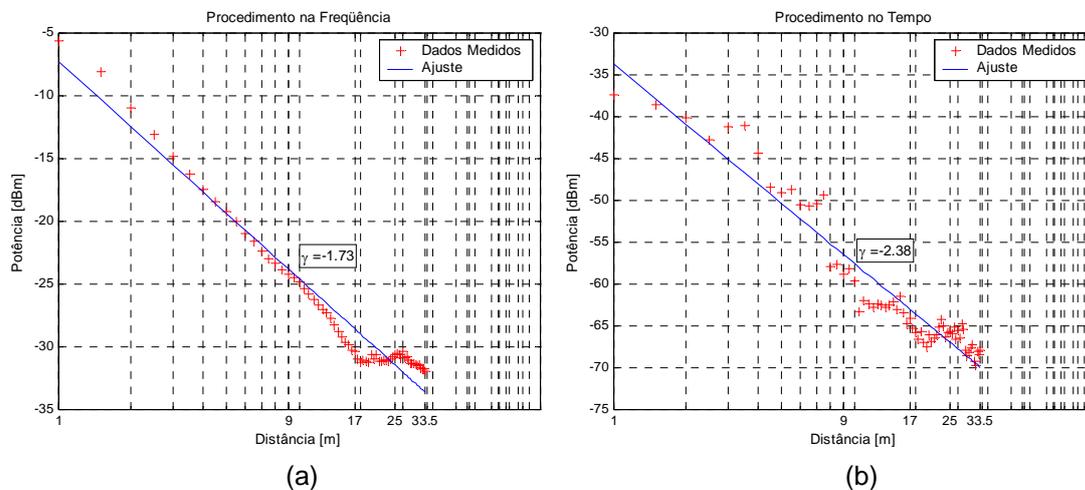
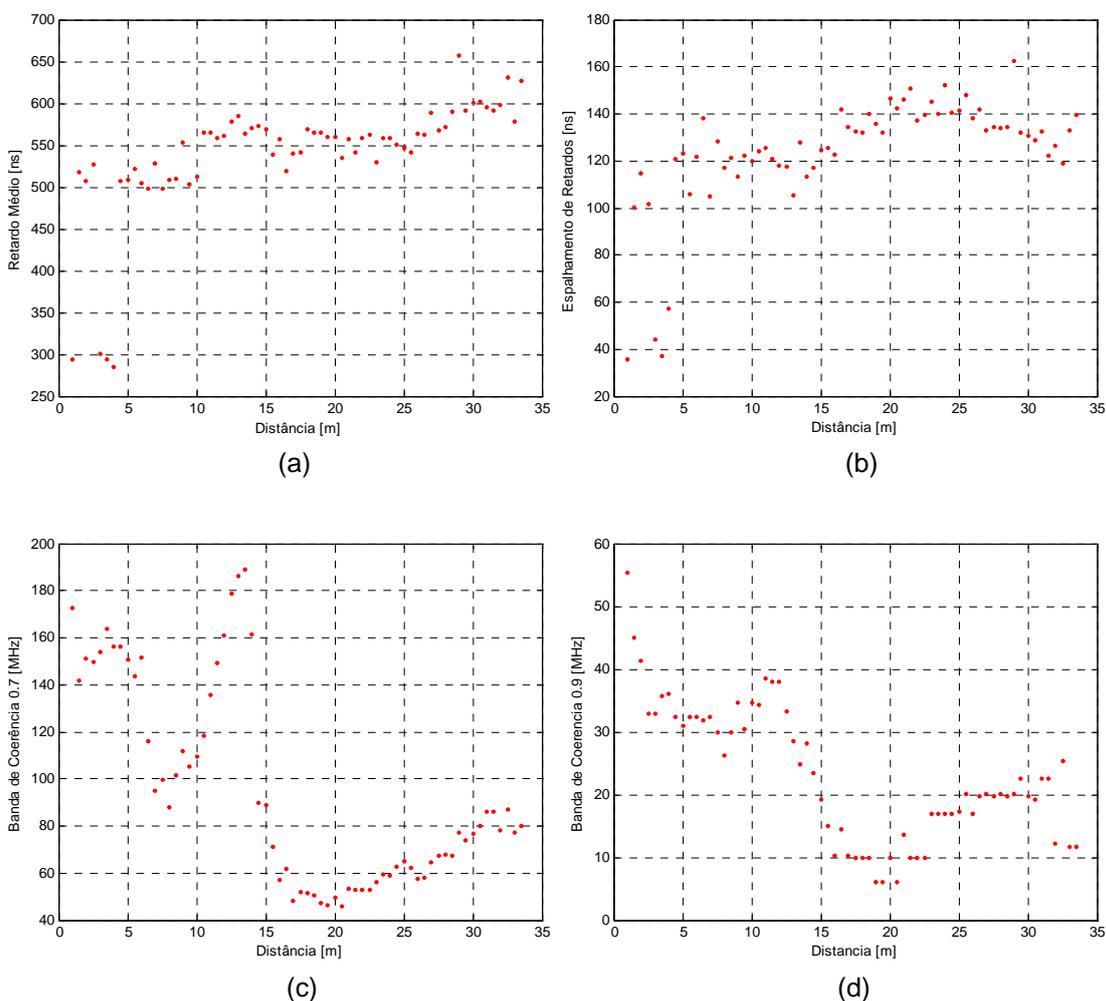


Fig C.37 – Perda de Propagação com a Distância no ambiente D1. Procedimento na Frequência (a) e Procedimento no Tempo (b).

Gráficos de parâmetros do canal *versus* a distância:

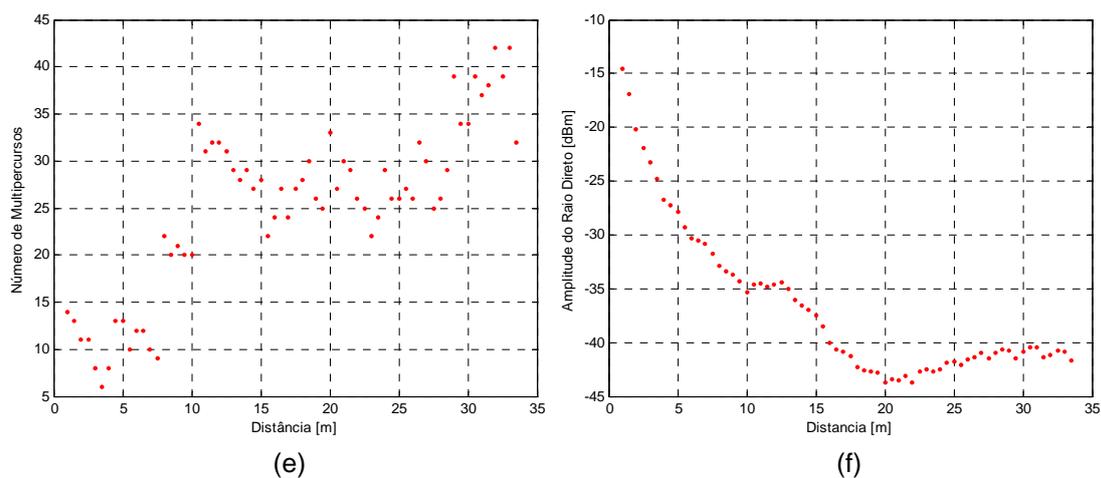


Fig C.38 – Parâmetros do Canal *versus* a Distância para o Ambiente D1.

Gráficos de perfil de retardos de potência:

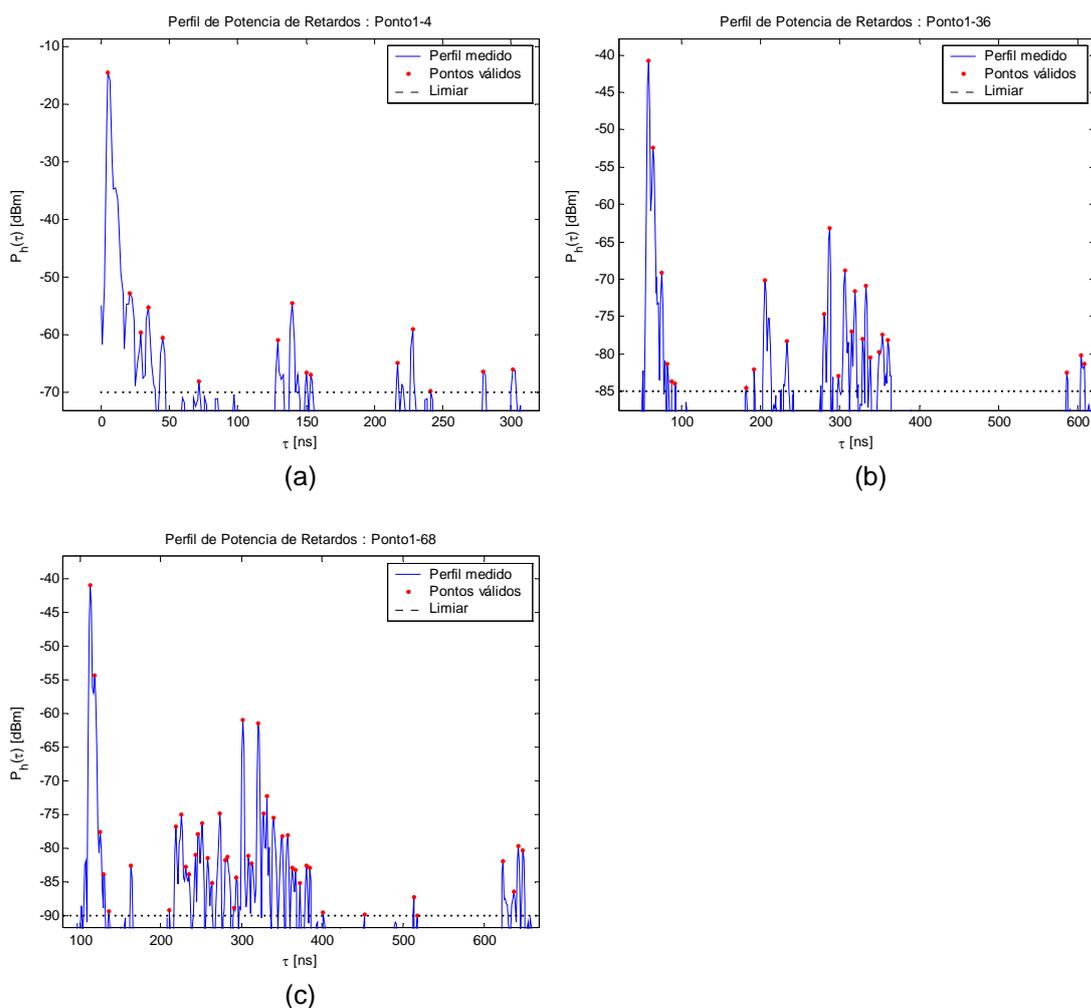


Fig C.39 – Perfil de Retardos de Potência a 1 metro (a), 17 metros (b) e 33 metros (c) de Distância TX-RX no Ambiente D1.

C.18 Resultados para o Ambiente D2: Campo de Futebol do *Campus* do

Gragoatá

	Média	Mediana	Desvio	Razão
Retardo Médio [ns]	632,21	653,37	158,95	
Espalhamento de Retardos [ns]	202,01	225,49	61,00	0,30
Banda Coer. 0,7 [MHz]	89,37	90,00	49,39	
Banda Coer. 0,9 [MHz]	13,30	7,97	14,39	
PL ₁ [dBm]	-22,68	-39,55	-14,93	
PL ₂ [dBm]	-57,30	-79,27	-51,22	

	Distância (m)	Limiar (dBm)	X médio (dB)
Ponto 04 – ponto 06	1 – 3	-70	44,31
Ponto 07 – ponto 10	4 – 7	-80	46,84
Ponto 11 – ponto 19	8 – 16	-85	40,41
Ponto 20 – ponto 41	17 – 38	-95	44,64
Ponto 42 – ponto 52	39 - 49	-100	47,89

PL ₀ [dBm]	Índice de atenuação com a distância γ		Nº médio de multipercursos
-14,8	PL ₁ = -1,94	PL ₂ = -2,64	51

Tabela C.18 - Resultados obtidos nos Ambientes D2.

Gráficos de perda de atenuação com a distância:

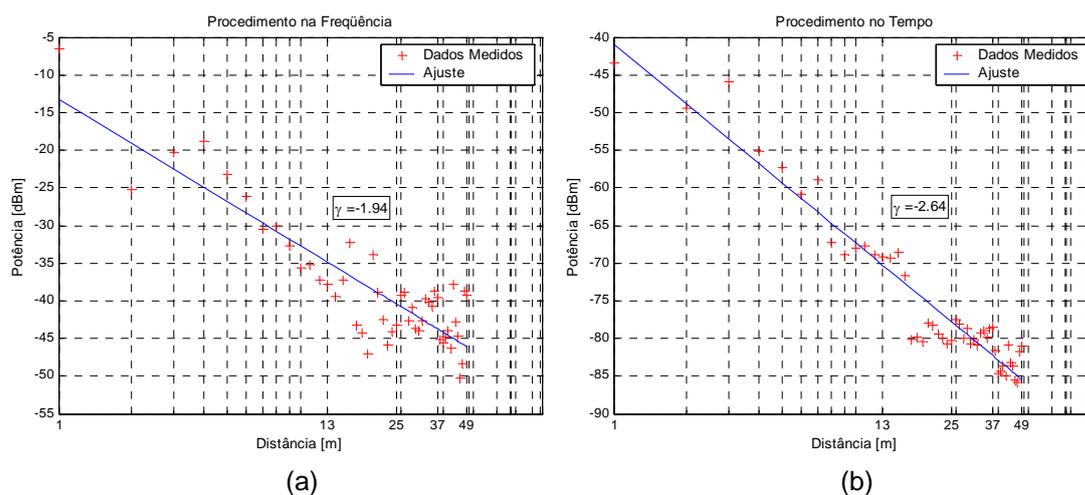


Fig C.40 – Perda de Propagação com a Distância no Ambiente D2. Procedimento na Frequência (a) e Procedimento no Tempo (b).

Gráficos de parâmetros do canal *versus* a distância:

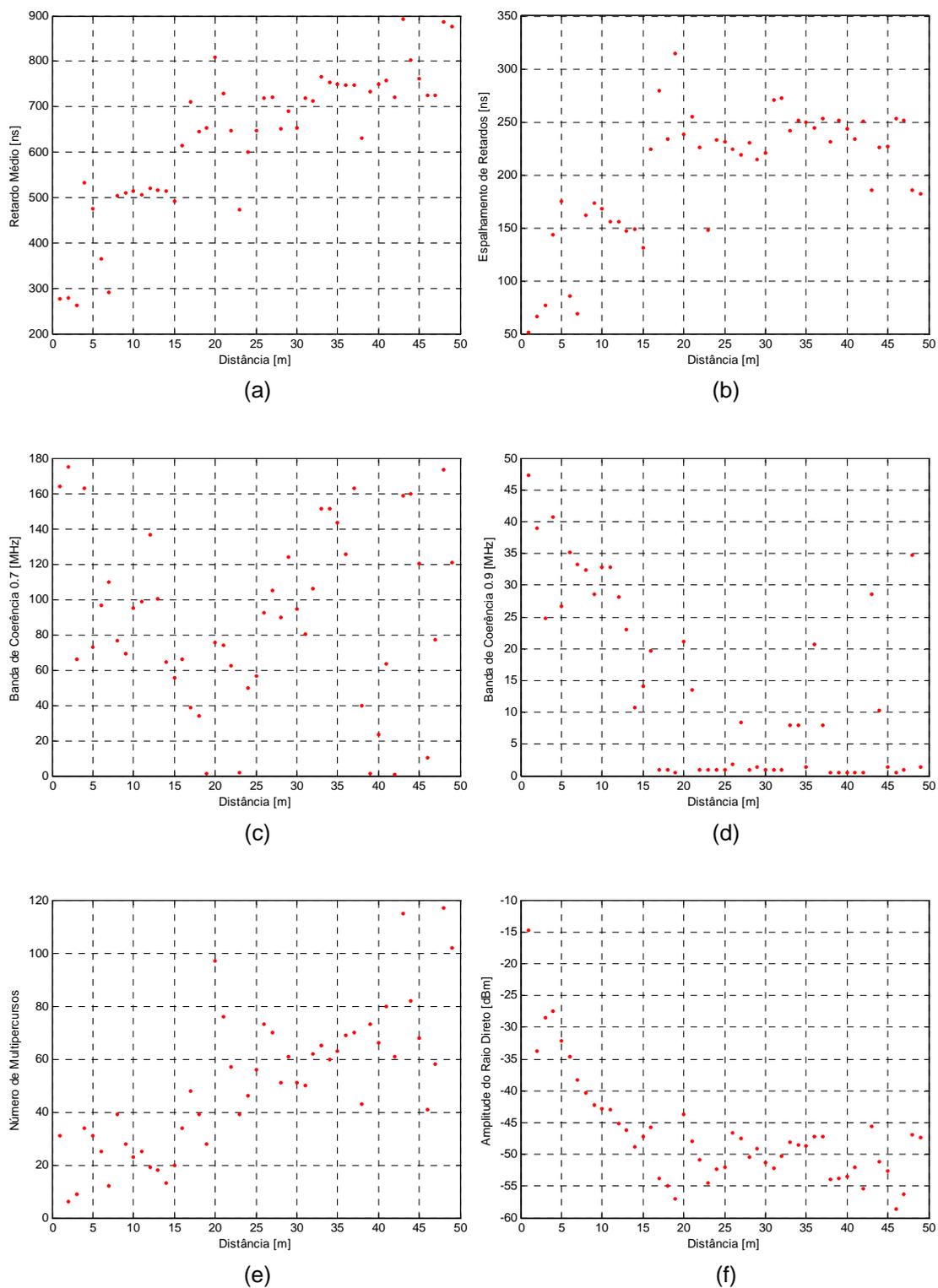


Fig C.41 – Parâmetros do Canal *versus* a Distância para o Ambiente D2.

Gráficos de perfil de retardos de potência:

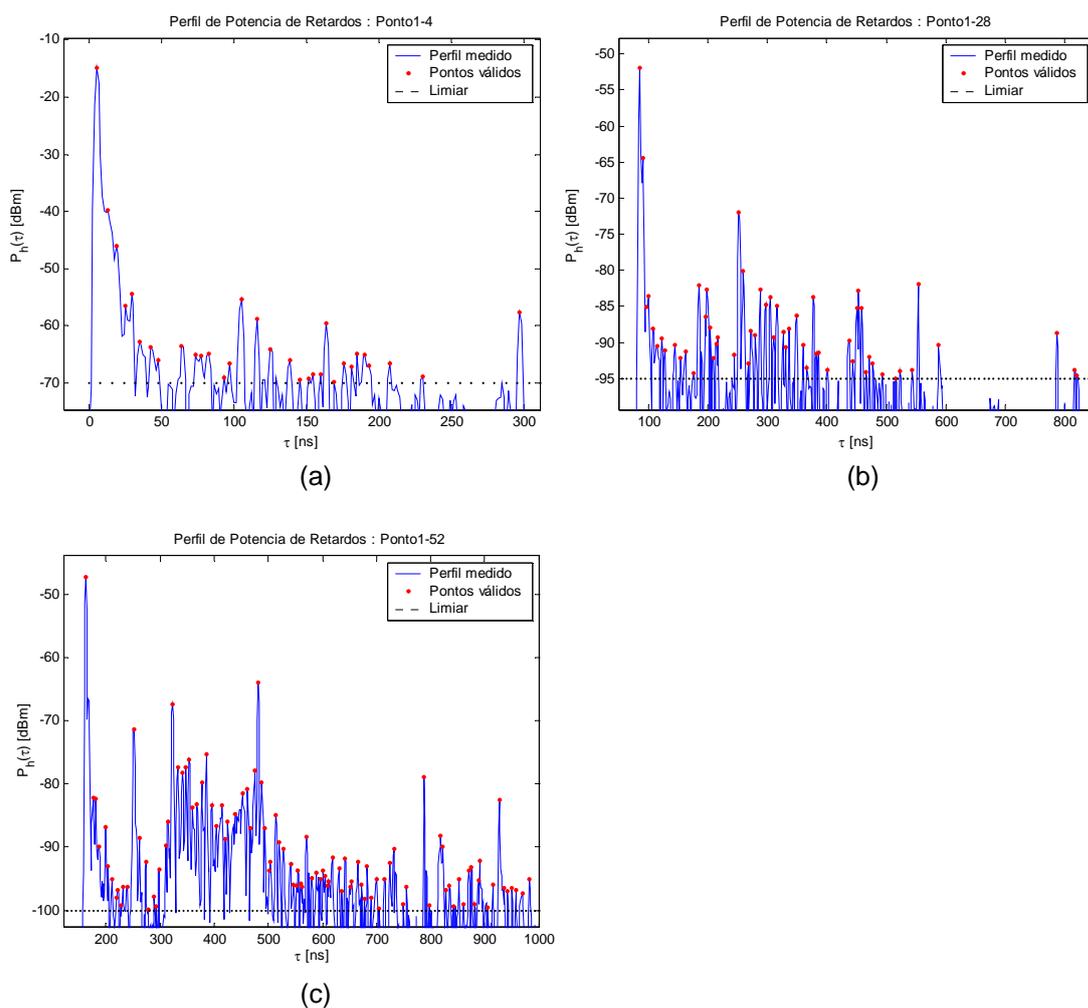


Fig C.42 – Perfil de Retardos de Potência a 1 metro (a), 24 metros (b) e 48 metros (c) de Distância TX-RX no ambiente D2.