

7

Resultados

Este capítulo apresenta uma análise dos resultados das medidas realizadas nos nove ambientes de propagação escolhidos. Como mencionado anteriormente para cada ambiente de medida, o transmissor ou o receptor foi descolado para diferentes posições, totalizando 32 posições diferentes. A maioria das medidas foi realizada sobre um grid quadrado com 36 pontos separados por um comprimento de onda, totalizando 1.134 pontos de medidas. Para cada ponto medido, 16 respostas impulsivas do canal foram coletadas totalizando assim 18.144 respostas impulsivas. Desse modo, apenas alguns pontos de alguns ambientes medidos foram escolhidos para serem apresentados.

Este capítulo será dividido em duas partes. A primeira parte apresenta os resultados das capacidades do canal MIMO para todos os ambientes de medidas. As funções cumulativas das capacidades faixa-larga e faixa-estreita, capacidade condicionada, capacidade média e análise dos canais paralelos são apresentados. A segunda parte apresenta os resultados da caracterização do canal, obtidos de um sistema de medidas com múltiplas antenas no transmissor e receptor. As estatísticas de pequena escala nos domínios temporal e espacial também são apresentadas, e suas influências na capacidade são discutidas.

7.1

Capacidade do Canal MIMO

A capacidade faixa-estreita do canal MIMO foi obtida particionando-se a banda total (200 MHz) em sub bandas de largura 0,25 MHz. Cada sub-banda foi

considerada uma matriz H independente. Assim, para esta largura de banda de 200 MHz, 801 matrizes H foram obtidas.

As funções cumulativas das capacidades faixa-estreita e faixa-larga foram determinadas a partir das capacidades calculadas dos dados medidos. A capacidade condicionada de 10% foi adotada. Para cada ambiente de medida, a resposta impulsiva do canal foi coletada em 36 pontos diferentes, conforme explicado anteriormente. Como o número de bandas independentes é insuficiente para o cálculo das funções cumulativas da capacidade faixa larga, decidiu-se agrupar as amostras coletadas em grupos de 6 pontos como mostra a Figura 32.

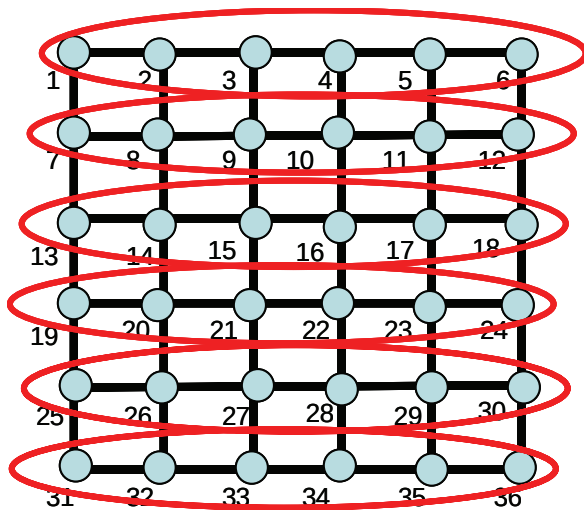


Figura 32 - Agrupamentos dos pontos

A seguir, são apresentados os resultados das capacidades faixa estreita e faixa larga. Nestes resultados os ganhos complexos foram normalizados e 20 dB foi a razão sinal ruído utilizada. Com a normalização, retira-se o efeito da distância no sinal e concentra-se apenas nos efeitos das mudanças do canal, ou seja, nas características do canal.

Na apresentação dos resultados da capacidade faixa-estreita também são apresentados os resultados da variação da capacidade com a potência, para uma potência de ruído de -88dBm. O objetivo é mostrar como a capacidade varia com a potência do sinal médio e as características do canal.

• Capacidade Faixa-estreita

A seguir, são apresentadas as cumulativas das capacidades e as capacidades condicionadas do canal faixa-estreita para os ambientes medidos. São apresentadas também as cumulativas das capacidades e as capacidades condicionadas do canal ideal. Dois pontos do grid, os quais representam a capacidade condicionada de 10% máxima e mínima, foram escolhidos para serem representados.

A Figura 33 apresenta as cumulativas do canal faixa-estreita para o ambiente CETUC. A Figura 34 apresenta os valores das capacidades condicionadas para cada ambiente medido dentro do CETUC.

O objetivo das medidas no ambiente CETUC era verificar como a capacidade variava para diferentes posições do transmissor em torno do receptor. Objetos metálicos foram adicionados em alguns ambientes com o objetivo de aumentar o número de espalhadores.

A Tabela 11 apresenta o percentual de quanto a capacidade medida é menor que a capacidade ideal. Os valores em negrito correspondem aos pontos escolhidos das cumulativas da capacidade do canal faixa-estreita dada pela Figura 2.

Pontos	Medida/Ideal (%)						
	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5	CT6	CT7
1	9,86	11,48	10,91	12,27	12,53	10,88	10,13
2	11,18	13,57	13,59	13,68	13,53	11,34	11,71
3	13,82	14,12	16,96	17,05	12,25	11,36	12,87
4	12,86	12,19	13,58	16,86	9,29	10,89	10,46
5	9,99	9,89	11,78	14,38	11,72	10,46	9,81
6	14,70	11,69	10,43	12,44	11,75	8,16	9,73

Tabela 11 - Relação entre a capacidade condicionada medida e a ideal para o CETUC

Pode-se observar que, para diferentes posições do transmissor, a capacidade variou no máximo em 2 bits/s/Hz. Para os casos CT1 e CT2, o aumento dos espalhadores do lado do transmissor praticamente não produziu nenhum impacto na capacidade. Com a inserção de uma placa na frente do transmissor, houve, na maioria dos pontos, uma pequena redução da capacidade e, assim, o aumento do número de espalhadores não produziu nenhum efeito.

Uma explicação do não aumento da capacidade é a pequena presença, mesmo com a inserção de algumas placas de metais, de objetos espalhadores que produziram diferentes percursos.

Para os casos CT3 e CT4, o aumento dos espalhadores do lado do transmissor também não produziu nenhum impacto significativo na capacidade, novamente havendo uma pequena redução da capacidade. Para os casos CT6 e CT7 houve uma pequena melhora da capacidade quando a porta da sala ficou aberta.

Pode se observar através das Figuras 33 e 34 que, variando a posição do receptor ao longo do grid de 36 pontos, a capacidade variou em até 1 bits/s/Hz. Essas variações são decorrentes principalmente da disposição dos espalhadores no ambiente, que varia ao longo dos pontos que são percorridos no grid. É importante lembrar ainda que a direção do receptor (paralelo ao transmissor) foi diferente para alguns dos ambientes de medidas.

As Figuras 35 e 36 apresentam a razão sinal ruído medida e a capacidade obtida no ambiente CETUC. É possível observar uma pequena variação SNR ao longo do grid e, conseqüentemente, na capacidade.

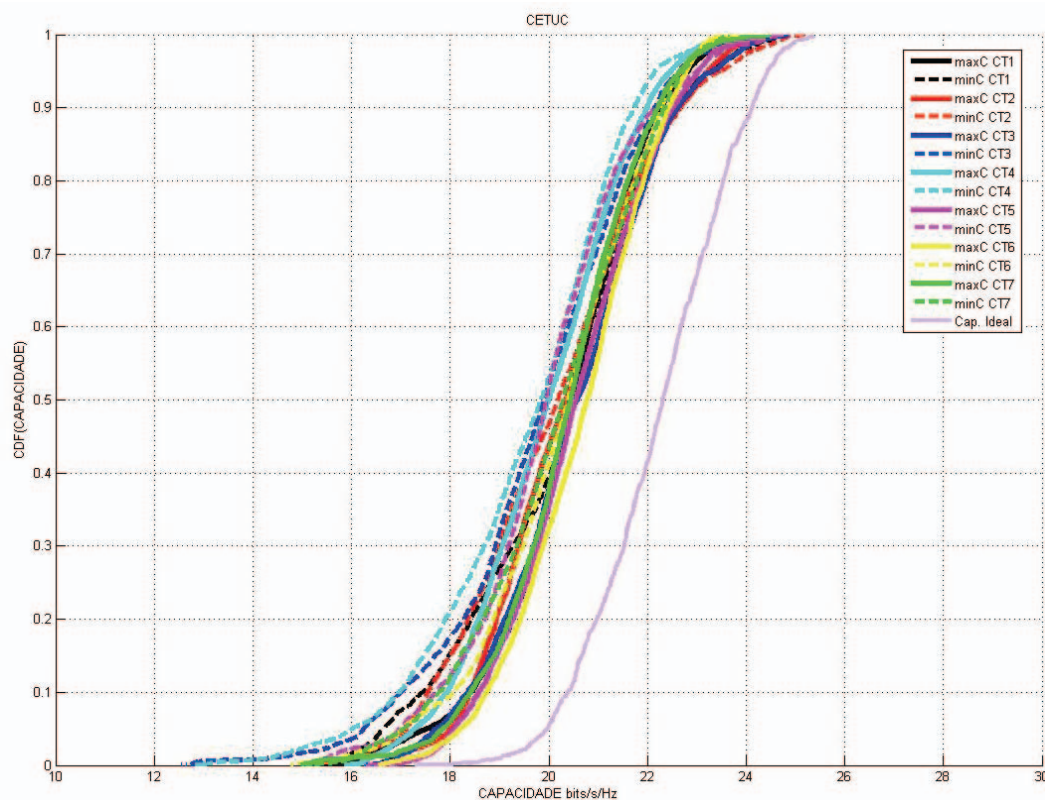


Figura 33 - Cumulativas da capacidade do canal faixa estreita no ambiente CETUC

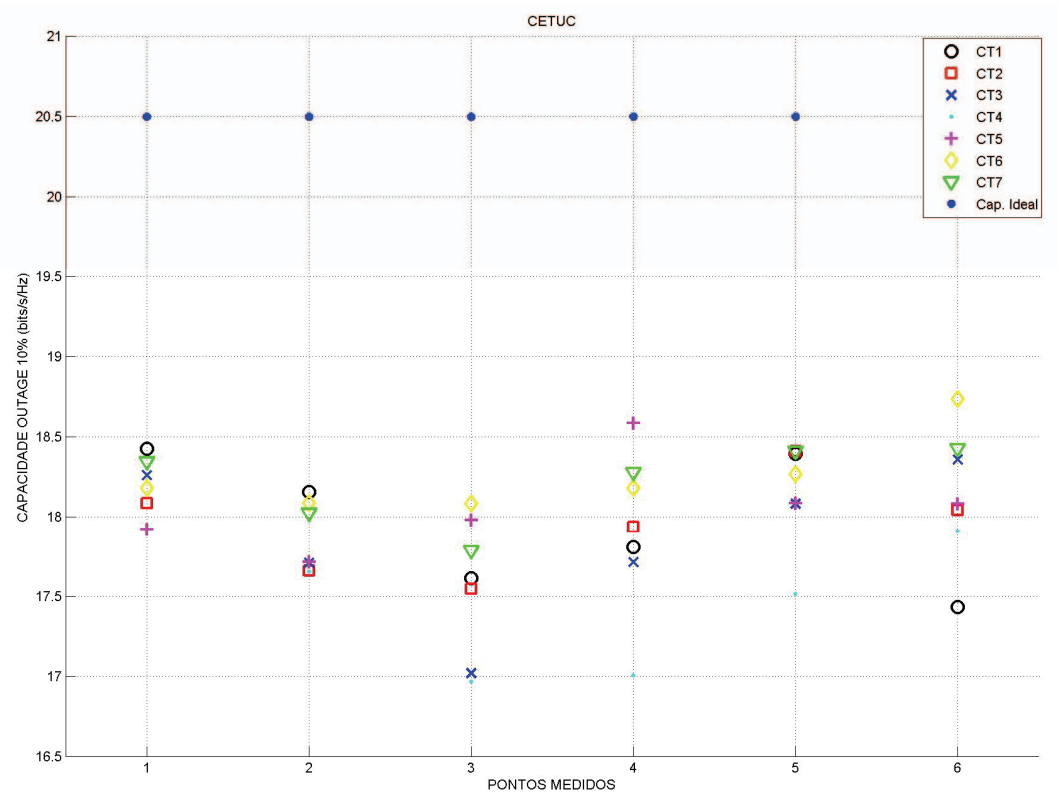


Figura 34 - Capacidade condicionada 10% do ambiente CETUC

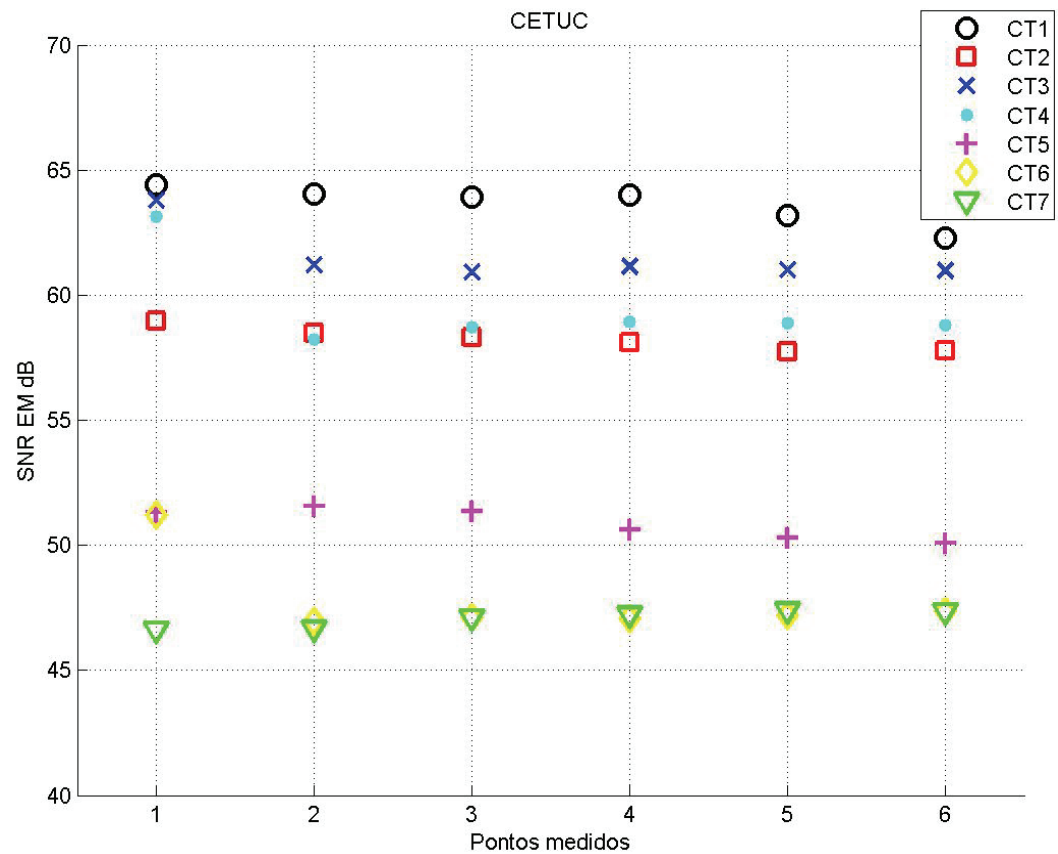


Figura 35 - SNR medida para o ambiente CETUC

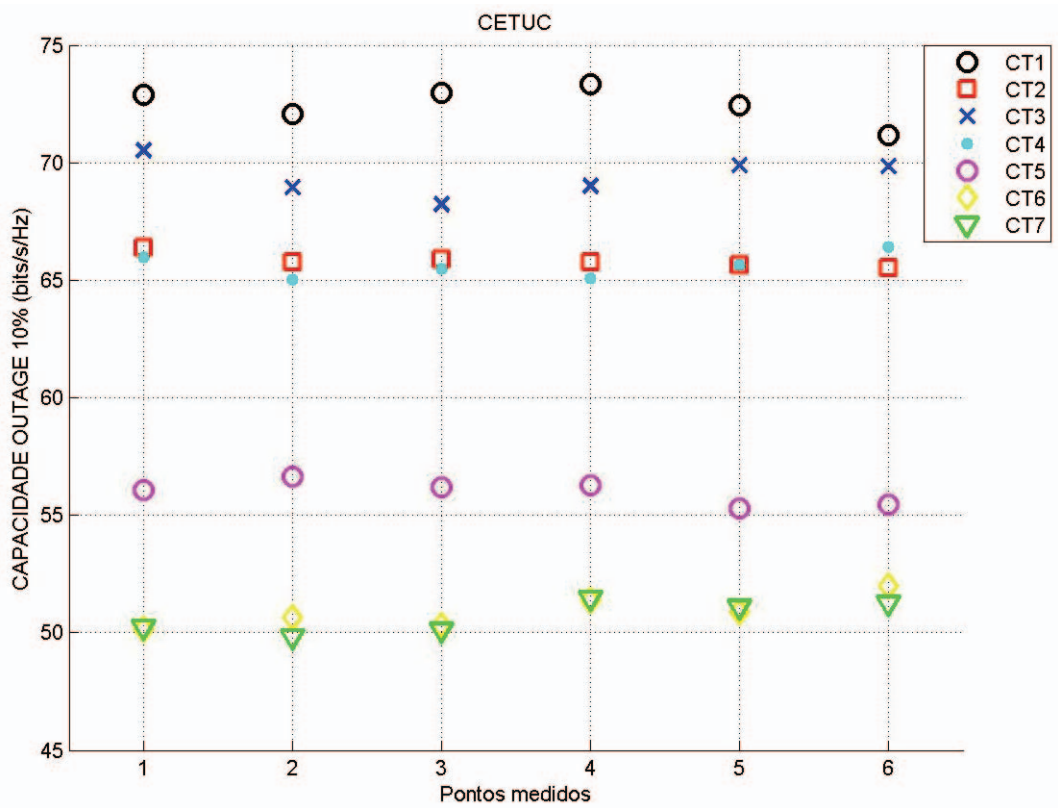


Figura 36 - Capacidade condicionada para a SNR medida para o ambiente CETUC

A Figura 37 apresenta as cumulativas da capacidade para o ambiente Laboratório de Sistemas. A Figura 38 apresenta os valores das capacidades condicionadas para seis cumulativas da capacidade, para as três diferentes posições do grid.

O objetivo das medidas no ambiente laboratório de Sistemas era verificar como a capacidade variava para situações com visada, com visada parcial e sem a visada. A Tabela 12 apresenta o percentual de quanto a capacidade medida é menor que a capacidade ideal. Os valores em negrito correspondem aos pontos escolhidos das cumulativas da capacidade do canal faixa-estreita dada pela Figura 37.

Pontos	Medida/Ideal (%)		
	LS1 (visada)	LS2 (visada parcial)	LS3 (sem visada)
1	24,99	30,61	19,55
2	25,40	26,03	22,51
3	29,78	24,08	19,95
4	30,16	24,70	20,93
5	31,86	25,33	20,39
6	32,98	23,04	20,08

Tabela 12 - Relação entre a capacidade condicionada medida e a ideal para o ambiente Laboratório de Sistemas

Para a situação com visada (LS1), tem-se uma capacidade aproximadamente 30% menor que a capacidade ideal e aproximadamente 24% menor para a situação com visada parcialmente obstruída (LS2). Para a situação sem visada (observando as Tabelas 11 e 12) a capacidade pode variar aproximadamente de 9 a 20%. Essa grande variação na capacidade sem visada depende da quantidade e do tipo de espalhadores presentes no ambiente. No Laboratório de Sistemas, por exemplo, além da quantidade de espalhadores em torno do transmissor e receptor ser bem pequena, os elementos presentes no ambiente produzem pouco espalhamento no sinal.

É possível observar através das Figuras 37 e 38 como a capacidade varia para as situações com visada, com visada parcial e sem visada. Aproximadamente 3 bits/s/Hz são acrescentados na capacidade partindo da situação com visada para a sem visada (ponto 6).

Para a situação com visada direta (LS1), com o deslocamento do receptor em direção ao transmissor (ponto 1 para o ponto 6) a capacidade é reduzida. Com a aproximação do receptor do transmissor praticamente predomina apenas um sub-canal.

Para a situação com visada parcial, é possível verificar que a capacidade cresce da situação com visada parcial para a sem visada (ponto 1 para o ponto 6). Para situação sem visada a capacidade praticamente não variou.

As Figuras 39 e 40 apresentam a SNR e a capacidade para a potência do sinal médio. Novamente que ao longo do grid a capacidade praticamente não variou.

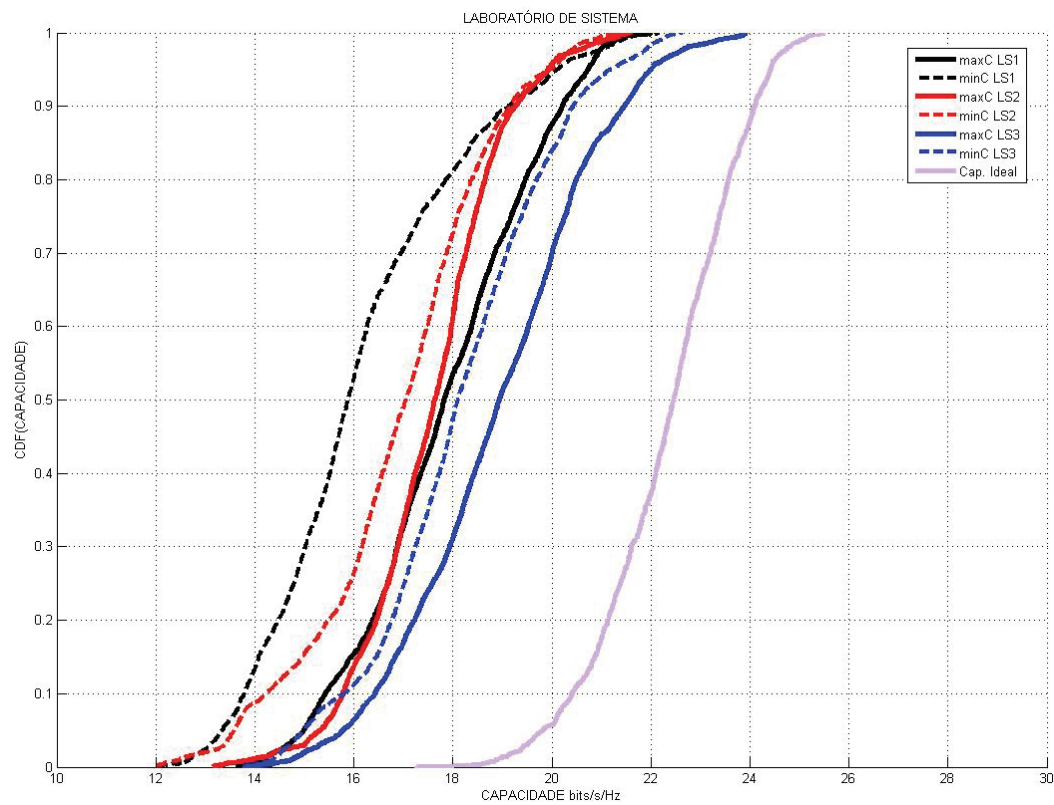


Figura 37 - Cumulativas da capacidade do canal faixa-estreita no ambiente Laboratório de Sistemas

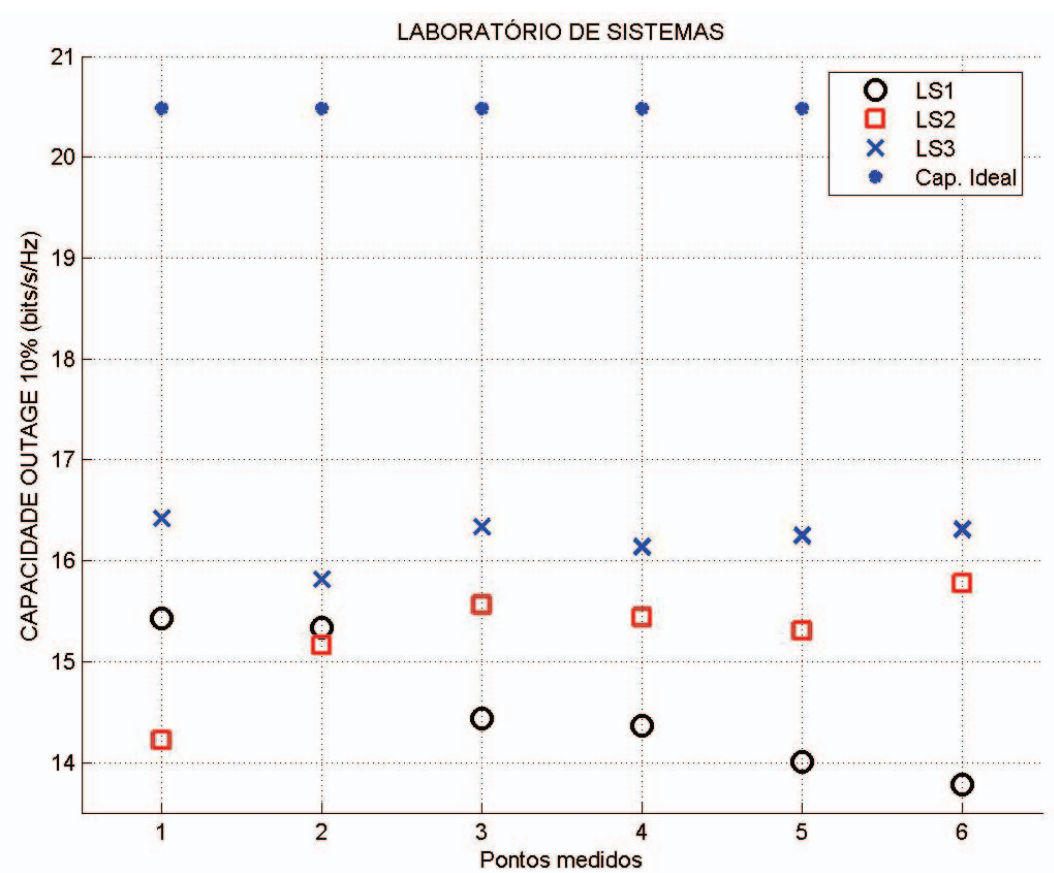


Figura 38- Capacidade condicionada 10% no ambiente Laboratório de Sistemas

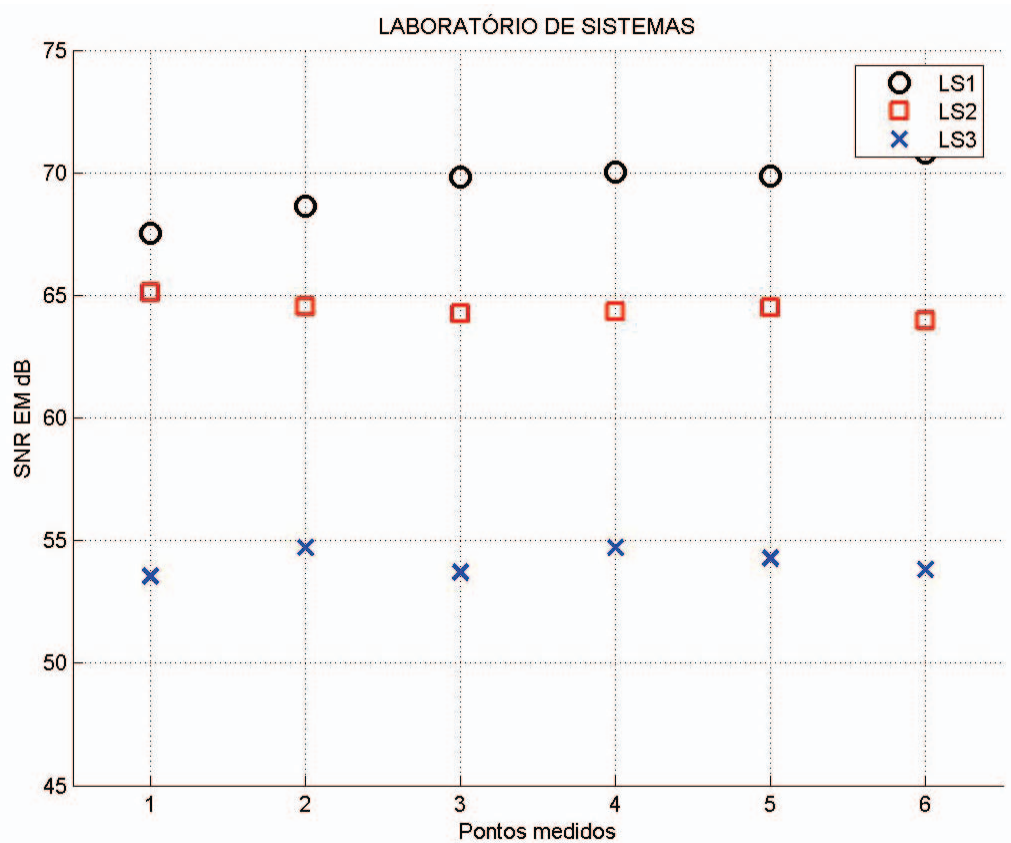


Figura 39 - SNR medida para o ambiente Laboratório de Sistemas

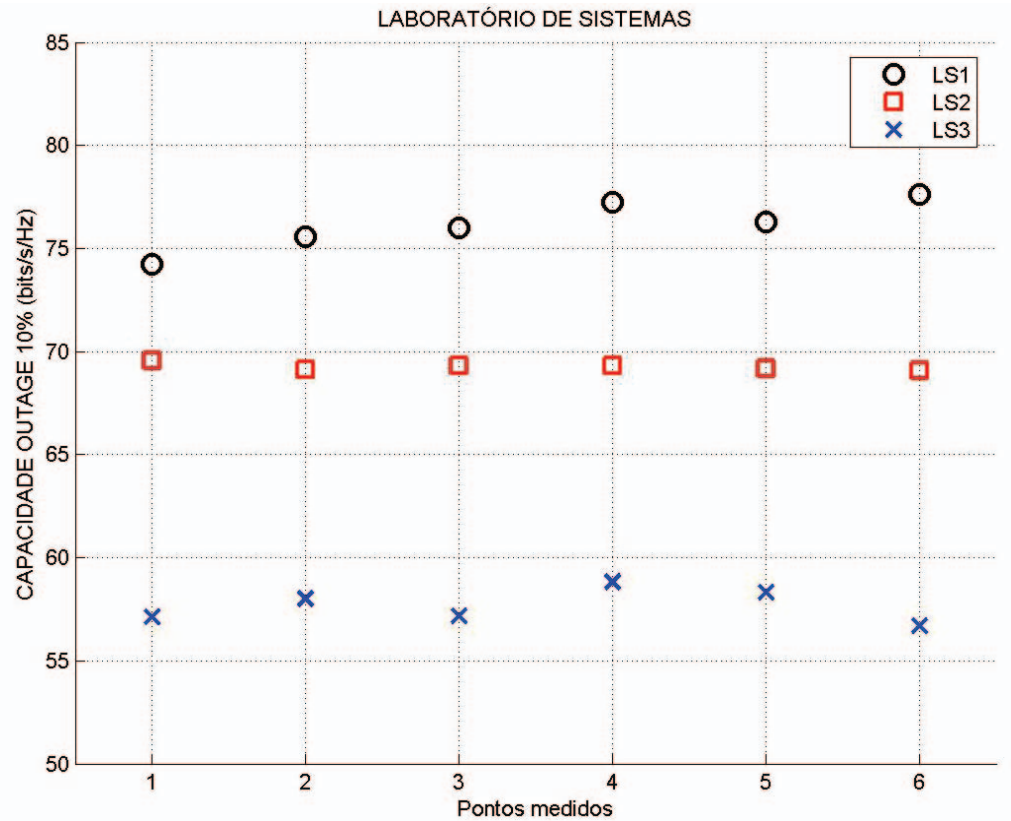


Figura 40 - Capacidade condicionada para a SNR medida para o ambiente Laboratório de Sistemas

A Figura 41 apresenta as cumulativas da capacidade para o ambiente Laboratório de Óptica. A Figura 42 apresenta os valores das capacidades condicionadas para seis cumulativas da capacidade, para as três diferentes posições do grid.

Como já descrito no Capítulo 4, o Laboratório de Óptica é um laboratório com duas salas: sala de computadores onde foi colocado o transmissor, e a sala de equipamentos onde foi colocado o receptor. Entre estas duas salas existe apenas uma parede fina. Contudo, a sala de equipamentos além de ser grande, possui vários espalhadores.

Através das Figuras 41 e 42 é possível observar que apesar de existem vários espalhadores em torno dos pontos de medidas LO1 e LO3, a capacidade do canal foi baixa se comparada com a capacidade ideal. No caso do ponto LO2, a visada entre o transmissor e o receptor era obstruída pela parede fina e por um armário metálico, produzindo uma melhora na capacidade de até 3 bits/s/Hz em algumas posições. É interessante observar que a capacidade variou não somente ao longo do grid, mas também em diferentes pontos no laboratório de Óptica.

A Tabela 13 apresenta o percentual de quanto a capacidade medida é menor que a capacidade ideal. Os valores em negrito correspondem aos pontos escolhidos das cumulativas da capacidade do canal faixa estreita dada pela Figura 41.

As Figuras 43 e 44 apresentam a razão sinal ruído e a capacidade para o Laboratório de Óptica. As distâncias entre os três pontos medidos (receptor) e o transmissor eram praticamente as mesmas. Porém, conforme explicado acima, entre o transmissor e o ponto LO2 existia um armário metálico, o que justifica uma SNR menor que nos outros pontos medidos (LO1 e LO3). É possível novamente observar que houve pouca variação SNR ao longo do grid e, conseqüentemente, na capacidade.

Pontos	Medida/Ideal (%)		
	LO1	LO2	LO3
1	17,50	14,51	18,95
2	19,25	11,74	20,34
3	19,76	10,31	19,61
4	23,87	9,96	20,42
5	22,76	11,23	23,74
6	23,19	12,31	22,49

Tabela 13 - Relação entre capacidade condicionada medida e a ideal para o ambiente Laboratório de Óptica

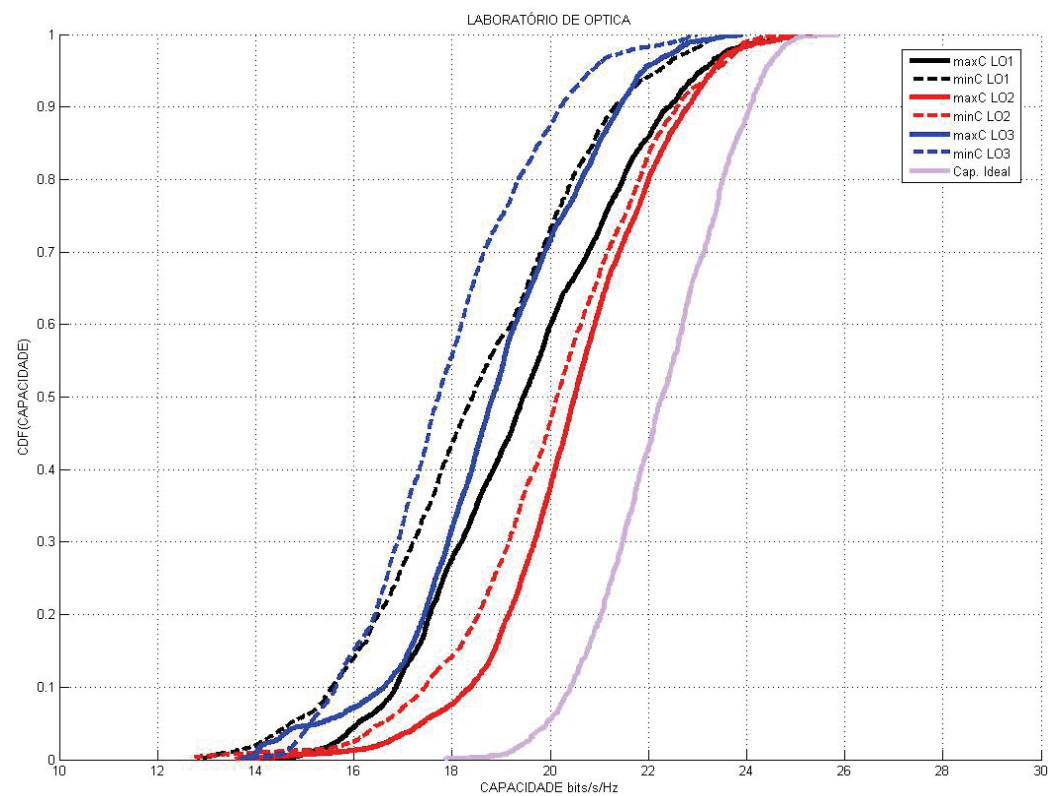


Figura 41 - Cumulativas da capacidade do canal faixa estreita no ambiente Laboratório de Óptica

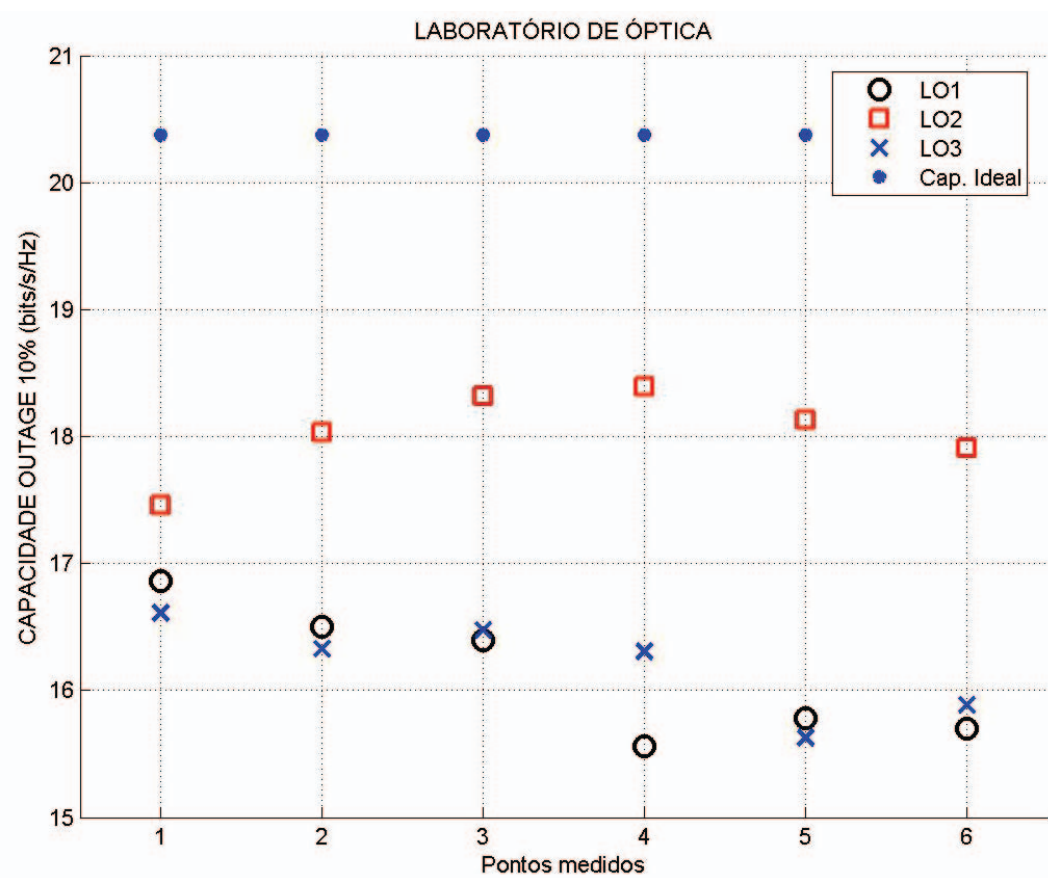


Figura 42 - Capacidade condicionada 10% no ambiente Laboratório de Óptica

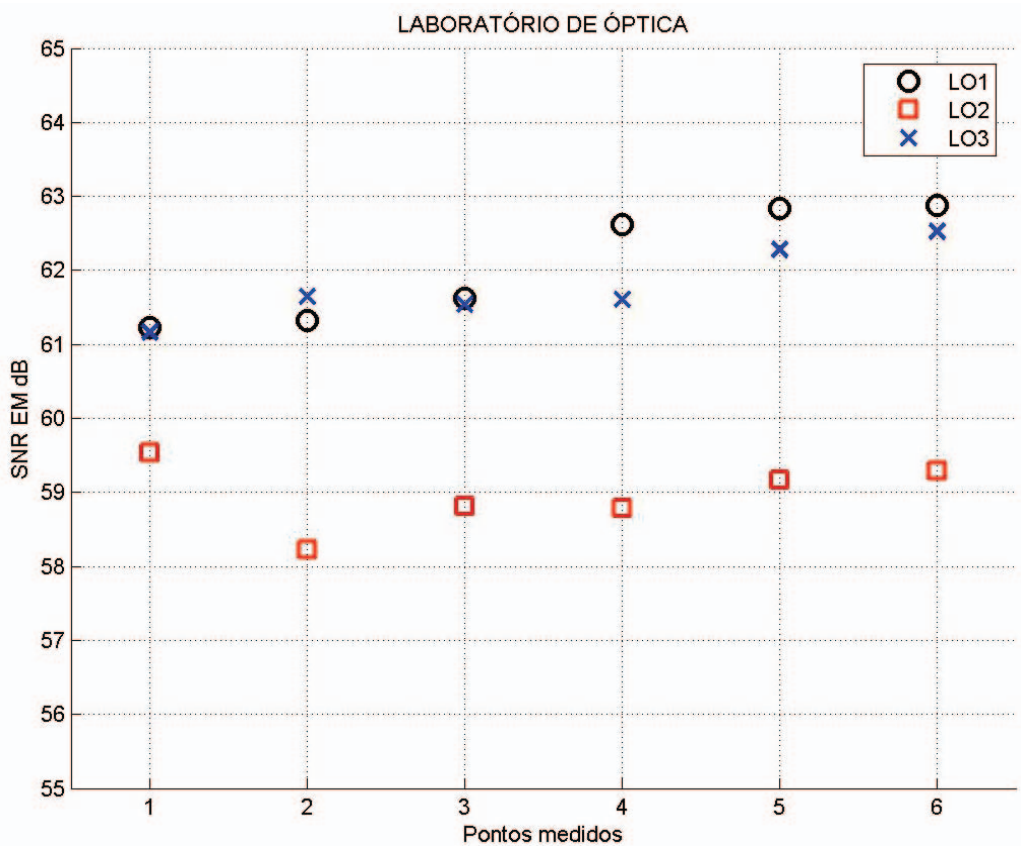


Figura 43 - SNR medida no ambiente Laboratório de Óptica

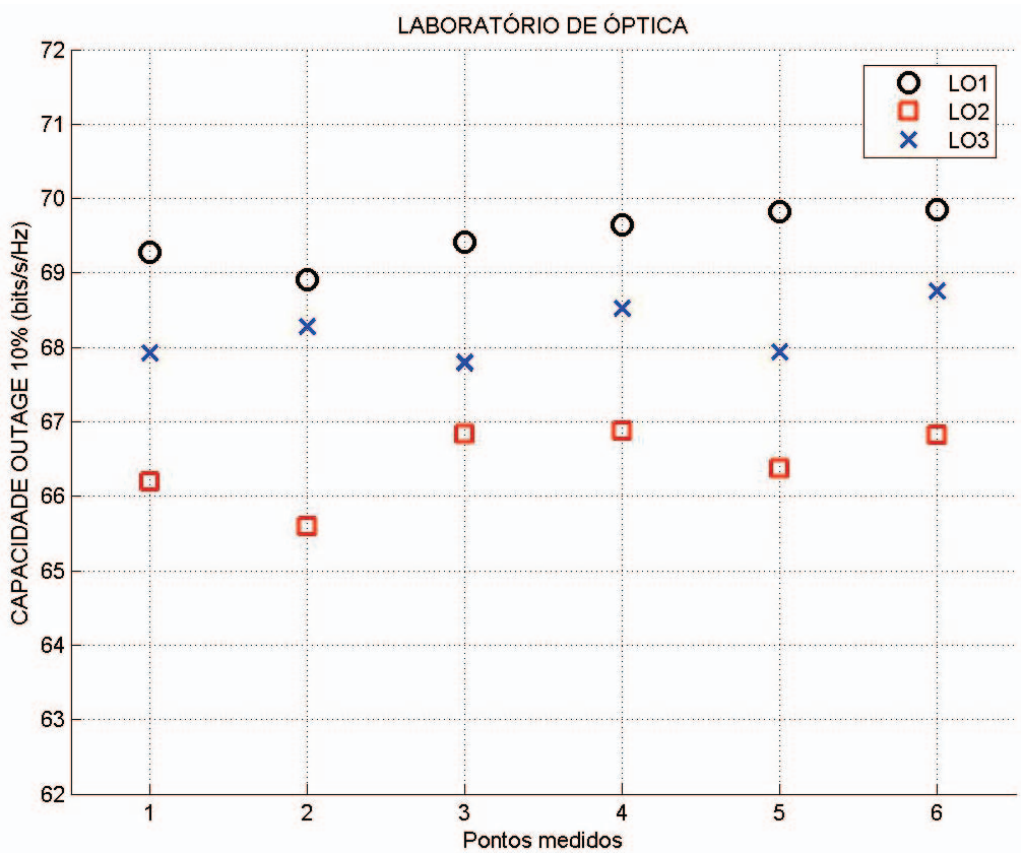


Figura 44 - Capacidade condicionada para a SNR medida para o ambiente Laboratório de Óptica

A Figura 45 apresenta as cumulativas da capacidade e a Figura 46 apresenta os valores das capacidades condicionadas para os nove pontos medidos no ambiente do corredor do CETUC.

Uma característica marcante em medidas de capacidade de um canal MIMO em corredores é a sua queda com a distância, como foi demonstrado em [8, 9]. Em [8, 9] foi demonstrado que a correlação dos sinais na transmissão aumenta com a distância, e que a correlação dos sinais na recepção independe da distância. Assim, no geral, a capacidade diminui com o aumento da distância.

A Tabela 14 apresenta o percentual de quanto a capacidade medida é menor que a capacidade ideal.

As Figuras 42 e 43 apresentam a razão sinal ruído e a capacidade para o para o corredor do CETUC. O aspecto interessante quando se retira o efeito da distância para o cálculo da capacidade é mostrado nas Figuras 46 e 48. Analisando apenas a Figura 48, é possível afirmar que a queda da capacidade se dá justamente pela redução da SNR. Com a normalização, verifica-se no entanto, que existem outros fenômenos no canal que reduz a capacidade. Neste caso específico, o aumento da correlação entre os sinais que é o responsável pela redução da capacidade.

Local de Medida	Pontos	Medida/Ideal (%)
CC	1	15,87
	2	15,80
	3	17,42
	4	9,11
	5	20,22
	6	29,04
	7	22,04
	8	22,41
	9	24,52

Tabela 14 - Relação entre a capacidade condicionada medida e a ideal para o Corredor do CETUC

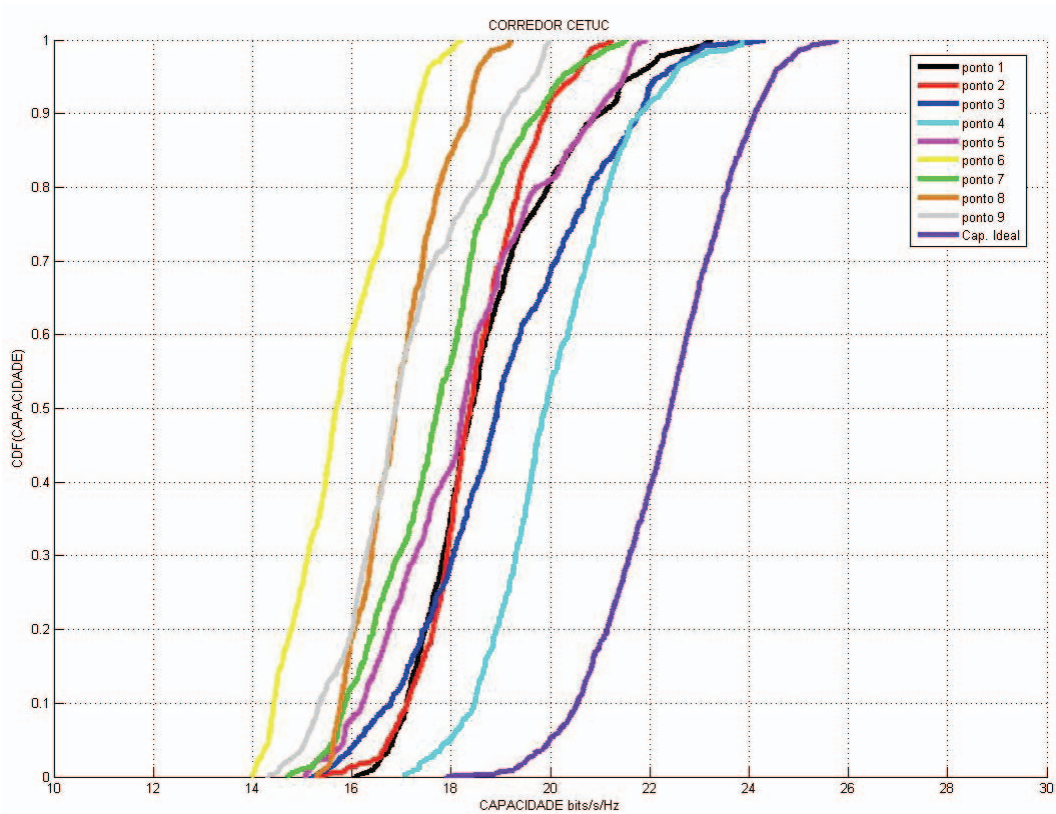


Figura 45 - Cumulativas da capacidade do canal faixa-estreita no ambiente Corredor do CETUC

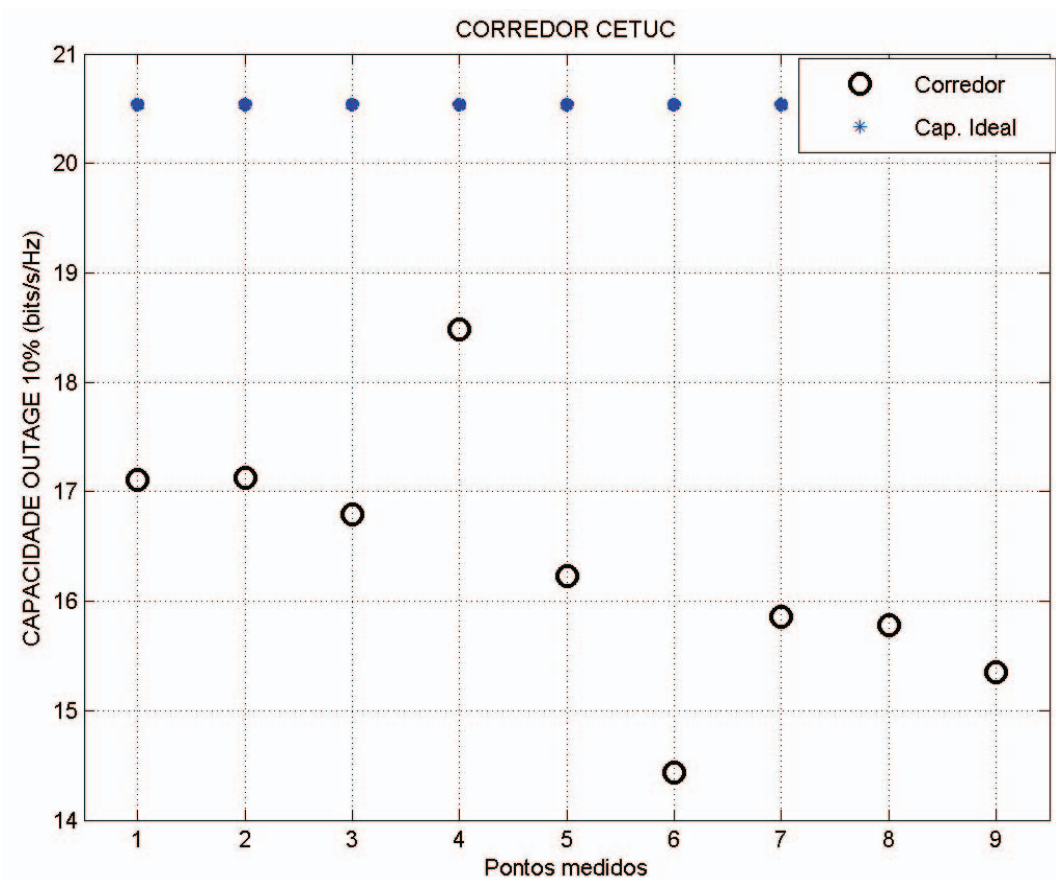


Figura 46 - Capacidade condicionada 10% no ambiente Corredor do CETUC

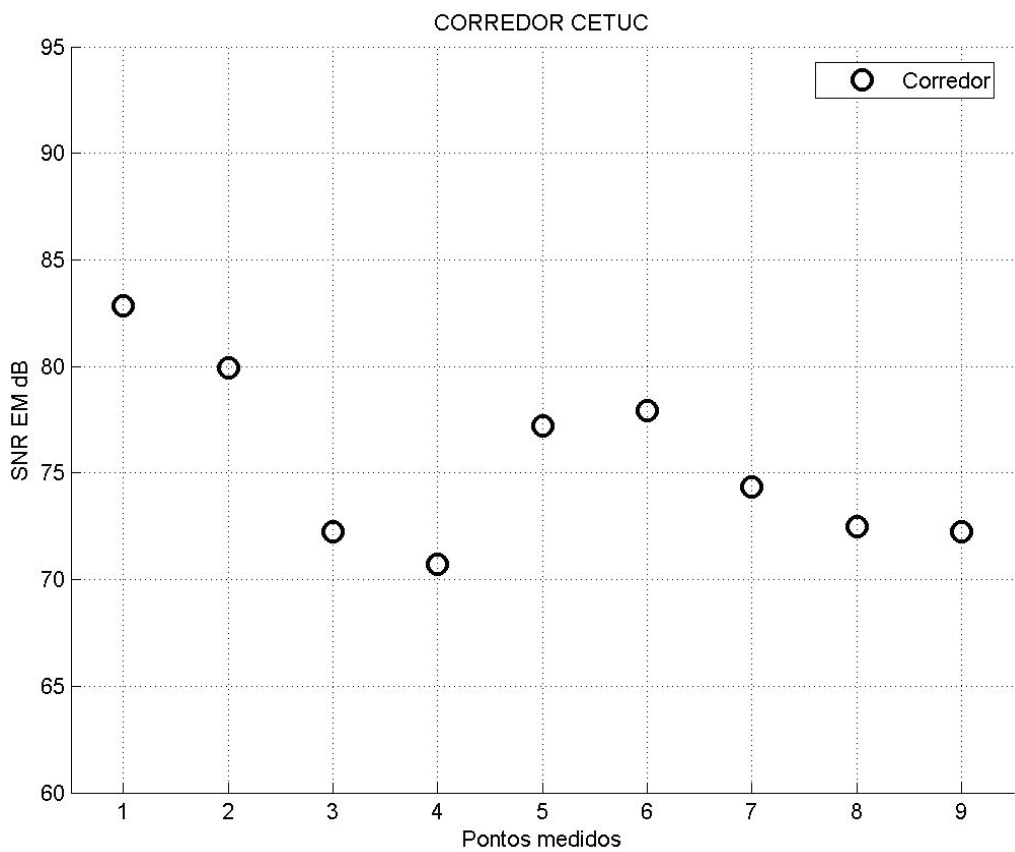


Figura 47 - SNR medida no ambiente Corredor do CETUC

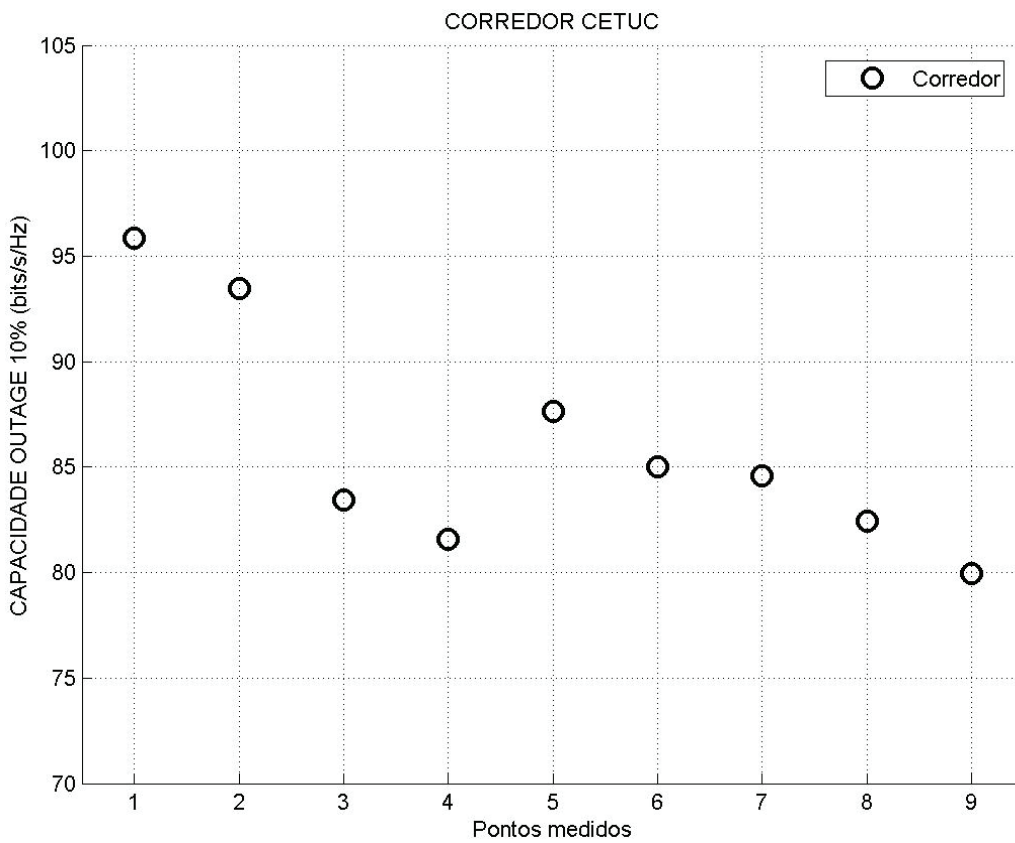


Figura 48 - Capacidade condicionada para a SNR medida no ambiente Corredor do CETUC

A Figura 49 apresenta as cumulativas da capacidade para o ambiente CETUC 2. A Figura 50 apresenta os valores das capacidades condicionadas para seis cumulativas da capacidade, para cinco situações diferentes do receptor.

Como descrito no Capítulo 4, grandes placas de metais foram adicionadas no ambiente, na tentativa de bloquear totalmente a visada entre o transmissor e o receptor. Observando as Figuras 49 e 50, as capacidades obtidas nos ambientes CT2_1 a CT2_3 foram baixas se comparadas com a capacidade ideal. Para os pontos CT2_4 e CT2_5, as capacidades foram extremamente baixas. Uma possível explicação para a baixa capacidade neste ambiente é que uma provável canalização do sinal ocorreu no corredor. Com a canalização do sinal, as correlações entre os sinais aumentaram, reduzindo a capacidade.

A Tabela 15 apresenta o percentual de quanto a capacidade medida é menor que a capacidade ideal. Os valores em negrito correspondem aos pontos escolhidos das cumulativas da capacidade do canal faixa-estreita dada pela Figura 49.

Pontos Medidos	Medida/Ideal (%)				
	CT2_1	CT2_2	CT2_3	CT2_4	CT2_5
1	33,18	29,55	32,73	45,28	42,32
2	29,26	28,66	33,53	46,00	41,72
3	28,99	30,23	29,99	46,48	41,86
4	25,71	21,45	27,28	46,93	42,99
5	26,66	21,85	27,93	45,18	43,29
6	28,93	24,45	31,89	45,25	43,97

Tabela 15 - Relação entre a capacidade condicionada medida e a ideal para o ambiente CETUC 2

As Figuras 51 e 52 apresentam a razão sinal ruído e a capacidade para o para o CETUC 2. Através das Figuras 50 e 52, é mostrada novamente a importância da retirada do efeito da distância para a análise da capacidade do canal.

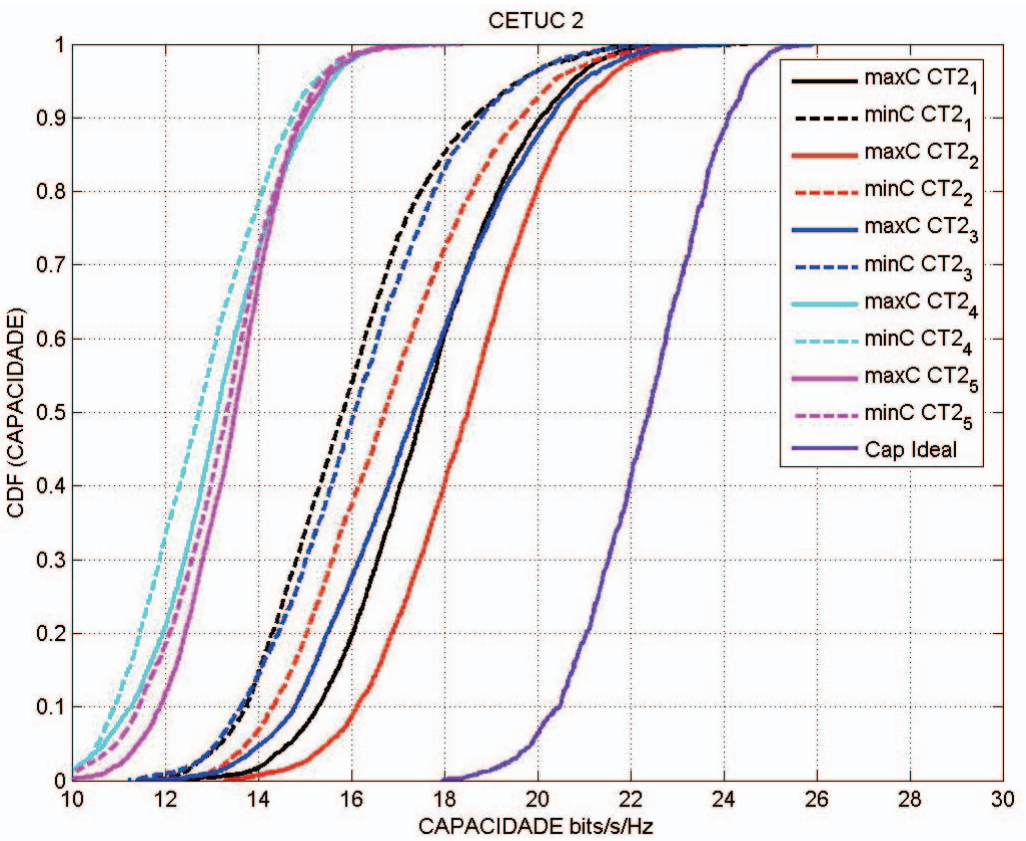


Figura 49 - Cumulativas da capacidade do canal faixa estreita para o ambiente CETUC 2

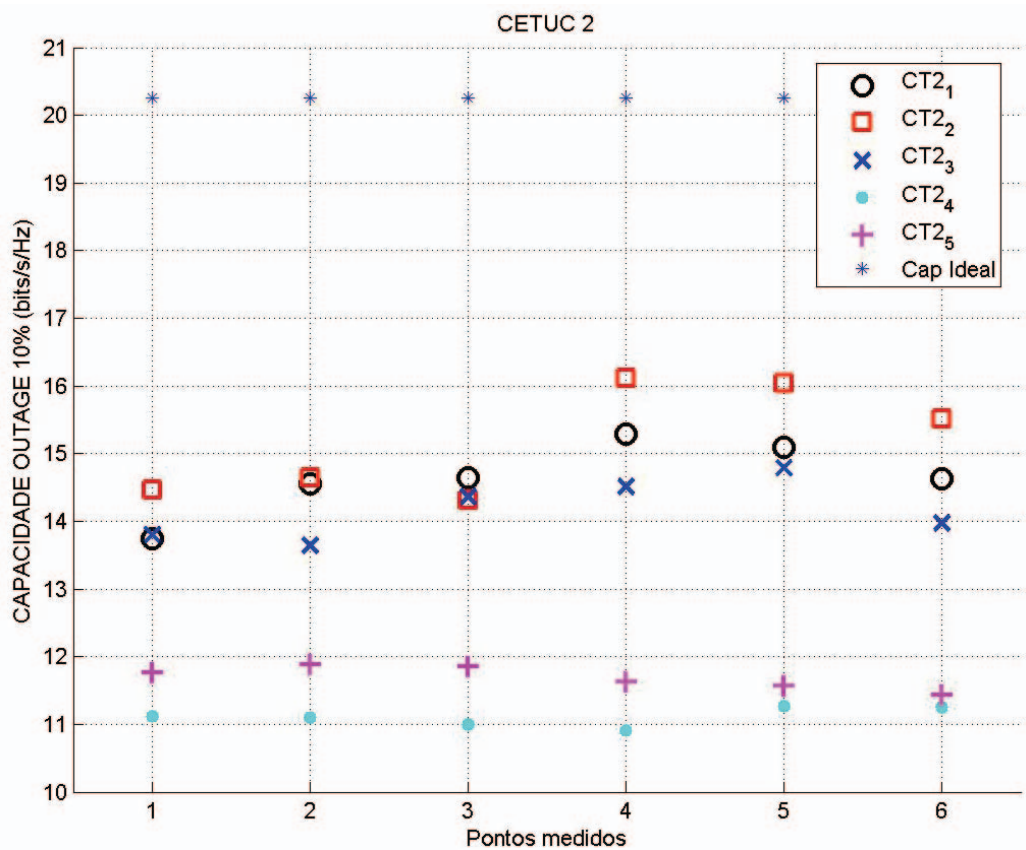


Figura 50 - Capacidade condicionada 10% no ambiente CETUC 2

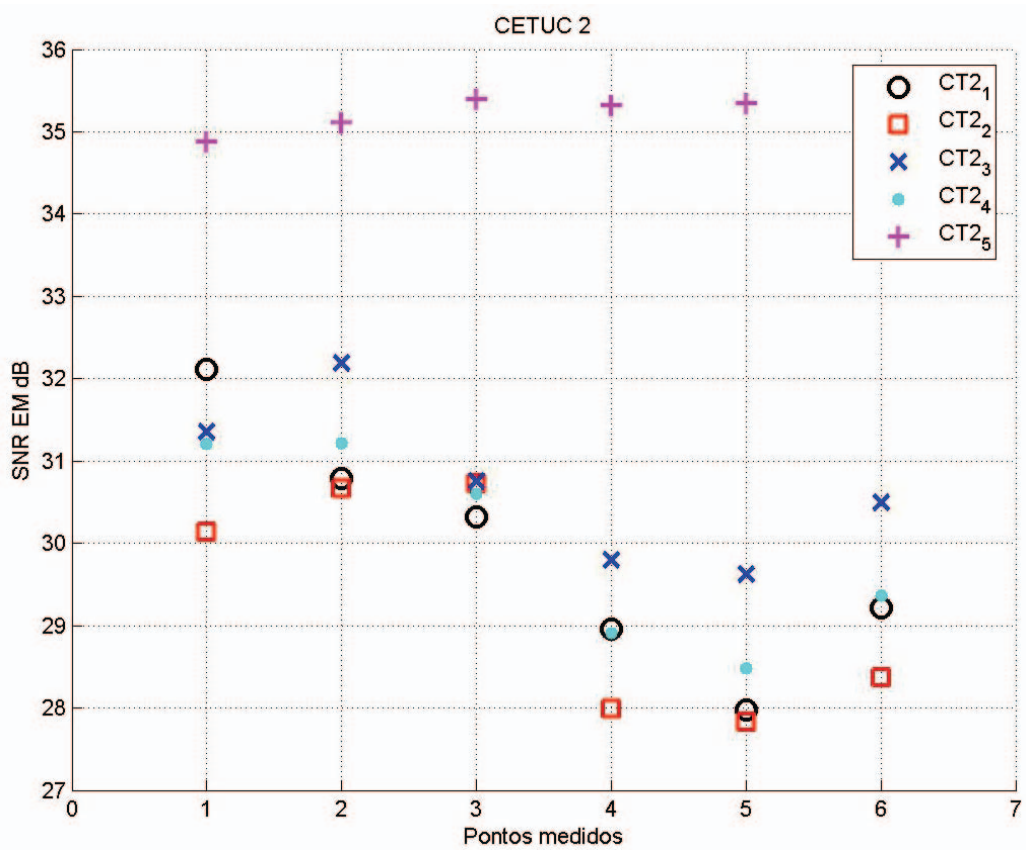


Figura 51 - SNR medida para o ambiente CETUC 2

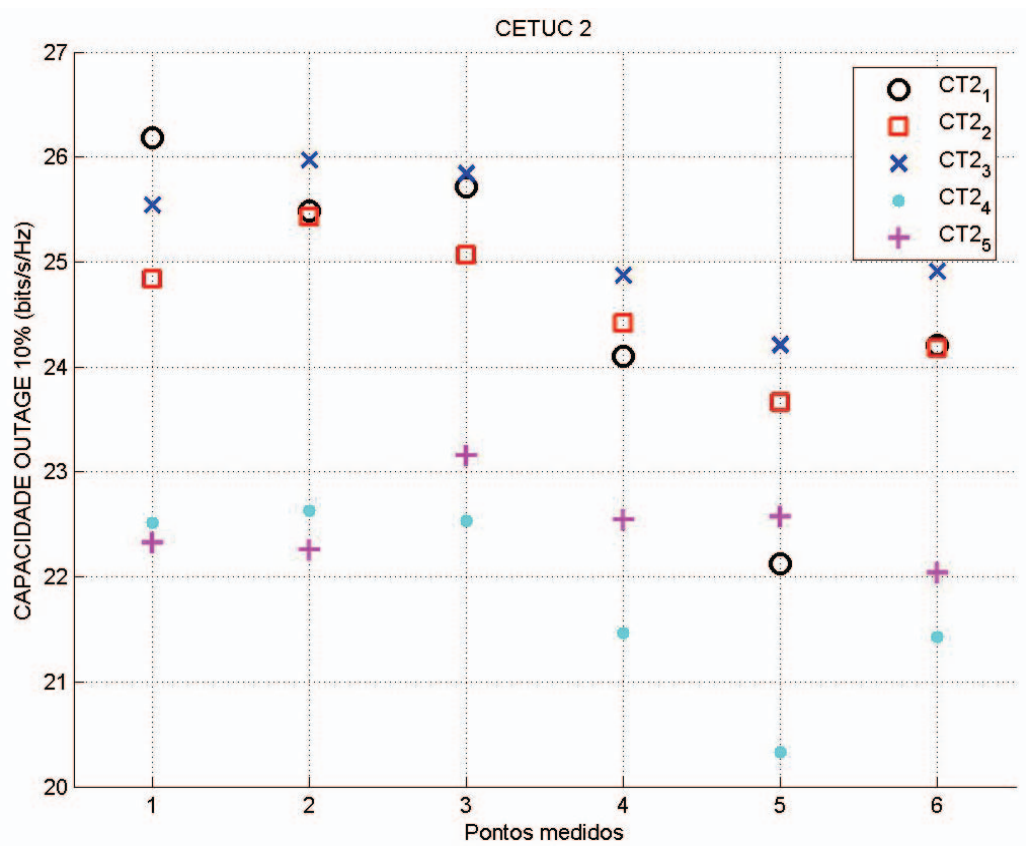


Figura 52 - Capacidade condicionada para a SNR medida para o ambiente CETUC 2

A Figura 53 apresenta as cumulativas para o ambiente Leme. A Figura 54 apresenta os valores das capacidades condicionadas para os 45 pontos medidos ao longo do corredor. A Figura 55 apresenta os valores das capacidades condicionadas para os pontos de medidas LM2 a LM5.

A Tabela 16 apresenta o percentual de quanto a capacidade medida é menor que a capacidade ideal para aos pontos de medidas LM2 a LM5. Os valores em negrito correspondem os pontos escolhidos das cumulativas da capacidade do canal faixa-estreita dada pela Figura 53.

Os pontos LM2 e LM3 foram medidos em um grid a 36 e a 47 metros do transmissor. A baixa capacidade obtida para estes dois pontos é resultado, principalmente, do aumento da correlação dos sinais que se dá com o aumento da distância entre o transmissor e o receptor. Os pontos LM4 e LM5 foram medidos sem visada obtendo melhores capacidades.

O ponto chamado LM1 é composto de 45 pontos medidos ao longo do corredor separados por 1 metro de distância. O primeiro ponto foi medido a partir de 3 metros do transmissor. É possível observar novamente, como mostrado nas medidas do corredor do CETUC, o decréscimo da capacidade com o aumento da distância.

As Figuras 56 a 59 apresentam a razão sinal ruído e a capacidade para o para o Leme. A mesma análise sobre a importância da normalização da matriz do canal realizada para o corredor do CETUC e do CETUC 2 pode ser feita também para o Leme.

Pontos	Medida/Ideal (%)			
	LM2	LM3	LM4	LM5
1	51,64	40,10	14,35	13,70
2	51,456	39,23	13,17	12,29
3	51,70	39,54	12,16	11,88
4	51,93	38,63	13,33	13,94
5	51,64	41,34	13,37	13,61
6	51,13	39,87	12,19	14,23

Tabela 16 - Relação entre a capacidade condicionada medida e a ideal para o ambiente Leme

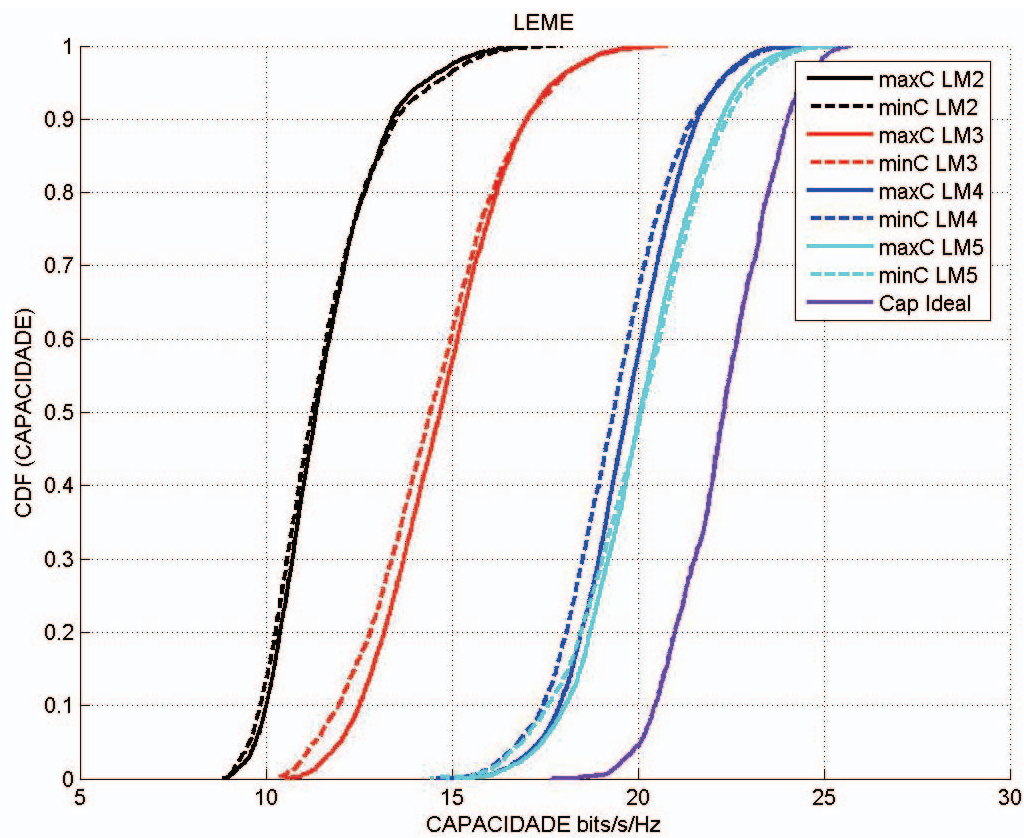


Figura 53 - Cumulativas da capacidade do canal faixa estreita para o ambiente Leme

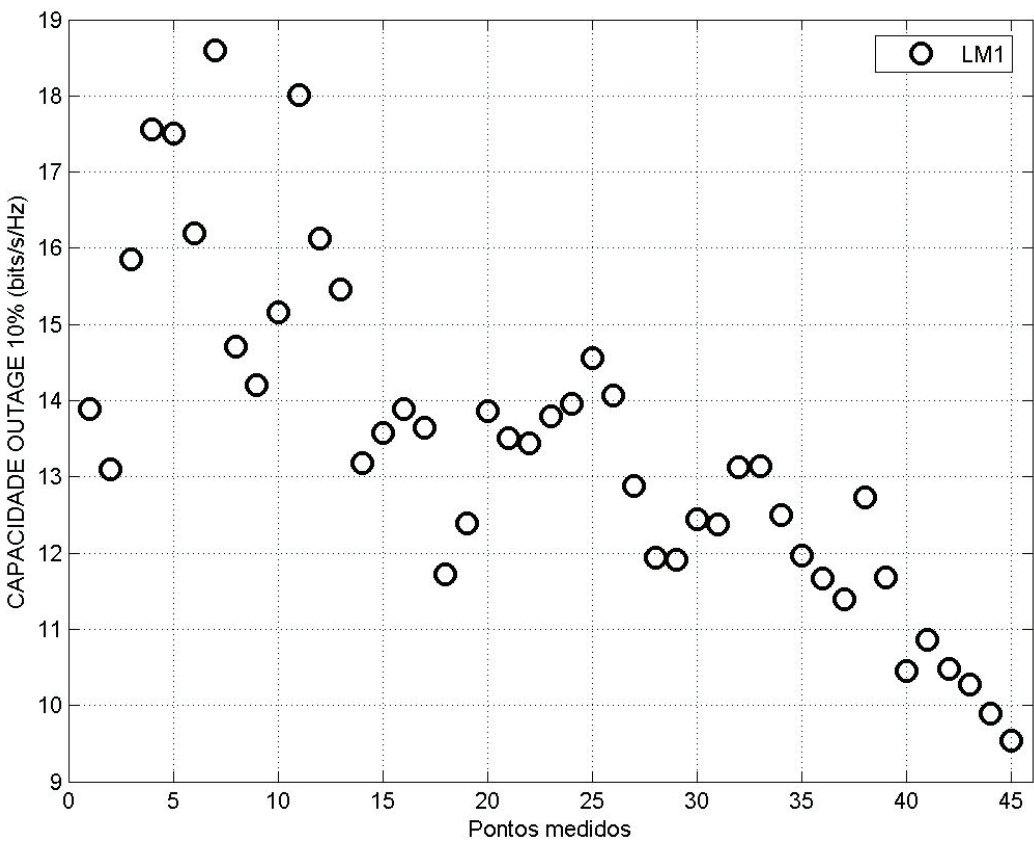


Figura 54 - Capacidade condicionada 10% no ambiente Leme_1

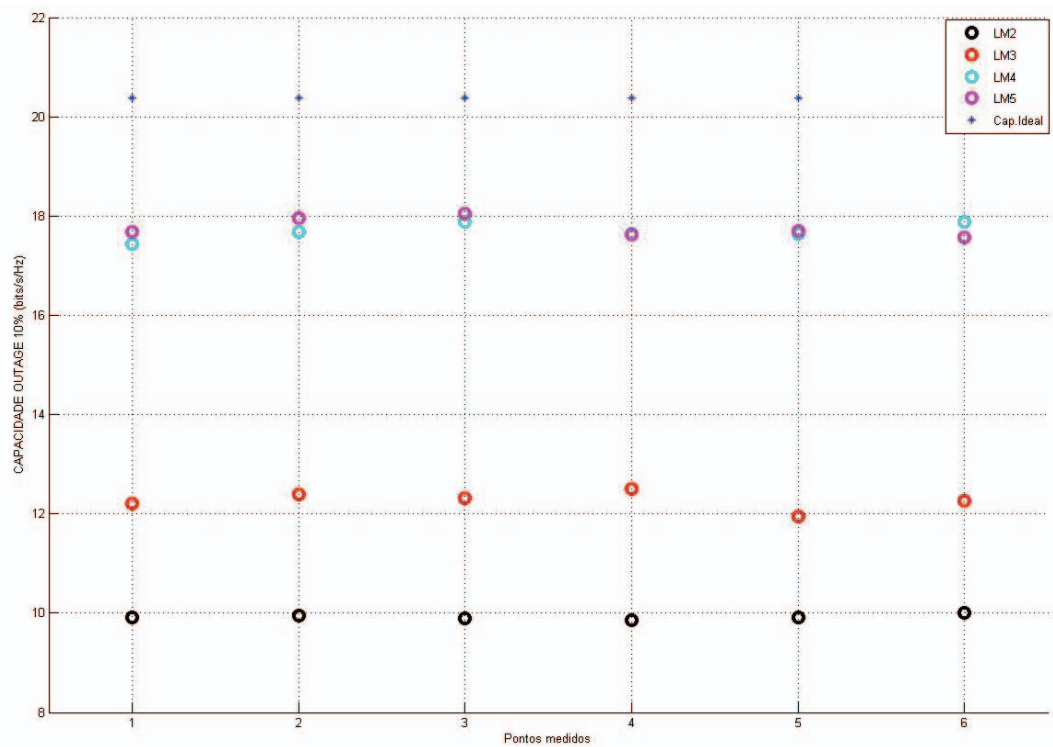


Figura 55 - Capacidade condicionada 10% no ambiente Leme_2

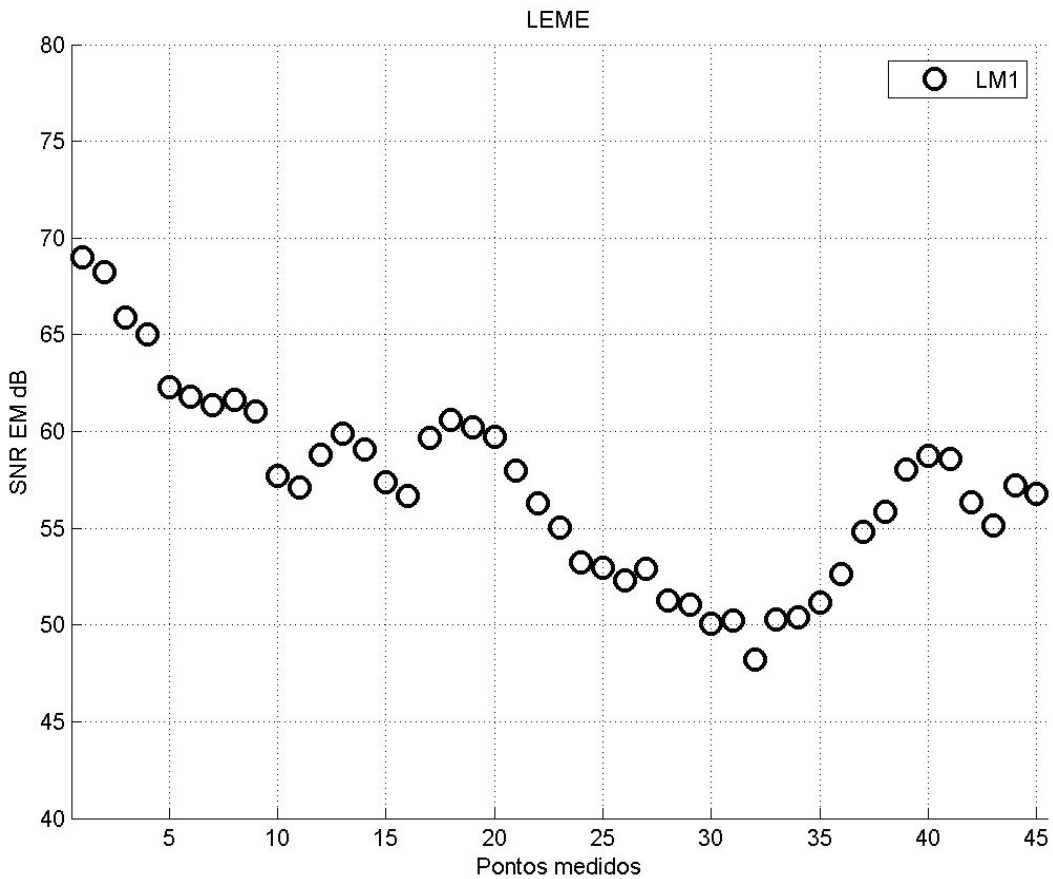


Figura 56 - SNR medida para o ambiente Leme_1

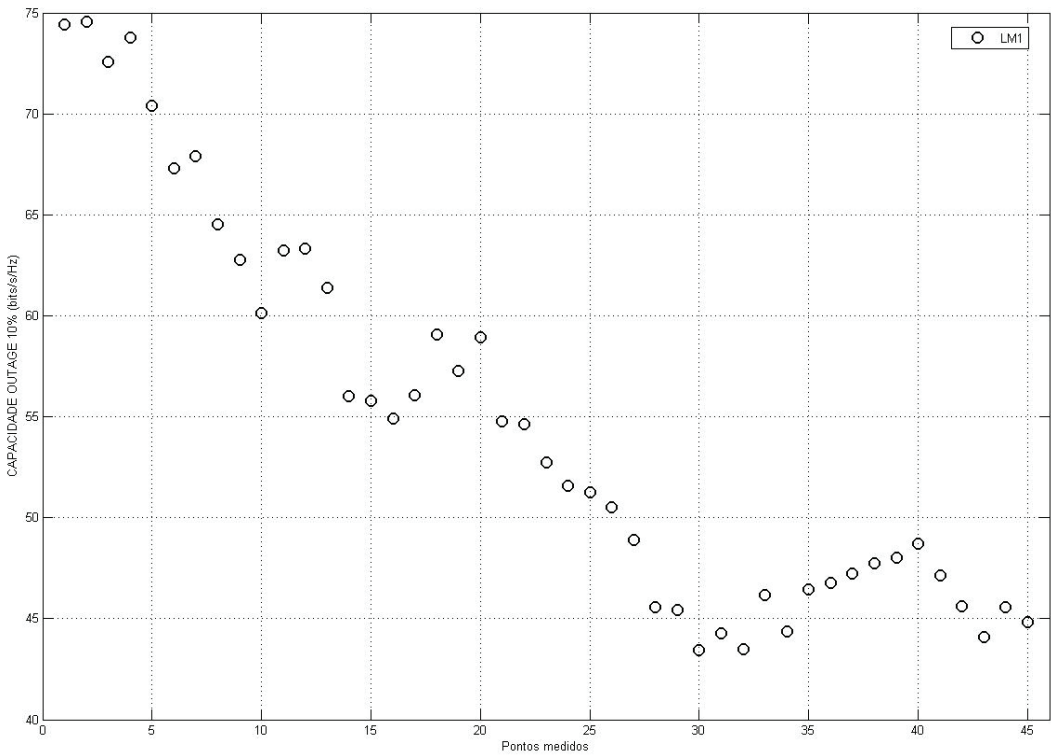


Figura 57 - Capacidade condicionada para a SNR medida para o ambiente Leme_1

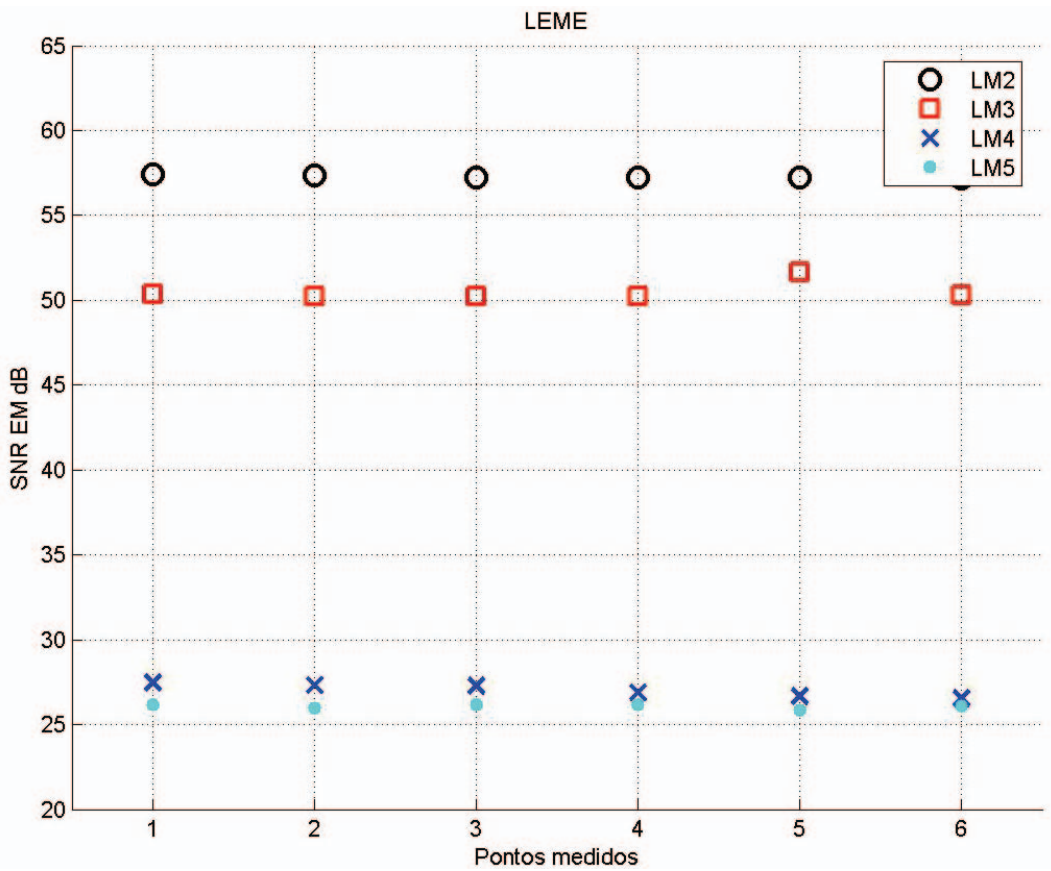


Figura 58 - SNR medida para o ambiente Leme_2

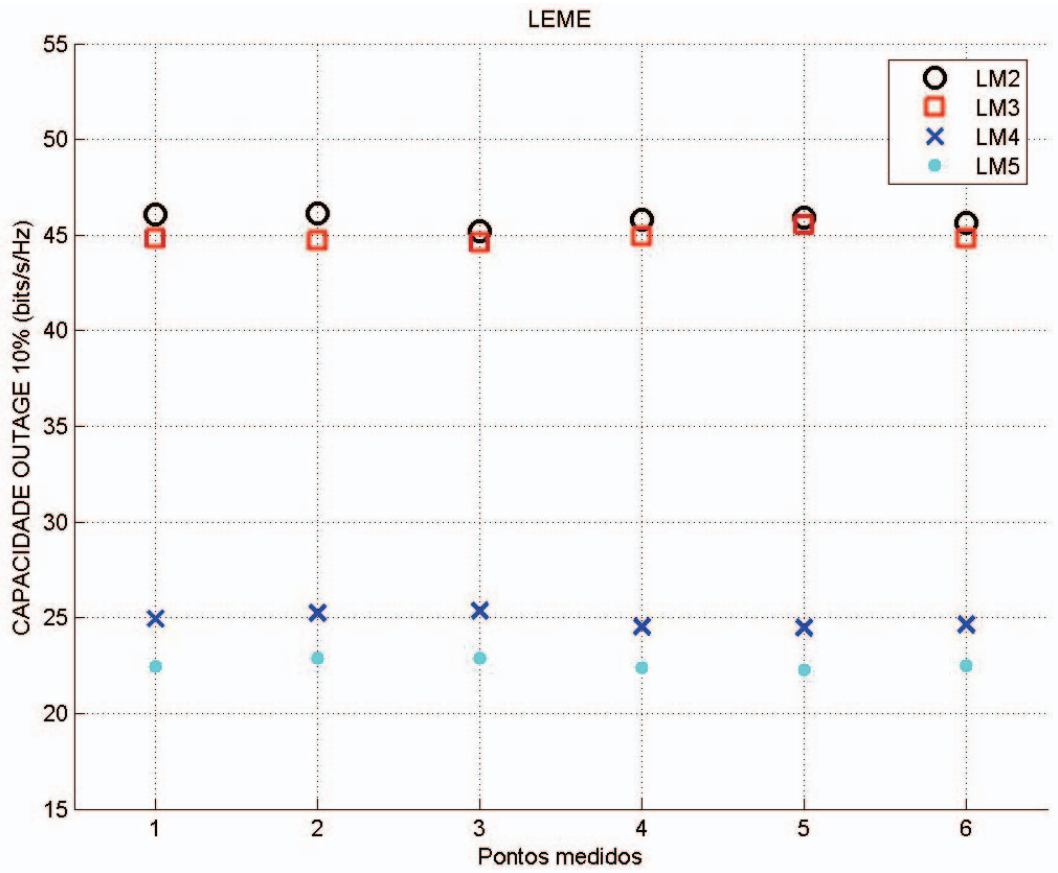


Figura 59 - Capacidade condicionada para a SNR medida para o Leme_2

A Figura 60 apresenta as cumulativas da capacidade para o ambiente Biblioteca. A Figura 61 apresenta os valores das capacidades condicionadas para os 3 pontos medidos.

A Tabela 17 apresenta o percentual de quanto a capacidade medida é menor que a capacidade ideal. Os valores em negrito correspondem aos pontos escolhidos das cumulativas da capacidade do canal faixa estreita dada pela Figura 60.

Pontos	Medida/Ideal (%)		
	BB1	BB2	BB3
1	13,30	17,15	17,32
2	18,16	16,07	14,20
3	15,21	16,43	14,18
4	15,60	14,14	13,94
5	13,13	14,26	17,39
6	14,79	11,92	17,74

Tabela 17 - Relação entre a capacidade condicionada medida e a ideal para o ambiente Biblioteca

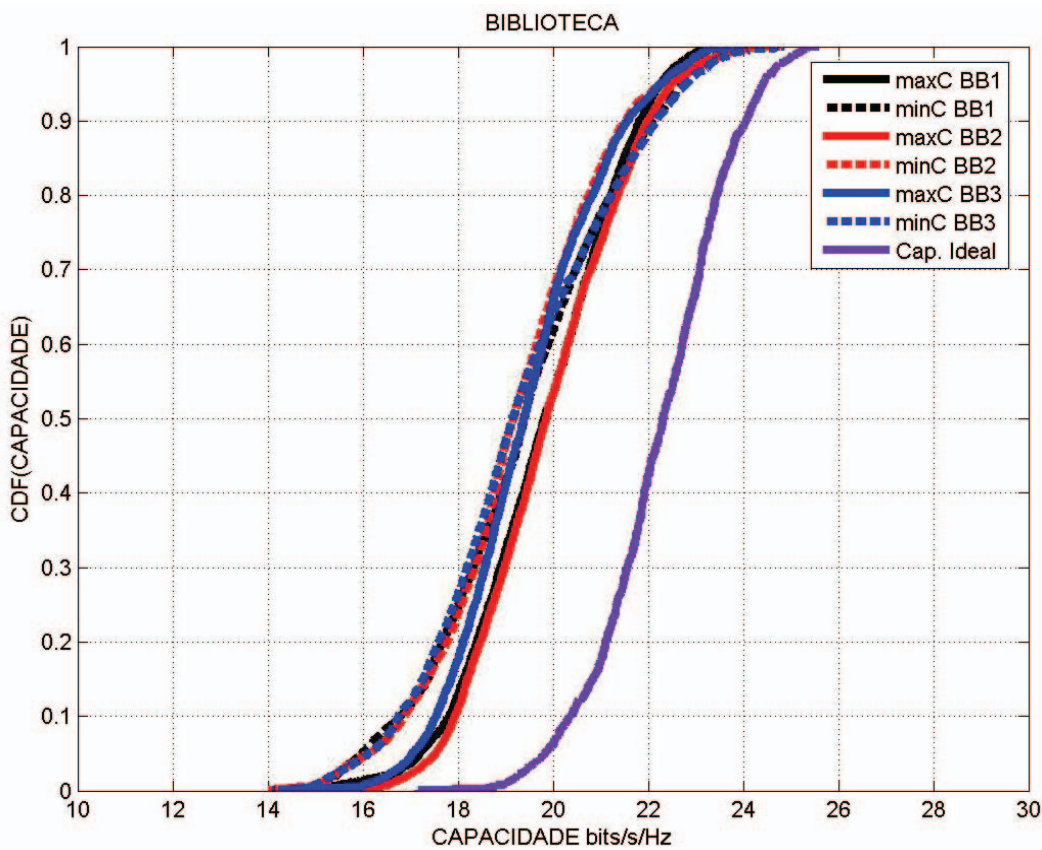


Figura 60 - Cumulativas da capacidade do canal faixa estreita para o ambiente Biblioteca

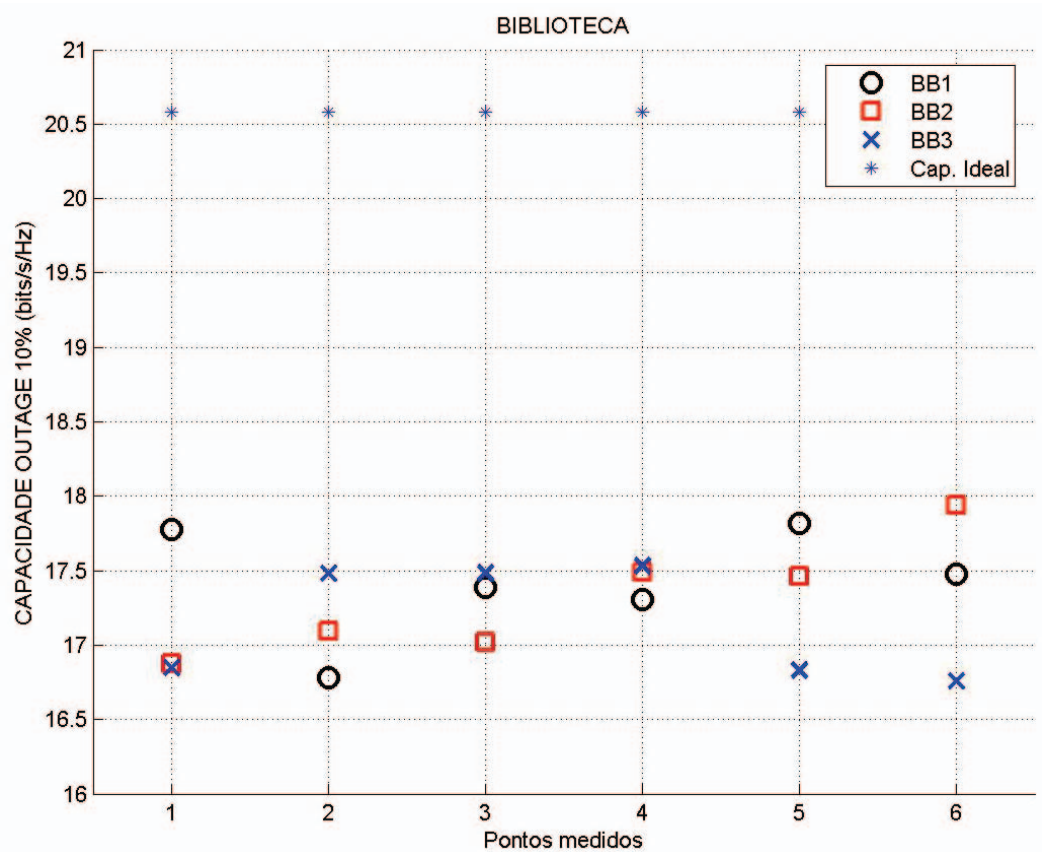


Figura 61 - Capacidade condicionada 10% para o ambiente Biblioteca

No ponto BB1, apenas uma parede fina separava o transmissor do receptor. Contudo, em vários pontos do grid existiam algumas estantes metálicas entre o transmissor e o receptor, que ajudavam a espalhar o sinal, melhorando a capacidade. O ponto BB2 estava localizado no canto da biblioteca. O receptor nesta posição, concentra os sinais recebidos, aumentando a correlação entre eles e, conseqüentemente, reduzindo a capacidade. No ponto BB3 existia parte do grid que possuía visada parcial com transmissor, reduzindo, dessa maneira, um pouco a capacidade.

As Figuras 62 e 63 apresentam a razão sinal ruído e a capacidade para o ambiente Biblioteca.

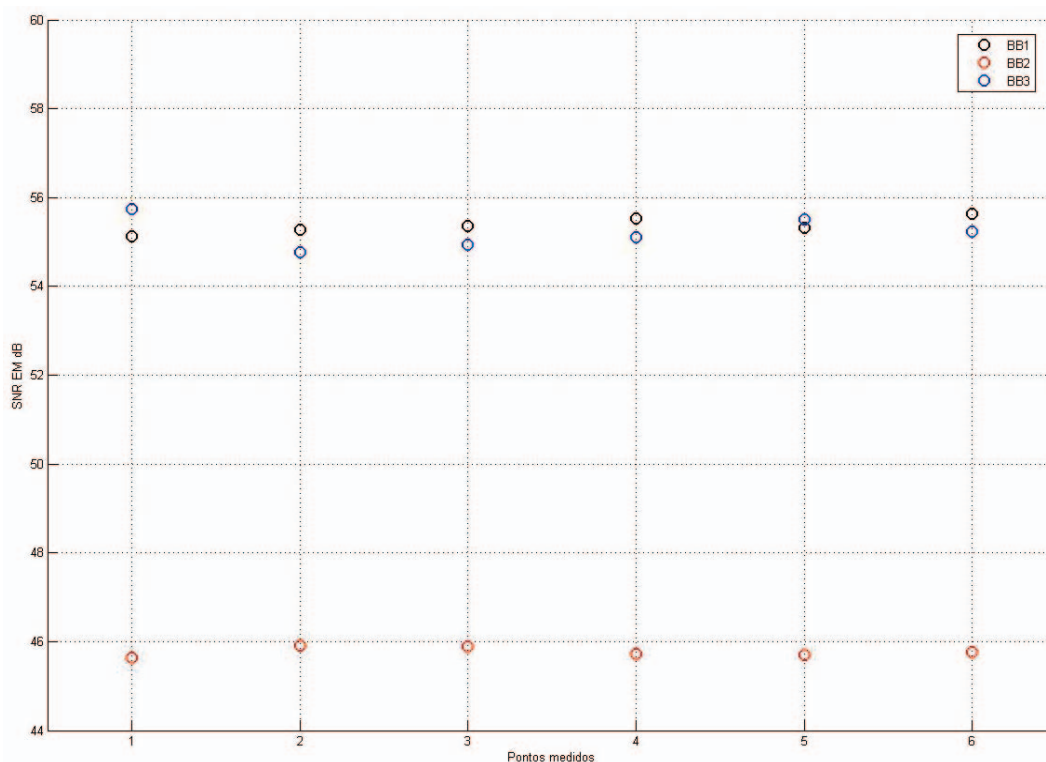


Figura 62 - SNR medida para a Biblioteca

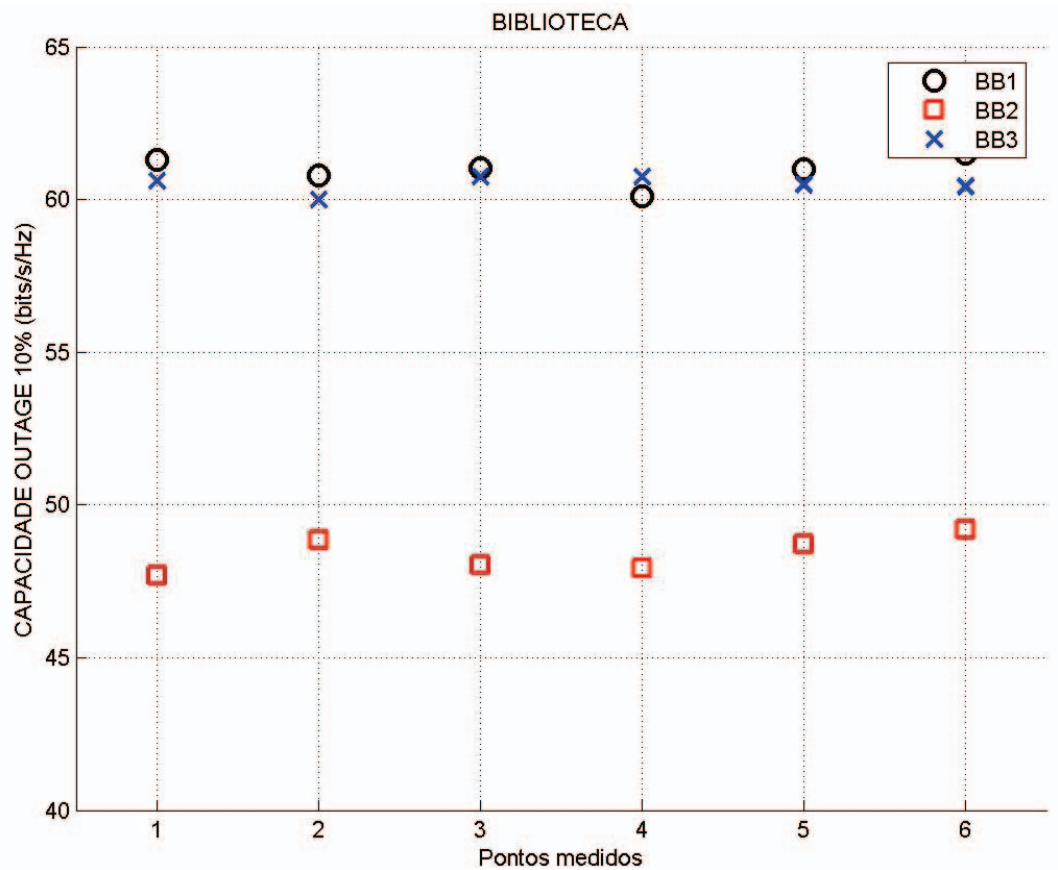


Figura 63 - Capacidade condicionada para a SNR medida para o ambiente Biblioteca

A Figura 64 apresenta as cumulativas da capacidade para o ambiente Indústria. A Figura 65 apresenta os valores das capacidades condicionadas para os 5 pontos medidos.

A Tabela 18 apresenta o percentual de quanto a capacidade medida é menor que a capacidade ideal para os pontos medidos. Os valores em negrito correspondem aos pontos escolhidos das cumulativas da capacidade do canal faixa estreita dada pela Figura 64.

Pontos Medidos	Medida/Ideal (%)				
	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5
1	16,79	9,73	29,16	7,99	23,14
2	13,33	15,70	31,49	8,95	16,35
3	15,44	18,95	26,34	10,13	12,02
4	15,99	19,52	27,00	12,27	10,18
5	14,54	21,16	27,76	15,95	8,94
6	16,15	20,74	28,08	21,25	12,99

Tabela 18 - Relação entre a capacidade condicionada medida e a ideal para o ambiente Indústria

Analisando todas as medidas, os maiores valores de capacidade foram obtidos na Indústria. Porém, na melhor situação, este valor é 8% ainda menor que o valor do caso ideal para um sistema MIMO 4x4. Para o caso ID1, existe uma situação em que pontos no grid possuem visada parcial. No caso ID2, existe uma situação com o bloqueio total da visada direta (um enorme torno mecânico bloqueava a visada). No caso ID3, existe uma situação com visada e com visada parcial. No caso ID 4 também existe o bloqueio total da visada e, no caso ID 5, tem se uma situação com o bloqueio total, mas também situações com visada direta.

As Figuras 66 e 67 apresentam a razão sinal ruído e a capacidade para a Indústria.

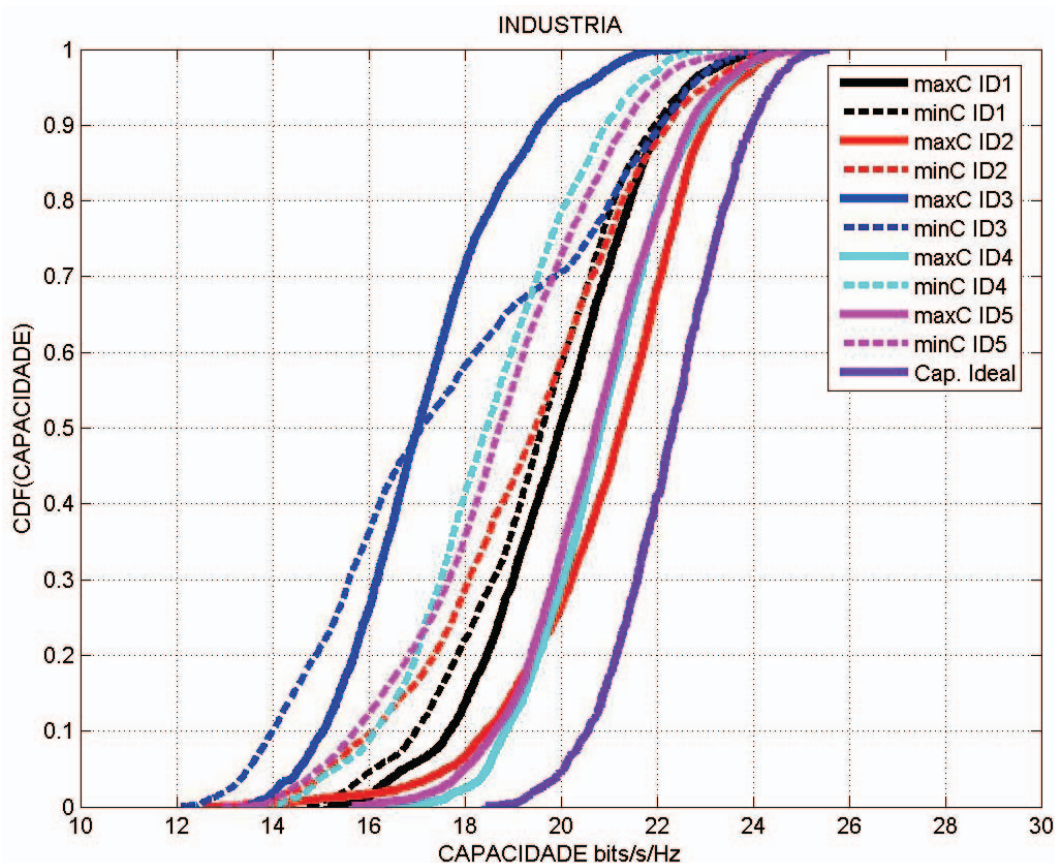


Figura 64 - Cumulativas da capacidade do canal faixa-estreita para o ambiente Indústria

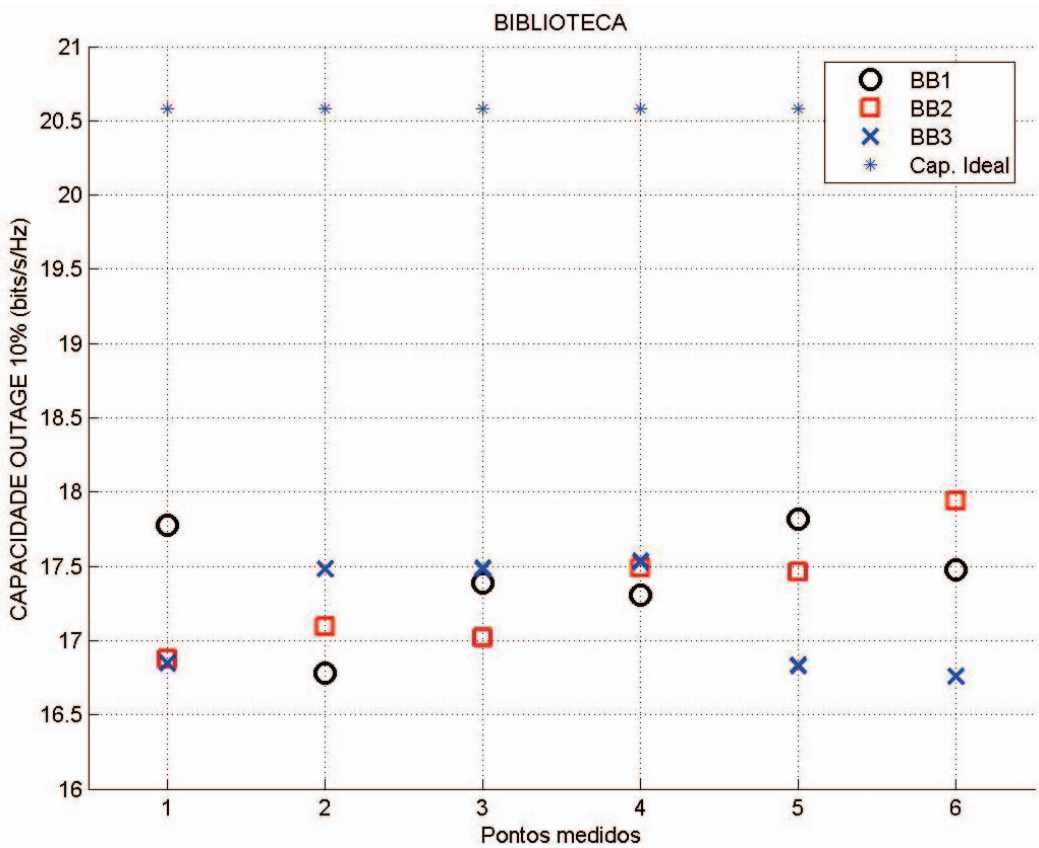


Figura 65 - Capacidade condicionada 10% para o ambiente Indústria

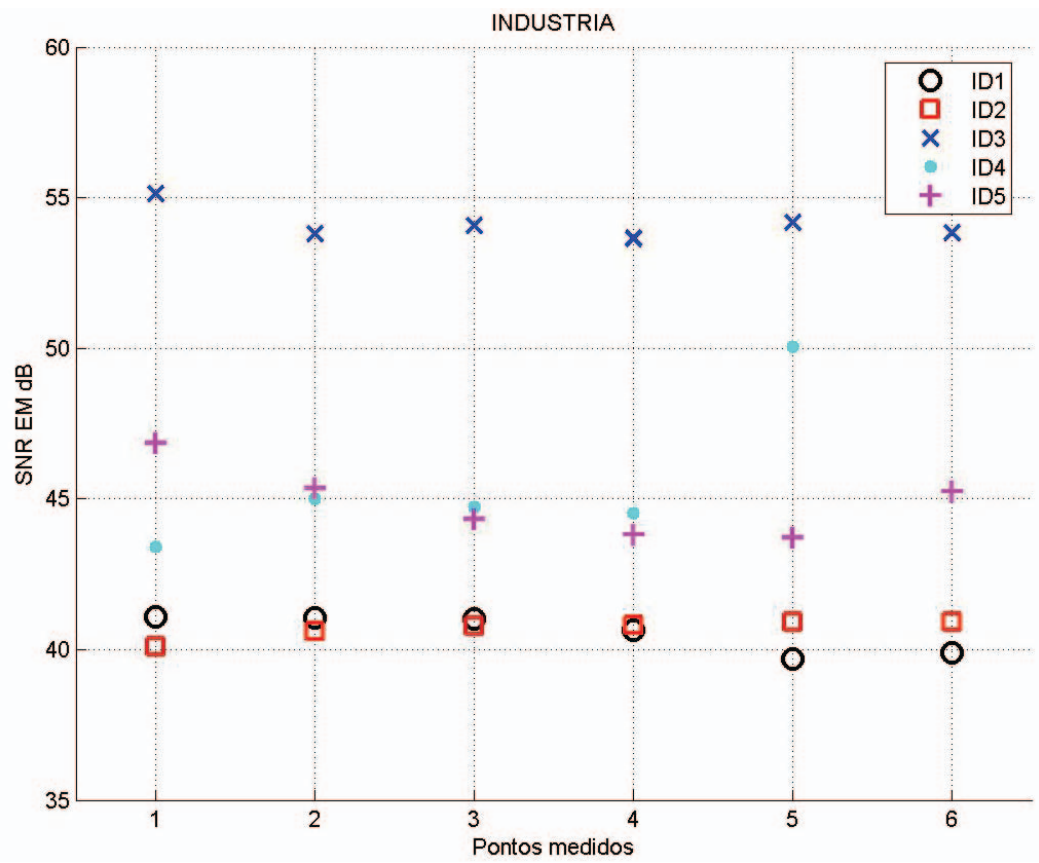


Figura 66 - SNR medida para o ambiente Indústria

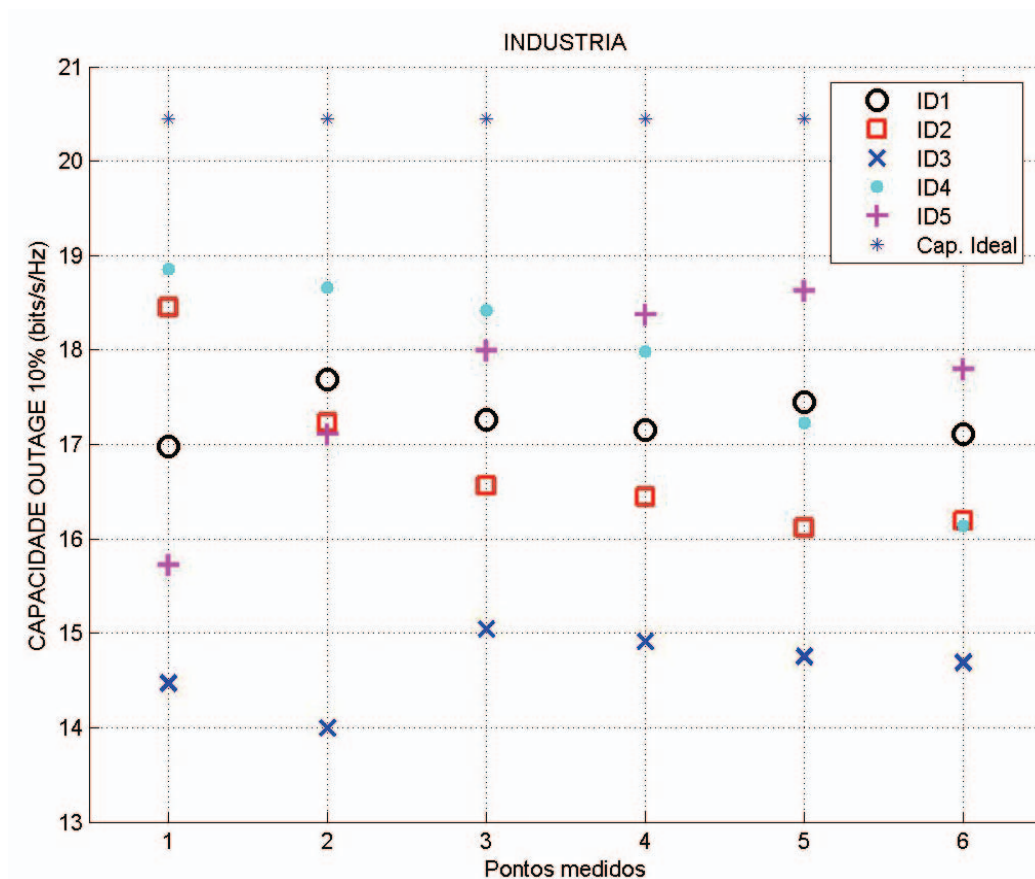


Figura 67 - Capacidade condicionada para a SNR medida para o ambiente Indústria

• Capacidade do canal seletivo em frequência

A capacidade do canal seletivo em frequência MIMO foi obtida dividindo a banda de interesse em N sub-canais de largura de banda B/N . Se N for grande o bastante, cada sub-canal pode ser assumido como um canal com desvanecimento plano. A capacidade do canal MIMO seletivo em frequência é a soma (adequadamente normalizada) das capacidades do sub-canais com desvanecimento plano. A capacidade do canal MIMO seletivo em frequência foi calculada de acordo com a Equação (41) do Capítulo 2.

A capacidade seletiva em frequência foi calculada para 6 tamanhos diferentes de largura de banda: 5, 10 20 50, 100 e 200 MHz. Cada banda do canal escolhida foi particionada em sub-bandas de largura 0.25 MHz. A banda total de medida foi de 200 MHz. A Tabela 19 apresenta o número de sub-bandas e o numero de bandas independentes obtidas para cada largura de banda escolhida para uma banda total de 200MHz.

Banda Total em MHz	Largura de Banda em MHz	Número de bandas independentes	Largura da sub-banda em MHz	Número de sub-bandas
200	5	40	0.25	20
200	10	20	0.25	40
200	20	10	0.25	80
200	50	4	0.25	200
200	100	2	0.25	400
200	200	1	0.25	800

Tabela 19 - Número de bandas independentes para cada largura de banda escolhida

As funções cumulativas das capacidades faixa-larga foram determinadas a partir das capacidades calculadas sobre dados medidos. A capacidade condicionada de 10% foi adotada. Para cada ambiente de medida, a resposta impulsiva do canal foi coletada em 36 pontos diferentes, conforme explicado anteriormente. Como o número de bandas independentes é insuficiente para o cálculo das funções cumulativas da capacidade faixa-larga, decidiu-se agrupar as amostras coletadas dos 36 pontos do grid. Devido a grande quantidade de pontos medidos, apenas alguns pontos foram escolhidos para serem apresentados.

As Figuras 69 a 81 apresentam a capacidade para o canal seletivo em frequência, para um arranjo 4x4, para alguns pontos dos ambientes medidos.

Podemos observar através das figuras um ganho na capacidade condicionada com o aumento da banda do canal, mesmo para situações em que a capacidade é extremamente baixa (Figura 75). Isto ocorre porque a seletividade na frequência do canal proporciona uma diversidade adicional, fazendo com que a capacidade condicionada se aproxime à capacidade média ou ergódica do canal. Assim, ocorre o estreitamento da cdf da capacidade com o aumento da banda. Desse modo, a correlação da banda do canal tem uma importante influência na melhora da capacidade condicionada.

A Tabela 20 apresenta os valores das capacidades condicionadas das Figuras 69 a 81 para as bandas de 5, 10 20, 50, 100 e 200 MHz e para o canal faixa-estreita.

	FE	5 (MHz)	10 (MHz)	20 (MHz)	50 (MHz)	100 (MHz)	200 (MHz)	Cap. Média (MHz)
CT1	17,98	18,06	18,20	18,30	18,50	19,16	19,30	20,2177
CT5	18,06	18,12	18,39	18,67	19,03	19,49	19,65	20,3193
LS1	14,40	14,43	14,47	14,58	14,74	15,55	15,78	16,9247
LS2	15,31	15,31	15,40	15,54	15,85	16,14	16,67	17,2837
LO1	16,13	16,16	16,24	16,31	16,79	17,32	17,71	18,9313
LO2	18,03	18,14	18,34	18,49	18,72	19,04	19,44	20,3507
CT2_2	14,96	15,24	15,35	15,60	15,90	16,04	16,10	17,6744
CT2_5	11,68	11,76	11,89	12,13	12,13	12,69	12,8599	13,3593
LM2	9,92	10,11	10,18	10,15	10,1584	10,3565	10,3591	11,5956
LM5	17,78	18,19	18,30	18,55	18,8021	18,7820	19,4286	20,0356
BB1	17,42	17,48	17,63	17,88	18,2620	18,6516	18,9335	19,6919
BB3	17,20	17,29	17,56	17,71	18,2764	18,3813	18,8217	19,4445
ID2	16,72	16,82	16,89	16,9714	17,1862	17,8303	18,5654	19,9618
ID3	14,62	14,65	14,73	14,9038	15,3512	15,5337	15,7115	17,2070

Tabela 20 - Capacidade condicionada para diferentes larguras de bandas

Para alguns dos pontos medidos, obteve-se acréscimos superiores a 1 bits/s/Hz (1,845 bits/s/Hz, por exemplo, para o ambiente ID2) para quando se aumentava a banda de faixa-estreita para uma banda de 200 MHz. Esta melhora é bastante significativa, porém necessita-se de uma grande banda de transmissão. Sistemas celulares faixa-larga e redes *wireless* LAN usam bandas que variam de 5 a 20 MHz, de modo que os ganhos obtidos serão menores para essas larguras de banda.

Pelas Figuras de 68 a 81, é possível observar que os ganhos obtidos nas capacidades para as larguras de 5 e 10 MHz foram bem baixos. Para a largura de banda de 20 MHz, os acréscimos que variam aproximadamente de 0,15 a 0,66 bits/s/Hz. Acima de 20 MHz, os acréscimos variam aproximadamente de 0,66 a 1,85 bits/s/Hz.

Para as situações com visada direta, Figuras 69, 75 e 80, os ganhos obtidos para os ambientes LS1 e ID3 foram significativos apenas para larguras de banda maiores que 50 MHz. Para o ambiente LM2, praticamente não houve nenhum ganho com o aumento da largura de banda.

Por fim, é possível observar, através da Tabela 20 que, para a maioria dos pontos medidos, a capacidade condicionada se aproxima da capacidade média quando se aumenta a largura de banda.

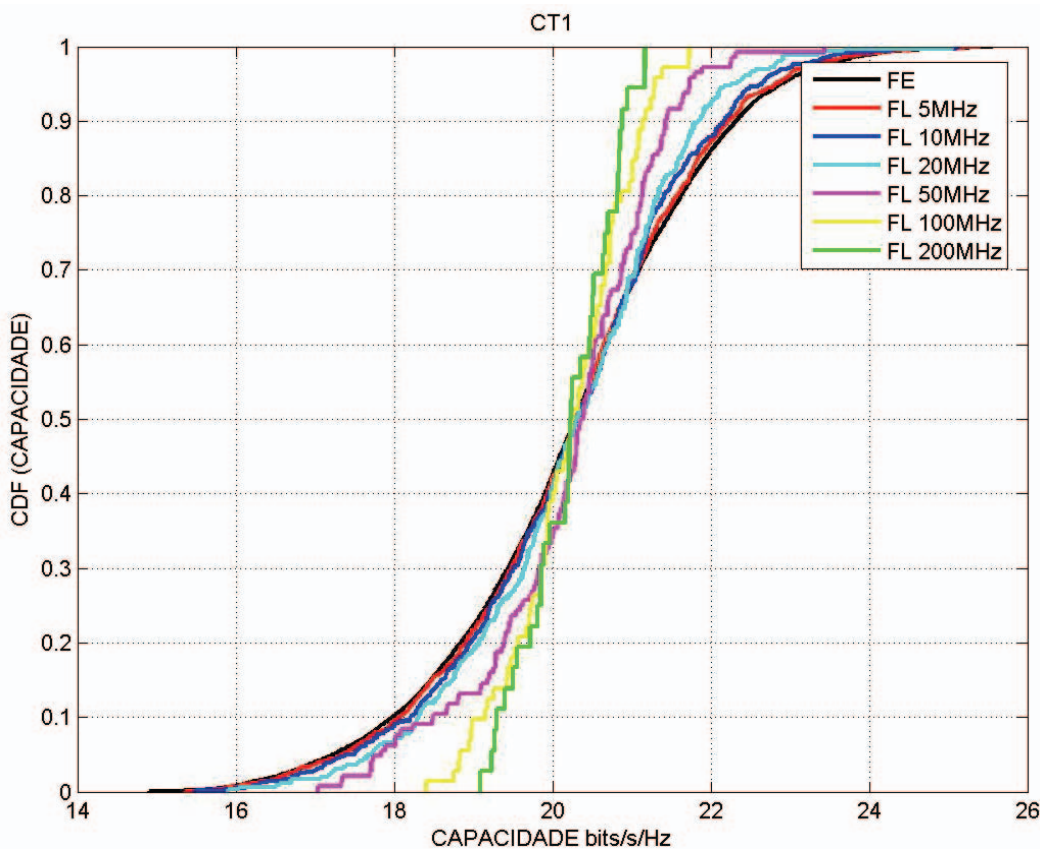


Figura 68 - Capacidade faixa-larga para o ambiente CT1

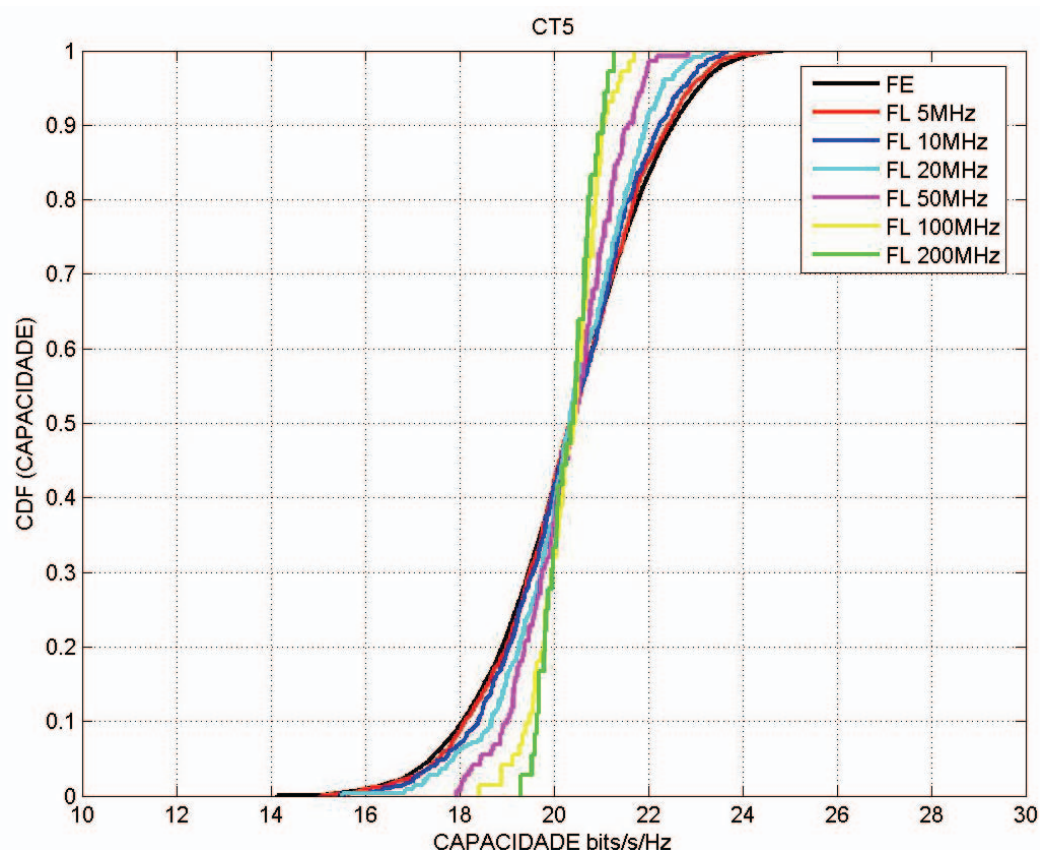


Figura 69 - Capacidade faixa-larga para o ambiente CT5

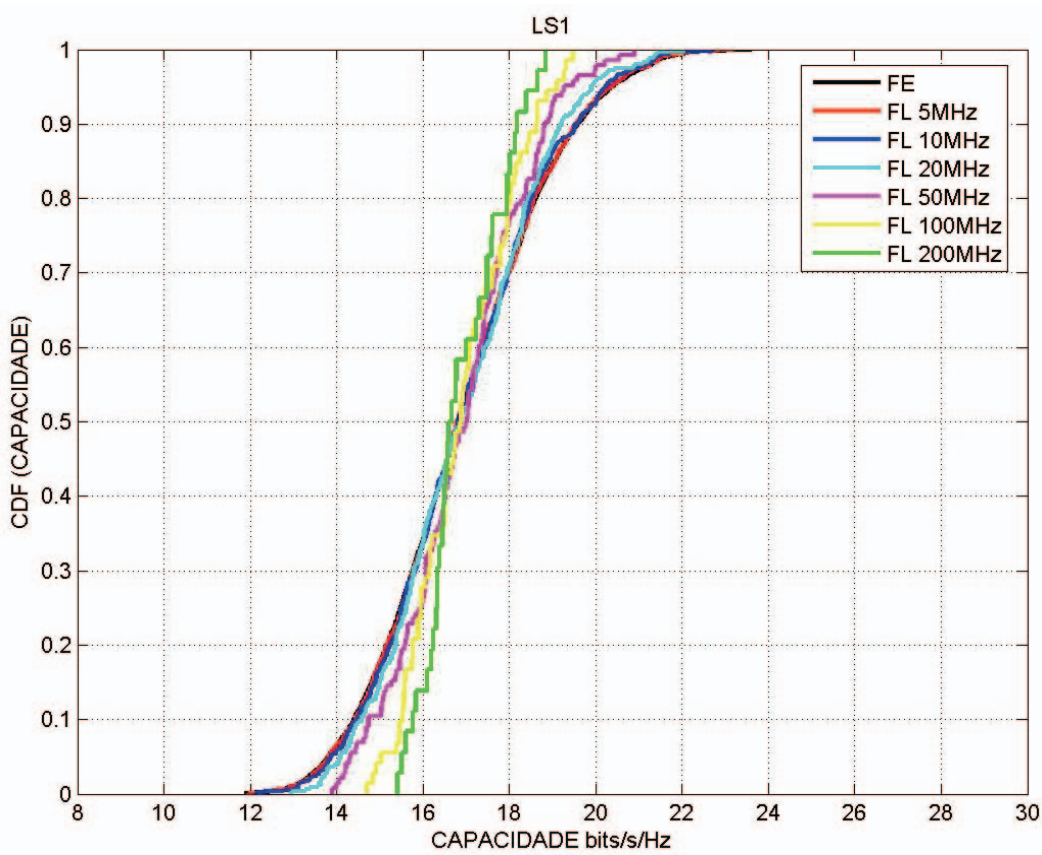


Figura 70 - Capacidade faixa-larga para o ambiente LS1

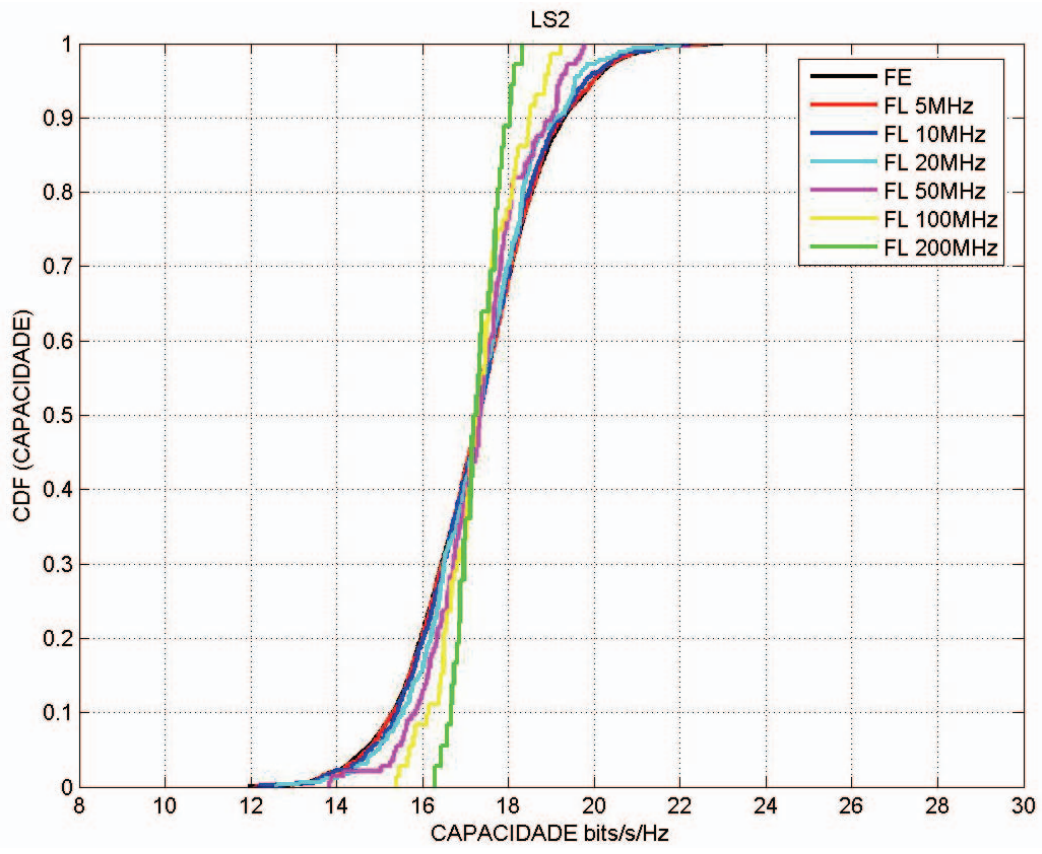


Figura 71 - Capacidade faixa-larga para o ambiente LS2

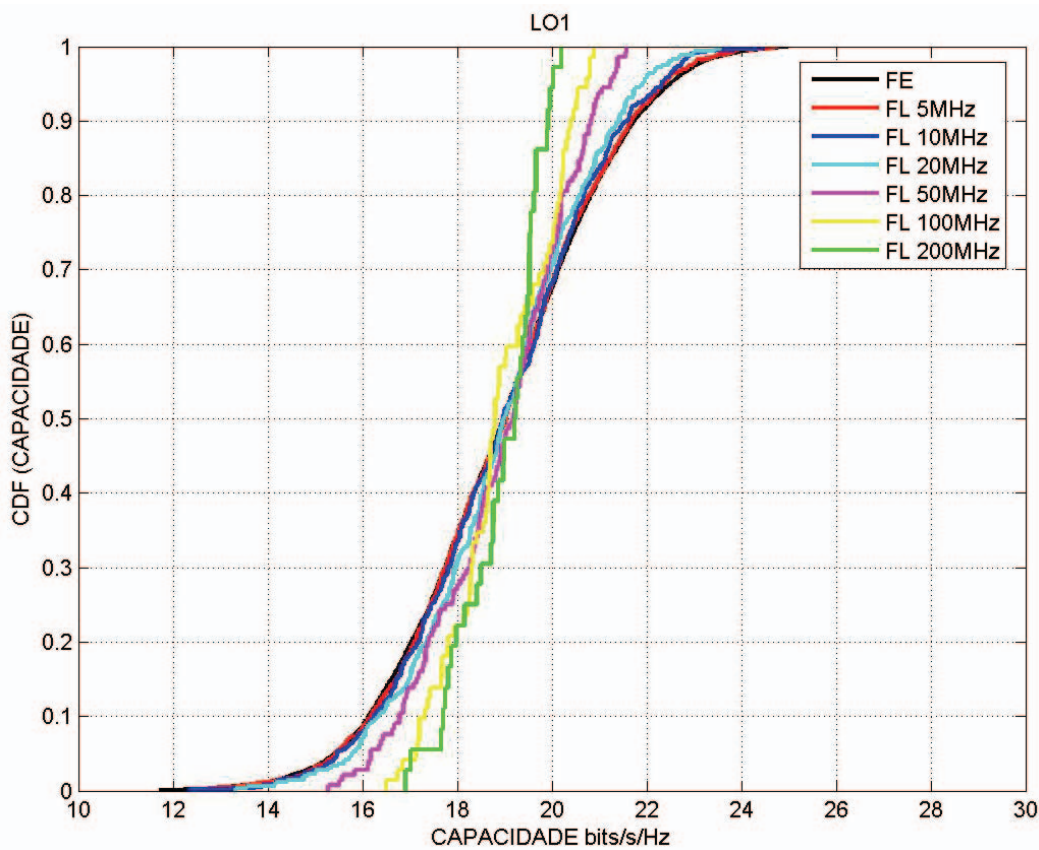


Figura 72 - Capacidade faixa-larga para o ambiente LO1

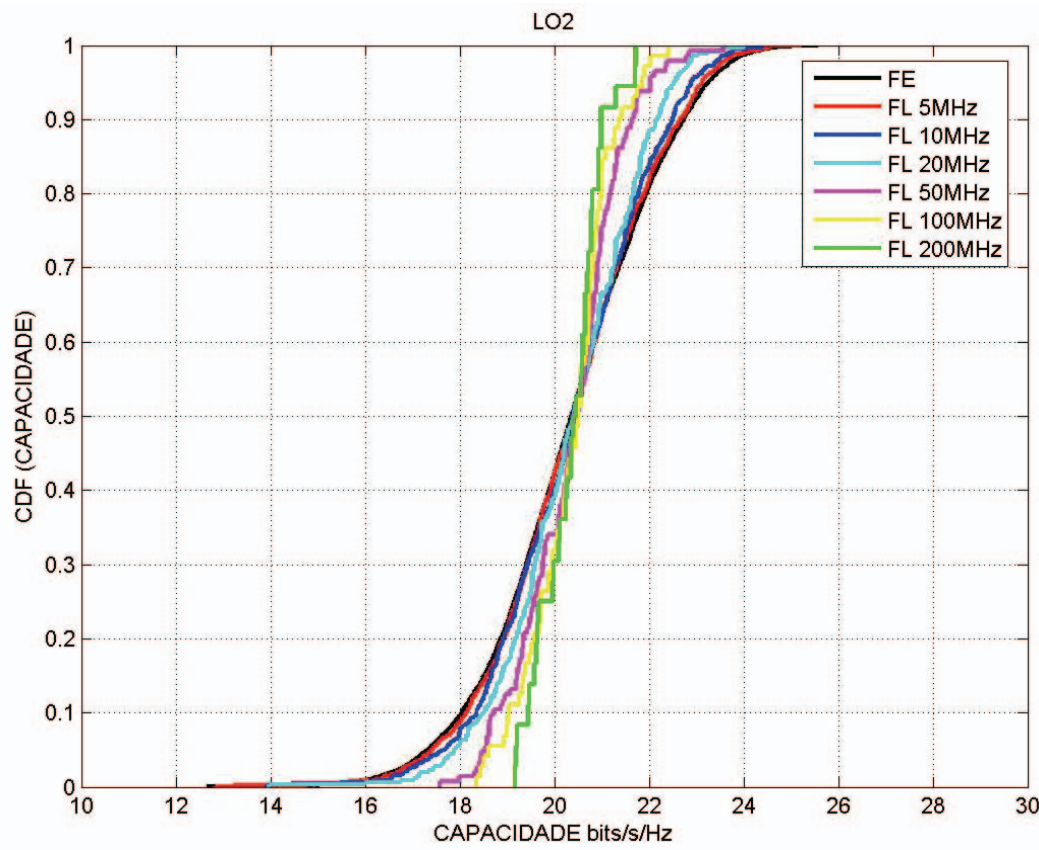


Figura 73 - Capacidade faixa-larga para o ambiente LO2

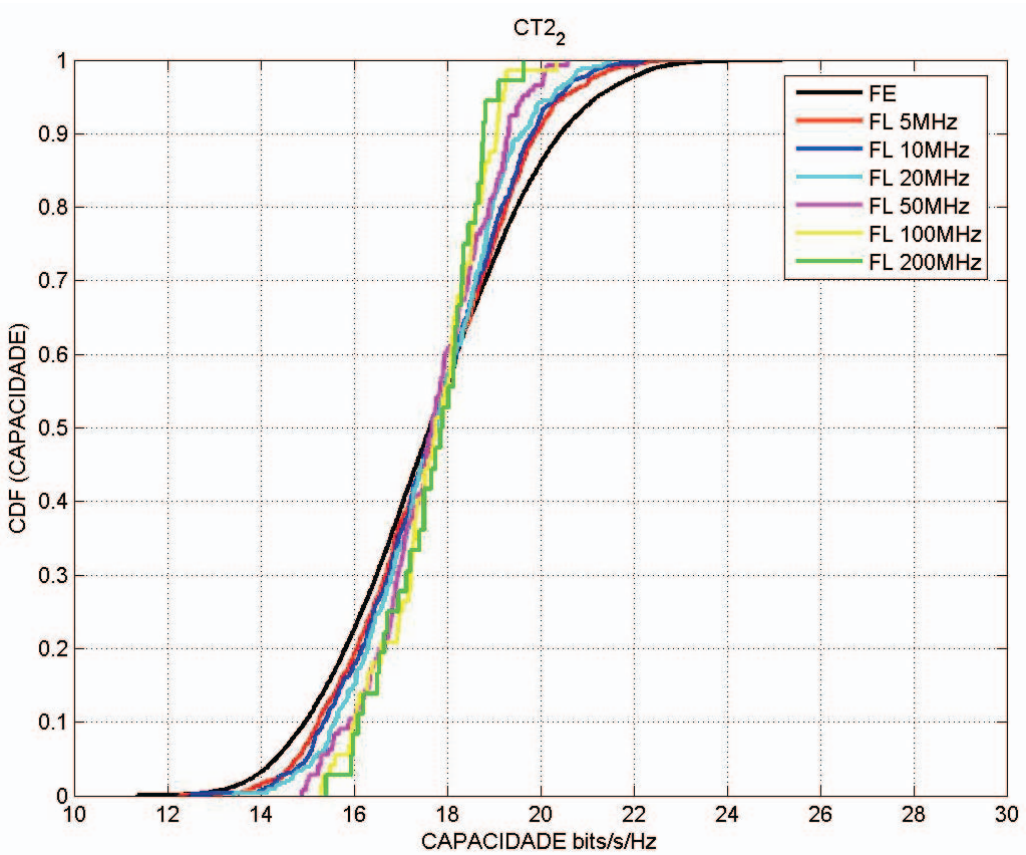


Figura 74 - Capacidade faixa-larga para o ambiente CT2_2

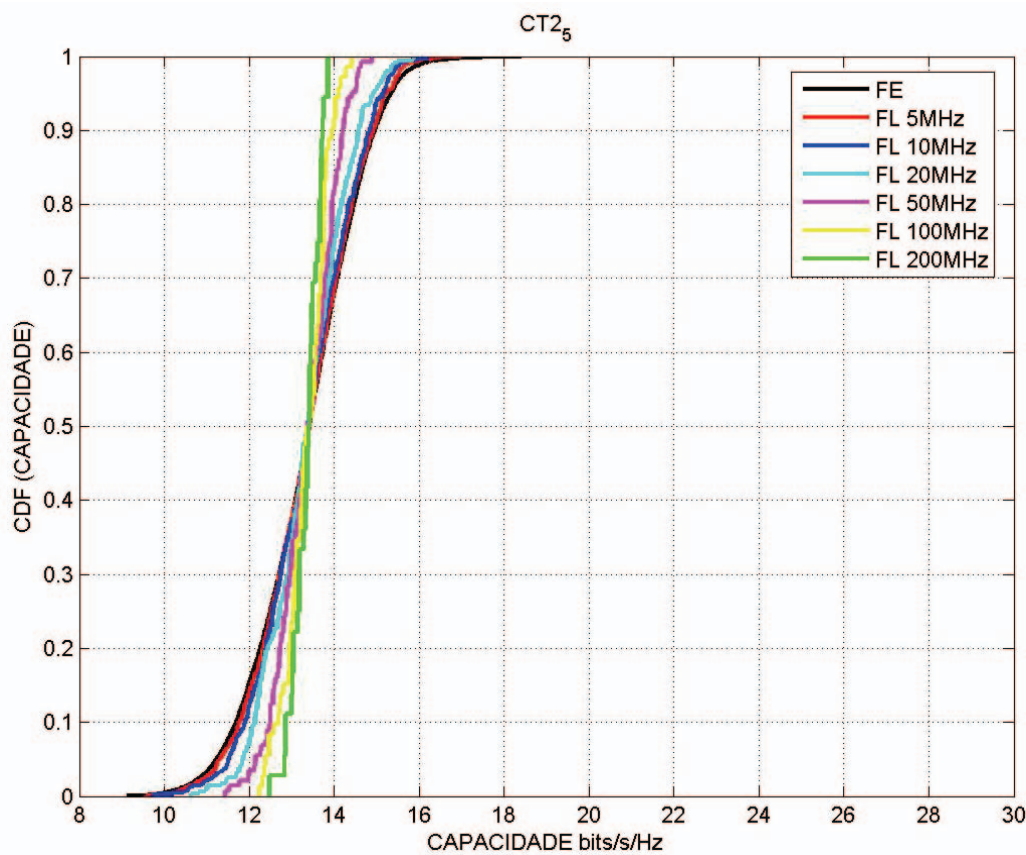


Figura 75 - Capacidade faixa-larga para o ambiente CT2_5

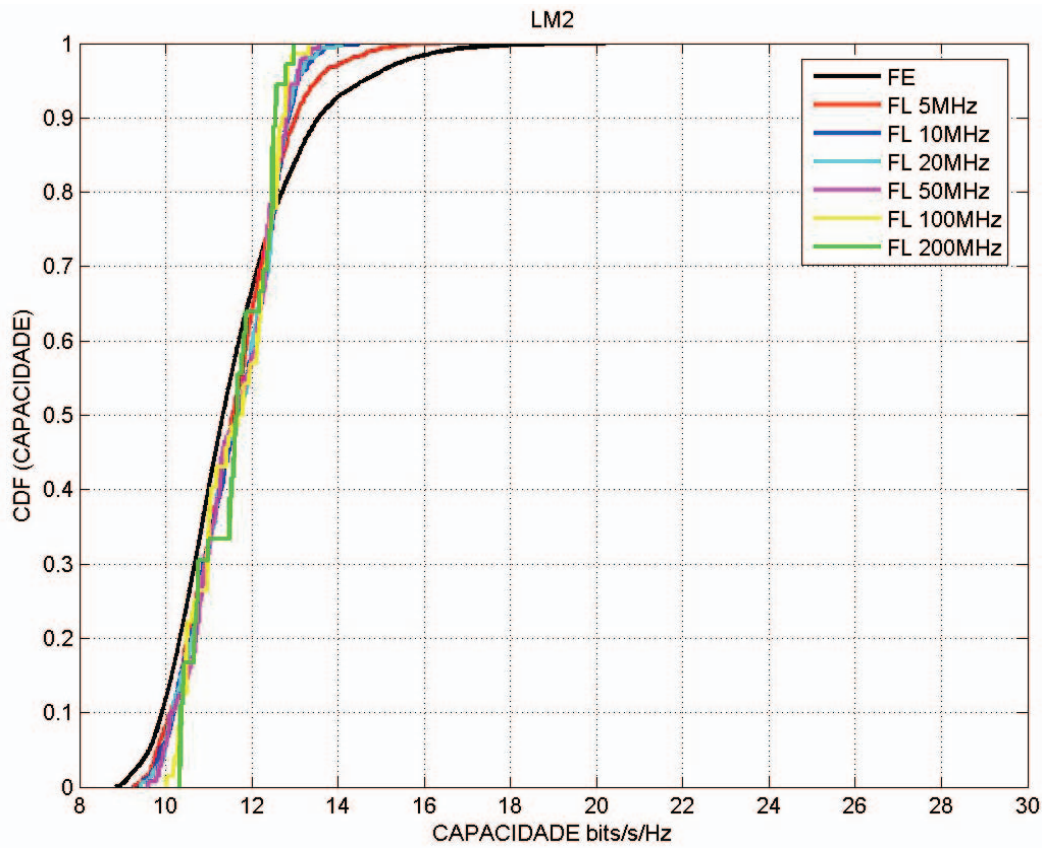


Figura 76 - Capacidade faixa-larga para o ambiente LM2

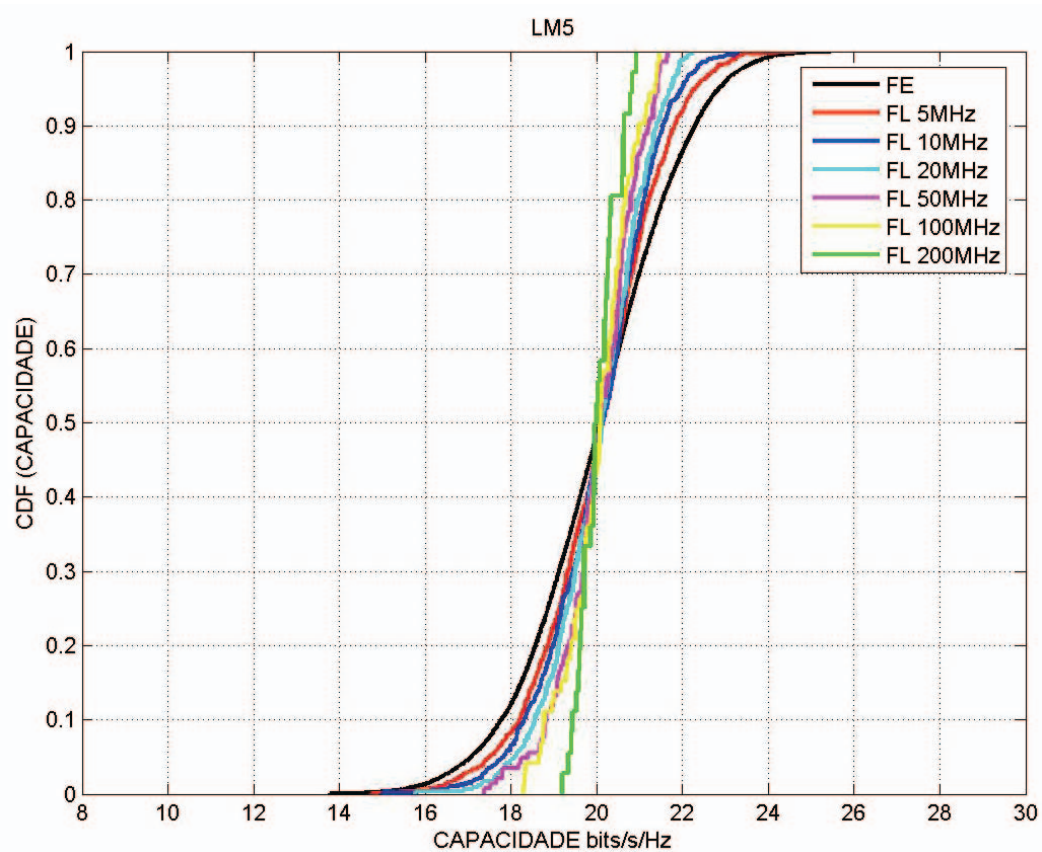


Figura 77 - Capacidade faixa-larga para o ambiente LM5

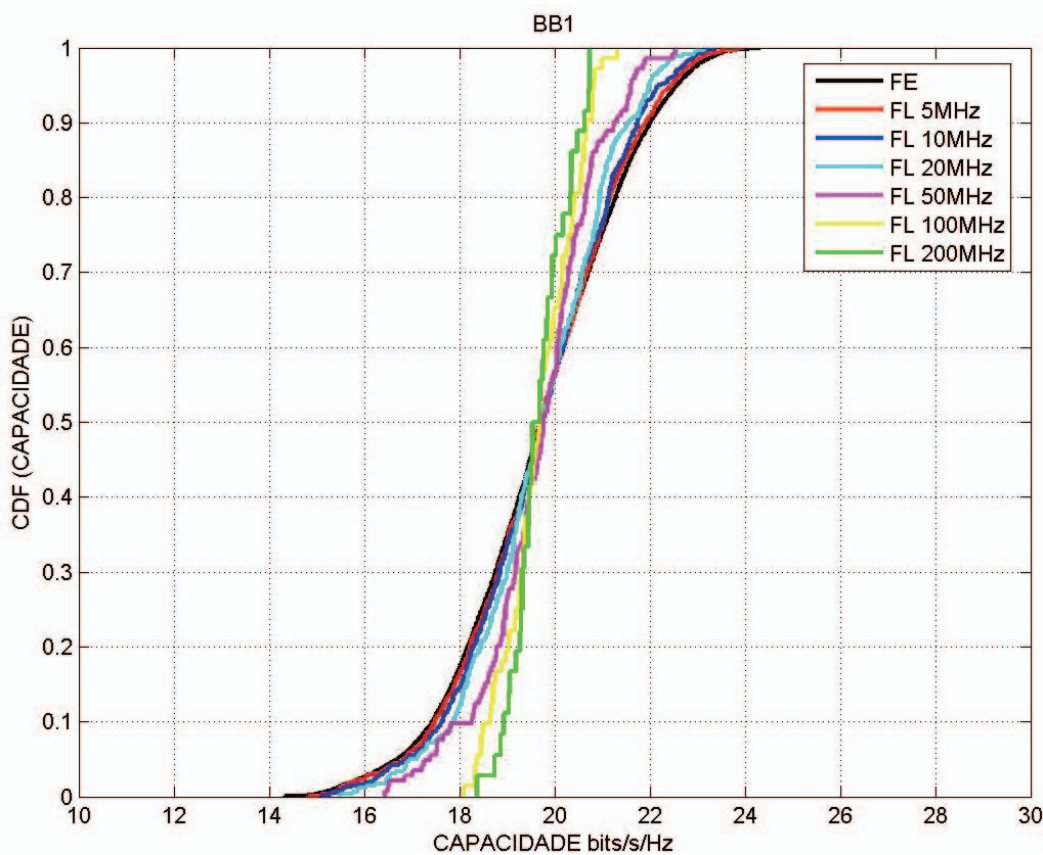


Figura 78 - Capacidade faixa-larga para o ambiente BB1

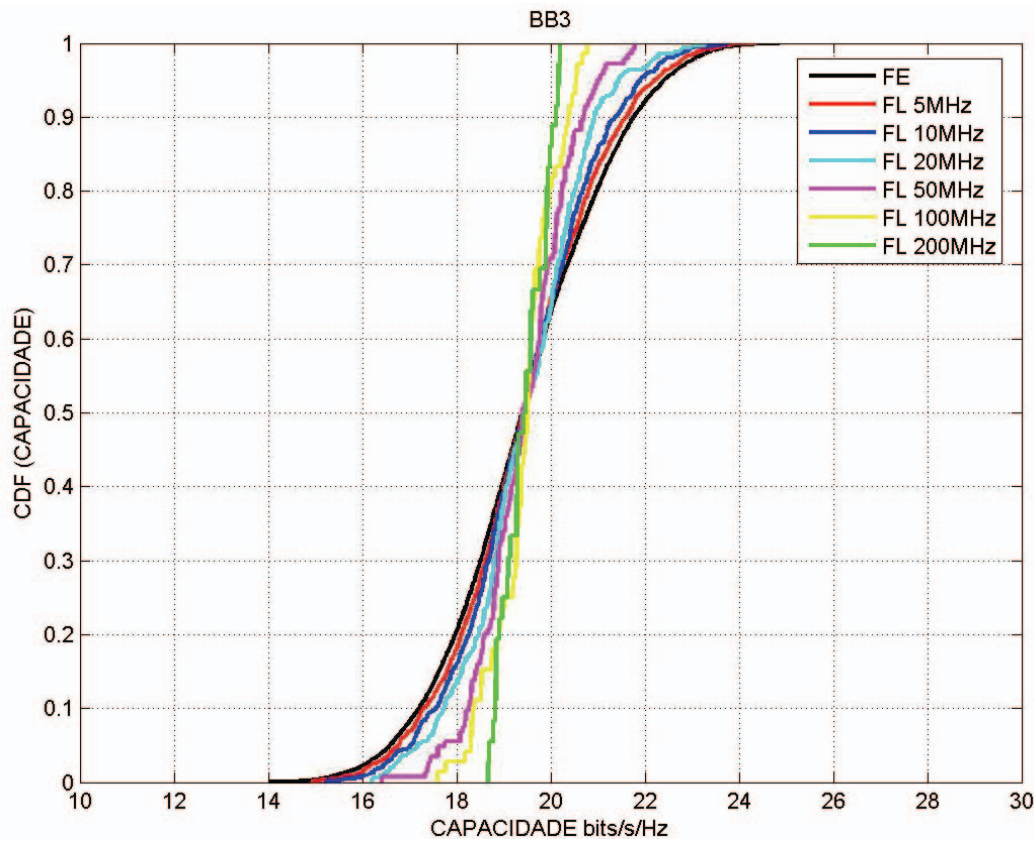


Figura 79 - Capacidade faixa-larga para o ambiente BB3

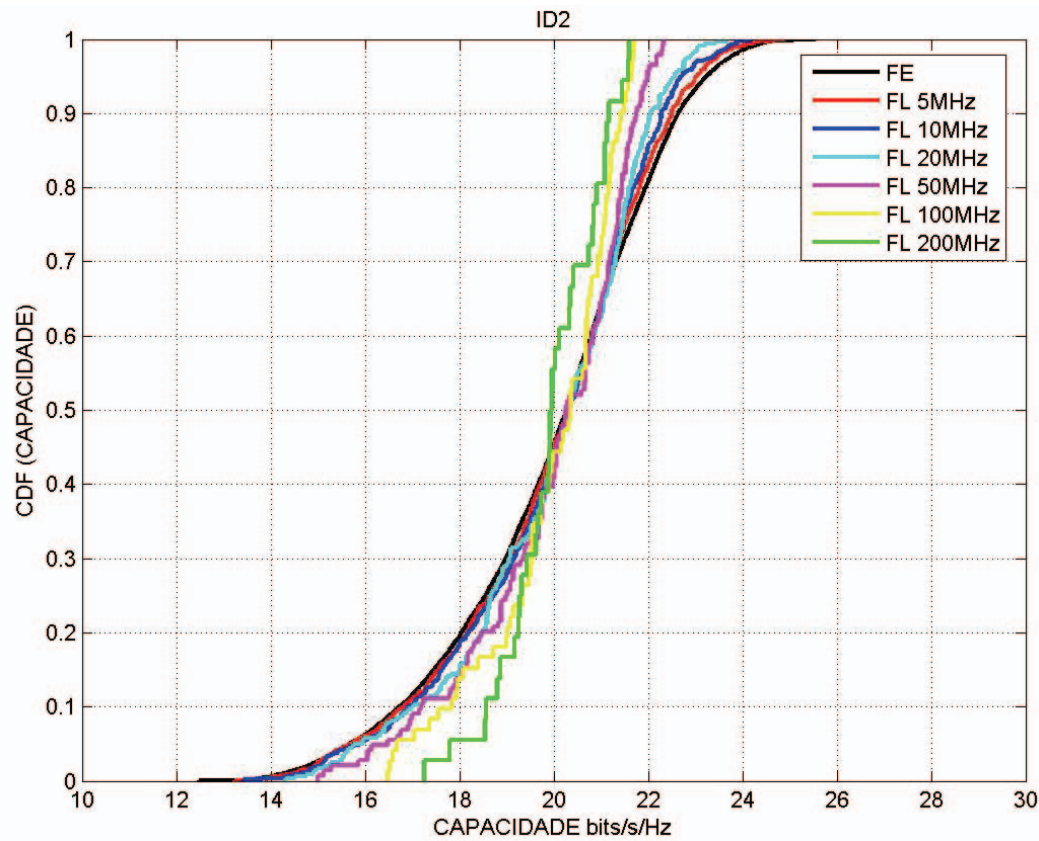


Figura 80 - Capacidade faixa-larga para o ambiente ID2

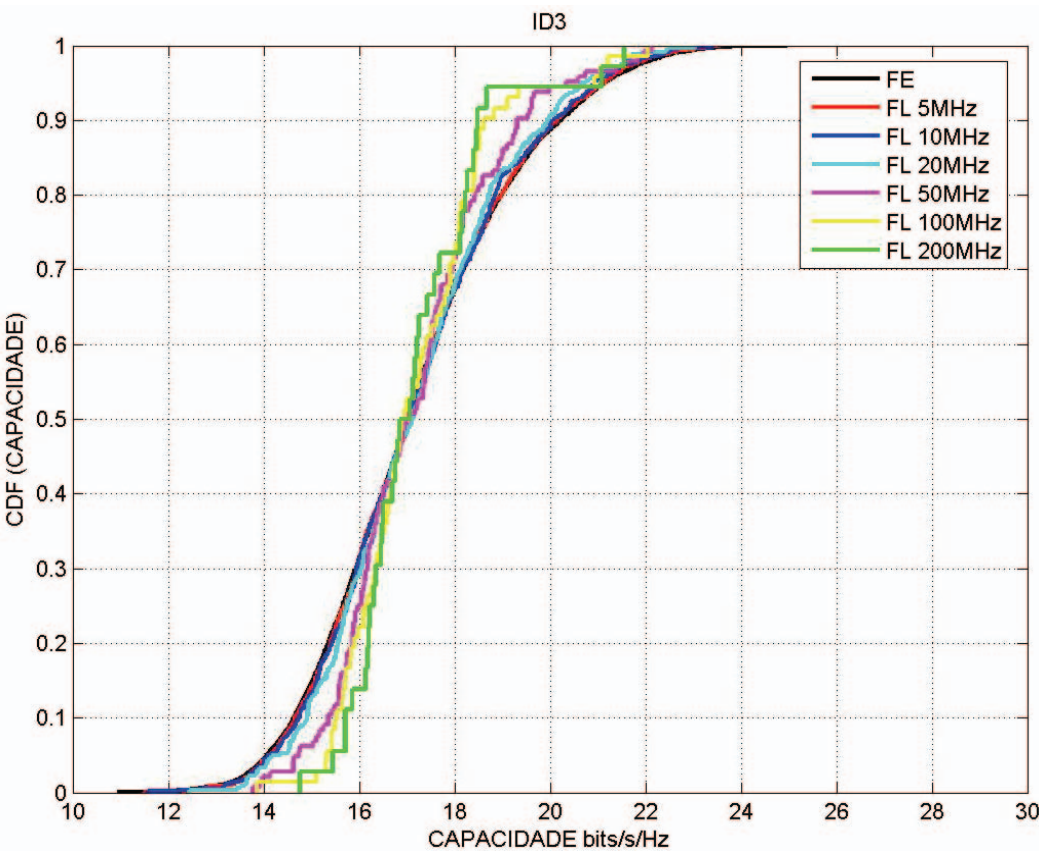


Figura 81 - Capacidade faixa-larga para o ambiente ID3

• Análise dos autovalores

Um aspecto chave na avaliação da capacidade é a caracterização dos canais paralelos ou sub-canais que podem ser identificados na matriz do canal. Como explicado anteriormente o número de canais paralelos está relacionado ao número de significativos de autovalores obtidos da matriz HH^H .

Usando a matriz do canal MIMO normalizada, os autovalores λ_k foram calculados para cada matriz do canal MIMO 4x4 disponível. A função distribuição cumulativa dos autovalores e das capacidades para cada canal paralelo para alguns pontos dos ambientes medidos é mostrada nas Figuras de 82 a 95, que apresentam os autovalores para cada canal paralelo, a soma total dos autovalores, a capacidade obtida para cada canal paralelo e a soma total das capacidades.

Analizando as Figuras 82 a 95, é possível verificar que a distribuição dos autovalores do canal determina a capacidade do sistema MIMO e que apenas alguns autovalores realmente contribuem para capacidade a total. Através das cumulativas dos autovalores, verifica-se que para a maioria dos ambientes existem 3 autovalores (canais paralelos) significativos e um com valor desprezível. Isto é confirmado nas figuras das individuais cumulativas da capacidade dos autovalores.

A Tabela 21 apresenta os valores dos autovalores em dB para o valor de 10% da função distribuição cumulativa e a capacidade condicionada 10 % para cada canal paralelo.

	λ_1 (dB)	CO1 (bits/s/Hz)	λ_2 (dB)	CO2 (bits/s/Hz)	λ_3 (dB)	CO3 (bits/s/Hz)	λ_4 (dB)	CO4 (bits/s/Hz)
CT1	9,76	7,89	1,18	5,08	-5,66	2,96	-18,76	0,31
CT5	9,58	7,96	2,34	5,29	-5,42	2,92	-20,25	0,30
LS1	11,35	8,44	-4,67	3,25	-11,18	1,54	-25,35	0,1
LS2	10,71	8,22	-1,91	3,63	-8,39	1,51	-25,70	0,09
LO1	10,52	8,14	-1,89	4,10	-8,76	2,11	-22,08	0,21
LO2	9,89	7,95	0,65	4,91	-5,17	3,11	-21,38	0,24
CT2_2	10,58	8,20	-1,31	4,5	-7,88	2,28	-21,70	0,18
CT2_5	11,24	8,42	-5,46	2,24	-25,42	0,13	-39,59	0
LM2	11,82	8,52	-13,02	1,16	-28,47	0,04	-46,38	0
LM5	10,12	8,01	1,62	5,22	-4,91	3,20	-19,73	0,34
BB1	10,23	7,98	1,16	5,33	-6,16	3,06	-18,63	0,32
BB2	10,32	8,02	0,77	4,78	-6,21	2,47	-20,01	0,28
ID2	9,49	7,81	2,03	5,36	-4,15	3,42	-18,20	0,46
ID3	11,21	8,37	-2,67	3,87	-9,61	1,91	-25,42	0,1

Tabela 21 - Capacidade condicionada para diferentes larguras de bandas

Para os ambientes com visada e com visada parcial (LS1, LS2, CT2_4, LM2 e ID3), o primeiro canal paralelo carrega quase todo o ganho. Para os ambientes LS1, LS2 e ID3, existem dois outros canais paralelos que ainda contribuem um pouco na capacidade. Para os ambientes CT2_5 e LM2 existe apenas mais um canal paralelo que contribui apenas um pouco na capacidade. Estes tipos de ambientes podem ser definidos como ambientes correlatados [36]. Para ambientes sem visada direta os ganhos dos canais paralelos estão distribuídos em três canais paralelos. Estes tipos de ambientes podem ser definidos como ambientes descorrelatados [36].

A taxa entre o maior e o menor autovalor (CN) da matriz do canal pode proporcionar indicações da qualidade do canal. A Tabela 22 apresenta a relação o primeiro canal paralelo, λ_1 , e o os outros três valores (λ_2 , λ_3 e λ_4) para o valor de 10% da função distribuição cumulativa. É possível verificar que, para os ambientes sem visada direta, o CN varia de aproximadamente 27 a 32 dB ou de 3 a 8 dB maior que o CN de um canal ideal (CN aproximado de 24 dB). Para o ambiente com visada e com visada parcial, o CN variou de aproximadamente 36 a 58 dB.

	λ_1/λ_2 (dB)	λ_1/λ_3 (dB)	λ_1/λ_4 (dB)
CT1	8,58	15,42	29,95
CT5	7,25	15,01	28,35
LS1	16,02	22,53	36,70
LS2	12,62	19,10	36,41
LO1	12,41	19,28	32,60
LO2	9,25	15,07	31,27
CT2_2	11,88	18,46	32,27
CT2_5	16,70	36,66	50,83
LM2	24,85	40,30	58,21
LM5	8,50	15,03	29,85
BB1	9,07	16,39	28,86
BB3	9,55	16,52	30,33
ID2	7,46	13,64	27,69
ID3	13,88	20,82	36,63

Tabela 22 - Relação entre o primeiro canal paralelo e os outros canais paralelos

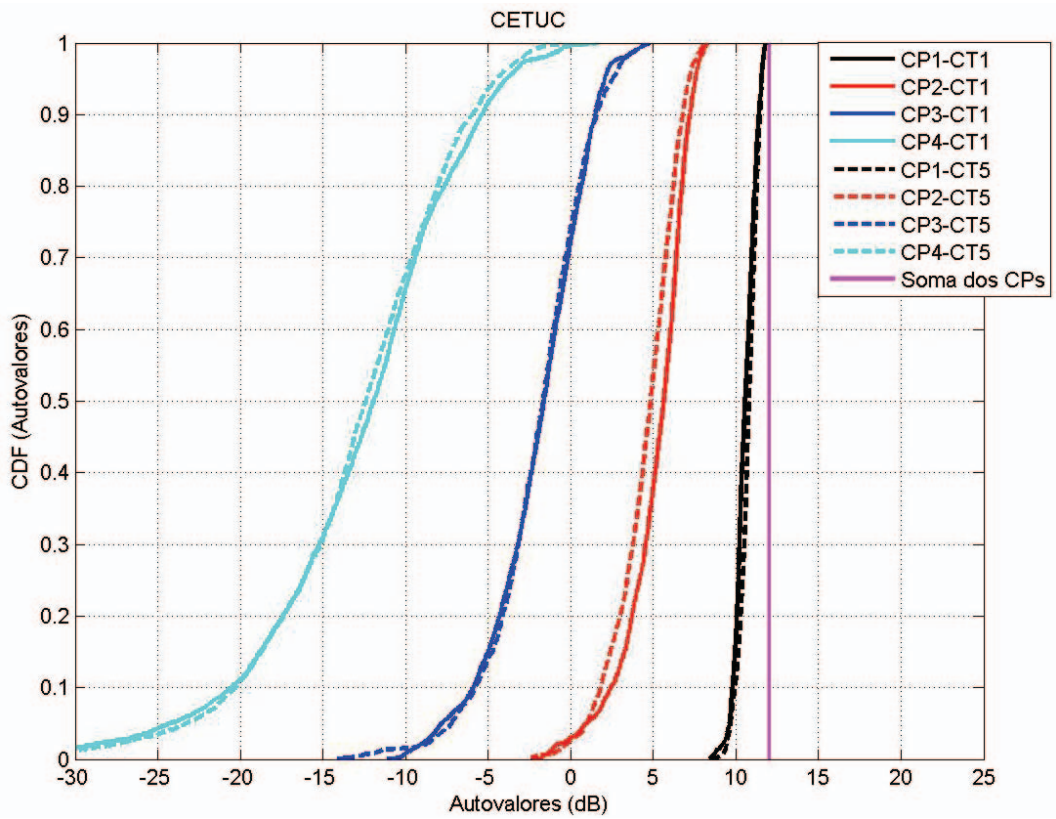


Figura 82 - Função distribuição cumulativas dos autovalores para os ambientes CT1 e CT5

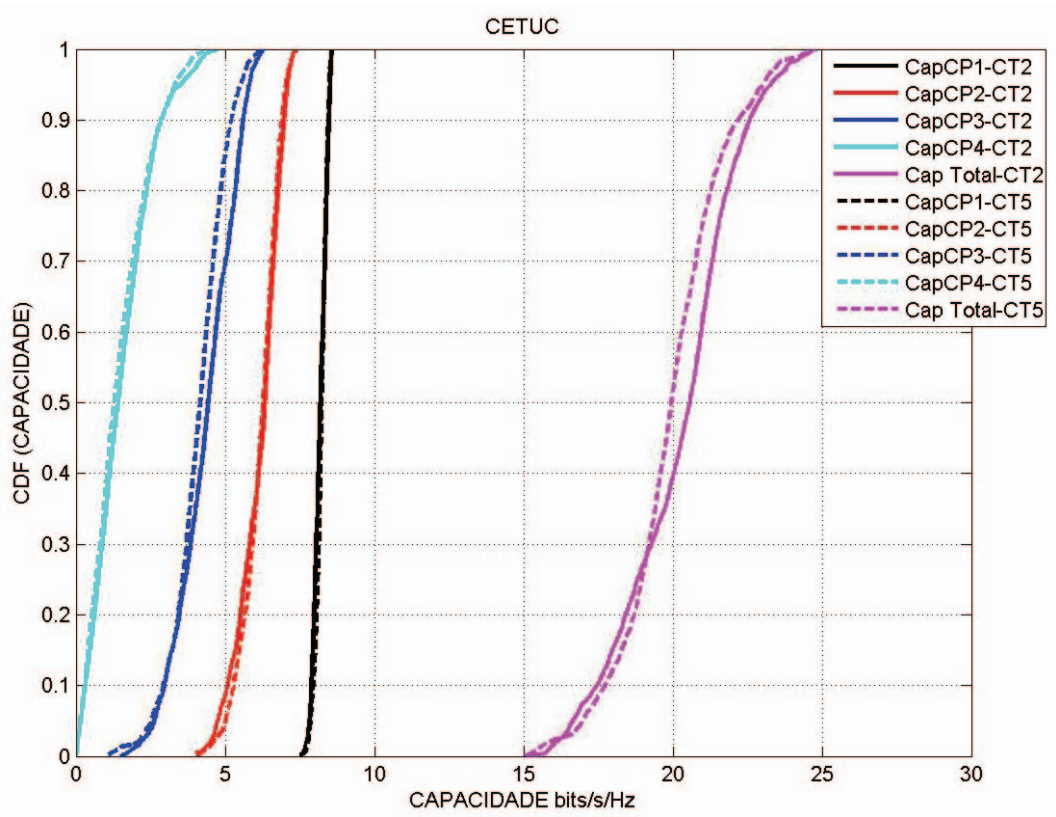


Figura 83 - Capacidade por canal paralelo e capacidade total para os ambientes CT2 e CT5

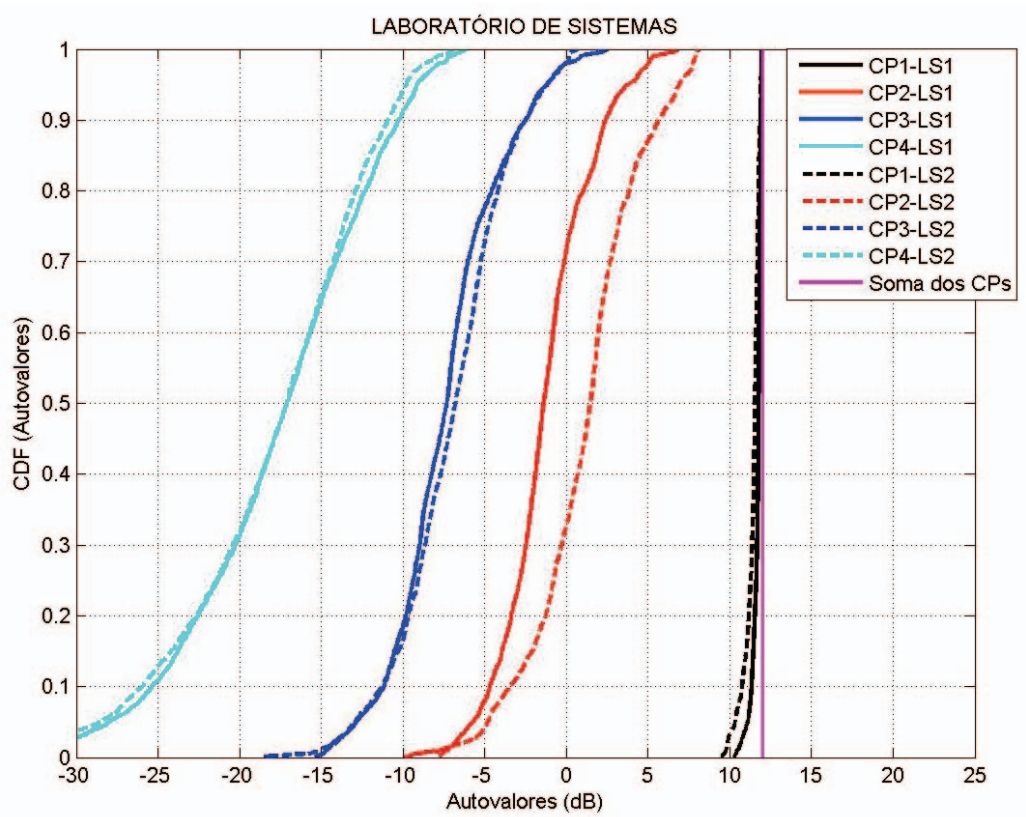


Figura 84 - Função distribuição cumulativas dos autovalores para os ambientes LS1 e LS2

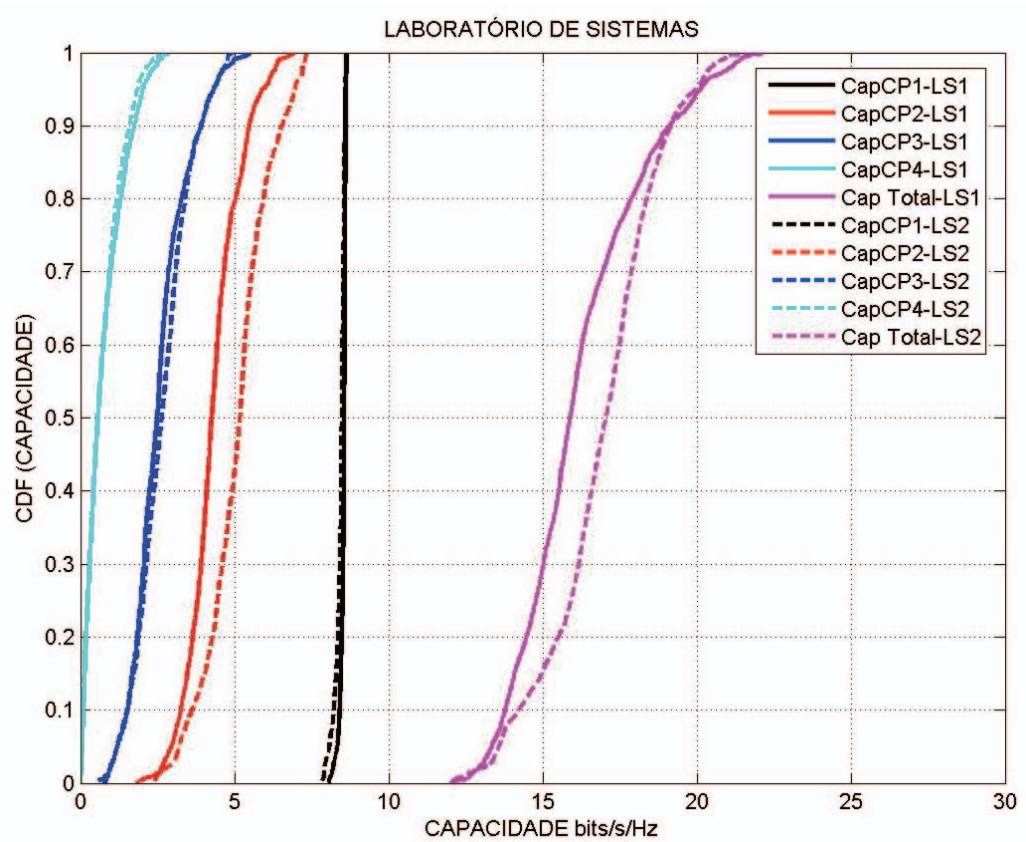


Figura 85 - Capacidade por canal paralelo e capacidade total para os ambientes LS1 e LS2

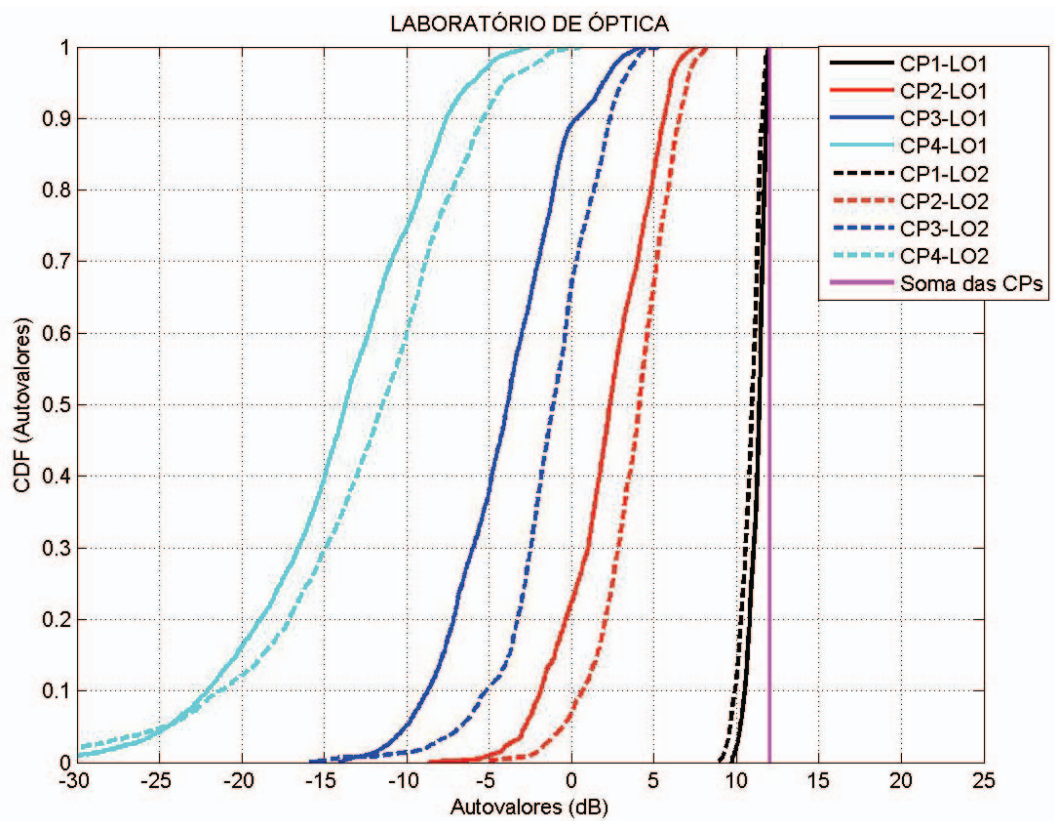


Figura 86 - Função distribuição cumulativas dos autovalores para os ambientes LO1 e LO2

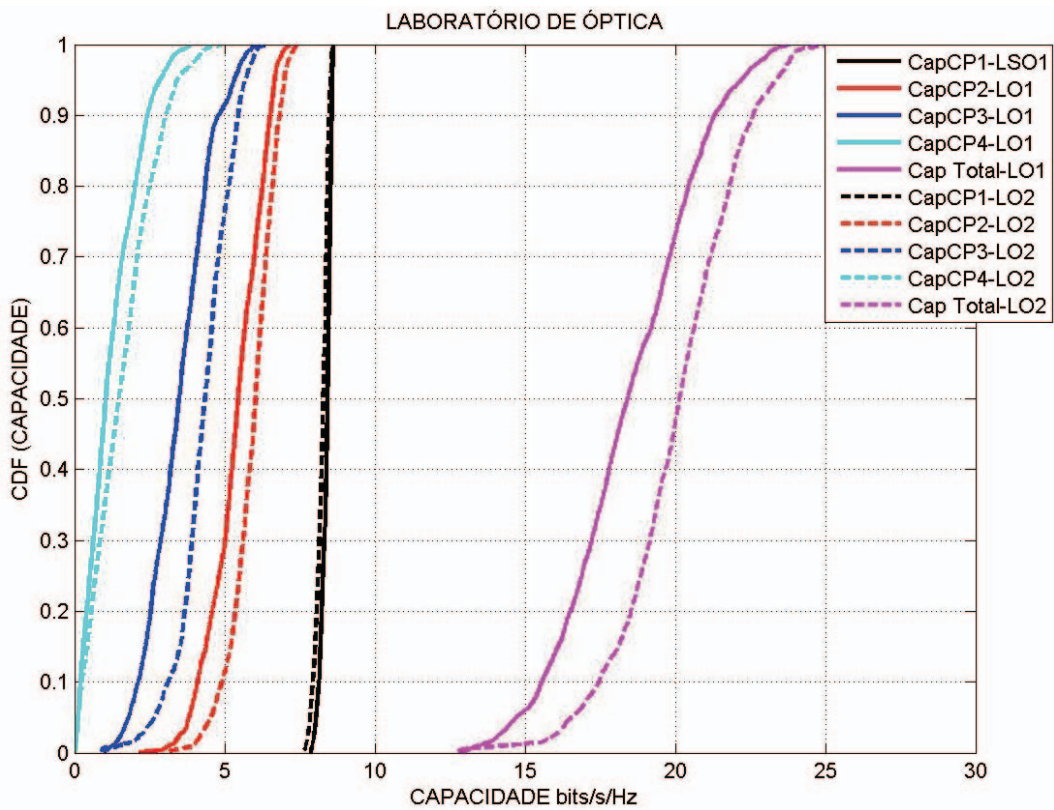


Figura 87 - Capacidade por canal paralelo e capacidade total para os ambientes LO1 e LO2

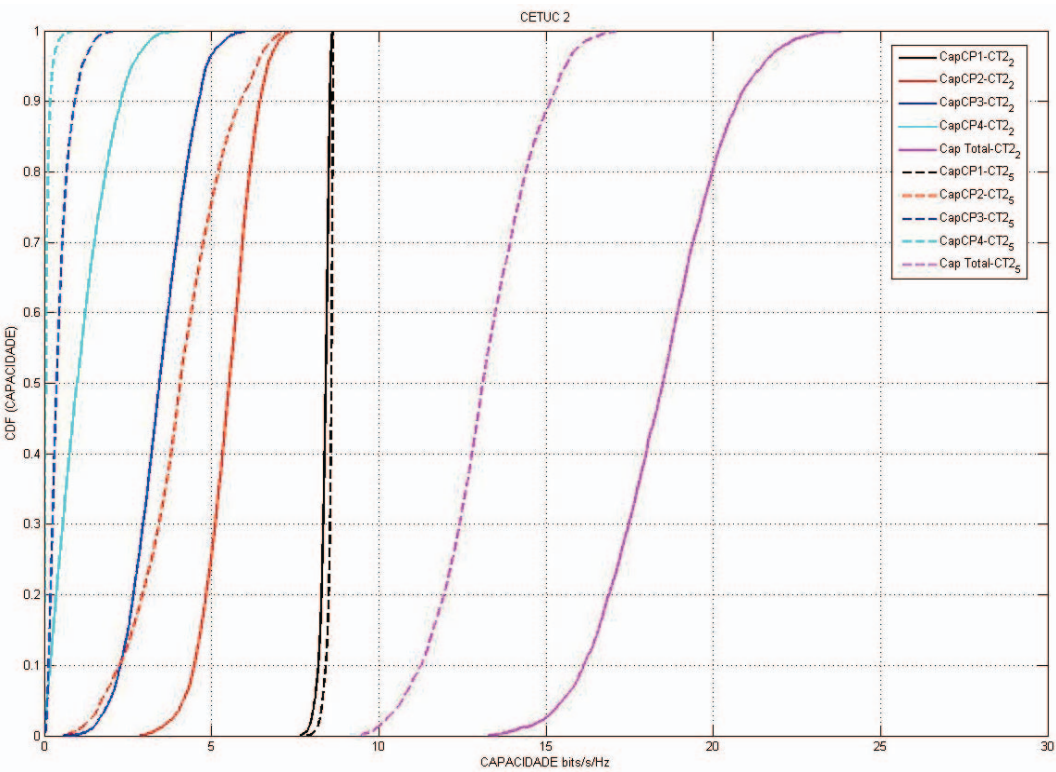


Figura 88 - Função distribuição cumulativas dos autovalores para os ambientes CT2_2 e CT2_4

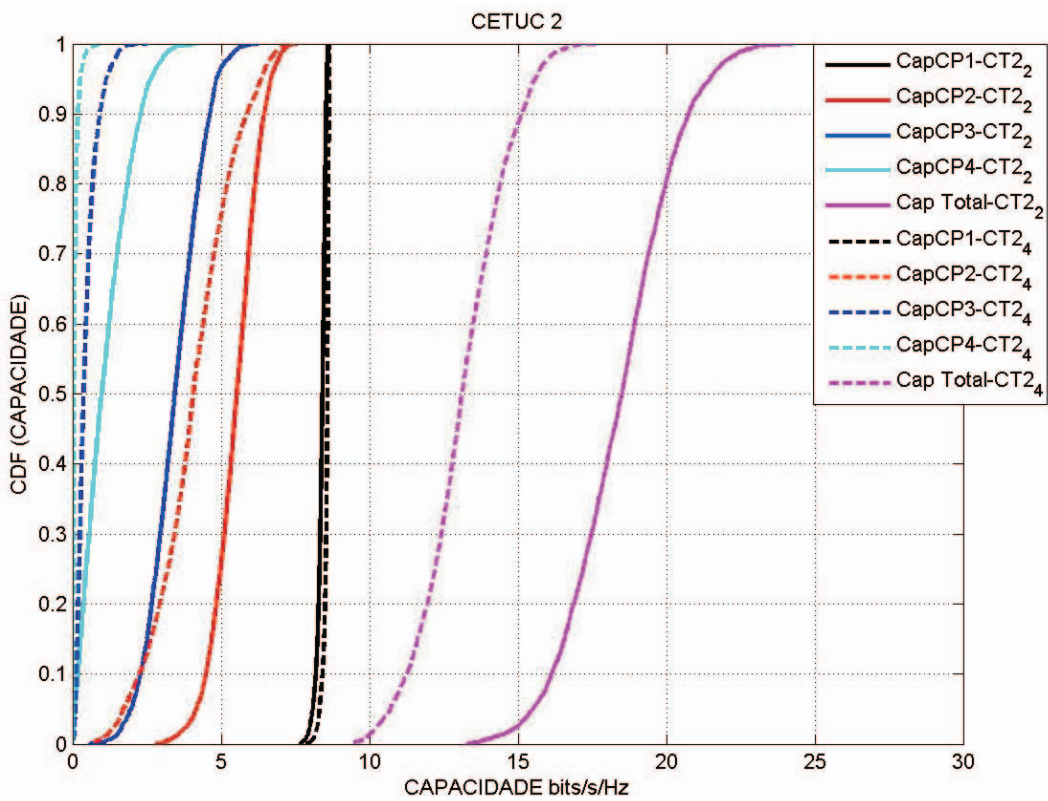


Figura 89 - Capacidade por canal paralelo e capacidade total para os ambientes CT2_2 e CT2_4

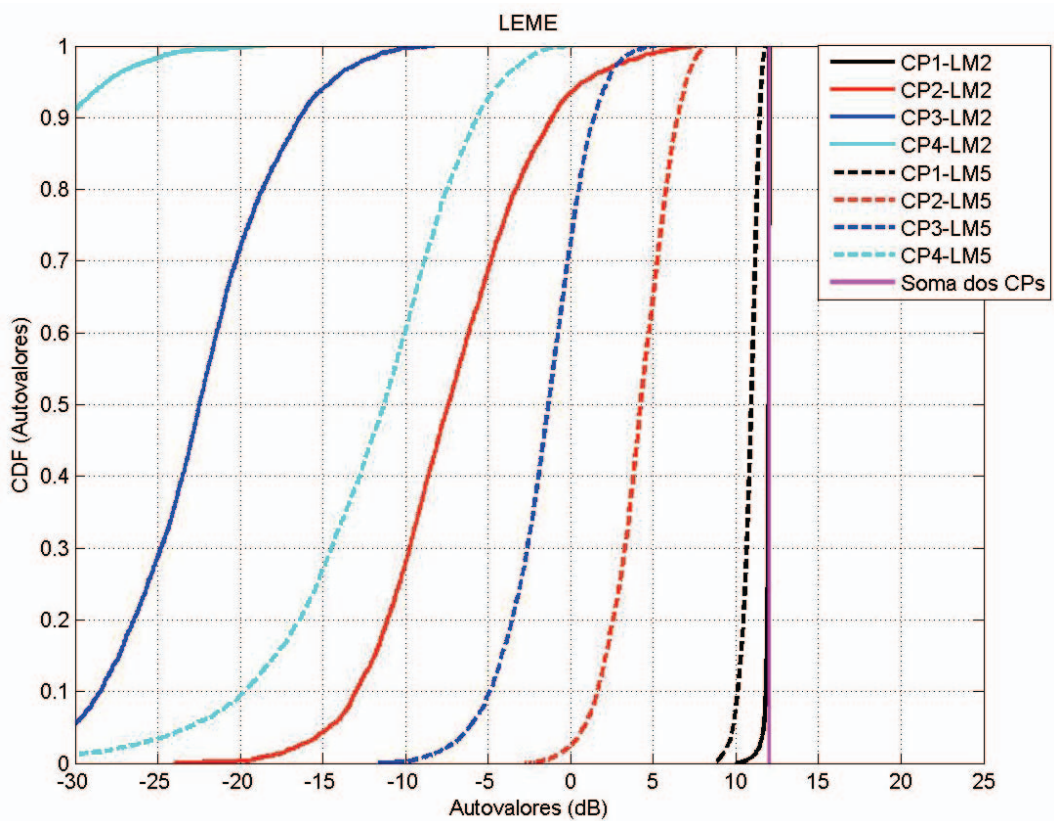


Figura 90 - Função distribuição cumulativas dos autovalores para os ambientes LM2 e LM5

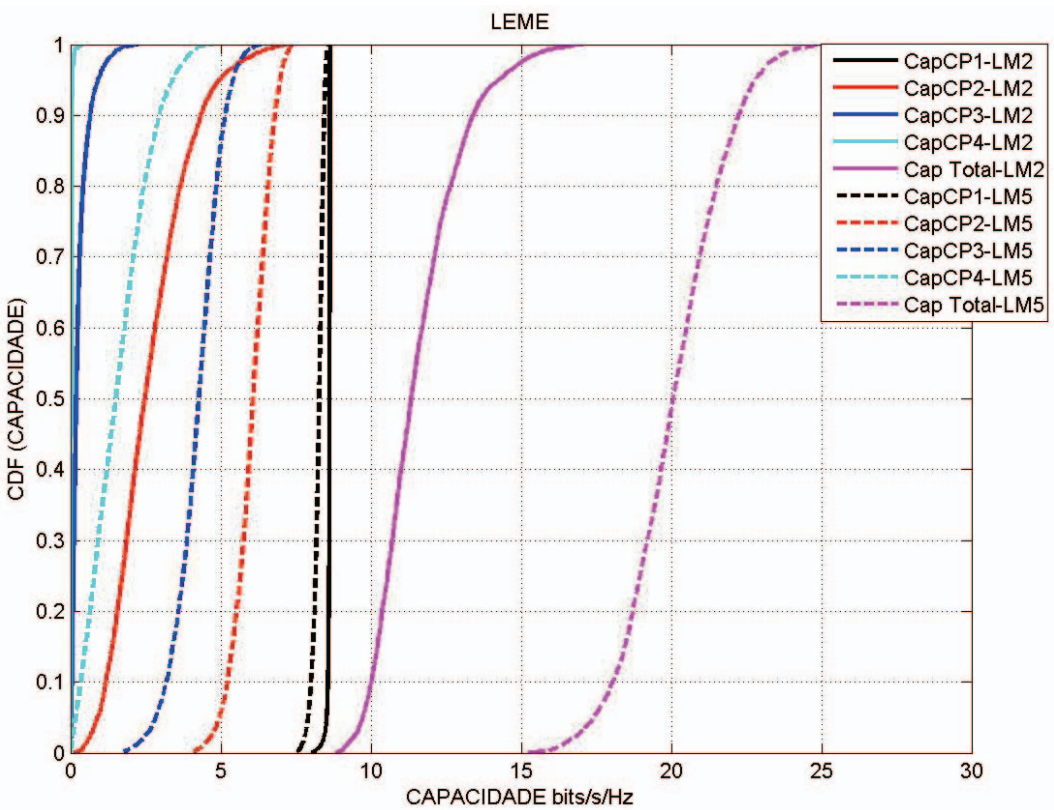


Figura 91 - Capacidade por canal paralelo e capacidade total para os ambientes LM2 e LM5

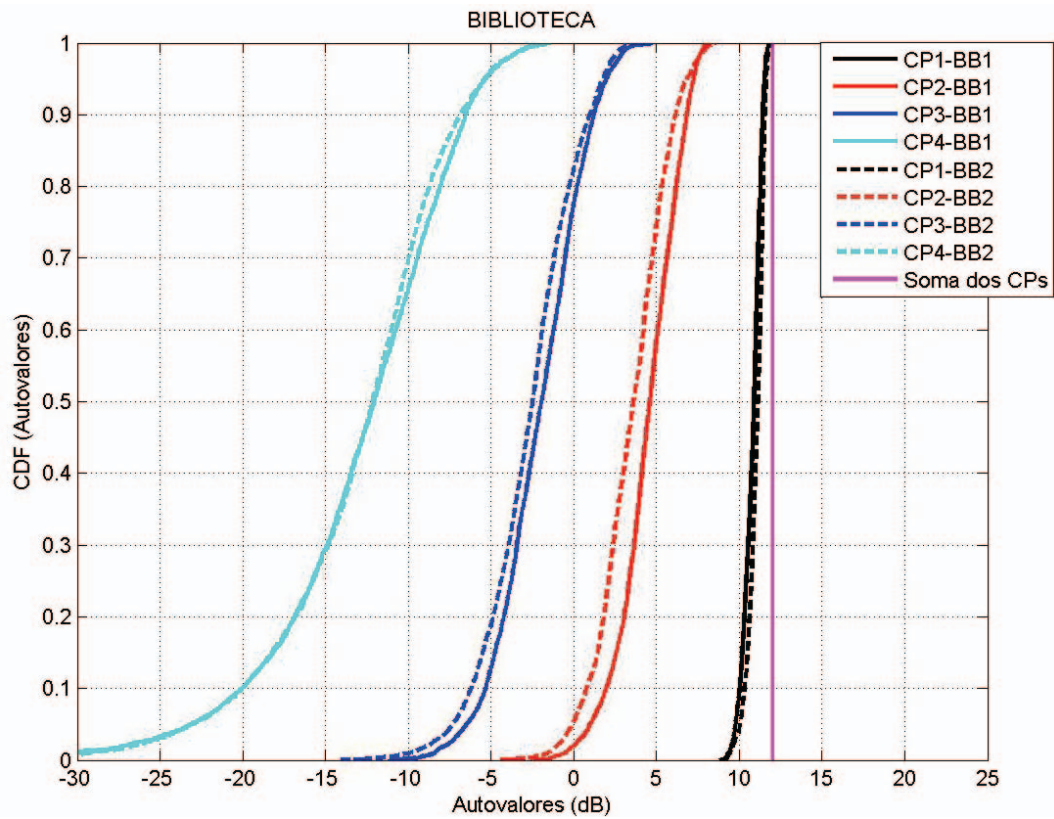


Figura 92 - Função distribuição cumulativas dos autovalores para os ambientes BB1 e BB2

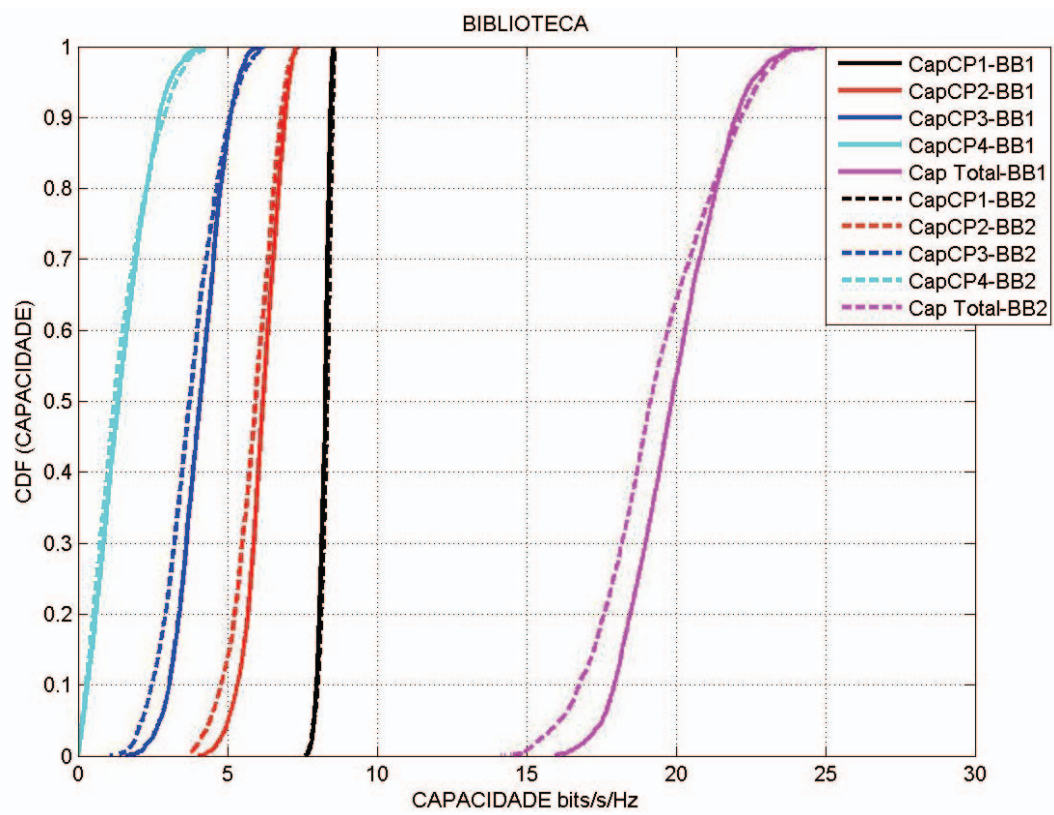


Figura 93 - Capacidade por canal paralelo e capacidade total para os ambientes BB1 e BB2

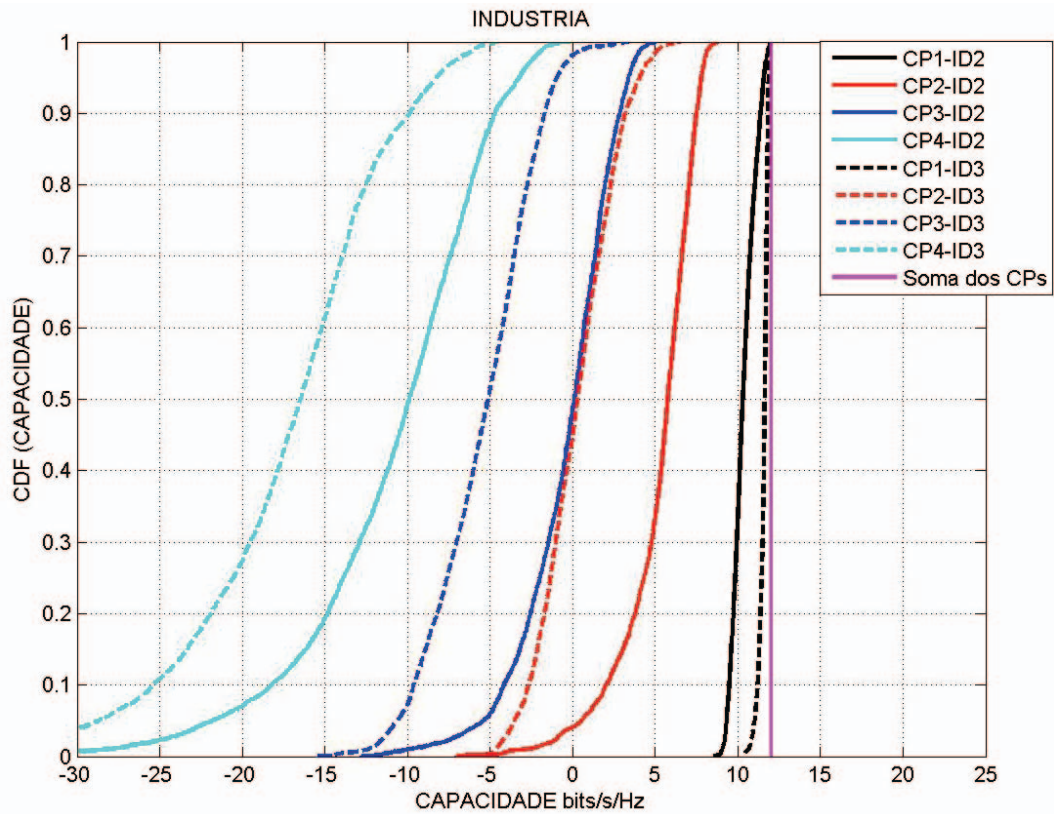


Figura 94 - Função distribuição cumulativas dos autovalores para os ambientes ID2 e ID3

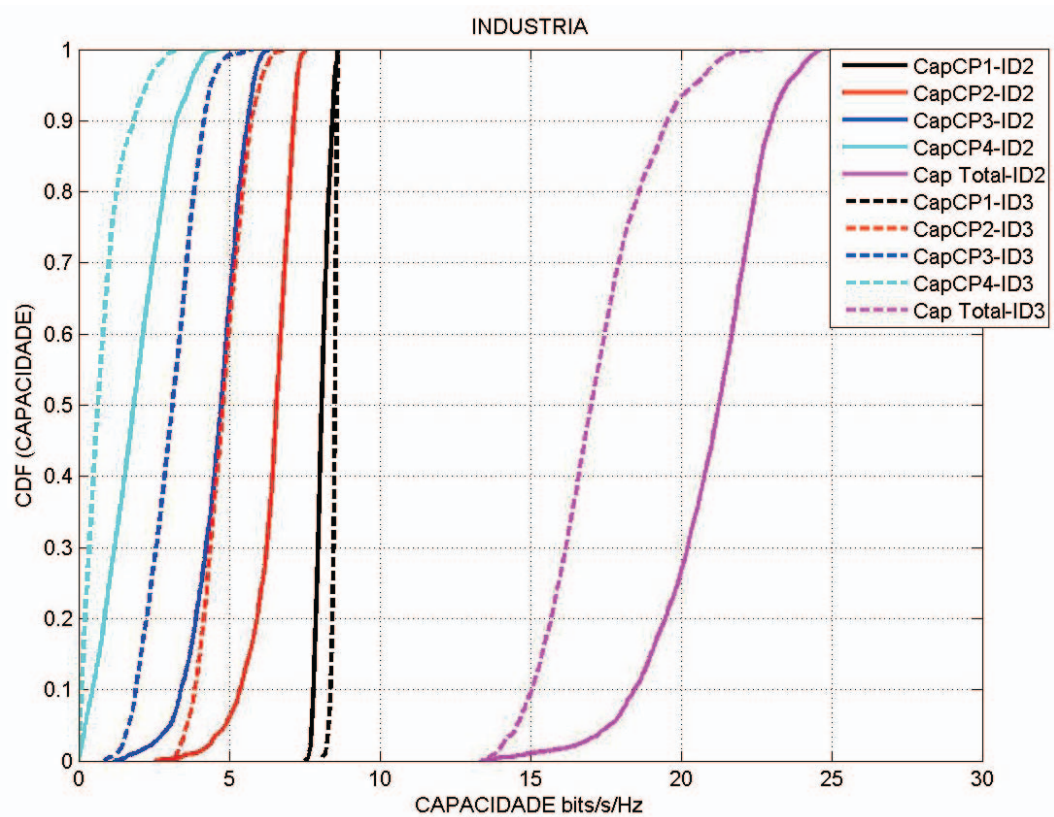


Figura 95 - Capacidade por canal paralelo e capacidade total para os ambientes ID2 e ID3

- **Capacidade para um sistema MIMO 2x2**

As Figuras 96 a 102 apresentam a função distribuição cumulativa das capacidades para o canal faixa-estreita para dois sistemas MIMO 2x2 com diferentes espaçamento entre os elementos ($0,5\lambda$ e 1λ). Estes dois conjuntos foram retirados do sistema MIMO 4x4 medido. Através destes conjuntos é possível observar o comportamento da capacidade quando se aumenta o espaçamento entre os elementos dos arranjos para os diferentes ambientes medidos.

Com o aumento do espaçamento entre os elementos do arranjo, em quase todos ambientes houve a melhora na capacidade condicionada. Para os ambientes com visada e com visada parcial, o menor incremento foi obtido no ambiente LM2 (corredor do Leme), mostrando que o aumento do espaçamento entre os elementos pode para situações com menores distâncias entre o transmissor e o receptor pode ser uma solução para a melhora da capacidade condicionada. Contudo, é bom lembrar, caso seja aumentada a distância entre o transmissor e receptor neste ambiente, mesmo com um espaçamento superior ou igual a um comprimento de onda, a capacidade será reduzida devido ao aumento da correlação entre os sinais que chegam no arranjo do receptor. Para os ambientes com visada parcial (LS2 e ID3) houve uma melhora significativa, principalmente para o ambiente ID3. A justificativa para esta melhora está associada com o aumento da possibilidade de uma das antenas do arranjo 2x2 estarem sempre sem visada direta.

Para os ambientes sem visada direta houve também uma melhora na capacidade condicionada. É possível observar ainda que, para alguns ambientes, o incremento da distância fez com que a capacidade condicionada se aproximasse da capacidade condicionada do canal ideal, e para outros ambientes a capacidade condicionada foi melhor que a capacidade condicionada do canal ideal.

A Tabela 23 apresenta as diferenças entre as capacidades condicionadas obtidas nos sistemas MIMO 2x2 com espaçamentos entre os elementos de 0,5 e 1 comprimento de onda.

	C10_1 - C10_0,5
CT1	0,85
CT5	0,72
LS1	0,54
LS2	0,87
LO1	0,82
LO2	0,64
CT2_2	0,68
CT2_5	0,0
LM2	0,27
LM5	0,52
BB1	0,67
BB3	0,52
ID2	0,54
ID3	1,55

Tabela 23 - Diferenças entre as capacidades condicionadas para relação entre o primeiro canal paralelo e os outros canais paralelos

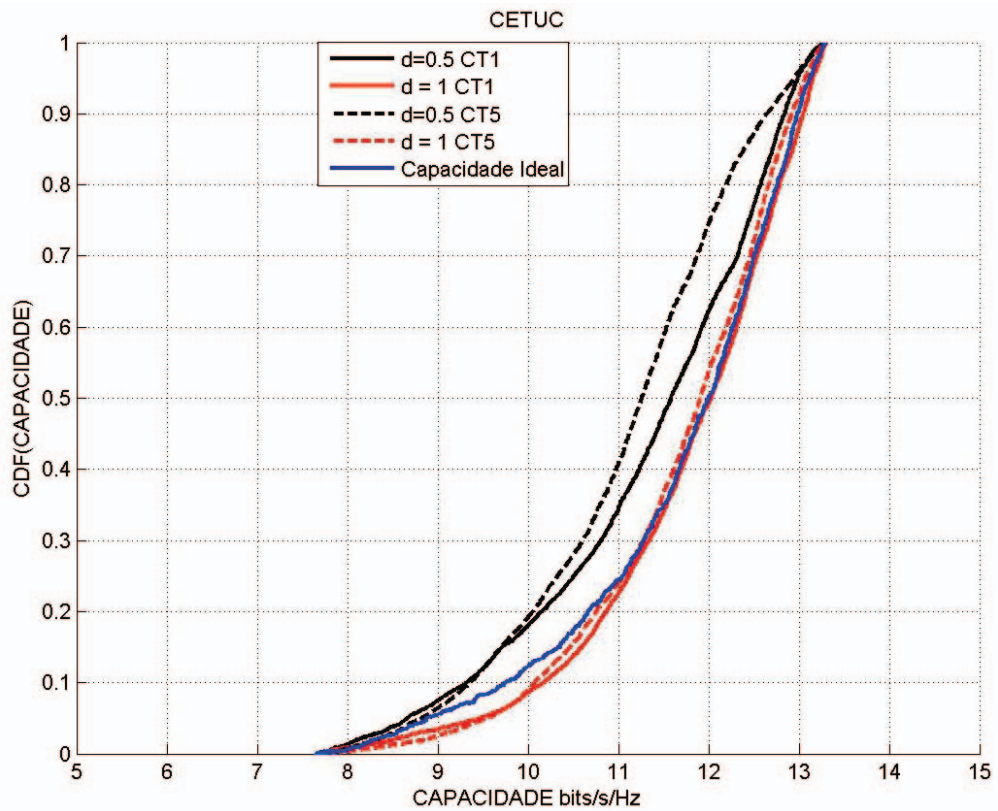


Figura 96 - Cumulativas da capacidade do canal faixa estreita 2x2 para o ambiente CETUC para d = 0,5 e 1 comprimento de onda

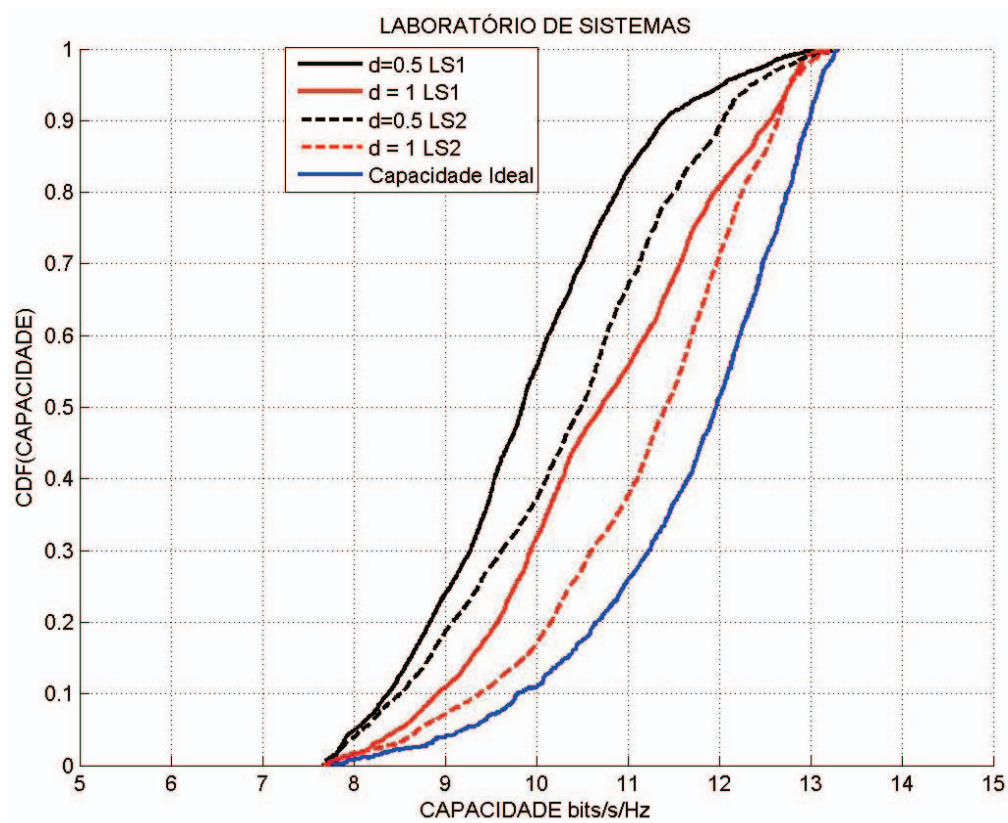


Figura 97 - Cumulativas da capacidade do canal faixa estreita 2x2 para o ambiente Laboratório de Sistemas para $d = 0,5$ e 1 comprimento de onda

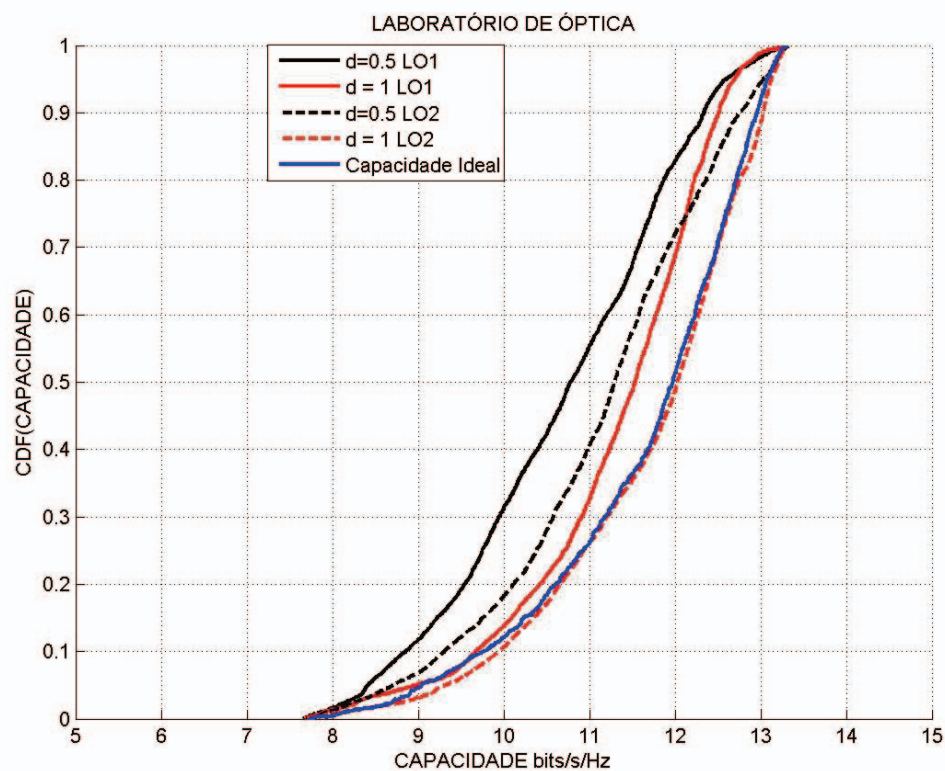


Figura 98 - Cumulativas da capacidade do canal faixa estreita 2x2 para o ambiente Laboratório de Óptica para $d = 0,5$ e 1 comprimento de onda

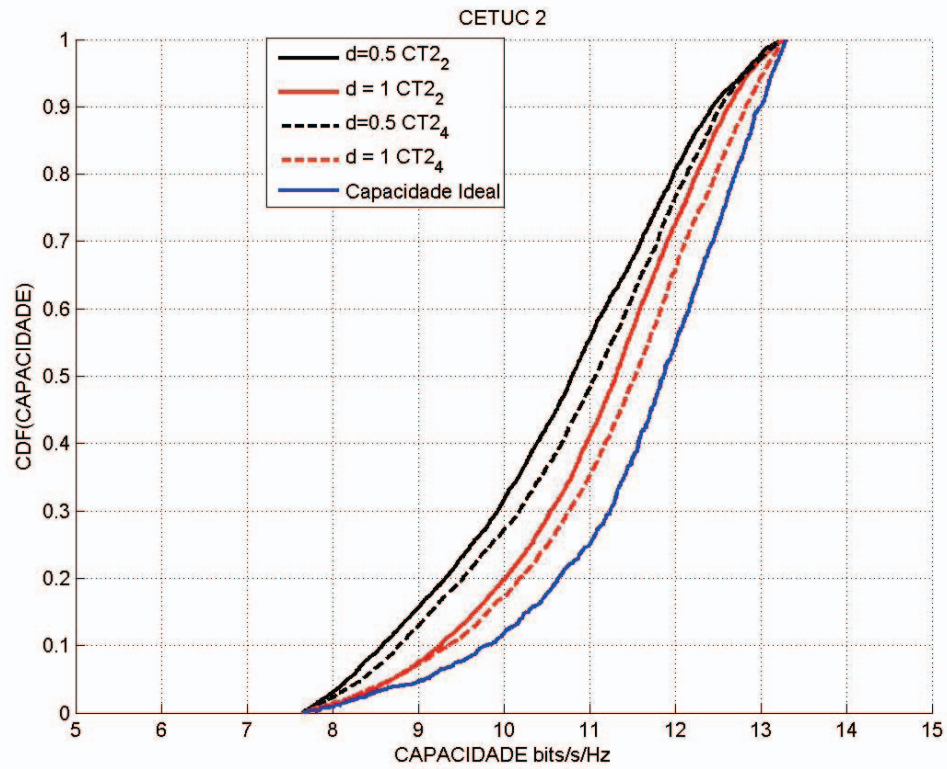


Figura 99 - Cumulativas da capacidade do canal faixa estreita 2x2 para o ambiente CETUC 2 para $d = 0,5$ e 1 comprimento de onda

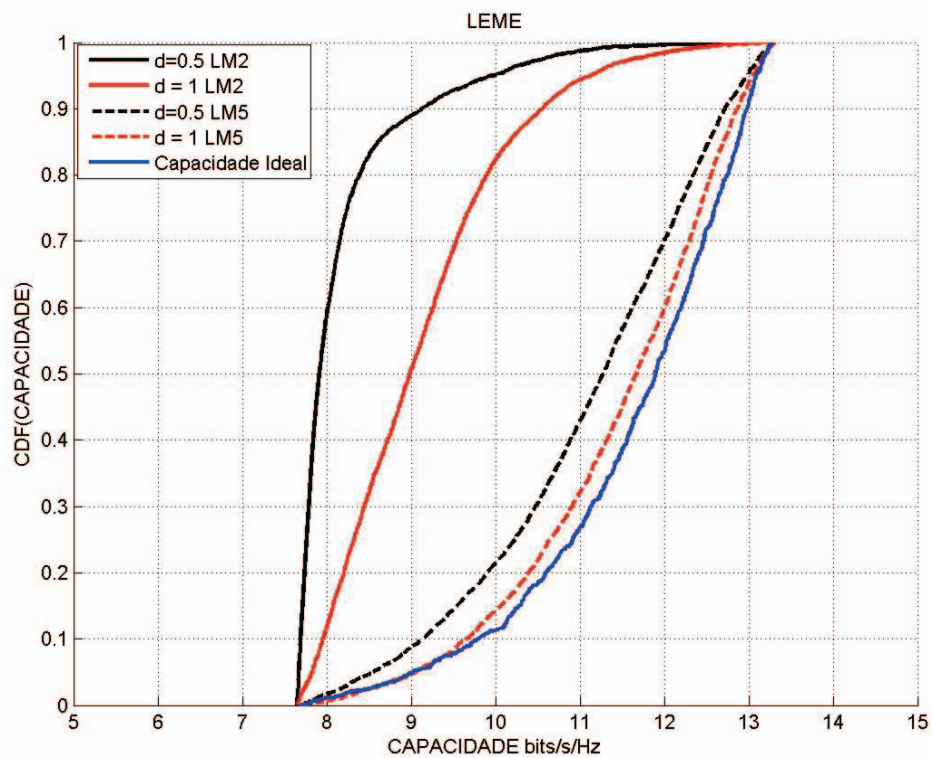


Figura 100 - Cumulativas da capacidade do canal faixa estreita 2x2 para o ambiente Leme para $d = 0,5$ e 1 comprimento de onda

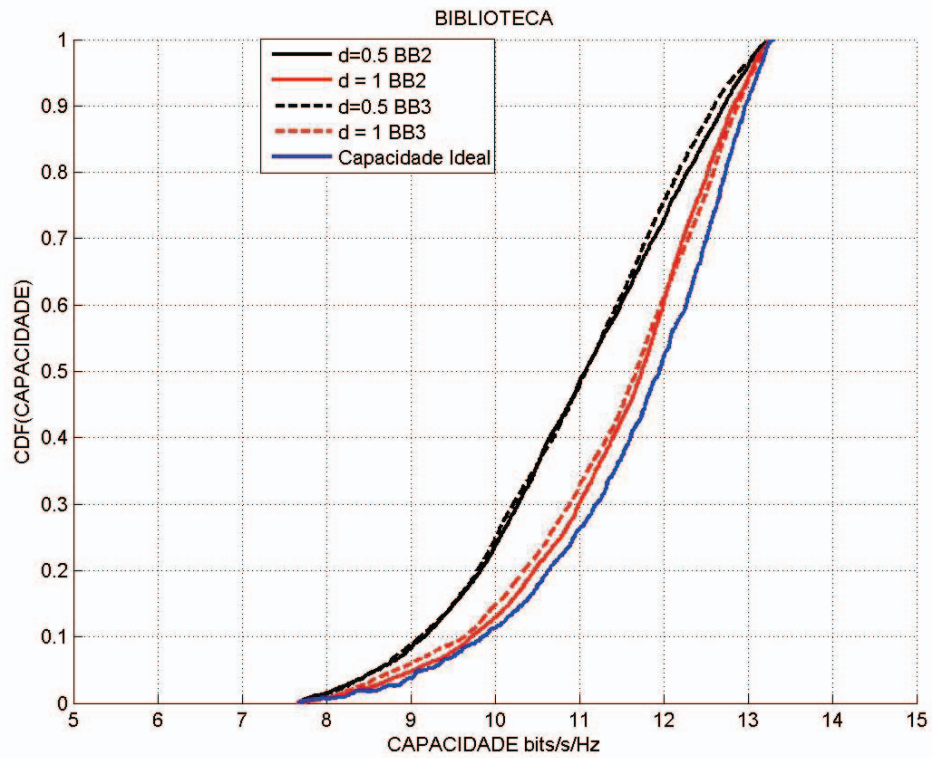


Figura 101 - Cumulativas da capacidade do canal faixa estreita 2x2 para o ambiente Biblioteca para $d = 0,5$ e 1 comprimento de onda

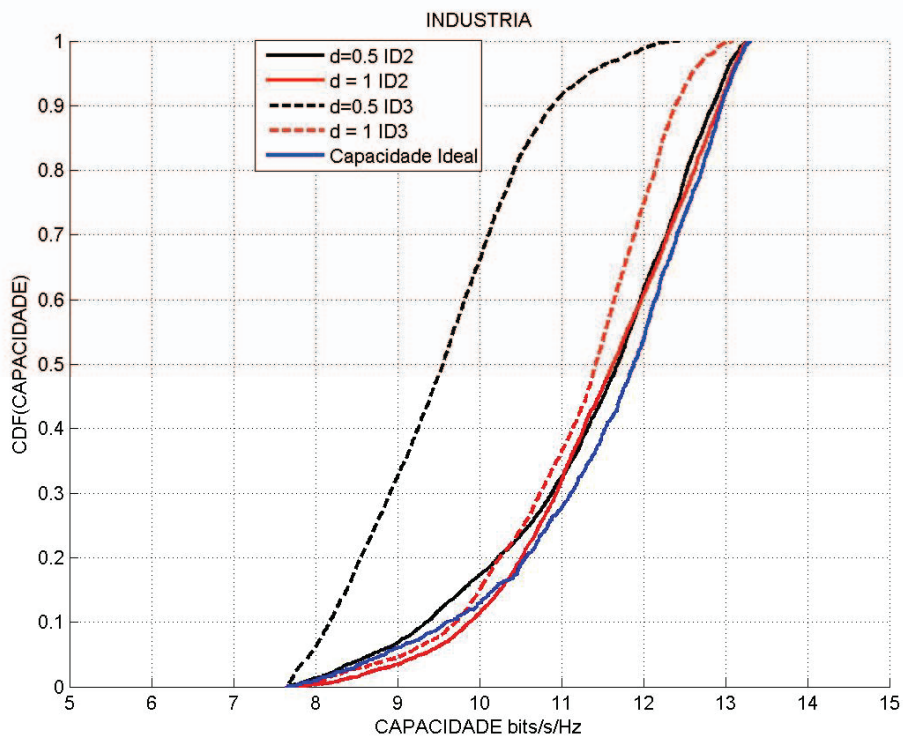


Figura 102 - Cumulativas da capacidade do canal faixa estreita 2x2 para o ambiente Indústria para $d = 0,5$ e 1 comprimento de onda

Nas Figuras 103 a 109 também são apresentadas as capacidades dos canais seletivos em frequência, para as larguras de banda 5, 10 e 20 MHz, para os dois sistemas MIMO 2x2 com diferentes espaçamentos entre os elementos do arranjo. Apenas alguns pontos foram escolhidos para serem apresentados. Analisando as figuras, é possível verificar um ganho na capacidade condicionada com o aumento da largura de banda, para os sistemas MIMO 2x2 com distância entre os de 0,5 e 1 comprimento de onda.

É possível observar novamente que para os sistemas MIMO 2x2 os ganhos obtidos nas capacidades condicionadas foram bem baixos apenas para a largura de banda de 5 e que, a partir da largura de banda maior que 10 MHz, inicia-se a ter acréscimos significativos na capacidade condicionada, se comparada com a capacidade condicionada faixa estreita. Isto é observado principalmente nos ambientes sem visada direta. Para os ambientes com visada têm-se acréscimos significativos nas capacidades condicionadas apenas para larguras de banda maiores que 20 MHz. A explicação acima também se aplica quando se aumenta da distância entre os elementos, ou seja, a distância entre os elementos não influencia na melhora da capacidade condicionada quando se aumenta a largura de banda.

Comparando as cumulativas do mesmo ambiente mas com espaçamento entre os elementos, pode-se observar uma melhora na capacidade condicionada. Para largura de banda de 5 MHz, esta melhora variou de 0,4 a 0,7 bits/s/Hz para ambientes sem visada e de 0,4 a 0,6 para ambientes com visada e com visada parcial. Para largura de banda de 10 MHz, esta melhora variou de 0,3 a 0,7 bits/s/Hz para ambientes com visada e de 0,4 a 0,5 bits/s/Hz para ambientes com visada e com visada parcial. Para largura de banda de 20 MHz, esta melhora variou de 0,4 a 0,7 bits/s/Hz para ambientes com visada e de 0,4 a 0,5 bits/s/Hz para ambientes com visada e com visada parcial.

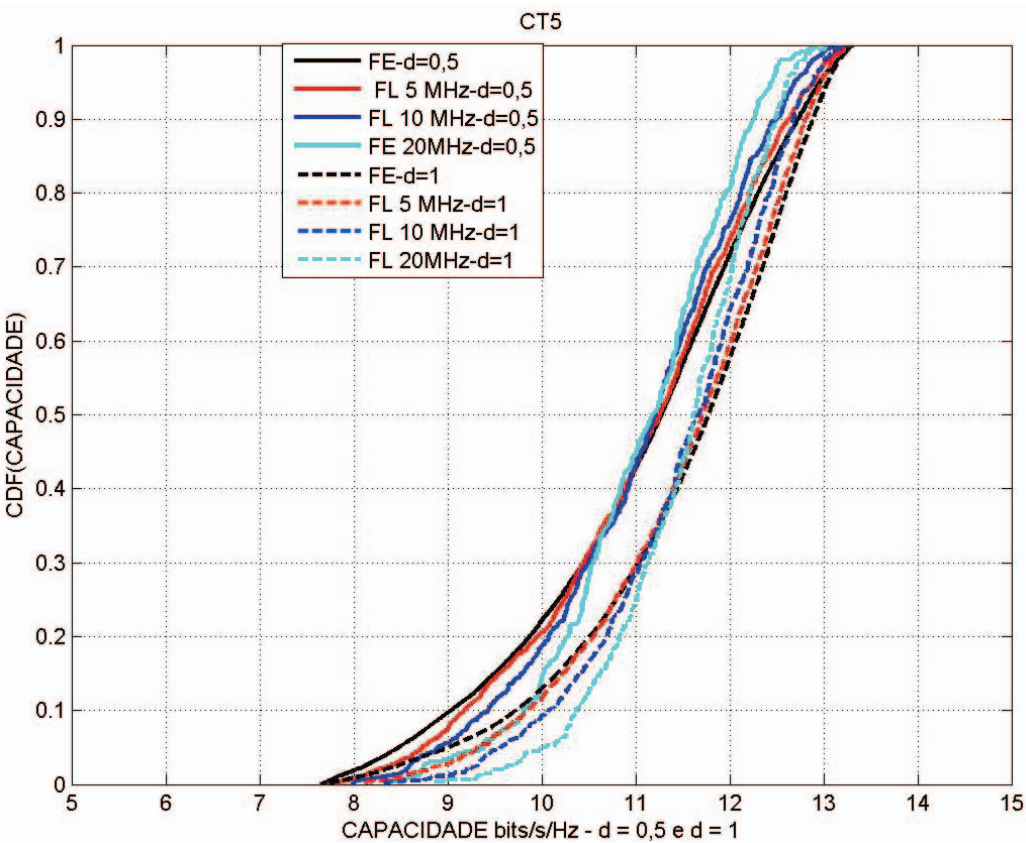


Figura 103 - Capacidade faixa-larga para o ambiente CT5-d=0,5 e d=1

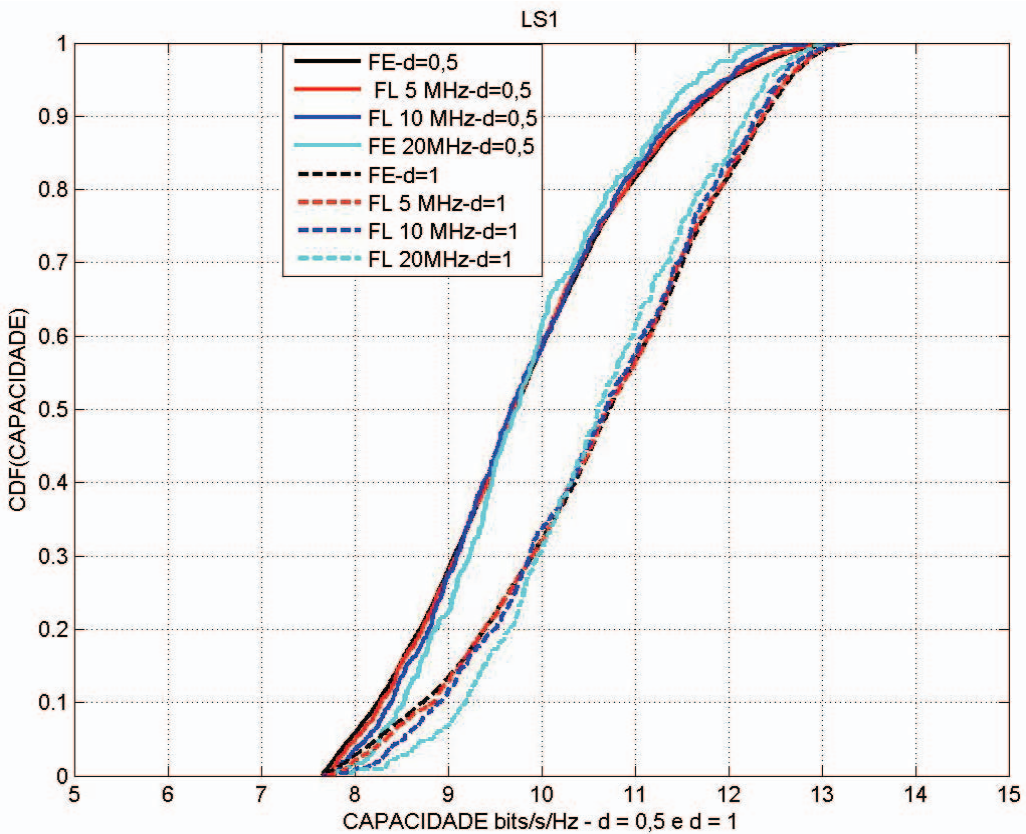


Figura 104 - Capacidade faixa-larga para o ambiente LS1-d=0,5 e d=1

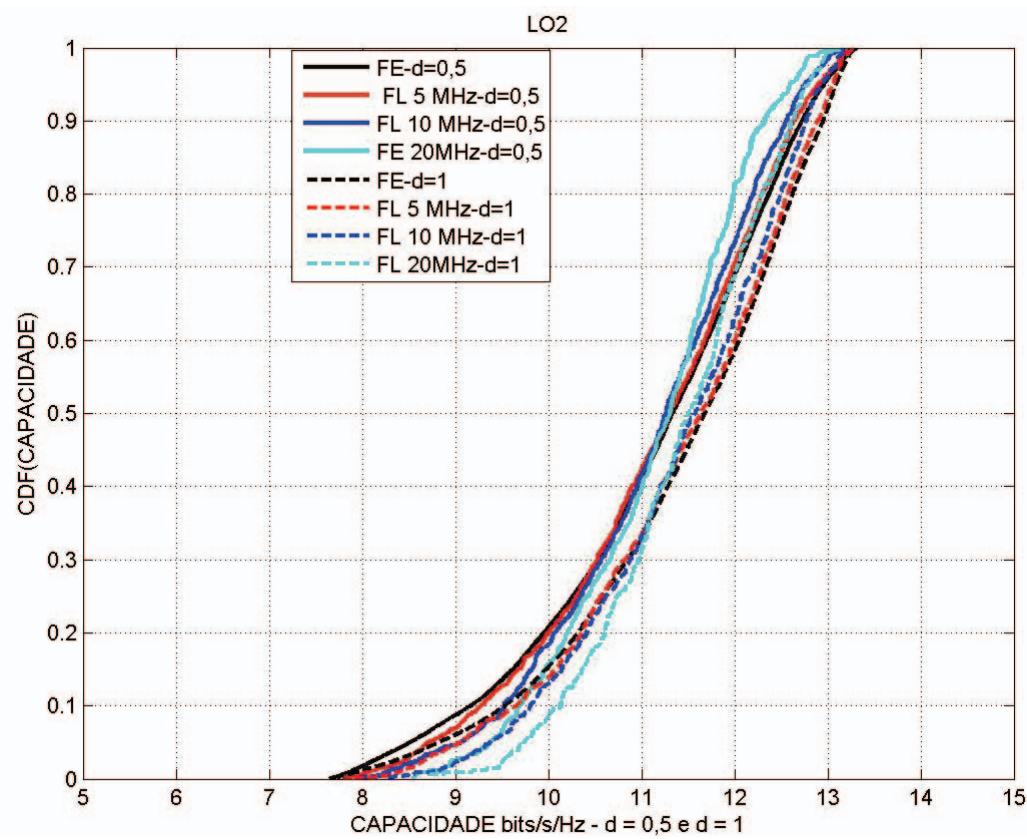


Figura 105 - Capacidade faixa-larga para o ambiente LO2-d=0,5 e d=1

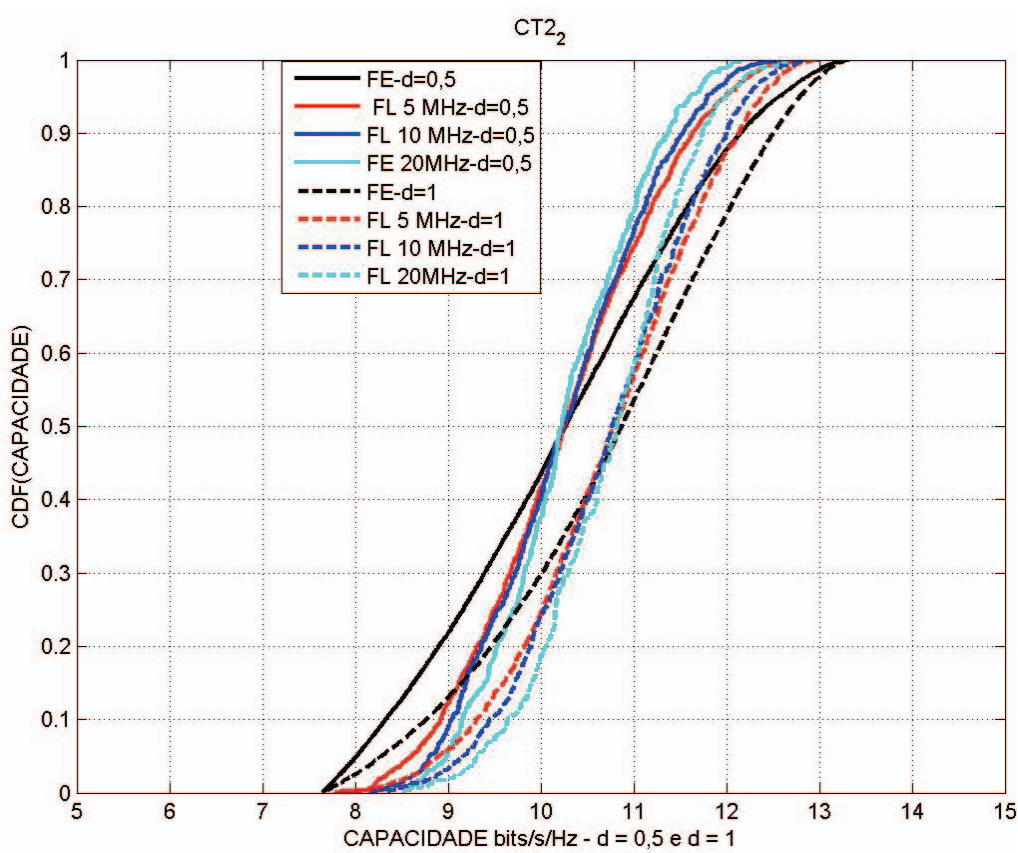


Figura 106 - Capacidade Faixa Larga para o ambiente Ct2_2-d=0,5 e d=1

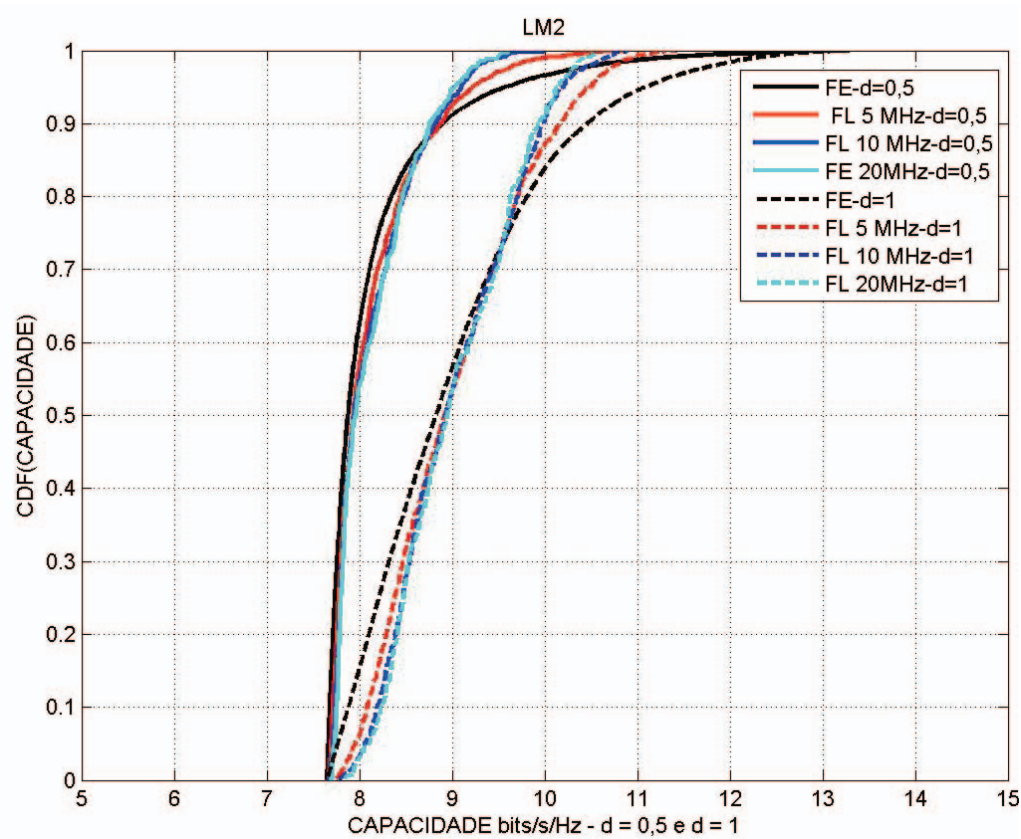


Figura 107 - Capacidade Faixa Larga para o ambiente LM2-d=0,5 e d=1

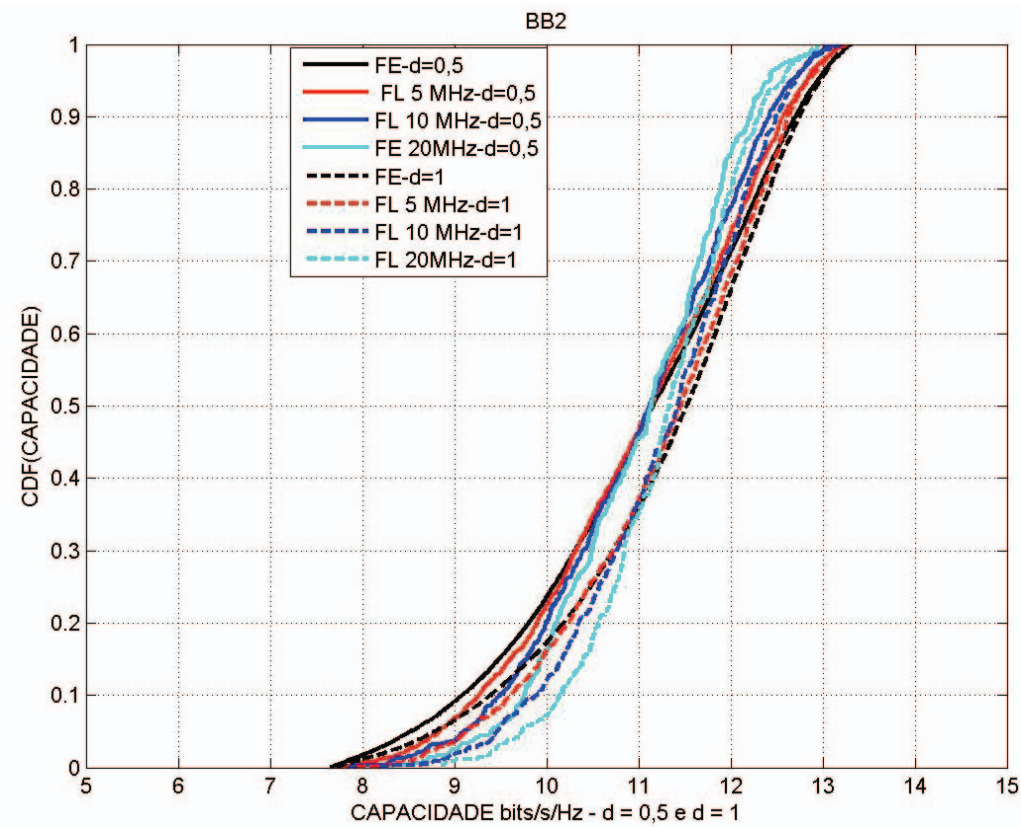


Figura 108 - Capacidade Faixa Larga para o ambiente BB2-d=0,5 e d=1

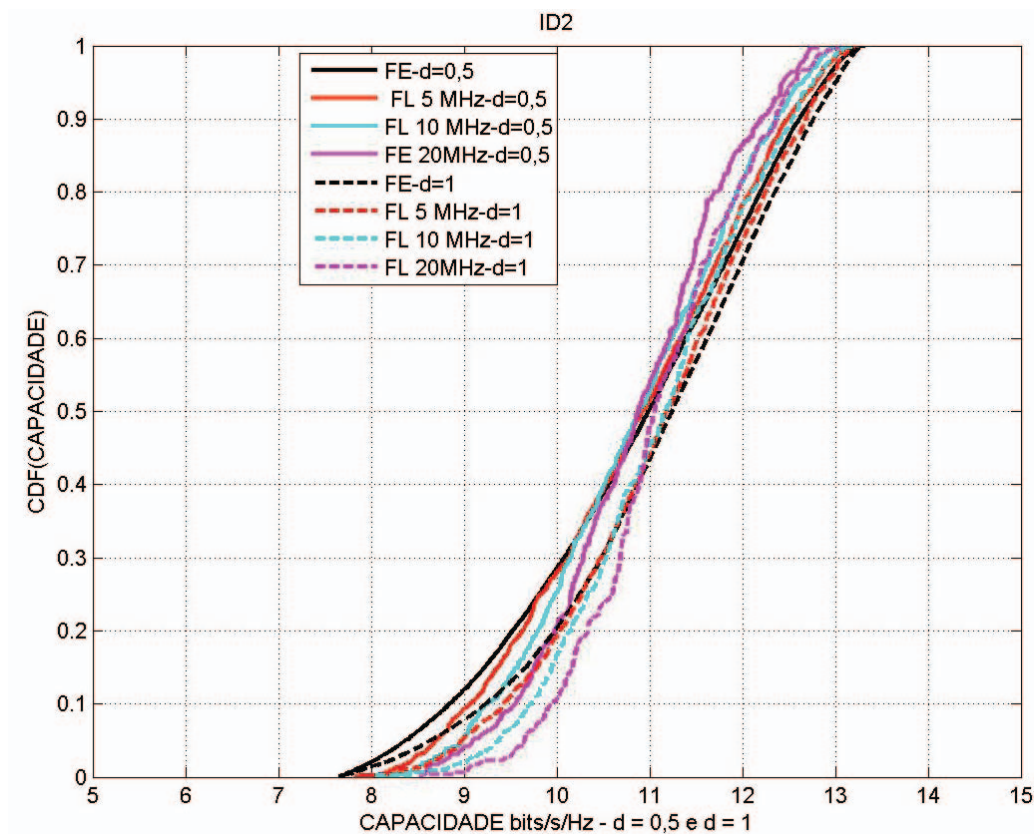


Figura 109 - Capacidade Faixa Larga para o ambiente ID2-d=0,5 e d=1

• Considerações Finais

Através de uma extensiva campanha de medidas *indoor*, a capacidade do canal para um sistema MIMO foi avaliada. A capacidade do canal MIMO foi calculada para um canal faixa-estreita e para um canal seletivo em frequência com diferentes larguras de banda. A caracterização dos canais paralelos foi realizada através da obtenção dos autovalores da matriz HH^H . Foi também avaliada a capacidade de cada canal paralelo. Por fim, foi avaliada a capacidade de um sistema MIMO 2x2 com diferentes espaçamentos entre os elementos dos arranjos.

Foi possível observar em quase todos ambientes a variação da capacidade (até 1 bits/s/Hz) ao longo do grid. Essa variação foi decorrente principalmente da grande quantidade e disposição dos espalhadores no ambiente, que variava ao longo dos pontos percorridos no grid. Foi mostrado também que, para alguns ambientes, aproximadamente 3 bits/s/Hz são acrescentados na capacidade quando se sai da situação com visada para a sem visada. Em alguns ambientes sem visada direta, uma melhora na capacidade de até 3 bits/s/Hz foi obtida apenas modificando a

posição do receptor, mostrando que a capacidade não variou não somente ao longo do grid, mas também para diferentes pontos do mesmo ambiente medido.

Foi analisada a capacidade em corredores. Medidas ao longo do corredor e em pontos fixos foram realizadas. Os resultados medidos se enquadram dentro de outros trabalhos na literatura, onde a capacidade é reduzida com o aumento da distância devido ao aumento da correlação no transmissor.

Foi observado que para a situação com visada, tem-se uma capacidade aproximadamente 30% menor que a capacidade ideal e aproximadamente 24% menor para a situação com visada parcialmente obstruída. Para a situação sem visada, a capacidade pode variar aproximadamente de 8 a 20%. Essa grande variação na capacidade sem visada depende da quantidade e do tipo de espalhadores presentes no ambiente. Nesta análise, excluimos o ambiente CETUC 2 e o Leme. Para estes ambientes, foi encontrada uma capacidade entre 25 e 45% menor e entre 12 e 52% menor que a capacidade ideal, respectivamente.

Analizando a capacidade do canal faixa-larga foi possível observar ganhos na capacidade condicionada com o aumento da banda do canal, mesmo para situações em que a capacidade é extremamente baixa. Para alguns ambientes, foram obtidos acréscimos superiores a 1 bits/s/Hz para quando se aumentava a banda de faixa-estreita para uma banda de 200 MHz. Para a maioria dos ambientes sem visada, os ganhos começaram a ser significativos para larguras de banda superiores a 20 MHz; já para os ambientes com visada direta, os ganhos começaram a ser significativos apenas para larguras de banda maiores que 50 MHz. Por fim, foi possível observar que para a maioria dos ambientes medidos, a capacidade condicionada se aproxima da capacidade média quando se aumenta a largura de banda.

Analizando os resultados dos autovalores obtidos da decomposição da matriz do canal em canais paralelos, foi possível verificar a influência da distribuição dos autovalores do canal na capacidade do sistema MIMO. De uma forma geral, foi observado através das cumulativas dos autovalores e da capacidade dos autovalores que, para a maioria dos ambientes, existiam 3 canais paralelos significativos e um com valor desprezível. A taxa entre o maior e o menor autovalor (CN) da matriz do canal foi calculada. Foi possível verificar que, para os ambientes sem visada direta, o CN variou de aproximadamente 27 a 32 dB ou de 3 a 8 dB maior que o CN de um canal ideal (CN aproximado de 24 dB). Para o ambiente com visada e com visada parcial, o CN variou de aproximadamente 36 a 58 dB.

Analisando as capacidades para os sistemas MIMO 2x2 com diferentes espaçamento entre os elementos ($0,5\lambda$ e 1λ), foi possível perceber que com o aumento do espaçamento entre os elementos do arranjo, em quase todos ambientes houve melhora na capacidade condicionada. Para os ambientes com visada e com visada parcial, foi observado que o aumento do espaçamento entre os elementos para situações com menores distâncias entre o transmissor e o receptor pode ser uma solução para a melhora da capacidade condicionada. Para os ambientes sem visada direta, houve também uma melhora na capacidade condicionada. Além disso, em alguns ambientes, a capacidade condicionada foi aproximadamente igual ou maior do que a capacidade condicionada do canal ideal. Avaliando as capacidades dos canais seletivos em frequência, para as larguras de banda 5, 10 e 20 MHz, o aumento da distância entre os elementos do arranjo não influencia na melhora da capacidade condicionada quando se aumenta a largura de banda.

A Tabela 24 apresenta os valores das capacidades condicionadas faixa-estreita, faixa-larga e capacidade média para todos os ambientes medidos.

	FE	5 (MHz)	10 (MHz)	20 (MHz)	50 (MHz)	100 (MHz)	200 (MHz)	Cap. Média (bits/s/Hz)
CT1	17,98	18,06	18,20	18,30	18,50	19,16	19,30	20,22
CT2	17,95	17,99	18,15	18,25	18,36	19,10	19,31	20,09
CT3	17,85	17,94	18,03	18,39	18,85	19,35	19,35	20,21
CT4	17,50	17,62	17,75	17,87	18,42	18,89	19,18	19,86
CT5	18,06	18,12	18,39	18,67	19,03	19,49	19,65	20,32
CT6	18,26	18,35	18,57	18,70	19,34	19,68	19,75	20,44
CT7	18,20	18,30	18,43	18,78	19,34	19,66	19,68	20,39
LS1	14,40	14,43	14,47	14,58	14,74	15,55	15,78	16,92
LS2	15,31	15,31	15,40	15,54	15,85	16,14	16,67	17,28
LS3	16,22	16,29	16,30	16,53	16,94	17,31	17,74	18,57
LO1	16,13	16,16	16,24	16,31	16,79	17,32	17,71	18,93
LO2	18,03	18,14	18,34	18,49	18,72	19,04	19,44	20,35
CT2_1	14,52	14,83	14,92	15,20	15,69	15,85	15,94	17,10
CT2_2	14,96	15,24	15,35	15,60	15,90	16,04	16,10	17,67
CT2_3	14,12	14,43	14,54	14,80	15,26	15,57	15,75	16,83
CT2_4	11,23	11,51	11,72	11,97	12,36	12,45	12,57	14,03
CT2_5	11,68	11,76	11,89	12,13	12,13	12,69	12,86	13,36
LM2	9,92	10,11	10,18	10,15	10,16	10,36	10,36	11,60
LM3	12,26	12,90	13,16	13,22	13,40	13,43	13,55	14,58
LM4	17,70	17,93	18,11	18,29	18,50	19,04	19,17	19,66
LM5	17,78	18,19	18,30	18,55	18,80	18,78	19,43	20,04
BB1	17,42	17,48	17,63	17,88	18,26	18,65	18,93	19,70
BB2	17,32	17,43	17,60	17,80	18,14	18,59	19,06	19,60

	FE	5 (MHz)	10 (MHz)	20 (MHz)	50 (MHz)	100 (MHz)	200 (MHz)	Cap. Média (bits/s/Hz)
BB3	17,20	17,29	17,56	17,71	18,28	18,38	18,82	19,44
ID1	17,27	17,38	17,55	17,75	18,15	18,39	18,81	19,71
ID2	16,72	16,82	16,89	16,97	17,19	17,83	18,57	19,96
ID3	14,62	14,65	14,73	14,90	15,35	15,53	15,71	17,20
ID4	17,74	17,79	17,82	18,06	18,35	18,67	18,73	20,15
ID5	17,52	17,65	17,79	17,65	18,30	18,73	18,81	19,92

Tabela 24 - Capacidade condicionada faixa-estreita, faixa-larga e capacidade média para todos os ambientes medidos

7.2

Caracterização do Canal MIMO

Um sistema de medições com múltiplas antenas no transmissor e no receptor é ideal para se caracterizar o canal rádio móvel. Isto porque vários parâmetros do canal dos diferentes domínios podem ser obtidos. No sistema de medições adotado, mais especificamente, podem-se extrair parâmetros de dispersão temporal e espacial do canal. Assim, parâmetros como espalhamentos de retardos, retardo médio, banda de coerência, número de multipercursos válidos, espalhamento angular e os perfis de potência de cada domínio podem ser extraídos.

Conforme citado anteriormente, uma grande quantidade de medidas em diferentes ambientes foi realizada. Assim, com o objetivo de ser prático, apenas alguns pontos de alguns ambientes foram escolhidos para serem apresentados. A Figura 110 apresenta o grid de 36 pontos adotado para a realização das medidas. A coluna circulada apresenta os pontos escolhidos para serem apresentados a seguir. Porém, em alguns casos, apenas alguns pontos da coluna circulada foram escolhidos para serem representados.

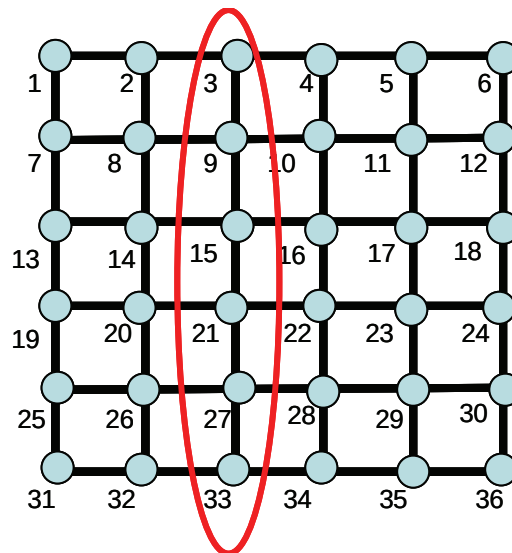


Figura 110 - Pontos escolhidos para representarem os resultados

- **Perfil de Potência de retardos**

As Figuras de 111 a 124 apresentam os perfis de potência de retardos de alguns ambientes medidos. Nestas figuras são apresentados seis perfis de potência de retardos do grid de 36 pontos definido na Figura 110.

Os círculos nas Figuras de 111 a 124 representam os valores de retardos estimados pelo algoritmo SAGE explicado no Capítulo 5. É bom lembrar que apenas raios com 30 dB abaixo da potência do raio mais forte foram estimados. Para comprovarmos a eficiência do algoritmo SAGE para a estimação dos parâmetros, o perfil de potência de retardos obtido da transformada de Fourier da função de transferência foi calculado (linha contínua). É importante lembrar que esses perfis de potência de retardos foram obtidos através da média espacial (posição dos transmissores e receptores no arranjo) do módulo ao quadrado da resposta impulsiva.

Pode ser observado através das figuras que o casamento entre os valores estimados e o valor obtido da transformada de Fourier é considerável. Porém, analisando os perfis com mais detalhe, pode ser visto também que os multipercursos estimados pelo algoritmo SAGE nem sempre se ajustam aos picos obtidos pela transformada de Fourier. Isto pode ser justificado pelas seguintes desvantagens da técnica de transformada de Fourier:

- A resolução da técnica de transformada de Fourier é determinada pela banda de transmissão. Esta resolução melhora proporcionalmente à

largura de banda, ou seja, quanto maior a banda, melhor é a resolução. No nosso caso específico, uma banda de 200 MHz foi utilizada proporcionando uma resolução no domínio dos retardos de 5 ns.

- A transformada discreta de Fourier pode somente reproduzir as componentes que estão localizados no grid de amostras. As componentes intermediárias são aproximadas pelas amostras vizinhas que pertencem ao grid.
- Quando se utiliza a transformada de Fourier, geralmente os dados são multiplicados por uma função janela apropriada para a redução dos níveis dos lóbulos laterais. Com isto, a resolução é piorada. Para gerarmos os perfis de potência de retardos, a *janela de Black Harris de 4 termos* foi utilizada. Com essa janela, a resolução piora de 4ns, ou seja, a resolução no domínio dos retardos passou para 9 ns.

Analizando as Figuras 111 a 124, pode ser observado que todos os perfis de potência de retardos seguem aproximadamente um decaimento exponencial. Pode se também observar a variação do perfil de potência de retardos com a distância em cada ambiente medido, ou seja, apenas alguns comprimentos de onda são suficientes para a modificação do perfil de potência de retardos. As Figuras 111, 115, 116, 117 e 119 apresentam exemplos dessa grande variação dos perfis de potência de retardos. Nos ambientes com visada e visada parcial, essa variação foi pouca acentuada.

A largura dos perfis de potência de retardos para os ambientes sem visada variou de 100 a 300 ns e de 50 a 75 ns, para a situação com visada e visada parcial. Isto indica uma maior inclinação nos perfis de potência de retardo para as situações com visada e visada parcial, se comparadas com as situações sem visada.

As Figuras 117 e 118 apresentam os perfis de potência de retardos do ambiente CETUC2, onde grandes placas metálicas foram adicionadas. Nestes perfis podem ser vistos picos bem destacados e, em alguns casos, até dois picos bem distintos e com a mesma potência. Esses picos são resultados da adição dessas placas de metais no ambiente.

A Figura 119 apresenta o perfil de potência de retardos medido no corredor do Leme e mostra dois picos bem distintos (raio direto 47 metros do transmissor e um raio refletido no armário localizado a 67 metros do transmissor).

Pode se observar em alguns perfis de retardo que alguns multipercursos estimados estão sobrepondo um sobre o outro. Analisando apenas o domínio dos retardos, poderíamos afirmar que estes raios fariam parte do mesmo cluster. Porém, será mostrado mais tarde que, analisando apenas mais um domínio diferente, esta afirmação nem sempre será verdade.

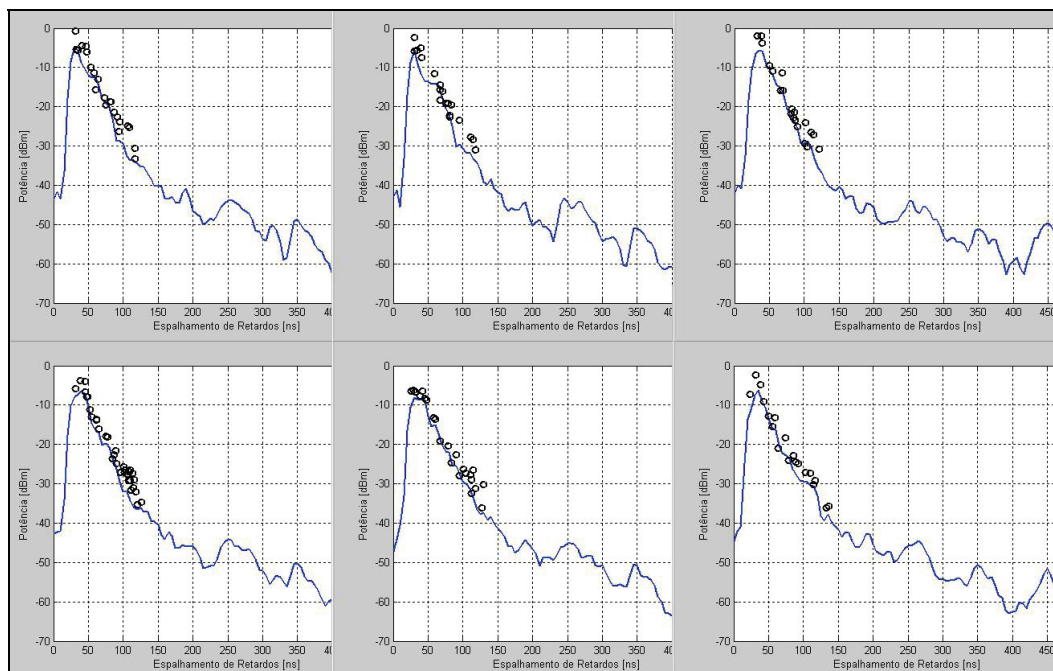


Figura 111 - Perfil de potência de retardos para o ambiente CT1

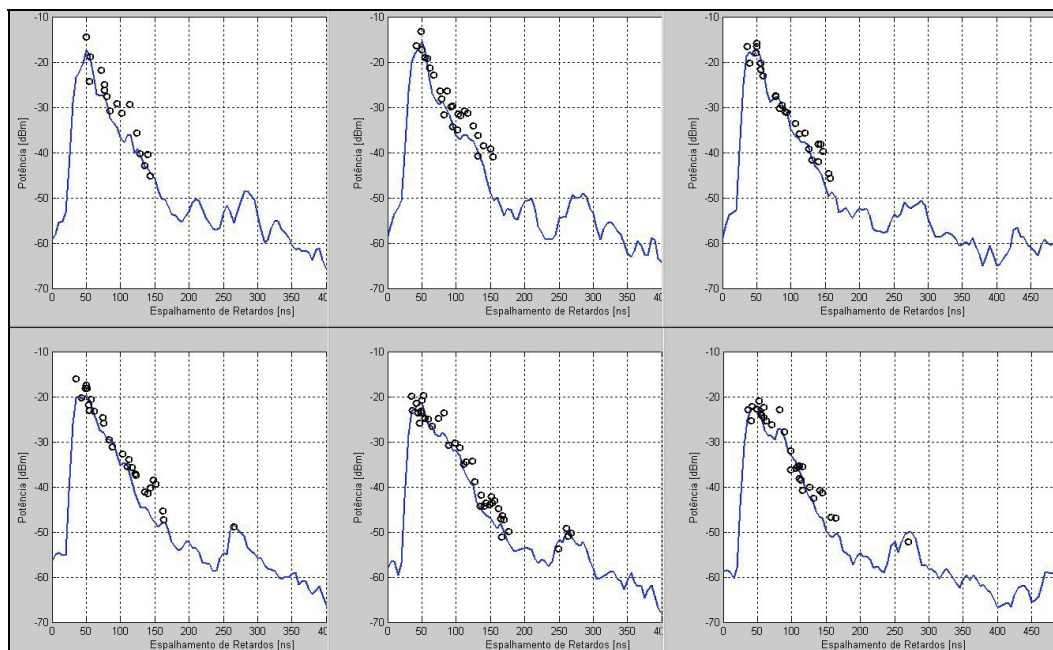


Figura 112 - Perfil de potência de retardos para o ambiente CT5

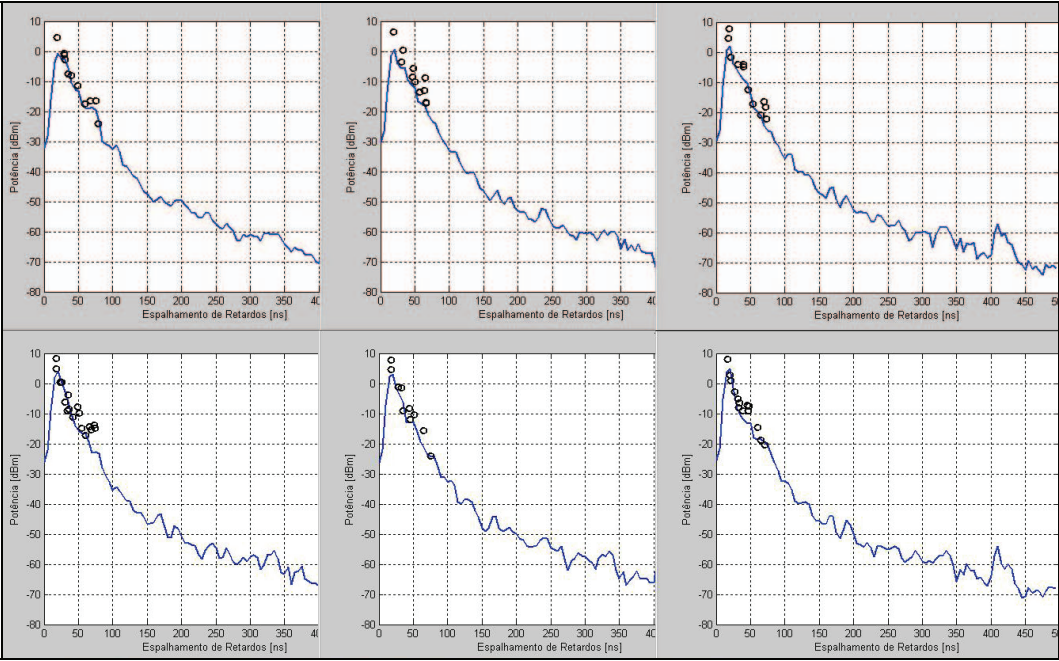


Figura 113 - Perfil de potência de retardos para o ambiente LS1

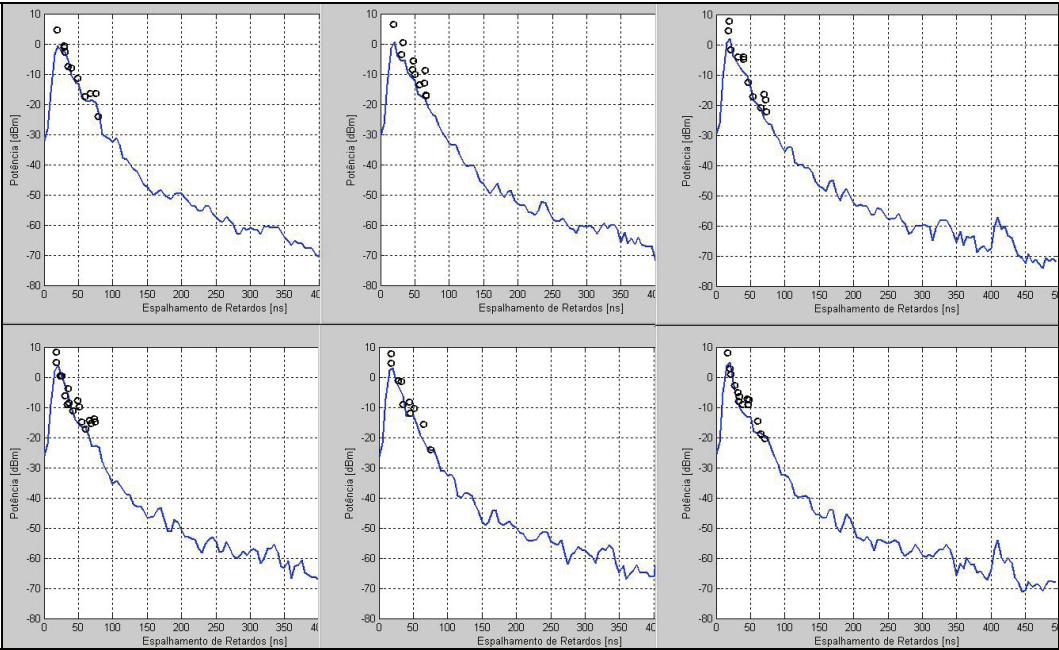


Figura 114 - Perfil de potência de retardos para o ambiente LS2

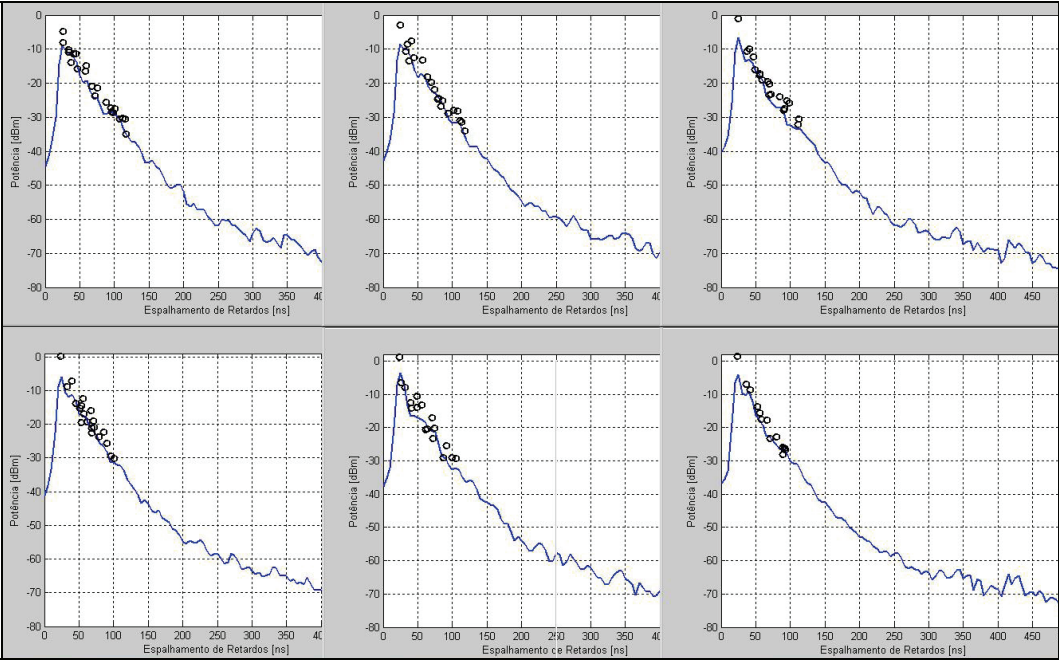


Figura 115 - Perfil de potência de retardos para o ambiente LO1

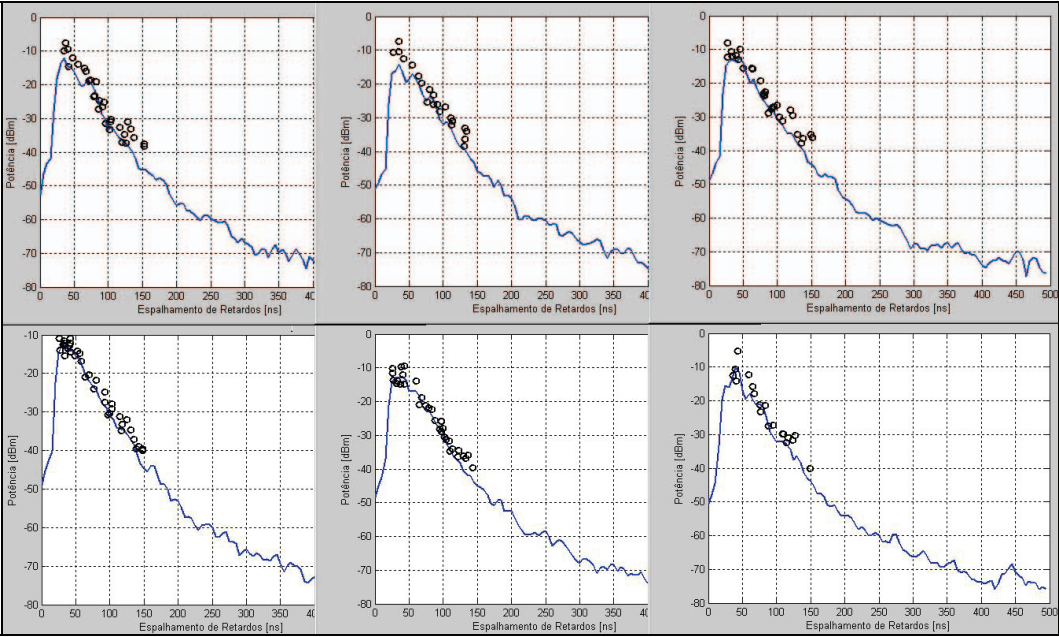


Figura 116 - Perfil de potência de retardos para o ambiente LO2

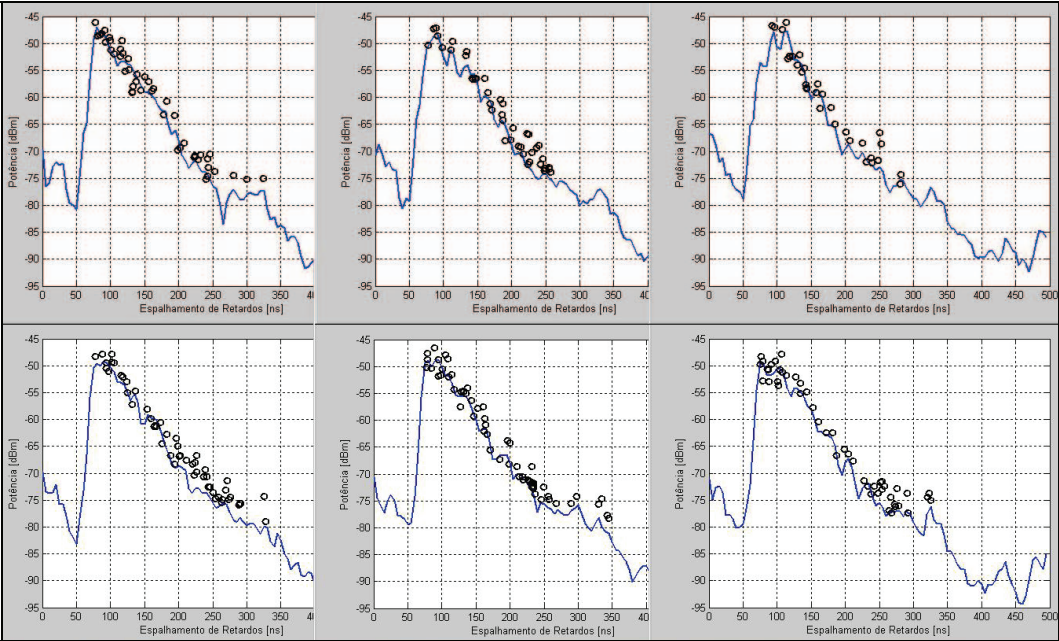


Figura 117 - Perfil de potência de retardos para o ambiente CT2_2

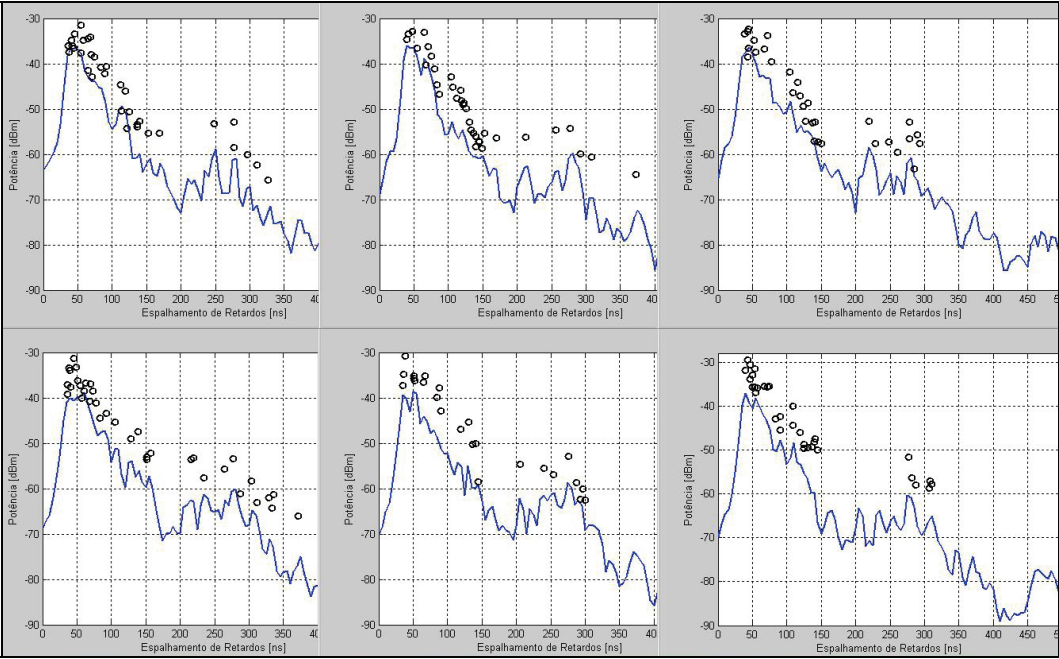


Figura 118 - Perfil de potência de retardos para o ambiente CT2_5

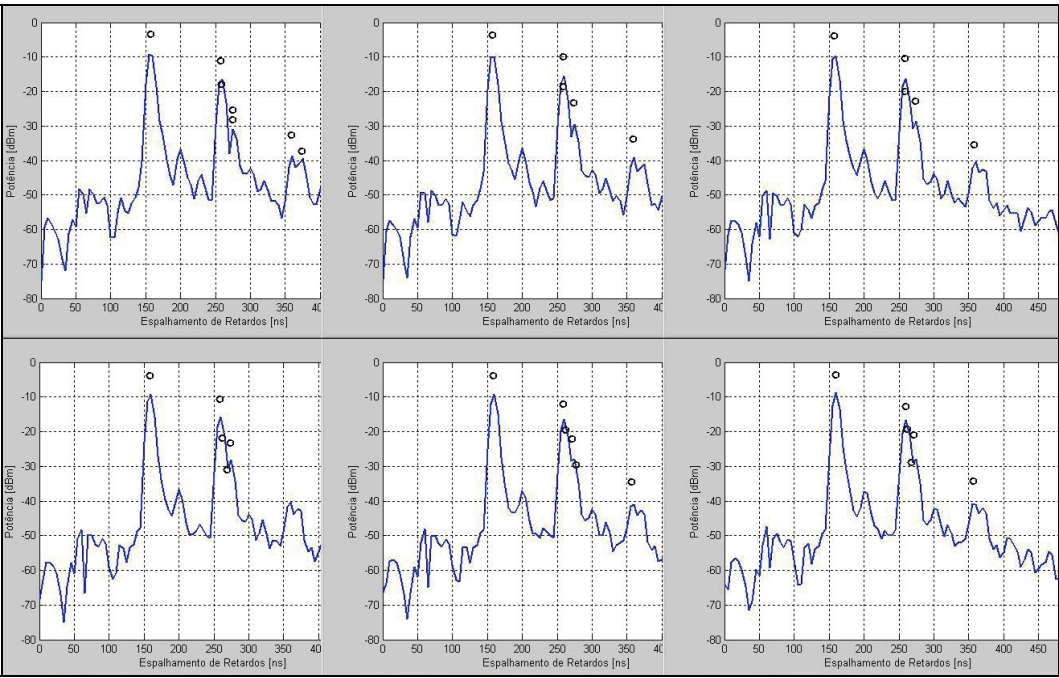


Figura 119 - Perfil de potência de retardos para o ambiente LM2

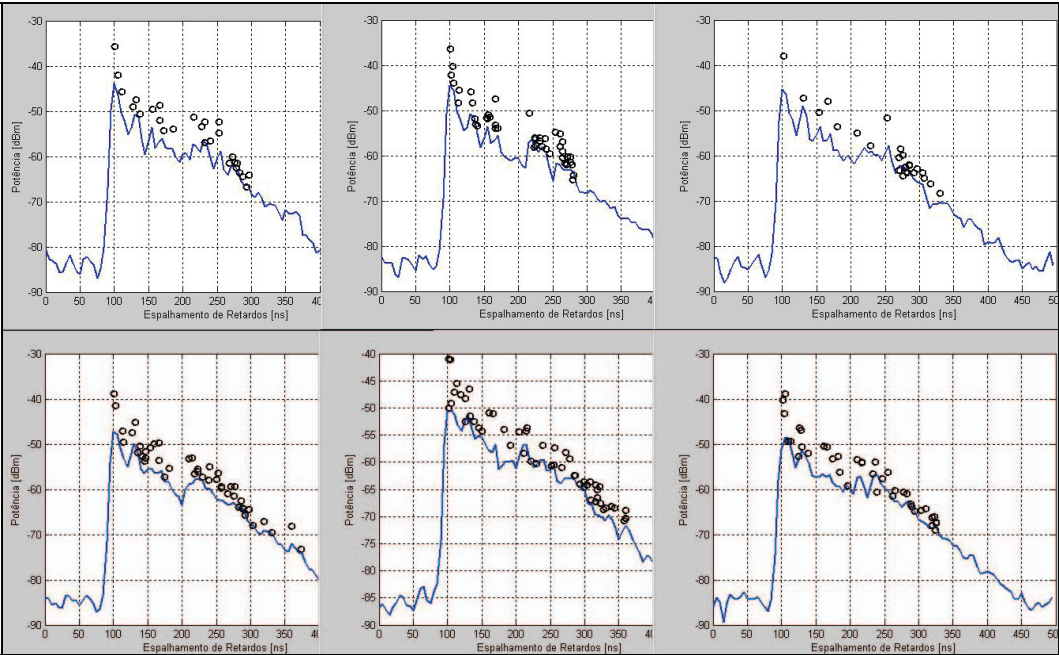


Figura 120 - Perfil de potência de retardos para o ambiente LM5

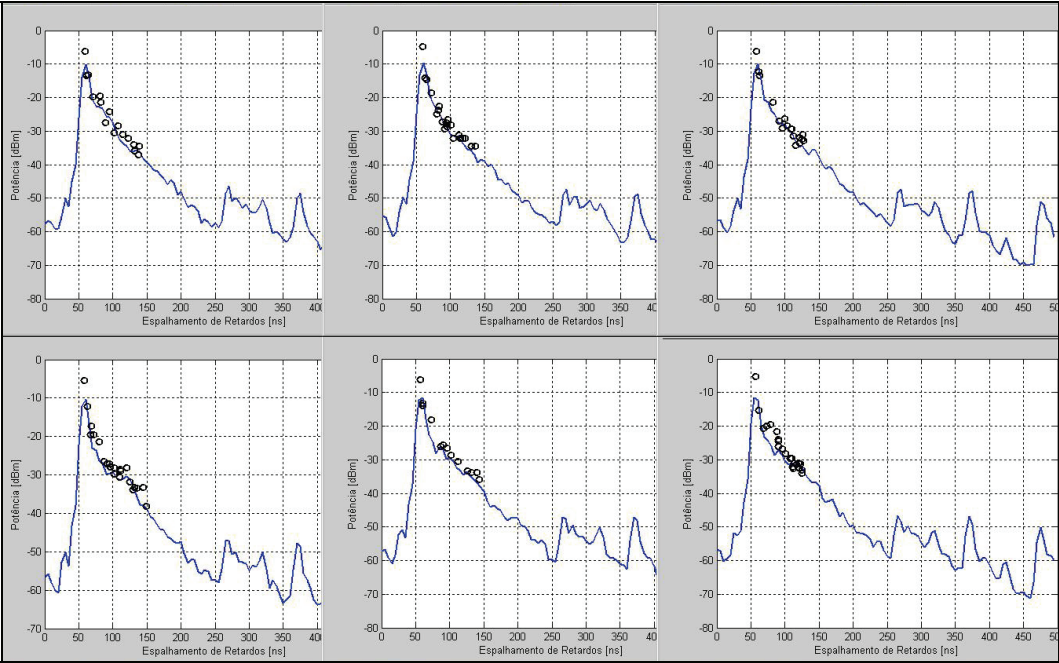


Figura 121 - Perfil de potência de retardos para o ambiente BB1

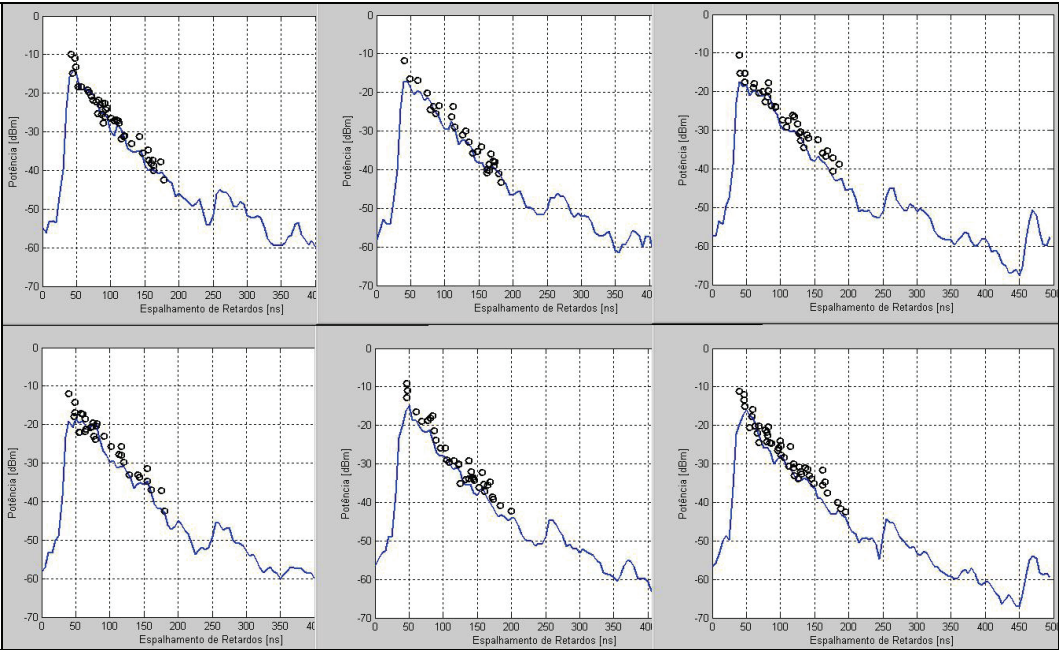


Figura 122 - Perfil de potência de retardos para o ambiente BB3

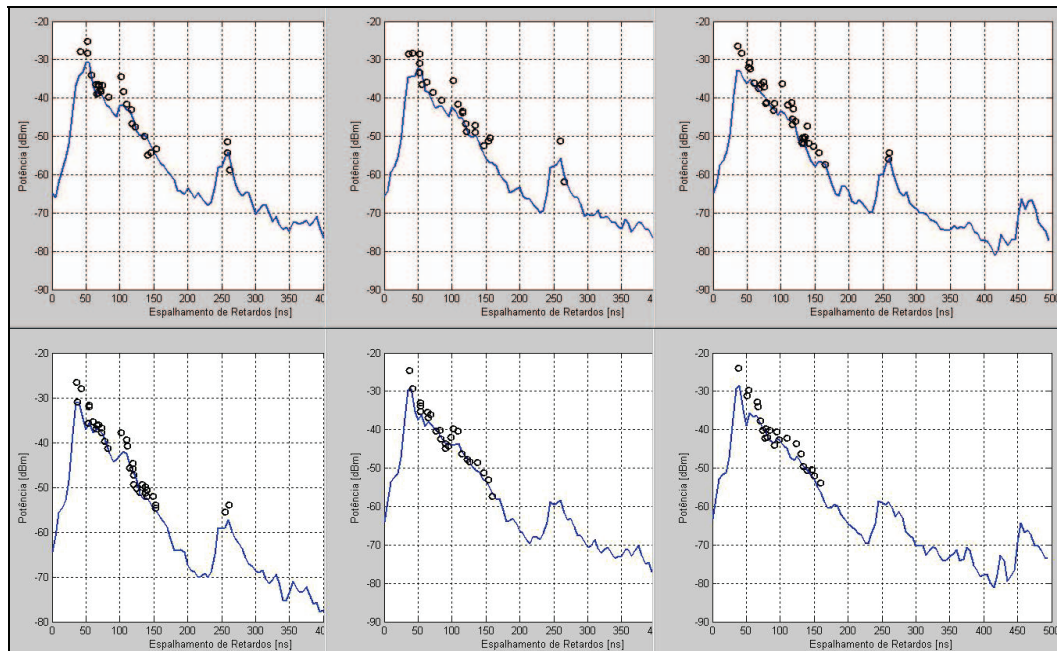


Figura 123 - Perfil de potência de retardos para o ambiente ID2

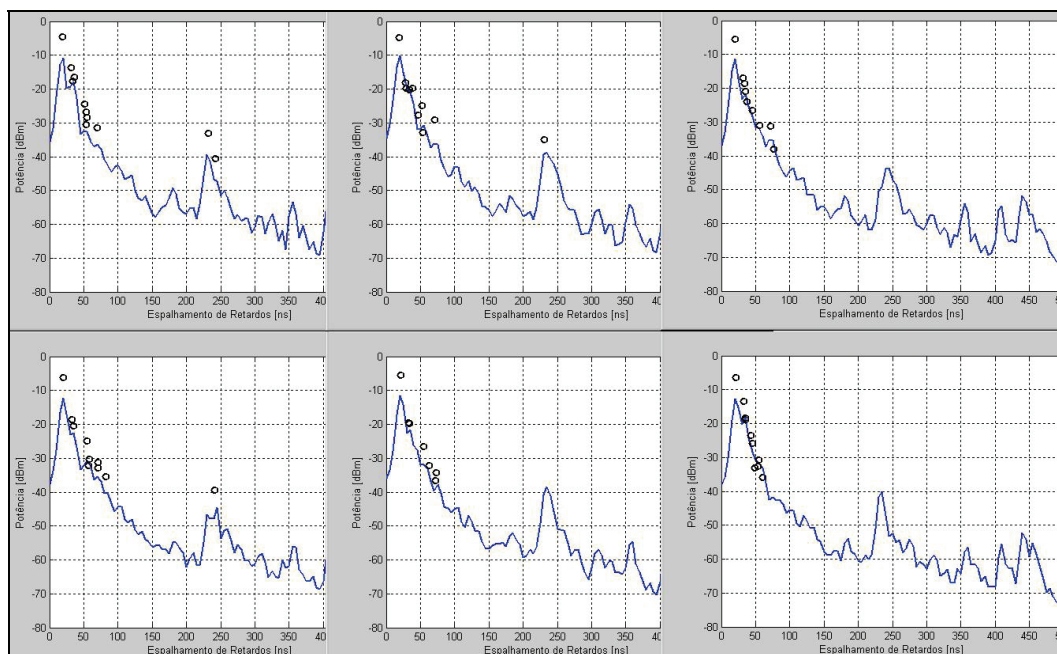


Figura 124 - Perfil de potência de retardos para o ambiente ID3

- **Número efetivo de multipercurso**

A Figura 125 apresenta a cumulativa do número de multipercursos de alguns ambientes medidos. Para os ambientes com visada e visada parcial, o número de multipercursos variou aproximadamente de 5 a 13 para o valor da

cumulativa de 0,5. Para o ambiente sem visada, o número de multipercursos aproximadamente de 18 a 46 para o valor da cumulativa de 0,5.

O número de multipercursos que podem ser esperados em um certo ambiente é muito importante para a modelagem dos sistemas MIMO. O número de multipercursos deve exceder o número de elementos do arranjo para que a capacidade do canal MIMO cresça linearmente com o mínimo de elementos entre o transmissor e o receptor. Aumentar o número de elementos além do número de espalhadores ou componentes de multipercurso do canal resulta na saturação da capacidade do canal MIMO. Conseqüentemente, o número máximo de multipercursos resolvidos constitui um limite inferior para o aumento da capacidade. Analisando apenas a Figura 125 todos ambientes estão acima do limite inferior.

Assim, para uma análise mais precisa da influência deste parâmetro na capacidade do canal, uma técnica de alta resolução para a extração dos parâmetros do canal, como o SAGE, é necessária. O número de multipercursos estimados para cada ambiente medido poderia ser diferente dos valores apresentados na Figura 125, já que foi limitada a extração dos multipercursos a um valor de 30 dB abaixo da potência do sinal mais forte. Porém, a influência desses novos multipercursos seria praticamente desprezível.

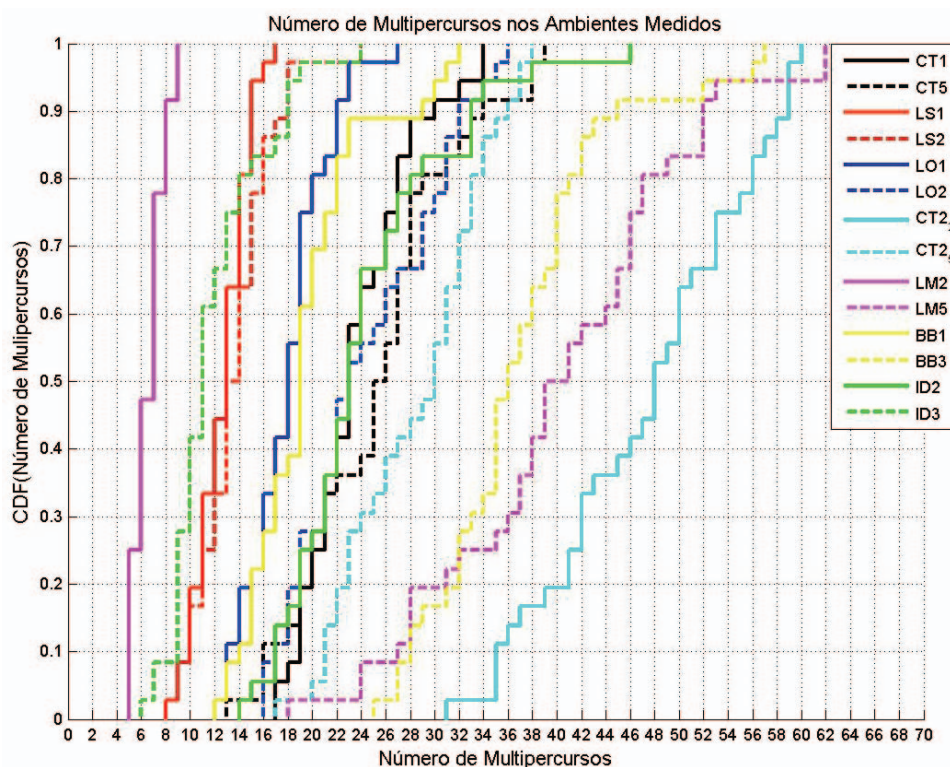


Figura 125 - Número de multipercursos nos ambientes medidos

Determinar apenas o número de multipercursos do canal não permite afirmar se esses multipercursos estão realmente contribuindo para a capacidade do canal. É necessário determinar o número efetivo de multipercursos que contribuem acima de 90% da potência do total dos multipercursos estimados. As Figuras 126 a 139 apresentam a porcentagem de contribuição de cada multipercurso para alguns pontos do grid e também o número de multipercursos efetivos para todos os pontos do grid para alguns ambientes medidos.

Para todos os pontos do grid nos ambientes CT1 e CT5, o número efetivo de multipercursos foi acima de quatro. Porém, analisando com mais detalhe o gráfico de porcentagem de contribuição de cada multipercurso, no ambiente CT5 a energia está mais distribuída entre os multipercursos. Observando os gráficos dos dois ambientes, vimos que quando o número efetivo de multipercursos é pequeno, tem-se uma maior concentração de energia em apenas alguns multipercursos, e que se o número efetivo de multipercurso for grande, então tem-se uma melhor distribuição da energia entre os multipercursos. Para o ambiente CT1, o ponto 3 tem um número efetivo de multipercurso de nove e os quatros primeiros raios carregam 31, 23, 18 e 5% da energia total; já o ponto P9 tem um número efetivo de multipercurso de cinco e os quatros primeiros raios carregam 46, 31, 5 e 5% da energia total. Para o ambiente CT5, o ponto P27 tem o número efetivo de multipercurso de treze e os quatro primeiros raios carregam 13, 11, 9 e 7% da energia total; já para o ponto P3, tem se um número efetivo de multipercurso de seis e os quatros primeiros raios carregam 50, 20, 5 e 4% da energia total.

Para os ambientes LS1 e LS2, existe uma grande quantidade de número efetivo de multipercursos menor ou igual a quatro. Assim, tem se a concentração da energia em apenas alguns multipercursos como pode ser visto no gráfico da porcentagem de contribuição de cada multipercurso.

Para o ambiente LO1, existem vários pontos do grid com números efetivos de multipercursos menores ou iguais a quatro, o que indica a concentração da energia em apenas alguns multipercursos. Porém, pode-se observar que, para o ambiente LO2, a energia está mais distribuída entre os multipercursos indicando um maior número efetivo de multipercurso.

Para os ambientes CT2_2 e CT2_5, tem se um grande número de multipercursos efetivos, indicando que a energia está bem distribuída entre vários multipercursos.

Para o ambiente LM2, a maioria dos números efetivos de multipercursos foi de dois e o gráfico de porcentagem de contribuição de cada multipercurso apenas confirma isso. Para o ambiente LM5 predomina um número efetivo de multipercurso pequeno, porém maior que quatro, o que indica uma concentração de energia em apenas alguns multipercursos.

Para o ambiente BB1, existe uma grande quantidade de pontos no grid com números efetivos de multipercursos menores ou iguais a quatro, indicando uma grande concentração de energia em apenas alguns multipercursos. Para o ambiente BB3, predomina-se o espalhamento da energia já que o número efetivo de multipercurso é grande para a maioria dos pontos do grid.

Para o ambiente ID3 predomina o espalhamento da energia e para o ambiente ID2 a concentração da energia.

De forma geral, pode-se observar através das Figuras 126 a 139 que o número efetivo de multipercursos grande implica no espalhamento da energia em vários multipercursos e que o número efetivo de multipercursos pequeno implica na concentração da energia em apenas alguns multipercursos. Analisando os gráficos, foi possível determinar que o número efetivo de multipercursos menor que seis implica na concentração da energia em apenas alguns multipercursos e que para valores maiores do que seis a energia é espalhada entre vários multipercursos.

A Tabela 25 apresenta os valores da capacidade condicionada 10% para um canal MIMO faixa-estreita, da capacidade média, do número médio de multipercursos e do número efetivo de multipercursos (NEM) médio para alguns ambientes medidos.

Em todos os ambientes apresentados nesta tabela, o número de multipercurso médio estimado excedeu o valor do número de elementos. Porém, a primeira conclusão importante que se tira é que nem sempre uma grande quantidade de multipercurso equivale a ter uma grande capacidade. Nesta tabela existem vários exemplos que comprovam esta conclusão (compare número de multipercurso médio e as capacidades obtidas para os ambientes CT2_2 e LO2).

Analisando o número efetivo de multipercursos médio, é comprovado que na maioria dos casos em que o número efetivo de multipercursos é menor do que seis, existe maior concentração da energia em apenas alguns multipercursos, o que reduz a capacidade condicionada e a média. Para valores maiores do que seis, há

um maior espalhamento da energia entre os multipercursos, o que aumenta a capacidade.

Pode-se observar através da Tabela 25 que o número efetivo de multipercursos indica algumas características do canal e sua influência na capacidade. Porém, ele também indica que outros parâmetros do canal devem ser avaliados (veja os valores obtidos para o ambiente CETUC 2).

	FE	Cap. Média (MHz)	NM-médio	NEM-médio
CT1	17,98	20,22	24	8
CT2	17,95	20,09	23	7
CT3	17,85	20,21	25	8
CT4	17,50	19,86	22	7
CT5	18,06	20,32	25	9
CT6	18,26	20,44	35	12
CT7	18,20	20,39	35	12
LS1	14,40	16,92	13	4
LS2	15,31	17,28	17	6
LS3	16,22	18,57	25	6
LO1	16,13	18,93	18	5
LO2	18,03	20,35	24	9
CT2_1	14,52	17,10	49	16
CT2_2	14,96	17,67	47	14
CT2_3	14,12	16,83	48	15
CT2_4	11,23	14,03	29	12
CT2_5	11,68	13,36	29	10
LM2	9,92	11,60	7	2
LM3	12,26	14,58	10	3
LM4	17,70	19,66	31	11
LM5	17,78	20,04	40	13
BB1	17,42	19,70	19	7
BB2	17,32	19,60	34	11
BB3	17,20	19,44	37	13
ID1	17,27	19,71	20	7
ID2	16,72	19,96	24	8
ID3	14,62	17,20	12	3
ID4	17,74	20,15	23	8
ID5	17,52	19,92	20	7

Tabela 25 - Capacidade condicionada faixa-estreita, capacidade média, número de multipercursos médio e número de multipercurso efetivo médio

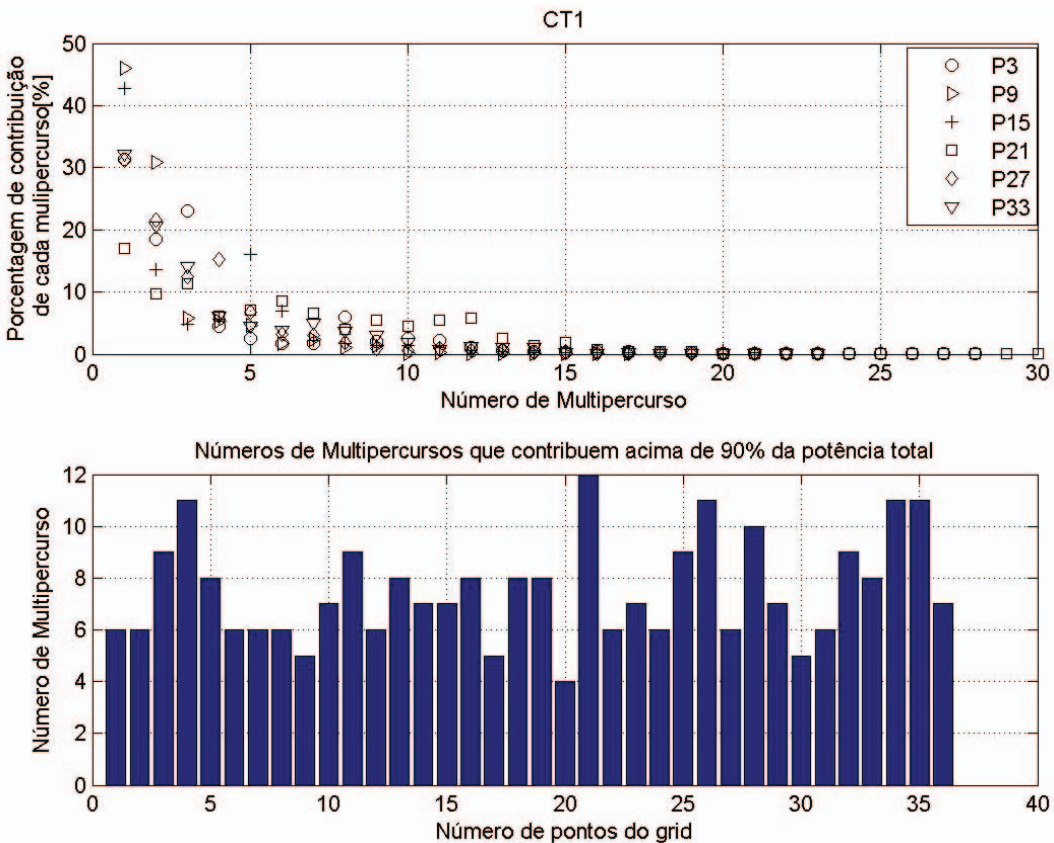


Figura 126 - Número efetivo de multipercursos no CT1

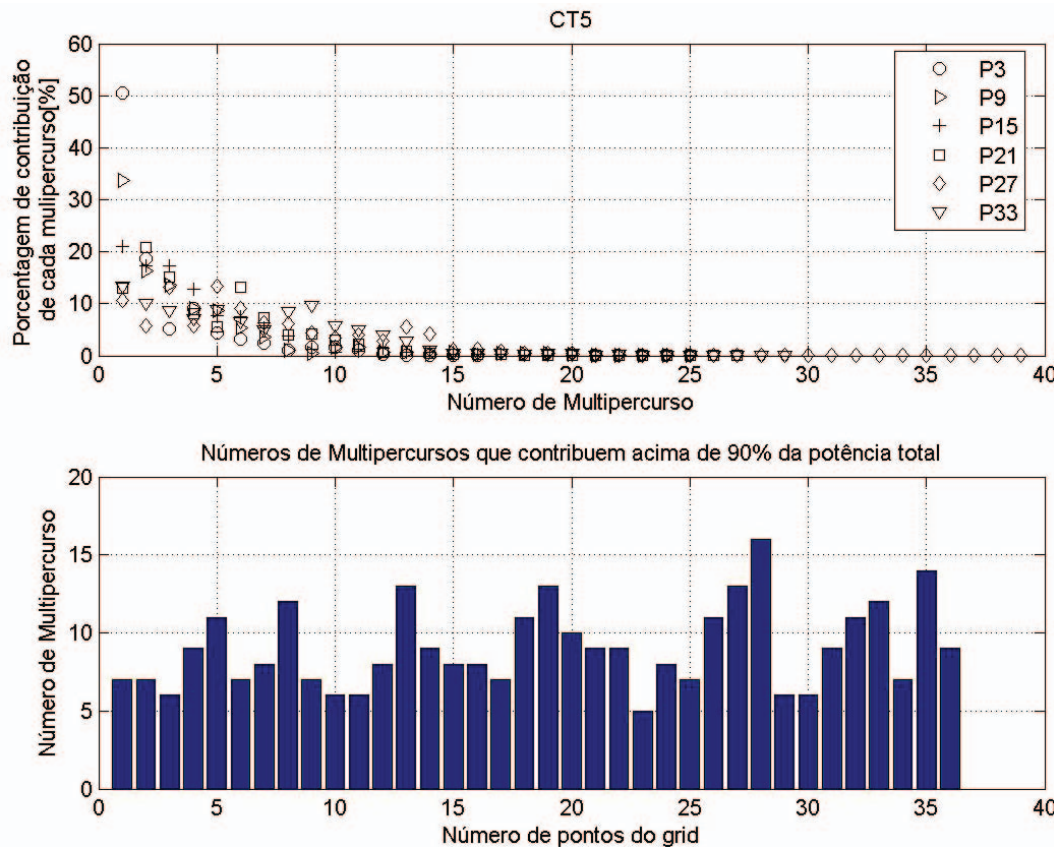


Figura 127 - Número efetivo de multipercursos no CT5

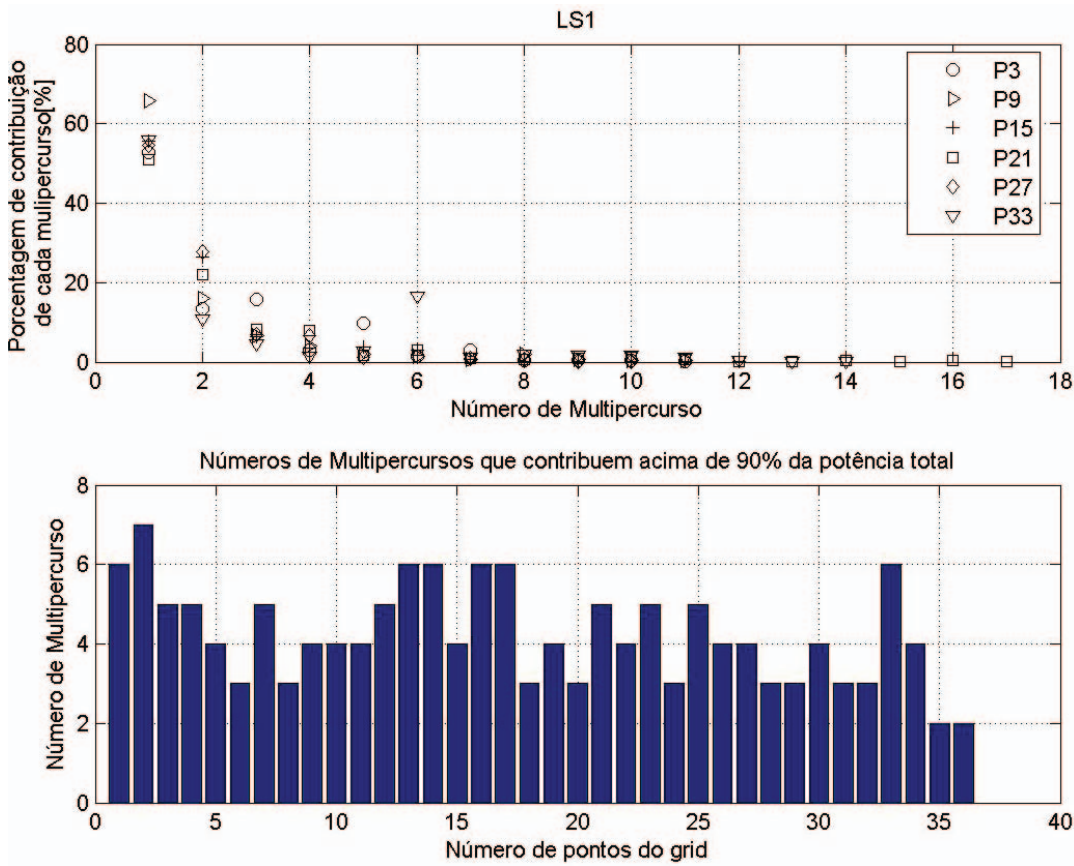


Figura 128 - Número efetivo de multipercursos no LS1

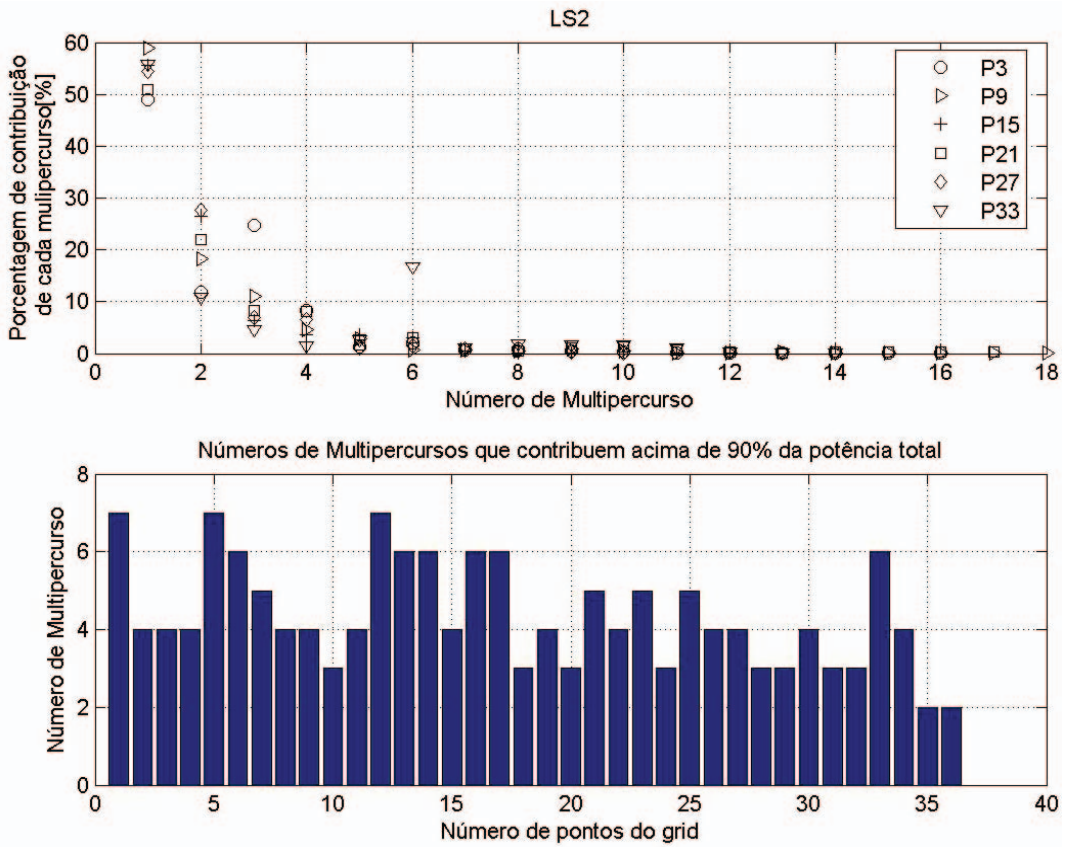


Figura 129 - Número efetivo de multipercursos no LS2

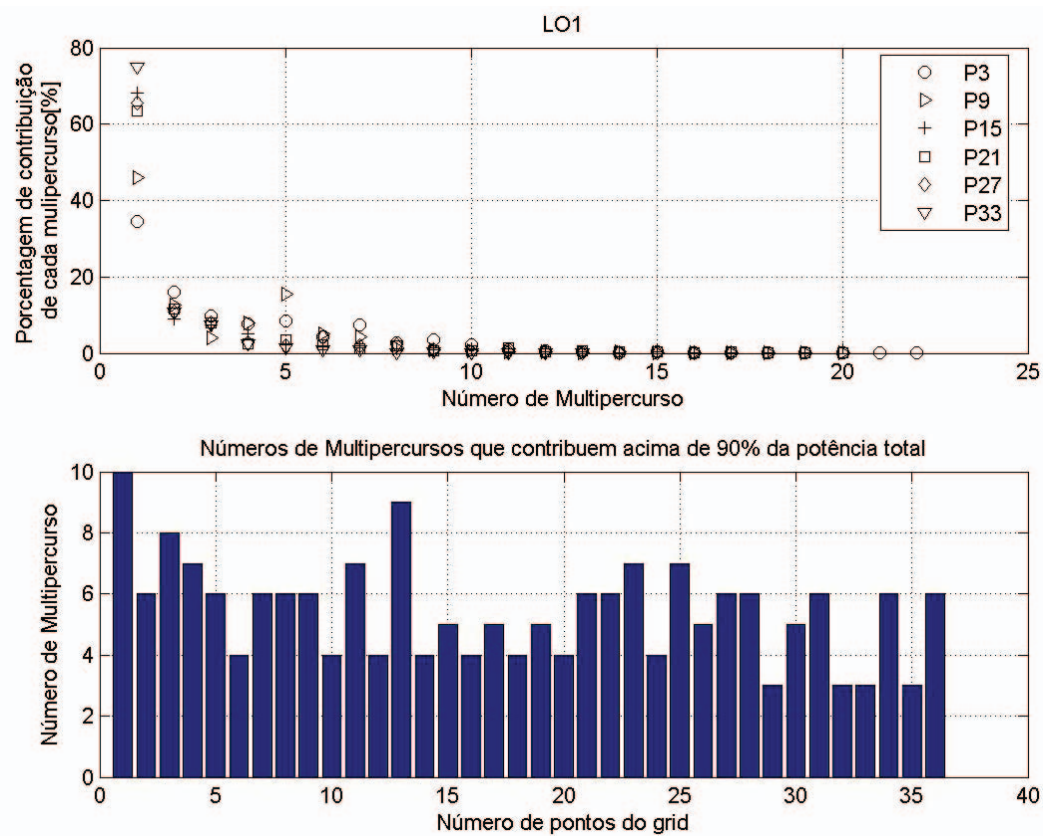


Figura 130 - Número efetivo de multipercursos no LO1

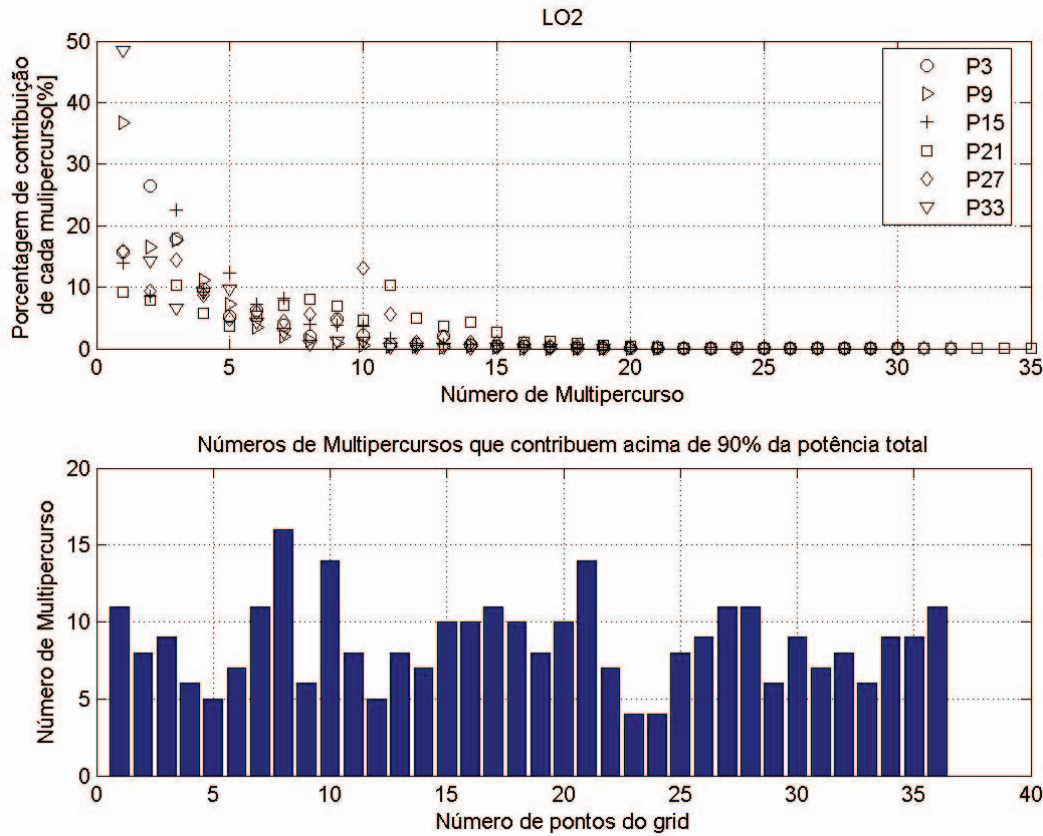


Figura 131 - Número efetivo de multipercursos no LO2

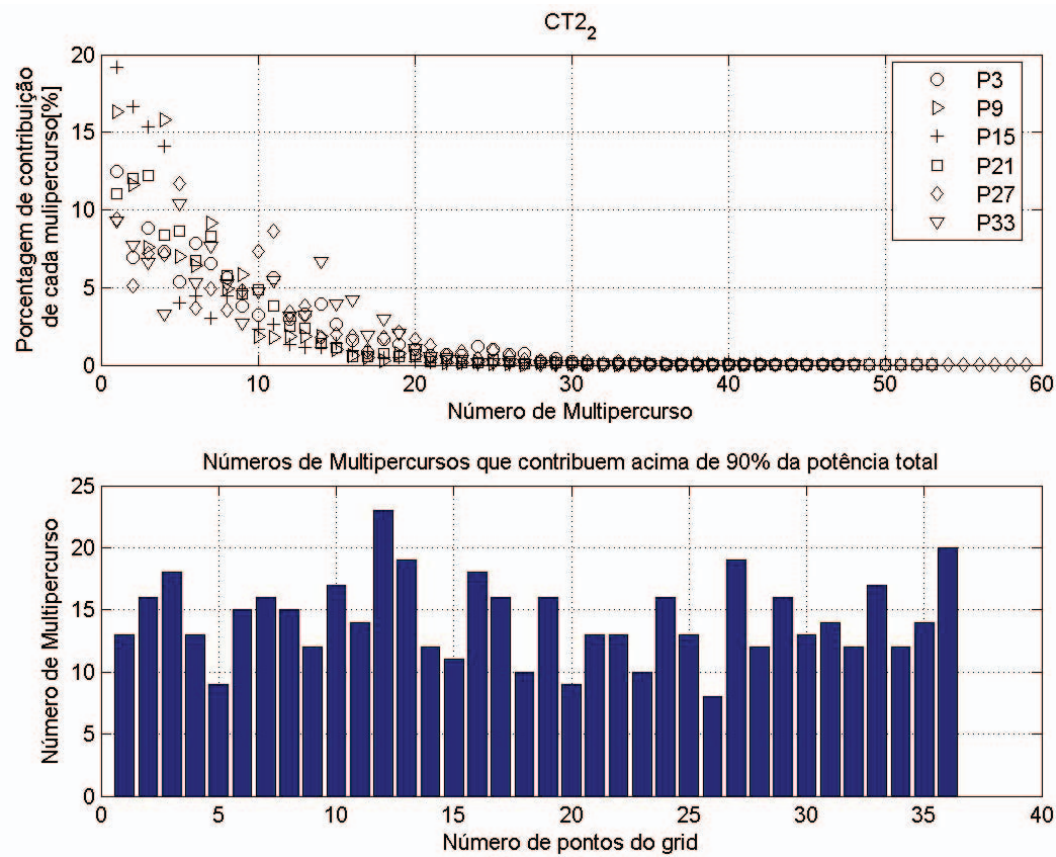


Figura 132 - Número efetivo de multipercursos no CT2_2

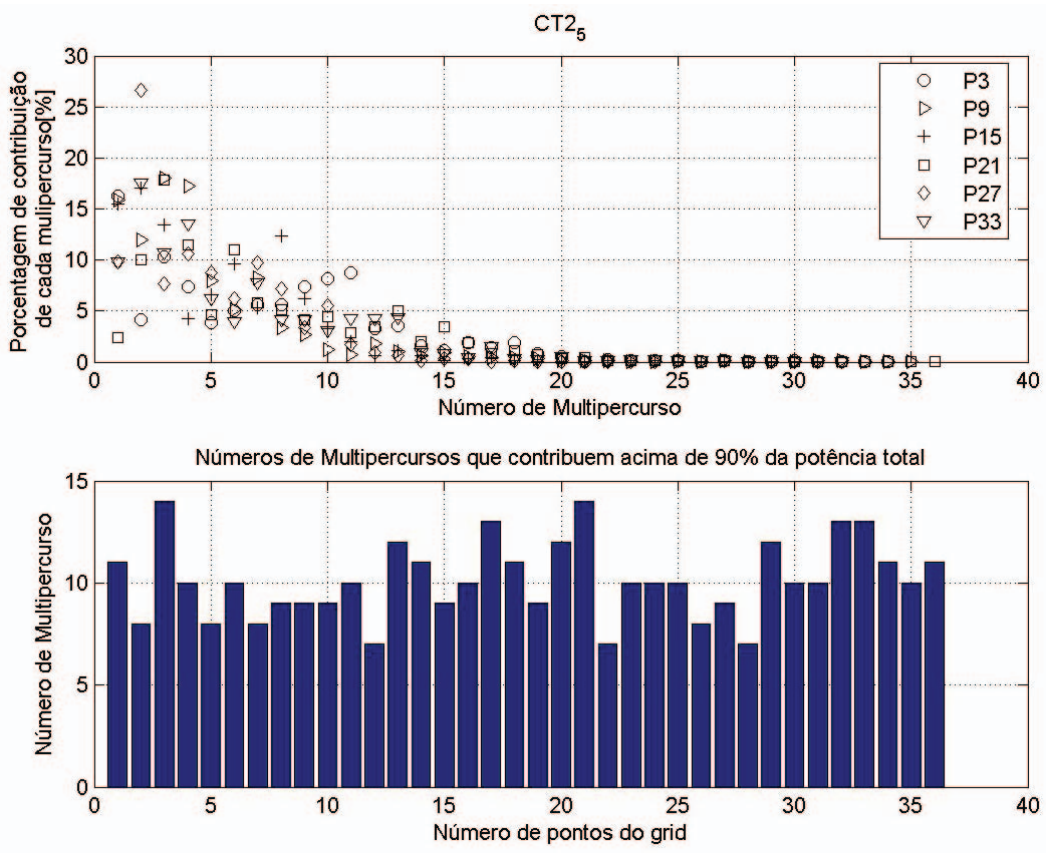


Figura 133 - Número efetivo de multipercursos no CT2_5

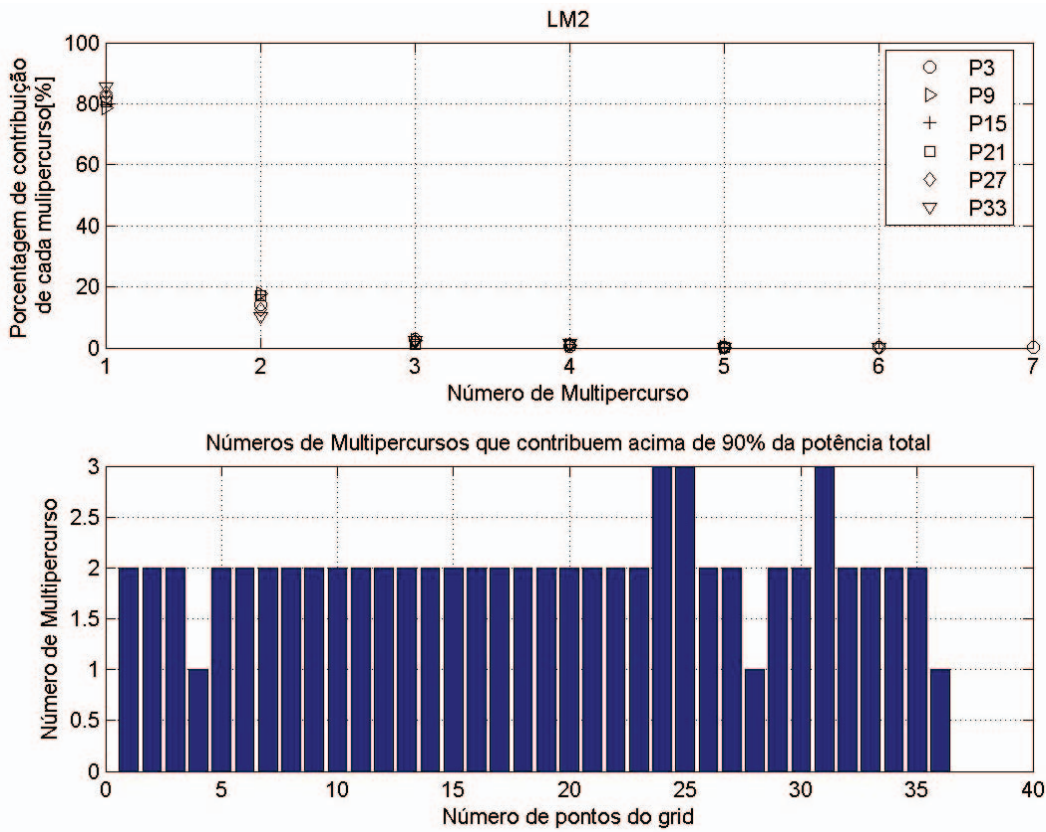


Figura 134 - Número efetivo de multipercursos no LM2

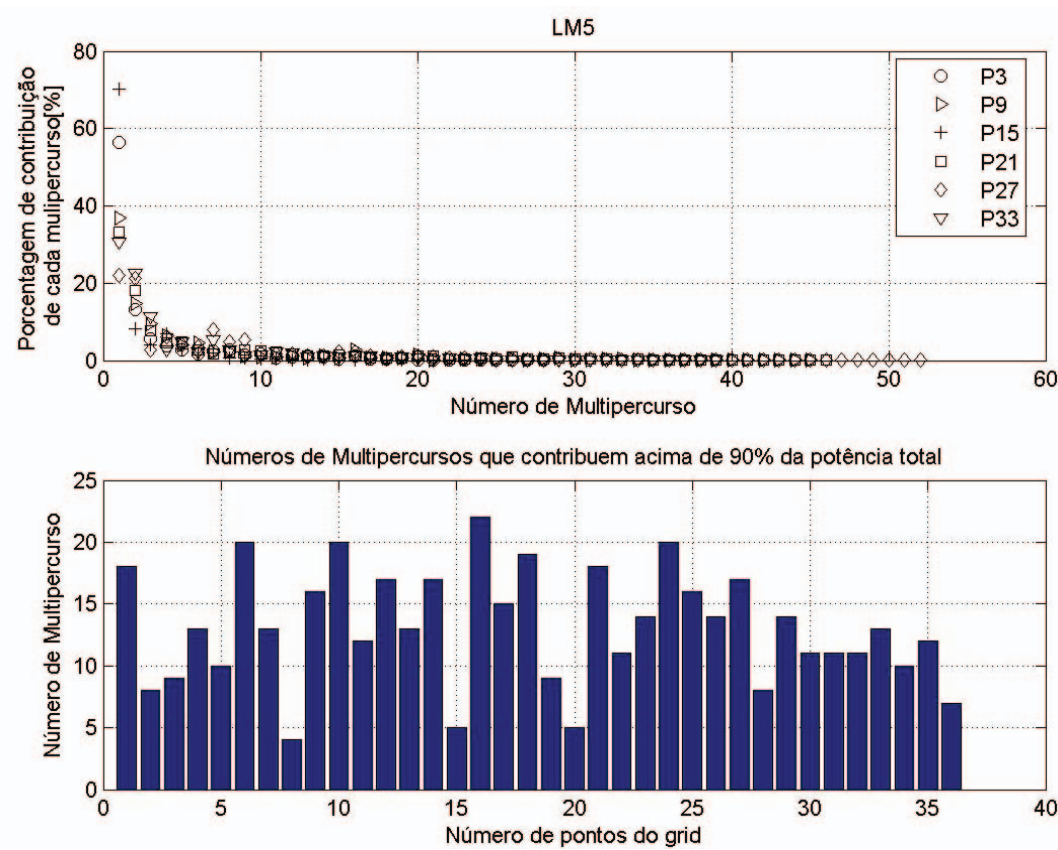


Figura 135 - Número efetivo de multipercursos no LM5

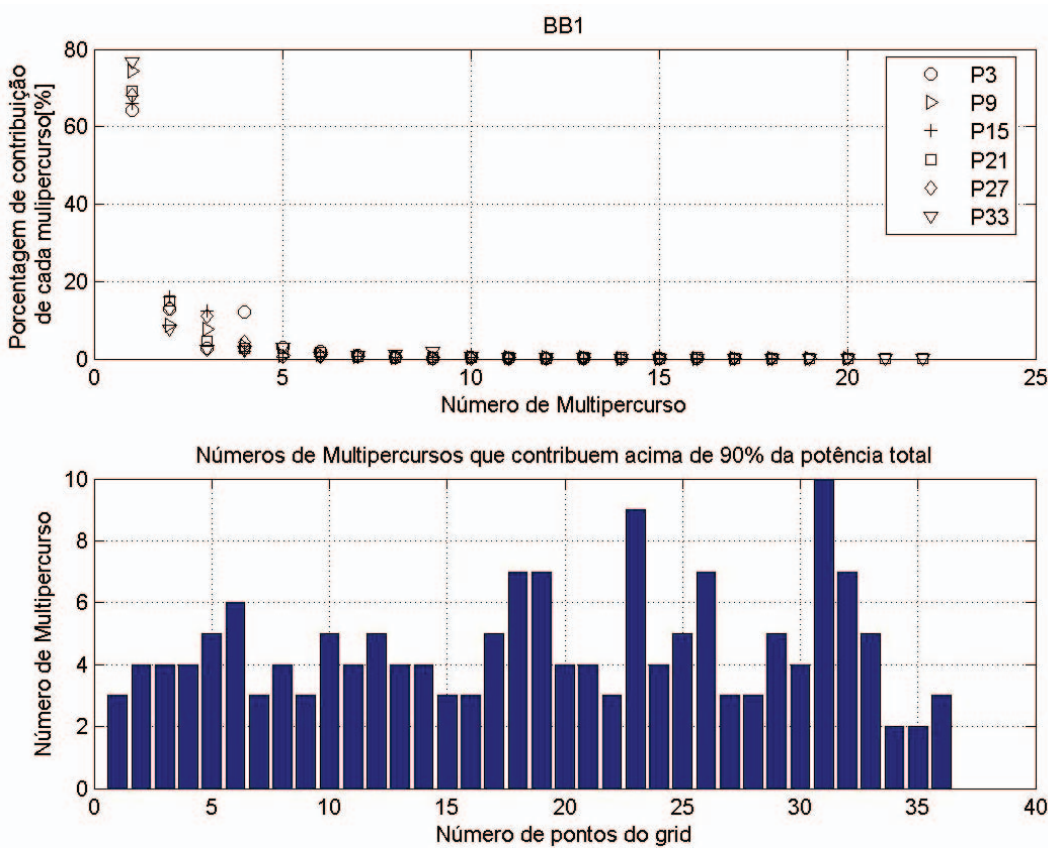


Figura 136 - Número efetivo de multipercursos no BB1

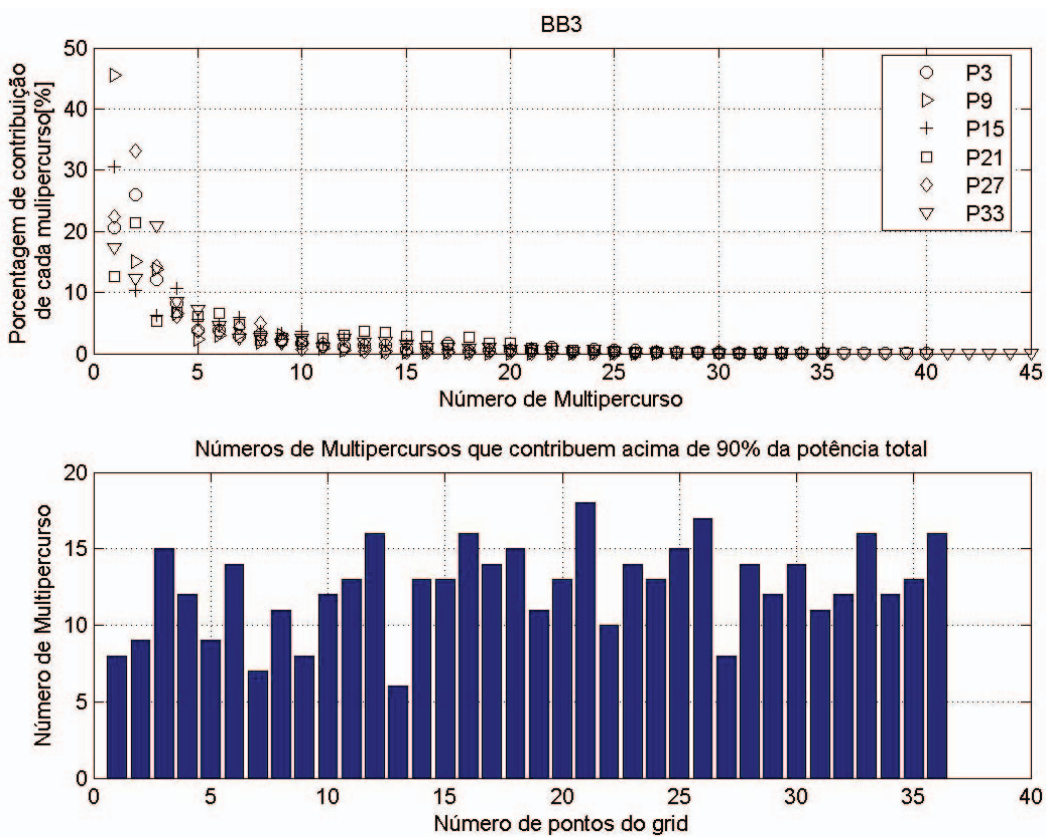


Figura 137 - Número efetivo de multipercursos no BB3

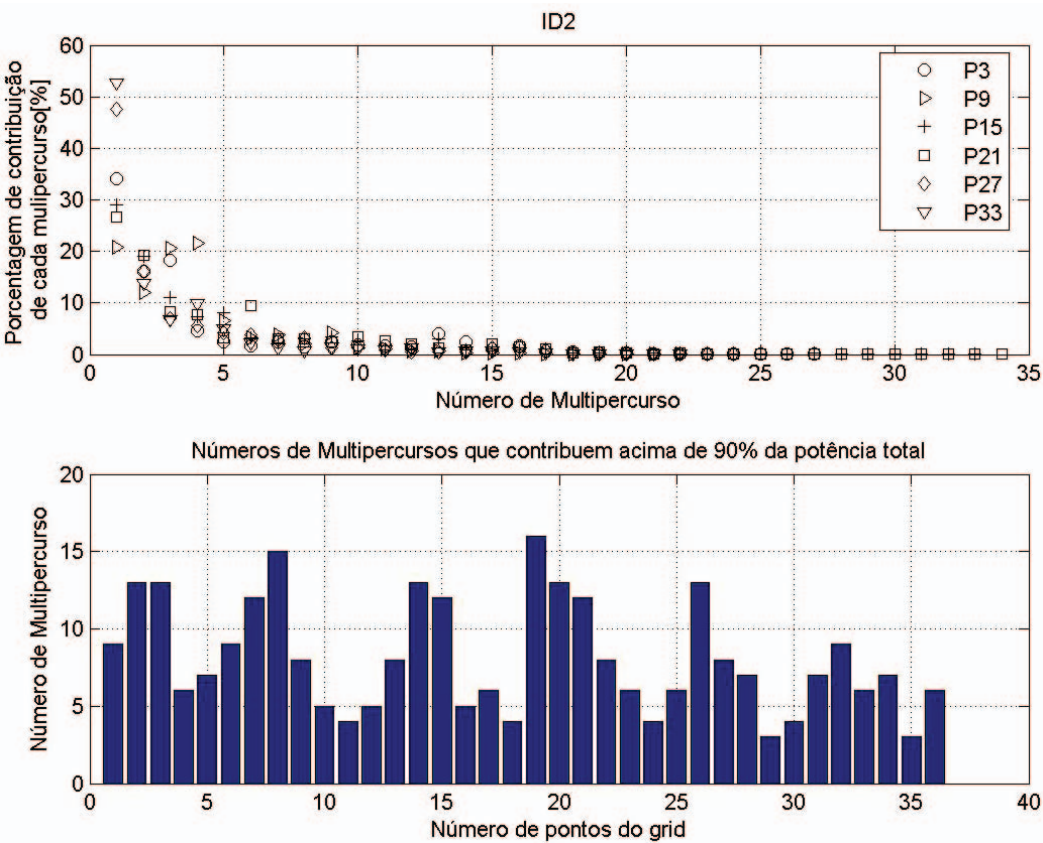


Figura 138 - Número efetivo de multipercursos no ID2

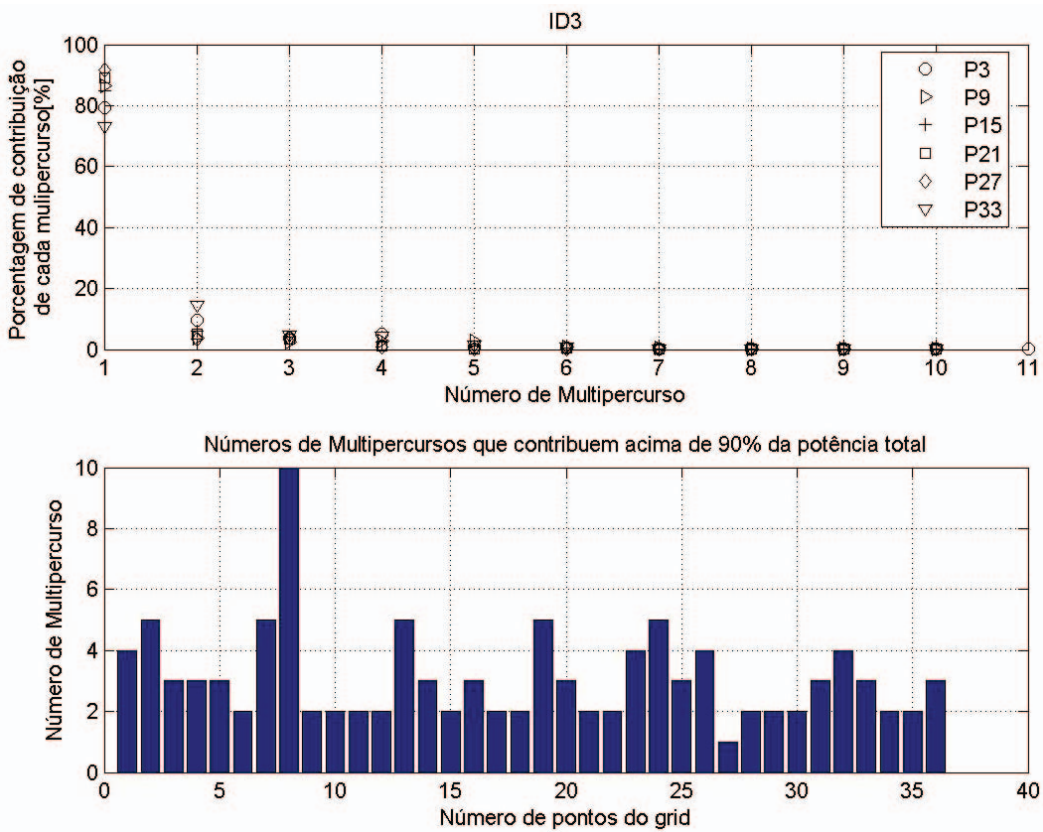


Figura 139 - Número efetivo de multipercursos no ID3

- **Parâmetros de dispersão do canal**

As Figuras 140 e 141 apresentam as cumulativas do espalhamento de retardo e da banda de coerência 0,7 para alguns ambientes medidos. As Tabelas 26 e 27 apresentam os valores de retardo médio e espalhamento de retardo e a banda de coerência de 0,9 e 0,7 para todos os ambientes medidos respectivamente. Os valores apresentados nestas tabelas foram obtidos através da média desses parâmetros ao longo do grid.

Nestes ambientes, conforme esperado, constatou-se que os valores de retardo médio e retardo RMS são relacionados de forma proporcional, enquanto a relação destes parâmetros com a banda de coerência 0,7 e 0,9 é feita de forma inversamente proporcional.

Para os ambientes sem visada (CT1 a CT7, LS3, LO1 a LO3, BB1, BB2, ID1, ID2, ID4, ID5), o espalhamento de retardo variou de aproximadamente 11 a 18ns para distâncias entre o transmissor e receptor variando aproximadamente de 4 a 18 metros. Para estes ambientes, a banda de coerência 0,7 variou 7 a 18 MHz.

Para os ambientes com visada e visada parcial (LS1, LS2, BB3 e ID3), o espalhamento variou de aproximadamente 8 a 9ns para distâncias de 4 a 8 metros. Para estes ambientes, a banda de coerência 0,7 variou 14 a 21 MHz.

Para o ambiente CETUC2, o espalhamento de retardo variou de aproximadamente 23 a 40ns e, para o Leme com visada, o espalhamento de retardo variou de aproximadamente 35 a 57ns, e sem visada de 42 a 44ns.

De um modo geral, como esperado nos ambientes analisados, foi observado que os valores de retardo médio e retardo RMS são menores e as bandas de coerência maiores para as situações com visada, se comparados aos valores em situações sem visada. É importante ressaltar que todos esses valores estão compatíveis com outros trabalhos encontrados na literatura.

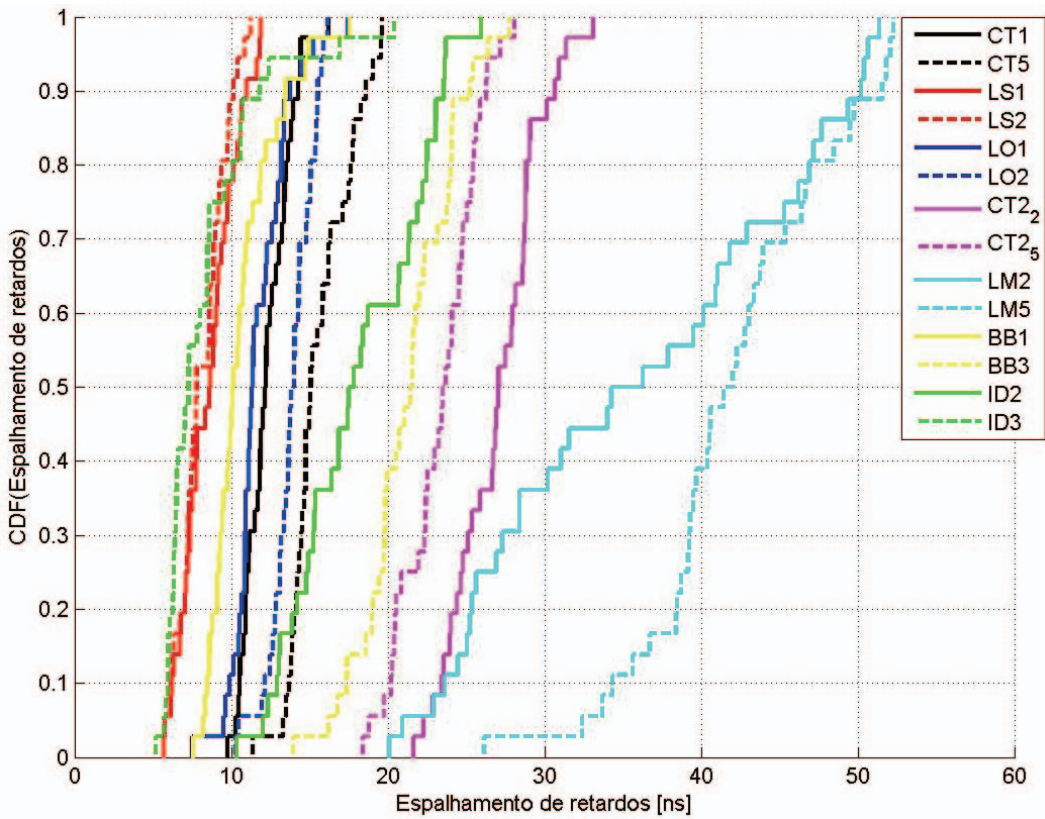


Figura 140 - CDF do espalhamento de retardos de alguns ambientes medidos

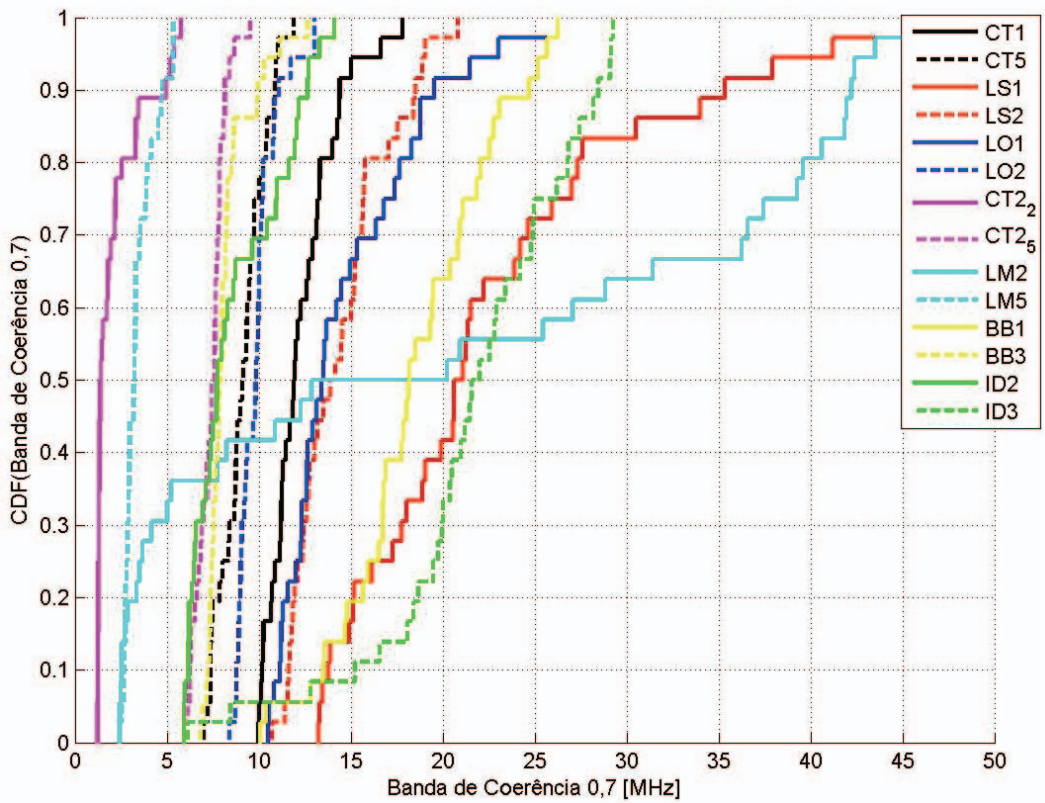


Figura 141 - CDF da banda de coerência 0,7 de alguns ambientes medidos

Ambiente	Retardo Médio [ns]			Retardo RMS [ns]		
	Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
CT1	37,64	37,20	2,85	12,36	12,20	1,43
CT2	39,60	39,26	2,21	11,60	11,54	1,50
CT3	36,16	34,98	3,44	14,77	14,55	2,36
CT4	36,38	36,13	3,23	14,82	15,15	2,03
CT5	56,09	55,75	4,08	15,66	15,07	1,95
CT6	54,34	54,65	3,90	18,74	18,95	1,80
CT7	54,72	54,01	3,31	18,20	18,38	2,17
LS1	22,12	21,80	2,12	8,57	8,26	1,83
LS2	27,53	27,35	2,00	9,56	9,58	1,43
LS3	47,25	47,25	2,64	13,34	13,16	2,23
LO	30,86	30,59	2,44	11,78	11,35	1,80
LO2	42,14	41,87	3,71	13,88	13,91	1,40
CT2_1	106,21	105,46	4,87	26,77	26,69	2,23
CT2_2	105,63	105,34	3,99	27,00	27,07	2,73
CT2_3	106,17	106,47	4,46	28,45	27,70	3,41
CT2_4	103,65	101,68	7,31	40,47	40,18	4,10
CT2_5	58,50	58,80	4,07	23,33	23,60	2,41
LM1	113,25	109,46	63,74	37,40	34,72	13,17
LM2	176,29	172,40	35,88	35,88	35,28	10,04
LM3	191,94	190,68	15,89	57,90	57,80	7,53
LM4	134,36	133,59	6,63	44,52	44,46	5,94
LM5	125,74	124,51	7,42	42,13	41,77	6,00
BB1	62,52	62,53	1,86	10,66	10,12	2,15
BB2	91,62	91,33	2,82	17,52	16,68	1,80
BB3	58,22	58,58	4,00	21,29	21,51	2,99
ID1	51,50	50,49	3,46	18,27	18,99	2,97
ID2	51,08	51,45	5,04	18,12	17,69	4,14
ID3	24,83	23,34	5,80	8,33	7,28	3,17
ID4	36,13	35,81	3,06	14,18	14,46	1,72
ID5	37,12	36,80	3,65	15,75	15,07	4,02

Tabela 26 - Retardo médio e o espalhamento de retardo para todos os ambientes medidos

Ambiente	Banda de Coerência 0,9 [MHz]			Banda de Coerência 0,7 [MHz]		
	Média	Mediana	Desvio	Média	Mediana	Desvio
CT1	4,93	4,90	0,43	12,28	11,91	1,85
CT2	5,22	5,20	0,41	12,65	12,20	1,54
CT3	4,49	4,54	0,49	10,40	10,30	1,05
CT4	4,29	4,28	0,41	10,16	9,84	1,14
CT5	4,01	4,03	0,43	9,11	9,14	1,25
CT6	3,27	3,26	3,90	7,47	7,41	0,53
CT7	3,28	3,28	0,17	7,43	7,37	0,42
LS1	7,36	7,34	1,44	22,64	20,86	8,13
LS2	5,71	5,58	0,85	14,40	14,01	2,58
LS3	4,52	4,49	0,33	10,46	10,45	1,04
LO	4,98	5,01	0,42	14,69	13,45	3,77
LO2	4,20	4,9	0,31	9,89	9,84	1,08
CT2_1	0,79	0,77	0,09	2,68	2,21	1,31
CT2_2	0,72	0,70	0,11	2,10	1,40	1,32
CT2_3	0,84	0,85	0,11	3,59	3,41	1,64
CT2_4	1,40	1,40	0,22	3,88	3,98	0,79
CT2_5	2,90	2,95	0,27	7,38	7,52	0,79
LM1	4,06	2,48	3,99	21,52	19,08	16,07
LM2	3,05	2,23	1,93	20,50	16,55	16,61
LM3	1,00	1,01	0,11	2,19	2,20	0,29
LM4	1,40	1,41	0,13	5,18	5,18	1,40
LM5	1,24	1,25	0,12	3,43	3,22	0,83
BB1	5,12	4,94	0,73	18,60	18,17	4,05
BB2	3,28	3,23	0,29	8,20	7,90	1,21
BB3	2,79	2,85	0,27	6,81	6,71	0,95
ID1	3,35	3,21	0,36	8,97	8,53	2,07
ID2	3,28	3,17	0,60	8,68	7,74	2,51
ID3	7,46	7,97	1,46	21,78	21,80	5,40
ID4	4,14	3,99	0,37	10,28	10,02	1,47
ID5	4,75	4,57	0,72	11,76	11,48	1,87

Tabela 27 - Banda de coerência para os dados medidos

Já foi observado nas figuras de capacidade para um canal seletivo um ganho na capacidade condicionada com o aumento da banda do canal. Isto ocorre, conforme explicado anteriormente, porque a seletividade na frequência do canal proporciona uma diversidade adicional, fazendo com que a capacidade condicionada se aproxime à capacidade média do canal. A seletividade na frequência pode ser caracterizada pelo espalhamento angular ou pela banda de coerência, já que esses dois parâmetros estão relacionados. Nesta tese será adotado o parâmetro banda de coerência 0,7 para a análise da capacidade para um canal seletivo em frequência.

A Tabela 28 apresenta os valores das capacidades para diferentes larguras de banda, a capacidade média e os valores de banda de coerência para os ambientes medidos. Foi observado na análise das capacidades que os ganhos obtidos nas capacidades condicionadas para as larguras de 5 e 10 MHz foram bem baixos. Isto pode ser justificado pelo tamanho da banda de coerência obtido para os ambientes medidos. Para os ambientes sem visada, a banda de coerência 0,7 variou 7 a 18 MHz, o que mostra coerência da pouca melhora da capacidade condicionada. Por exemplo, para os ambientes CT1 e CT5, com bandas de coerência aproximadas de 12 e 9 MHz, ocorre um aumento na capacidade condicionada para largura de 10 MHz de 0,22 e 0,33, respectivamente. Para a largura de banda de 20 MHz, os acréscimos começam a ser significativos para os ambientes sem visada, justamente porque a banda de coerência é menor que 20 MHz.

Para as situações com visada direta, os ganhos obtidos começam a serem significativos apenas para larguras de banda maiores que 50 MHz., justamente porque a banda de coerência é menor que 50 MHz.

Para o ambiente LM2, praticamente não houve nenhum ganho com o aumento da largura de banda. O problema da baixa capacidade neste ambiente está associado a outros fenômenos de propagação e indica que nem com aumento da banda há uma melhora na capacidade condicionada.

	FE (bits/s/Hz)	5 (MHz)	10 (MHz)	20 (MHz)	50 (MHz)	100 (MHz)	200 (MHz)	Cap. Media (MHz)	Banda Coerência 0,7 [MHz]
CT1	17,98	18,06	18,20	18,30	18,50	19,16	19,30	20,22	12,28
CT2	17,95	17,99	18,15	18,25	18,36	19,10	19,31	20,09	12,65
CT3	17,85	17,94	18,03	18,39	18,85	19,35	19,35	20,21	10,40
CT4	17,50	17,62	17,75	17,87	18,42	18,89	19,18	19,86	10,16
CT5	18,06	18,12	18,39	18,67	19,03	19,49	19,65	20,32	9,11
CT6	18,26	18,35	18,57	18,70	19,34	19,68	19,75	20,44	7,47
CT7	18,20	18,30	18,43	18,78	19,34	19,66	19,68	20,39	7,43
LS1	14,40	14,43	14,47	14,58	14,74	15,55	15,78	16,92	22,64
LS2	15,31	15,31	15,40	15,54	15,85	16,14	16,67	17,28	14,40
LS3	16,22	16,29	16,30	16,53	16,94	17,31	17,74	18,57	10,46
LO1	16,13	16,16	16,24	16,31	16,79	17,32	17,71	18,93	14,69
LO2	18,03	18,14	18,34	18,49	18,72	19,04	19,44	20,35	9,89
CT2_1	14,52	14,83	14,92	15,20	15,69	15,85	15,94	17,10	2,68
CT2_2	14,96	15,24	15,35	15,60	15,90	16,04	16,10	17,67	2,10
CT2_3	14,12	14,43	14,54	14,80	15,26	15,57	15,75	16,83	3,59

	FE (bits/s/Hz)	5 (MHz)	10 (MHz)	20 (MHz)	50 (MHz)	100 (MHz)	200 (MHz)	Cap. Media (MHz)	Banda Coerência 0,7 [MHz]
CT2_4	11,23	11,51	11,72	11,97	12,36	12,45	12,57	14,03	3,88
CT2_5	11,68	11,76	11,89	12,13	12,13	12,69	12,86	13,36	7,38
LM2	9,92	10,11	10,18	10,15	10,16	10,36	10,36	11,60	20,50
LM3	12,26	12,90	13,16	13,22	13,40	13,43	13,55	14,58	2,19
LM4	17,70	17,93	18,11	18,29	18,50	19,04	19,17	19,66	5,18
LM5	17,78	18,19	18,30	18,55	18,80	18,78	19,43	20,04	3,43
BB1	17,42	17,48	17,63	17,88	18,26	18,65	18,93	19,70	18,60
BB2	17,32	17,43	17,60	17,80	18,14	18,59	19,06	19,60	8,20
BB3	17,20	17,29	17,56	17,71	18,28	18,38	18,82	19,44	6,81
ID1	17,27	17,38	17,55	17,75	18,15	18,39	18,81	19,71	8,97
ID2	16,72	16,82	16,89	16,97	17,19	17,83	18,57	19,96	8,68
ID3	14,62	14,65	14,73	14,90	15,35	15,53	15,71	17,20	21,78
ID4	17,74	17,79	17,82	18,06	18,35	18,67	18,73	20,15	10,28
ID5	17,52	17,65	17,79	17,65	18,30	18,73	18,81	19,92	11,76

Tabela 28 - Capacidade de um canal seletivo em frequência e a banda de coerência

• Análise do canal bidirecional

As Figuras 143 a 149 apresentam todas as relações bi-direcional possíveis dos parâmetros estimados do canal. Assim, tem se:

- Perfil de potência dos retardos.
- Perfil de potência azimutal (DOA e DOD).
- Retardo versus DOA e DOD.
- DOA versus DOD.

A largura e as cores da bola representam a diferença entre a potência do multipercurso mais forte e os outros multipercursos. Apenas alguns pontos de alguns ambientes foram escolhidos para serem mostrados. A Figura 142 apresenta a escala de cores adotada. DP significa a diferença entre a potência do multipercurso mais forte e os outros multipercursos em dB.



Figura 142 - Escala de cores

Analisando as Figuras 143 a 149, é possível observar claramente a diferença entre os ambientes com visada e visada parcial dos ambientes sem visada quando se compara, por exemplo, as Figuras 145 e 146 com as Figuras 143 e 144. Em ambientes sem visada existem muito mais bolas grandes com potência equivalentes do que nos ambientes com visada e visada parcial.

Para o ambiente CT1, o número efetivo para o ponto 33 foi de oito (veja a Figura 126). Estes oito multipercursos podem ser identificados na Figura 143 (veja o círculo no gráfico do perfil de potência de retardo). Analisando apenas o gráfico

do perfil de potência de retardo, podem ser vistos três raios bem distintos (separados pelo tempo) e dois outros conjuntos de raios. Observando agora os gráficos que envolvem o DOA, pode ser visto que os raios que pertencem a esses conjuntos são separados espacialmente. Analisando agora os gráficos que envolvem o DOD, alguns dos multipercursos efetivos possuem o mesmo DOD, mas possuem DOA e tempos de chegadas diferentes. Esta situação representa o caso de diversidade, onde um sinal é transmitido e duas cópias decorrelatadas chegam na recepção.

Analisando de forma global os gráficos da distribuição da potência dos ângulos de chegada e da distribuição dos ângulos de chegada nos retardos, podem ser visto multipercursos chegando em várias direções distintas, indicando um ambiente rico em espalhadores no lado dos receptores. O mesmo não se pode afirmar quando são analisados os gráficos da distribuição da potência dos ângulos de saída e da distribuição dos ângulos de saída nos retardos, nos quais pode ser vista uma maior concentração dos multipercursos na transmissão. O gráfico DOA-DOD deixa mais claro o espalhamento do ângulo de chegada e a concentração do ângulo de saída. O gráfico DOA-DOD também mostra que apenas algumas combinações DOA-DOD permitem estabelecer um enlace entre o transmissor e o receptor.

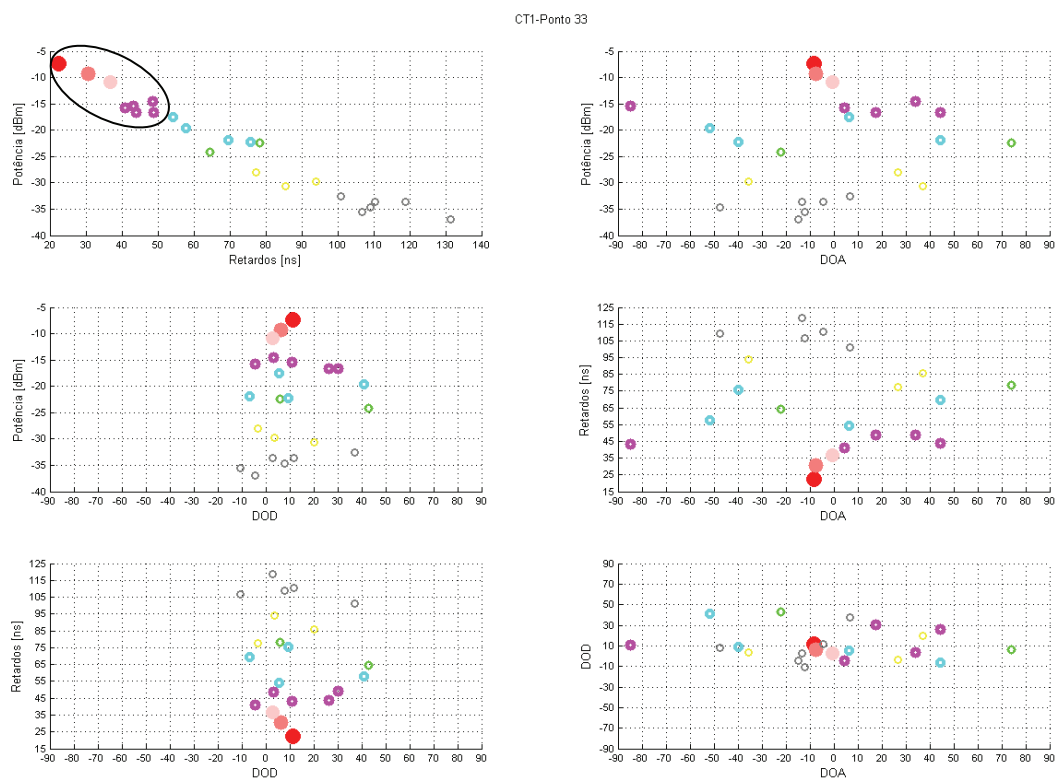


Figura 143 - CT1: Componentes de multipercursos apresentadas em todas as possíveis relações em duas dimensões. A largura das bolas é proporcional à potência de cada multipercurso

Para o ambiente CT5, o número efetivo para o ponto 21 foi de nove (ver Figura 127). Na Figura 144, estes multipercursos estão localizados dentro de um círculo no gráfico do perfil de potência dos retardos.

Analizando o perfil de potência dos retardos, pode ser observado que vários raios (sete raios) com potências equivalentes estão se sobrepondo. Analisando apenas este gráfico, seria possível afirmar a existência de alguns clusters. Um cluster pode ser definido como uma agregação de raios com parâmetros de canal similares, geralmente tempo e ângulo de chegada. Assim, raios que chegam com tempos e ângulos de chegada próximos pertencem ao mesmo cluster. Analisando agora o gráfico DOA-retardo e o gráfico da potência-DOA, pode ser observado que os sinais, em sua maioria, estão separados espacialmente, mas dois clusters com dois raios podem ser identificados nos gráficos (veja os círculos e setas). Próximo a um desses clusters existe um outro raio que possui aproximadamente o mesmo ângulo de chegada. Porém, este mesmo raio possui tempo de chegada diferente e, por esta razão, não pertence a esse cluster.

Analizando agora os gráficos que envolvem o DOD, pode ser observado que os raios com potências equivalentes possuem ângulos diferentes. Pode ser observado também que raios que pertencem ao mesmo cluster possuem DODs diferentes. Porém, existem raios que possuem o mesmo DOD mas possuem DOA diferentes (veja as setas), indicando uma correlação entre esses sinais e um ganho de diversidade de recepção. Isto fica mais visível se o gráfico DOA-DOD for observado.

Analizando os gráficos de maneira geral, é possível observar um maior espalhamento espacial dos multipercursos na recepção e uma maior concentração espacial dos multipercursos na transmissão.

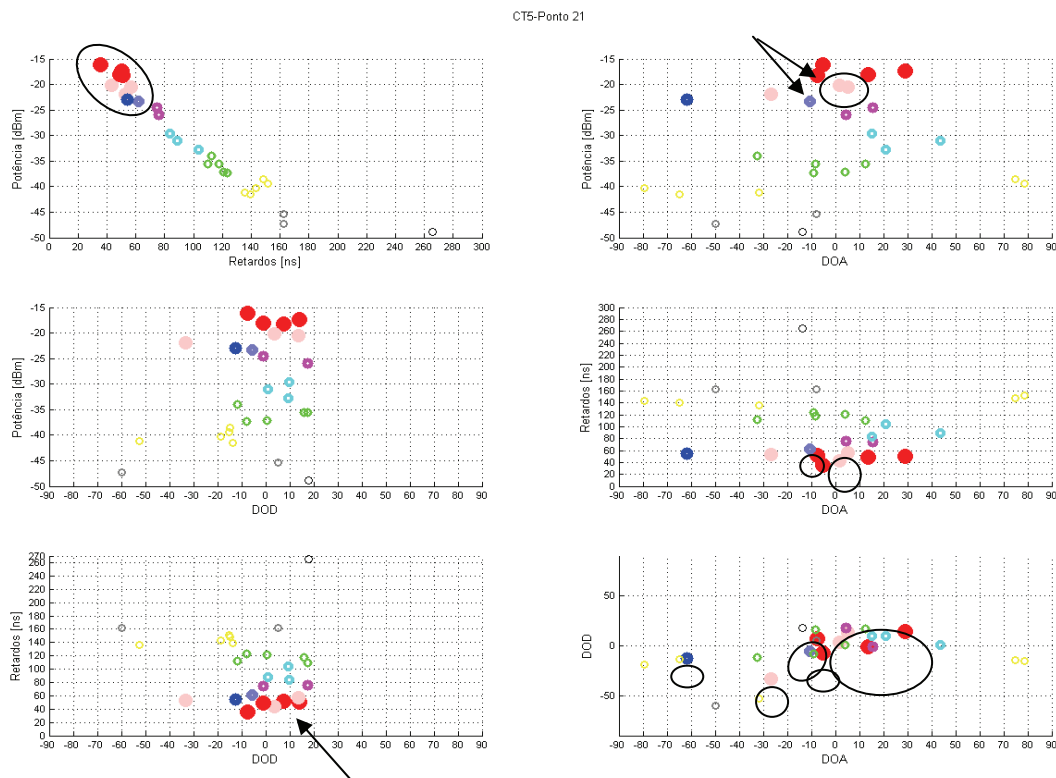


Figura 144 - CT5: Componentes de multipercursos apresentadas em todas as possíveis relações em duas dimensões. A largura das bolas é proporcional à potência de cada multipercursos

Para os ambientes LS1 e LS2, os números efetivos para os pontos 3 e 9 foram de cinco e quatro, respectivamente, e podem ser identificados nas Figuras 128 e 129.

Analisando os ambientes LS1 e LS2, pode ser vista a presença de poucos raios que possuem potências equivalentes. Analisando os gráficos da distribuição da potência dos ângulos de chegada e da distribuição dos ângulos de chegada nos retardos, pode ser visto um maior espalhamento dos retardos no domínio angular no ambiente LS2 (visada parcial) do que no ambiente LS1 (com visada). Para os gráficos da distribuição da potência dos ângulos de saída e da distribuição dos ângulos de saída nos retardos, vê-se uma maior concentração espacial dos raios para o ambiente LS1 do que para o ambiente LS2.

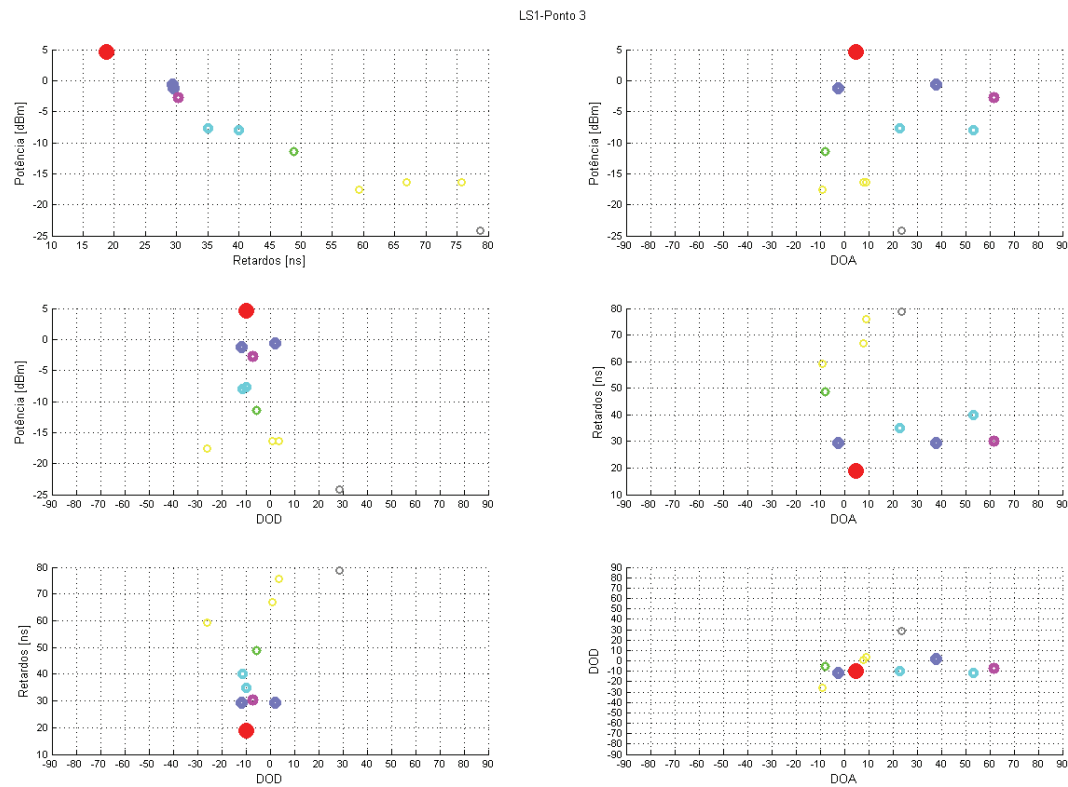


Figura 145 - LS1: Componentes de multipercursos apresentadas em todas as possíveis relações em duas dimensões. A largura das bolas é proporcional a potência de cada multipercursos

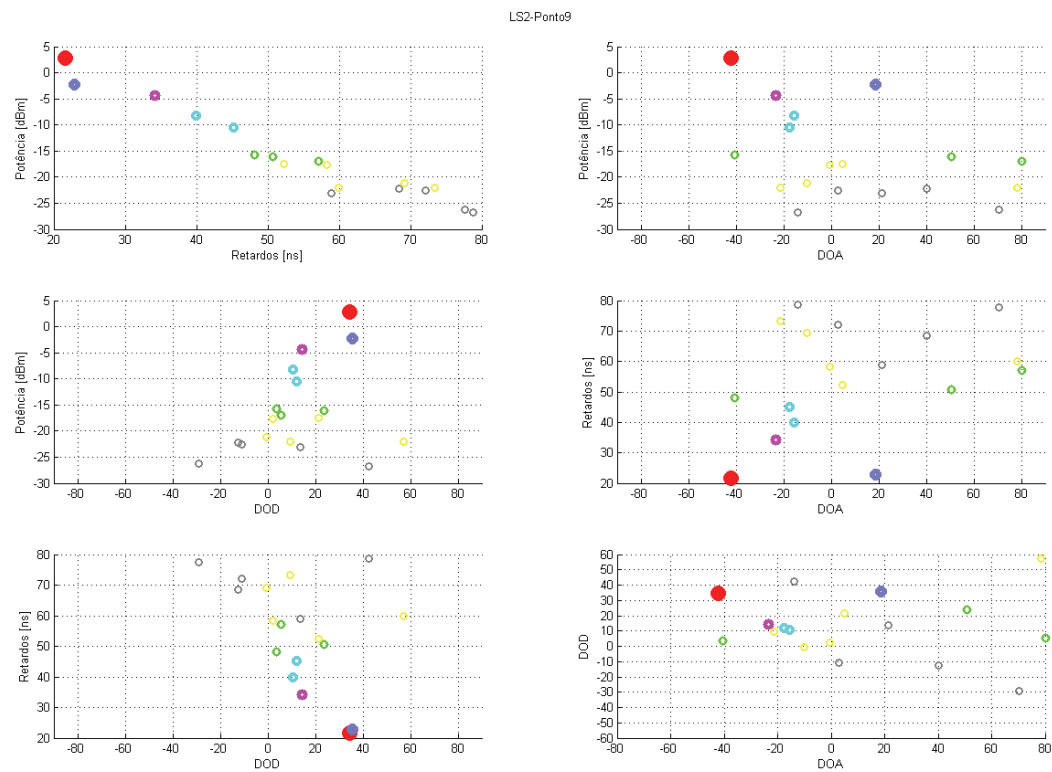


Figura 146 - LS2: Componentes de multipercursos apresentadas em todas as possíveis relações em duas dimensões. A largura das bolas é proporcional a potência de cada multipercursos

Para a Figura 147 (ambiente LO1), pode ser visto o grande espalhamento dos retardos no domínio angular mostrado pelos gráficos de potência por DOA e DOD e pelos gráficos retardos por DOA e DOD, indicando que este ambiente é rico em espalhadores em ambos os lados.

Para este ambiente, o número efetivo de multipercurso é de 8 (veja os círculos no gráfico de perfil de potência de retardos). Nos gráficos potência-DOA e retardos-DOA, podem ser visto que os multipercursos estão espalhados no espaço. Existem até alguns multipercursos com o mesmo ângulo de chegada, mas que estão separados no tempo. Porém, nos gráficos potência-DOD e retardos-DOD, pode ser visto o agrupamento de alguns multipercursos. Assim, novamente tem-se uma situação de diversidade, onde se tem sinais correlatados na transmissão e sinais descorrelatados na recepção.

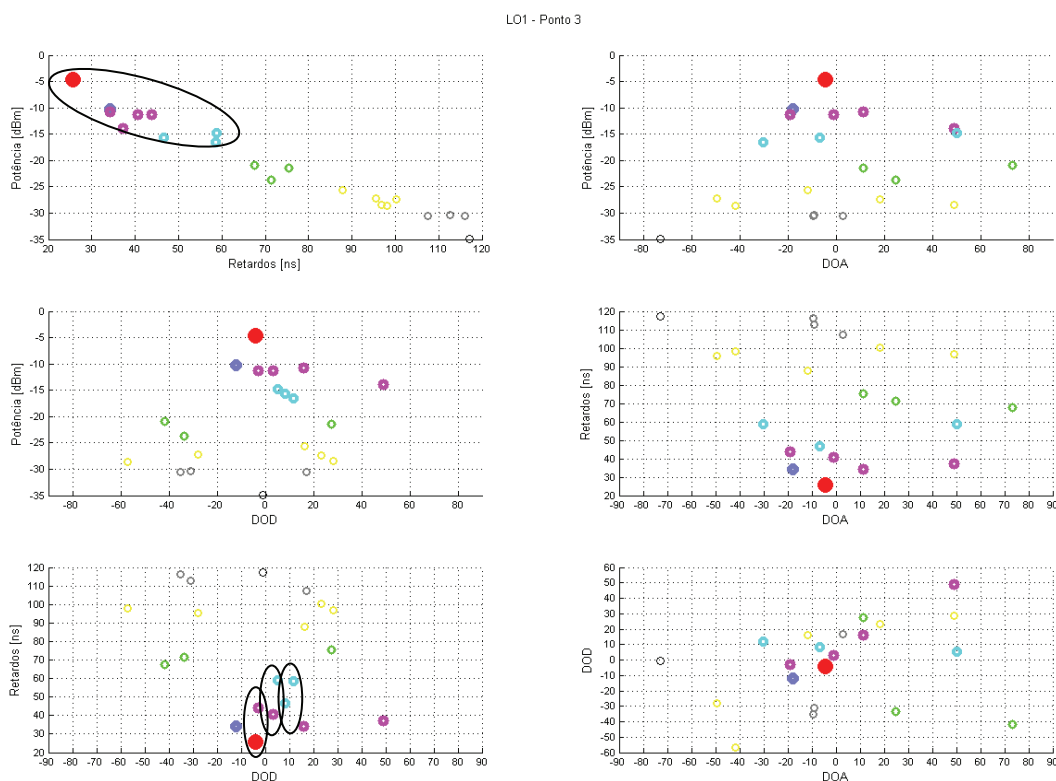


Figura 147 - LO1: Componentes de multipercurso apresentadas em todas as possíveis relações em duas dimensões. A largura das bolas é proporcional a potência de cada multipercurso

Para o ambiente LO2, o número efetivo para o ponto 21 foi de 14 (veja o círculo no gráfico do perfil de potência dos retardos). Analisando apenas o perfil de potência dos retardos, podem ser vistos vários raios (14 raios) com potências equivalentes se sobrepondo. Analisando este gráfico, seria possível afirmar a

princípio a existência de no mínimo 4 clusters (observe o eixo x deste gráfico). Porém, olhando o gráfico DOA-retardo e o gráfico da potência-DOA, pode-se identificar a existência de três clusters (observe os círculos no gráfico DOA-retardo).

Analisando agora os gráficos que envolvem o DOD, podem ser identificados quatro clusters (veja os círculos no gráfico retardo-DOD). Os multipercursos do primeiro cluster (dois multipercursos, contando da esquerda para a direita) são separados espacialmente na recepção. No segundo cluster (cinco multipercursos), quatro multipercursos são separados espacialmente na recepção. Desses cinco multipercursos, dois pertencem a dois clusters distintos. No terceiro cluster (dois multipercursos), os multipercursos também são separados espacialmente na recepção. Assim, a presença de mesmo DOD para vários raios e com DOA diferentes na recepção indica sinais correlatados no transmissor, porém desconrelatados na recepção, indicando a possibilidade de se ter ganhos de diversidade.

A separação espacial dos multipercursos, que é um pré-requisito para os sistemas MIMO, é somente possível através da análise do canal bi-direcional. Somente através desta análise é possível, por exemplo, resolver multipercursos que possuem o mesmo DOD com ângulo de chegada diferentes e diferentes DODs com o mesmo ângulo e tempo de chegada. O ambiente de propagação ideal para o sistema MIMO é composto por um conjunto de multipercursos com potências equivalentes, mas que possuem separação espacial no transmissor e no receptor.

Todas as análises dos gráficos realizadas até agora podem ser utilizadas para a interpretação dos gráficos seguintes. Algumas conclusões importantes podem ser obtidas depois das análises desses gráficos:

- O espalhamento dos multipercursos com potências equivalentes no domínio dos retardos e no domínio angular é de fundamental importância para o aumento da capacidade no sistema MIMO.
- Se o espalhamento ocorrer apenas na transmissão ou na recepção, tem-se apenas ganho de diversidade. A Figura 150 é um exemplo claro de diversidade.

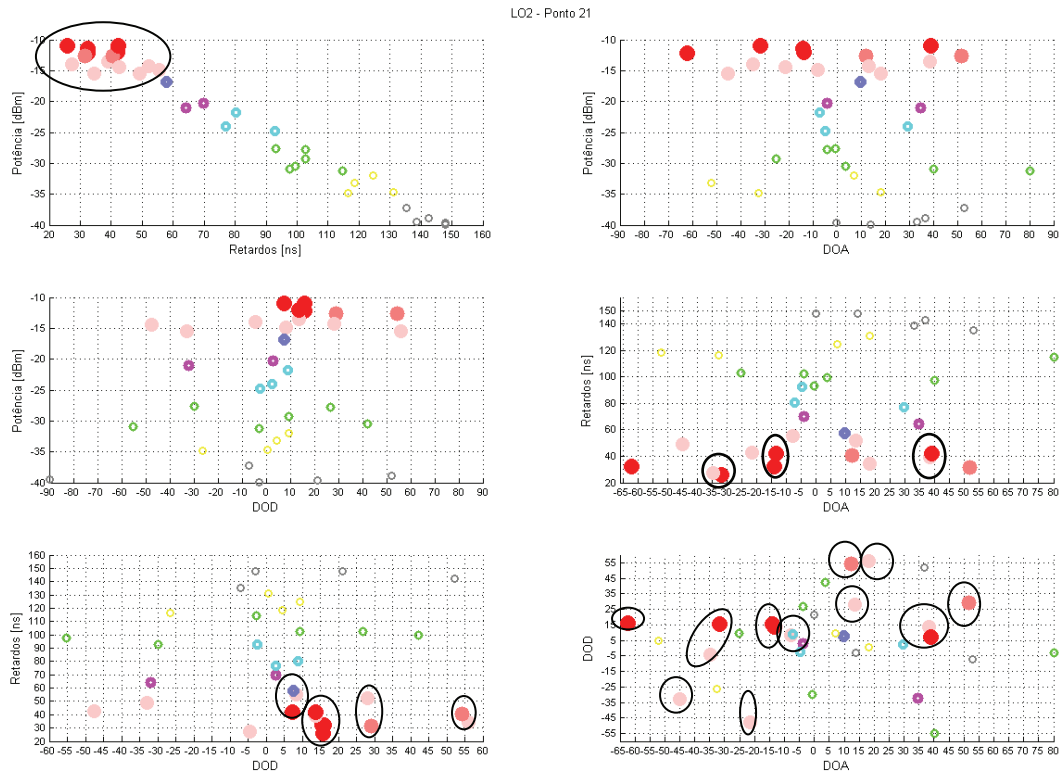


Figura 148 - LO2: Componentes de multipercursos apresentadas em todas as possíveis relações em duas dimensões. A largura das bolas é proporcional à potência de cada multipercursos

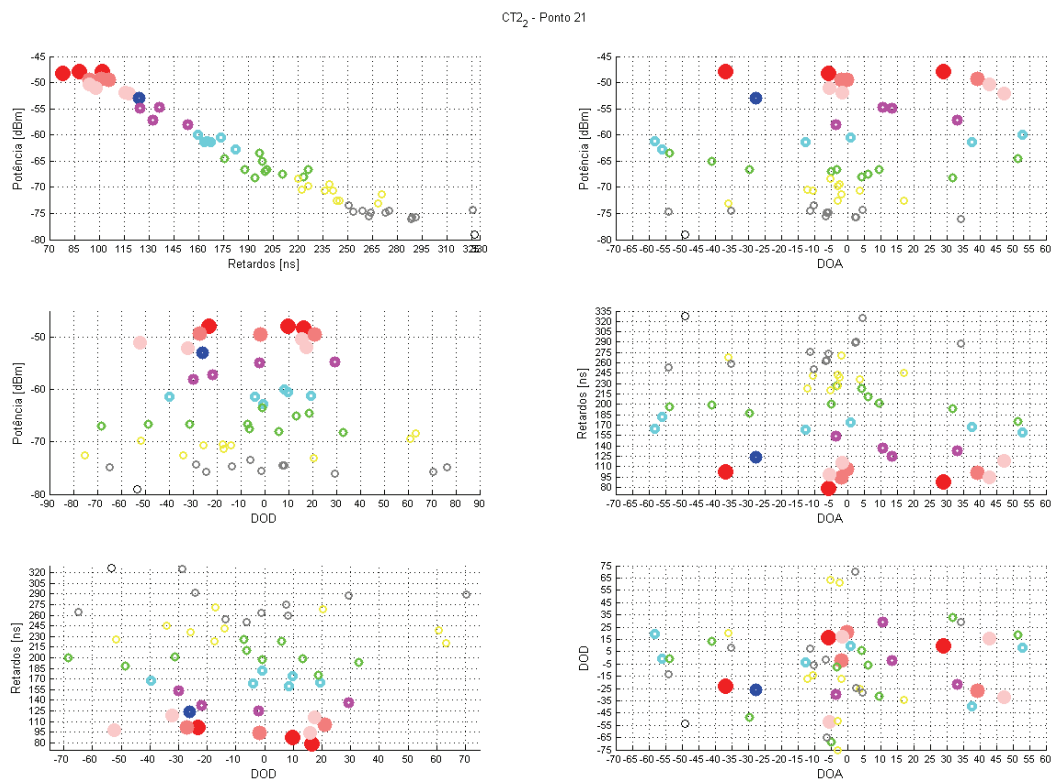


Figura 149 - CT2₂: Componentes de multipercursos apresentadas em todas as possíveis relações em duas dimensões. A largura das bolas é proporcional à potência de cada multipercursos

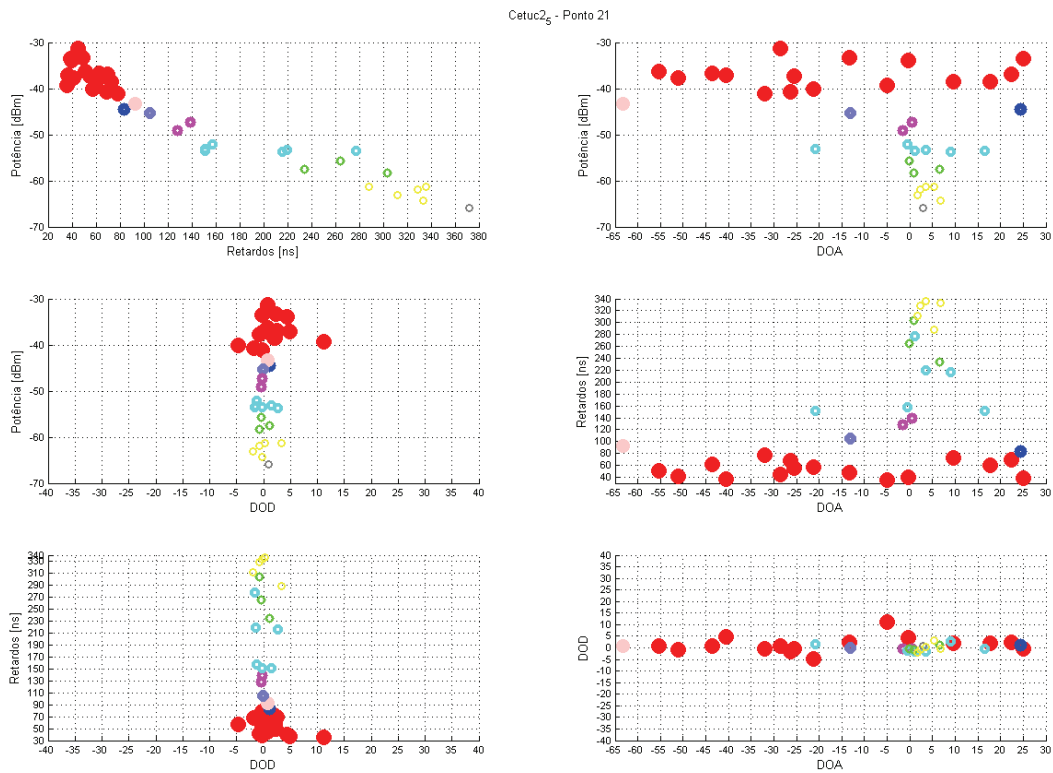


Figura 150 - CT2_5: Componentes de multipercursos apresentadas em todas as possíveis relações em duas dimensões. A largura das bolas é proporcional à potência de cada multipercursos

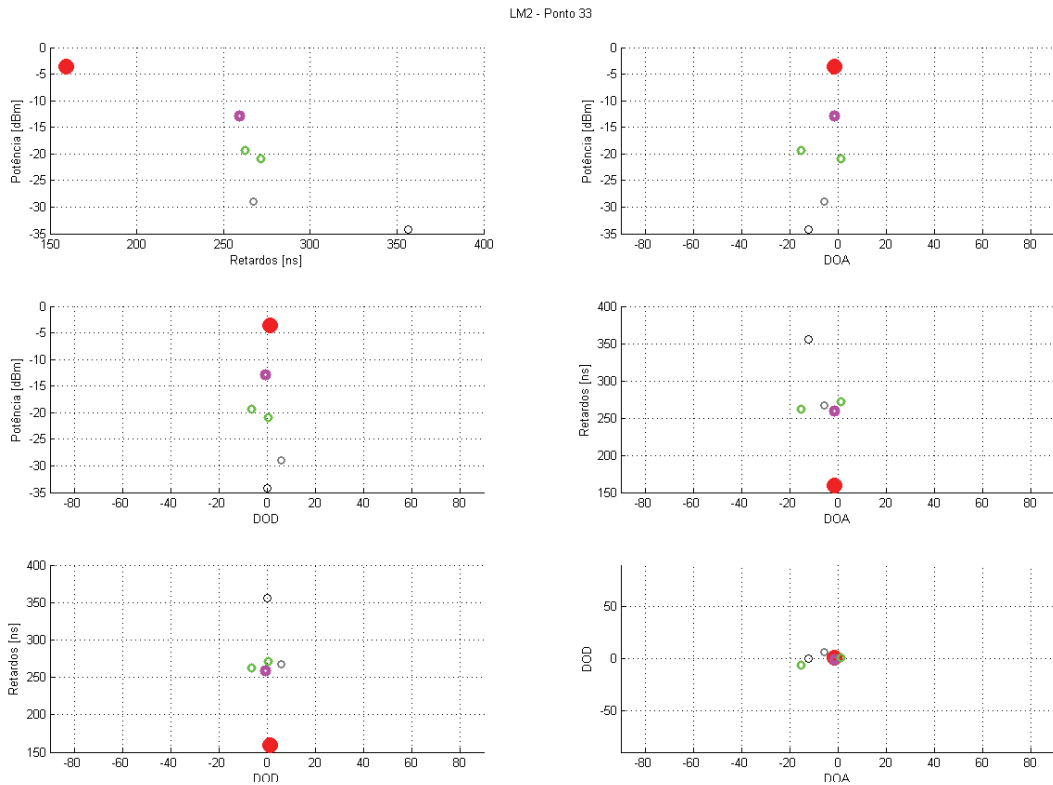


Figura 151 - LM2: Componentes de multipercursos apresentadas em todas as possíveis relações em duas dimensões. A largura das bolas é proporcional à potência de cada multipercursos

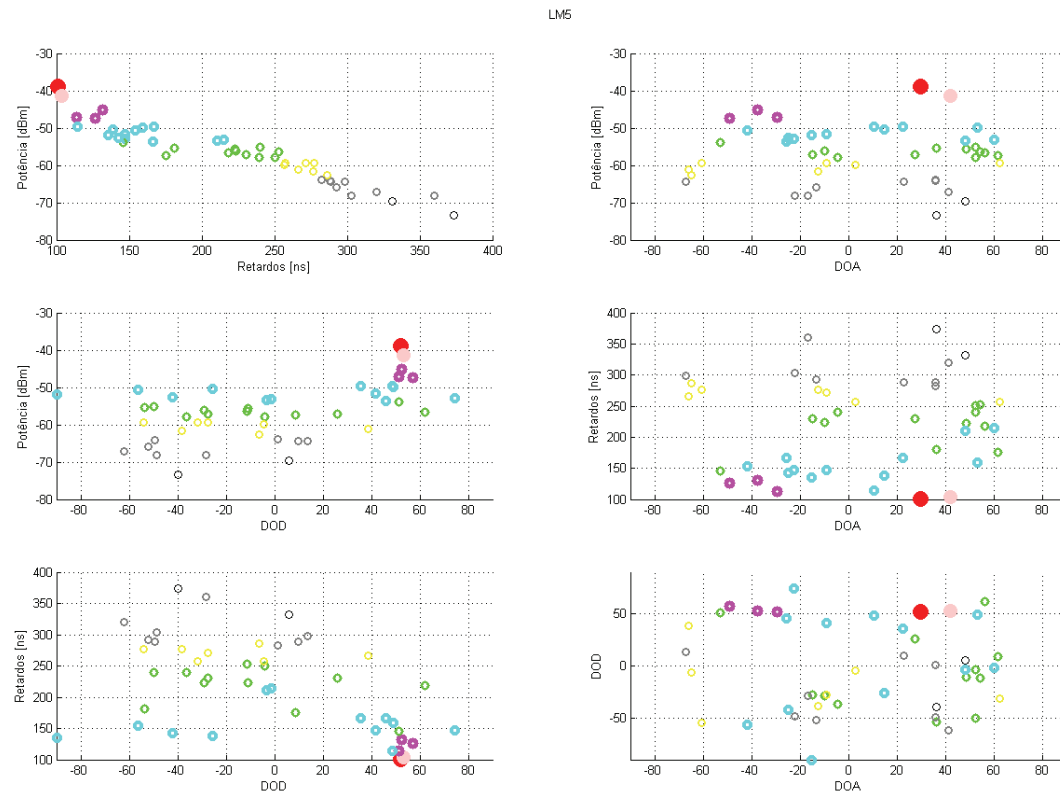


Figura 152 - LM5: Componentes de multipercursos apresentadas em todas as possíveis relações em duas dimensões. A largura das bolas é proporcional à potência de cada multipercurso

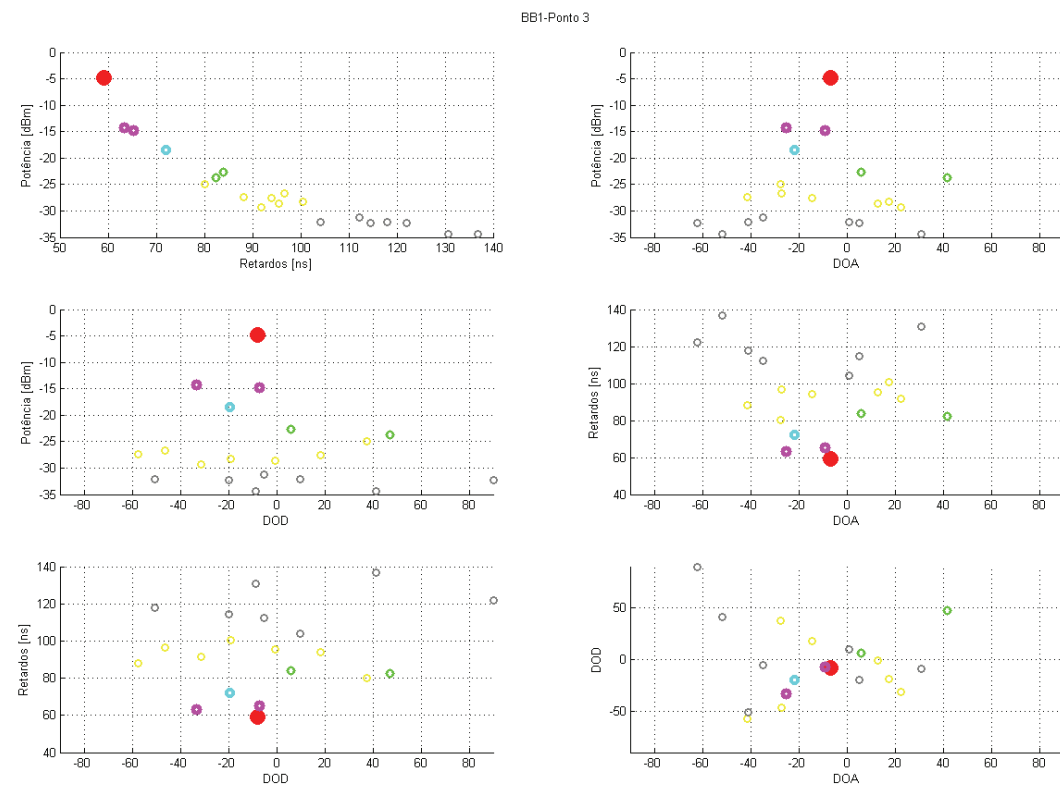


Figura 153 - BB1: Componentes de multipercursos apresentadas em todas as possíveis relações em duas dimensões. A largura das bolas é proporcional à potência de cada multipercurso

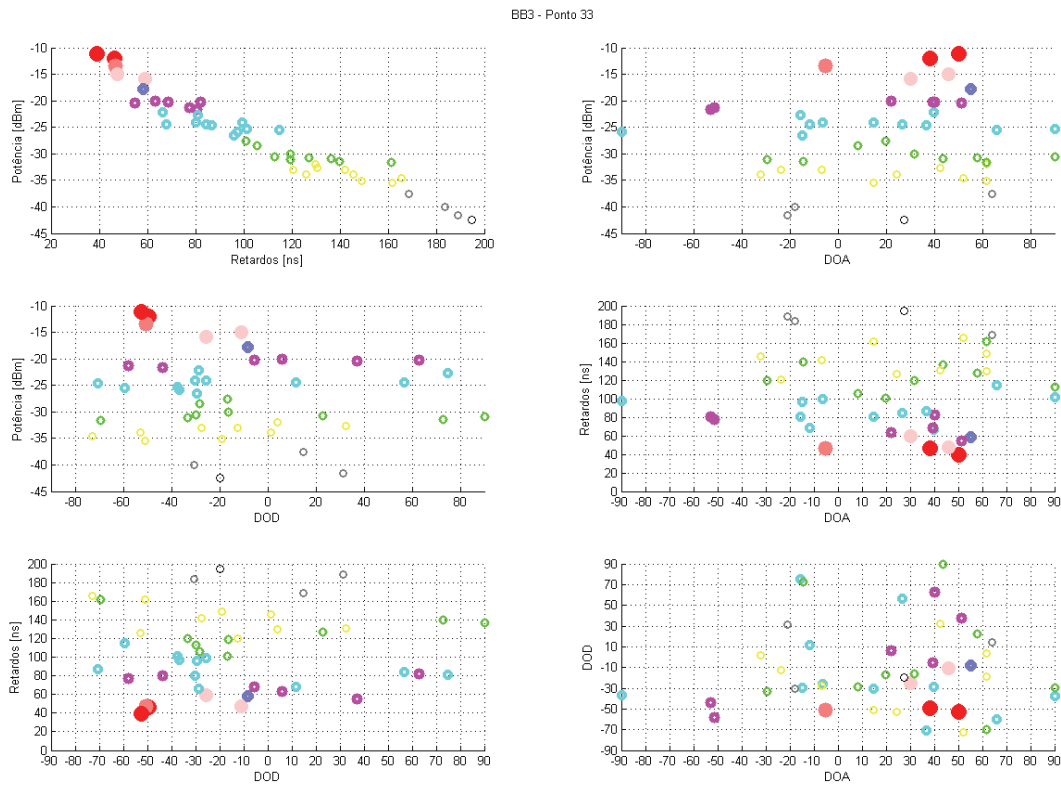


Figura 154 - BB3: Componentes de multipercursos apresentadas em todas as possíveis relações em duas dimensões. A largura das bolas é proporcional à potência de cada multipercursos

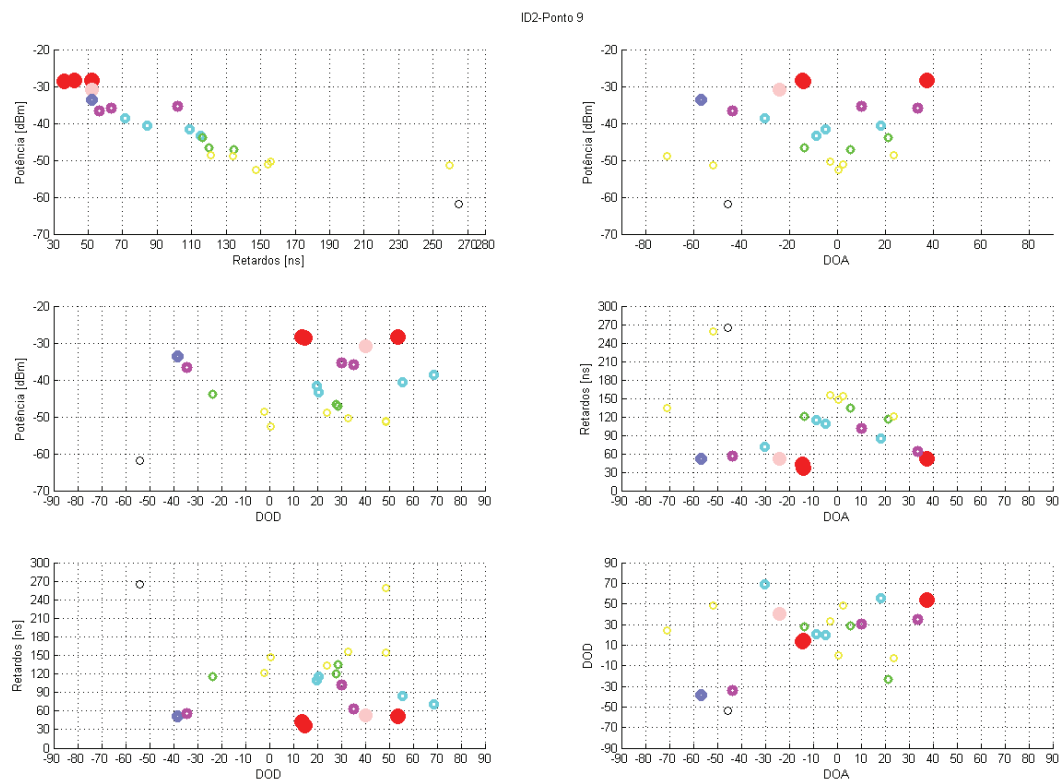


Figura 155 - ID2: Componentes de multipercursos apresentadas em todas as possíveis relações em duas dimensões. A largura das bolas é proporcional à potência de cada multipercursos

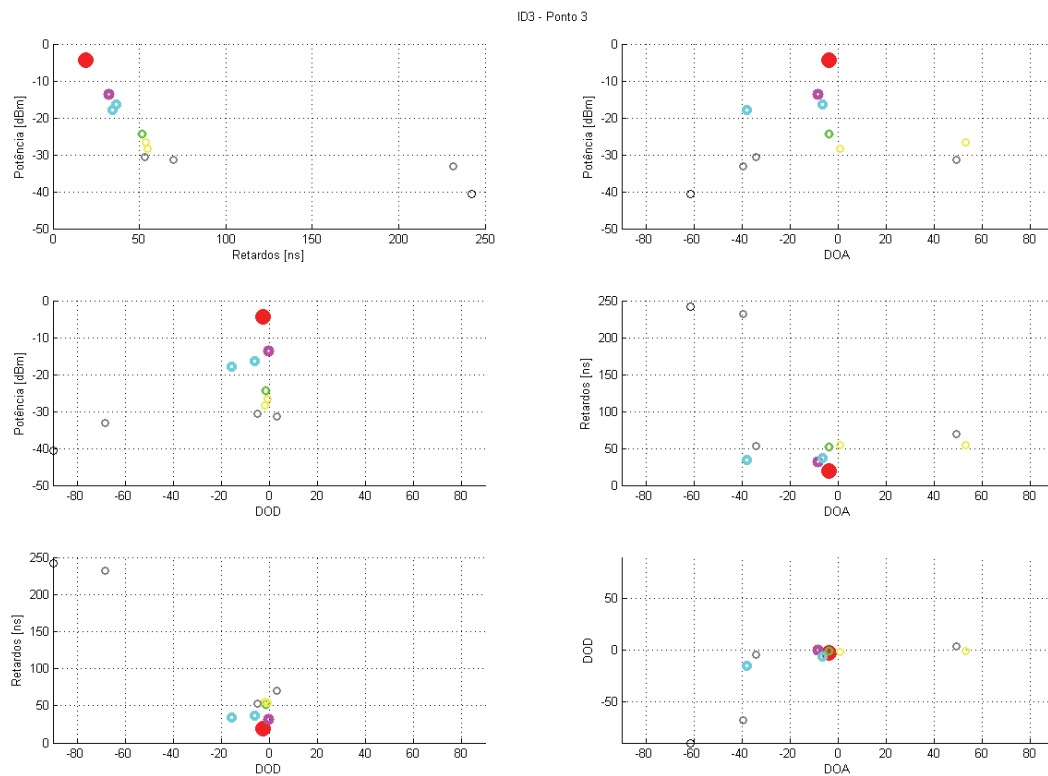


Figura 156 -ID3: Componentes de multipercursos apresentadas em todas as possíveis relações em duas dimensões. A largura das bolas é proporcional à potência de cada multipercurso

As Figuras 157 a 159 apresentam exemplos do perfil de potência retardo-angular-DOA, do perfil de potência retardo-angular-DOA e do perfil de potência angular-DOD-angular-DOA na forma 3D.

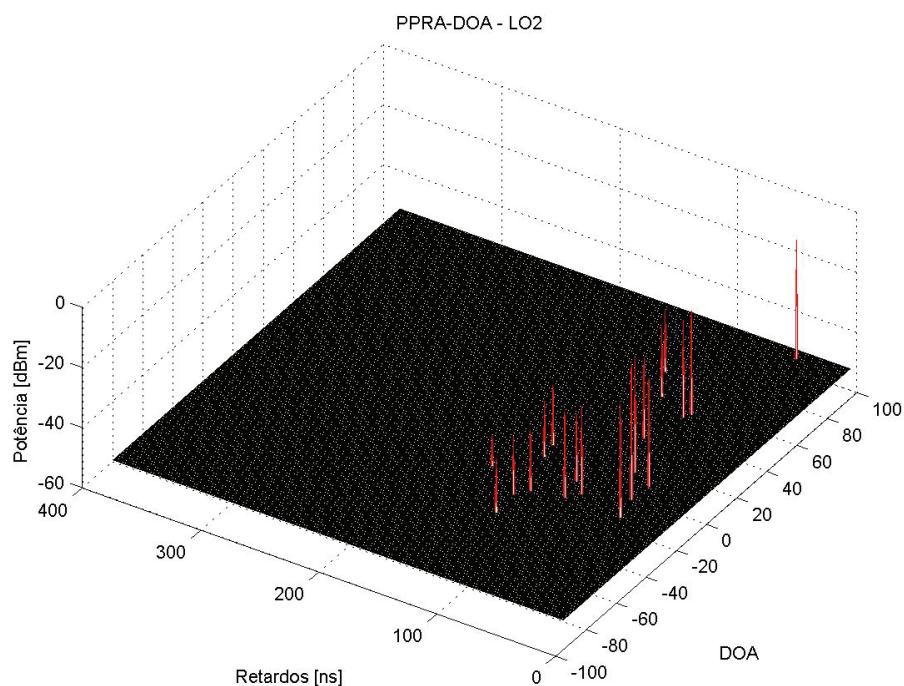


Figura 157 - PPRA-DOA para o ponto 33 do ambiente LO2

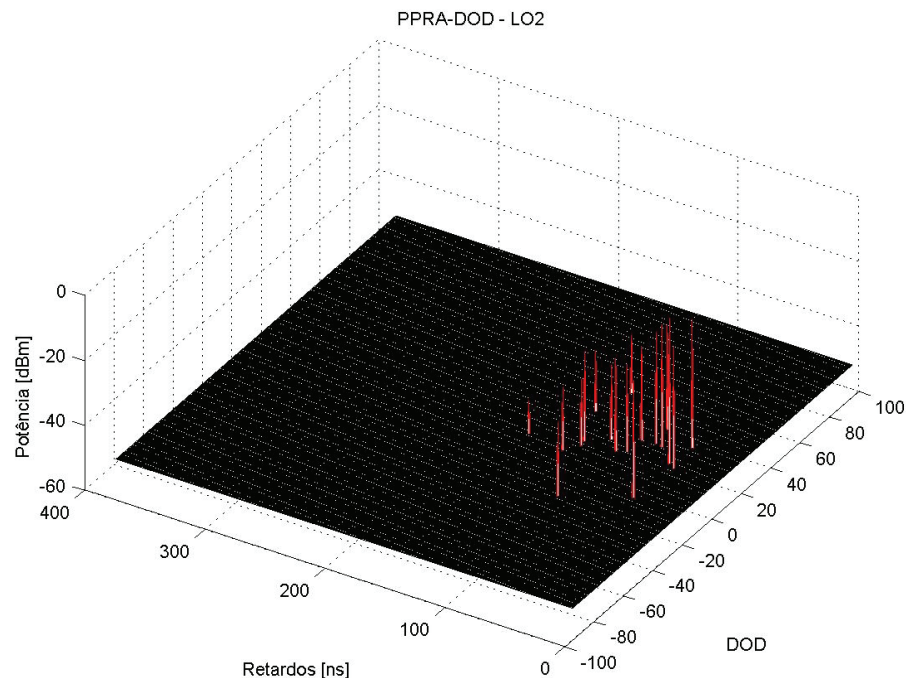


Figura 158 - PPRA-DOD para o ponto 33 do ambiente LO2

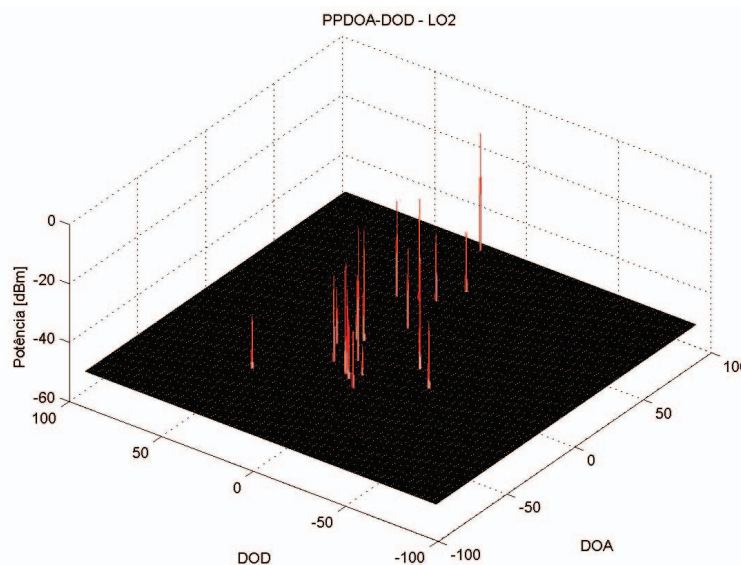


Figura 159 - PPDOA-DOD para o ponto 33 do ambiente LO2

• Parâmetros de dispersão angular

Para a análise e extração de alguns parâmetros de dispersão angular do canal, será adotado o teorema da reciprocidade do canal. Neste teorema, os tempos de chegada, deslocamento Doppler e as amplitudes complexas são iguais e independem de quem é transmissor ou receptor. Porém, para que se possa utilizar esta condição, o canal tem que ser mantido estacionário, condição já aplicada

devido à técnica de sondagem do canal adotada. Assim, pode-se calcular os espalhamento angular tanto no transmissor quanto no receptor.

A dispersão espacial é avaliada através do espalhamento angular calculado a partir do perfil de potência azimutal ou angular. O espalhamento angular representa o espalhamento das direções de chegada ou saída dos multipercursos. Um alto valor do espalhamento angular representa uma maior seletividade espacial, que implica em uma distância de coerência pequena. Como resultado, duas antenas separadas a uma distância maior que a distância de coerência tendem a experimentarem desvanecimentos descorrelatados. O cálculo do espalhamento angular segue a definição tradicional dada pela Equação (36) do Capítulo 4.

As Figuras 160 e 161 apresentam as cumulativas do espalhamento angular no transmissor e receptor para alguns ambientes medidos. Pode-se observar um espalhamento angular bem maior no receptor do que no transmissor. Esta maior concentração dos raios do lado do transmissor já tinha sido observada nos gráficos de perfil de potência angular. O motivo principal desta concentração se dá pelo tipo de local escolhido para posicionar o transmissor.

Através dessas cumulativas, é possível perceber que o espalhamento angular para ambientes com visada é menor do que nos sem visada. Isto também já tinha sido observado nos gráficos de perfil de potência angular. Porém, é importante ressaltar que os valores obtidos para os ambientes com visada ainda são valores consideráveis.

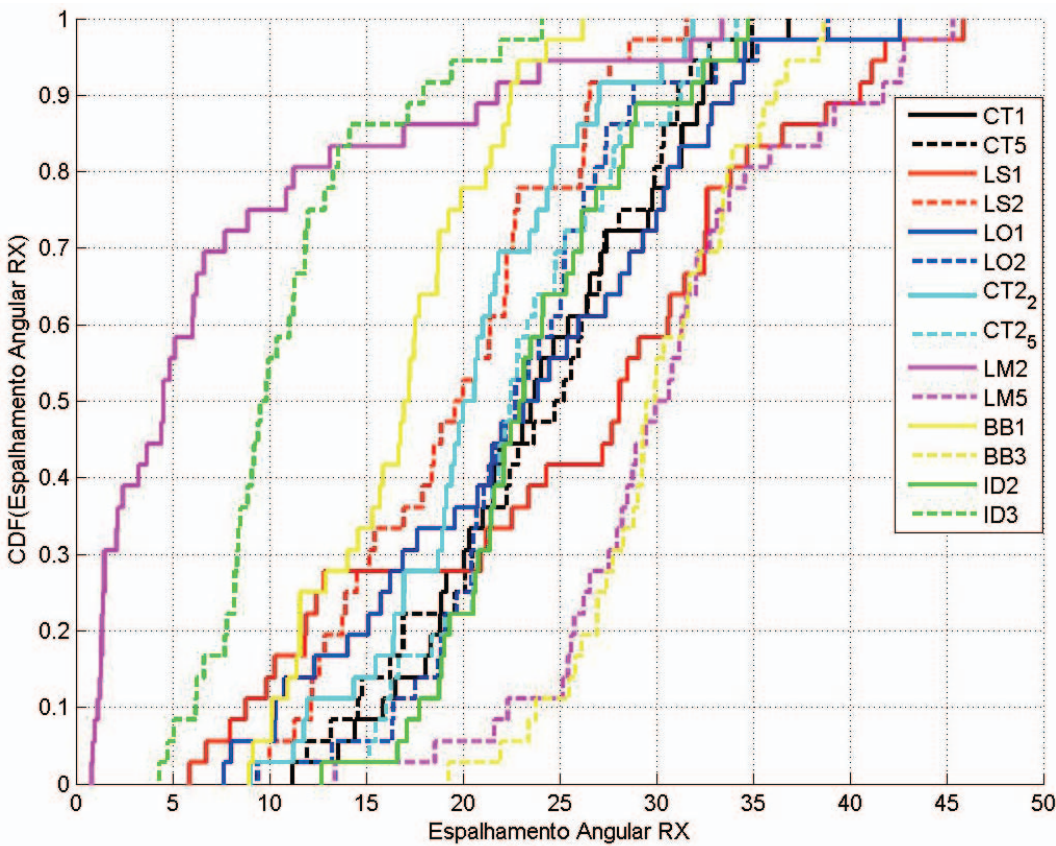


Figura 160 - Espalhamento angular no RX

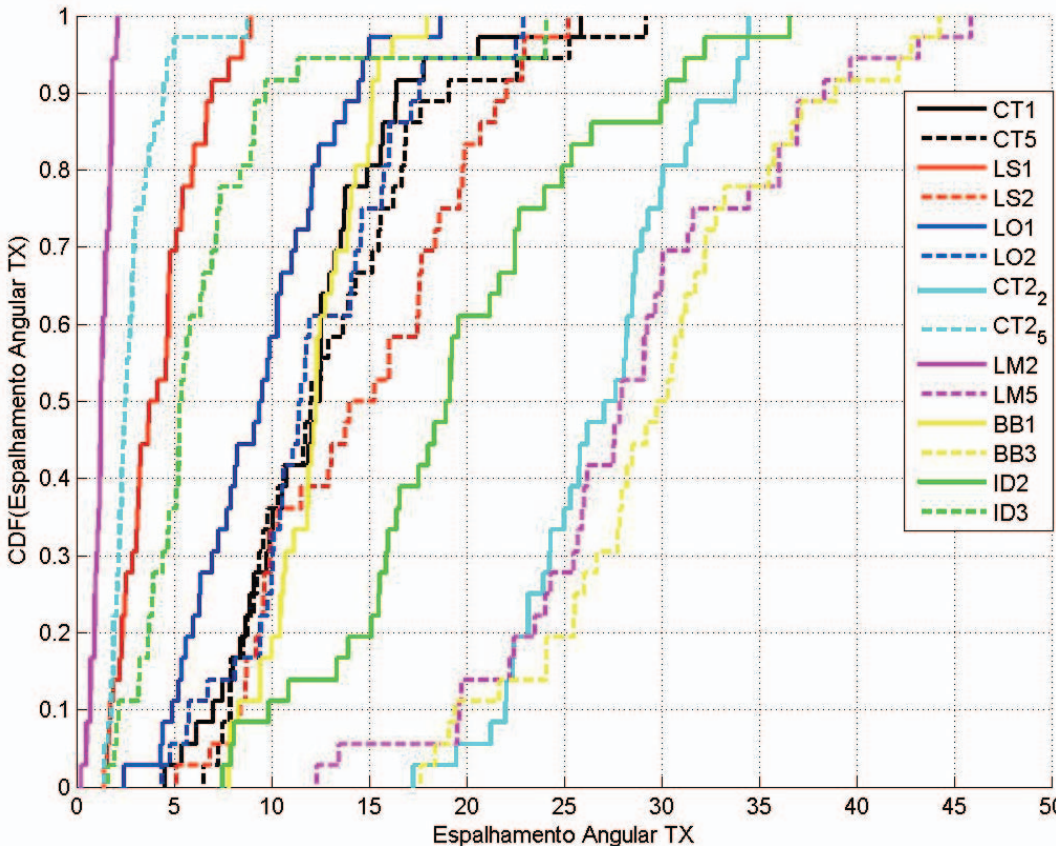


Figura 161 - Espalhamento angular no TX

A Tabela 29 apresenta os valores médios dos ângulos de chegada, dos ângulos de saída, do espalhamento angular no transmissor e do espalhamento angular no receptor para todos os ambientes medidos.

Através desta tabela pode-se confirmar que, para a maioria dos ambientes medidos, o espalhamento angular é maior no receptor do que no transmissor. Para os ambientes com visada direta esta diferença ainda é acentuada. Todos os valores encontrados para o espalhamento angular estão dentro dos valores encontrados na literatura para ambientes *indoor*.

Para os ambientes com um grande número de espalhadores e sem visada (CT1 a CT7, LS3, LO1 a LO3, BB1, BB2, ID1, ID2, ID4, ID5), o espalhamento angular no receptor variou de aproximadamente 17 a 32° para distâncias entre o transmissor e o receptor variando aproximadamente de 4 a 18 metros. Para estes ambientes o espalhamento angular no transmissor variou de aproximadamente 9 a 26°. Para os ambientes com visada e visada parcial (LS1, LS2, BB3 e ID3), o espalhamento angular no receptor variou de aproximadamente 10 a 30° para distâncias 4 a 8 metros, que são valores consideráveis se compararmos como os valores sem visada direta. Para estes ambientes o espalhamento angular no transmissor variou de aproximadamente 4 a 14°. Para o ambiente CETUC2 o espalhamento angular variou em torno de 20° para o receptor e de 26° para o transmissor, na maioria dos pontos.

Para o Leme, nos pontos com visada (LM2 e LM3) o espalhamento de angular variou de aproximadamente 7 a 13° para o receptor e ficou em torno de 2° para o transmissor. Para os pontos sem visada o espalhamento angular variou em torno 30° para o receptor e para o transmissor obteve valores em torno de 10 e de 28. Esta variação no espalhamento angular no transmissor se deu porque no ambiente LM4 o transmissor estava ainda localizado no corredor, limitando o espalhamento do sinal. Já para o ambiente LM5 o transmissor foi colocado em uma sala de aula ampla, justificando o aumento do espalhamento angular. A Figura 162 apresenta o espalhamento angular no receptor e no transmissor para os 45 pontos medidos no corredor do Leme. O interessante desta figura é que ela comprova os resultados obtidos em [9, 10]. Em [9, 10] é realizada uma análise da correlação do sinal em corredores. Algumas conclusões importantes foram obtidas deste trabalho:

- a capacidade reduz com o aumento da distância entre o transmissor e o receptor;
- a correlação entre os sinais na transmissão aumenta com o aumento da distância;
- a correlação entre os sinais na recepção é sempre menor que a correlação na transmissão.

A Figura 162 apresenta esse comportamento, só que através do espalhamento angular. Com o aumento da distância entre o transmissor e o receptor, o espalhamento angular no transmissor vai reduzindo. O espalhamento de retardo no receptor, por outro lado, apresenta valores sempre bem superiores aos obtidos no espalhamento angular no transmissor, e não é possível afirmar se o espalhamento no receptor reduzirá se for aumentada mais a distância entre o transmissor e o receptor, apesar da leve tendência da redução (veja a melhor reta que ajusta aos valores medidos). A Tabela 29 apresenta o valor médio de aproximadamente 16° para o espalhamento no receptor e de aproximadamente 4° para o transmissor.

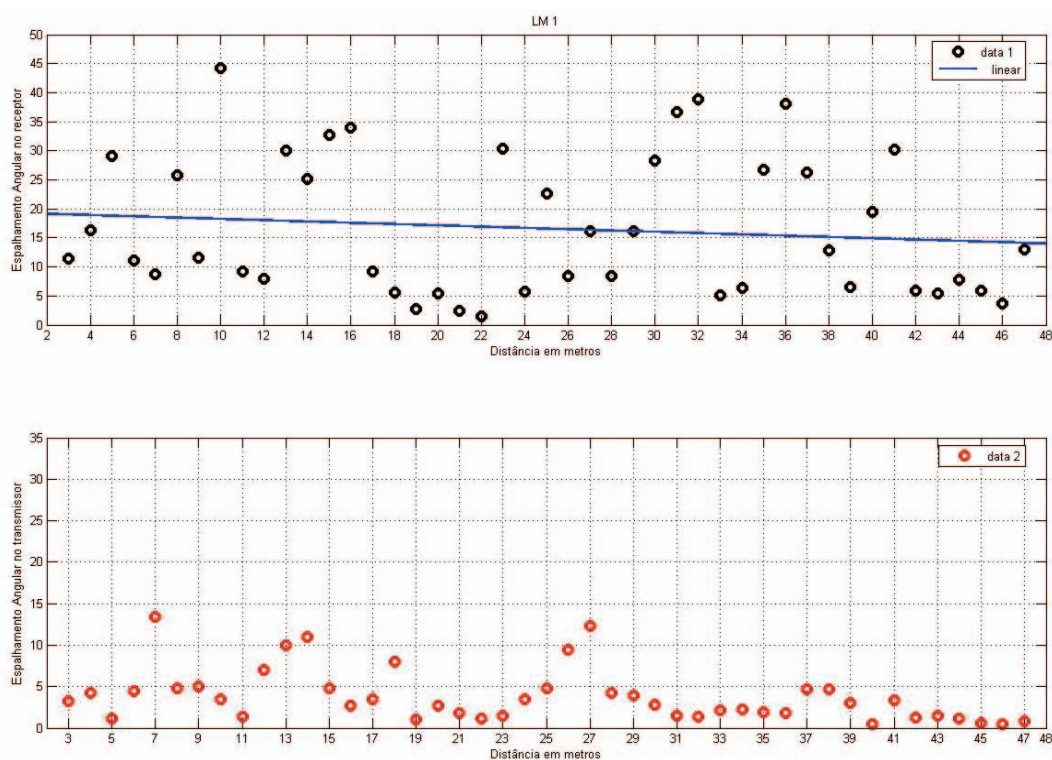


Figura 162 - Espalhamento angular no receptor e no transmissor no ambiente LM1

	$\bar{\phi}_{DOA}$	$\bar{\phi}_{DOD}$	$\bar{\Lambda}_{1-DOA} [^\circ]$	$\bar{\Lambda}_{1-DOD} [^\circ]$
CT1	2,13	6,73	24,04	12,06
CT2	0,47	5,96	24,40	9,92
CT3	-1,79	0,26	21,16	12,60
CT4	-3,75	3,03	17,53	10,39
CT5	-0,067	4,38	23,74	13,13
CT6	16,35	-2,77	24,70	25,48
CT7	14,58	-4,87	26,07	26,06
LS1	11,63	-7,12	25,45	4,24
LS2	-28,61	25,86	19,49	14,69
LS3	-35,99	21,43	27,90	26,45
LO1	6,08	-1,10	22,07	23,07
LO2	-4,63	14,35	23,20	12,13
CT2_1	1,84	-12,69	19,92	26,73
CT2_2	1,10	-12,65	20,51	26,91
CT2_3	1,29	-11,37	19,50	26,07
CT2_4	-0,60	-3,29	9,82	8,26
CT2_5	-3,16	0,42	23,16	2,90
LM1	0,05	-0,65	16,66	3,80
LM2	-1,75	-0,22	7,68	1,29
LM3	-4,22	1,50	13,30	2,91
LM4	-3,38	-3,20	32,11	10,35
LM5	21,53	40,52	30,58	28,61
BB1	-5,29	-6,88	16,68	12,26
BB2	-0,94	-22,90	32,46	13,76
BB3	27,33	-28,76	30,13	29,93
ID1	2,96	-15,47	26,64	18,25
ID2	-7,99	17,42	23,67	19,57
ID3	-4,06	-1,51	10,86	6,63
ID4	6,36	-12,05	31,71	20,13
ID5	-6,06	13,47	23,70	14,68

Tabela 29 - Ângulo de chegada médio, ângulo de saída médio, espalhamento angular médio no transmissor, espalhamento angular médio no receptor e maior pico

A Tabela 30 apresenta os valores de capacidade condicionada 10%, a capacidade média, os valores de espalhamento angular no transmissor e no receptor e o número efetivo de multipercursos médio. Pode-se confirmar na Tabela 30 que para a maioria dos ambientes valores pequenos de espalhamento angular (no transmissor ou no receptor) implicam em uma redução na capacidade.

Para os ambientes sem visada (CT1 a CT7, LS3, LO1 a LO3, BB1, BB2, ID1, ID2, ID4, ID5), onde o espalhamento angular no receptor variou aproximadamente de 17 a 32° e o no transmissor de 9 a 26°, a capacidade

condicionada variou de aproximadamente de 16 a 18 bits/s/Hz e a média variou entre 18 e 20 bits/s/Hz.

Para os ambientes com visada e visada parcial (LS1, LS2 e ID3), o espalhamento angular no receptor variou de aproximadamente 10 a 30°, o espalhamento angular no transmissor variou de aproximadamente 4 a 14° e a capacidade condicionada variou de aproximadamente de 14 a 15 bits/s/Hz e a média em torno de 17 bits/s/Hz.

Para os pontos com visada no Leme (LM2 e LM3) onde os espalhamentos angular no transmissor e no receptor eram pequenos, a capacidade foi pequena. Para os pontos LM4 e LM5 o espalhamento angular no receptor está entre 10° e 30°, no transmissor está em torno de 28°, e a capacidade condicionada foi de aproximadamente 17 bits/s/Hz e a média em torno de 20 bits/s/Hz.

O número efetivo de multipercursos médio também é apresentado Tabela 30. Pode-se observar na tabela quem nem sempre um espalhamento alto no transmissor e no receptor garante uma capacidade grande. Por exemplo, se analisarmos os ambientes LO1 e LO2 apenas pelos seus espalhamentos angulares, poderíamos dizer que LO1 proporcionaria uma maior capacidade. Porém, o número efetivo de multipercursos de LO1 é menor que seis, o que indica uma concentração de energia em apenas alguns multipercursos. Já para LO2 o número médio efetivo de multipercursos é de 14, indicando a possibilidade de mais multipercursos com potências equiprováveis, o que resulta em uma maior capacidade do que a obtida no ambiente LO1. O ambiente LS3 é um outro exemplo que apresenta um dos maiores espalhamentos angulares tanto para o transmissor como para o receptor. Porém, este ambiente apresenta um número efetivo de multipercursos médio baixo, que resulta em uma baixa capacidade.

	FE	Cap. Média (MHz)	$\bar{\Lambda}_{1-DOA}$ [°]	$\bar{\Lambda}_{1-DOD}$ [°]	NEM-médio
CT1	17,98	20,22	24,04	12,06	8
CT2	17,95	20,09	24,40	9,92	7
CT3	17,85	20,21	21,16	12,60	8
CT4	17,50	19,86	17,53	10,39	7
CT5	18,06	20,32	23,74	13,13	9
CT6	18,26	20,44	24,70	25,48	12
CT7	18,20	20,39	26,07	26,06	12
LS1	14,40	16,92	25,45	4,24	4
LS2	15,31	17,28	19,49	14,69	6
LS3	16,22	18,57	27,90	26,45	6
LO1	16,13	18,93	22,07	23,07	5
LO2	18,03	20,35	23,20	12,13	9
CT2_1	14,52	17,10	19,92	26,73	16
CT2_2	14,96	17,67	20,51	26,91	14
CT2_3	14,12	16,83	19,50	26,07	15
CT2_4	11,23	14,03	9,82	8,26	12
CT2_5	11,68	13,36	23,16	2,90	10
LM2	9,92	11,60	7,68	1,29	2
LM3	12,26	14,58	13,30	2,91	3
LM4	17,70	19,66	32,11	10,35	11
LM5	17,78	20,04	30,58	28,61	13
BB1	17,42	19,70	16,68	12,26	7
BB2	17,32	19,60	32,46	13,76	11
BB3	17,20	19,44	30,13	29,93	13
ID1	17,27	19,71	26,64	18,25	7
ID2	16,72	19,96	23,67	19,57	8
ID3	14,62	17,20	10,86	6,63	3
ID4	17,74	20,15	31,71	20,13	8
ID5	17,52	19,92	23,70	14,68	7

Tabela 30 - Capacidade condicionada 10%, capacidade média, espalhamento de retardo no transmissor, espalhamento de retardo no receptor e número efetivo de multipercurso para os ambientes medidos

Analisando os valores dos espalhamentos angulares da Tabela 30, algumas conclusões obtidas nas seções anteriores são confirmadas:

- O espalhamento angular pequeno no receptor ajuda o agrupamento dos multipercursos significativos ou indica a predominância de apenas um multipercurso. A capacidade do canal será reduzida, porém, o quanto será reduzida ainda dependerá do espalhamento angular no transmissor.
- O espalhamento angular pequeno no transmissor indica a predominância de apenas um multipercurso. Assim, no máximo um ganho de

diversidade na recepção será possível. Isto é comprovado pelos gráficos de perfil de potência angular DOD.

- Um espalhamento angular grande no transmissor e no receptor nem sempre pode garantir uma capacidade grande. É importante analisar outros fatores como o número efetivo de multipercurso.

• **Considerações Finais**

Nesta seção foram apresentados os resultados da caracterização do canal realizada com um sistema de medidas com múltiplas antenas no transmissor e no receptor. Parâmetros de dispersão temporal e espacial do canal foram extraídos dos dados medidos. Com esses parâmetros, um estudo sobre a influência deles na capacidade foi realizado.

Os perfis de potência de retardos foram obtidos através dos parâmetros de retardo e potência estimados pelo algoritmo SAGE. Para comprovar a eficiência do algoritmo SAGE para a estimação dos parâmetros, o perfil de potência de retardos obtido da transformada de Fourier da função de transferência foi também calculado. Pode ser visto um bom casamento entre as duas técnicas. Foi visto que todos os perfis de potência de retardos seguem aproximadamente um decaimento exponencial. Foi constatada uma grande variação do perfil de potência de retardos ao longo do grid, o que confirma a presença de vários espalhadores no ambiente.

O número de multipercursos dos ambientes medidos foi determinado. Para os ambientes com visada e visada parcial, o número de multipercursos variou aproximadamente de 5 a 13, e para o ambiente sem visada o número de multipercurso variou aproximadamente de 18 a 46. A partir dos multipercursos estimados, o número efetivo de multipercursos foi determinado. Foi observado que o número efetivo de multipercurso grande (maior que seis) implica no espalhamento da energia e que o número efetivo de multipercurso pequeno implica na concentração da energia em apenas alguns multipercursos. Uma análise da quantidade de multipercurso e do número efetivo de multipercursos com as capacidades condicionada e média foi realizada. A primeira conclusão importante que se tira é que nem sempre uma grande quantidade de multipercurso equivale a ter uma grande capacidade. Analisando o número efetivo de multipercursos

médio, foi comprovado que as maiores capacidades calculadas possuíam número efetivo de multipercurso maior que seis.

Os parâmetros de dispersão temporal foram calculados. Nos ambientes medidos e sem visada o espalhamento de retardo variou de aproximadamente 11 a 18 ns para distâncias entre o transmissor e receptor variando aproximadamente de 4 a 18 metros. Para estes ambientes a banda de coerência 0,7 variou 7 a 18 MHz. Para os ambientes com visada e visada parcial o espalhamento variou de aproximadamente 8 a 9 ns para distâncias 4 a 8 metros. Para estes ambientes a banda de coerência 0,7 variou de 14 a 21 MHz. Um estudo sobre o efeito da banda de coerência do canal e a capacidade para um canal seletivo foi realizado. Através deste estudo, foi possível explicar as poucas melhoras na capacidade condicionada para as larguras de 5, 10 e 50 MHz, se comparada com o canal faixa-estreita para os ambientes medidos.

Uma análise espacial e espaço-temporal do canal foi realizada. Um estudo sobre as seguintes relações foi realizado: perfil de potência azimutal (DOA e DOD), retardo versus DOA e DOD, e DOA versus DOD. Analisando essas relações foi possível observar as grandes diferenças entre os ambientes com visada e visada parcial dos ambientes sem visada. Foram identificados multipercursos com potências equivalentes e suas relações no domínio espacial. O agrupamento dos multipercursos com potências equivalentes no transmissor e no receptor foi observado, o que indica uma provável redução da capacidade. Essas relações confirmam a importância da modelagem bi-direcional.

Foi adotado o princípio da reciprocidade do canal para estimar alguns parâmetros da dispersão espacial. Foi observado que o espalhamento angular era bem maior no receptor do que no transmissor, confirmando o que já tinha sido observado nos gráficos de perfil de potência angular. Foi possível perceber que o espalhamento angular para ambientes com visada é menor do que para os ambientes sem visada. Para os ambientes sem visada o espalhamento angular no receptor variou aproximadamente de 17 a 32° e no transmissor variou aproximadamente de 9 a 26°. Para os ambientes com visada e visada parcial o espalhamento angular no receptor variou aproximadamente de 10 a 30° e no transmissor variou aproximadamente de 4 a 14°. Foi avaliado o comportamento do espalhamento angular do transmissor e no receptor em corredor. Foi verificado que, com o aumento da distância entre o transmissor e o receptor, o espalhamento

angular no transmissor vai reduzindo. O espalhamento angular no receptor, por outro lado, apresenta valores sempre bem superiores aos obtidos no espalhamento angular no transmissor.

Por fim, foi realizado um estudo sobre a relação entre o espalhamento angular e as capacidades condicionada e média. Foi confirmado que valores pequenos de espalhamento angular (no transmissor ou no receptor) implicam em uma redução na capacidade. Porém, foi mostrado que outros parâmetros devem ser analisados em conjunto com o espalhamento angular para se obter conclusões mais precisas, pois nem sempre um alto valor do espalhamento angular indica probabilidade de ter uma alta capacidade.