

Capítulo VI – Simulações

Neste Capítulo, foram realizadas diversas simulações baseadas nos ambientes selecionados de Ipanema e Madri, aplicando o modelo desenvolvido e ajustado durante o Capítulo de Validação. O ajuste do modelo concentrou-se em definir os melhores valores dos parâmetros característicos dos meios encontrados nos ambientes simulados, aplicando a técnica do gradiente descendente, onde a função de custo para cada métrica deveria convergir para o valor medido em campanha, em cada polarização.

O objetivo desta seção é obter e discutir resultados associados às técnicas propostas pela comunidade científica, citadas no Capítulo I, para o desenvolvimento de comunicações móveis na faixa de ondas milimétrica. Foram investigados os efeitos conjuntos destas técnicas sobre canais UWB externos típicos, utilizando as métricas apresentados no Capítulo II.

6.1

Efeitos da ordem de interações em canais com e sem visada

Nesta seção, foi investigado o efeito da variação do número máximo de interações da onda propagante com o meio (ordem) e verificada sua influência sobre: função de transferência, perfil de potência e retardos, potência recebida (apenas para a polarização VV) e despolarização (XPD) das componentes lineares ortogonais, assim como retardo médio e desvio RMS da componente copolarizada vertical. As simulações foram feitas no cenário de Madri. Inicialmente, foi simulado um canal em visada, definido em uma rua cercada por prédios altos, com árvores plantadas em intervalos regulares, com postes de iluminação e postes de trânsito nas esquinas. O Tx está a 15 m do solo e o Rx a 1,5 m. As demais configurações utilizadas na simulação podem ser vistas na Tabela 6.1. O modelo Misto foi adotado para representar o espalhamento difuso em paredes (Cap. IV).

Para estudar as propriedades de canais em visada, foi simulado o deslocamento de um usuário do sistema de comunicações móveis ao longo de uma calçada. Em seguida, são traçados raios até a oitava ordem e calculados: função de transferência, PDP, potência recebida da componente VV, XPD, tempo de processamento e quantidade de raios traçados. Posteriormente, o mesmo canal é usado para traçar raios até a sétima ordem máxima e são calculados os mesmos parâmetros para comparação, e assim sucessivamente, até a quinta ordem.

Tabela 6.1 – Parâmetros de configuração da simulação.

Parâmetro	Valor	Unidade
Largura do feixe de meia potência do Tx	10	Graus
Largura do feixe de meia potência do Rx	10	Graus
Velocidade da luz no vácuo	3,00E+08	m/s
Permissividade do ar	8,85E-12	F/m
Permissividade relativa do chão	3	
Permissividade relativa das faces dos prédios	3	
Condutividade do solo	0,015	S/m
Condutividade das faces dos prédios	0,015	S/m
Pressão atmosférica total	1033	hPa
Temperatura	20	°C
Densidade de vapor de água	7,3	g/m ³
Desvio padrão das rugosidades das paredes	0,075	mm
Número de iterações (ordem máxima dos raios)	(8 – 5)	
Frequência inicial	73	GHz
Largura da faixa de frequências	800	MHz
Potência Tx (VV e HH)	1	W
Ganho Tx e Rx	24,0	dBi

Deve-se esperar que a qualidade da previsão diminua com a ordem máxima dos raios. A intenção deste estudo não é estabelecer um limite rígido entre a qualidade da previsão e a ordem máxima utilizada para o traçado de raios, mas verificar o efeito e estabelecer critérios para a escolha da ordem a ser usada em determinada simulação.

O objetivo geral é reduzir o tempo de processamento, sem afetar significativamente a precisão da previsão. Assim, este estudo limitou-se ao intervalo de ordens máximas entre oito e cinco. Observou-se uma diminuição no tempo de processamento superior a 400% entre a oitava e quinta ordem na maioria dos casos.

O traçado de raios demonstra que há uma forte diminuição na quantidade de raios à medida que a ordem máxima é decrementada. A Figura 6.1, apresenta um

gráfico comparativo, onde é possível ver enormes diferenças entre os números de raios e os tempos de processamento.

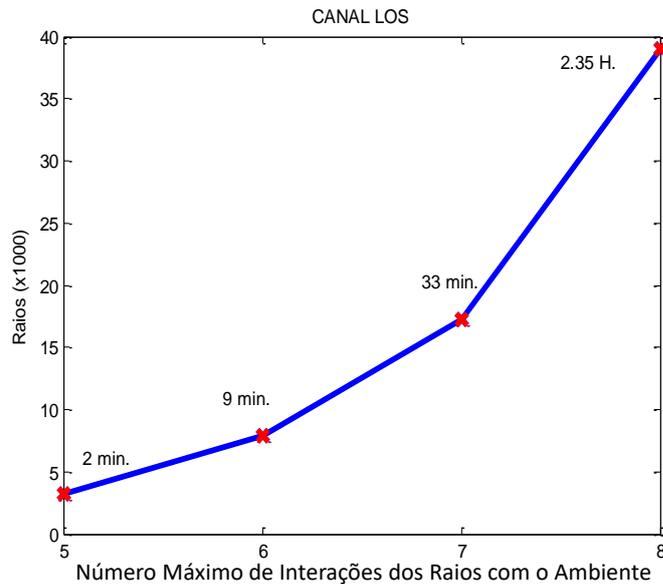


Figura 6.1 – Gráfico comparativo entre o número de raios traçados e o tempo de processamento total, como funções do número máximo de interações dos raios com o ambiente.

O crescimento aparentemente exponencial do número de raios traçados em relação ao aumento da ordem máxima de interações é observado na literatura [122]. Por outro lado, o tempo de simulação também depende de diversos fatores de ordem técnica e da qualidade do código e de sua compilação.

A Figura 6.2, apresenta os resultados da simulação da função de transferência de um canal LOS em função da ordem máxima. Não se observam diferenças significativas entre as diversas funções de transferência.

Em seguida, de posse das funções de transferência, é possível calcular o isolamento entre as componentes do campo vertical e horizontal e suas componentes cruzadas (XPD). A Figura 6.3 mostra o isolamento em função da ordem máxima de raios traçados, para cada componente linear do campo. A análise da XPD mostra pouca variação neste parâmetro, que tem um leve decréscimo com o aumento da ordem máxima. Este decréscimo pode ser devido ao fato de que o mecanismo da reflexão especular causa despolarização. Portanto, o aumento no número reflexões pode impactar o isolamento. Outro ponto a ser considerado é que, neste modelo, o espalhamento difuso e interações com copas também produzem despolarização. Assim, um aumento na quantidade de raios destes mecanismos também pode levar a uma diminuição do isolamento.

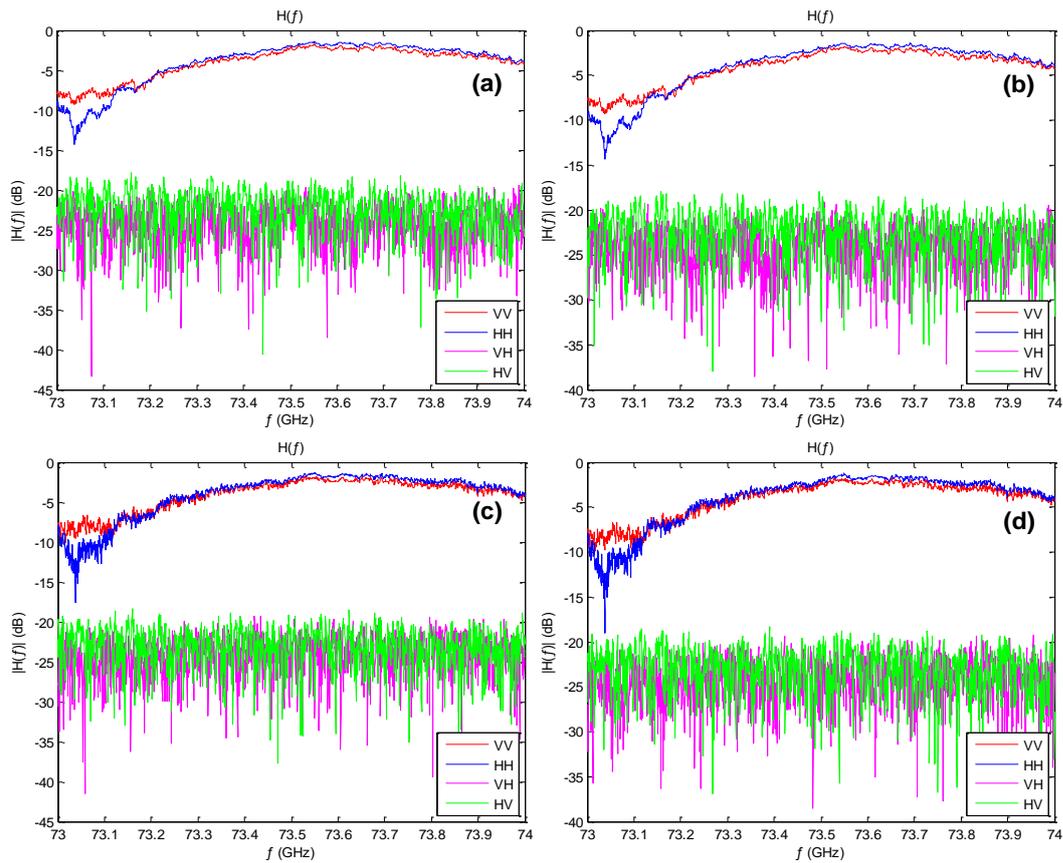


Figura 6.2 – Canal LOS e sua função de transferência para vários valores de ordem máxima: (a) oitava ordem, (b) sétima ordem, (c) sexta ordem e (d) quinta ordem. O eixo vertical representa o módulo da FT e não sua potência.

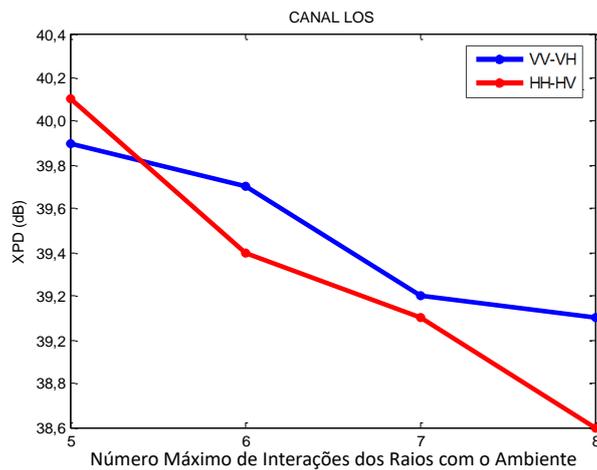


Figura 6.3 – Isolamento no canal LOS em função da quantidade máxima de interações dos raios traçados com o ambiente.

O próximo passo foi calcular os PDPs associados às funções de transferência e aplicar a integração numérica para encontrar os níveis de potência recebida no

canal LOS. A Figura 6.5 mostra os resultados. Qualitativamente, os PDPs obtidos para as variadas ordens apresentam muita semelhança entre si. Analisando as métricas: potência recebida, retardo médio e desvio RMS, há grandes semelhanças, mostrando que, para este canal e com esse conjunto de parâmetros, a variação da ordem máxima dos raios traçados entre 8 e 5 produz pouco impacto, como mostra a Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Comparativo da variação de ordem máxima nas métricas apresentadas.

Ordem máxima	8	7	6	5
Potência recebida (dBW)	-105,77	-105,59	-105,65	-105,81
Retardo médio (ns)	719,01	702,43	709,11	717,09
Desvio RMS (ns)	177,74	176,84	163,92	175,57

Os resultados comparativos apontam que, para canais em visada, que apresentem similaridades com o ambiente simulado e nas mesmas configurações de parâmetros, o modelo pode prever resultados semelhantes no intervalo de ordem máxima no traçado de raios entre 5 e 8.

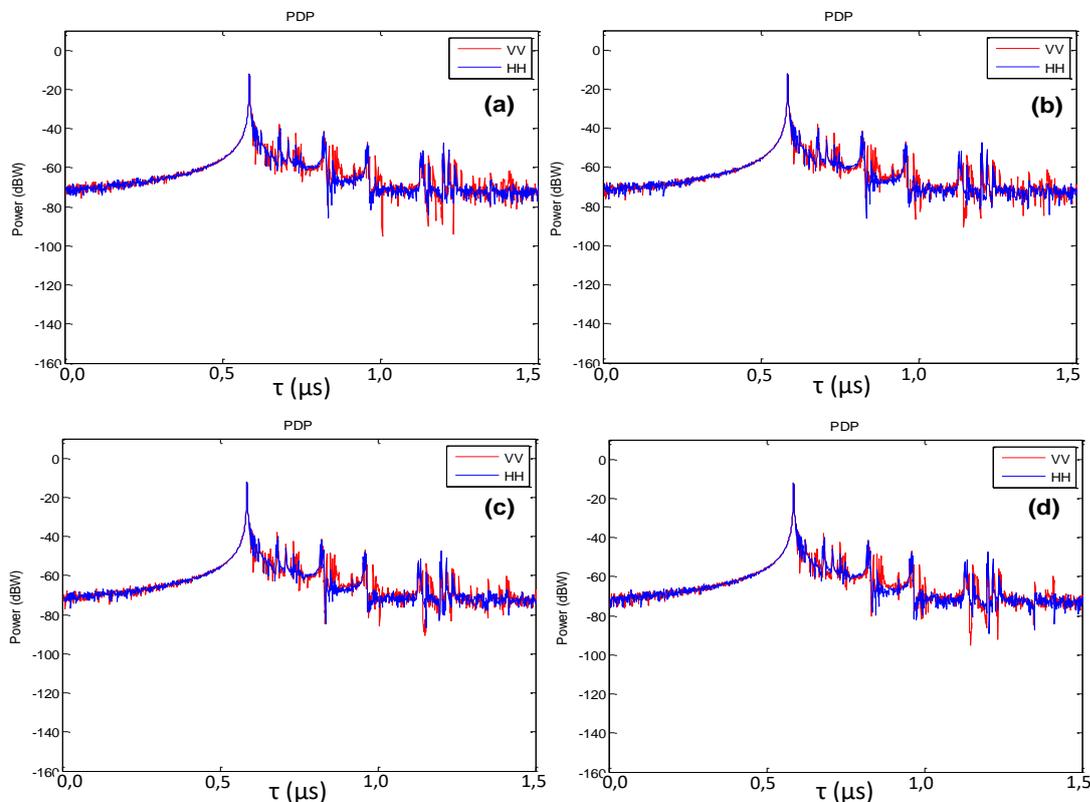


Figura 6.4 – Perfil de potência e retardos no canal LOS: (a) até a oitava ordem, (b) até a sétima ordem, (c) até a sexta ordem e (d) até a quinta ordem.

O próximo passo foi verificar os efeitos da variação de ordem máxima do traçado de raios para um canal sem visada (NLOS). Para isso, foi escolhido um canal no mesmo cenário de Madri, simulando um usuário de comunicação móvel, nas mesmas condições descritas na análise em LOS. A diferença é que, agora, o usuário está relativamente próximo a uma praça arborizada, em um canal sem visada. Os mesmos parâmetros e configurações gerais usadas na análise em visada foram utilizados.

Em canais com muitos espalhadores nas proximidades dos transceptores, o modelo traça, usualmente, muito mais raios, oriundos do mecanismo de espalhamento. A Figura 6.5 faz uma comparação entre a quantidade de raios traçados em função da ordem máxima, mostrando o tempo de processamento total.

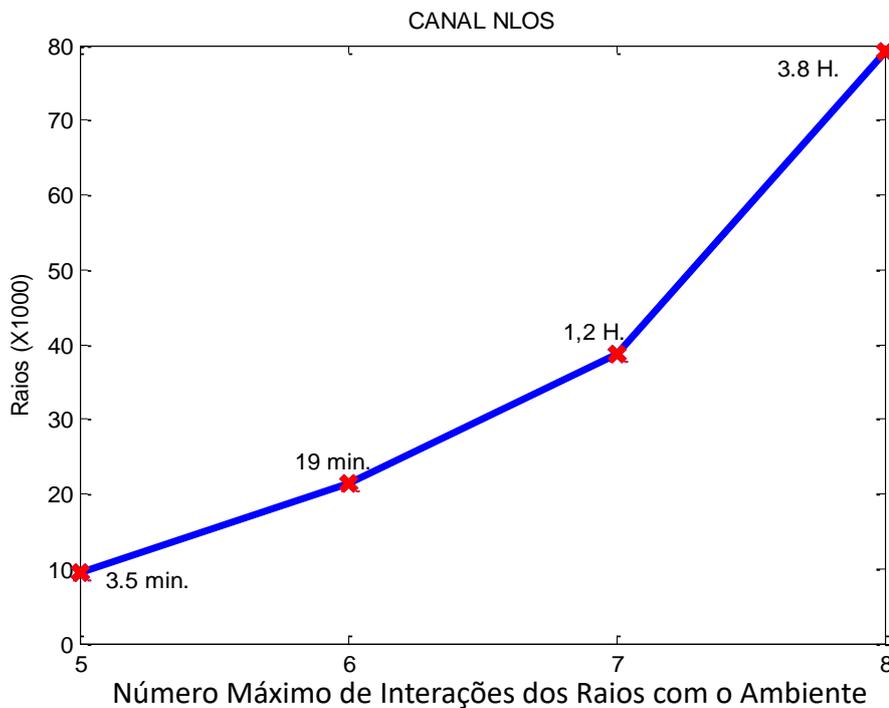


Figura 6.5 – Gráfico comparativo, ordem máxima por número de raios traçado, com indicação do tempo de processamento total.

Em seguida, foram analisadas as funções de transferência do canal para as diversas ordens máximas, assim como a XPD. As Figuras 6.6 e 6.7 mostram os resultados.

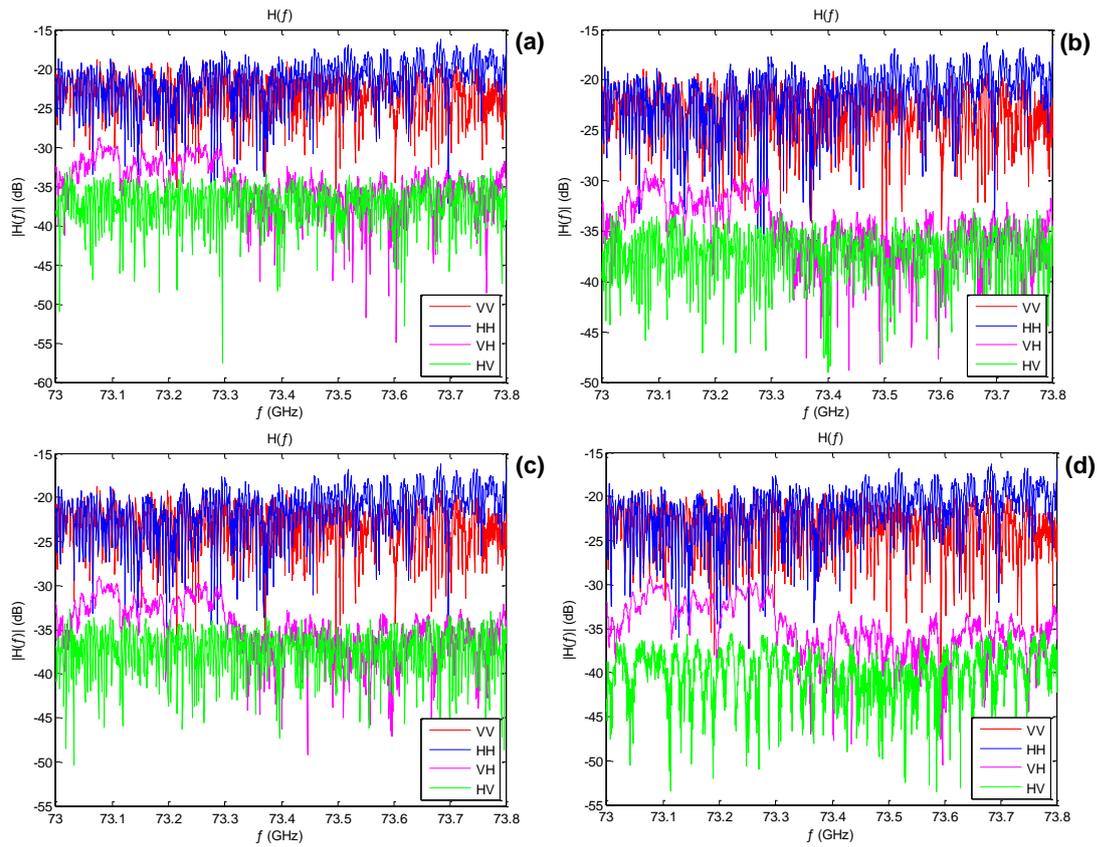


Figura 6.6 – Canal NLOS e sua função de transferência para vários valores de ordem máxima: (a) oitava ordem, (b) sétima ordem, (c) sexta ordem e (d) quinta ordem.

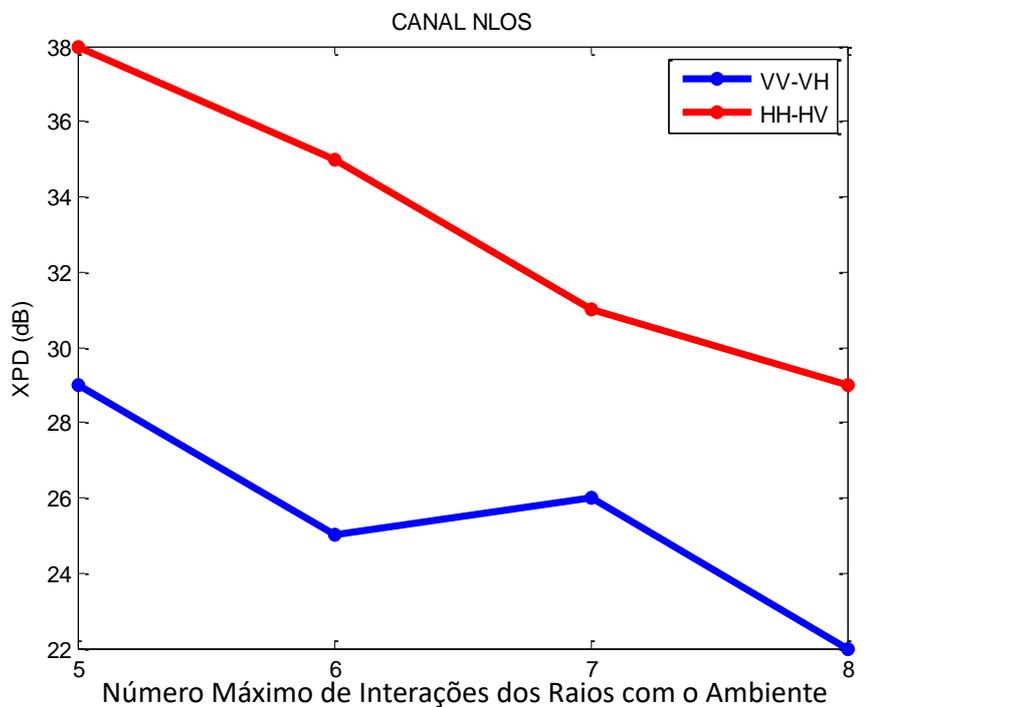


Figura 6.7 – Isolamento no canal NLOS em função da quantidade máxima de ordens dos raios traçados.

A despolarização no canal sem visada também diminui à medida que é decrementada a ordem máxima de traçado de raios. Entretanto, o gradiente negativo é muito maior. Ou seja, o impacto da variação de ordem produz grandes efeitos na estimativa da despolarização. Tal fato pode ser devido ao menor número de raios que chegam ao Rx oriundos de reflexões especulares, que usualmente contêm mais energia. Na ausência destes raios, aumenta a contribuição de potência recebida de outros mecanismos, como o espalhamento, no qual a despolarização pode ser maior. À medida que a ordem é decrementada, há uma forte diminuição da quantidade de raios oriundos de espalhamento, o que aumenta o isolamento entre as componentes copolarizadas e cruzadas do campo.

Em seguida, foram calculados os PDPs no canal NLOS com a variação da ordem máxima de traçado de raios e calculadas as métricas: potência recebida, retardo médio e desvio RMS. Os resultados encontram-se na Figura 6.8 e Tabela 6.3.

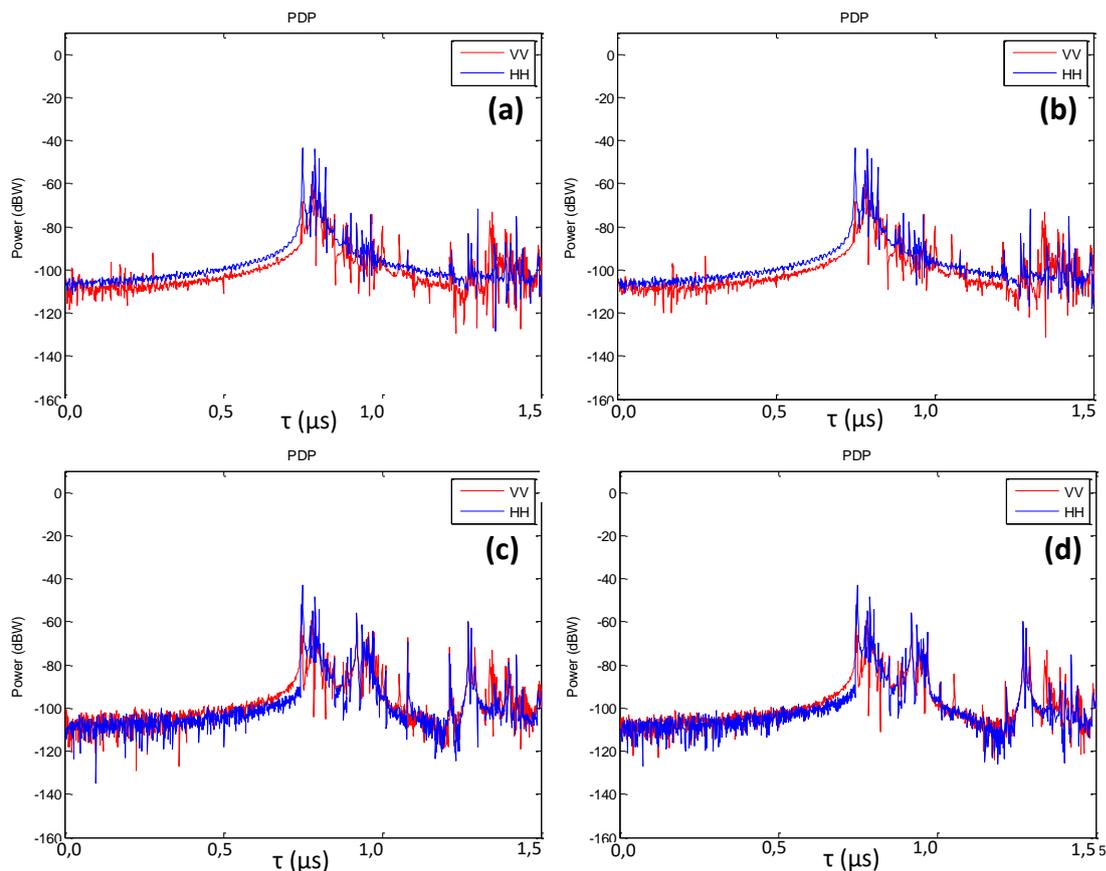


Figura 6.8 – Perfil de potência e retardos no canal NLOS: (a) até a oitava ordem, (b) até a sétima ordem, (c) até a sexta ordem e (d) até a quinta ordem.

Tabela 6.3 – Comparativo da variação das métricas apresentadas em função da ordem máxima.

Ordem máxima	8	7	6	5
Potência recebida (dBW)	-141,28	-141,34	-140,75	-138,99
Retardo médio (ns)	906,00	926,02	918,00	921,18
Desvio RMS (ns)	174,40	165,90	161,41	139,50

As variações da potência recebida, retardo médio e desvio RMS referentes ao canal NLOS, embora ainda pequenas, são superiores às correspondentes para ao canal LOS. A potência recebida apresentou pequena variação tanto em NLOS quanto em LOS, mostrando que, dentro da faixa utilizada, a ordem máxima do traçado de raios apresenta impacto reduzido seu valor. O retardo médio mostra o mesmo comportamento, apresentando pouca variação em LOS e NLOS. O desvio RMS apresentou uma tendência a diminuir juntamente com a ordem máxima dos raios. Tal fato pode ser explicado pela redução na quantidade de raios de ordens elevadas à medida que a ordem máxima é reduzida, o que obviamente pode produzir fortes alterações nesta métrica.

Analisando os resultados das simulações em LOS, verificou-se que a diminuição da ordem máxima de traçado de raios teve pouco impacto nas métricas utilizadas. Por outro lado, a diminuição do tempo de processamento foi muito grande.

Para as simulações em NLOS, foi verificado um maior impacto nas métricas de XPD e desvio RMS, mas as outras métricas apresentaram pouca variação. De forma geral, notou-se que a diminuição da ordem máxima da oitava para a sexta apresentou menor variação em todas as métricas. Foi notado um gradiente de variação crescente à medida que a ordem diminuía além da sexta ordem, principalmente na despolarização.

Em resumo, conclui-se ser aparentemente seguro em canais LOS a redução da oitava para a quinta ordem máxima de traçado. Em canais NLOS, pode ser seguro reduzir a ordem máxima até a quinta ordem para as métricas de potência recebida e retardo médio e até a sexta ordem máxima para todas as métricas utilizadas.

Importante salientar que esta recomendação necessita de maiores estudos comparativos e pode ser válida apenas para este modelo e tipos de canais utilizados.

6.2

Efeitos da vegetação sobre a propagação

Parte importante do esforço de caracterização da propagação de ondas milimétricas em canais externos diz respeito ao impacto da vegetação, em especial de árvores, que estão presentes em larga escala em ambientes externos [123]. As árvores estão presentes em geral nas calçadas das ruas e em áreas de convivência social: praças, parques, reservas, etc. Os modelos geométrico e eletromagnético de uma árvore foram discutidos nos Capítulos III e IV.

Para avaliar o impacto das árvores na propagação em canais externos na faixa das ondas milimétricas, foram consideradas situações em que ocorrem variações da altura de transmissão de um sinal UWB, com o intuito de verificar a propagação abaixo da linha de copas, sobre as copas e acima delas, para obter um panorama geral sobre estas situações.

Foi também considerado o efeito de bloqueio por uma árvore da visada entre o usuário e o transmissor e o impacto da propagação ao longo do do raio direto através da copa.

6.2.1

Efeitos da vegetação e da variação da altura de transmissão

Foram consideradas algumas situações envolvendo um usuário de serviço móvel que se desloca por uma rua com árvores plantadas em intervalos regulares na calçada, onde o Tx pode estar a 3 m, 8 m e 20 m do solo, respectivamente. O cenário utilizado na simulação foi uma rua de Ipanema, que possui árvores onde a linha de copas começa aos 3,5 m e acaba em 8 m de altura do chão. O Rx ficará fixo em uma posição, a 1,5 m do solo. Apenas o Tx sofrerá variação na altura. A Figura 6.9 mostra o aspecto geral deste canal. As mesmas configurações da seção anterior foram utilizadas nesta nova simulação.

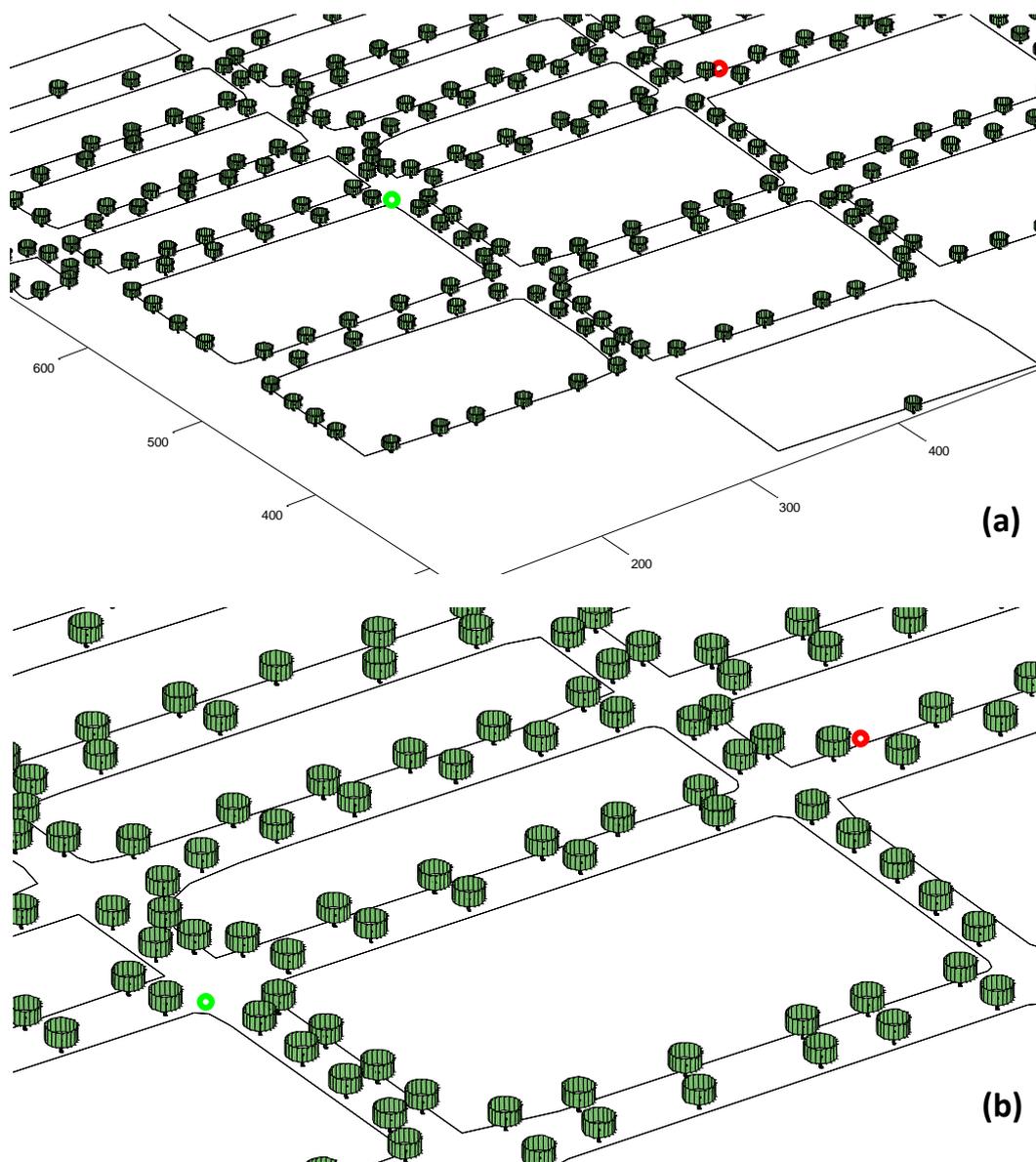


Figura 6.9 – Canal utilizado para a simulação de efeitos da vegetação: (a) vista geral, com escalas em metros, as árvores em verde, o Tx é um círculo vermelho, o Rx é um círculo verde, a projeção dos quarteirões no solo são polígonos com linhas pretas; (b) vista aproximada do canal, sem escalas. As faces laterais dos prismas foram removidas para melhor visualização.

Inicialmente, foram traçados os raios com o Tx a 3 m do solo, conforme mostra a Figura 6.10. O canal possui visada entre o transmissor e o usuário e o sinal se propaga ao longo do raio direto abaixo da linha de copas, o que contribui com o alto isolamento (XPD) verificado. A função de transferência para este canal pode ser vista na Figura 6.11. Nesta simulação, grande parte dos raios se situam abaixo da linha das copas, produzindo uma função de transferência com a contribuição de

muitos raios oriundos de reflexões especulares. A maioria destes raios não são afetados pelas copas. Os afetados são apenas os que usam o mecanismo de espalhamento por copas, que interagem com seus centros geométricos e obedecem a diagramas de espalhamento próprios, conforme explicado no Capítulo IV.

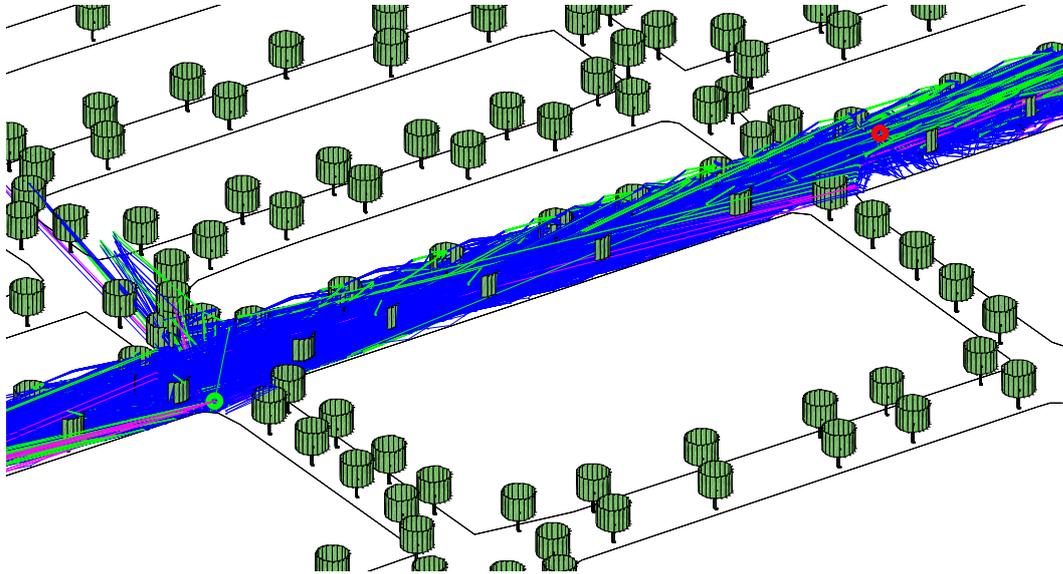


Figura 6.10 – Traçado de raios com Tx a 3 m do solo, sendo as faces laterais dos prismas removidas para melhor visualização. As linhas azuis, magentas e verdes representam raios oriundos de reflexão, difração e espalhamento, respectivamente.

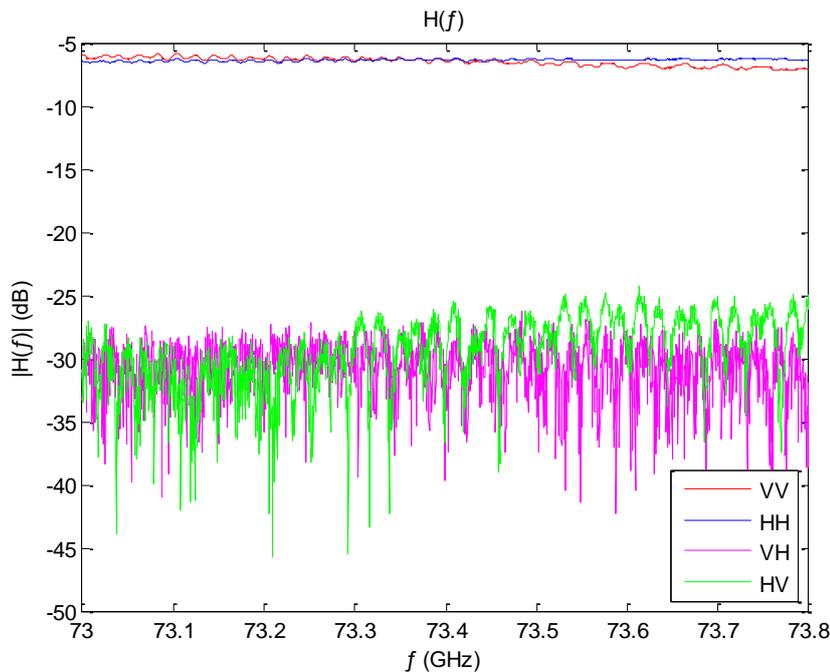


Figura 6.11 – Função de transferência do canal, na simulação com o Tx a 3 m do solo. Observa-se grande isolamento entre as polarizações ortogonais.

O PDP apresentado na Figura 6.12 confirma as características observadas acima.

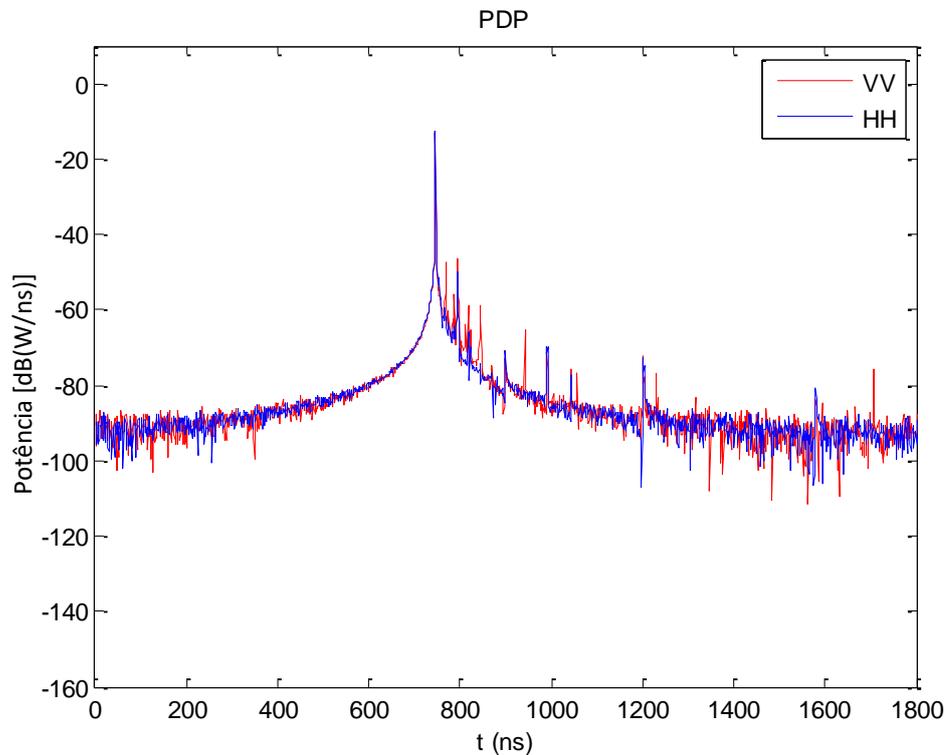


Figura 6.12 – Perfil de potência e retardos para a simulação com o Tx a 3 m do solo.

Em seguida foi simulado o mesmo canal, com o Tx a 8 m do solo. A Figura 6.13 mostra detalhes da geometria do canal e dos raios traçados e a Figura 6.14 mostra a função de transferência, que apresenta um isolamento XPD muito menor que o encontrado na simulação correspondente ao Tx situado a 3 m do solo. Isso pode ser devido à maior quantidade de componentes do sinal que se propagam ao longo dos raios através das copas, o que causa maior perda de propagação e, conseqüentemente, uma menor proporção na energia que atinge o Rx por reflexões múltiplas e especulares. O PDP mostra claros efeitos da maior perda devida à propagação através das copas para a altura do Tx, conforme ilustra a Figura 6.15.

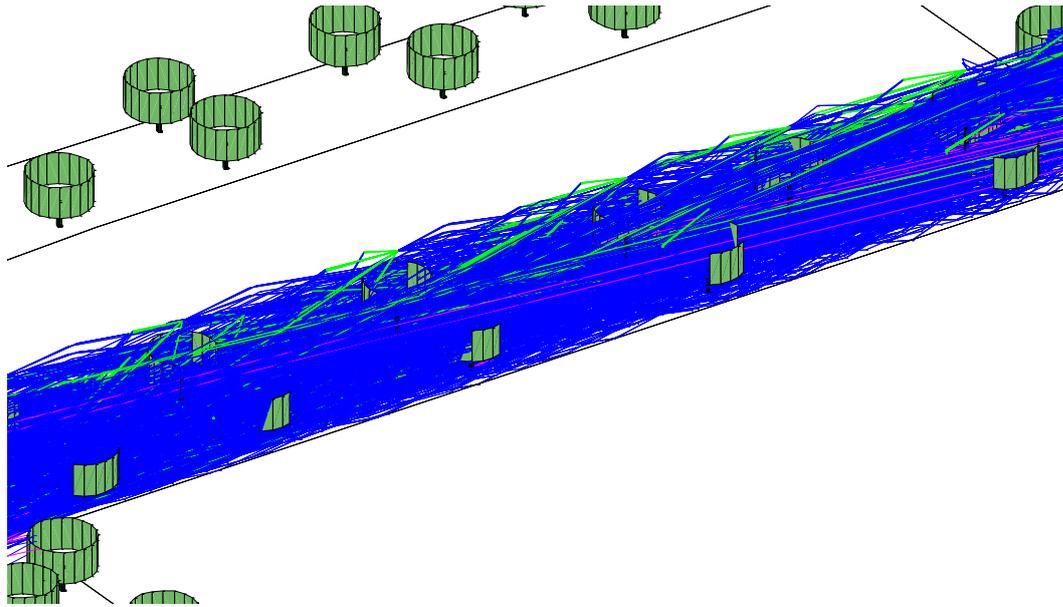


Figura 6.13 – Traçado de raios com Tx a 8 m do solo. As faces laterais dos prismas foram removidas para melhor visualização. As linhas azuis, magentas e verdes representam raios oriundos de reflexão, difração e espalhamento, respectivamente.

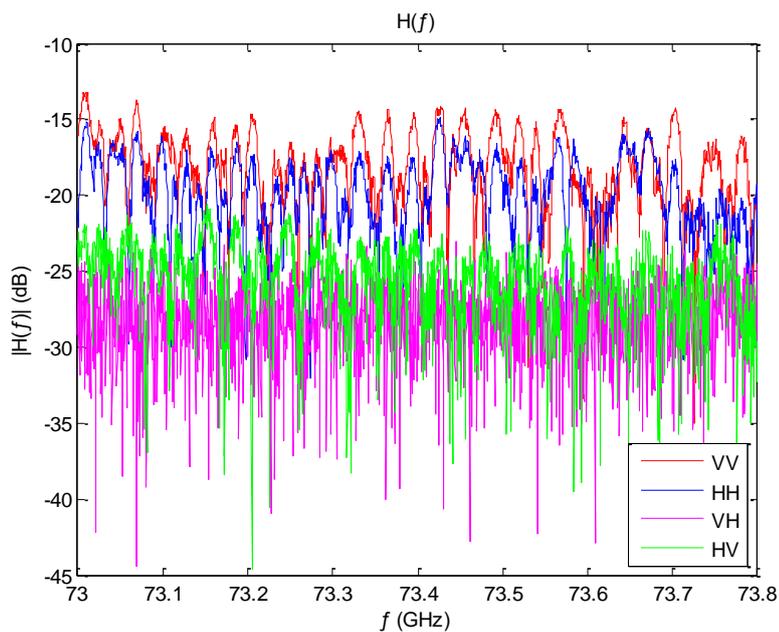


Figura 6.14 – Função de transferência do canal com o Tx a 8 m do solo.

Na simulação com o Tx a 8 m do solo, o canal continua em visada, mas o algoritmo selecionou como mais intenso o raio terrestre, e não o direto aéreo, que foi fortemente atenuado pela vegetação.

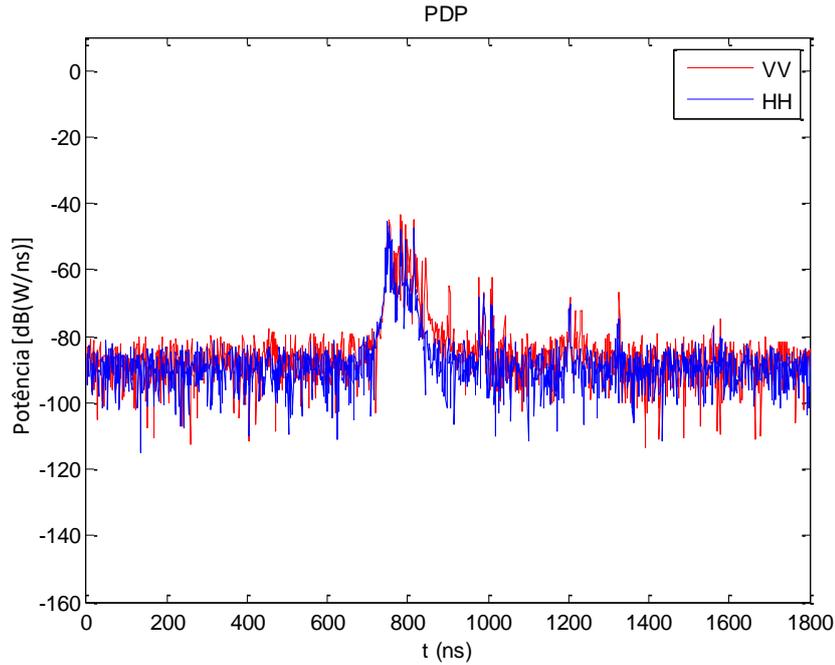


Figura 6.15 – Perfil de potência e retardos para a simulação com o Tx a 8 m do solo.

Em seguida foi simulado o mesmo canal, com o Tx a 20 m do chão e bem acima das copas, conforme mostra a Figura 6.16. Nesta simulação há grande quantidade de componentes do sinal que se propagam ao longo de raios situados acima das copas, produzindo uma função de transferência com as características apresentadas na Figura 6.17, em que o isolamento aumenta, mas não aos níveis da simulação correspondente ao Tx a 3 m do solo.

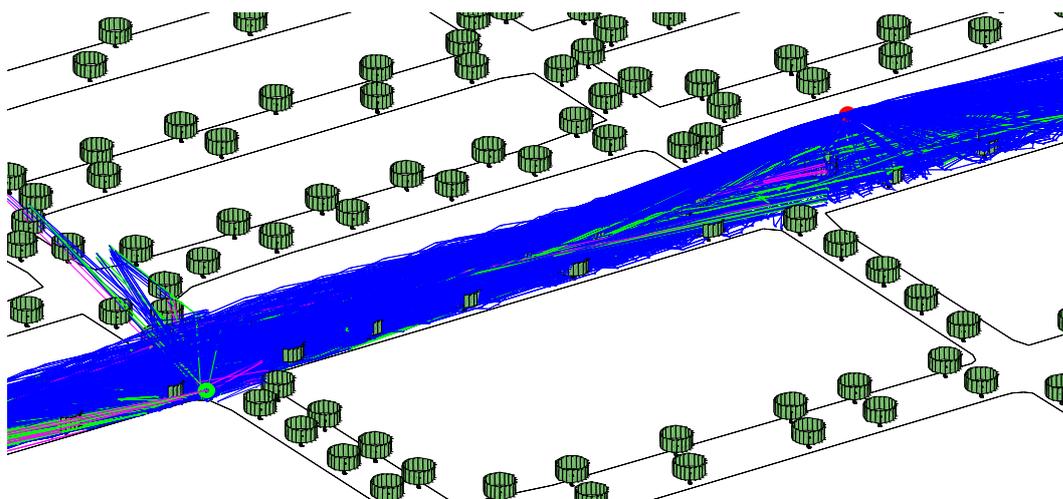


Figura 6.16 – Traçado de raios com Tx a 20 m do solo. As faces laterais dos prismas foram removidas para melhor visualização. As linhas azuis, magentas e verdes representam raios oriundos de reflexão, difração e espalhamento, respectivamente.

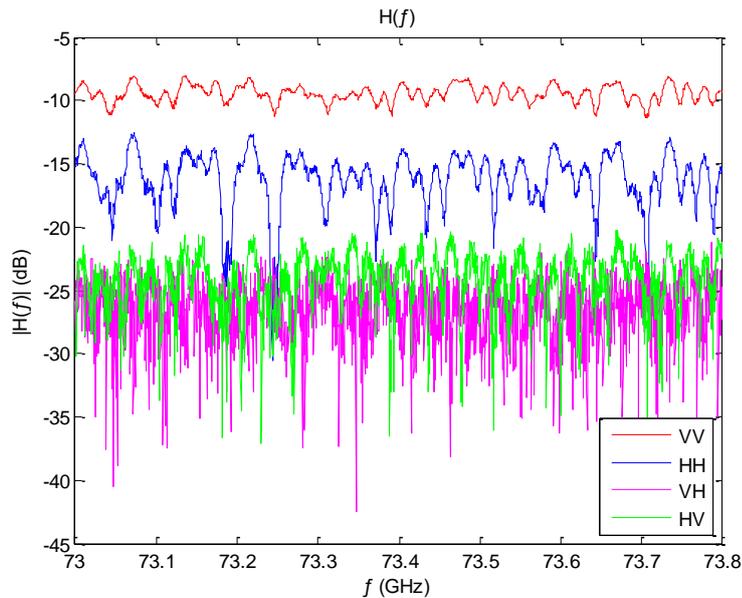


Figura 6.17 – Função de transferência do canal com o Tx a 20 m do solo.

Outra característica marcante desta simulação é a diferença nos valores da função de transferência entre as componentes copolarizadas do campo elétrico (VV e HH). Este efeito foi verificado, ainda que de forma sutil na simulação com o Tx a 8 m do solo e pode ser causado pela diferença verificada entre os valores dos coeficientes de reflexão de Fresnel para as componentes VV e HH em ângulos próximos de 90° entre o raio incidente e a normal ao solo. Esta função de transferência produz o PDP da Figura 6.18.

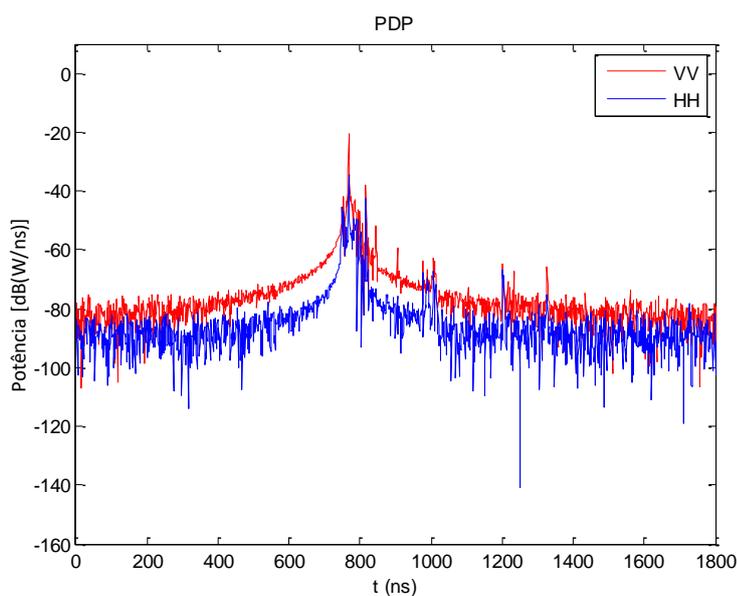


Figura 6.18 – Perfil de potência e retardos para a simulação com o Tx a 20 m do solo.

Nesta simulação, o canal continua em visada e o sinal associado ao raio direto (aéreo) é o mais intenso, apesar de sofrer uma atenuação ao se propagar por distâncias nos interiores de copas inferiores às observadas na simulação com o Tx a 8 m do solo. Os valores calculados para todas as métricas em todas as três simulações estão resumidos na Tabela 6.4, abaixo. A potência recebida na componente VV apresenta o maior valor na altura de 20 m, com o Tx acima de linha das copas, e o menor valor com o Tx a 8 m, na mesma altura que a faixa de copas das árvores. Este resultado mostra o impacto da propagação nos interiores das copas e a possibilidade maior de bloqueios. Com a potência recebida na componente horizontal, a maior potência recebida foi com o Tx abaixo da linha de copas, com as potências recebidas com o Tx nas alturas de 8 m e 20 m mostrando valores próximos.

O isolamento entre as componentes VV-VH mostrou que pode sofrer forte decréscimo entre os valores simulados com o Tx abaixo da linha de copas e valores simulados com o Tx acima do início da linha das copas, mostrando diferenças da ordem de 25 dB. Um comportamento semelhante ocorreu com o isolamento entre as componentes HH-HV. A diferença entre os isolamentos obtidos com o Tx abaixo da linha de copas (3 m) e em 8 m foi de até 49 dB e na ordem de 40 dB para a simulação com o Tx a 20 m.

As métricas de retardo médio e desvio RMS, ambas simuladas apenas para a componente VV, apresentaram valores mais baixos na simulação com o Tx a 3m, 20 m e 8 m (nesta ordem), respectivamente.

Tabela 6.4 – Comparativo entre as métricas em todas as simulações de altura do Tx.

Altura do Tx (m)	3	8	20
Potência recebida VV (dBW)	-120,16	-126,04	-116,19
Potência recebida HH (dBW)	-120,01	-127,84	-129,54
<i>XPD</i> VV-VH (dB)	61,33	32,87	36,29
<i>XPD</i> HH-HV (dB)	61,21	12,42	21,64
Retardo médio VV (ns)	788,19	918,61	842,27
Desvio RMS VV (ns)	145,54	216,69	168,20

6.2.2

Efeitos na propagação causados pela proximidade de uma árvore

Nesta seção, foram investigados os efeitos na propagação causados pela proximidade de uma árvore. Foi examinado o caso de um usuário de serviço móvel que trafega em uma das ruas que definem uma praça arborizada. O transmissor está localizado em um dos cantos da praça. Em seu trajeto, o usuário passa por trás de uma árvore que obstrui sua visada com o Tx. Foram considerados dois casos de interesse. No primeiro, o Tx encontra-se a 3 m do solo, abaixo da linha de copas, e o tronco pode obstruir a visada. No segundo, o Tx encontra-se a 15 m do solo, acima da linha de copas e o raio direto intercepta a copa da árvore, sofrendo atenuação e espalhamento.

A simulação foi feita ao longo de uma rota com 39 posições dispostas de tal forma que a árvore pode obstruir a visada entre o Rx, situado na altura de 1,5m acima do solo, e o Tx, cujas alturas já foram citadas. Os pontos da rota onde o Rx foi posicionado estão uniformemente espaçados de um metro nos primeiros e últimos pontos. Os pontos centrais, mais próximos da árvore, estão uniformemente espaçados de 10 cm. As mesmas métricas e configurações da simulação foram utilizadas. A Figura 6.19 mostra detalhes sobre a simulação.

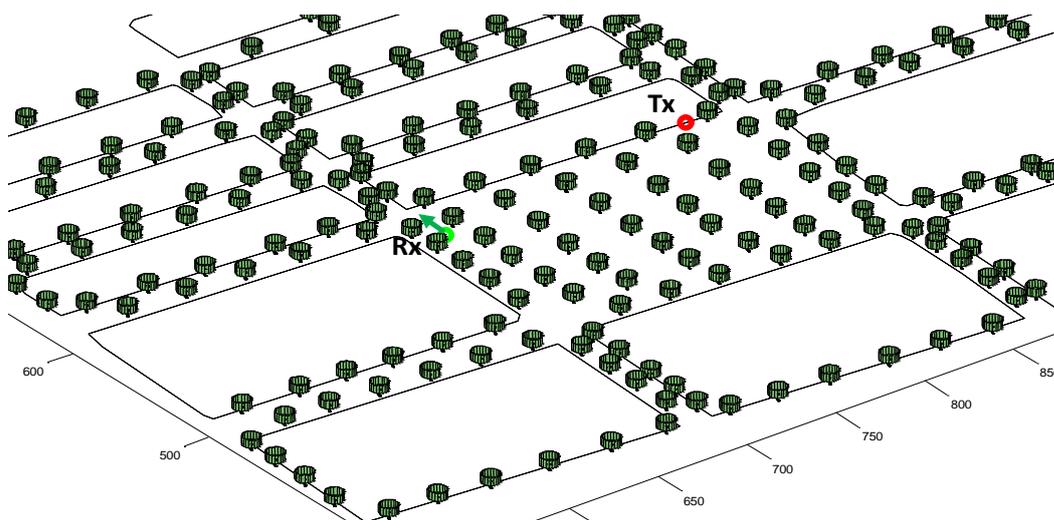


Figura 6.19 – Canais utilizados na simulação: o Tx é um círculo vermelho, o Rx no ponto inicial da rota é um círculo verde e os demais pontos e direção da rota estão representado por uma linha com seta verde. As árvores estão em verde e as projeções dos prisma no solo são polígonos com linhas pretas. As faces laterais dos prisma foram removidas. As escalas estão em metros.

Inicialmente, foi feita a simulação com o Tx a 3 m. A praça é cercada de construções, o que causa um intenso espalhamento. A grande quantidade de árvores ao redor também produz espalhamento. O traçado de raios nestes canais quase sempre ultrapassou 100.000 raios. A Figura 6.20 mostra detalhes dos canais simulados, em que os raios não foram exibidos para melhor visualização e uma linha vermelha foi traçada entre o Rx e o Tx, no que poderia ser o percurso do raio direto. Uma árvore próxima foi escolhida para a análise e está marcada na Figura 6.20. Desta forma, do canal 1 até o canal 17 o raio direto não é obstruído pela árvore próxima; no intervalo entre os canais 18 e 22, o raio direto é obstruído; e nos próximos canais, o tronco da árvore próxima não obstrui o raio direto. A árvore escolhida está a aproximadamente 4 m da rota escolhida para posicionar o Rx.

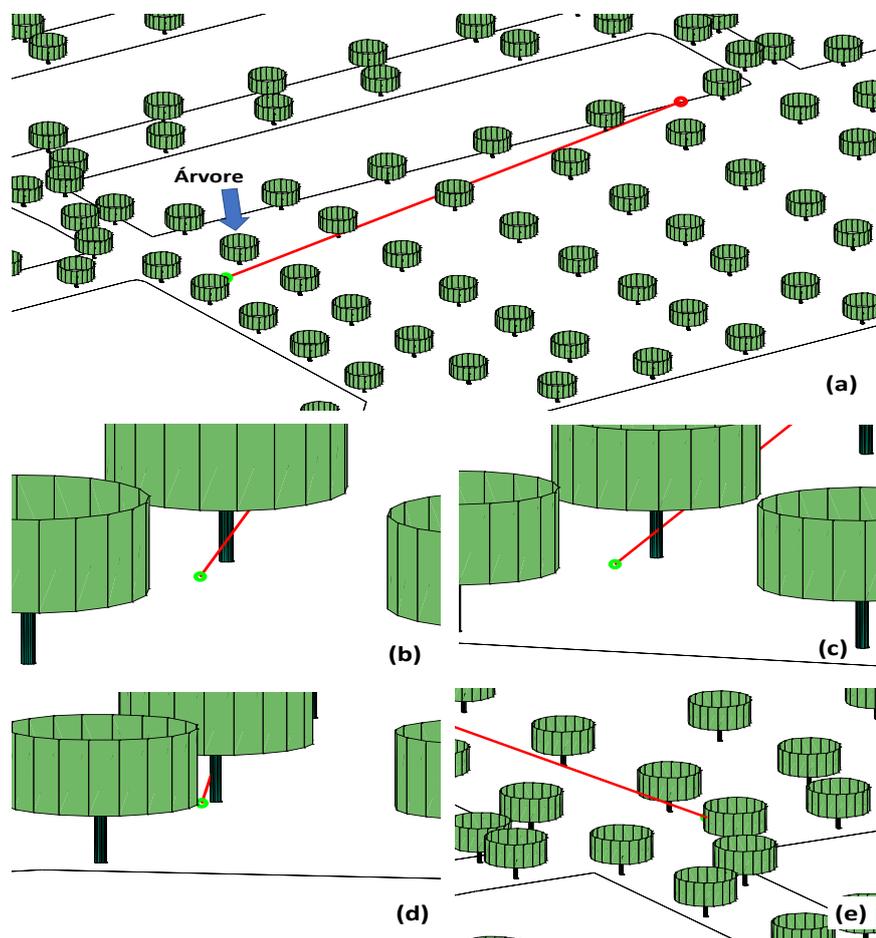


Figura 6.20 – Canais utilizados na simulação. Os círculos vermelho e verde são o Tx e Rx, respectivamente. Uma linha vermelha foi traçada entre os transceptores; (a) visão geral do canal 1; (b) detalhe da posição relativa entre o Rx do canal 17 e o tronco da árvore próxima; (c), (d) e (e) são detalhes da posição relativa entre o Rx e o tronco da árvore próxima nos canais 18, 22 e 23, respectivamente.

Em seguida, foram traçados os raios em todos os 39 canais e calculados suas funções de transferência, que foram utilizadas para calcular os PDPs de cada canal e as seguintes métricas: potência recebida nas componentes copolarizadas do campo (VV e HH), XPD (VV-VH e HH-HV), retardo médio e desvio RMS para a componente vertical do campo (VV).

Os resultados para a potência recebida nos canais podem ser vistos na Figura 6.21. É bastante evidente a diminuição da potência recebida nas polarizações VV e HH em função do bloqueio do raio direto pelo tronco da árvore. Nos canais de 1 a 17 e 23 a 39 existe visada, o que produz uma função de transferência e perfil de potência e retardos com características semelhantes aos da Figura 6.22, que mostra o resultado para o canal 1.

Nos canais de 18 a 22, não existe visada e pode-se observar uma diminuição no isolamento, causada pela diminuição da contribuição da potência do raio direto e aumento da contribuição do espalhamento. Com o bloqueio do raio direto, fica mais evidente a contribuição dos raios difratados no tronco que bloqueia o raio direto, conforme pode ser visto na Figura 6.23.

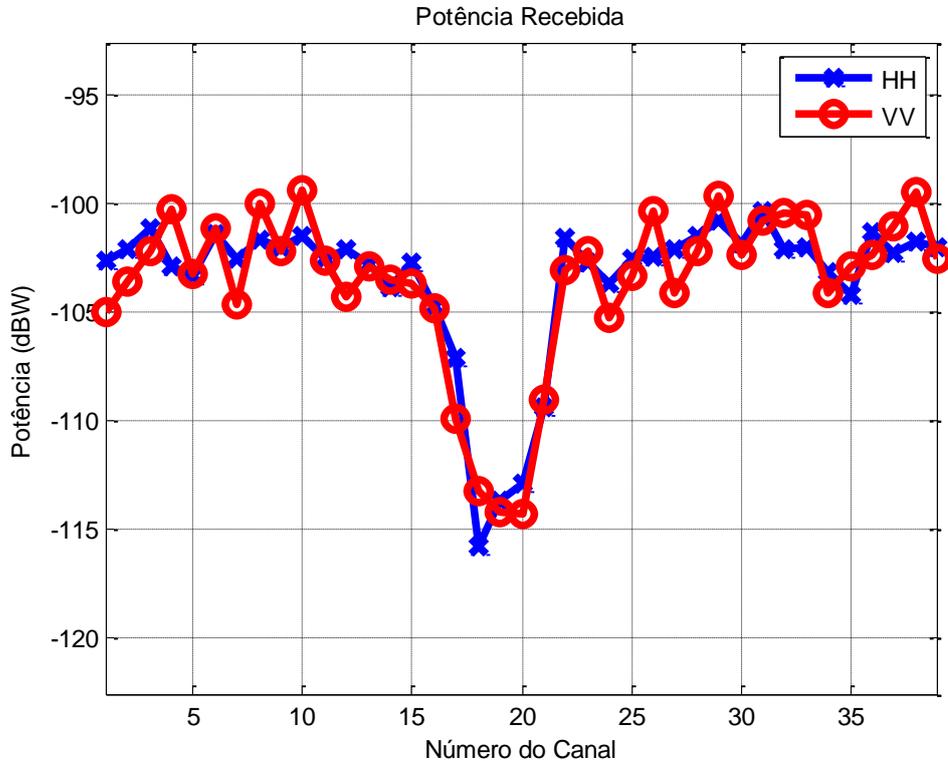


Figura 6.21 – Potência recebida nas componentes copolarizadas do campo nos canais.

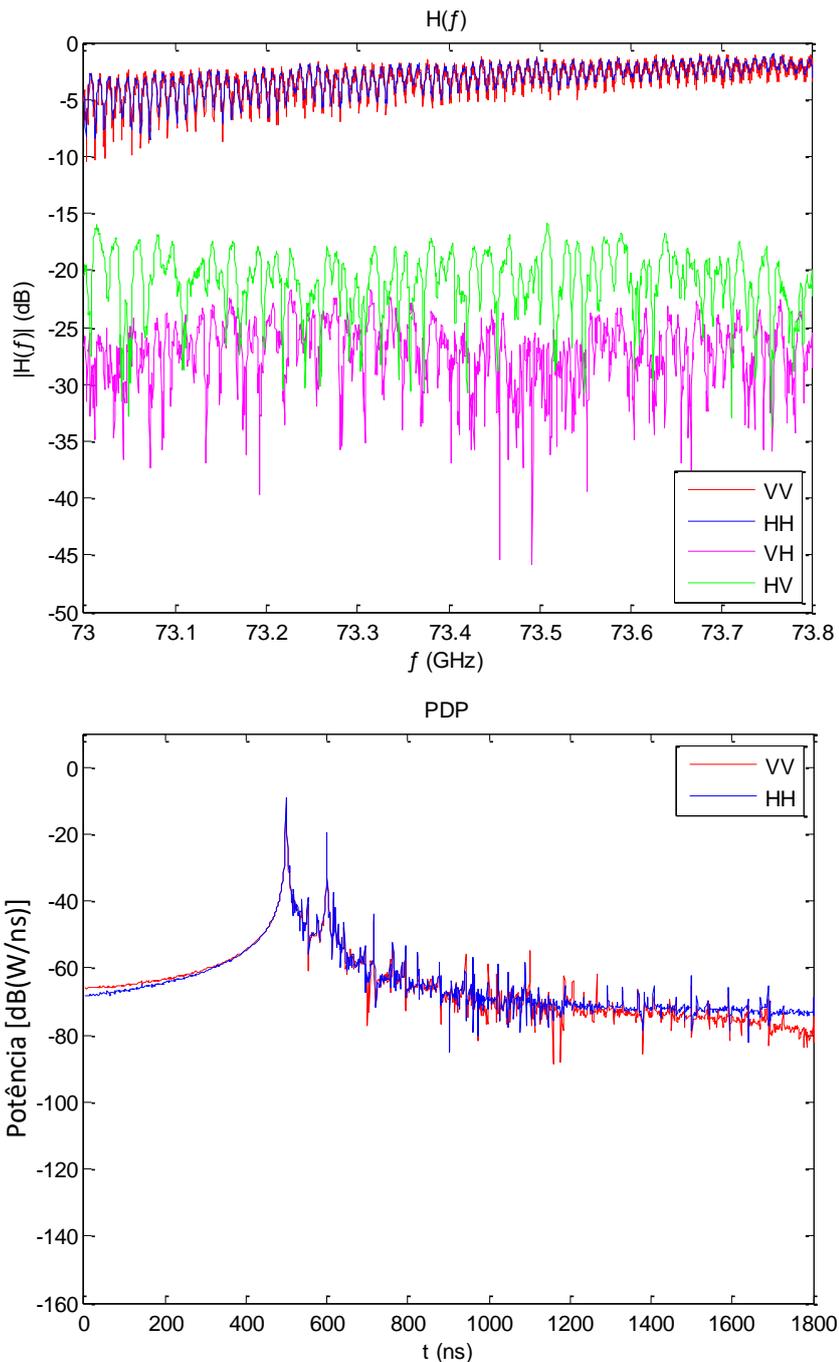


Figura 6.22 – Função de transferência e PDP do canal 1, em LOS.

O isolamento entre as componentes copolarizadas e cruzadas do campo também sofre alterações significativas quando o raio direto é obstruído, como pode ser visto na Figura 6.24. O isolamento diminui acima de 10 dB em ambas componentes. O retardo médio e o desvio RMS têm um leve aumento nos canais sem visada, conforme demonstra a Figura 6.25.

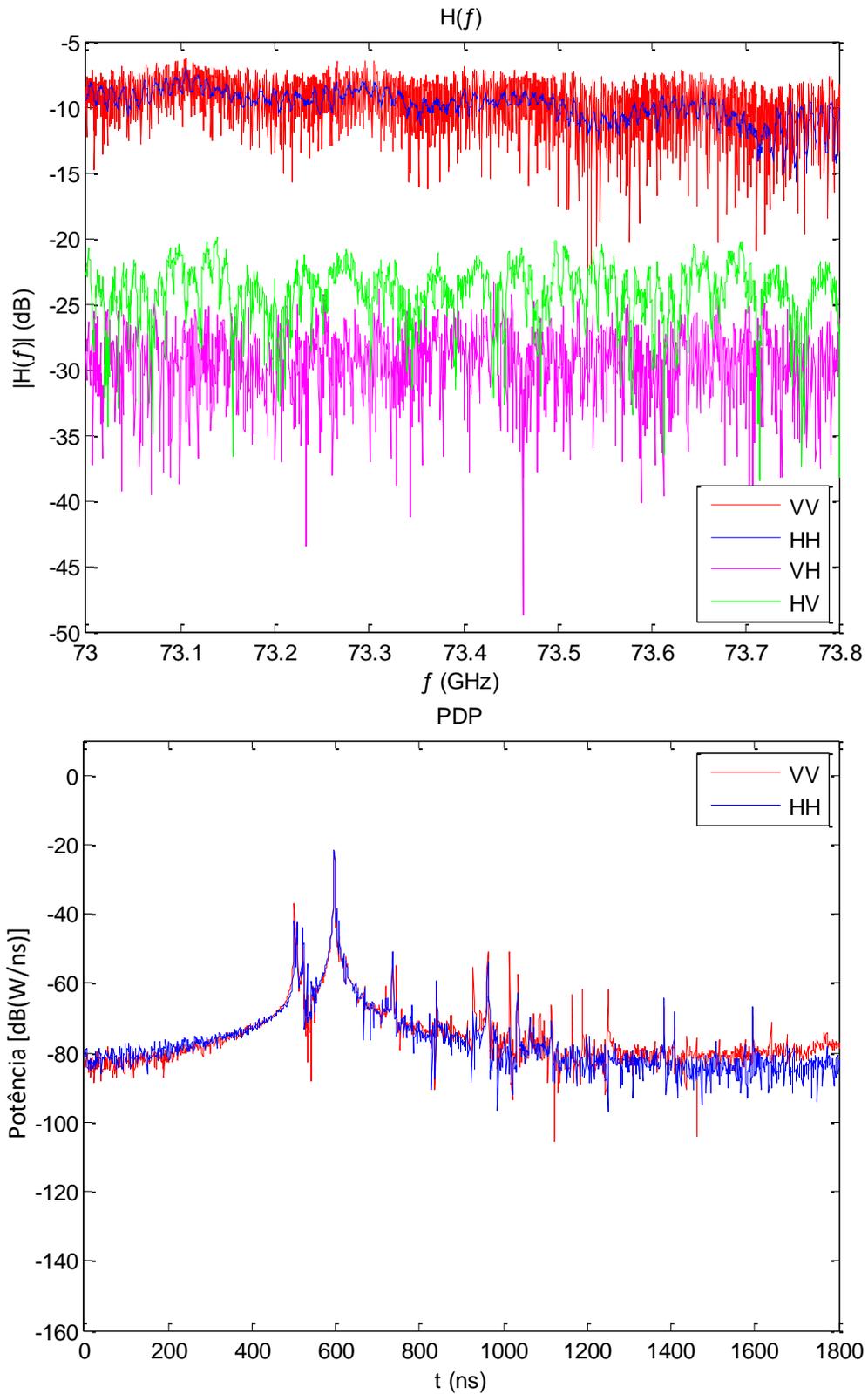


Figura 6.23 – Função de transferência e PDP do canal 20, em NLOS.

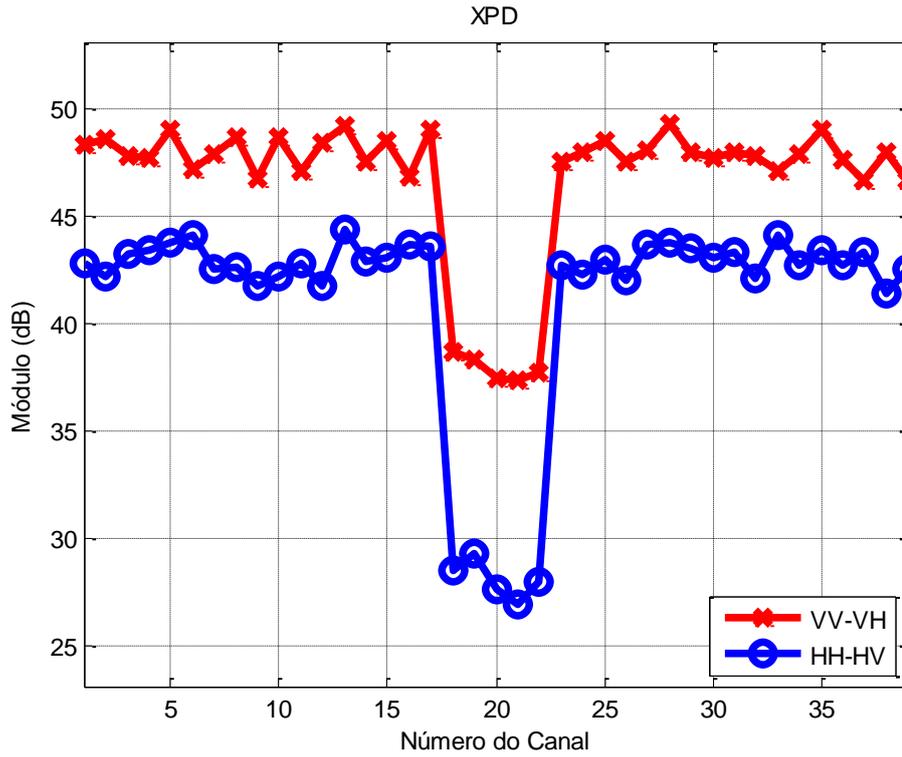


Figura 6.24 – XPD nos canais. O isolamento é calculado pela diferença da potência recebida pelas componentes co- e cruzada do campo.

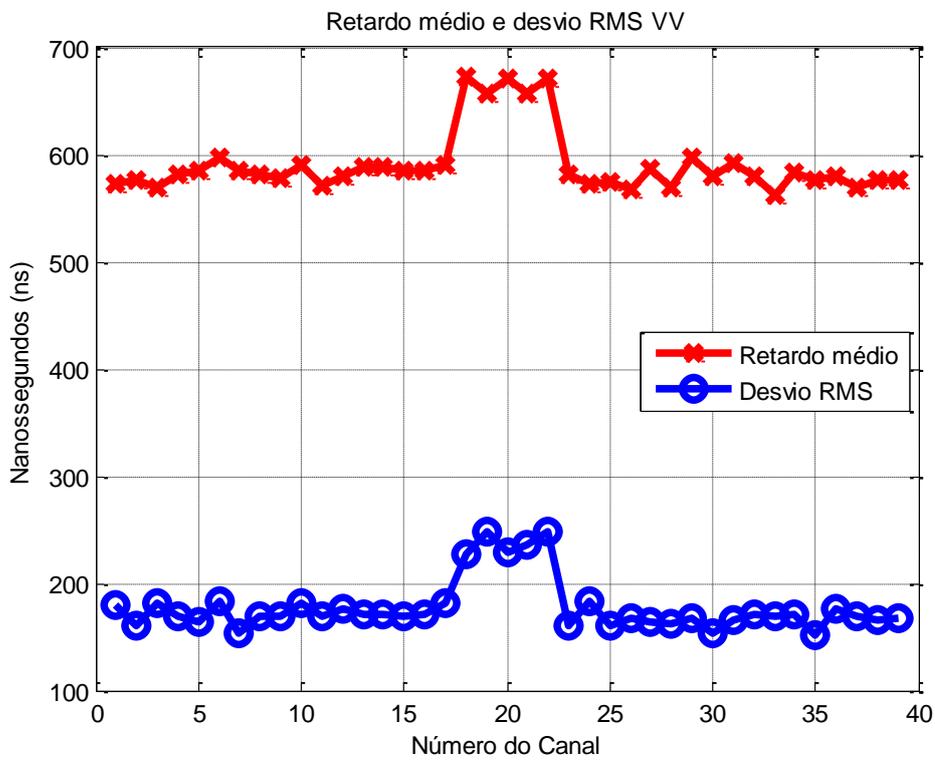


Figura 6.25 – Retardo médio e desvio RMS nos canais simulados.

Posteriormente, foi realizada a simulação com o Tx a 15 m do solo. As mesmas posições do Tx e Rx foram utilizadas. Nesta situação, o raio direto sofre atenuação e espalhamento pela copa da mesma árvore selecionada no caso anterior (e não pelo seu tronco). A Figura 6.26 mostra mais detalhes sobre a geometria da propagação.

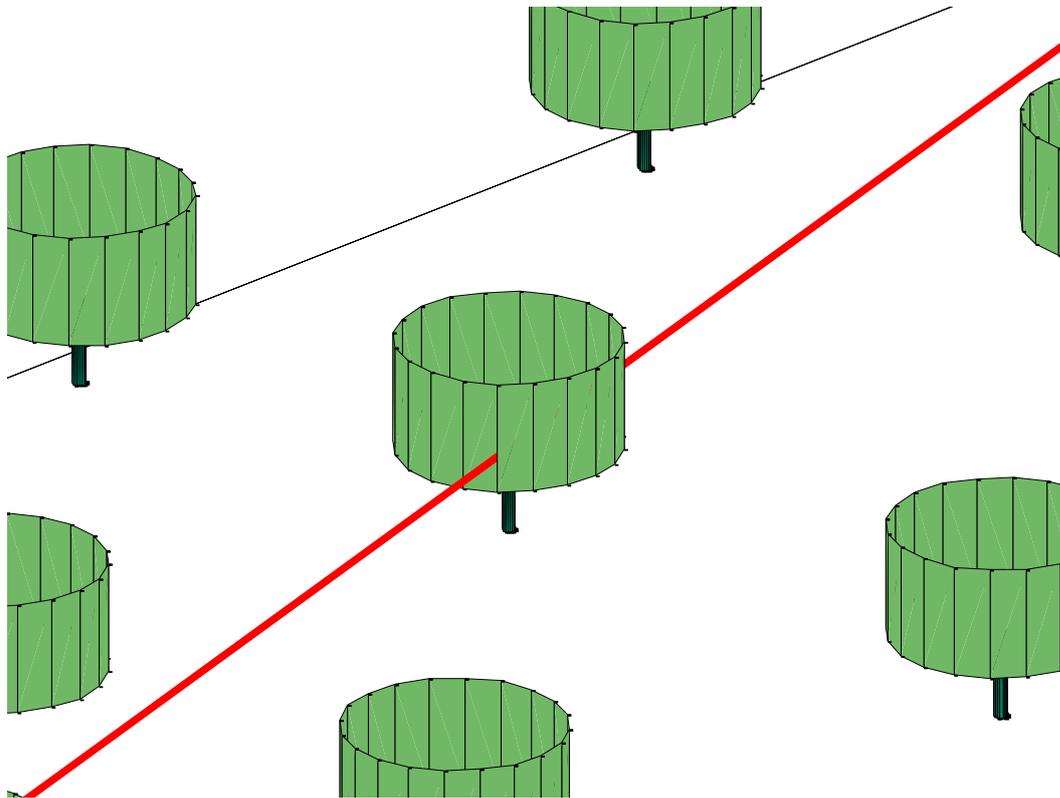


Figura 6.26 – Detalhe do canal 10: uma linha vermelha foi traçada entre os transceptores. Pode-se ver o percurso do raio direto através da copa da árvore selecionada. As árvores estão em verde e as linhas pretas são as projeções dos prismas.

Nesta simulação, o raio direto nunca é bloqueado. O sinal associado se propaga através da copa de árvores próximas e apenas o raio terrestre correspondente (raio que atinge o Rx após uma reflexão no solo) é bloqueado nos canais 18 a 22. Nos canais de 1 a 3 e 38 a 39, o raio direto não é interceptado por qualquer copa. Nos canais de 4 a 38, o raio direto intercepta copas de árvore. Desta forma, pode-se estabelecer três características de propagação diferentes: com visada e sem propagação através de copas; com visada e propagação através de copas; e com visada, propagação através de copas e com o bloqueio do raio terrestre que atinge o Rx após uma reflexão no solo. As funções de transferência e PDPs de canais com cada uma destas características podem ser vistos nas Figura 6.27 a 6.29, respectivamente.

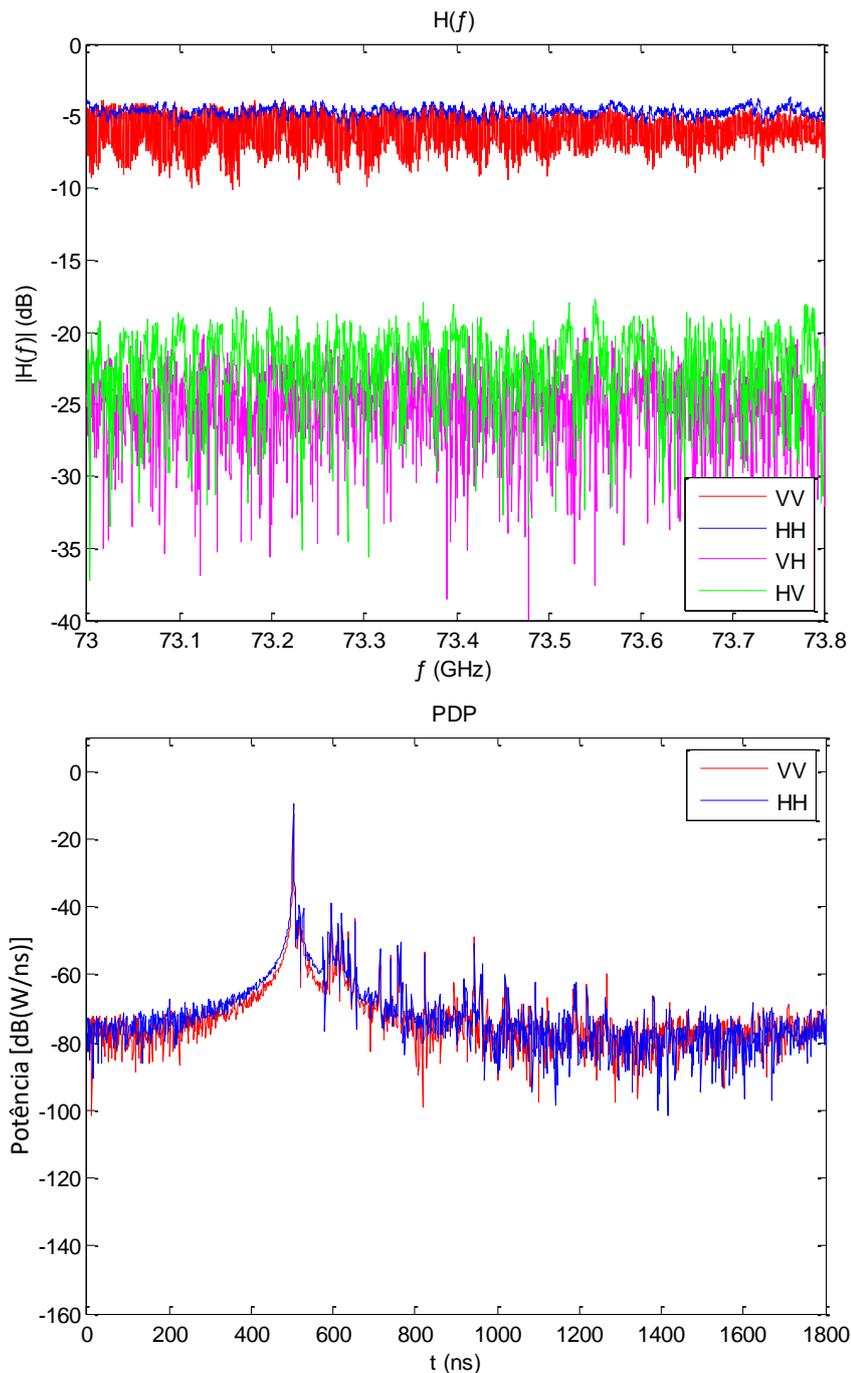


Figura 6.27 – Canal 1, onde há visada, sem bloqueios ou propagação ao longo do raio direto através de copas.

É importante estabelecer que a elevação do Tx acima da linha de copas também pode provocar o aumento da perda de propagação em todos os mecanismos, pois o Rx se encontra abaixo da linha de copas e os raios agora percorrerão percursos que podem estar interceptados por copas de árvores.

Nos canais em que o raio direto se encontra totalmente desobstruído (Figura

6.27), pode-se constatar elevadas potências e altos isolamentos entre as componentes do campo. Nos canais em que o raio direto intercepta alguma copa de árvore, pode-se observar a alta perda provocada pela propagação através deste elemento, ocorrendo em algumas vezes a escolha de outro raio como o mais intenso, como pode ser visto na Figura 6.28. Nesta situação o isolamento pode decrescer substancialmente.

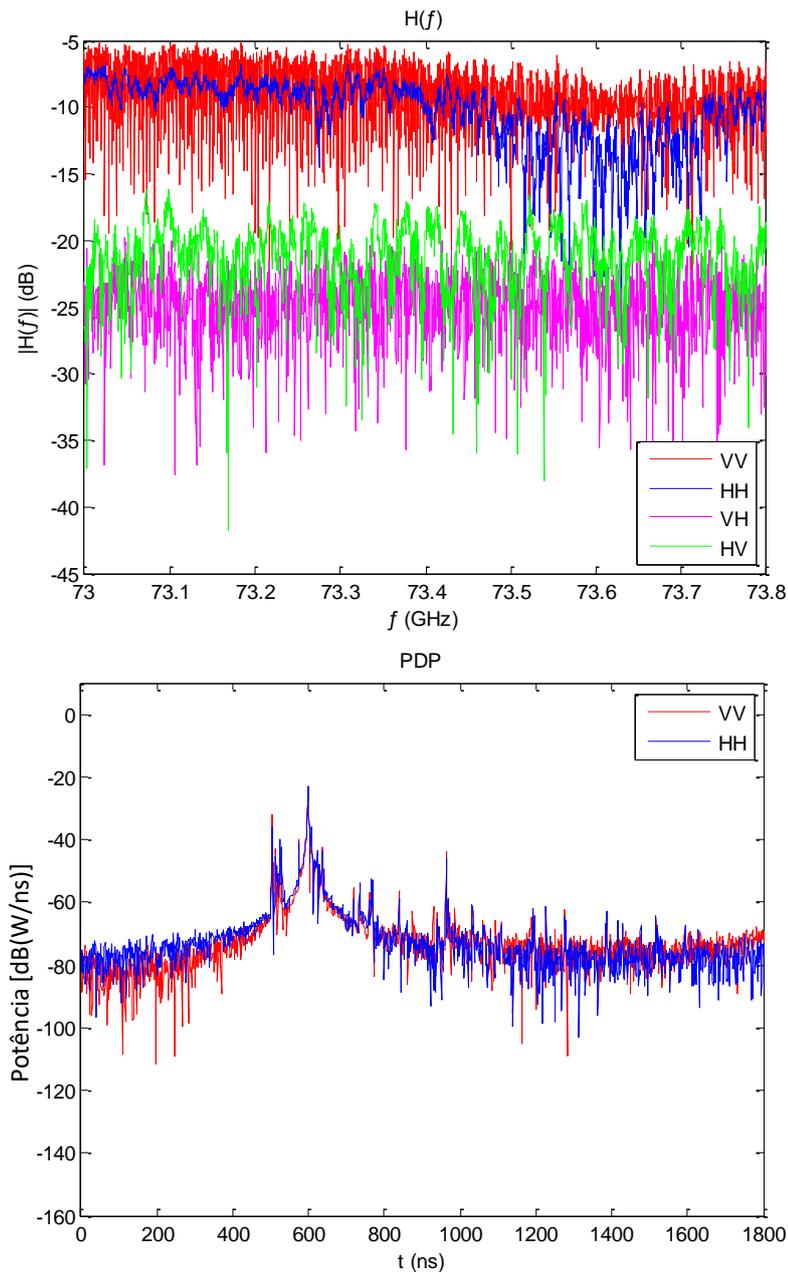


Figura 6.28 – Canal 30, onde há visada sem bloqueios, mas com a propagação ao longo do raio direto através de copas.

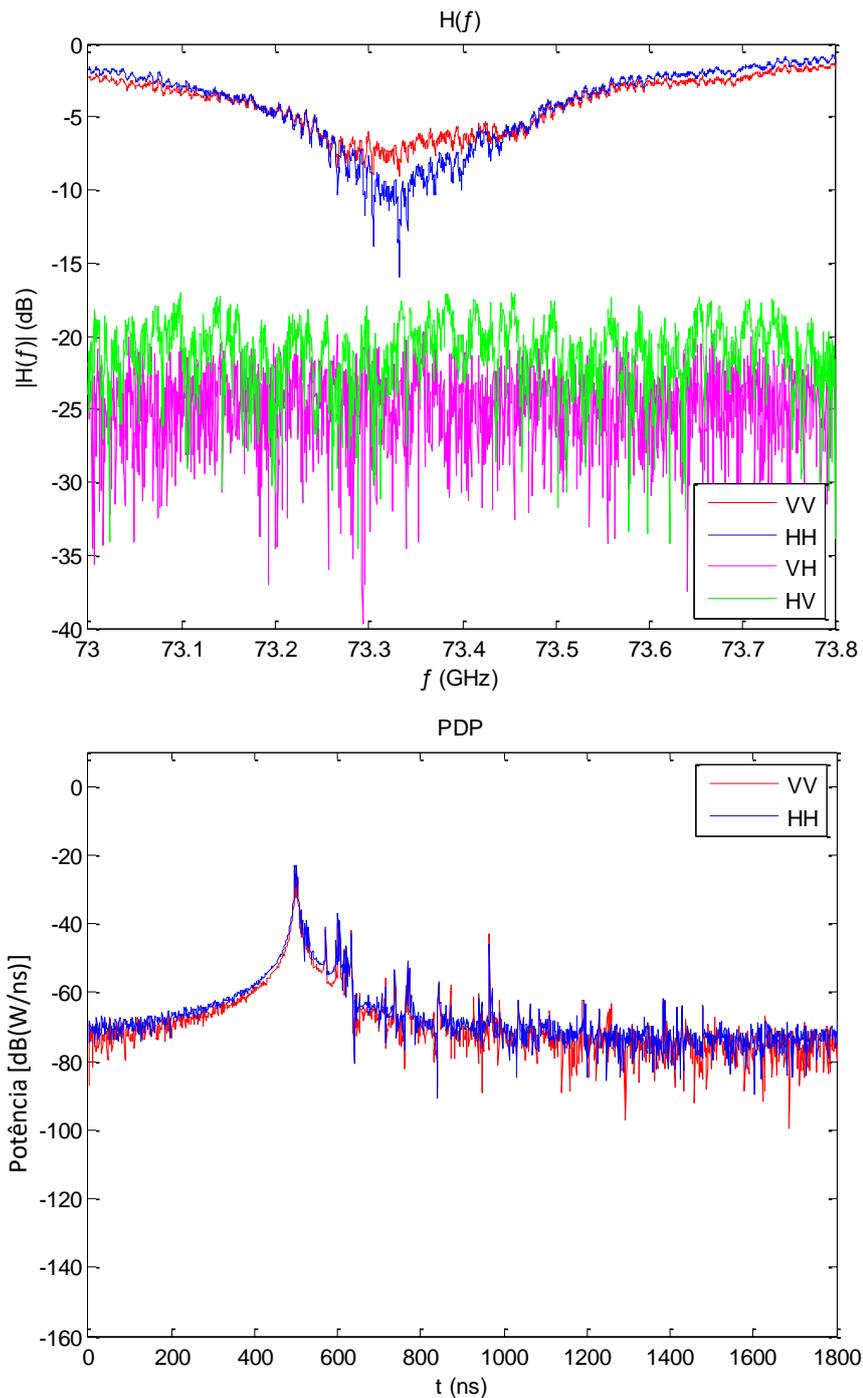


Figura 6.29 – Canal 20, onde há visada, bloqueio do raio terrestre e a propagação ao longo do raio direto através de copas.

No caso em que o raio direto possui visada, embora intercepte copas de árvores e o raio terrestre é interceptado por um tronco, pode-se observar a diminuição na sua potência relativa e o isolamento em um nível elevado, embora inferior ao observado no caso da completa desobstrução. Em seguida, o algoritmo processou

os dados dos PDPs em todos os canais para produzir os resultados da potência recebida no Rx (VV e HH), os valores de XPD (VV-VH e HH-HV) e os retardos médios e desvios RMS (VV) nos canais, conforme mostram as Figuras 6.30, 6.31 e 6.32, respectivamente.

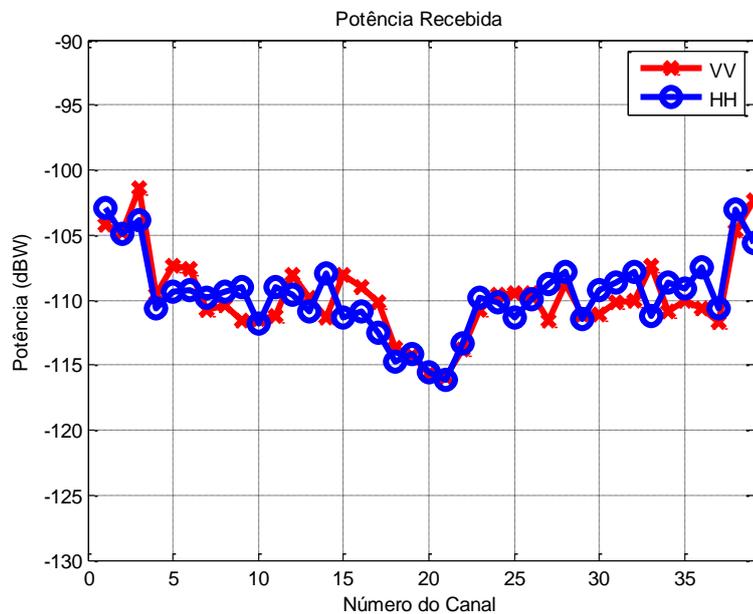


Figura 6.30 – Potência recebida nas componentes copolarizadas do campo nos canais.

É possível notar na Figura 6.30 que, para ambas polarizações VV e HH ocorre um acréscimo da potência recebida nos canais em que o raio direto não interage com copas (canais 1, 2, 3, 38 e 39) e os demais canais. Os menores valores de potência recebida ocorrem nos casos em que o raio terrestre é bloqueado pelo tronco e o raio direto é atenuado por copas (canais 18, 19, 20, 21 e 22). Os níveis de potência recebida são, em geral, inferiores aos obtidos na simulação anterior (Tx a 3 m do solo), embora os gradientes de queda e elevação sejam mais suaves. Tal resultado pode ser devido à maior atenuação provocada pelas copas.

A XPD calculada sobre a componente VV do campo mostra-se, em geral, quase 10 dB abaixo daquela calculada nos mesmos canais na simulação anterior. Adicionalmente, as variações de XPD nesta nova simulação estão mais suaves que as obtidas anteriormente. A XPD calculada sobre a componente HH possui níveis próximos aos encontrados para a componente VV nos canais sem interceptação do raio direto pelas copas. Posteriormente, o valor desta métrica decresce inicialmente de até 7 dB nos canais com níveis variados de interceptação em copas do raio direto

e atinge seu menor valor em toda simulação (17 dB). Este isolamento é muito inferior ao encontrado em canais onde o raio direto está presente. A Figura 6.31 mostra este comportamento. Em relação ao desvio RMS, os resultados são próximos aos obtidos na simulação anterior. O retardo médio também apresenta similaridades com o obtido no caso anterior. Entretanto, na situação de atenuação do raio direto aéreo por copas e bloqueio do raio terrestre que atinge o Rx após reflexão no solo, o aumento do seu valor é mais pronunciado que o observado na simulação anterior.

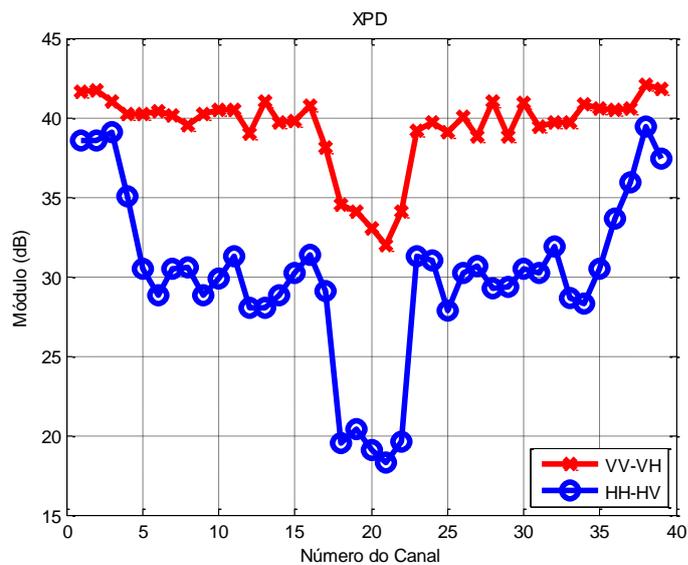


Figura 6.31 – XPD nos canais simulados. É possível notar o decréscimo no isolamento à medida que o raio direto intercepta a copa.

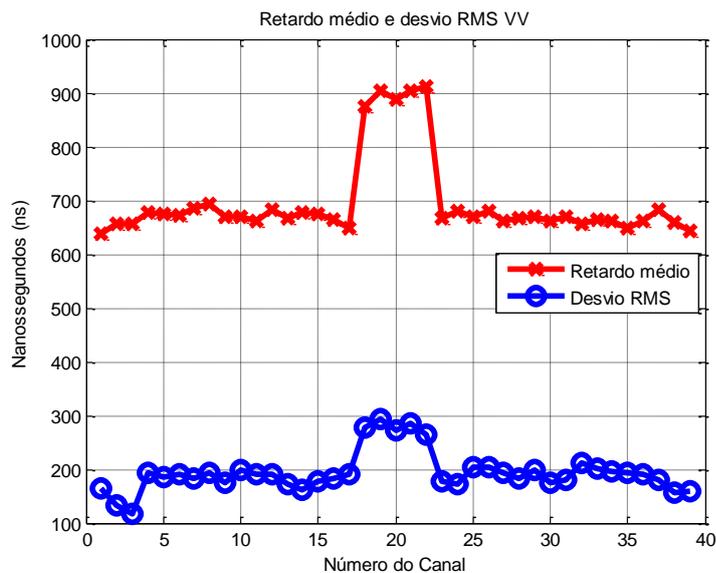


Figura 6.32 – Retardo médio e Desvio RMS nos canais simulados.

6.3

Simulação em Rota Pré-definida em Ipanema

Para esta última simulação do Capítulo, foi suposto que um usuário de sistema móvel se desloque pelas calçadas do bairro de Ipanema, nas proximidades da praça Nossa Senhora da Paz. O Tx e o Rx encontram-se a 15 m e 1,5 m de altura em relação ao solo, respectivamente. Inicialmente, o usuário encontra-se sem visada e segue uma rota que se aproxima do Tx. A rota consiste de 25 posições uniformemente espaçadas de 16 m. A Figura 6.33 ilustra detalhes geométricos da rota.

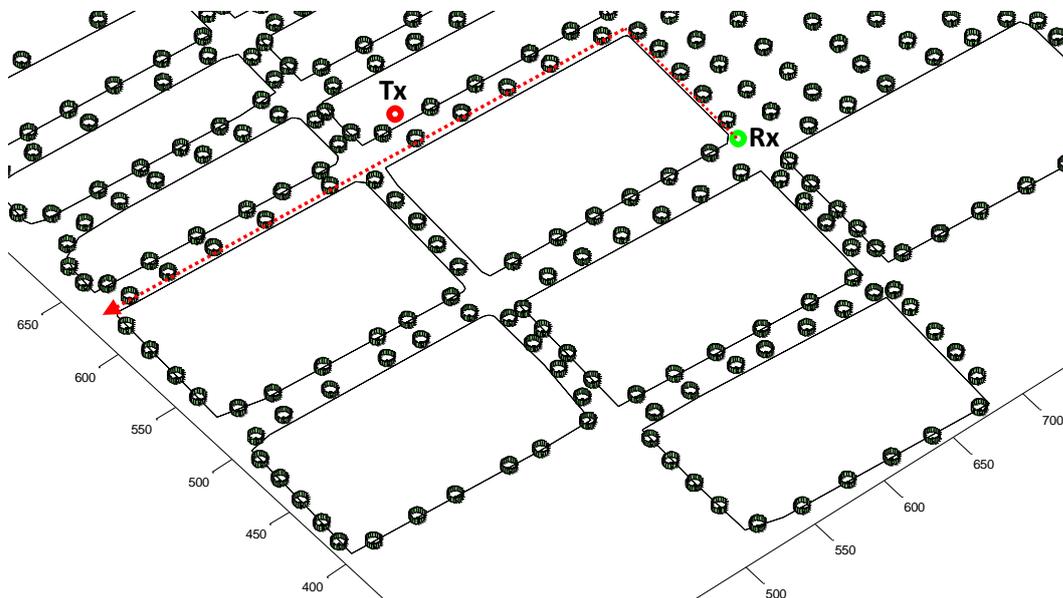


Figura 6.33 – Canais utilizados na simulação: O Tx é um círculo vermelho, o Rx no ponto inicial da rota é um círculo verde e os demais pontos e direção da rota estão representados por uma linha tracejada com seta vermelha. As árvores estão em verde e as projeções dos prismas no solo são polígonos com linhas pretas. As faces laterais dos prismas foram removidas. As escalas estão em metros.

Foram usadas as mesmas configurações gerais utilizadas na simulação passada. A única alteração foi a largura da faixa de transmissão, de 1 GHz. Os 25 canais foram processados e o traçado de raios executado. Em seguida, foram calculadas as funções de transferência e as mesmas métricas utilizadas na seção anterior. O Apêndice XIII mostra maiores detalhes do traçado de raios, funções de transferência e PDPs de cada canal.

Os canais de 1 a 6 estão nas proximidades da praça e sem visada. Nestes canais, o Rx está localizado em um espaço aberto, com muitas árvores ao redor e prédios nos limites da praça, o que produz, em geral, uma grande quantidade de raios oriundos do espalhamento. O canal 7 marca o ponto da rota em que o usuário dobra a esquina, sai dos arredores da praça e entra em uma rua caracterizada por um ambiente do tipo “vale de prédios”, com visada para o Tx. O Apêndice XIII mostra a geometria destes canais.

Nestes canais, o Rx inicialmente se aproxima do Tx, se deslocando em direção ao norte pela lateral leste da praça. É possível notar que a potência recebida nos 6 primeiros canais, que não dispõem de visada, aumenta paulatinamente à medida que o Rx se aproxima do Tx. Um grande aumento da potência é percebido no canal 7, que possui visada. A partir do canal 7, todos os demais canais possuem visada, embora no canal 13 o raio direto seja bloqueado por um tronco. Nos canais de 8 a 16, o Rx está se aproxima do Tx, pela calçada, no sentido Leste-Oeste (geometria no Apêndice XIII). O nível de potência recebida tem um nível bem maior que nos canais iniciais. Isso se deve não somente à contribuição do raio direto, mas ao número mais elevado de raios oriundos de reflexão especular. Por fim, nos canais de 17 a 25 o Rx se afasta do Tx no mesmo sentido Leste-Oeste e a potência recebida diminui progressivamente. A Figura 6.34 mostra os valores simulados para a potência recebida em ambas polarizações ortogonais.

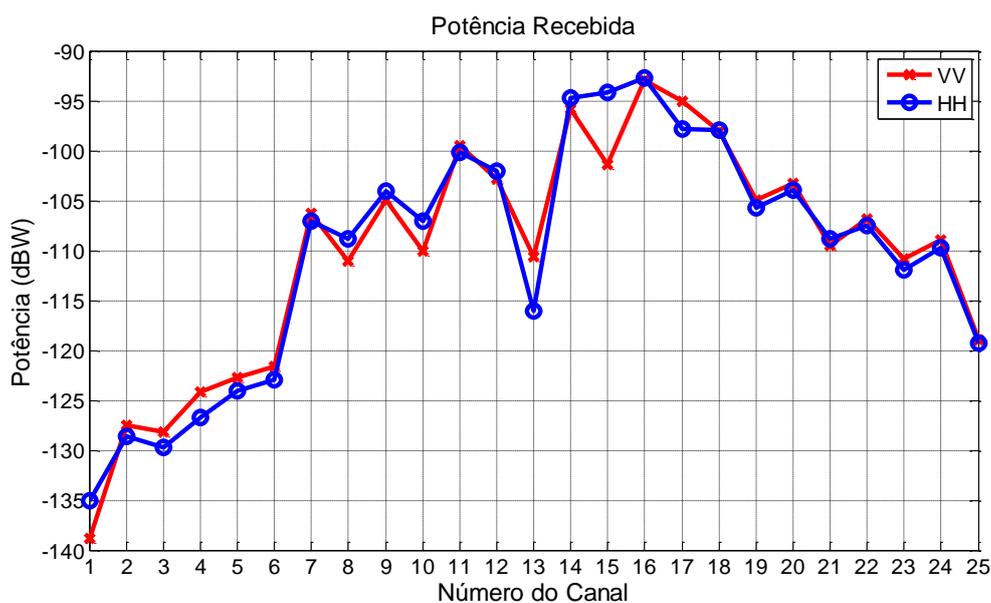


Figura 6.34 – Potência recebida por canal.

A simulação mostra que o impacto da propagação sobre as copas causa variações na potência recebida. Este efeito foi especialmente verificado nos canais 8, 10, 13 e 25, onde o sinal associado ao raio direto se propagou através das copas.

Sob o ponto de vista da XPD, é possível notar que a grande quantidade de raios oriundos do espalhamento nas árvores e paredes na proximidade da praça afeta negativamente o isolamento entre as componentes copolarizadas e cruzadas do campo. Seus efeitos podem ser notados não apenas nos canais iniciais, que possuem um baixo isolamento, em virtude da ausência de visada, mas também nos canais intermediários, conforme pode ser visto nas Figuras de traçado de raios do Apêndice XIII, que mostram os raios de espalhamento oriundos da região da praça, ainda afetando os canais em visada. O isolamento nos canais de 7 a 25 mostra bastante variação, em função da ação da reflexão difusa nas paredes dos prédios e inibição de raios refletidos especularmente nestas paredes pelas árvores e postes distribuídos na calçada. O isolamento atinge seu valor máximo no canal 15, que está próximo do Tx e não possui muitas árvores nas proximidades, o que diminui a despolarização.

Um efeito interessante é que o isolamento continua aumentando à medida que o Rx se afasta do Tx nos canais finais, em virtude da grande diminuição da quantidade de raios oriundos da praça. A Figura 6.35 mostra esse efeito.

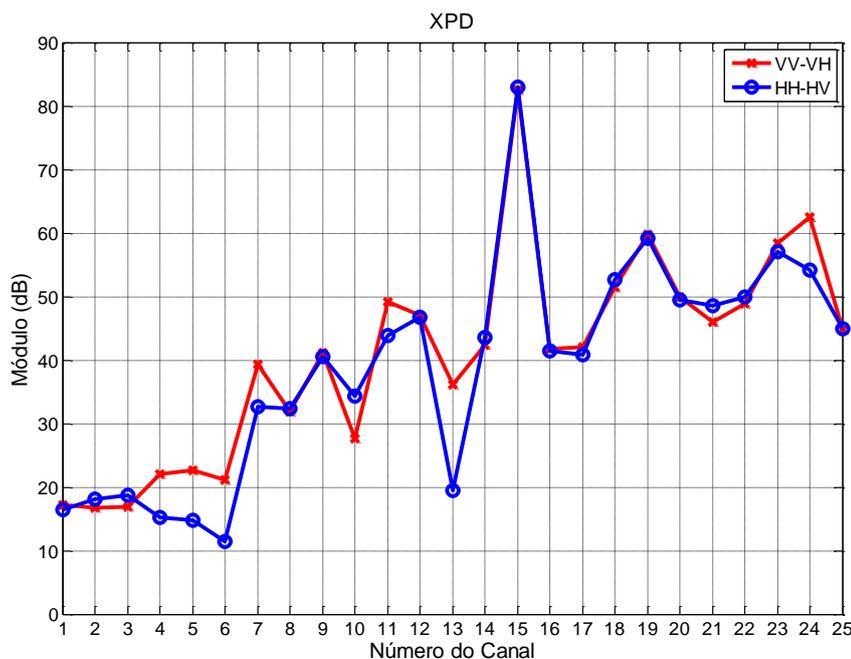


Figura 6.35 – XPD entre componentes copolarizadas e cruzadas do campo.

O retardo médio mostrou resultados previsíveis, com altos valores nos canais iniciais e finais, em virtude do maior afastamento entre os transceptores. Seu valor diminui à medida que este afastamento é reduzido, conforme mostra a Figura 6.36, que apresenta apenas resultados associados à componente vertical do campo. O desvio RMS também se comportou como o esperado, apresentando uma leve queda nos canais centrais e aumento nos canais iniciais e finais. Os valores obtidos estão compreendidos entre 90 ns e 220 ns, conforme mostra a Figura 6.36.

Por razões de simplicidade e facilidade de visualização, as Figuras 6.37 e 6.38 mostram os PDPs nos canais iniciais de 1 a 7, ainda na praça. Posteriormente, as Figuras 6.39 e 6.40 mostram os PDPs associados aos canais 8 a 16, correspondentes ao Rx na rua e se aproximando do Tx. Finalmente, as Figuras 6.41 e 6.42 mostram os PDPs associados aos canais 17 a 25, correspondentes ao Rx na rua e se afastando do Tx.

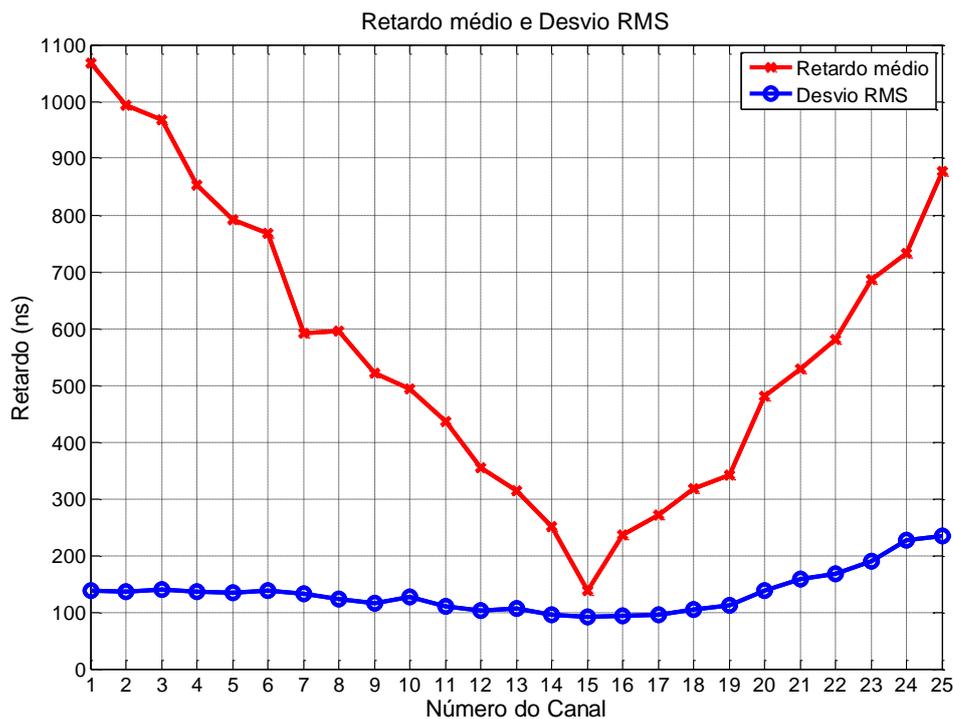


Figura 6.36 – Retardo médio e Desvio RMS nos canais para a componente vertical do campo.

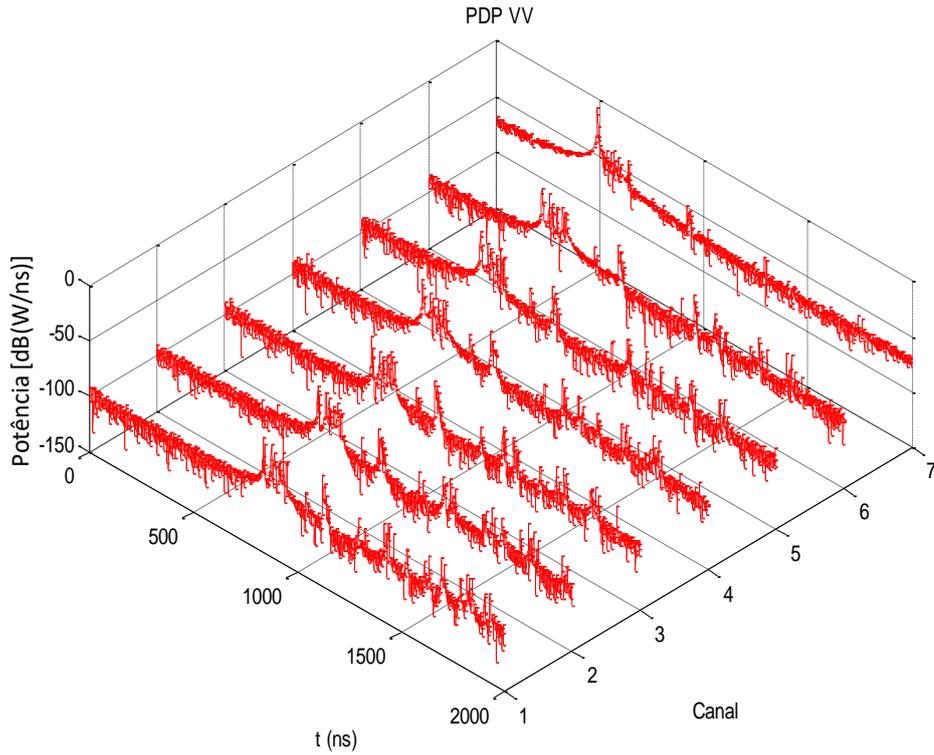


Figura 6.37 – Perfil de potência e retardos para os canais de 1 a 7, próximos à praça e na polarização vertical.

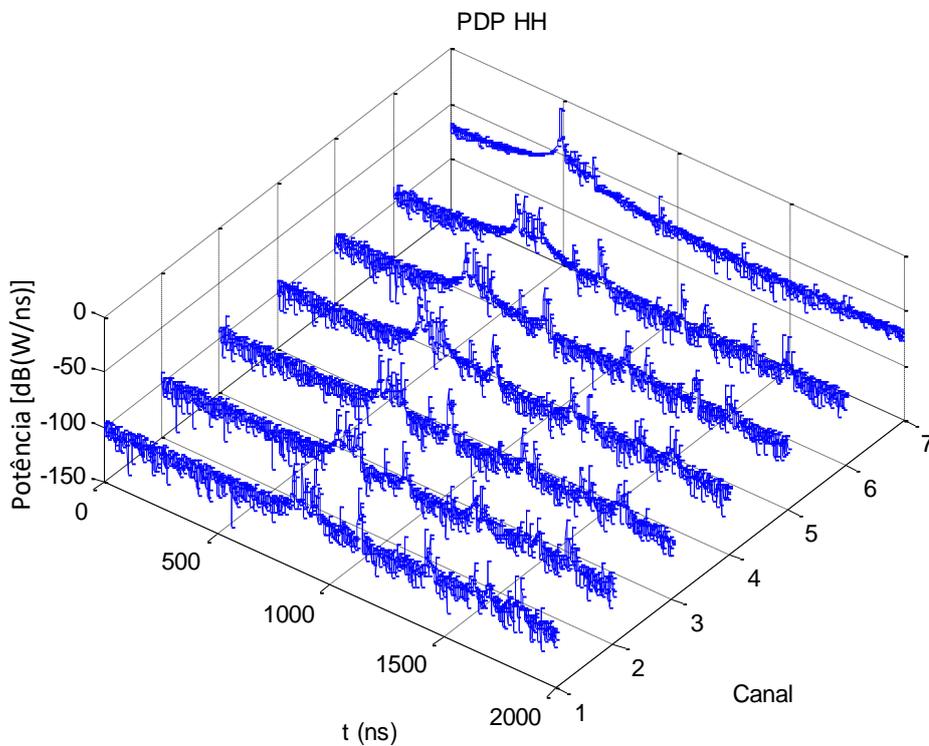


Figura 6.38 – Perfil de potência e retardos para os canais de 1 a 7, próximos à praça e na polarização horizontal.

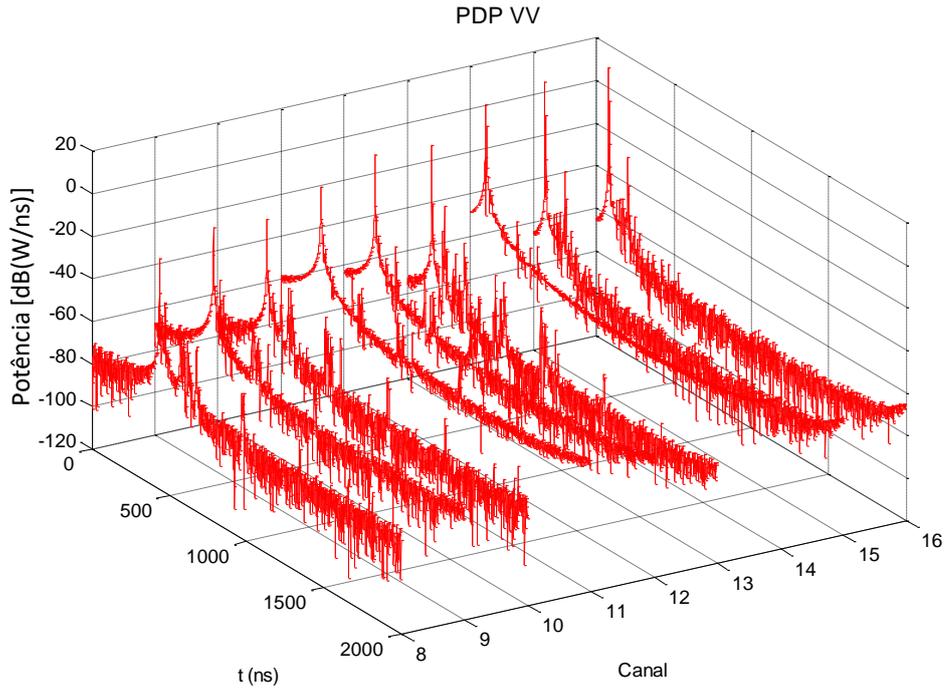


Figura 6.39 – Perfil de potência e retardos para os canais de 8 a 16, na rua cercada por prédios e na polarização vertical.

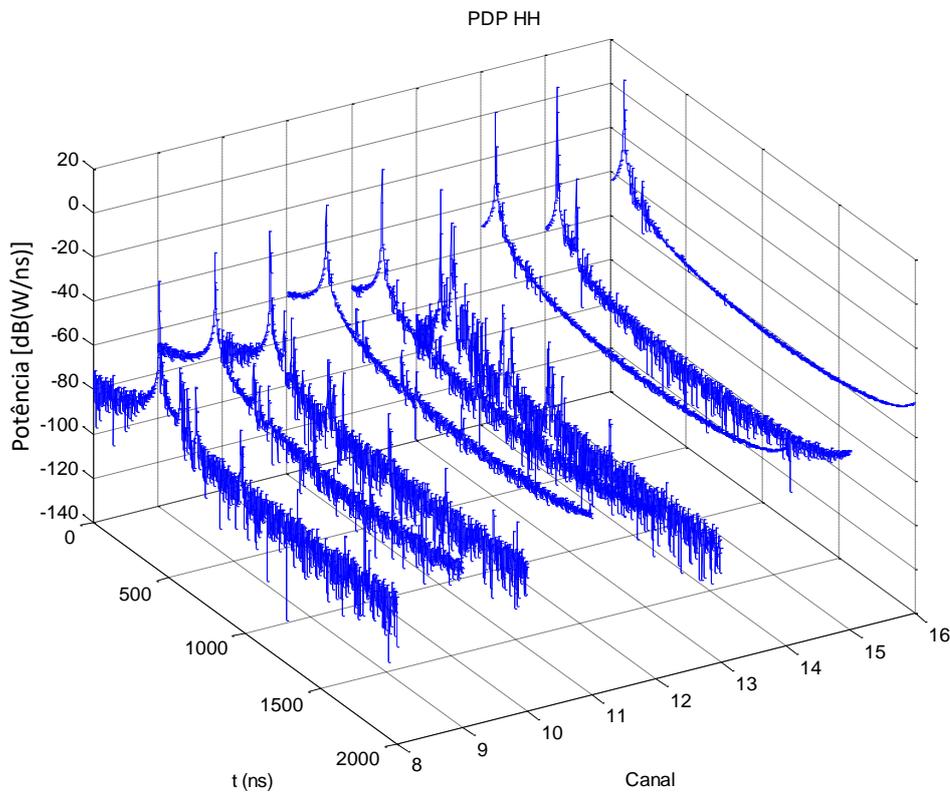


Figura 6.40 – Perfil de potência e retardos para os canais de 8 a 16, na rua cercada por prédios e na polarização horizontal.

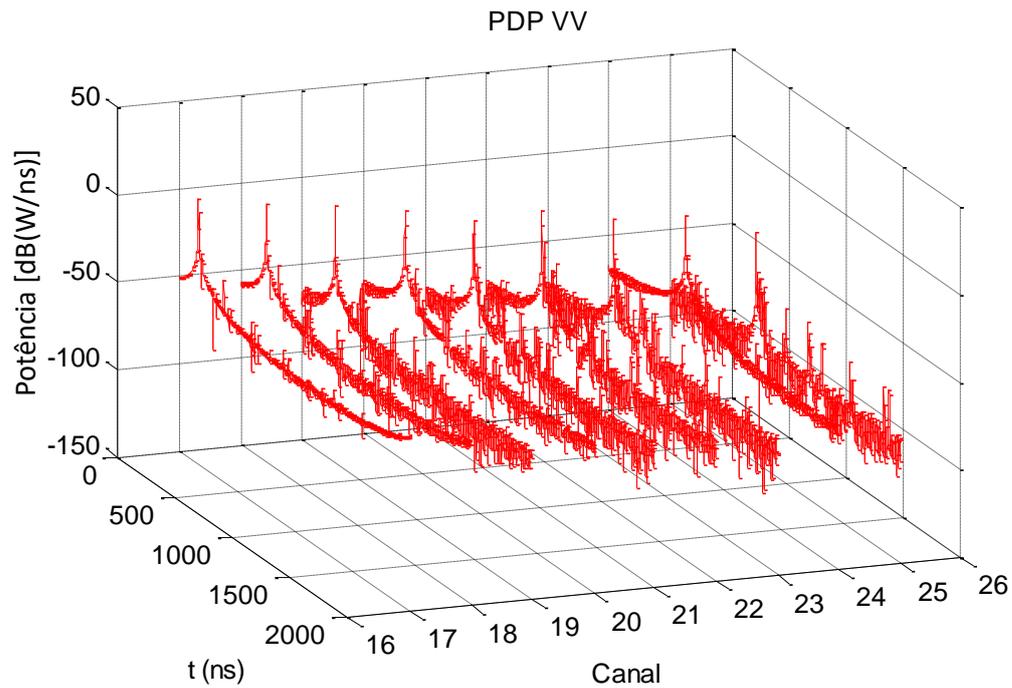


Figura 6.41 – Perfil de potência e retardos para os canais de 17 a 25, na rua cercada por prédios e na polarização vertical.

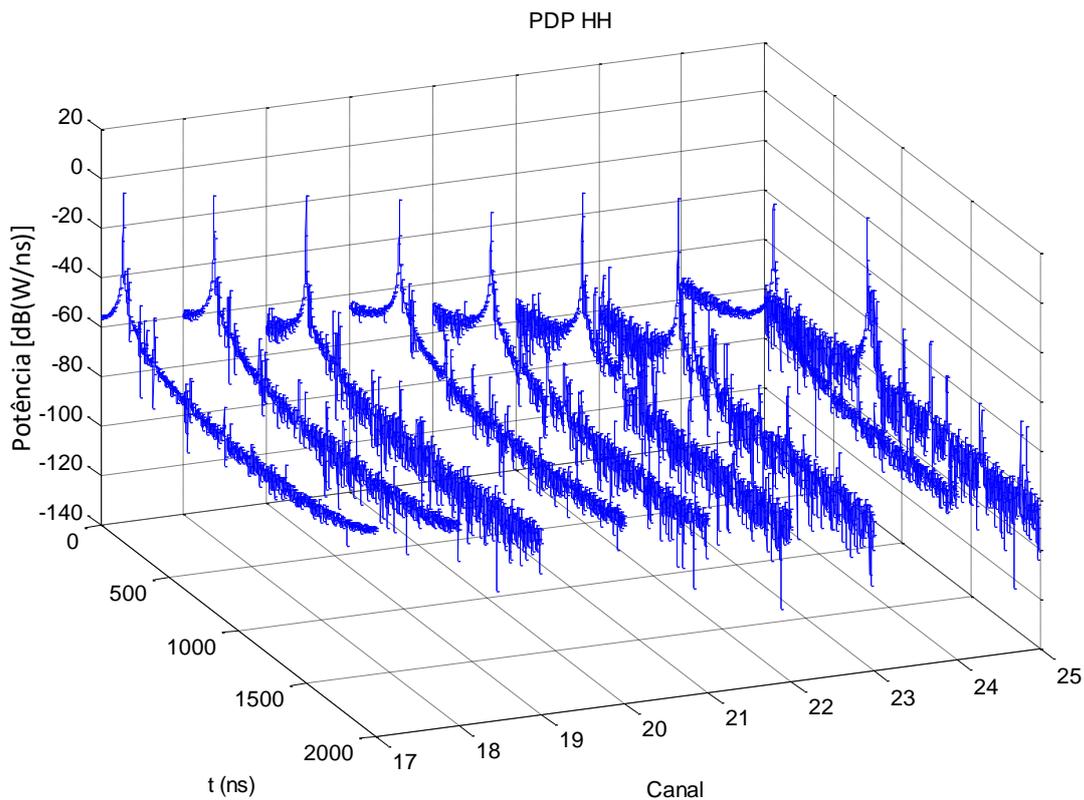


Figura 6.42 – Perfil de potência e retardos para os canais de 17 a 25, na rua cercada por prédios e na polarização horizontal.