

5 Implementação e Análise de Resultados

5.1. Introdução

Neste Capítulo, serão feitas a descrição de todo o procedimento utilizado para o cálculo da capacidade do canal MIMO, a apresentação dos resultados e a sua comparação com dados disponíveis em artigos da literatura especializada.

A base de dados de edificações foi fornecida pelo Instituto Pereira Passos da Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro (IPP), conforme citado anteriormente. Optou-se trabalhar com os bairros de Copacabana e Ipanema, por apresentarem uma geometria regular, facilitando assim a comparação com diversos artigos publicados [20,21].

Conforme apresentado no Capítulo 3, o programa de traçado de raios no plano horizontal foi usado para a obtenção dos raios que partem do transmissor e, efetivamente, atingem o receptor. Como a grande quantidade de edificações contidas nesses bairros seria um fator limitante ao uso do programa, decidiu-se representar cada conjunto de edificações que forma uma quadra pela respectiva cobertura convexa. Entende-se por cobertura convexa [22] o menor polígono convexo que envolve todos os vértices que formam as edificações.

As figuras 5.1 e 5.2 apresentam as regiões dos bairros de Copacabana e Ipanema que foram utilizadas no trabalho:

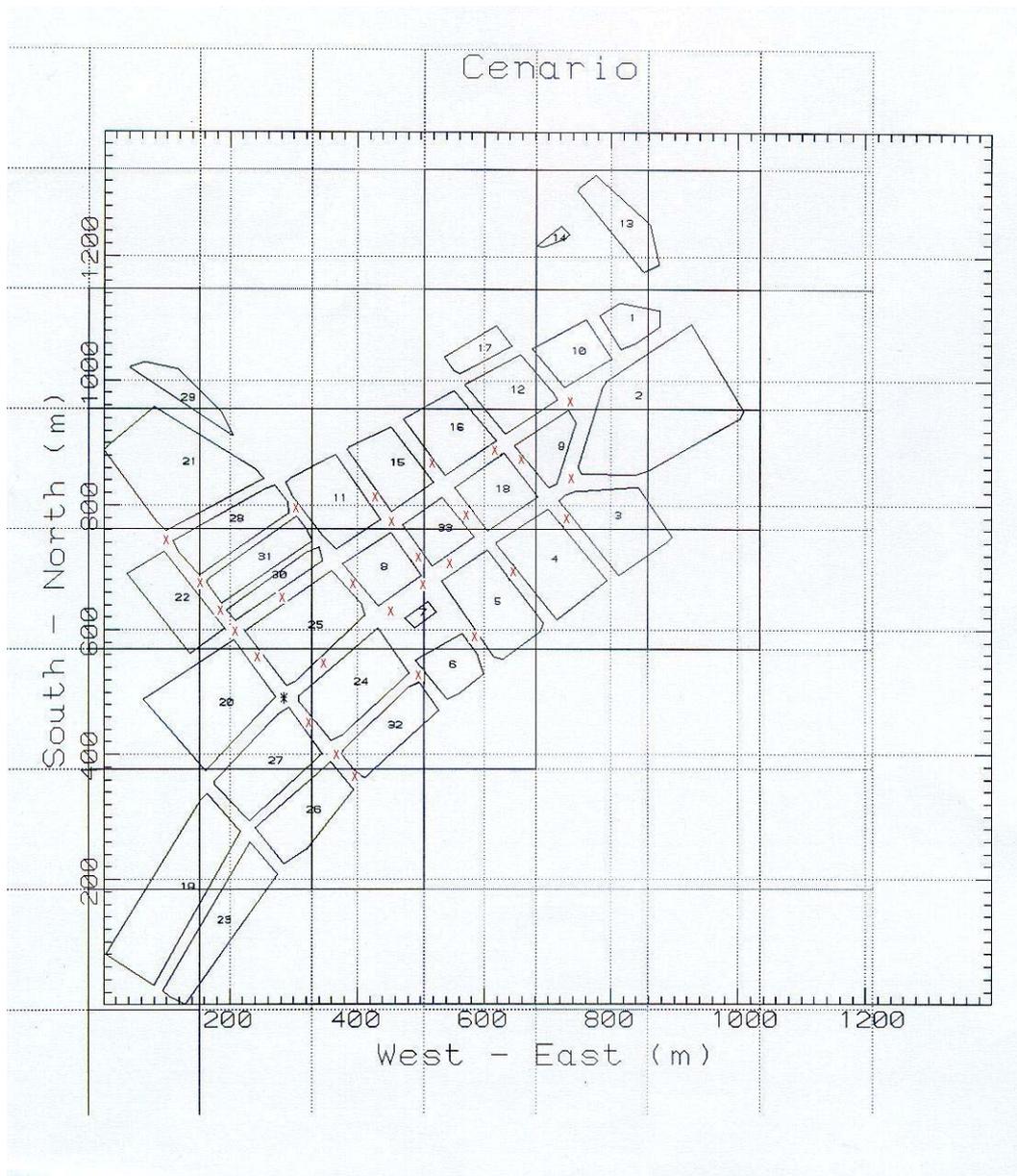


Figura 5.1: Região de Copacabana utilizada nos cálculos, coberturas convexas das edificações contidas em cada quadra e pontos de recepção.

Os pontos que aparecem assinalados com X correspondem aos pontos de recepção estudados e o ponto assinalado com * corresponde ao ponto de transmissão.

Para cada ponto de recepção, foi obtido um arquivo de saída do programa de traçado de raios com todos os raios que partem do transmissor e atingem o receptor.

Cenário

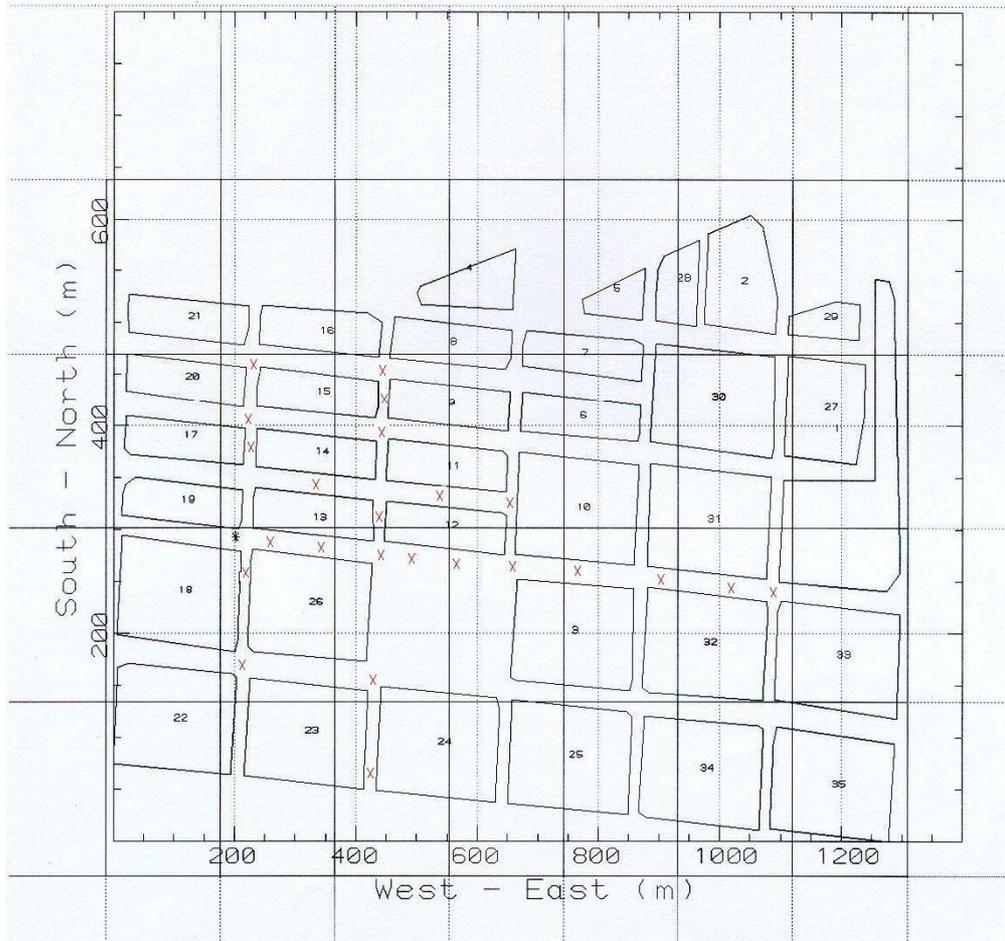


Figura 5.2: Região de Ipanema utilizada nos cálculos, coberturas convexas das edificações contidas em cada quadra e pontos de recepção.

Em cada bairro, foram selecionados vários pontos de recepção em visibilidade (LOS) e na ausência de visibilidade (NLOS), num total de 52 pontos de observação. Os pontos selecionados podem ser observados nas Figuras 5.1 e 5.2.

A partir das coordenadas do transmissor e do receptor, o programa de traçado de raios retorna um arquivo de saída que apresenta o conjunto de todos os raios que atingem o receptor. Conforme já citado, o programa de traçado de raios usa o máximo de quatro interações para cada raio (difração ou reflexão). Para diminuir o número de raios com amplitude desprezível que o programa determina, o número de difrações consecutivas foi limitado a dois.

Para cada raio, o programa retorna o valor da atenuação sofrida no percurso TX-RX e o valor do retardo.

Para a simulação da matriz de transferência do canal H e para o cálculo da capacidade do canal MIMO, desenvolveu-se um programa em linguagem FORTRAN (MimoTR). Este programa determina a distribuição cumulativa complementar da capacidade do canal entre o conjunto de antenas transmissoras (considerado fixo) e conjunto de antenas receptoras (situado em cada ponto de observação). O programa utiliza, como arquivo de entrada, o arquivo de saída do programa de traçado de raios.

Os raios contabilizados para o cálculo da capacidade do canal correspondem àqueles que apresentam atenuação acima de uma determinada margem em dB em relação ao raio mais intenso, especificada como parâmetro de entrada no programa MimoTR.

Em cada passo da simulação, o programa MimoTR calcula inicialmente, para cada raio, o coeficiente complexo de espalhamento γ_p caracterizado na equação (4.3). Supondo que a amplitude de cada raio é relativamente estável, mas que sua fase varia rapidamente, adiciona uma fase aleatória uniformemente distribuída no intervalo $(-\pi, \pi)$ à do coeficiente complexo de espalhamento γ_p . Em seguida, multiplica o resultado por todas as combinações possíveis dos fatores apresentados na equação (4.3) para determinar a contribuição do raio para a matriz H. O procedimento descrito é repetido de forma cumulativa para todos os raios. Finalmente, ainda no mesmo passo da simulação, a capacidade é determinada por intermédio da equação (4.4) e o resultado utilizado para atualizar o histograma correspondente.

Foram utilizados 10000 passos de simulação para determinar a distribuição cumulativa complementar da capacidade do canal.

Além da distribuição cumulativa complementar da capacidade do canal, o arquivo de saída do programa MimoTR apresenta os valores médios do retardo e dos ângulos de partida e de chegada, assim como os valores dos correspondentes desvios padrões.

Pode-se selecionar no programa se o cálculo da capacidade será realizado com controle da potência transmitida ou não. Adicionalmente, pode-se simular um canal Rayleigh.

O controle de potência garante a manutenção de um valor determinado para a relação sinal-ruído em qualquer ponto de observação. Quando não exercido, a potência do sinal desejado foi determinada pela soma das potências dos raios e a potência de ruído térmico foi obtida supondo o fator de ruído de 8 dB e a largura da faixa de transmissão de 30 kHz. A frequência de operação é de 1,9 GHz. Todas as simulações nesta dissertação supõem um ambiente microcelular, no qual as alturas do transmissor e dos receptores são muito inferiores às das edificações.

Não foram considerados os efeitos do acoplamento mútuo entre as antenas dos conjuntos transmissor e receptor. Adicionalmente, foi suposto que a potência transmitida foi uniformemente distribuída entre as antenas do conjunto transmissor.

Para as simulações, variou-se a potência de transmissão do conjunto transmissor, o número de antenas do conjunto transmissor e receptor (sendo que o número do conjunto transmissor é sempre igual ao número do conjunto receptor) e a relação sinal-ruído na recepção. Também foram realizadas simulações supondo um canal Rayleigh.

5.2. Canal Rayleigh

O canal Rayleigh supõe a existência de um grande número de raios entre o transmissor e o receptor, independentes e identicamente distribuídos (iid). Com isso, a matriz do canal Rayleigh é complexa e Gaussiana, com média zero e variância unitária. Logo:

$$H_{ij} = \text{Normal}\left(0, \frac{1}{\sqrt{2}}\right) + \sqrt{-1} \cdot \text{Normal}\left(0, \frac{1}{\sqrt{2}}\right) \quad (5.1)$$

Os resultados gráficos a serem apresentados correspondem às funções distribuição cumulativa complementar (ccdfs), onde se pode melhor observar o crescimento na capacidade do canal.

As figuras 5.3 e 5.4 apresentam as funções distribuição cumulativa complementar para o canal Rayleigh supondo, respectivamente, 2 e 4 antenas na transmissão e na recepção. Foram utilizados, em ambos os casos, os valores de 18 dB e 21 dB para a relação sinal-ruído SNR.

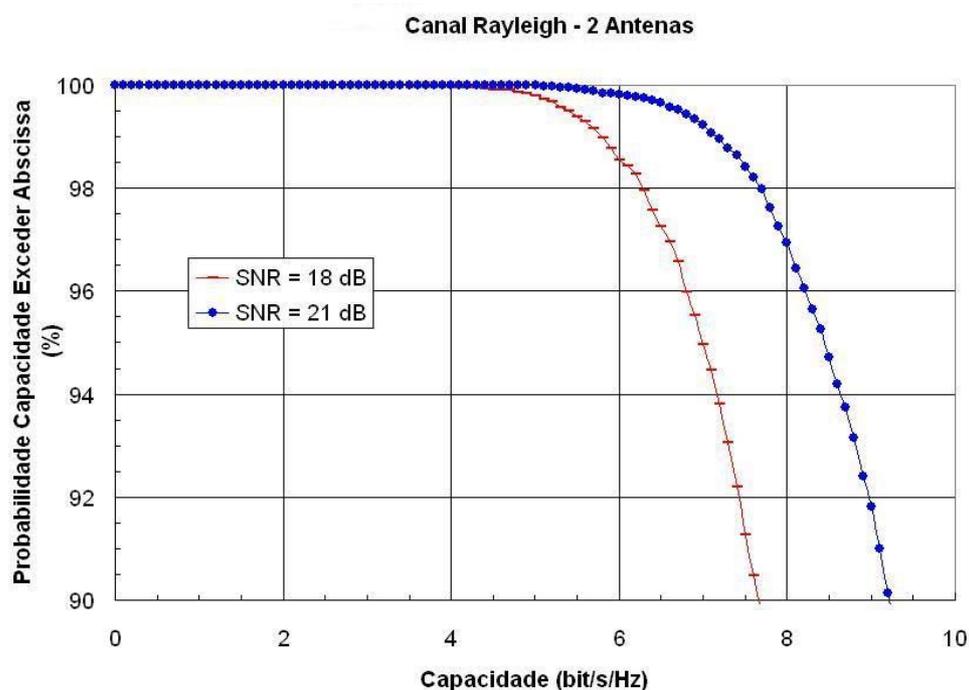


Figura 5.3: Distribuição Cumulativa Complementar da Capacidade do Canal Rayleigh para 2 Antenas com valores de SNR iguais a 18 dB e 21 dB.

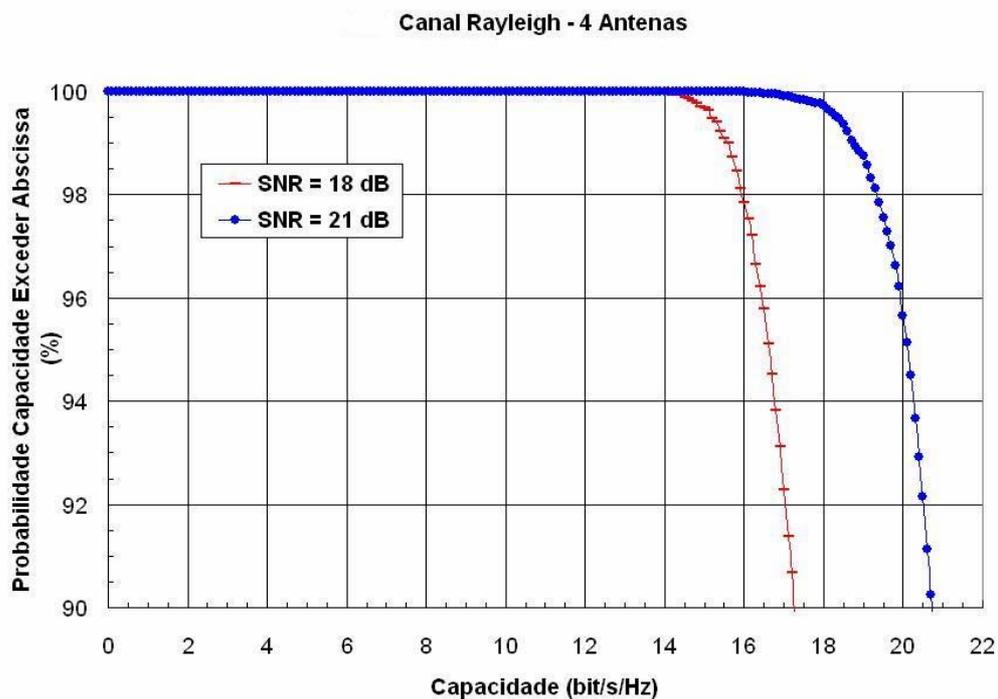


Figura 5.4: Distribuição Cumulativa Complementar da Capacidade do Canal Rayleigh para 4 Antenas com valores de SNR iguais a 18 dB e 21 dB.

Independentemente do número de antenas transmissoras, a potência total radiada foi mantida constante.

Observa-se que, para um mesmo valor de SNR, a maior capacidade é atingida com o uso de mais antenas na transmissão e recepção. Adicionalmente, quanto maior a SNR, maior a capacidade atingida.

A capacidade excede os valores de 9,3 bit/s/Hz e 20,7 bit/s/Hz em 90% dos casos para SNR igual a 21 dB e para 2 e 4 antenas, respectivamente.

Na figura 5.5, observa-se as funções distribuição cumulativa complementar da capacidade do canal Rayleigh para 2, 4 e 8 antenas, mantendo fixa a relação sinal-ruído (SNR) em 21 dB.

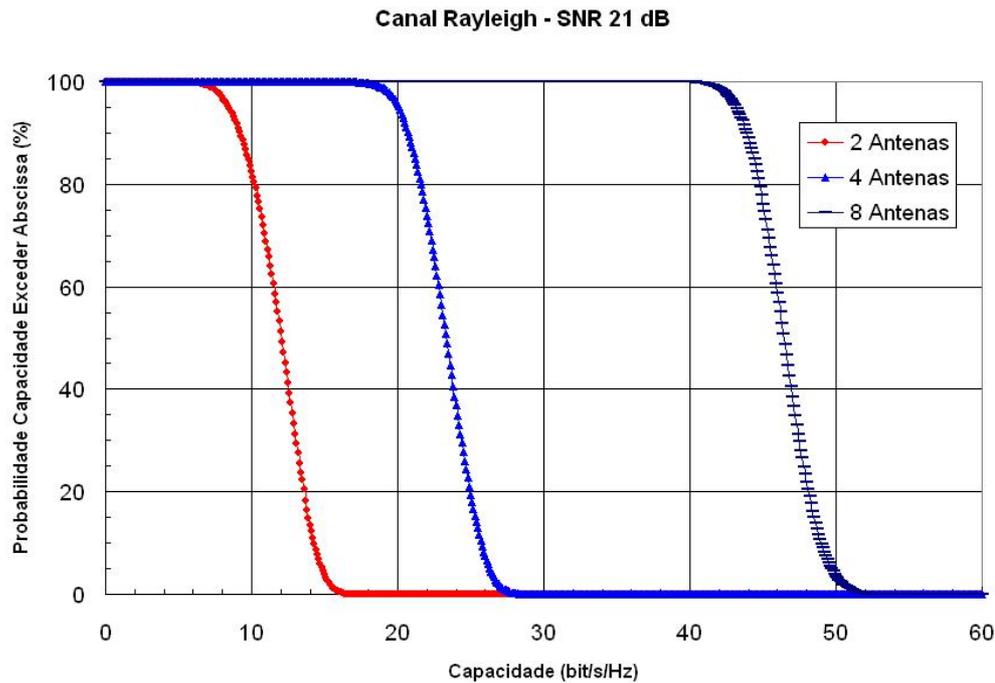


Figura 5.5: Distribuição Cumulativa Complementar da Capacidade do Canal Rayleigh para 2, 4 e 8 Antenas com valor de SNR igual e 21 dB.

Nas figuras apresentadas acima, observa-se o rápido decaimento da função, que independe do número de antenas. Isso significa que há aproximadamente a mesma variação na capacidade atingida em 90% e 10% dos casos para 2, 4 e 8 antenas.

A tabela 5.1 abaixo resume os resultados apresentados graficamente:

Capacidade Excedida	2 antenas	4 antenas	8 antenas
90%	9,0	20,8	44,0
10%	14,3	25,9	49,2
Variação	5,3	5,1	5,2

Tabela 5.1: Capacidade excedida em 90% e 10% dos casos para canal Rayleigh

Todas as curvas e os valores apresentados acima estão em conformidade com o artigo de Foschini e Gans [15], um dos artigos pioneiros sobre transmissão utilizando múltiplas antenas e que tem servido de base para estudos posteriores. Conclui-se, também, que o conhecimento dos valores de capacidade excedente para 90% e 10% dos casos é suficiente para caracterizar adequadamente as cdfs da capacidade do canal, devido ao comportamento regular de todas as curvas apresentadas nas Figuras 5.3 a 5.5.

5.3. Canal Determinístico

Conforme escrito anteriormente, consegue-se caracterizar bem o canal MIMO apresentando apenas os valores de capacidade excedida para 90% e 10% dos casos analisados.

Primeiramente, o estudo do canal MIMO foi feito através da variação da relação sinal-ruído (SNR) e sua relação com a capacidade para pontos LOS e NLOS. Foi estudado o bairro de Copacabana, considerando 4 antenas na transmissão e na recepção. Para tanto, a relação sinal-ruído foi variada em múltiplos de 5 dB. Em seguida, para cada valor de SNR (mantido fixo), foram determinadas as cdfs para todos os pontos de observação.

Os resultados correspondentes aos pontos LOS e NLOS foram analisados separadamente.

A figura 5.6 mostra a capacidade excedida em 90% dos casos. Mostra, ainda, as capacidades do canal Rayleigh para os valores de SNR iguais a 18 dB e 21 dB.

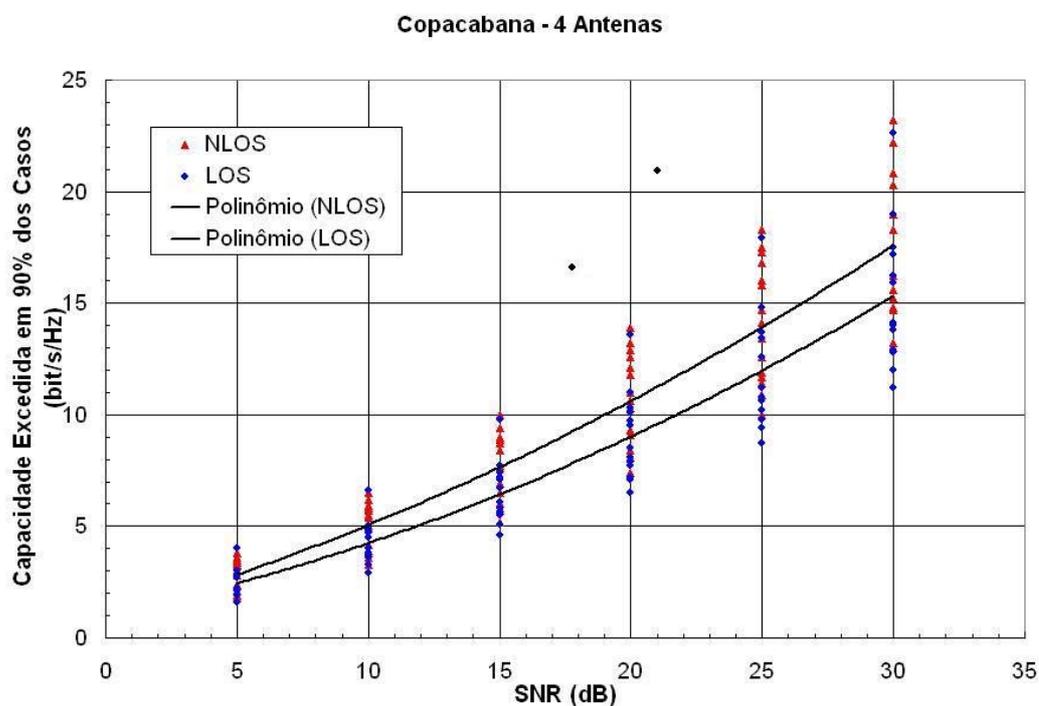


Figura 5.6: Capacidade Excedida para 90% dos casos em Copacabana, 4 antenas

É evidente na figura 5.6 que a capacidade do canal determinístico é inferior à do canal Rayleigh para o mesmo valor de SNR.

Como se pode observar, os pontos em NLOS apresentam, em média, uma maior capacidade em relação aos pontos de LOS, para o mesmo valor de SNR. Este resultado pode ser explicado pelo maior espalhamento sofrido pelos raios para atingir o receptor em situações NLOS. Como não há uma componente predominante (raio direto) para a composição do sinal recebido, a composição dos vários raios espalhados se aproxima mais de uma distribuição Rayleigh. Assim, como o canal MIMO se aproveita do grande espalhamento sofrido pelos raios para conseguir maior capacidade, os pontos em NLOS apresentam capacidade maior que as correspondentes para os pontos em LOS, para o mesmo valor de SNR.

A figura 5.7 apresenta a capacidade excedida para 10% dos casos em Copacabana:

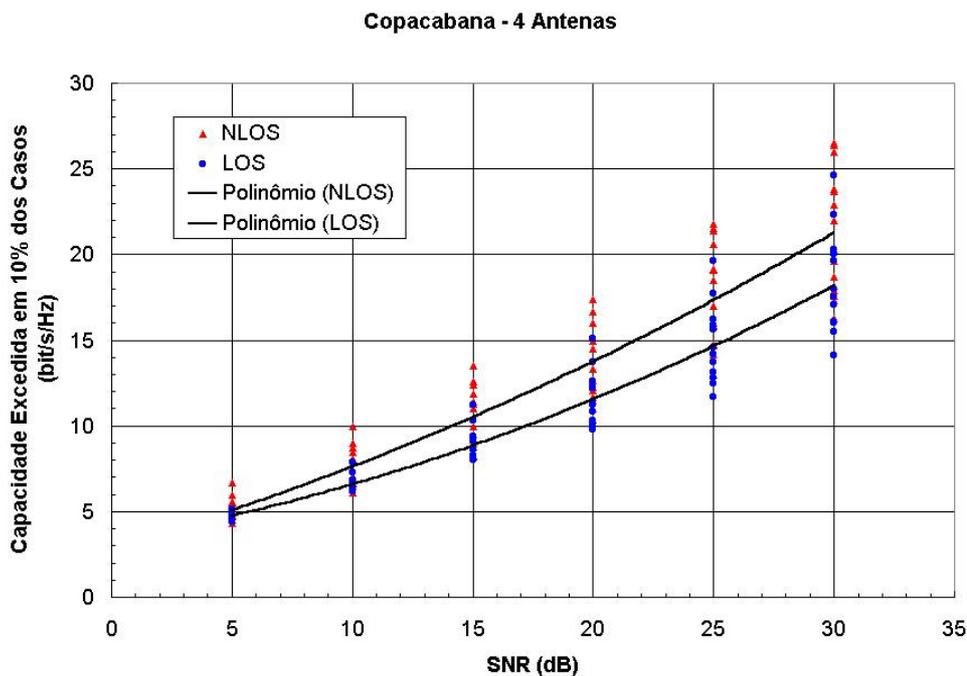


Figura 5.7: Capacidade Excedida em 10% dos casos em Copacabana, 4 antenas

Como esperado, a capacidade é maior nos pontos em NLOS.

Para um valor de relação sinal-ruído igual a 20 dB, compatível com os critérios de qualidade adotados pelos padrões atuais, têm-se, aproximadamente, 9,1 bit/s/Hz para 90% dos casos para pontos em LOS e 10,9 bit/s/Hz para pontos em NLOS para 90% dos casos. Considerando a capacidade excedida em 10% dos casos, têm-se, aproximadamente, 11,1 bit/s/Hz para pontos em LOS e 13,5 bit/s/Hz para pontos em NLOS.

Observa-se, assim, que a capacidade excedida para pontos LOS apresenta um decaimento mais rápido do que para pontos NLOS.

Os valores apresentados para a capacidade excedida estão consistentes com as medidas realizadas em Manhattan [21], utilizando um conjunto de antenas de abertura (slot), cujo acoplamento mútuo foi medido e considerado desprezível. Naqueles resultados também se observa maior capacidade para os pontos NLOS, para um valor fixo de SNR (10 dB).

Entretanto, é importante chamar a atenção para os resultados apresentados por Dandekar e Heath [23], que estudam os efeitos do acoplamento mútuo entre os elementos dos conjuntos de antenas por intermédio de simulações em computadores representativas da cidade de Filadélfia, PA, EUA. Na ausência de acoplamento mútuo, os diagramas azimutais de dipolos verticais são isotrópicos e os resultados apresentados mostram capacidades para pontos em LOS superiores às capacidades para pontos em NLOS, mantida a relação sinal-ruído. Por outro lado, o acoplamento mútuo introduz diretividade nos mesmos diagramas e cada elemento do conjunto de antenas passa a apresentar ângulos preferenciais diferentes. Esta separação angular favorece o aumento da capacidade. Neste caso, os resultados apresentados mostram capacidades para pontos NLOS superiores às capacidades para pontos LOS, mantida a relação sinal-ruído, tal como nas figuras 5.6 e 5.7. Estes autores concluíram, então, que, mantidos constantes as demais condições, a presença de acoplamento mútuo aumenta a eficiência espectral.

É também importante ressaltar que Dandekar e Heath [23] utilizaram uma medida para a capacidade diferente da utilizada aqui, de modo que os resultados obtidos talvez não sejam diretamente comparáveis.

Portanto, as diferenças apontadas e suas possíveis causas devem ser objeto de estudos adicionais.

Também foi analisado o comportamento da capacidade atingida pelo canal MIMO em função da distância, não fixando o valor da relação sinal-ruído.

A figura 5.8 apresenta a capacidade excedida para 90% dos casos para pontos em LOS em Copacabana com 4 antenas na transmissão e na recepção.

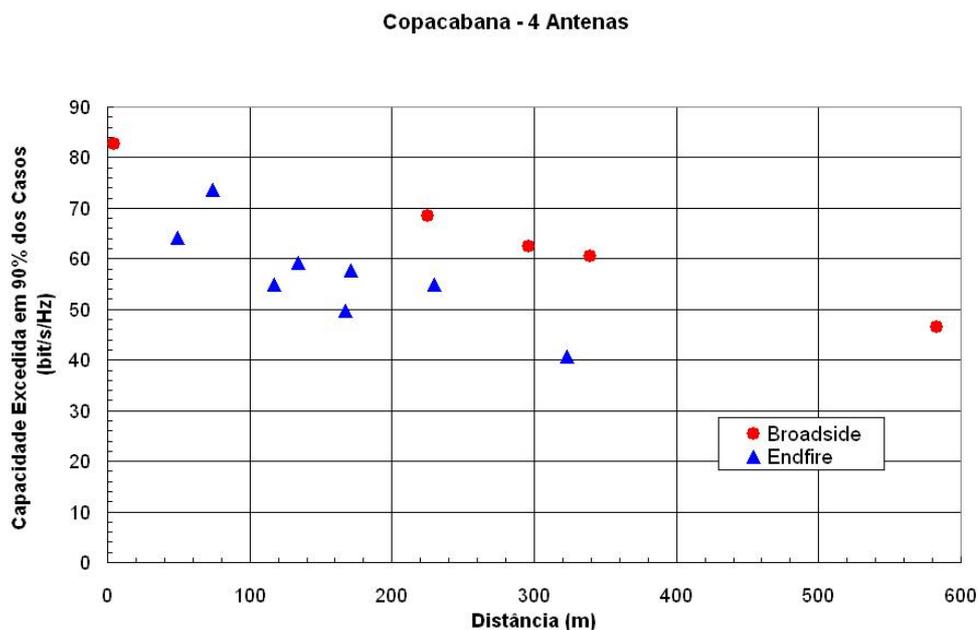


Figura 5.8: Capacidade Excedida em 90% dos casos em função da distância para pontos em LOS.

Como esperado, a capacidade decai em função da distância para os pontos em LOS.

Consistentemente com as medidas realizadas em Manhattan [21], a direção *broadside* (isto é, preferencialmente normal à linha de base dos elementos do conjunto) apresenta capacidade maior que a direção *endfire* (isto é, preferencialmente alinhada com linha de base dos elementos do conjunto).

A figura 5.9 apresenta os valores de capacidade atingidos em 90% dos casos para pontos NLOS também em Copacabana com 4 antenas na transmissão e na recepção.

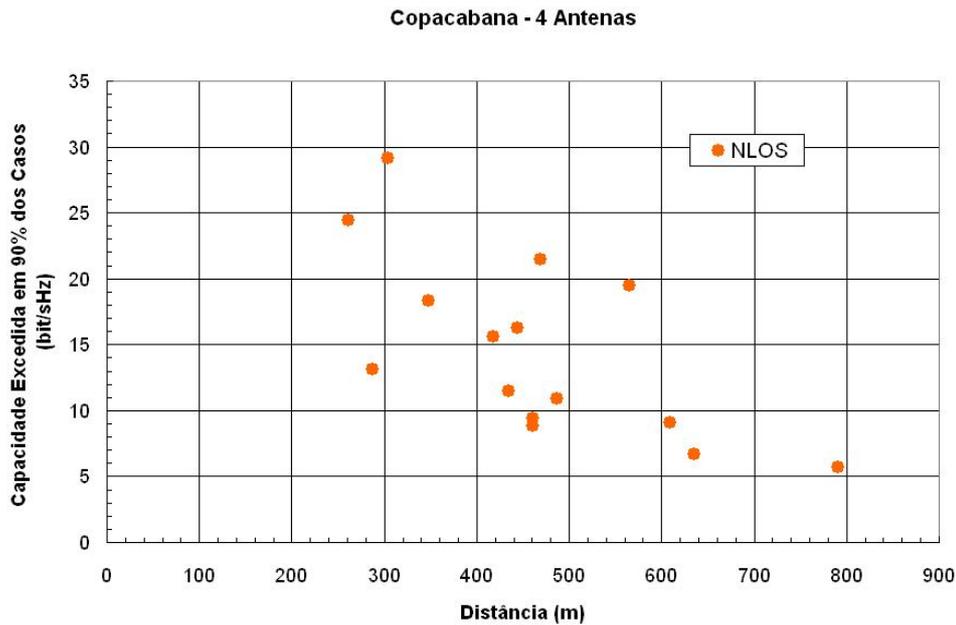


Figura 5.9: Capacidade Excedida para 90% dos casos em função da distância para pontos em NLOS.

Para o caso NLOS, observa-se também um decaimento com relação à distância.

As figuras 5.8 e 5.9 apresentadas acima não fixaram o valor da relação sinal-ruído. Os pontos em LOS apresentam maior capacidade que os pontos em NLOS para a mesma distância, já que possuem maior relação sinal-ruído (SNR).

Em seguida, analisou-se o comportamento da capacidade do canal, mantendo-se fixa a relação sinal-ruído em 21 dB para o bairro de Ipanema com 4 antenas na transmissão e na recepção.

A figura 5.10 apresenta a capacidade excedida em 90% dos casos para pontos em LOS em função da distância.

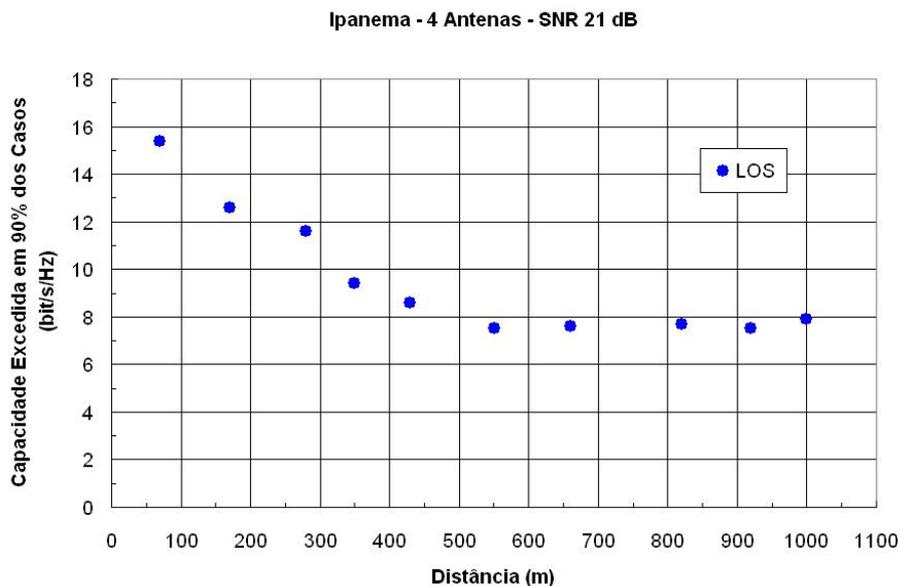


Figura 5.10: Capacidade Excedida em 90% dos casos em função da distância para pontos em LOS.

Pode-se observar que a capacidade diminui com a distância até um determinado valor, quando torna-se constante. Como o comportamento apresentado no bairro de Ipanema parecia atípico, decidiu-se apresentar a capacidade atingida em função da distância, fixando-se a relação sinal-ruído em 21 dB para o bairro de Copacabana com 4 antenas na transmissão e na recepção.

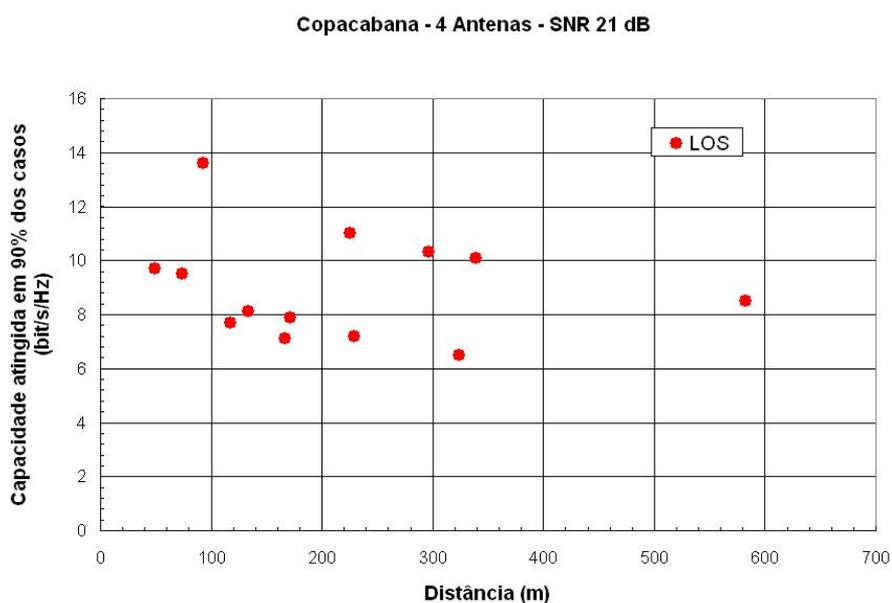


Figura 5.11: Capacidade Excedida em 90% dos casos em função da distância para pontos em LOS

Analisando o bairro de Copacabana, verificou-se que o comportamento notado no bairro de Ipanema não era padrão. Concluindo que, apesar da dispersão, mantendo-se a relação sinal-ruído constante, a capacidade excedida em 90% dos casos não varia com a distância, aproximando-se do valor constante de 9 bit/s/Hz. Portanto, o comportamento apresentado pela capacidade em função da distância, fixando-se a relação sinal-ruído para o bairro de Ipanema deve ser objeto de estudos adicionais.

A figura 5.12 apresenta a capacidade excedida em 90% dos casos também para o bairro de Ipanema com 4 antenas na transmissão e na recepção para pontos em NLOS com relação sinal-ruído fixa em 21 dB.

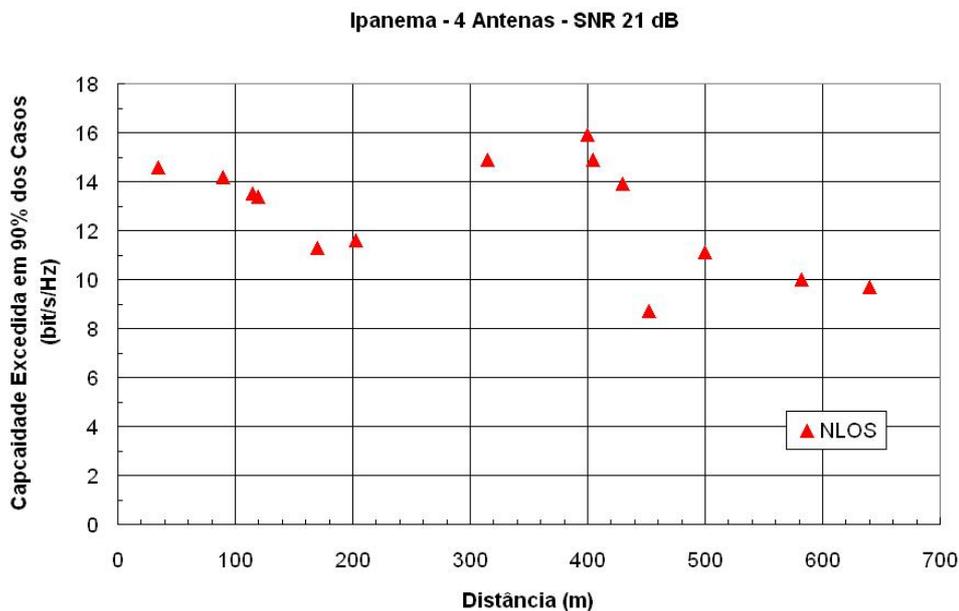


Figura 5.12: Capacidade Excedida em 90% dos casos em função da distância para pontos em NLOS.

Apesar da dispersão, observa-se que mantendo a relação sinal-ruído constante, a capacidade excedida em 90% dos casos não varia com a distância. Ela aproxima-se do valor constante de 12 bit/s/Hz.

Novamente observa-se que para pontos em NLOS a capacidade atingida é maior do que para pontos em LOS, mantendo-se fixa a relação sinal-ruído para uma mesma distância.

Posteriormente, analisou-se o comportamento da capacidade, variando-se a potência de transmissão em um determinado ponto de recepção.

Utilizando as mesmas configurações de Valenzuela et al. [20], ou seja, 4 antenas na transmissão com 3λ de espaçamento entre elas e 4 antenas na recepção com 1λ de espaçamento, e variando a potência de transmissão em 17 dBm, 20 dBm e 23 dBm, levantou-se a função distribuição cumulativa complementar para um ponto qualquer de recepção no bairro de Ipanema.

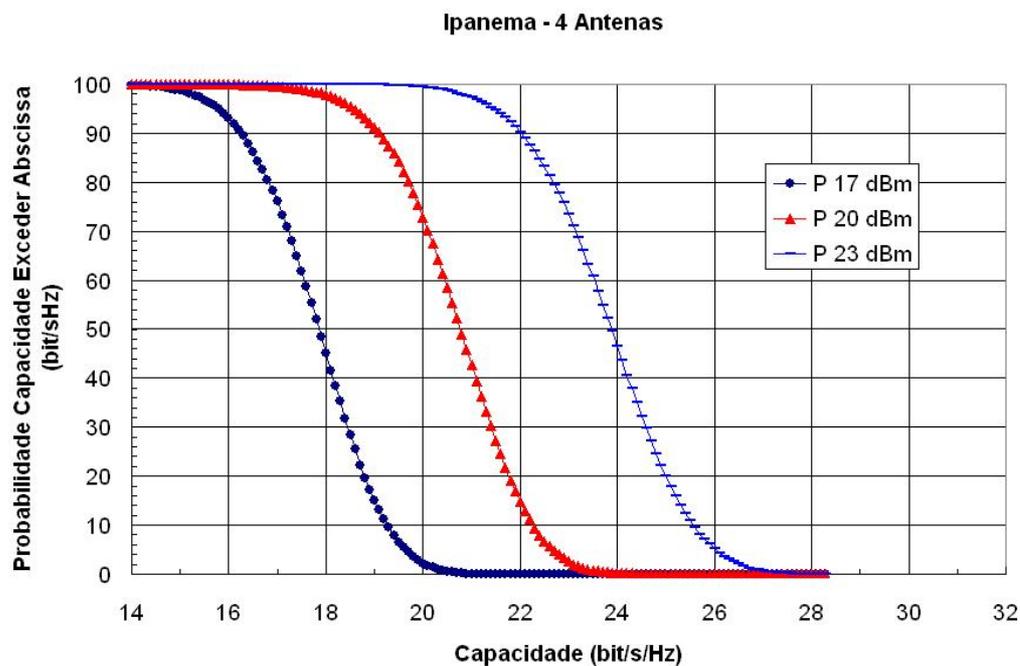


Figura 5.13: Função distribuição cumulativa complementar da capacidade em função da potência de transmissão.

A capacidade encontrada para 95% dos casos foi de, aproximadamente, 15,7 bit/s/Hz para a potência de 17 dBm, 18,5 bit/s/Hz para 20 dBm e 21,5 bit/s/Hz para 23 dBm.

Os valores encontrados estão de acordo com os apresentados por Chuah et al. [20] que encontraram, respectivamente, 15,5 bit/s/Hz, 18,3 bit/s/Hz e 21,3 bit/s/Hz. Eles também utilizam um software de traçado de raios em 3 dimensões, chamado Wise para simular a propagação na cidade de Rosslyn na Virgínia, EUA.

A capacidade média encontrada em 95% dos casos, considerando todos os pontos de recepção, para a potência de 23 dBm ficou em 26,04 bit/s/Hz que é consistente com [20], considerando as limitações existentes em um traçado de raios em duas dimensões.

Pode-se observar que um crescimento de 3 dB na potência de transmissão provoca um crescimento linear na capacidade de 3 bit/s/Hz, aproximadamente.

Com isso, conclui-se que, apesar de o programa de traçado de raios utilizado trabalhar com somente duas dimensões, apresenta resultados consistentes com os provenientes de outros cuja aplicabilidade é, potencialmente, menos restrita.

5.4. Características Espaciais

Para finalizar a análise do canal MIMO, estudou-se o comportamento do desvio padrão do ângulo de recepção, do ângulo de transmissão, ambos definidos a partir da normal à linha de base do respectivo conjunto de elementos, e do retardo, sendo este último relacionado diretamente com o *rms delay spread*.

Primeiramente, analisou-se o bairro de Ipanema com 4 antenas na transmissão e na recepção, fixando-se a relação sinal-ruído em 21 dB. Foi estudado o comportamento do desvio padrão do ângulo de recepção em função da distância e o comportamento do desvio padrão do retardo em função da distância, ambos para pontos em LOS e NLOS.

A figura 5.14 apresenta o desvio padrão do ângulo de recepção em função da distância para o bairro de Ipanema com pontos em LOS.

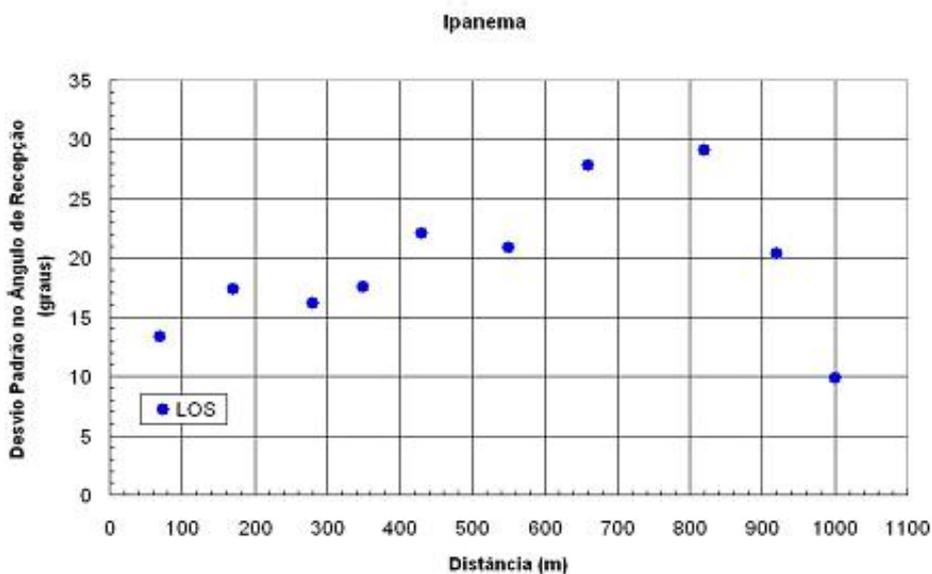


Figura 5.14: Desvio padrão do ângulo de recepção em função da distância para pontos em LOS.

Observa-se que houve um nítido crescimento do desvio padrão do ângulo de recepção em função da distância, indicando um maior espalhamento dos raios que compõe o sinal, exceto para os dois últimos pontos.

A figura 5.15 apresenta o desvio padrão do retardo em função da distância para o pontos em LOS em Ipanema.

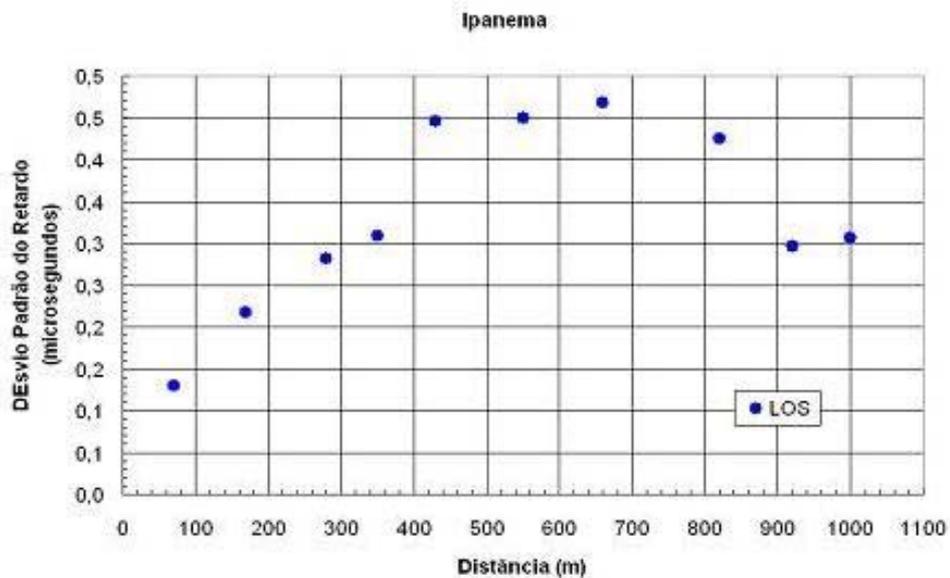


Figura 5.15: Desvio padrão do retardo em função da distância para pontos em LOS.

Observa-se um crescimento inicial no desvio padrão do retardo para depois se tornar constante e decrescer para os dois últimos pontos.

Os crescimentos apresentados nas figuras 5.14 e 5.15 correspondem aos pontos de recepção situados na Praça Nossa Senhora da Paz no bairro de Ipanema. Observa-se em ambas as figuras que há uma canalização dos raios que partem do transmissor, situado à Rua Visconde de Pirajá, e que essa canalização se desfaz no momento em que os raios atingem a praça (local sem edificações), para depois, novamente retornarem a canalização provocada pelas edificações. Ou seja, os pontos de recepção em LOS situados na Praça Nossa Senhora da Paz apresentam maior desvio padrão do ângulo de recepção e do retardo, devido ao maior espalhamento dos raios.

As figuras 5.16 e 5.17 apresentam o comportamento do desvio padrão do ângulo de recepção e do retardo em função da distância para pontos em NLOS em Ipanema com 4 antenas na transmissão e na recepção.

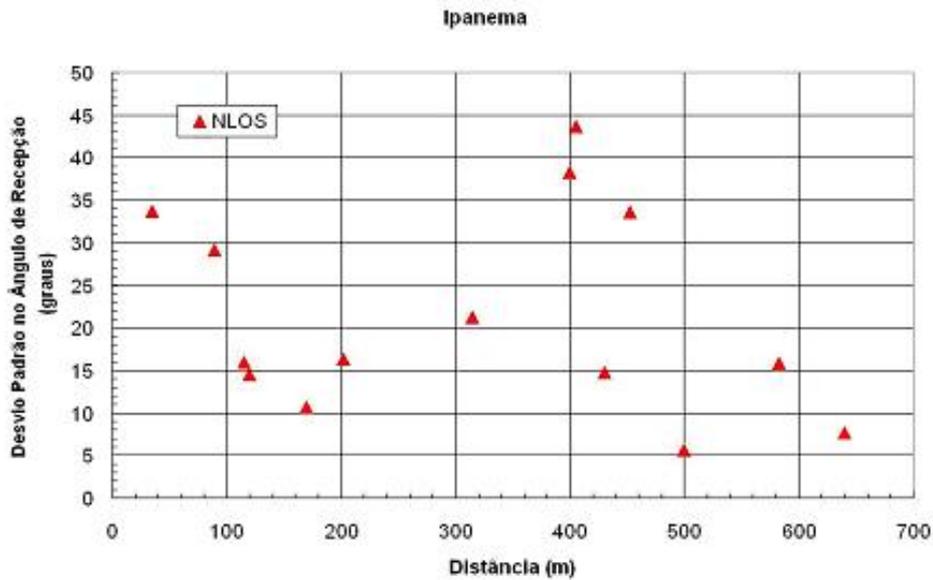


Figura 5.16: Desvio padrão do ângulo de recepção em função da distância para pontos em NLOS.

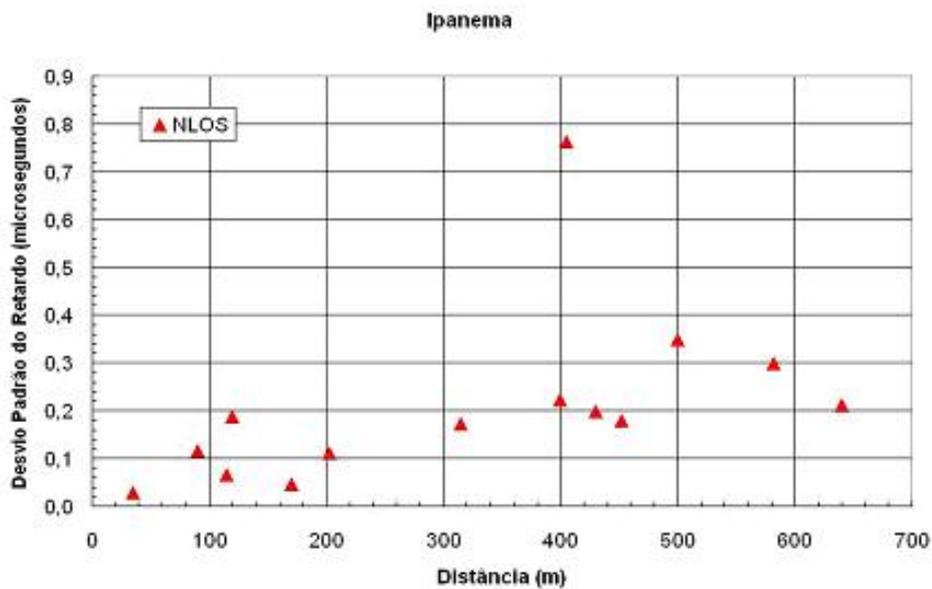


Figura 5.17: Desvio padrão do retardo em função da distância para pontos em LOS.

Verifica-se que não há variação claramente definida no desvio padrão do ângulo de recepção. Observa-se, por outro lado, um aumento apenas discreto no desvio padrão do retardo em função da distância. Estas observações justificam a ausência de variação na capacidade atingida em função da distância para pontos em NLOS (mantendo-se fixa a relação sinal-ruído) apresentada na figura 5.12.

Nota-se nas figuras 5.16 e 5.17 o mesmo comportamento para pontos de recepção situados na Praça Nossa Senhora da Paz. Neste caso, há um único ponto em NLOS situado na praça que corresponde ao ponto que apresenta maior valor de desvio padrão do ângulo de recepção e do retardo nas figuras 5.16 e 5.17.

Confirmando-se, então, que qualquer ponto de recepção em LOS ou NLOS localizado na praça apresenta valor maior de desvio padrão do ângulo de recepção e do retardo, devido ao maior espalhamento dos raios.

De fato, os resultados apresentados nas figuras 5.15 e 5.16 não indicam um aumento nítido no espalhamento espacial e temporal nos percursos entre o transmissor e o receptor, necessários para o aumento da capacidade.

Posteriormente, analisou-se a capacidade de um sistema MIMO com 8 antenas na transmissão e na recepção, localizado no bairro de Copacabana fixando-se a relação sinal-ruído em 21 dB.

Nesta análise, verificou-se o comportamento da capacidade atingida para pontos em LOS e NLOS em função do desvio padrão do ângulo de transmissão, recepção e retardo.

O gráfico 5.18 apresenta a capacidade excedida em 90% dos casos em função do desvio padrão do ângulo de transmissão para pontos em LOS e NLOS.

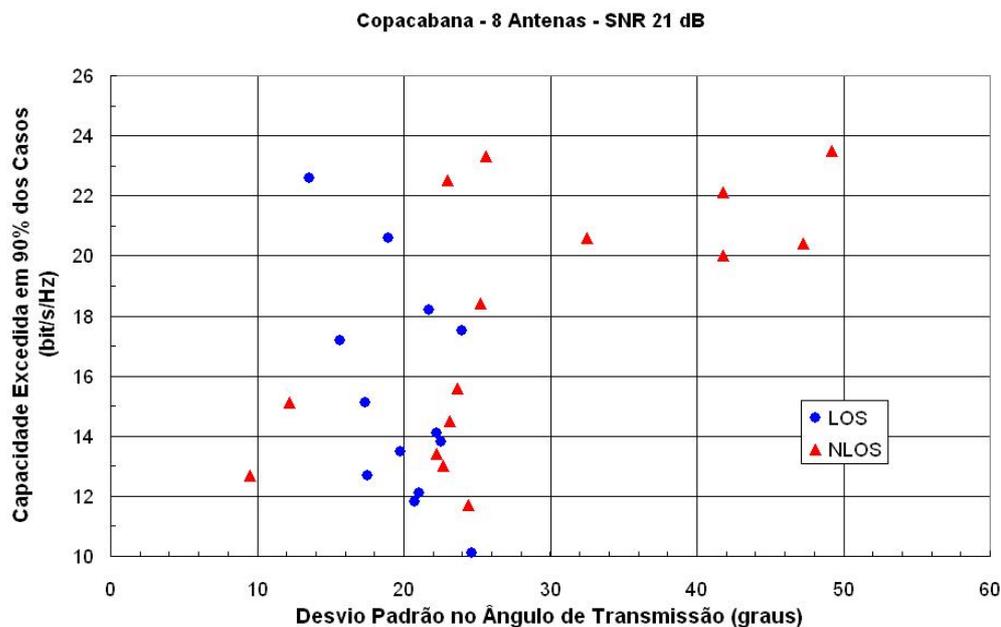


Figura 5.18: Capacidade Excedida em 90% dos casos em função do desvio padrão do ângulo de transmissão.

Observa-se que, para os pontos em LOS, a capacidade pode variar substancialmente mesmo que o desvio padrão permaneça relativamente constante. Um valor relativamente constante era, de fato, esperado para o desvio padrão do ângulo de transmissão correspondente a pontos em LOS, em consequência da canalização imposta pela rua, na qual os conjuntos transmissor e receptor se situam. Mesmo assim, em função de outros fatores importantes, a capacidade pode variar.

Para os pontos em NLOS, observam-se valores maiores do desvio padrão do ângulo de transmissão, possivelmente resultantes do maior número de percursos alternativos entre o transmissor e um ponto de observação. Associados a estes valores de desvio padrão do ângulo de partida, encontram-se valores também maiores da capacidade, como consequência do processo já descrito.

Os gráficos 5.19 e 5.20 apresentam a capacidade excedida em 90% dos casos em função dos desvios padrões do ângulo de recepção e do retardo, respectivamente, para pontos em LOS e NLOS.

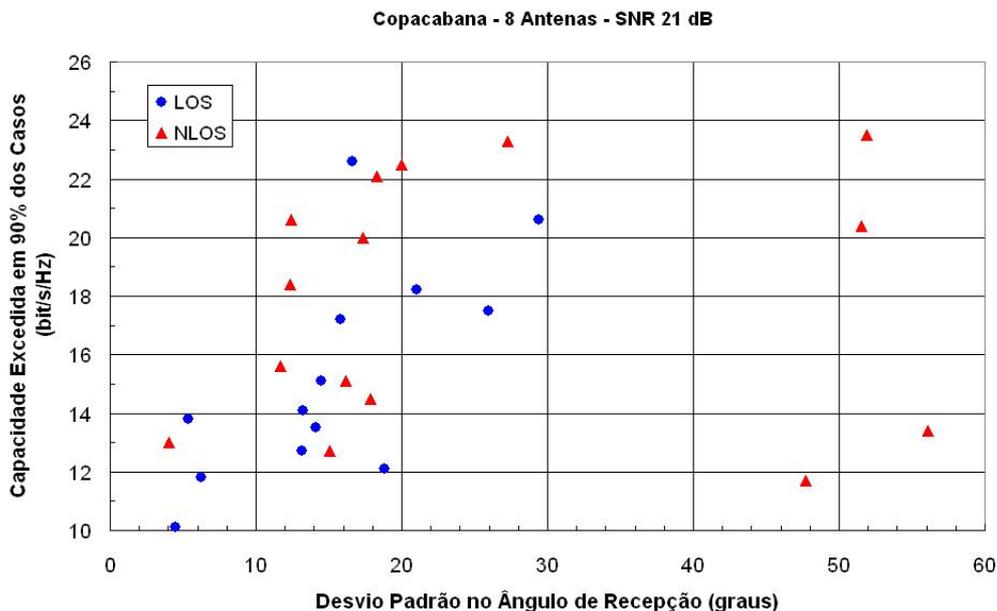


Figura 5.19: Capacidade Excedida em 90% dos casos em função do desvio padrão do ângulo de recepção.

Ao contrário da transmissão para os pontos em LOS, observa-se um crescimento da capacidade em função dos desvios padrões do ângulo de recepção e do retardo, o que pode ser explicado pelo fato de que o canal MIMO

