

6 Resultados

A análise do canal rádio UWB foi feita em três ambientes interiores com características diferentes: o corredor do segundo andar do prédio Cardeal Leme da PUC-Rio (corredor Leme), corredores do CETUC e um Escritório.

Em todos os ambientes analisados foram considerados feixes transmitidos, refletidos e difratados de primeira ordem. Adicionalmente, nos corredores do CETUC, foram também considerados feixes de difração de segunda ordem. A escolha da ordem de feixes difratados nos modelos foi realizada com os objetivos de produção da melhor precisão dos modelos que incorpora difração no menor tempo de processamento. A melhor precisão do modelo que considera a difração pode ser visto no apêndice A.4, que analisada os valores (LOS e NLOS) de retardo médio e espalhamento de retardo RMS nos corredores do CETUC, onde existem distâncias de até 30,5 metros (corredor A3), com vários obstáculos entre transmissor e receptor.

A escolha destes ambientes baseou-se na possibilidade de futuras utilizações nestes ambientes de aplicações a altas taxas de transmissão, como WPANs (*Wireless Personal Area Networks*), multimídia e de conexão remota entre equipamentos.

A descrição dos ambientes, assim como a análise dos parâmetros de dispersão em pequena escala do canal e a variação de potência recebida ao longo da distância são realizadas nas seções 6.1, 6.2 e 6.3.

A análise em pequena escala do canal refere-se a medidas realizadas sobre uma pequena área centrada em uma determinada posição do espaço, denominada de ponto local, onde as características do canal são bastante similares.

6.1. Corredor Leme

O corredor Leme é representado pelo corredor do segundo andar do prédio Cardeal Leme da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, um grande prédio de alvenaria no qual existem salas de aulas, laboratórios e escritórios. Este corredor é ilustrado na Figura 57.



Figura 57- Foto do corredor Leme.

Neste ambiente, a altura das antenas transmissora e receptora é de 1,5 metros. Apenas a situação de LOS (*line-of-sight*) entre transmissor e receptor é encontrada. O transmissor (ponto de observação) foi colocado a cada 0,5 metros ao longo de uma linha reta imaginária que se afastava do ponto de recepção. Todas as portas existentes neste ambiente estavam fechadas durante as medidas.

Com base nas medidas realizadas neste ambiente, foram feitas análises dos parâmetros de dispersão do canal e da variação de potência recebida ao longo da distância, em 88 posições diferentes do transmissor. O primeiro ponto de transmissão estava situado a um metro do receptor.

Os objetos existentes no ambiente de medidas, tais como armários, extintores, máquina de café e porta de vidro, foram considerados pelo modelo, nas posições indicadas na Figura 58. Nesta Figura, alguns objetos estão posicionados em alturas diferentes em relação ao solo. Os extintores e o teto do corredor estão a uma altura de 0,69 metros e 3,15 metros, respectivamente.

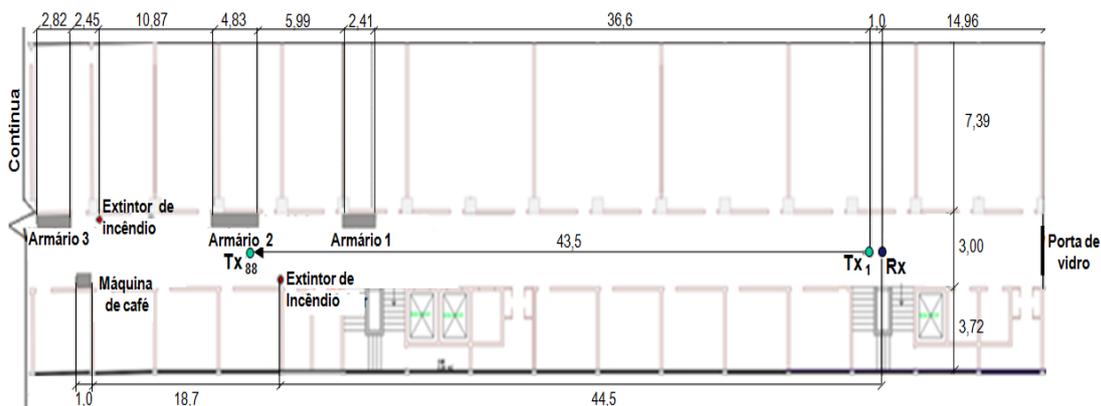


Figura 58- Planta baixa do segundo andar do prédio Cardeal Leme.

A Tabela 3 apresenta as dimensões de cada objeto.

	Altura (metros)	Largura (metros)	Tipo de material
Armário 1	2,00	2,41	Metal
Armário 2	2,00	4,83	Metal
Armário 3	2,20	2,82	Metal
Maquina de café	1,20	1,00	Metal
Extintores	0,17	0,52	Metal
Porta	1,20	2,1	Vidro

Tabela 3- Características dos objetos contidos no corredor do segundo andar do prédio Cardeal Leme.

A Tabela 4 [75] apresenta as permissividades relativas ϵ_r e as condutividades σ utilizadas para as faces que compõem os objetos existentes no ambiente considerado na simulação.

	Material	Espessura (m)	ϵ_r	σ (S/m)
Paredes	Tijolo	0,13	4	0,011-0,016
Teto e solo	Concreto	0,3	4-6	0,016-1
Porta	Vidro	0,01	3,8-8	$<5 \times 10^{-4}$
Armários, extintores e maquina de café	Metal	0,01	1-10	$>1 \times 10^{+10}$

Tabela 4-Parâmetros constitutivos do ambiente simulado (corredor Leme).

A Figura 59 ilustra a subdivisão espacial do ambiente simulado em células, explicada na seção 2.3. Nesta Figura, a face laranja em um dos extremos do corredor representa uma porta de vidro. As outras portas presentes do ambiente de medidas (ver Figuras 57 e 58) foram desconsideradas no ambiente simulado.

A Figura 60 ilustra a subdivisão considerada para representar os demais objetos do ambiente simulado. As células formadas por faces de cor vermelha, verde, e azul representam os armários, extintores e máquina de café, respectivamente. As faces de cores roxas representam faces transparentes que limitam células vizinhas a cada célula que representa um objeto. Esta células foram introduzidas para manter a convexidade da partição do ambiente.

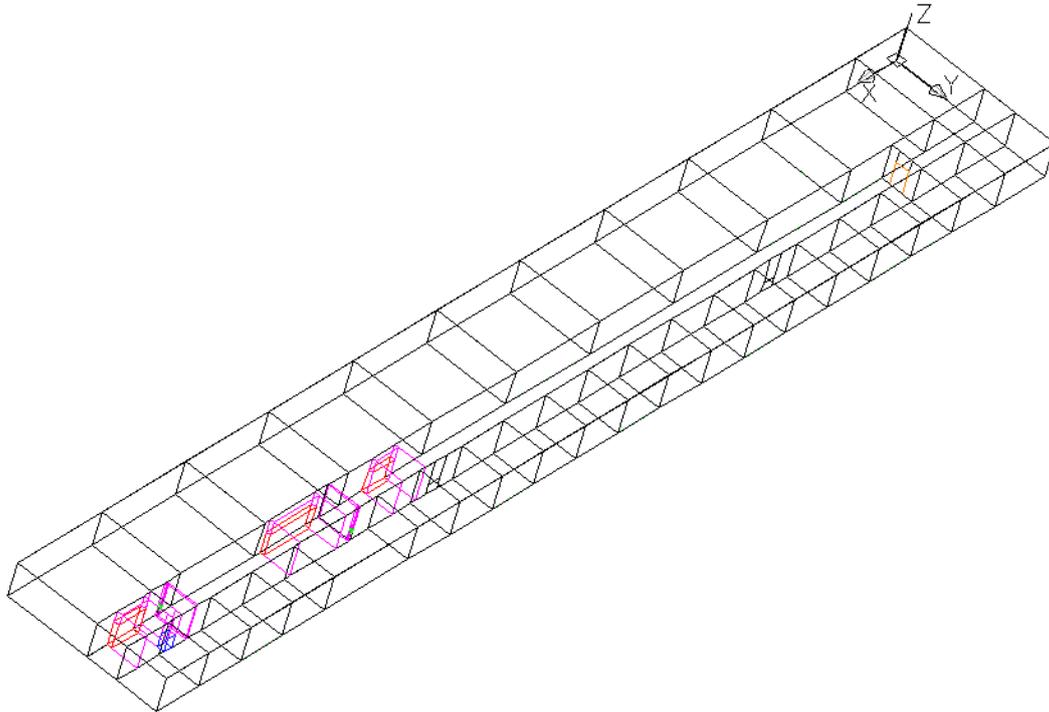


Figura 59- Modelo do ambiente utilizado para aplicação do método de traçado de feixes (corredor Leme).

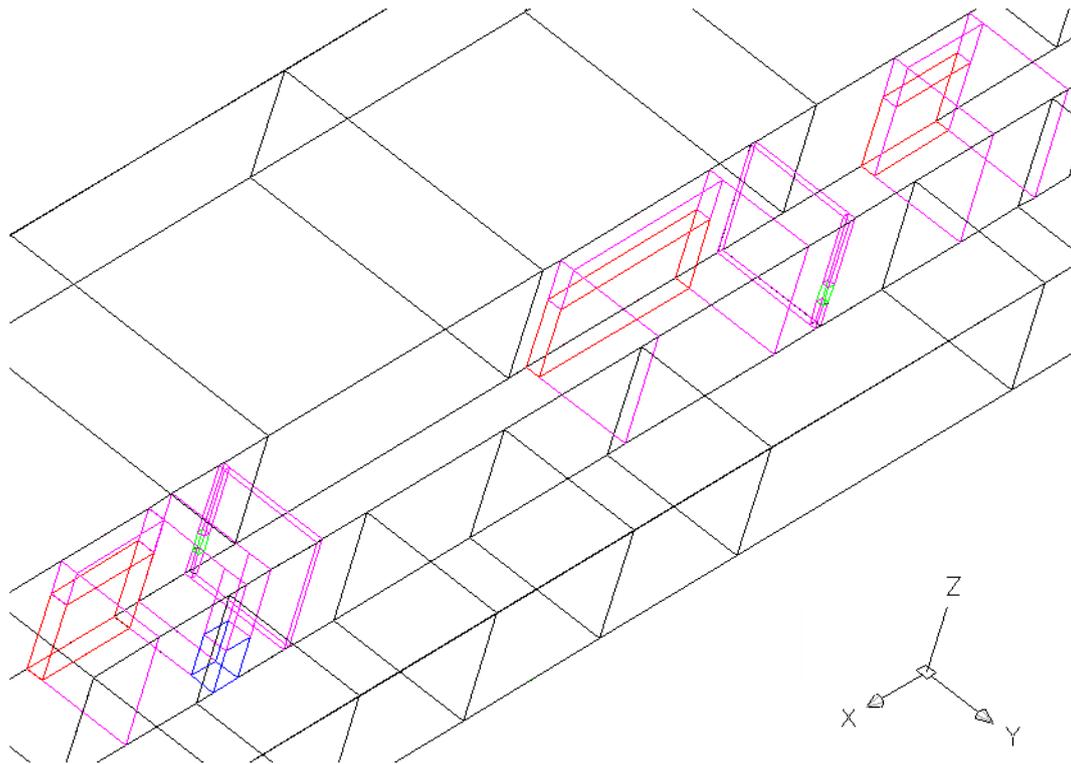


Figura 60- Faces transparentes e faces que representam objetos existentes no ambiente simulado (corredor Leme).

A utilização do método de traçado de feixes no ambiente simulado (mostrado nas Figuras 59 e 60) proporcionou a obtenção de 7.601.962 feixes. A partir destes feixes, 2.675 raios, em média, foram traçados entre transmissor e receptor, para cada uma das 88 posições do transmissor.

O tempo de processamento para a obtenção dos valores de campo elétrico na largura de banda de 850 MHz em todas as 88 posições do transmissor foi de quarenta e sete minutos e trinta e dois segundos. O tempo de processamento inclui o tempo de obtenção de todos os feixes do ambiente, dos raios para cada posição do transmissor e da resposta ao impulso correspondente.

Vale ressaltar que cada um dos raios obtidos no corredor Leme pode interagir até doze vezes com o ambiente (em pontos de transmissão ou reflexão). Quando aplicável, um ponto de difração de primeira ordem pode correr até a quinta interação do raio com o ambiente. Após uma difração, podem ocorrer até mais cinco interações (transmissões ou reflexões) com o ambiente.

Varição da Potência Recebida ao Longo da Distância

Para a obtenção dos valores medidos e simulados para a potência recebida ao longo da distância, a equação (5.9) é utilizada. Aos valores medidos e simulados, foi ajustada a função não linear (6.1), utilizada para estimar a variação da potência recebida ao longo da distância em canais banda larga [60] e UWB [61], [59].

$$P(d) = \left[P_0 + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \right], \quad d \geq d_0, \quad (6.1)$$

onde P_0 representa a potência recebida em uma distância de referência d_0 , $10\gamma \log_{10}(d/d_0)$ a potência média em relação a d_0 , e γ o expoente de perda de potência, dependente da estrutura do ambiente.

A Figura 61 apresenta os valores medidos e simulados pelo modelo de traçado de feixes, assim como os resultados dos ajustes da equação (6.1) a estes valores. Deve-se observar que as potências apresentadas na Figura 61 são relativas a referências arbitrárias. As referências utilizadas para os valores medidos e calculados são independentes, uma vez que a constante V_o da equação (3.3) não foi especificada a priori. Entretanto, foi selecionada aqui de modo a minimizar o erro médio quadrático entre os valores medidos e calculados.

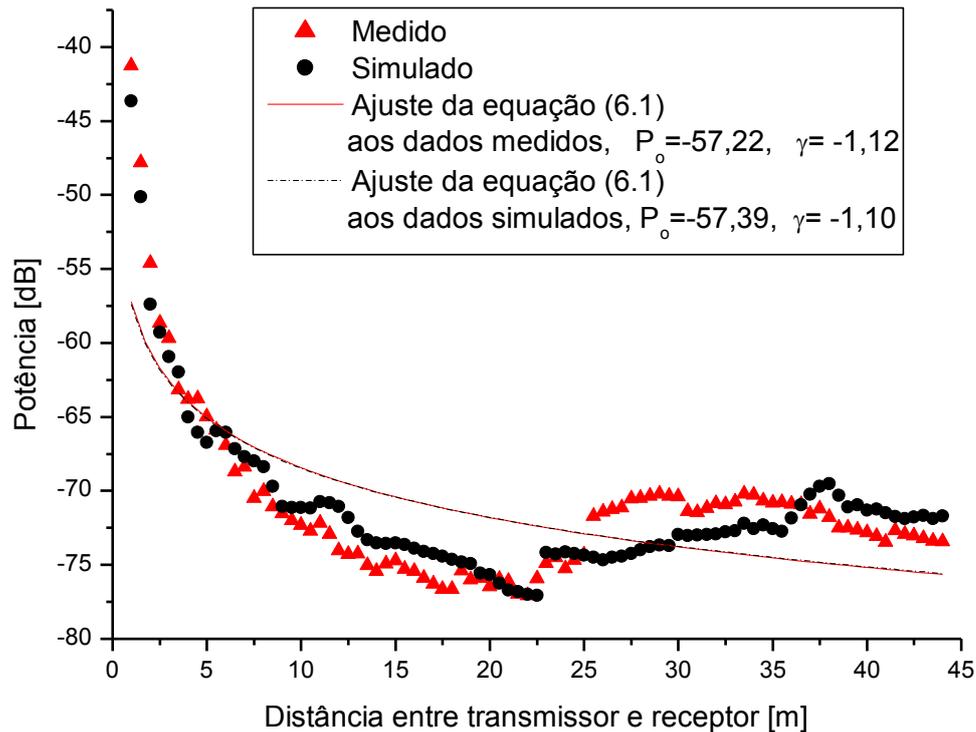


Figura 61- Variação da potência recebida com a distância para o corredor Leme.

Nesta Figura, constatou-se que as variações dos dados medidos e simulados com a distância tiveram uma boa concordância. Em consequência deste fato, os ajustes da equação (6.1) a estes dados que proporcionaram valores de $\gamma = -1.12$ e $\gamma = -1.10$ para os valores medidos e simulados, respectivamente. Observa-se que o modelo de traçado de feixes foi capaz de reproduzir a rápida variação inicial da potência recebida, o aumento de sete decibéis a partir da distância de 22,5 m, assim como sua queda, a partir de 37,5 m. Em particular, o aumento observado é atribuído à interferência construtiva das componentes de multipercursos produzidas pelos armários de metal localizados no final do corredor (ver Figura 58). Obviamente, estes efeitos do ambiente na variação da potência com a distância não estão considerados na equação (6.1).

O valor de γ obtido a partir dos valores simulados é similar a outros valores encontrados em campanhas de medidas UWB realizadas em ambientes confinados. Por exemplo, a partir de medidas realizadas no domínio da frequência para uma banda de 10 GHz [62], encontrou-se valor de $\gamma = -1.58$. Em [70], medidas realizadas no domínio do tempo com pulsos de RF de espectro centrado na frequência de 5 GHz, também realizados em ambientes confinados LOS (como

corredor) encontrou o valor de $\gamma = -1.27$. Em [60] medidas realizadas para sistemas de banda estreita produziram valores de γ que variavam de -1,6 a -1,8 na situação de LOS.

A Tabela 5 apresenta os valores dos parâmetros da equação (6.1) para o corredor Leme.

Parâmetros do Modelo de Variação da Potência Recebida com a Distância			
Medido		Simulado	
PL_0	γ	PL_0	γ
-57,22	-1,12	-57.39	-1.10

Tabela 5- Parâmetros da equação (6.1) para o corredor Leme (LOS).

Retardo Médio e Espalhamento de Retardo RMS

As Figuras 62 e 63 mostram os valores medidos e simulados pelo modelo de traçado de feixes para o retardo médio e espalhamento de retardo RMS ao longo das distâncias no corredor Leme.

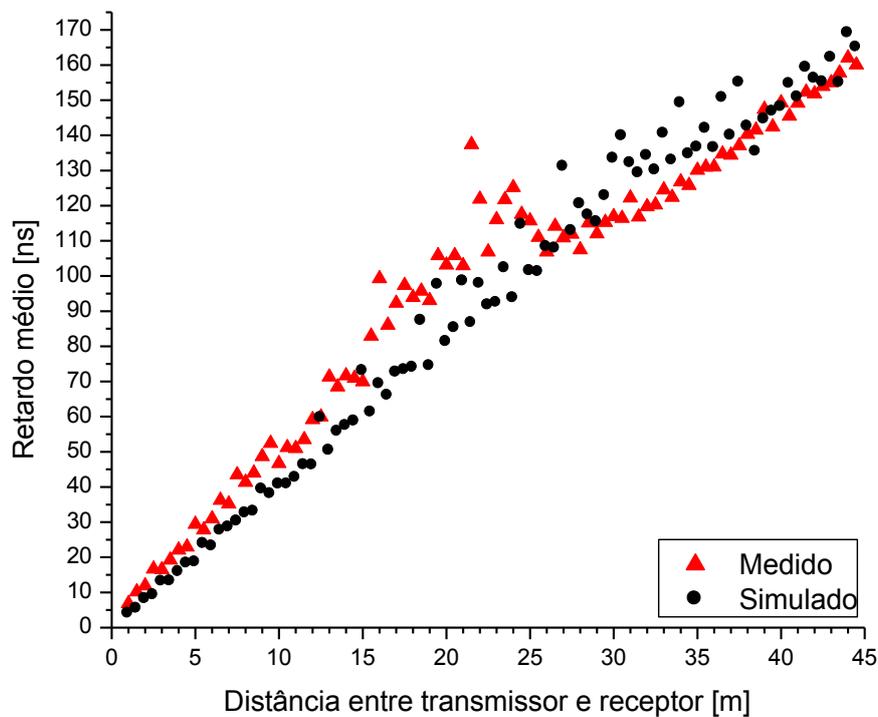


Figura 62- Retardo médio ao longo da distância para o corredor Leme.

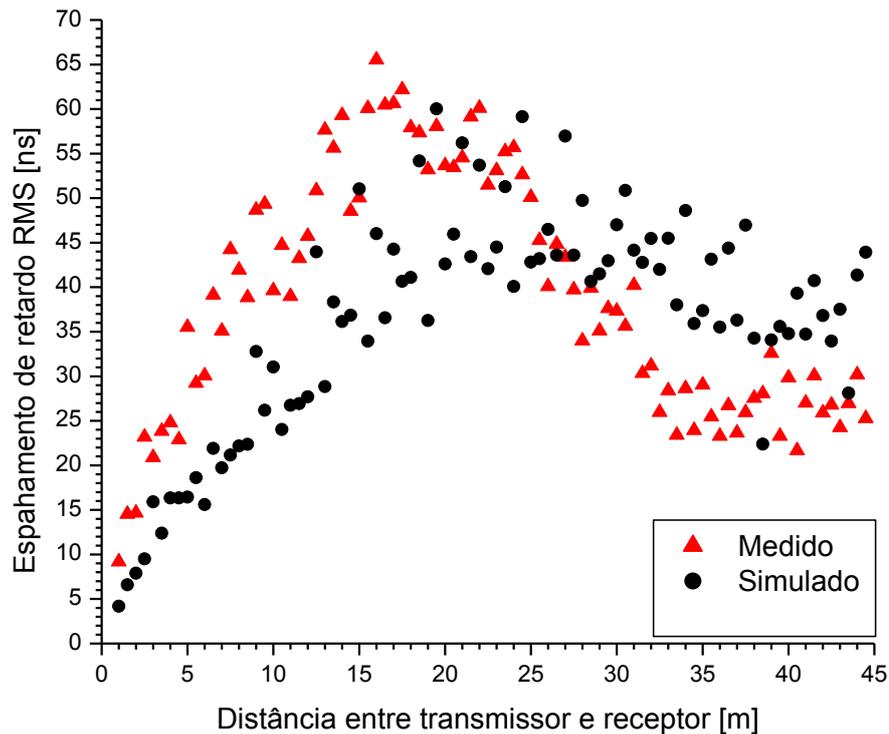


Figura 63- Espalhamento de retardo RMS ao longo da distância para o corredor Leme.

Na Figura 62, observa-se uma boa concordância entre valores medidos e simulados de retardo médio no ambiente considerado. Em ambos os casos, observou-se aumento linear nos valores de retardo médio em função da distância entre o transmissor e o receptor.

Na Figura 63, o espalhamento de retardo RMS medido também aumenta linearmente com a distância no intervalo (0 m, 18 m). Em seguida, permanece aproximadamente constante no intervalo (18,5 m, 25m), decresce linearmente no intervalo (25,5 m, 33,5 m) e, mais uma vez, permanece aproximadamente constante até o fim do corredor no intervalo (34 m, 45m). O comportamento geral observado para o espalhamento de retardo RMS simulado em função da distância é semelhante ao do medido.

Uma comparação mais detalhada entre os valores medidos e simulados de retardo médio e espalhamento de retardo RMS pode ser feita com base nos perfis de potência e retardo correspondentes.

Nos perfis de potência e retardo, as maiores amplitudes são as que mais contribuem nos cálculos para a obtenção dos valores de retardo médio e espalhamento de retardo RMS.

A utilização do modelo de traçado de feixes no corredor Leme proporcionou a obtenção de perfis de potência e retardo que conseguiram reproduzir, em geral, as maiores amplitudes presentes nos perfis medidos. Por exemplo, a Figura 64 mostra os perfis de potência e retardo medido e simulado para a distância de 27,5 metros. Nesta Figura, nota-se que, para retardos inferiores a 270 ns, as maiores amplitudes medidas foram reproduzidas nos perfis de potência e retardo simulado. Estas amplitudes são mostradas em circunferências de várias cores. As cores laranja, azul, verde, roxo e preto mostram as amplitudes resultantes dos conjuntos de raios com retardos próximos ao do raio direto, do raio unicamente refletido na parede A (que contém a porta de vidro), ao do raio refletido no armário 1, ao do raio refletido no armário 2 e próximos ao do raio refletido duas vezes (na parede A e armário 1), respectivamente (ver Figura 58).

No corredor Leme, os valores de retardo médio e espalhamento de retardo RMS são influenciados pelas amplitudes (no perfil de potência e retardo) resultantes dos conjuntos de raios que possuem retardos próximos ao retardo do raio direto e ao do raio unicamente refletido na parede A, sendo secundárias as contribuições dos demais grupos mencionados.

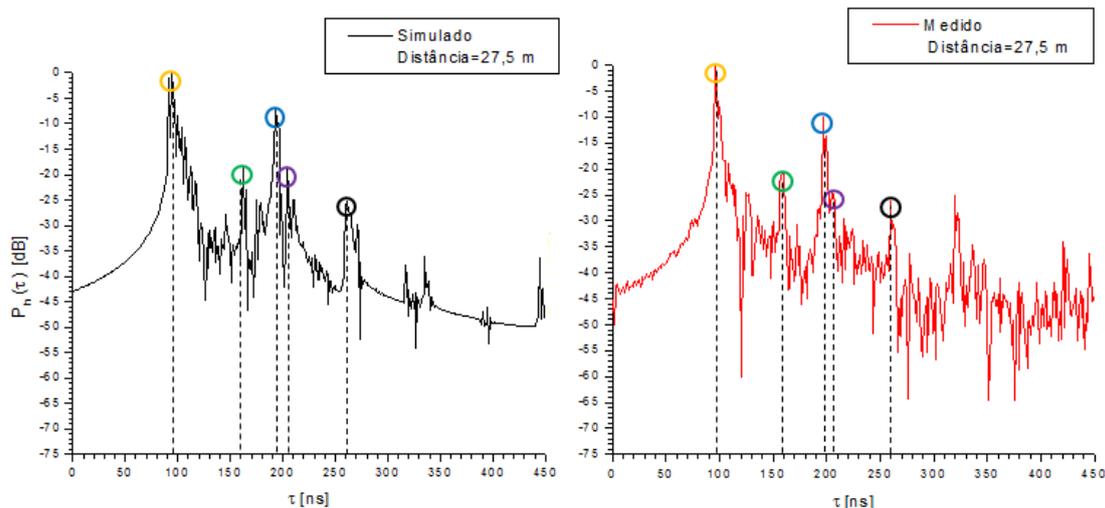


Figura 64- Perfis de potência e retardo medido e simulado para a distância de 27,5 metros no corredor Leme.

As Figuras 65 (a) e 65 (b) mostram os perfis de potência e retardo simulados e medidos para as distâncias de 6,5 metros e 18 metros. As circunferências de cores laranja e azul representam as amplitudes resultantes dos conjuntos de raios com retardos próximos ao do raio direto e ao do raio unicamente refletido na parede A, respectivamente. Nestas Figuras, observam-se grandes semelhanças entre os perfis de potência e retardo simulado e medido para cada uma das distâncias analisadas.

Uma análise mais detalhada destas Figuras revela que as amplitudes medidas e simuladas mostradas nas circunferências azuis aumentam de aproximadamente 6 dB e que os retardos próximos ao do raio direto e ao do raio unicamente refletido na parede A aumentam de aproximadamente 40 ns quando se passa da distância de 6,5 metros para a distância de 18 metros. Ambos os aumentos apresentados acima descrevem o comportamento geral observado nos diagramas de amplitude e retardo à medida que o transmissor se desloca no intervalo (0 m, 18 m), o que explica o aumento linear dos valores simulados e medidos de espalhamento de retardo RMS no intervalo (0m, 18m).

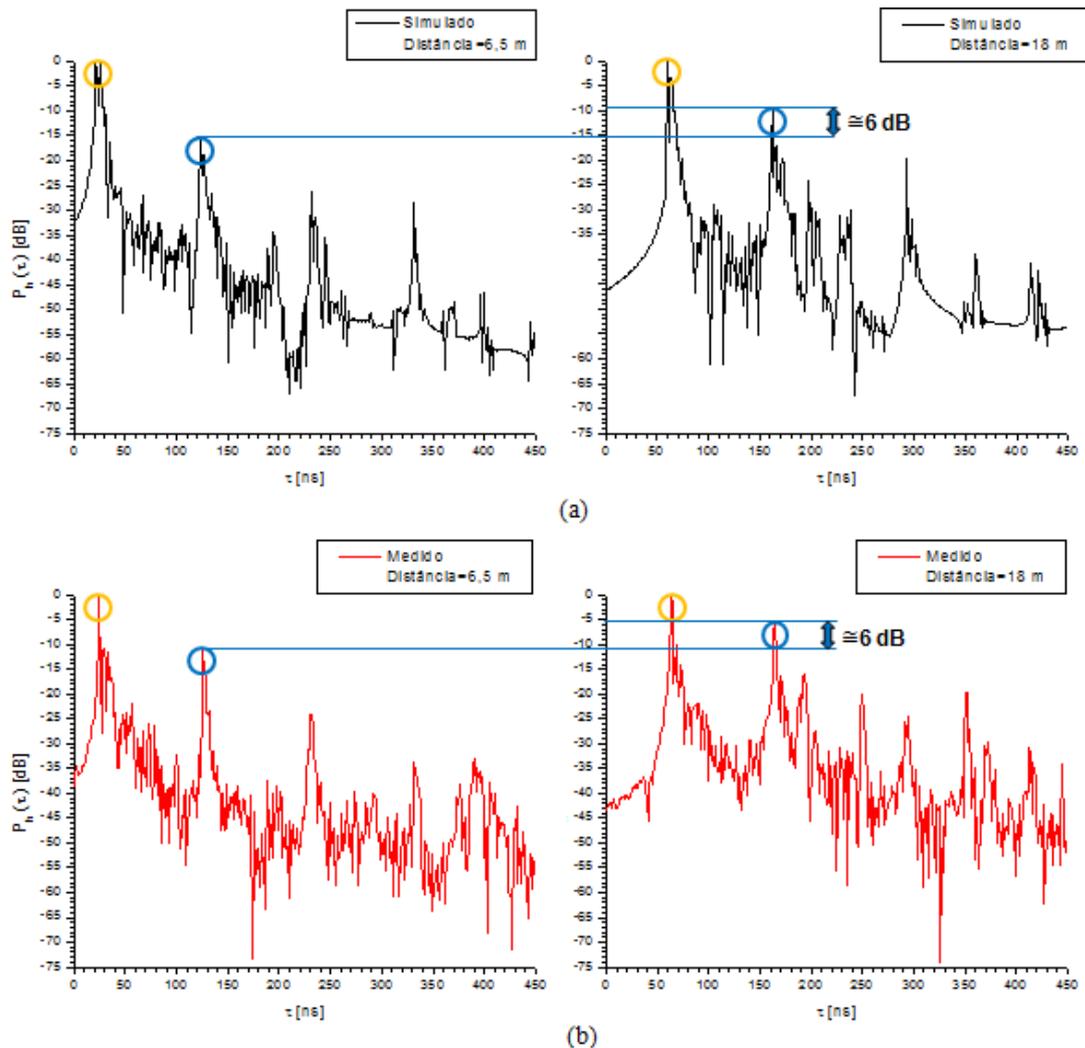


Figura 65- Perfis de potência de e retardo para as distâncias de 6,5 metros e 18 metros no corredor Leme. (a) Perfis simulados. (b) Perfis medidos.

As Figuras 66 (a) e 66 (b) mostram os perfis de potência e retardo simulados e medidos para as distâncias de 21 metros e 25 metros, onde as circunferências de cores laranja e azul representam as amplitudes resultantes dos conjuntos de raios com retardos próximos ao do raio direto e ao do raio unicamente refletido na parede A, respectivamente. Nestas Figuras, observam-se perfis de potência e retardo simulados semelhantes aos medidos para cada uma das distâncias analisadas.

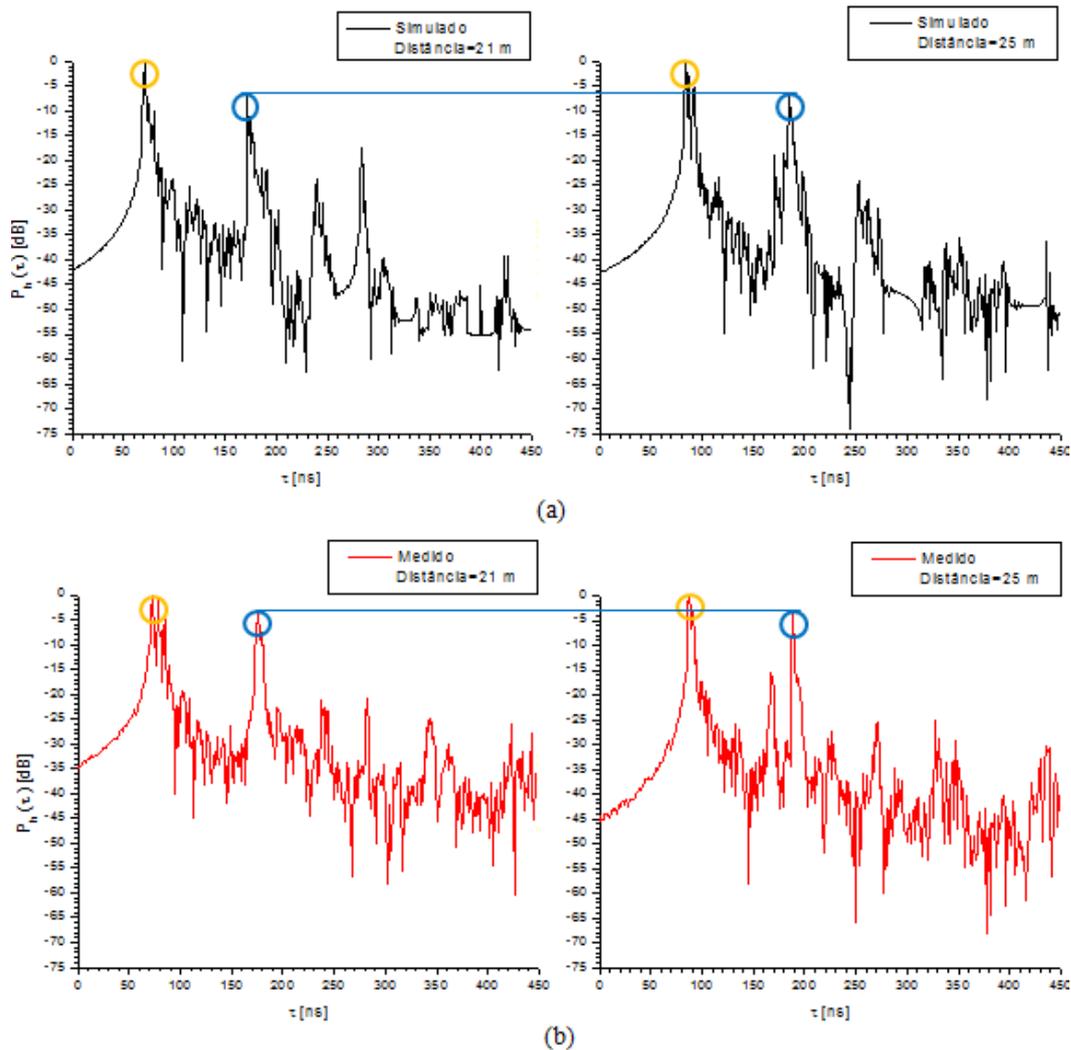


Figura 66- Perfis de potência de e retardo para as distâncias de 21 metros e 25 metros no corredor Leme. (a) Perfis simulados. (b) Perfis medidos.

Os valores aproximadamente constantes das amplitudes mostradas nas circunferências azuis e dos retardos próximos ao do raio direto e ao do raio unicamente refletido na parede A quando se passa da distância de 21 metros para a distância de 25 metros descrevem o comportamento geral do diagrama de potência e retardo à medida que o transmissor se desloca no intervalo (18,5 m, 25 m). Estas observações explicam a manutenção de valores aproximadamente constantes para os espalhamentos de retardo RMS simulados e medidos neste intervalo.

As Figuras 67 (a) e 67 (b) mostram os perfis de potência e retardo simulados e medidos para as distâncias de 26 metros e 33,5 metros, onde as

circunferências de cores laranja e azul representam as amplitudes resultantes dos conjuntos de raios com retardos próximos ao do raio direto e ao do raio unicamente refletido na parede A, respectivamente. Nestas Figuras, observam-se perfis de potência e retardo simulados semelhantes aos medidos para cada uma das distâncias analisadas.

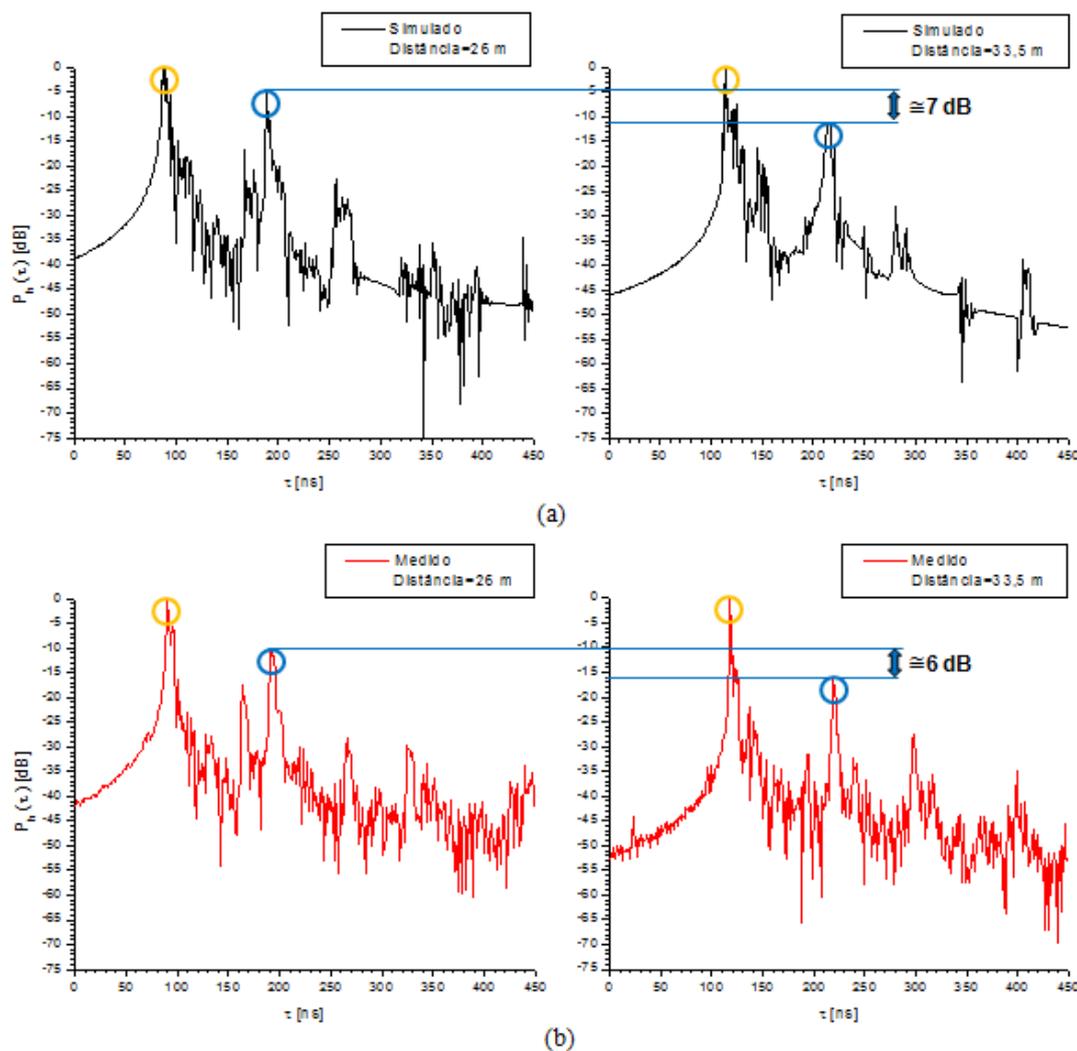


Figura 67- Perfis de potência de e retardo para as distâncias de 26 metros e 33,5 metros. (a) Perfis simulados. (b) Perfis medidos.

Uma análise mais detalhada destas Figuras revela que as amplitudes mostradas nas circunferências azuis decaem (de aproximadamente 7 dB e 6 dB nos perfis simulados e medidos, respectivamente) e que retardos próximos ao do raio direto e ao do raio unicamente refletido na parede A aumentam (de aproximadamente 30 ns). Estas observações apresentadas acima descrevem o

comportamento geral observado nos diagramas de amplitude e retardo à medida que o transmissor se desloca no intervalo (25,5 m, 33,5 m).

Apesar do aumento dos retardos próximos ao do raio direto e ao do raio unicamente refletido na parede A, a diminuição das amplitudes mostradas nas circunferências azuis é o fator de maior relevância para o cálculo dos valores de espalhamento de retardo RMS medidos e simulados, o que explica o decréscimo linear destes valores no intervalo (25,5 m, 33,5 m).

As Figuras 68 (a) e 68 (b) mostram os perfis de potência e retardo simulados e medidos para as distâncias de 38 metros e 44 metros, onde as circunferências de cores laranja e azul representam as amplitudes resultantes dos conjuntos de raios com retardos próximos ao do raio direto e ao do raio unicamente refletido na parede A, respectivamente. Nestas Figuras, observam-se perfis de potência e retardo simulados semelhantes aos medidos para cada uma das distâncias analisadas.

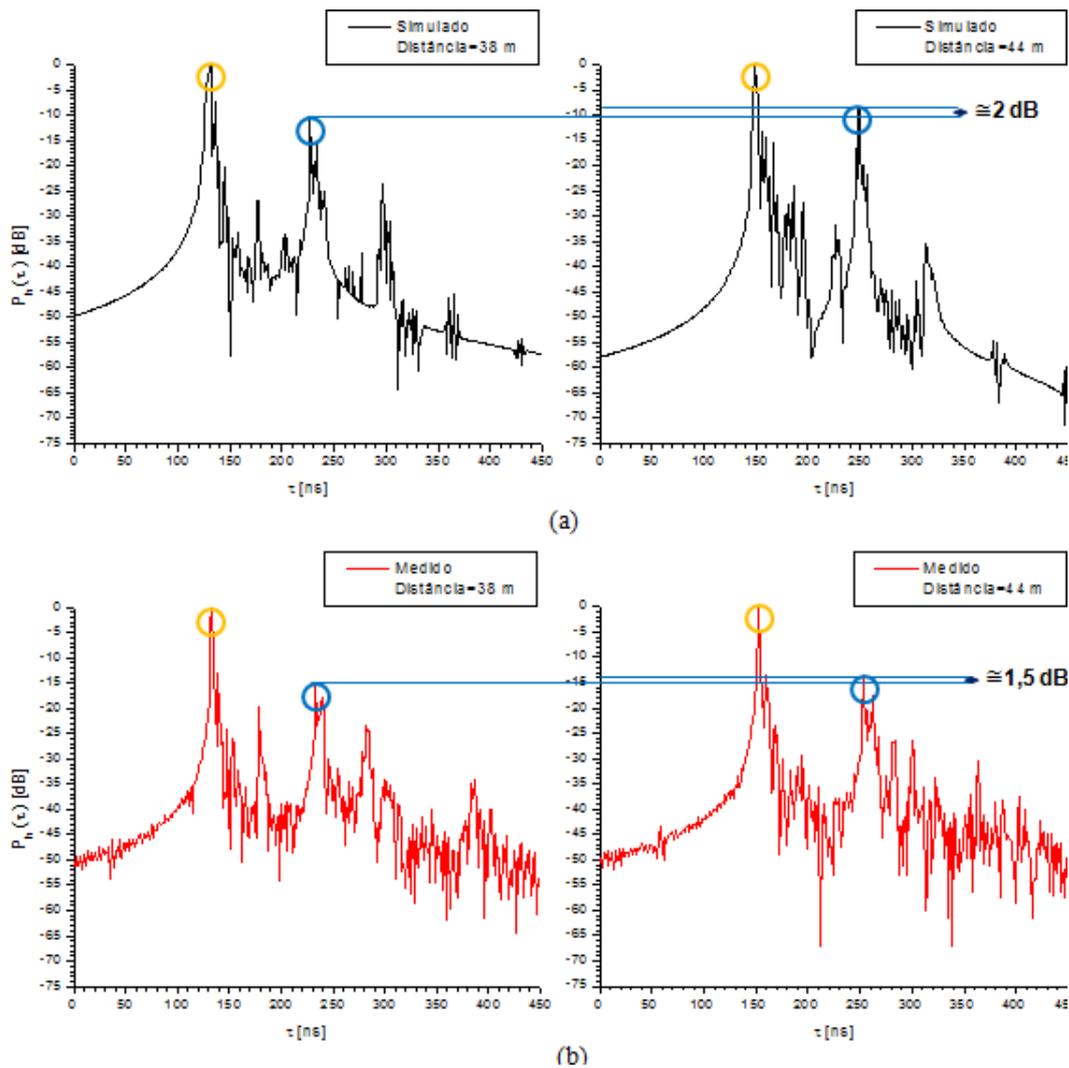


Figura 68- Perfis de potência de e retardo para as distâncias de 38 metros e 44 metros. (a) Perfis simulados. (b) Perfis medidos.

Os valores aproximadamente constantes das amplitudes mostradas nas circunferências azuis e dos retardos próximos ao do raio direto e ao do raio unicamente refletido na parede A quando se passa da distância de 38 metros para a distância de 44 metros descrevem o comportamento geral do diagrama de potência e retardo à medida que o transmissor se desloca no intervalo (34 m, 45 m). Estas observações explicam a manutenção de valores aproximadamente constantes para os espalhamentos de retardo RMS simulados e medidos neste intervalo.

Apesar de os valores simulados e medidos de retardo médio e espalhamento RMS de retardo apresentarem comportamentos semelhantes, observados nas

Figuras 62 e 63, nota-se que os valores simulados são, em geral, inferiores aos medidos no intervalo (0 m, 24 m) e superiores no intervalo (30 m, 45 m).

As diferenças entre os valores simulados e medidos de espalhamento de retardo nos intervalos (0 m, 24 m) e (30 m, 45 m) foram de 13,22 ns e 11,44 ns, respectivamente. Esta diferença de valores foi obtida através da média do erro entre valores medidos e simulados ao longo dos intervalos de distância considerados.

As diferenças entre os valores simulados e medidos de retardo médio e espalhamento de retardo RMS decorrem, principalmente, das diferenças de amplitude entre os perfis de potência e retardo simulados e medidos. Estas diferenças de amplitude são atribuídas a erros nas medidas das dimensões do ambiente e na seleção de valores para os parâmetros constitutivos (condutividade, permissividade, espessura, etc.) dos objetos simulados.

É importante salientar que cada amplitude do perfil de potência e retardo simulado é o resultado da combinação dos campos devidos a um grupo de raios que possuem retardos muito próximos. Este fato torna ainda mais difícil a seleção de valores para os parâmetros constitutivos que minimizem os erros entre as amplitudes correspondentes dos diagramas de potência e retardo medidos e simulados para todos os pontos de observação.

Banda de Coerência

As Figuras 69 e 70 ilustram os valores simulados e medidos para a banda de coerência obtida quando a função autocorrelação $R_H(\Omega)$ dada pela equação (5.2), atinge os níveis 0,7 e 0,9, respectivamente. A situação de melhor concordância entre os valores simulados e medidos é mostrada na Figura 70.

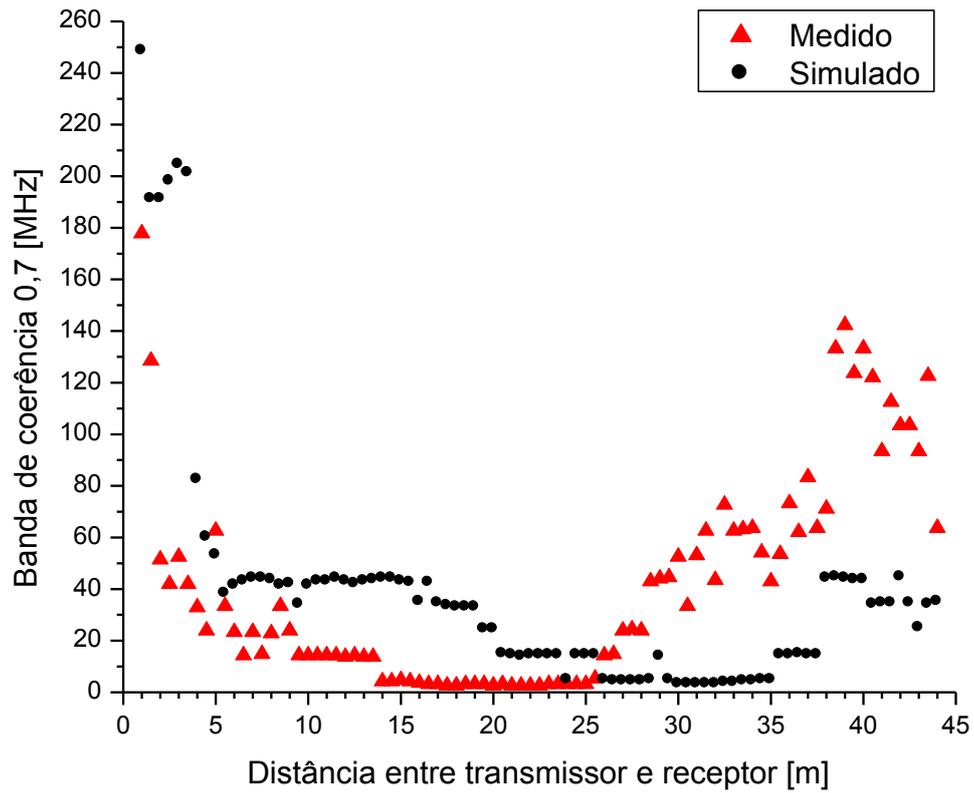


Figura 69- Banda de Coerência 0,7 ao longo da distância para o corredor Leme.

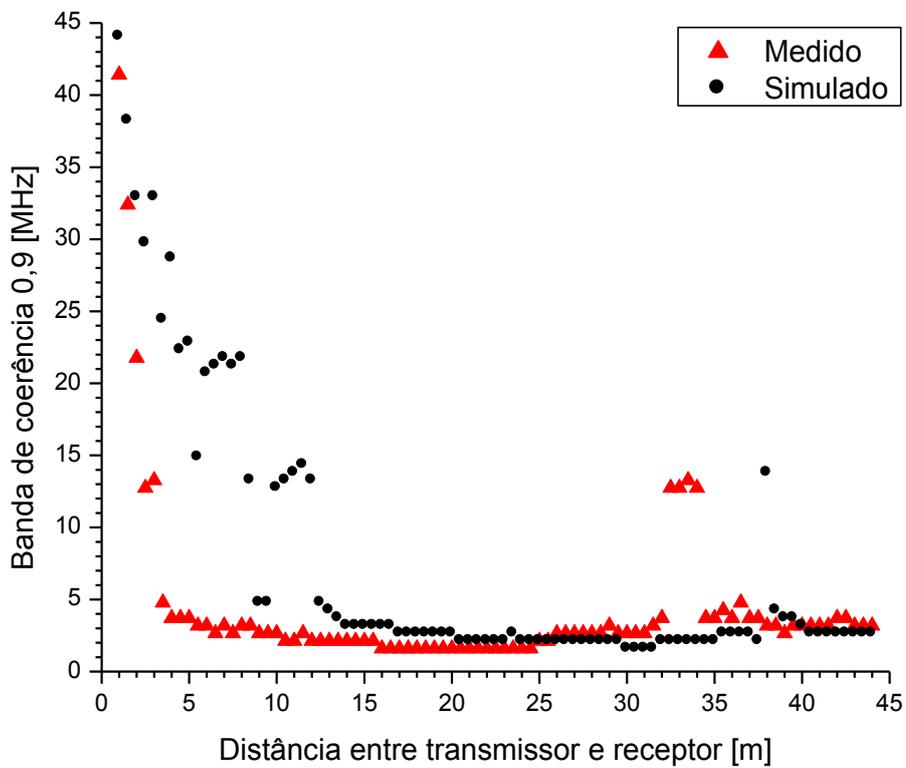


Figura 70- Banda de Coerência 0,9 ao longo da distância para o corredor Leme.

No intervalo (0 m, 25 m), os valores medidos e simulados de banda de coerência 0,7 e 0,9 decrescem. No intervalo (25,5 m, 45 m), os valores medidos e simulados de banda de coerência 0,7 (ver Figura 69) crescem, enquanto os mesmos se mantêm aproximadamente constantes para a banda de coerência 0,9 (ver Figura 70).

A análise dos valores simulados da banda de coerência ao longo da distância entre transmissor e receptor conseguiu revelar a proporcionalidade inversa existente com os valores de retardo RMS simulados, que também foi constatada entre os valores medidos [60]. Ou seja, à medida que um valor tende a aumentar, o outro tende a diminuir.

Apesar dos valores simulados e medidos para as bandas de coerência 0,7 e 0,9 apresentarem comportamento semelhante, nota-se nas Figuras 69 e 70 que os valores simulados são, em geral, superiores aos medidos no intervalo (0 m, 24 m), e inferiores no intervalo (25,5 m, 45 m).

As diferenças entre os valores simulados e medidos nos intervalos (0 m, 25 m) e (25,5 m, 45 m) para banda de coerência 0,7 foram de 26,77 MHz e 86,28 MHz, respectivamente. Por outro lado, para banda de coerência 0,9, nos intervalos (0 m, 25 m) e (25,5 m, 45 m) foram de 7,19 MHz e 1,49 MHz, respectivamente. Estes valores foram obtidos através da média do erro entre os valores medidos e simulados ao longo dos intervalos de distância considerados.

A diferença entre os valores simulados e medidos de banda de coerência é explicada pela utilização de parâmetros constitutivos (condutividade, permissividade e espessura) no modelo de traçado de feixes que não representam com precisão os objetos presentes no ambiente de medidas.

De maneira geral, apesar da diferença entre os valores simulados e medidos encontrados, observa-se que o modelo de traçado de feixes foi capaz de acompanhar o comportamento dos valores medidos de banda de coerência 0,7 e 0,9 ao longo de todas as distâncias.

6.2. Corredores CETUC

Os Corredores CETUC são representados pelos corredores do CETUC (Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica), que representa um pequeno prédio de escritórios de alvenária, com divisórias de gesso e amplas janelas de vidro nas salas externas. Estes corredores são estreitos (1,20 m) e foram divididos em uma situação de LOS (*Line-Of-Sight*) entre transmissor e receptor (Corredor A₁) e duas situações de NLOS (*Non-Line-Of-Sight*) (Corredores A₂ e A₃). Estes corredores são ilustrados na Figura 71.

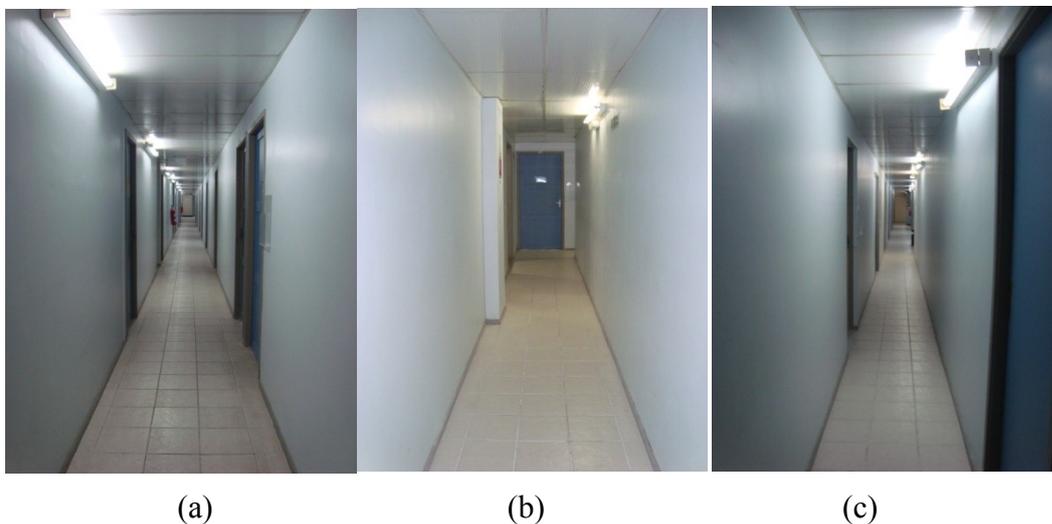


Figura 71- Fotos corredores CETUC. (a) Corredor A1. (b) Corredor A2. (c) Corredor A3.

Neste ambiente, a altura das antenas transmissora e receptora é de 1,5 metros. Em cada corredor, o transmissor era colocado a cada 0,5 metros em uma linha imaginária que se afastava do receptor. Todas as portas existentes neste ambiente estavam fechadas durante as medidas.

Com base nas medidas realizadas foram feitas análises dos parâmetros de dispersão do canal e da variação de potência recebida, em diferentes posições dependendo do corredor analisado (68 posições para o corredor A1, 17 posições para o corredor A2 e 49 posições para o corredor A3).

O primeiro ponto de transmissão estava situado a um metro do receptor para o corredor A1, a 5,21 metros para o corredor A2 e a 10,01 metros para o corredor A3.

Os objetos existentes no ambiente de medidas, tais como portas e janelas, foram considerados pelo modelo, nas posições indicadas na Figura 72. Nesta Figura, as setas indicam as posições das arestas onde as difrações são consideradas.

Alguns objetos estão posicionados em alturas diferentes em relação ao solo. As janelas e o teto dos corredores estão a uma altura de 0,9 metros e 2,3 metros, respectivamente. Os corredores A1 e A2 possuem largura de 1,2 metros. O corredor A3 possui duas larguras: 0,9 metros e 1,15 metros.

A Tabela 6 apresenta as dimensões de cada objeto presente nos corredores do CETUC.

	Altura (metros)	Largura (metros)	Tipo de material
Portas	2,1	0,8	Madeira
Janelas	1,2	4,15	Vidro

Tabela 6- Características dos objetos contidos nos corredores do CETUC.

A Tabela 7 [75] apresenta a permissividade relativa ϵ_r e a condutividade σ das faces que compõem os objetos do ambiente, considerados na simulação.

	Material	Espessura (m)	ϵ_r	σ (S/m)
Paredes externas	Tijolo	0,13	4	0,011-0,016
Paredes internas	Gesso	0,13	2,8	0,1533
Solo	Concreto	0,3	4-6	0,016-1
Teto	Gesso	0,03	2,8	0,1533
Janela	Vidro	0,005	3.8-8	$<5 \times 10^{-4}$
Portas	Madeira	0,03	1,5-2,1	0,011
Chapa	Metal	0,01	1-10	$>1 \times 10^{+10}$

Tabela 7-Parâmetros constitutivos do ambiente simulado CETUC.

A Figura 73 ilustra a subdivisão espacial do ambiente simulado em células, explicada na seção 2.3. Nesta Figura, as faces de cores vermelha, verde e azul representam as portas, janelas e a chapa metálica, respectivamente.

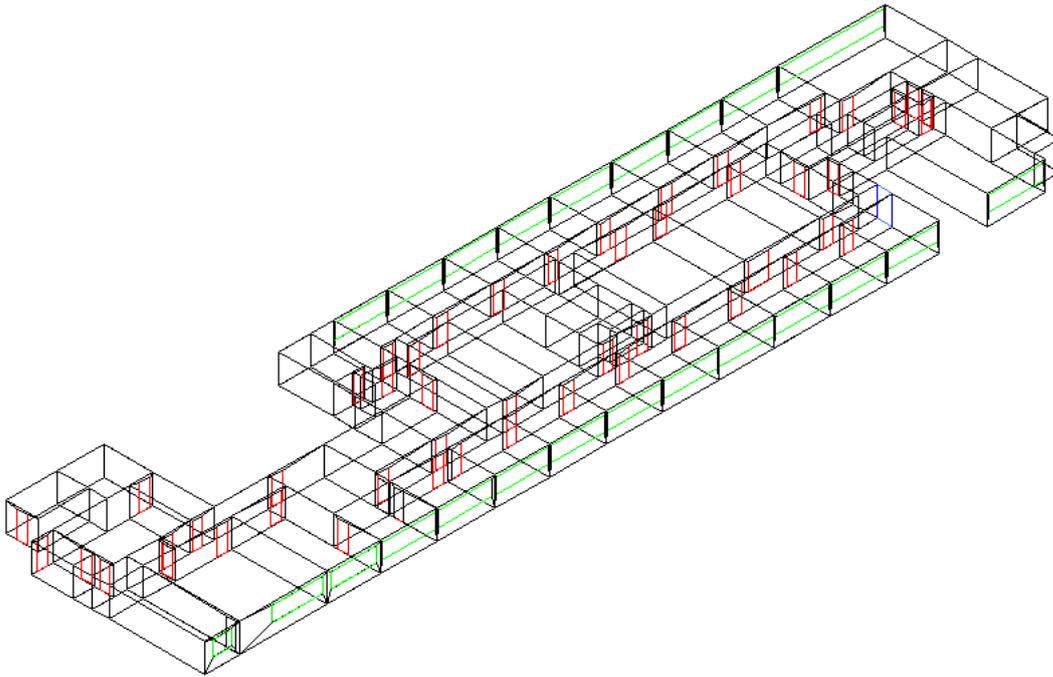


Figura 73- Modelo do ambiente utilizado para aplicação do método de traçado de feixes (CETUC).

No ambiente simulado (mostrado na Figura 73), cada raio traçado entre transmissor e receptor contém pontos de interseção contidos nas faces e arestas do ambiente simulado.

A utilização do método de traçado de feixes no ambiente simulado proporcionou a obtenção de 27.148.335 feixes. Para cada corredor, diferentes números de raios foram traçados entre transmissor e receptor. Para o corredor A1 foram traçados, em média, 1.979 raios para cada posição do transmissor. Para os corredores A2 e A3 foram traçados, em média, 1.804 raios e 1.425 raios, respectivamente.

O tempo de processamento para a obtenção dos valores de campo elétrico na largura de banda de 850 MHz em todas as 134 posições do transmissor foi de uma hora, doze minutos e vinte e três segundos. O tempo de processamento inclui o tempo de obtenção de todos os feixes do ambiente, os raios para cada posição do transmissor e as respostas impulsivas correspondentes.

Vale ressaltar que cada um dos raios obtidos nos corredores do CETUC podem interagir até dez vezes com o ambiente (em pontos de transmissão e reflexão). Quando aplicável, um ponto ou dois pontos (consecutivos) de difração

podem ocorrer até a quinta interação do raio com o ambiente . Após uma ou duas difrações, podem ocorrer até mais cinco interações (pontos de transmissão ou de reflexão) com o ambiente.

Varição da Potência Recebida ao Longo da Distância

Para a obtenção da variação de potência recebida ao longo da distância nos corredores do CETUC, a equação (5.9) foi novamente utilizada. Nos valores simulados, após a utilização da equação (5.9), o menor erro médio quadrático foi aplicado.

Aos valores medidos e simulados, foi ajustada a função não linear (6.1) utilizada para estimar a variação da potência recebida ao longo da distância.

A Figura 74 apresenta os valores medidos e simulados pelo modelo de traçado de feixes para uma situação LOS obtida no corredor A1, assim como os resultados dos ajustes da equação (6.1) a estes valores. Nesta Figura, foram encontradas algumas diferenças nos valores de potência medidos e simulados, quando o transmissor se situava em determinadas posições do corredor. Quando o transmissor está distante do receptor por volta de 5 metros e 18 metros a diferença entre o nível do sinal simulado em relação ao medido foram, em média, de 5 dB e 7 dB, respectivamente.

Apesar da diferença nos níveis de potência em determinadas posições do transmissor, conseguiu-se também verificar dados simulados em concordância com os medidos. Por exemplo, observa-se que o modelo de traçado de feixes foi capaz de reproduzir a rápida variação da potência recebida, e o aumento de seis decibéis a partir da distância de 24 m. Em particular, o aumento observado é atribuído à interferência construtiva das componentes de multipercursos produzidas pela chapa metálica localizada no final do corredor (ver Figura 72).

O ajuste da equação (6.1) a estes dados proporcionou valores γ medidos e simulados próximos. Os valores de $\gamma = -1,95$ e $\gamma = -1,65$ foram obtidos para os dados medidos e simulados, respectivamente.

O valor de γ simulado está próximo a outros valores de γ medidos em ambientes diferentes, mas com mesmas características de um corredor, como

encontrados em [62] e [70] anteriormente citados. Está próximo também do valor de γ medido no corredor Leme, apresentado na seção anterior.

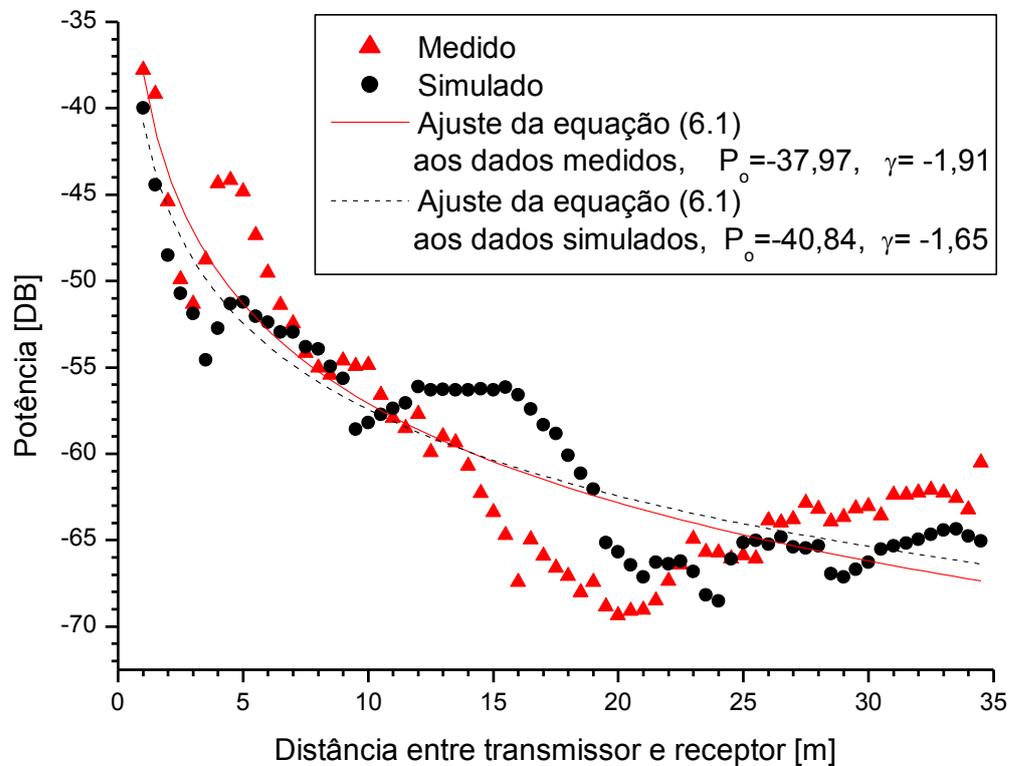


Figura 74- Variação da potência recebida com a distância para o corredor A1 (CETUC).

Os valores de potência medidos e simulados em duas situações NLOS obtidos nos corredores A2 e A3 são mostrados na Figura 75 e Figura 76, respectivamente. Na Figura 75, o ajuste da equação (6.1) resultou em valores medidos de $\gamma = -5,76$ e valores simulados de $\gamma = -7,07$. Na Figura 76, encontraram-se valores medidos de $\gamma = -8,28$ e valores simulados de $\gamma = -7,36$.

Os maiores valores de γ medidos e simulados encontrados no corredor A3 em relação ao corredor A2, são explicados devido ao maior número de paredes sucessivas entre o transmissor e o receptor (ver Figura 72) e também pelo maior caminho percorrido pelos raios que se deslocam do transmissor em direção ao receptor.

Na literatura sobre trabalhos referentes a medidas UWB da variação da potência recebida na situação de NLOS em ambientes confinados, não se

observou padrão sobre que tipo de obstáculo ou quantos obstáculos existem entre o transmissor e o receptor, o que proporcionou a obtenção dos mais variados valores de γ , como em [62] onde se obteve um valor de $\gamma = -1,96$ medido na situação de NLOS em uma sala adjacente ao corredor medido. Em [60], medida feita para sistemas banda estreita foram encontrados valores de γ que variavam de -4 a -6.

Nas duas situações NLOS analisadas nos corredores do CETUC, considerando os valores de potência medidos e simulados, em cada posição onde se deslocava o transmissor, em geral, observou-se o mesmo comportamento de decaimento sem variações rápidas da potência recebida e os valores de γ encontrados foram próximos. Pode-se dizer que ocorre boa concordância entre os valores simulados e medidos nos corredores A2 e A3.

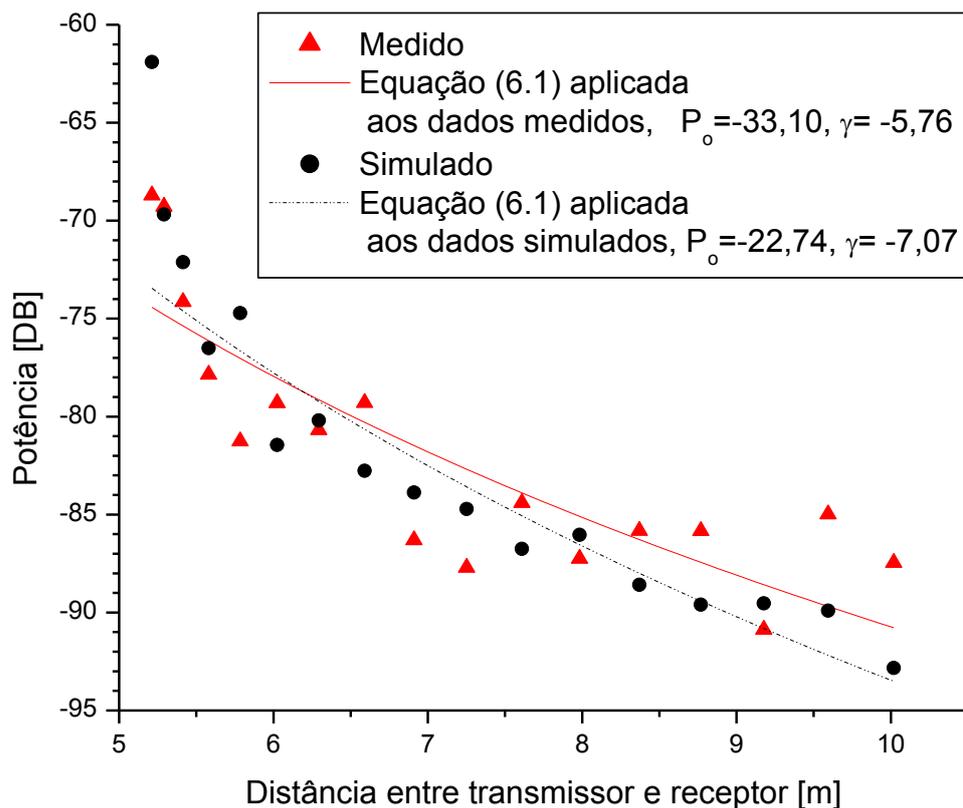


Figura 75- Variação da potência recebida com a distância para o corredor A2 (CETUC).

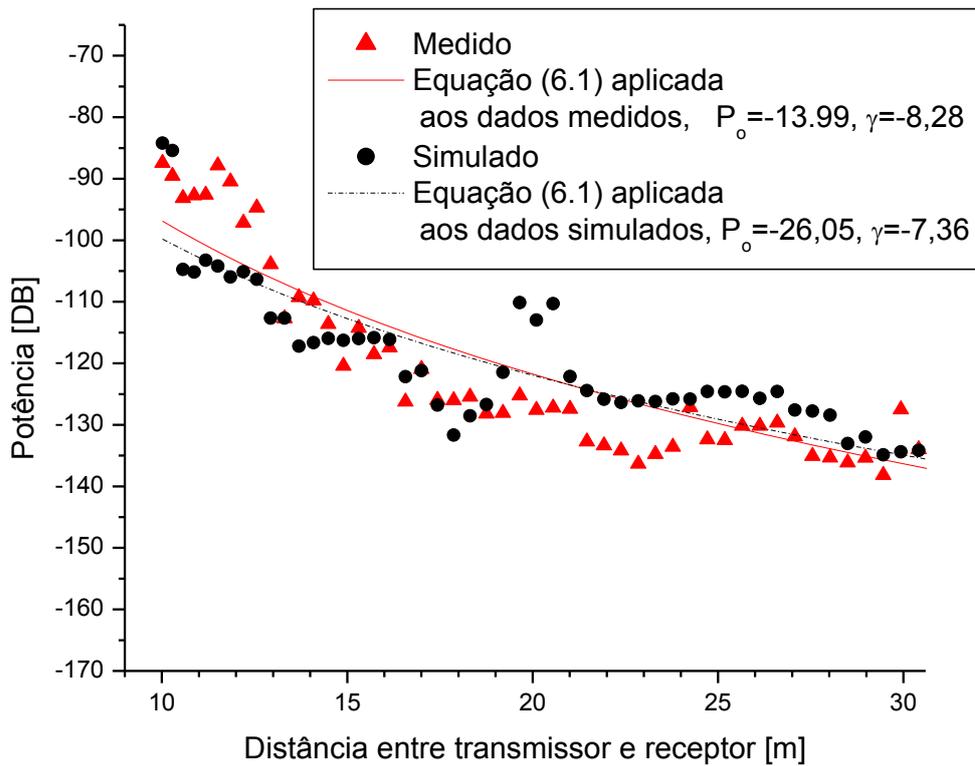


Figura 76- Variação da potência recebida ao longo da distância para o corredor A3 (CETUC).

Na Tabela 8 são apresentados os valores dos parâmetros da equação (6.1) para os corredores do CETUC.

	Parâmetros do Modelo de Variação da Potência Recebida ao longo da Distância			
	Medido		Simulado	
	P_0	γ	P_0	γ
Corredor A1 (LOS)	-37,97	-1,91	-40,84	-1,65
Corredor A2 (NLOS)	-33,10	-5,76	-22,74	-7,07
Corredor A3 (NLOS)	-13,99	-8,28	-26,05	-7,36

Tabela 8- Parâmetros do modelo de variação da potência recebida ao longo da distância para os corredores do CETUC.

Retardo Médio e Espalhamento de Retardo RMS

As Figuras 77 e 78 mostram os valores medidos e simulados pelo modelo de traçado de feixes para o retardo médio e espalhamento de retardo RMS para uma situação de LOS, realizada ao longo das distâncias no corredor A1.

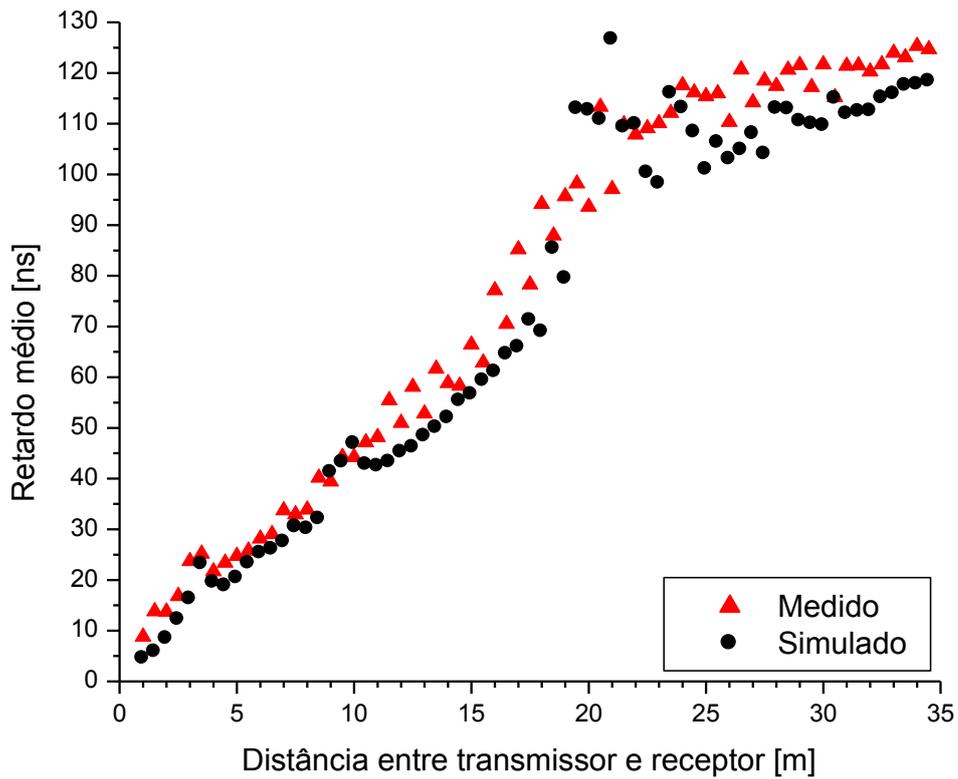


Figura 77- Retardo médio ao longo da distância para o corredor A1 (CETUC).

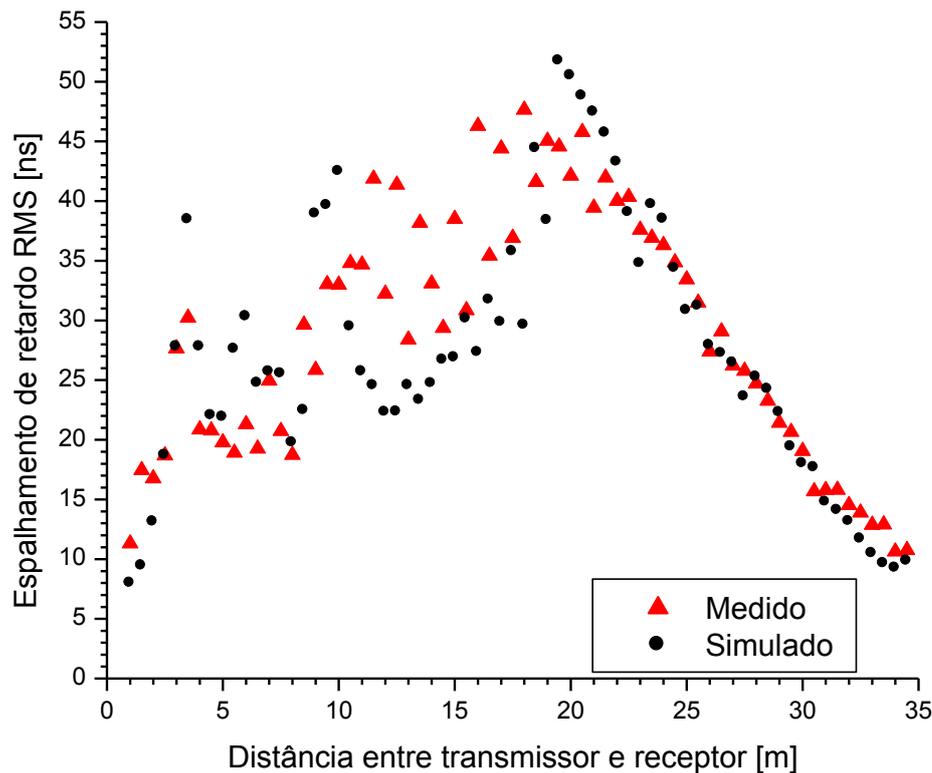


Figura 78- Espalhamento de retardo RMS ao longo da distância para o corredor A1 (CETUC).

Na Figura 77, observa-se uma boa concordância entre valores medidos e simulados de retardo médio no ambiente considerado. Em ambos os casos, observou-se aumento linear nos valores de retardo médio em função da distância entre o transmissor e o receptor.

Na Figura 78, o espalhamento de retardo RMS medido também aumenta linearmente com a distância no intervalo (0 m, 3,5 m). Em seguida, permanece aproximadamente constante no intervalo (4 m, 8 m), aumenta linearmente no intervalo (8,5 m, 20 m) e decresce linearmente no intervalo até o fim do corredor no intervalo (20,5 m, 34,5 m). O comportamento geral observado para o retardo RMS simulado em função da distância é semelhante ao do medido, com exceção do intervalo (8,5 m, 20 m) onde os valores aumentam até a distância de 10 m. Em seguida, decrescem até a distância 13,5 m e crescem linearmente até o final do intervalo.

Para explicar o comportamento dos valores de espalhamento de retardo RMS em cada intervalo é necessária a visualização dos perfis de potência e retardo. A utilização do modelo de traçado de feixes nos corredores do CETUC

proporcionou a obtenção de perfis de potência e retardo simulados que conseguiram reproduzir, em geral, as maiores amplitudes presentes nos perfis medidos.

As Figuras 79 (a) e 79(b) mostram os perfis de potência e retardo simulados e medidos para as distâncias de 1 metro e 3,5 metros. As circunferências de cores laranja e azul representam as amplitudes resultantes dos conjuntos de raios com retardos próximos ao do raio direto e ao do raio unicamente refletido em chapa de meta, respectivamente (ver Figura 72). Nestas Figuras, observam-se grandes semelhanças entre os perfis de potência e retardo simulado e medido para cada uma das distâncias analisadas.

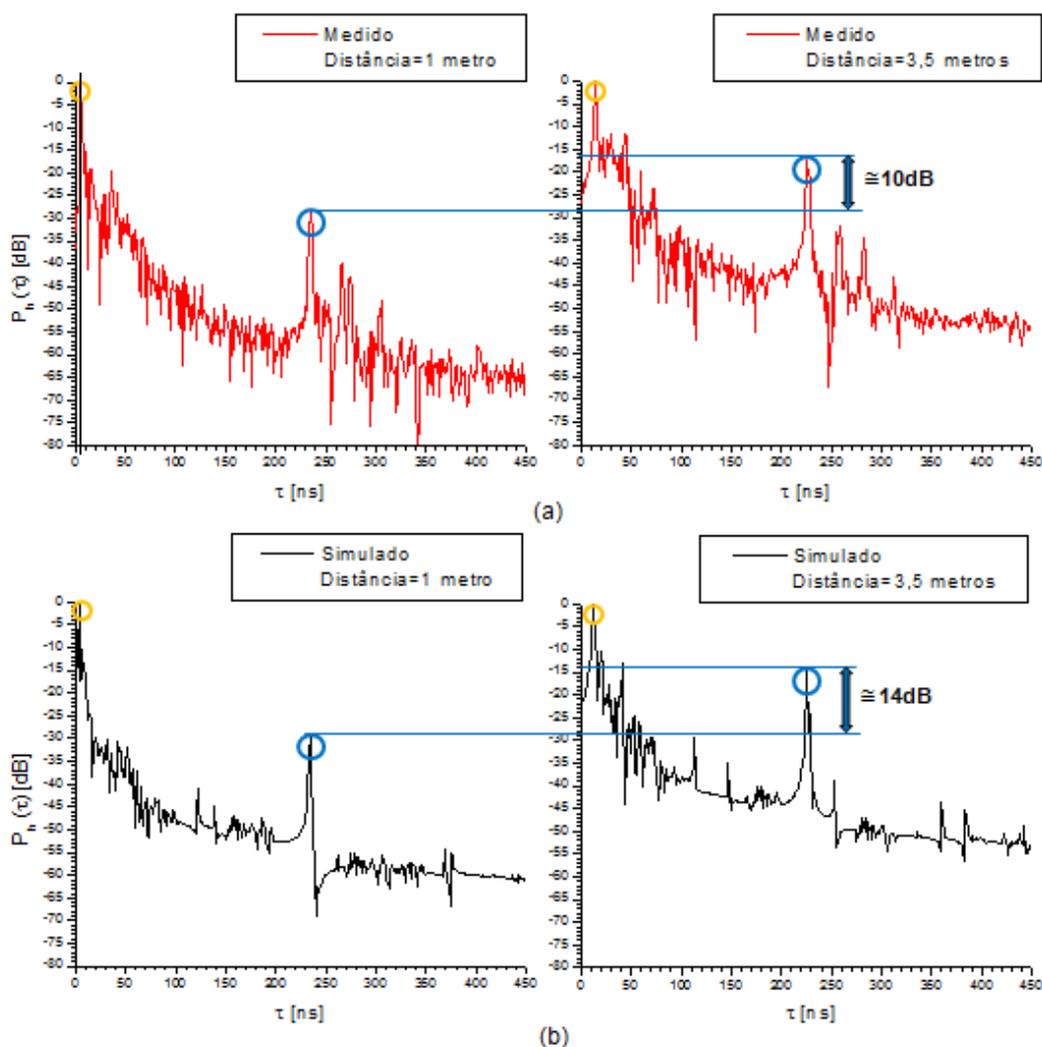


Figura 79- Perfis de potência de e retardo para as distâncias de 1 metro e 3,5 metros no corredor A1 do CETUC. (a) Perfis simulados. (b) Perfis medidos.

Uma análise mais detalhada destas Figuras revela que as amplitudes mostradas nas circunferências azuis aumentam de aproximadamente 10 dB e 14 dB nos perfis medidos e simulados, respectivamente. Por outro lado, os retardos próximos ao do raio direto se mantêm aproximadamente constantes (aumentam de apenas de 8 ns) quando se passa da distância de 1 metro para a distância de 3,5 metros. Estas observações apresentadas acima descrevem o comportamento geral observado nos diagramas de amplitude e retardo à medida que o transmissor se desloca no intervalo (0 m, 3,5 m), o que explica o aumento linear dos valores simulados e medidos de espalhamento de retardo RMS no intervalo (0 m, 3,5 m).

As Figuras 80 (a) e 80 (b) mostram os perfis de potência e retardo simulados e medidos para as distâncias de 4,5 metros e 8 metros, onde as circunferências de cores laranja e azul representam as amplitudes resultantes dos conjuntos de raios com retardos próximos ao do raio direto e ao do raio unicamente refletido na chapa de metal, respectivamente. Nestas Figuras, observam-se perfis de potência e retardo simulados semelhantes aos medidos para cada uma das distâncias analisadas.

Os valores aproximadamente constantes das amplitudes mostradas nas circunferências azuis e dos retardos próximos ao do raio direto (aumentam de apenas de 13 ns) quando se passa da distância de 4,5 metros para a distância de 8 metros descrevem o comportamento geral do diagrama de potência e retardo à medida que o transmissor se desloca no intervalo (4 m, 8 m). Estas observações explicam a manutenção de valores aproximadamente constantes para os espalhamentos de retardo RMS simulados e medidos neste intervalo.

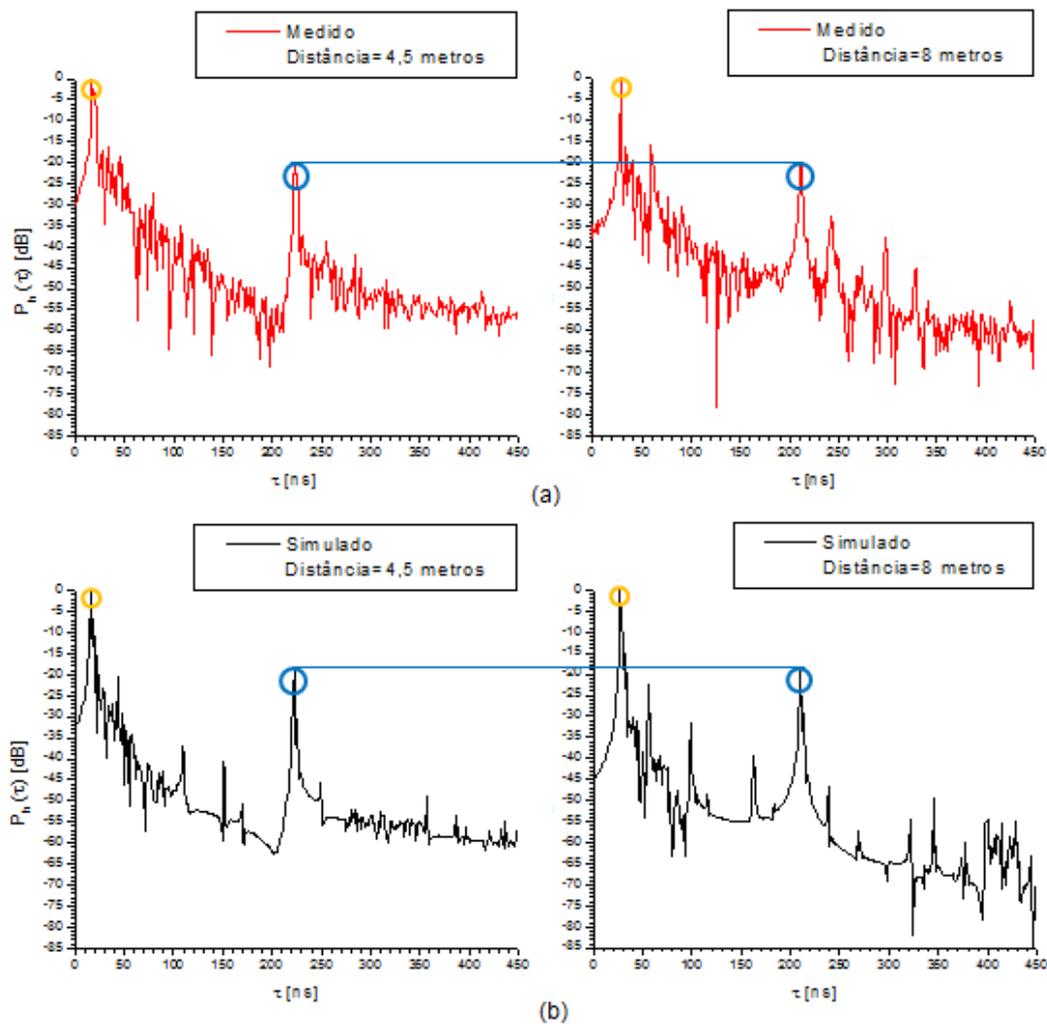


Figura 80- Perfis de potência e de retardo para as distâncias de 4,5 metros e 8 metros no corredor A1 do CETUC. (a) Perfis simulados. (b) Perfis medidos.

As Figuras 81 (a) e 81 (b) mostram os perfis de potência e retardo simulados e medidos para as distâncias de 10 metros e 13,5 metros, onde as circunferências de cores laranja e azul representam as amplitude resultantes dos conjuntos de raios com retardos próximos ao do raio direto e ao do raio unicamente refletido na chapa de metal, respectivamente. Nestas Figuras, observam-se perfis de potência e retardo simulados semelhantes aos medidos para cada uma das distâncias analisadas.

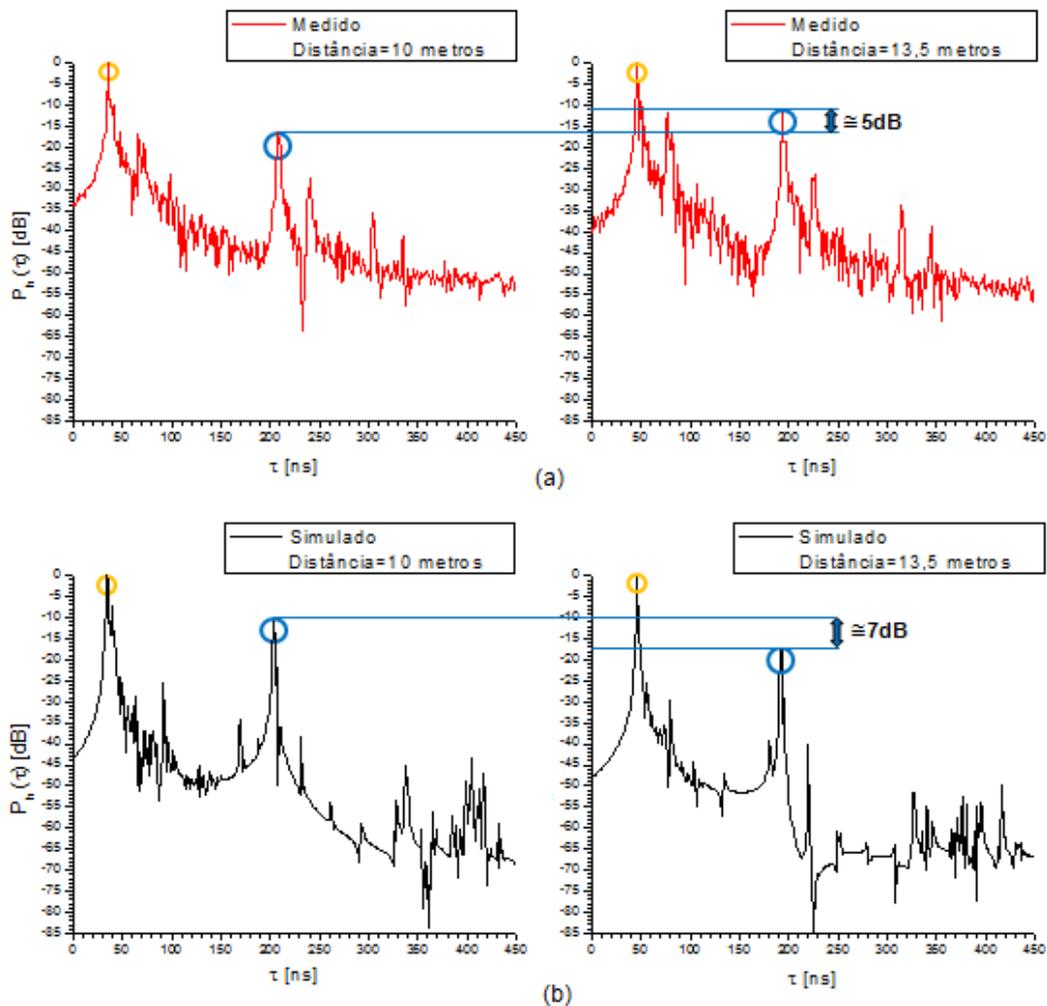


Figura 81- Perfis de potência de e retardo para as distâncias de 10 metros e 13,5 metros no corredor A1 do CETUC. (a) Perfis simulados. (b) Perfis medidos.

Uma análise mais detalhada destas Figuras revela a diminuição das amplitudes simuladas (de aproximadamente 7 dB) e o aumento das medidas (de aproximadamente 5 dB) mostradas nas circunferências azuis quando se passa da distância 10 metros para a distância de 13,5 metros. Por outro lado, os retardos próximos ao do raio direto se mantém aproximadamente constantes (aumentam de apenas de 11,6 ns). Estas observações apresentadas acima descrevem o comportamento geral observado nos diagramas de amplitude e retardo à medida que o transmissor se desloca no intervalo (8,5 m, 20 m). Este fato explica a diferença entre os valores de espalhamento de retardo RMS medidos e simulados neste intervalo.

As Figuras 82 (a) e 82 (b) mostram os perfis de potência e retardo simulados e medidos para as distâncias de 20,5 metros e 31 metros, onde as circunferências de cores laranja e azul representam as amplitudes resultantes dos conjuntos de raios com retardos próximos ao do raio direto e ao do raio unicamente refletido em chapa de metal, respectivamente. Nestas Figuras, observam-se perfis de potência e retardo simulados semelhantes aos medidos para cada uma das distâncias analisadas.

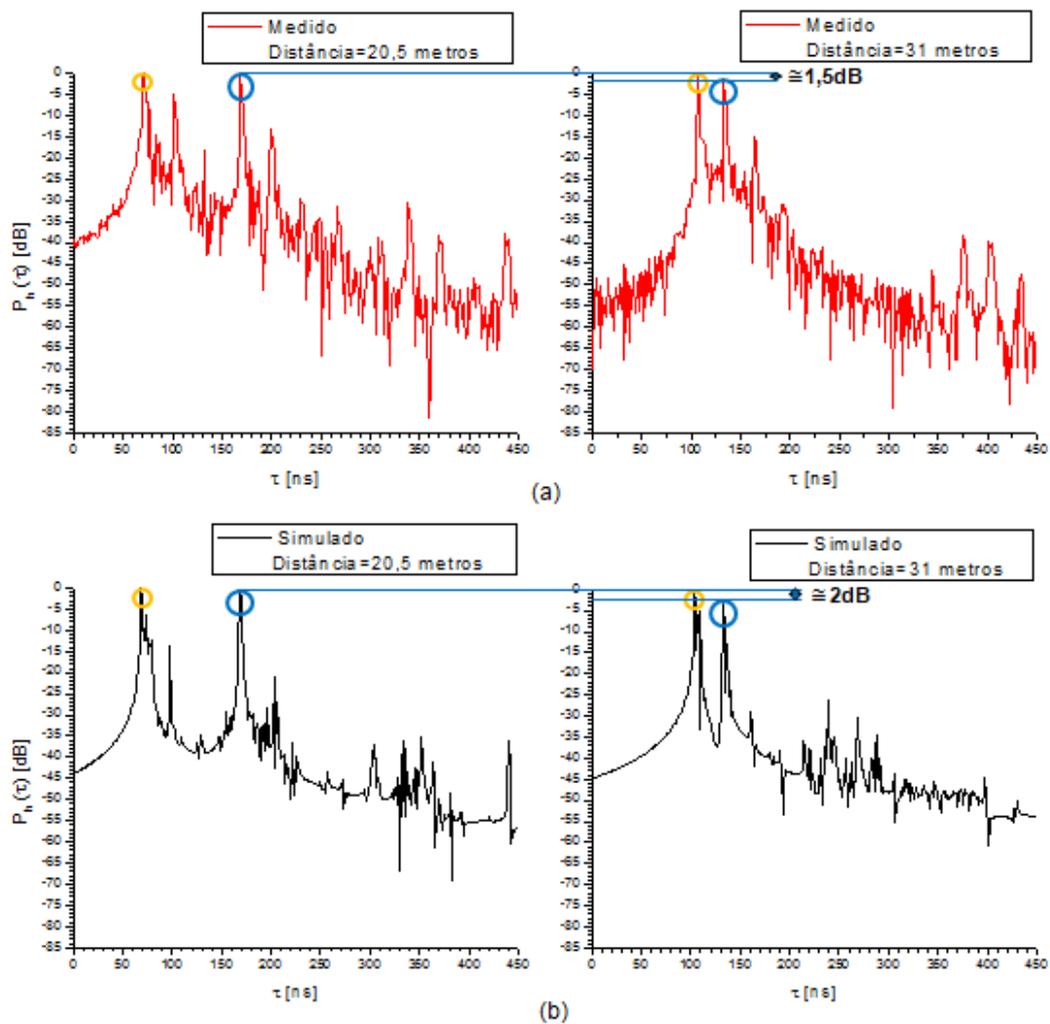


Figura 82- Perfis de potência de e retardo para as distâncias de 20,5 metros e 31 metros no corredor A1 do CETUC. (a) Perfis simulados. (b) Perfis medidos.

Os retardos próximos ao do raio direto aumentam (de aproximadamente 40 ns) e ao do raio refletido unicamente em chapa de metal diminuem (de aproximadamente 40 ns) quando se passa da distância 20,5 metros para a distância de 31 metros, associado a valores aproximadamente constantes (próximos a 0 dB) das amplitudes mostradas nas circunferências azuis. Estas observações descrevem o comportamento geral do diagrama de potência e retardo à medida que o transmissor se desloca no intervalo (20,5 m, 34,5 m), e explicam o decréscimo linear dos valores de espalhamentos de retardo RMS simulados e medidos neste intervalo.

De maneira geral, com exceção de alguns intervalos (8,5 m, 20 m), o modelo de traçado de feixes foi capaz de reproduzir, em geral, valores simulados de retardo médio e espalhamento de retardo RMS próximos e comportamento semelhante aos medidos (ver Figuras 77 e 78).

A diferença entre os valores simulados e medidos de retardo médio e espalhamento de retardo RMS no corredor A1 ocorre devido à diferença de amplitude entre os perfis de potência e retardo simulados e medidos. Esta diferença de amplitude é causada pela utilização de parâmetros constitutivos imprecisos.

As Figuras 83 e 84 mostram os valores medidos e simulados pelo modelo de traçado de feixes para o retardo médio e espalhamento de retardo RMS para a situação de NLOS, obtidos ao longo da distância no corredor A2 (ver Figura 72).

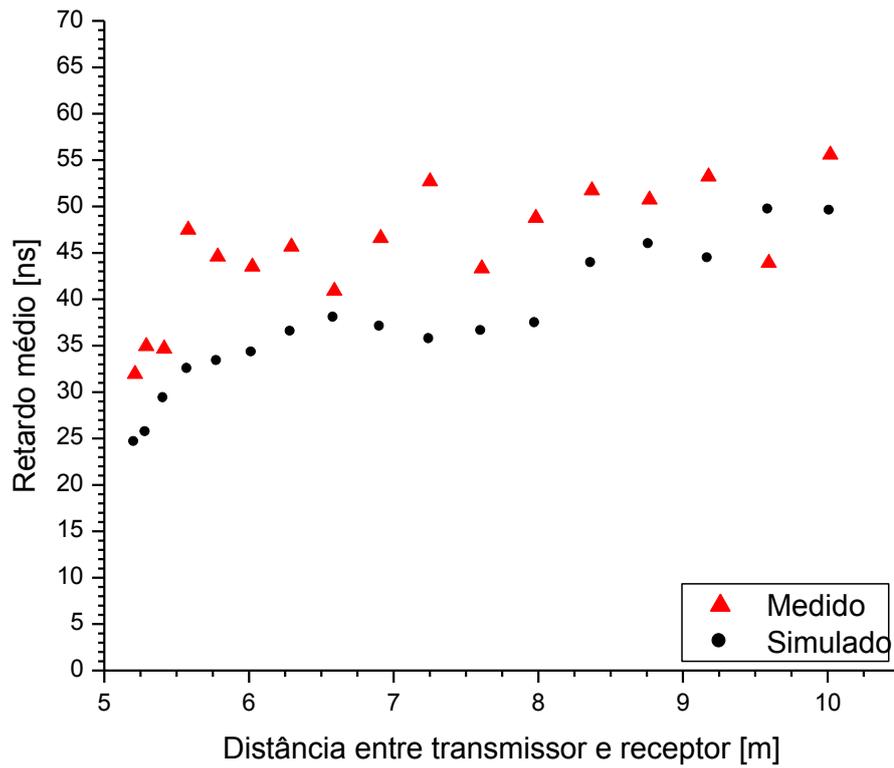


Figura 83- Retardo médio ao longo da distância para o corredor A2 (CETUC).

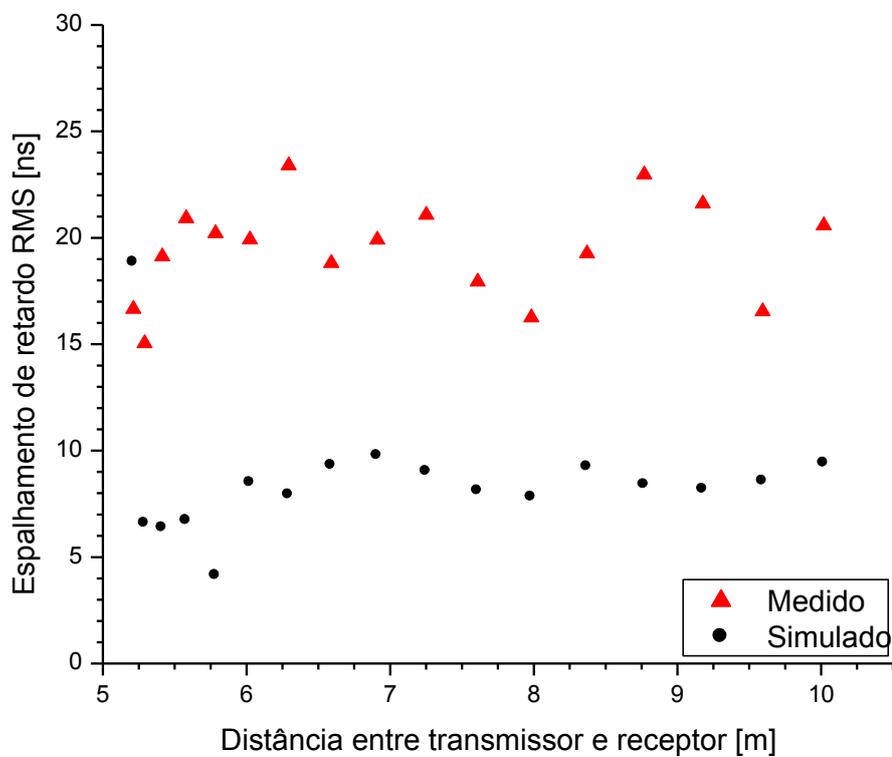


Figura 84- Espalhamento de retardo RMS ao longo da distância para o corredor A2 (CETUC).

Uma análise mais detalhada destas Figuras revela comportamento similar entre os valores medidos e simulados. Na Figura 83, observa-se aumento linear nos valores de retardo médio em função da distância entre o transmissor e o receptor. Na Figura 84, observam-se valores aproximadamente constantes de espalhamento de retardo RMS em função da distância entre o transmissor e o receptor.

As Figuras 85 (a) e 85 (b) mostram os perfis de potência e retardo simulados e medidos para as distâncias de 5,29 metros e 10,02 metros. As circunferências de cores laranja e azul representam as amplitudes resultantes dos conjuntos de raios com retardos próximos ao do raio direto e ao do raio refletido em chapa de metal e difratado nas duas arestas próximas a TX_1 no Corredor A2 (Figura 72), respectivamente.

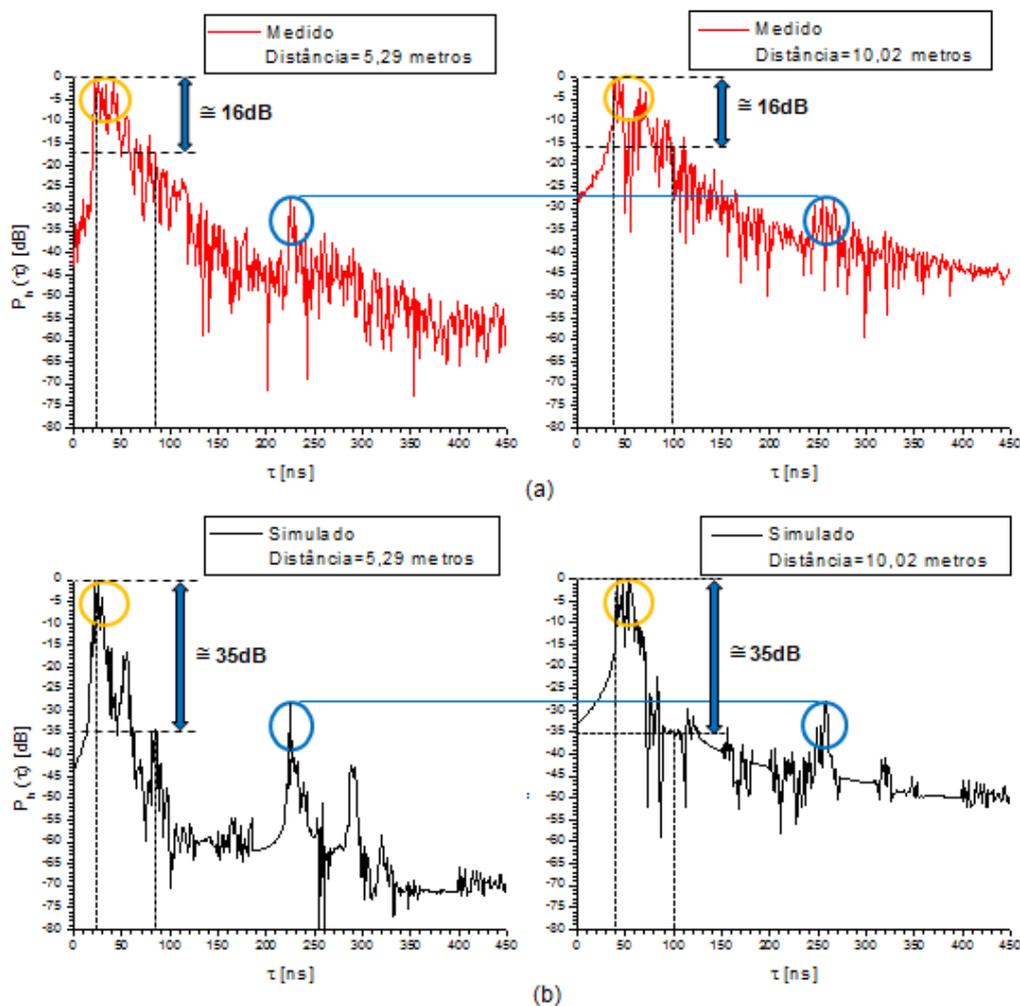


Figura 85- Perfis de potência e de retardo para as distâncias de 5,29 metros e 10,02 metros no corredor A2 do CETUC. (a) Perfis simulados. (b) Perfis medidos.

Nestas Figuras, as amplitudes medidas mostradas nas circunferências laranjas possuem maior concentração de picos em comparação aos simulados para cada distância. Observa-se também, que as amplitudes do diagrama de potência e retardo simulados decrescem mais rapidamente em relação aos medidos, a partir de 30 ns do retardo de maior amplitude, quando se passa da distância de 5,29 metros para a distância de 10,02 metros. Por exemplo, 60 ns após a maior amplitude encontrada, a potência diminuiu 35 dB e 16 dB para as distâncias simuladas e medidas, respectivamente. Estas observações descrevem o comportamento geral do diagrama de potência e retardo à medida que o transmissor se desloca no corredor A2, o que explica a manutenção de valores aproximadamente constantes e inferiores de espalhamentos de retardo RMS simulados em comparação aos medidos.

Apesar dos valores simulados e medidos de retardo médio e espalhamento de retardo RMS apresentarem comportamentos semelhantes, observados nas Figuras 83 e 84, nota-se que os valores simulados são, em geral, inferiores aos medidos no corredor A2.

As diferenças entre os valores simulados e medidos foram de 8,07 ns e 10,79 ns, para o retardo médio e espalhamento de retardo RMS, respectivamente. Esta diferença de valores foi obtida através da média do erro entre valores medidos e simulados ao longo dos intervalos de distância considerados.

As Figuras 86 e 87 mostram os valores medidos e simulados pelo modelo de traçado de feixes para o retardo médio e espalhamento de retardo RMS para a situação de NLOS, obtidos ao longo do corredor A3 (ver Figura 72).

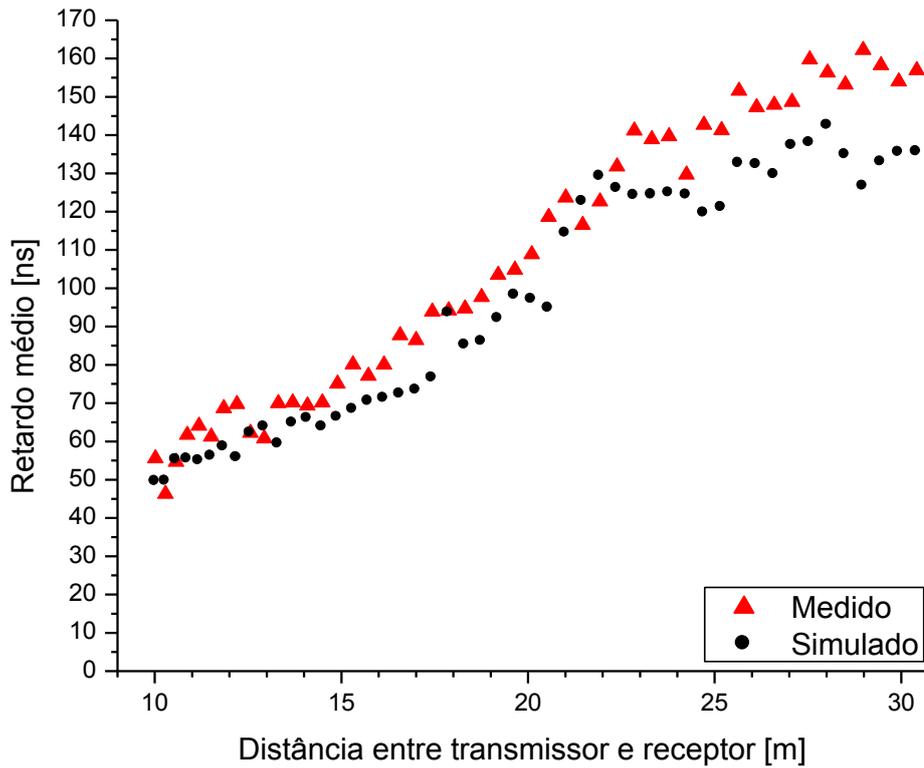


Figura 86- Retardo médio ao longo da distância para o corredor A3 (CETUC).

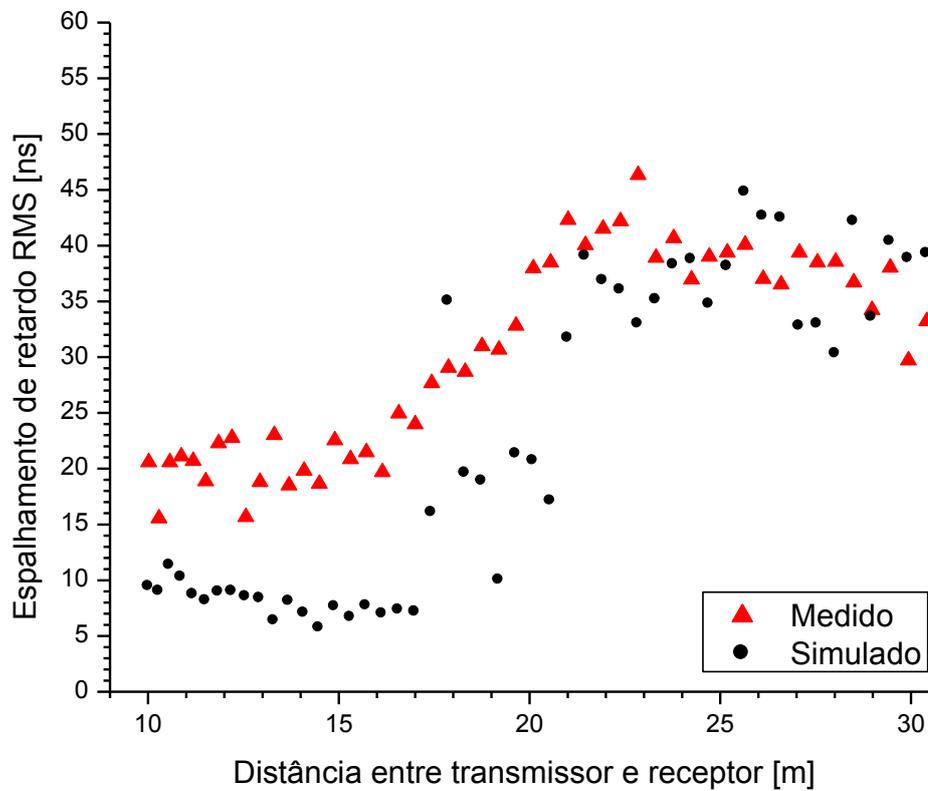


Figura 87- Espalhamento de retardo RMS ao longo da distância para o corredor A3 (CETUC).

Na Figura 86, observa-se aumento linear nos valores de retardo médio medido e simulado em função da distância entre o transmissor e o receptor.

Na Figura 87, o comportamento geral observado para o retardo RMS simulado em função da distância é semelhante ao do medido. Nesta Figura observam-se valores aproximadamente constantes no intervalo (10 m, 17 m). Em seguida, o retardo RMS aumenta linearmente no intervalo (17,4 m, 21,5 m) e, mais uma vez, permanece aproximadamente constante até o fim do corredor no intervalo (22 m, 30,5 m).

As Figuras 88, 89 e 90 mostram os perfis de potência e retardo simulados e medidos para duas distâncias contidas nos intervalos (10 m, 17 m), (17,4 m, 21,5 m) e (22 m, 30,5 m), respectivamente. As circunferências de cores laranja e azul indicam as amplitudes com maiores semelhanças encontradas nos diagramas de amplitude e retardo.

Na Figura 88, as amplitudes medidas mostradas nas circunferências laranjas possuem maior concentração de picos em comparação aos simulados para cada distância. Observa-se também, que as amplitudes do diagrama de potência e retardo simulados decrescem mais rapidamente em relação aos medidos, a partir de 20 ns do retardo de maior amplitude, quando se passa da distância de 11,18 metros para a distância de 14,49 metros. Por exemplo, 60 ns após a maior amplitude encontrada, a potência diminuiu 38 dB e 17 dB para as distâncias simuladas e medidas, respectivamente. Estas observações descrevem o comportamento geral do diagrama de potência e retardo à medida que o transmissor se desloca no intervalo de (10 m, 17 m), o que explica a manutenção de valores aproximadamente constantes e inferiores de espalhamentos de retardo RMS simulados em comparação aos medidos.

Na Figura 89, o aumento das amplitudes medidas e simuladas mostradas nas circunferências azuis e dos retardos relativos às amplitudes mostradas nas circunferências laranjas quando se passa da distância de 17,43 metros para a distância de 21 metros descrevem o comportamento geral do diagrama de potência e retardo à medida que o transmissor se desloca no intervalo (17,7 m, 21,5 m). Estas observações explicam o aumento linear dos valores simulados e medidos de espalhamento de retardo RMS neste intervalo (17,7 m, 21,5 m).

Na Figura 90, os valores aproximadamente constantes das amplitudes mostradas nas circunferências azuis e dos retardos relativos às amplitudes

mostradas nas circunferências laranjas quando se passa da distância de 23,78 metros para a distância de 27,55 metros descrevem o comportamento geral do diagrama de potência e retardo à medida que o transmissor se desloca no intervalo (22 m, 33,5 m). Estas observações explicam os valores simulados e medidos aproximadamente constantes de espalhamento de retardo RMS no intervalo (22 m, 33,5 m).

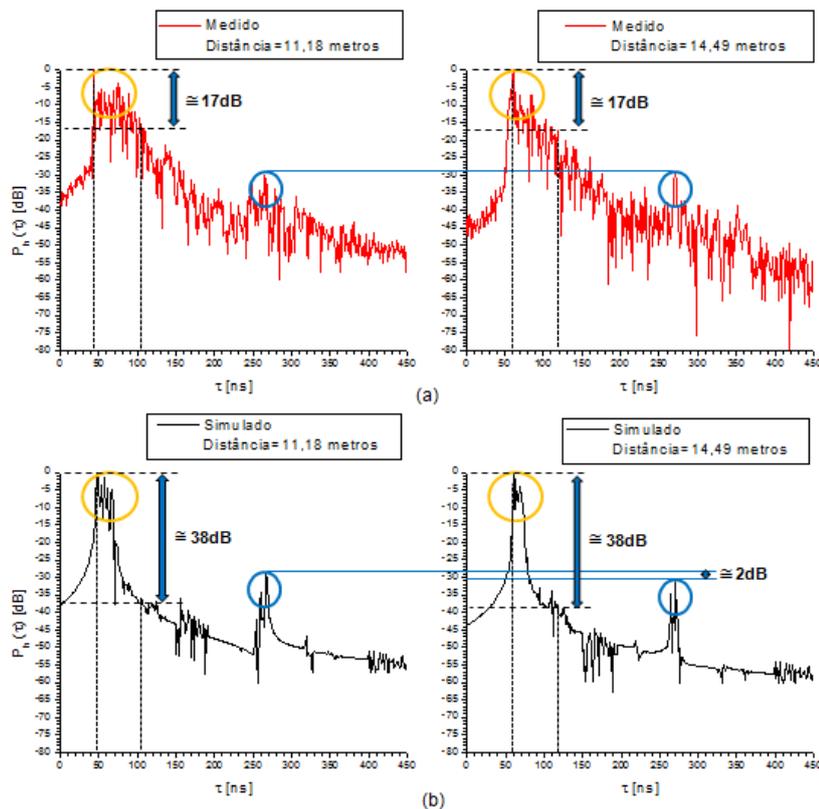


Figura 88- Perfis de potência de e retardo para as distâncias de 11,18 metros e 14,49 metros no corredor A3 do CETUC. (a) Perfis simulados. (b) Perfis medidos.

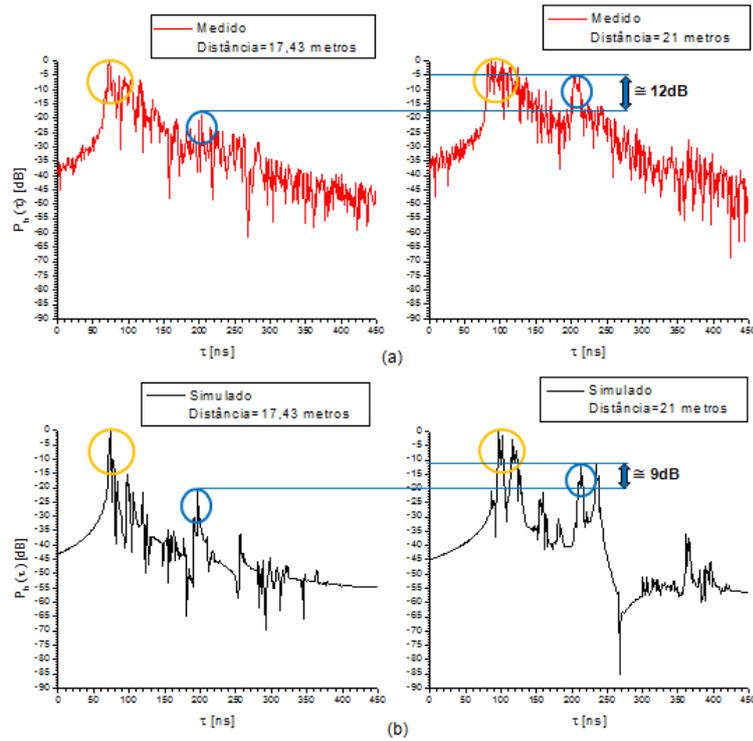


Figura 89- Perfis de potência de e retardo para as distâncias de 17,43 metros e 21 metros no corredor A3 do CETUC. (a) Perfis simulados. (b) Perfis medidos.

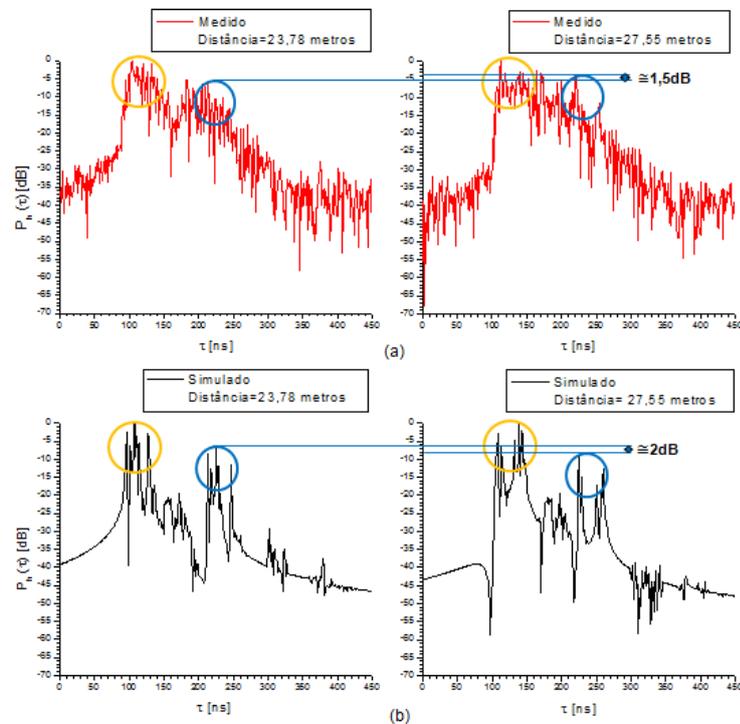


Figura 90- Perfis de potência de e retardo para as distâncias de 23,78 metros e 27,5 metros no corredor A3 do CETUC. (a) Perfis simulados. (b) Perfis medidos.

Apesar dos valores simulados e medidos de retardo médio e espalhamento de retardo RMS apresentarem comportamentos semelhantes, nota-se que os valores simulados são, em geral, inferiores aos medidos no corredor A3. A única exceção foi a semelhança constatada no intervalo (22 m, 33,5 m) para os valores de espalhamento de retardo RMS.

As diferenças no intervalo (10 m, 21,5 m) entre os valores simulados e medidos de retardo médio e espalhamento de retardo RMS foram de 7,74 ns e 11,93 ns. No intervalo (22 m, 33,5 m), as diferenças entre os valores simulados e medidos de retardo médio e espalhamento de retardo RMS foram de 16,48 ns e 0,86 ns. Esta diferença de valores foi obtida através da média do erro entre valores medidos e simulados ao longo dos intervalos de distância considerados.

A diferença entre os valores de retardo médio e espalhamento de retardo RMS obtidas nos corredores A2 e A3 é causada pelas diferentes amplitudes encontradas nos perfis de potência e retardo simulados em comparação aos medidos. Esta diferença de amplitude é provavelmente atribuída a falta de reflexões entre as difrações nas arestas do ambiente. Este fato descarta a obtenção de raios traçados entre transmissor e receptor que poderiam melhorar a precisão dos valores de retardo médio e espalhamento de retardo RMS obtidos através do modelo de traçado de feixes.

Estas observações relatadas no parágrafo anterior, associadas a não representação dos objetos presentes nos interiores das salas do ambiente simulado, assim como erros nas medidas das dimensões do ambiente e na seleção de valores para os parâmetros constitutivos dos objetos simulados contribuíram para o aumento na diferença entre os valores de retardo médio e espalhamento de retardo RMS medidos e simulados

Banda de Coerência

As Figuras 91 e 92 ilustram os valores simulados e medidos para a banda de coerência para a situação de LOS no corredor A1 obtida quando a função autocorrelação $R_H(\Omega)$ dada pela equação (5.2), atinge os níveis 0,7 e 0,9, respectivamente.

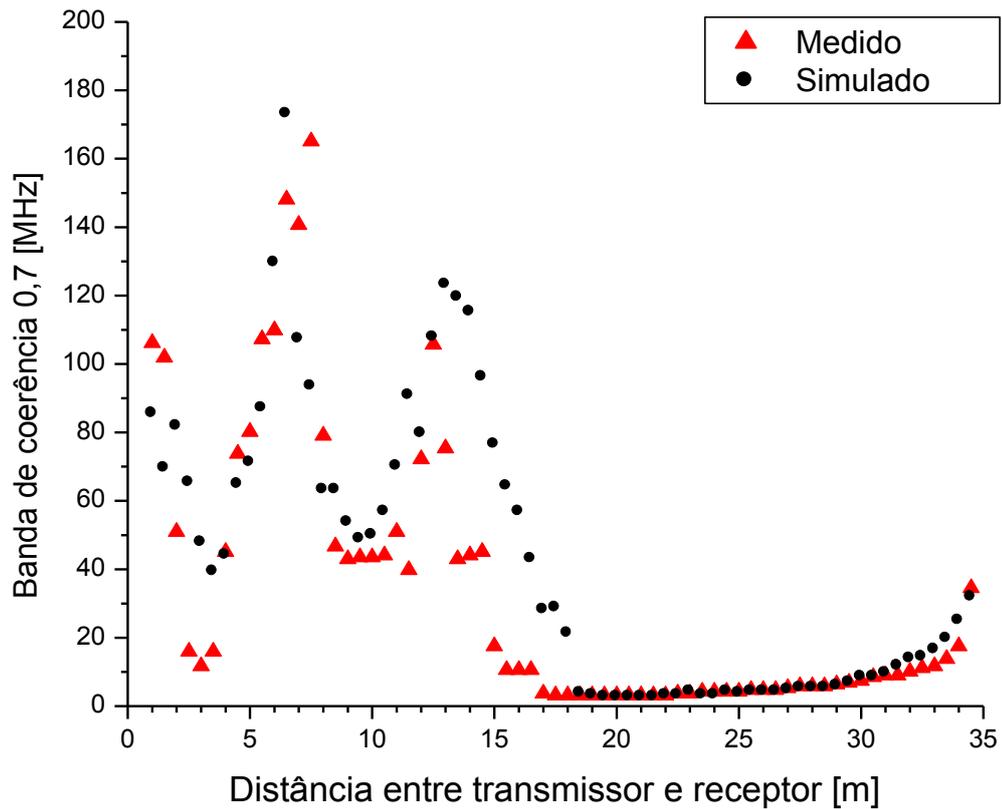


Figura 91- Banda de Coerência 0,7 ao longo da distância para o corredor A1 (CETUC).

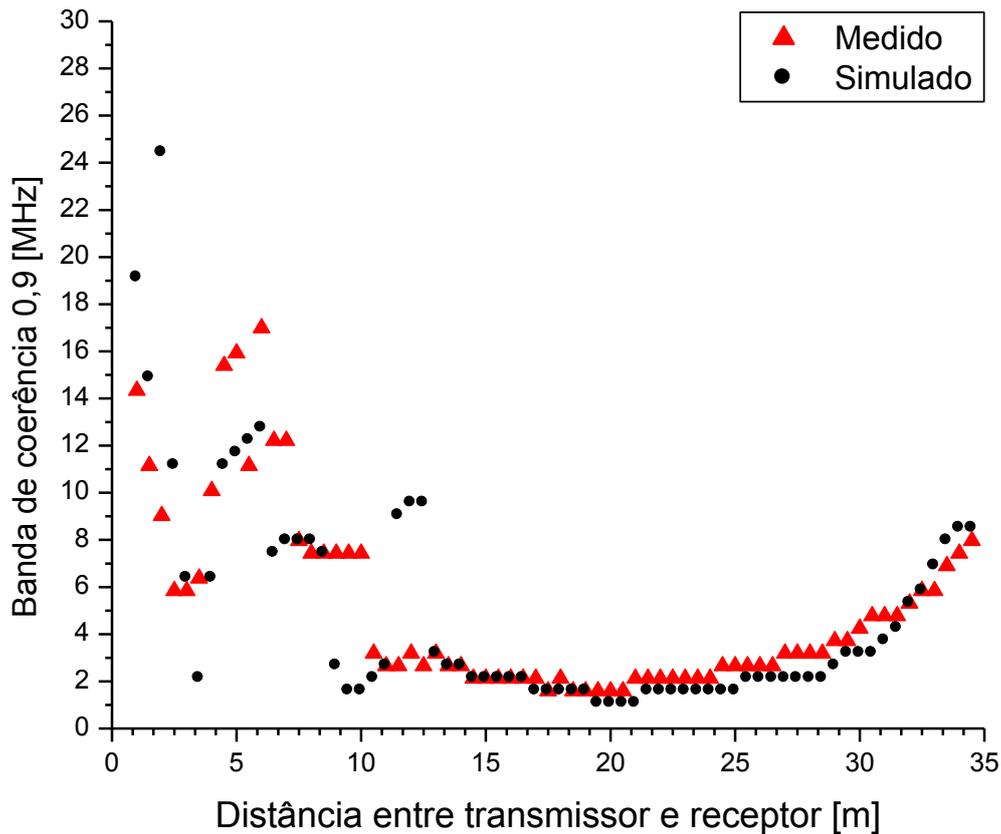


Figura 92- Banda de Coerência 0,9 ao longo da distância para o corredor A1 (CETUC).

Uma análise mais detalhada destas Figuras releva a boa concordância entre os valores simulados e medidos. Observa-se que o modelo de traçado de feixes foi capaz de reproduzir a rápida variação dos valores medidos no intervalo (0 m, 20 m) e (0 m, 15 m) das bandas de coerência 0,7 e 0,9, respectivamente. Após estes intervalos, o modelo também reproduziu o aumento dos valores medidos encontrados.

As Figuras 93 e 94 ilustram os valores simulados e medidos para a banda de coerência no corredor A2 (situação NLOS) obtida quando a função autocorrelação $R_H(\Omega)$ dada pela equação (5.2), atinge os níveis 0,7 e 0,9, respectivamente. Nestas Figuras, os valores medidos e simulados mantiveram-se aproximadamente constantes para a banda de coerência 0,7 e 0,9 em todo o intervalo de distancias. No entanto, os valores simulados foram em geral, 12,27 MHz e 2,45 MHz maiores que os medidos para a banda de coerência 0,7 e 0,9, respectivamente.

As Figuras 95 e 96 ilustram os valores simulados e medidos para a banda de coerência no corredor A3 (situação NLOS) obtida quando a função autocorrelação $R_H(\Omega)$ dada pela equação (5.2), atinge os níveis 0,7 e 0,9, respectivamente. Nestas Figuras, observam-se variações rápidas nos valores simulados no intervalo (10 m, 20,5 m). Por outro lado, os valores medidos mantiveram-se aproximadamente constantes neste intervalo. A diferença entre os valores medidos e simulados de banda de coerência 0,7 e 0,9 neste intervalo foram de 10,18 MHz e 2,46 MHz, respectivamente.

No intervalo (21 m, 30,5 m) os valores medidos e simulados para a banda de coerência 0,7 e 0,9 tiveram boa concordância, mantendo-se aproximadamente constantes. A diferença entre os valores medidos e simulados de banda de coerência 0,7 e 0,9 neste intervalo foram de 0,75 MHz e 0,28 MHz, respectivamente.

A diferença entre os valores medidos e simulados para a situação de NLOS constatada nos corredores A2 e A3 pode ser explicada pelas mesmas observações consideradas para justificar os diferentes valores de espalhamento de retardo RMS e retardo médio: a ausência de raios no receptor ; erros nas medidas das dimensões do ambiente; e a não representação dos objetos interiores as salas adjacentes aos corredores.

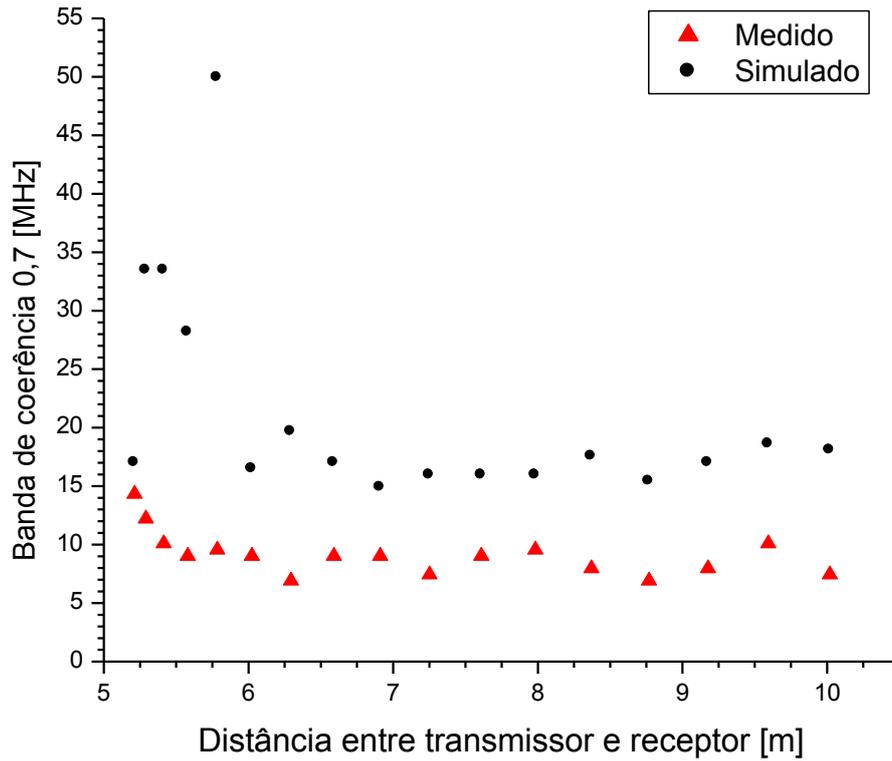


Figura 93- Banda de Coerência 0,7 ao longo da distância para o corredor A2 (CETUC).

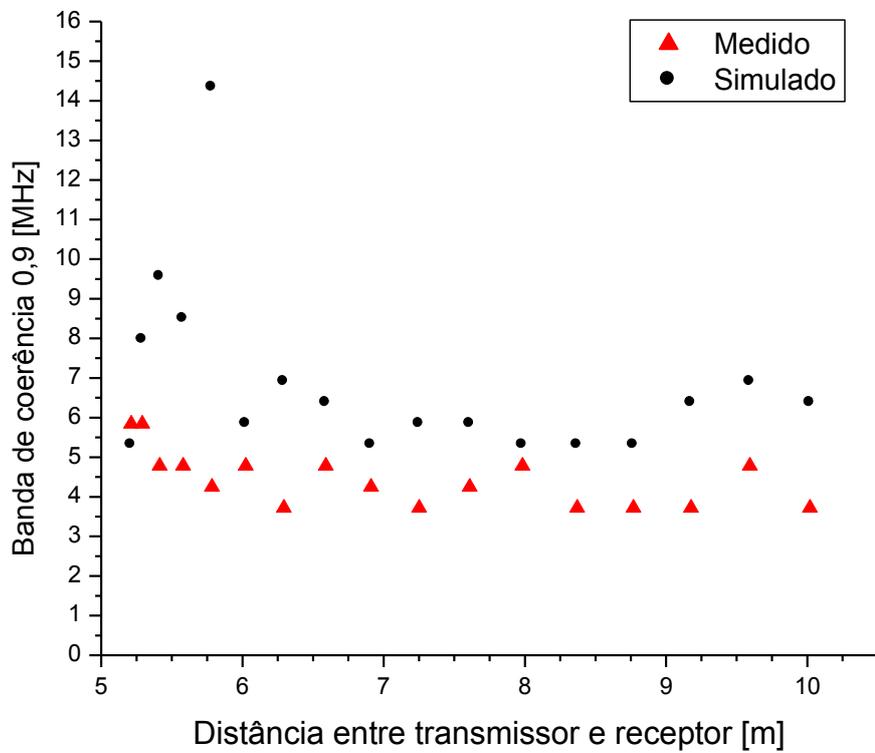


Figura 94- Banda de Coerência 0,9 ao longo da distância para o corredor A2 (CETUC).

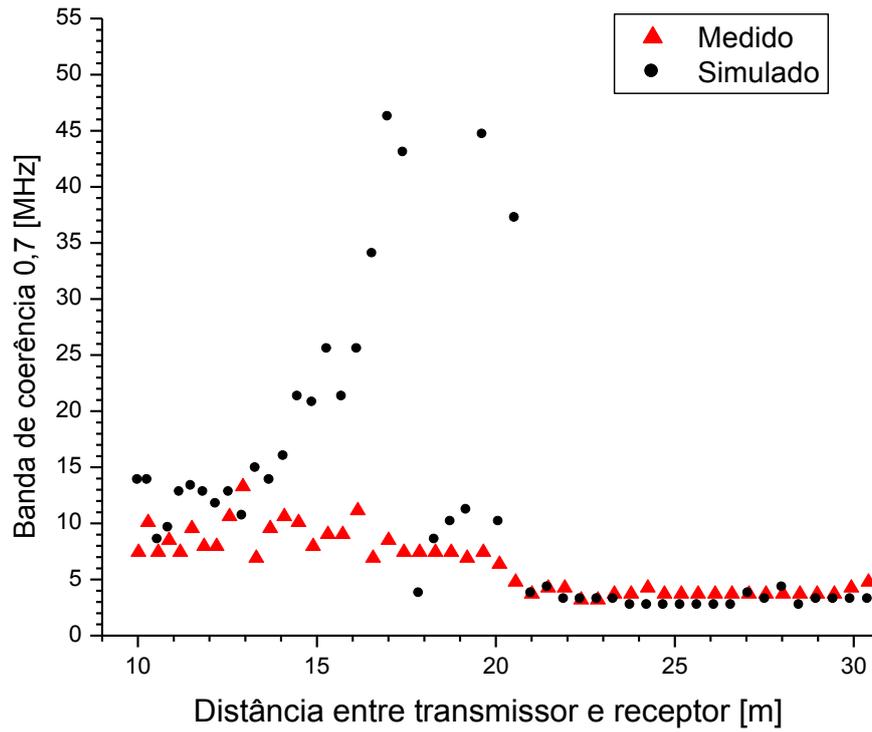


Figura 95- Banda de Coerência 0,7 ao longo da distância para o corredor A3 (CETUC).

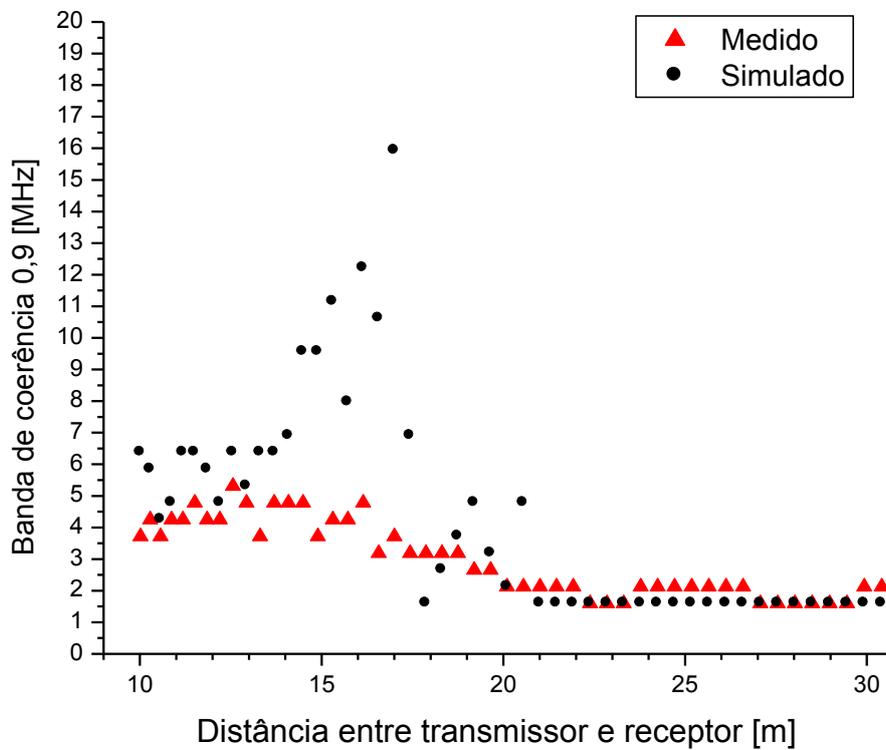


Figura 96- Banda de Coerência 0,9 ao longo da distância para o corredor A3 (CETUC).

6.3. Escritório

O escritório considerado é representado pela sala de Sistemas de Comunicação do CETUC, com inúmeras bancadas de computadores. Neste ambiente, foram analisadas uma situação de LOS e três situações de NLOS (com uma divisória de vidro entre o receptor e o transmissor). Este ambiente é ilustrado na Figura 97.



Figura 97- Foto do escritório.

Neste ambiente, a altura das antenas transmissora e receptora é de 1,5 metros. O transmissor (ponto de observação) foi deslocado numa grade (*grid*) de 6x6 com espaçamento de 15 cm em 4 diferentes pontos de referência (Tx₁, Tx₂, Tx₃ e Tx₄). A porta existente neste ambiente estava fechada durante as medidas.

No Escritório foram feitas análises dos parâmetros de dispersão do canal. A variação da potência recebida foi desconsiderada devido às pequenas dimensões do ambiente.

Os objetos existentes no ambiente de medidas, tais como bancadas, computadores (monitores e gabinetes) e divisórias de vidro, foram considerados pelo modelo. A Figura 98 mostra a disposição de alguns destes objetos no ambiente de medidas. Nesta Figura, alguns objetos estão posicionados em alturas diferentes em relação ao solo. As bancadas e o teto do corredor estão a uma altura de 0,75 metros e 2,73 metros, respectivamente.

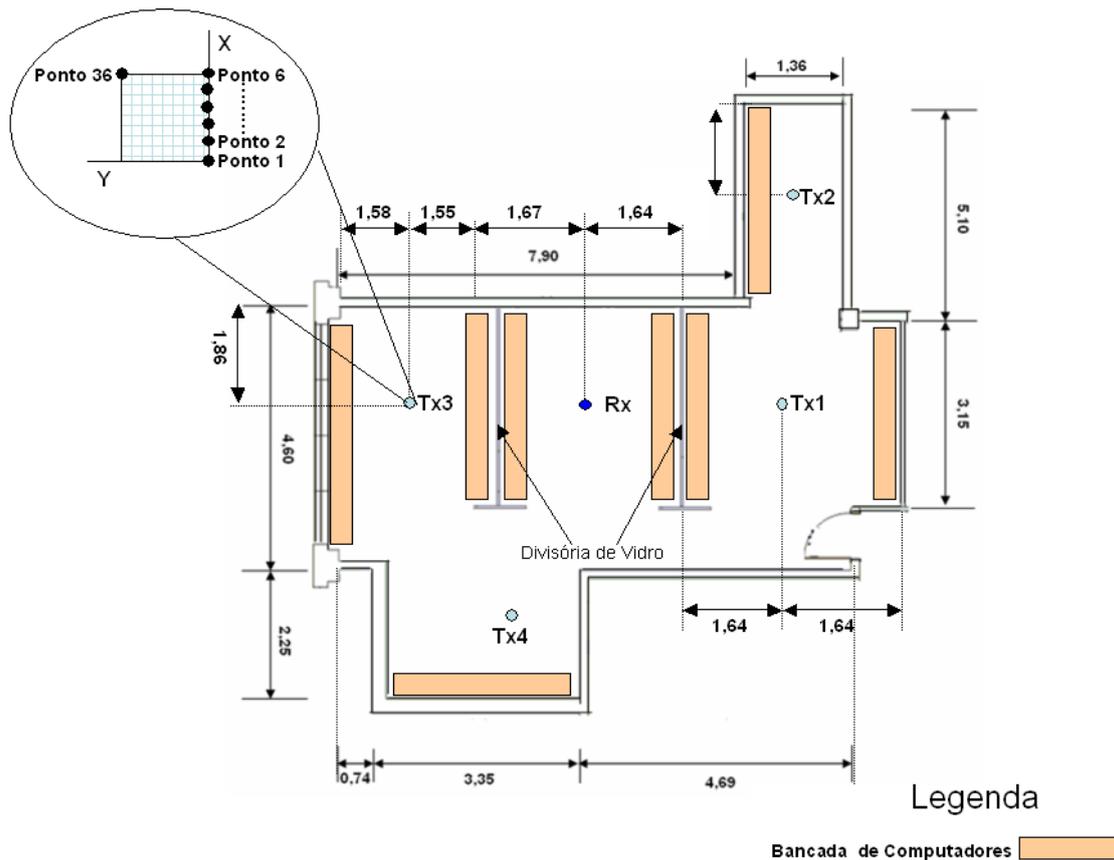


Figura 98- Planta do Escritório (escritório de Sistema de Comunicações do CETUC).

A Tabela 9 [75] apresenta a permissividade relativa ϵ_r e a condutividade σ das faces que compõem os objetos do ambiente, considerados na simulação.

	Material	Espessura (m)	ϵ_r	σ (S/m)
Paredes	Tijolo	0,13	4	0,011-0,016
Solo	Concreto	0,30	4-6	0,016-1
Teto	Gesso	0,03	2,8	0,1533
Bancadas	Madeira	0,03	1,5-2,1	0,011
Monitores e gabinetes	metal	0,01	1-10	$>1 \times 10^{+10}$

Tabela 9-Parâmetros constitutivos do ambiente simulado (Escritório A).

A Figura 99 ilustra a subdivisão espacial do ambiente simulado em células, explicada na seção 2.3. Nesta Figura, as faces vermelhas representam as divisórias de vidro. As células azuis representam somente os monitores, as amarelas somente os gabinetes e as verdes representam o conjunto monitor e gabinete. Estas células estão separadas de 20 cm e a localização das mesmas sobre as bancadas foi realizada através de uma aproximação da disposição dos objetos presentes no momento em que as medidas foram realizadas.

A Figura 100 ilustra a subdivisão espacial sobre uma região do ambiente que contém computadores.

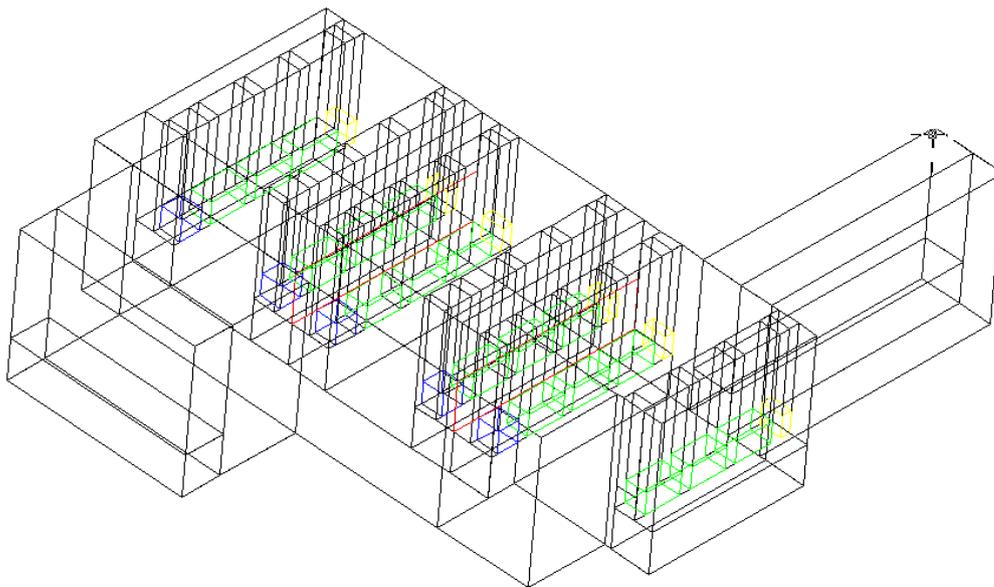


Figura 99- Modelo do ambiente utilizado para aplicação do método de traçado de feixes (Escritório).

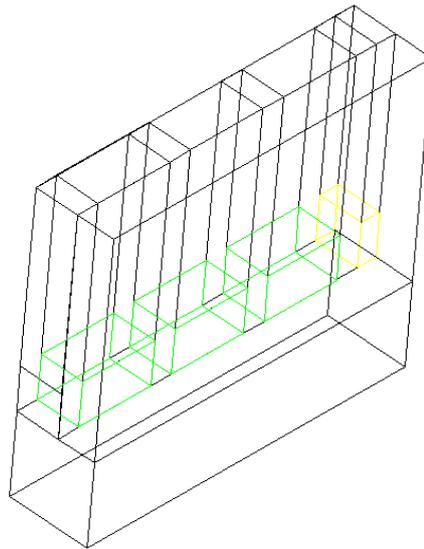


Figura 100- Subdivisão espacial aplicada a uma região do ambiente que contém computadores (Escritório).

A Tabela 10 apresenta as dimensões das células e faces coloridas mostradas nas Figuras 99 e 100.

	Altura (metros)	Largura (metros)
Célula azul	2,41	2,00
Célula amarela	4,83	2,00
Célula verde	2,82	2,20
Face Vermelha	1,00	1,2

Tabela 10- Dimensões das células coloridas mostradas nas Figuras 99 e 100.

A utilização do método de traçado de feixes no ambiente simulado proporcionou a obtenção de 5.186.641 feixes. A partir destes feixes, 989 raios, em média, foram traçados entre transmissor e receptor, para cada uma das posições do transmissor.

O tempo de processamento para a obtenção dos valores de campo elétrico na largura de banda de 850 MHz em todas as 144 posições do transmissor foi de trinta e sete minutos e onze segundos. O tempo de processamento inclui o tempo de obtenção de todos os feixes do ambiente e os raios para cada posição do transmissor.

No escritório simulado, cada um dos raios obtidos pode interagir até 20 vezes com o ambiente (em pontos de transmissão e reflexão). Quando aplicável, um ponto de difração de primeira ordem pode correr até a quinta interação do raio com o ambiente. Após, uma difração podem ocorrer até mais cinco interações (pontos de transmissão ou de reflexão) com o ambiente.

Retardo Médio e Espalhamento de Retardo RMS

As Figuras 101 e 102 mostram os valores medidos e simulados pelo modelo de traçado de feixes para o retardo médio e espalhamento de retardo RMS para todas as posições onde o transmissor se deslocou no *grid* centrado em Tx_1 .

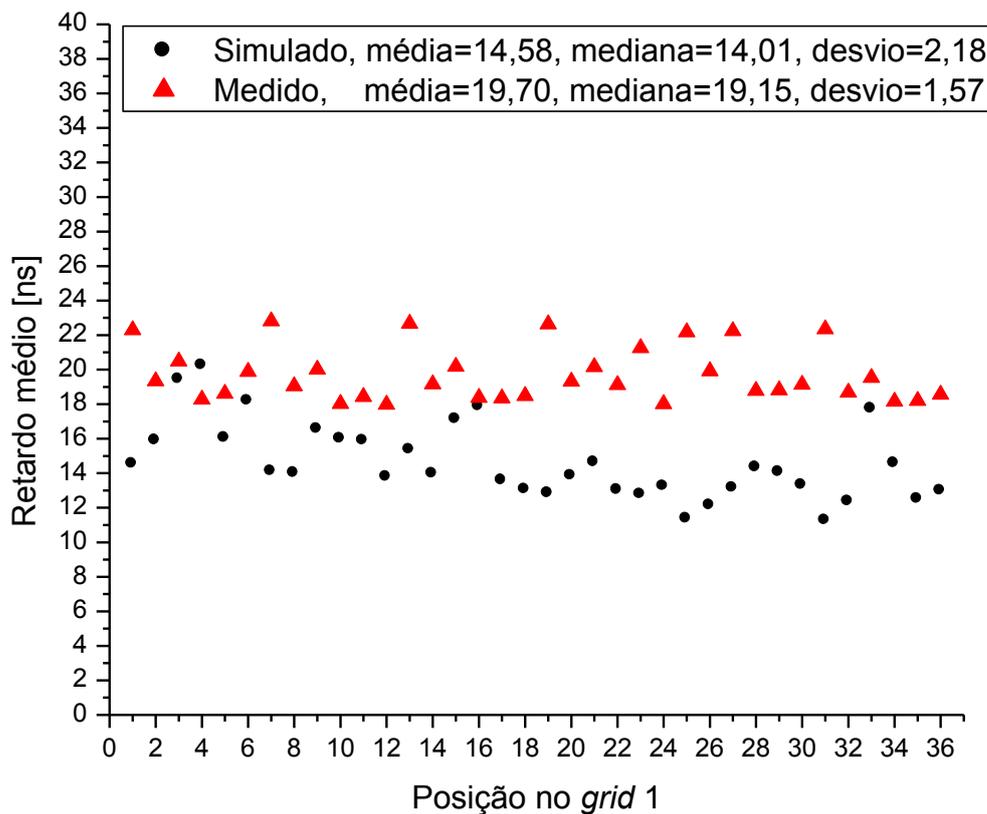


Figura 101- Retardo médio sobre as posições do *grid* centrado em Tx_1 (Escritório).

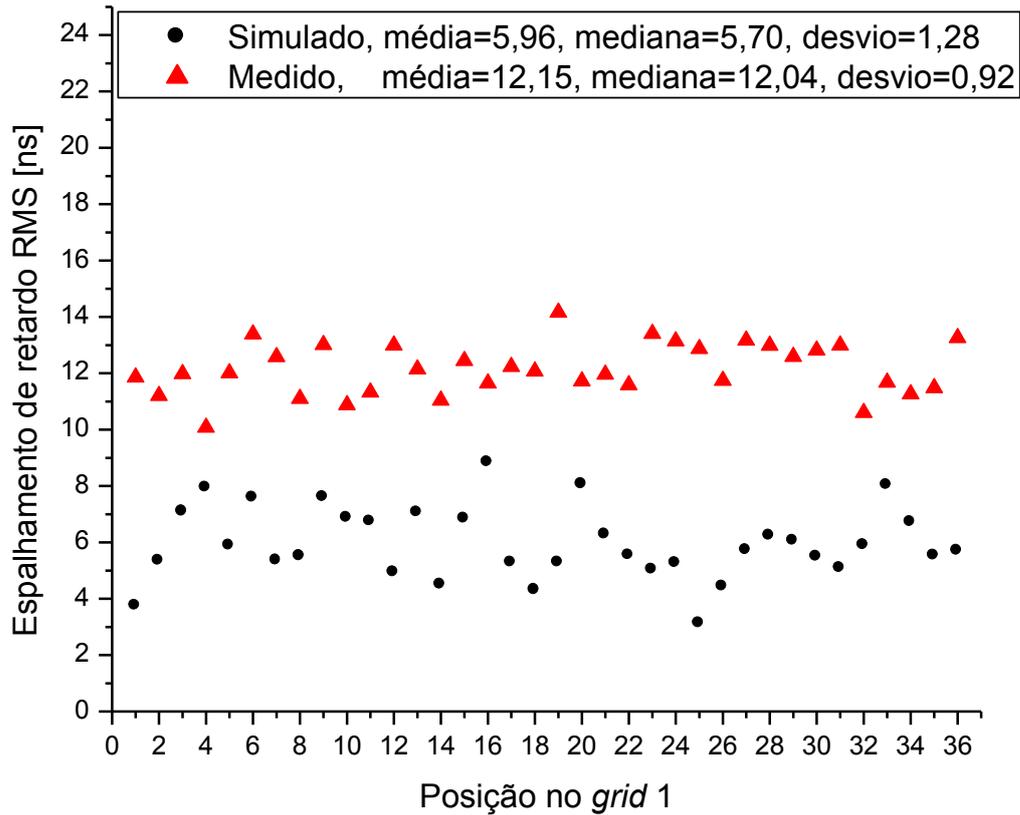


Figura 102- Espalhamento de retardo RMS sobre as posições do *grid* centrado em Tx₁ (Escritório).

Uma análise mais detalhada destas Figuras revela que os valores de retardo médio e espalhamento de retardo RMS medidos e simulados são aproximadamente constantes sobre o *grid* centrado na posição Tx₁. No entanto, os valores simulados são, em geral, inferiores aos medidos para os valores de retardo médio e espalhamento de retardo RMS, respectivamente.

Nas posições Tx₂, Tx₃ e Tx₄, os valores medidos e simulados de retardo médio e espalhamento de retardo RMS encontrados também se mantiveram aproximadamente constantes sobre as posições do *grid*. Os valores simulados, em geral, foram inferiores aos medidos, com exceção dos valores de retardo médio, maiores que os medidos na posição Tx₂.

A Tabela 11 apresenta a média, a mediana e o desvio padrão dos valores analisados no ambiente simulado. As letras “S” e “M” representam os valores simulados e medidos, respectivamente. Os valores de retardo médio e espalhamento de retardo RMS em todas as posições do *grid* centrados em Tx₂, Tx₃ e Tx₄ são mostrados no apêndice A (seção A.4).

T X 1	Retardo médio [ns]					
	Média		Mediana		Desvio	
	S	M	S	M	S	M
	14,58	19,70	14,01	19,15	2,18	1,57
	Espalhamento de retardo RMS [ns]					
	Média		Mediana		Desvio	
	S	M	S	M	S	M
5,96	12,15	5,7	12,04	1,28	0,92	
T X 2	Retardo médio [ns]					
	Média		Mediana		Desvio	
	S	M	S	M	S	M
	39,85	35,19	38,58	34,63	4,12	2,92
	Espalhamento de retardo RMS [ns]					
	Média		Mediana		Desvio	
	S	M	S	M	S	M
5,96	14,22	5,27	14,21	2,58	1,40	
T X 3	Retardo médio [ns]					
	Média		Mediana		Desvio	
	S	M	S	M	S	M
	14,88	18,46	15,52	18,33	2,14	1,39
	Espalhamento de retardo RMS [ns]					
	Média		Mediana		Desvio	
	S	M	S	M	S	M
6,80	11,06	7,10	10,73	0,98	1,30	
T X 4	Retardo médio [ns]					
	Média		Mediana		Desvio	
	S	M	S	M	S	M
	16,99	23,18	16,66	22,92	2,45	1,88
	Espalhamento de retardo RMS [ns]					
	Média		Mediana		Desvio	
	S	M	S	M	S	M
4,98	10,40	4,62	10,10	1,56	1,56	

Tabela 11- Retardo médio e espalhamento de retardo RMS obtidos nas posições analisadas no Escritório.

Uma análise mais detalhada da Tabela 11 revela valores simulados próximos aos medidos para a situação LOS (Tx₄) e NLOS (Tx₁, Tx₂ e Tx₃). Na situação LOS, a diferença entre os valores de retardo médio e espalhamento de retardo RMS simulados em relação aos medidos foi de 5,12 ns e 6,19 ns, respectivamente. Por outro lado, na situação NLOS, a diferença foi de 4,45 ns e 6,23 ns, respectivamente. Esta diferença de valores foi obtida através da média do erro entre valores medidos e simulados para as situações de LOS e NLOS.

No Escritório, a diferença entre os valores medidos e simulados é explicada pela diferença de amplitudes encontradas nos perfis de potência e retardo simulado em comparação aos medidos, e em particular, das amplitudes relacionadas ao intervalo (0 ns, 100 ns). Neste intervalo, encontram-se os valores de maiores amplitudes (acima de 20 dB).

A diferença encontrada entre os perfis de potência e retardo simulados e medidos é novamente atribuída a erros nas medidas das dimensões do ambiente de medidas e erro na escolha de valores para os parâmetros constitutivos do ambiente simulado.

A Figura 103 mostra um exemplo de perfil de potência e retardo onde a diferença entre amplitudes simulada e medida é constatada. Na Figura 103 (a), (b), (c) e (d) o transmissor está em uma posição do *grid* centrado em Tx₁, Tx₂, Tx₃ e Tx₄, respectivamente. Nesta figura, observam-se perfis de potência e retardos simulados e medidos semelhantes, porém com valores simulados de amplitude, em geral, inferiores aos medidos. A característica apresentada acima para cada gráfico descreve o comportamento geral observado nos diagramas de amplitude e retardo das outras posições do *grid* centradas em Tx₁, Tx₂, Tx₃ e Tx₄, respectivamente. Estas observações explicam os valores de retardo médio e do espalhamento de retardo RMS com comportamento semelhante (aproximadamente constantes), porém com valores simulados inferiores aos medidos em todas as posições analisadas.

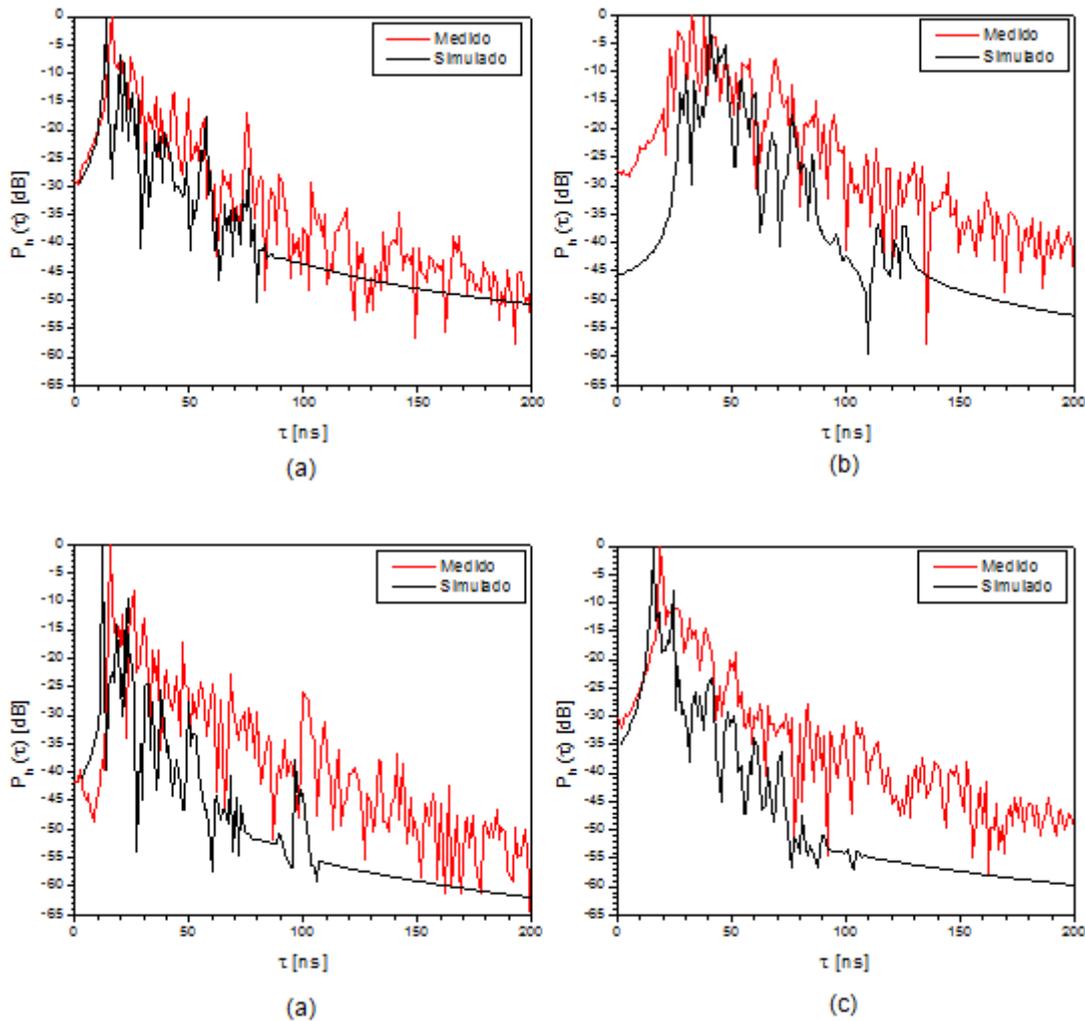


Figura 103- Comparação entre os perfis de potência e retardo simulados e medidos. (a) Posição 13 do *grid* centrado em Tx₁. (b) Posição 35 do *grid* centrado em Tx₂. (c) Posição 6 do *grid* centrado em Tx₃. (d) Posição 17 do *grid* centrado em Tx₄.

Vale ressaltar que, a partir de 100 ns, variações na amplitude não eram constatadas nos perfis de potência e retardo simulados devido à ausência de raios no modelo de traçado de feixes que percorrem distâncias acima de 30 metros no ambiente analisado.

No modelo de traçado de feixes, os raios traçados entre transmissor e receptor não conseguiram percorrer grandes distâncias no ambiente, pois o raio tinha que interagir com muitas faces para percorrer pequenas distâncias. Esta situação é ilustrada na Figura 104 onde um raio unicamente refletido em uma parede do ambiente teve que percorrer 3,28 metros e interagir com 5 faces. Nesta Figura, os asteriscos vermelhos representam os pontos de interseção do raio com

as faces que compõem as células do ambiente, e os pontos de cor preta e verde representam o transmissor e o receptor, respectivamente.

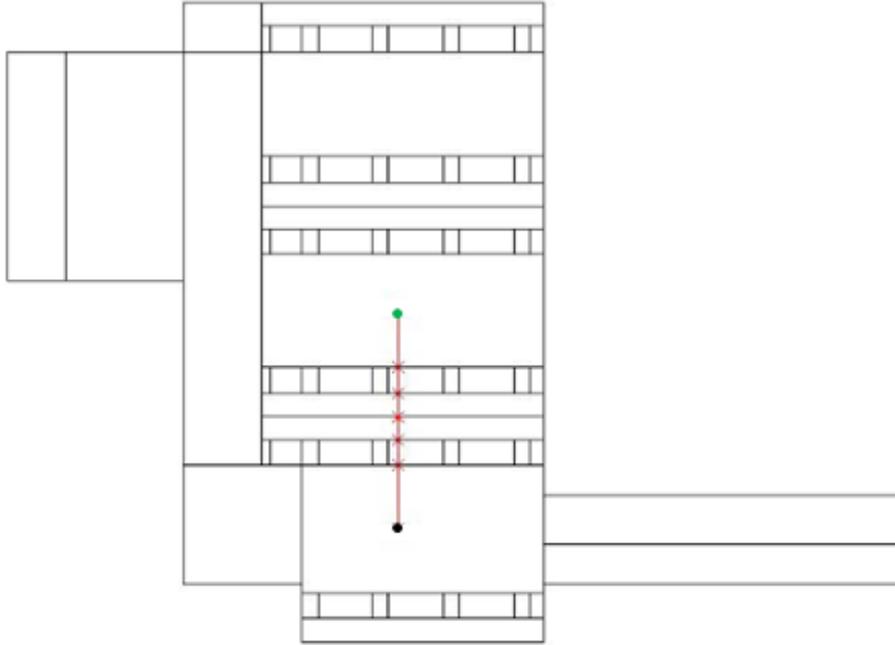


Figura 104- Exemplo de raio traçado entre transmissor e receptor no Escritório.

Desta forma, para se obter raios que percorram distâncias acima de 30 metros, existe a necessidade de um maior número de transmissões, reflexões e difrações dos feixes inicialmente emitidos, o que resulta no aumento do número de níveis na árvore de feixes (ver seção 2.4.10). Assim, à medida que os níveis aumentam, o número de feixes por nível também aumenta.

O programa desenvolvido para utilização do método de traçado de feixes na linguagem de programação Fortran armazena os feixes de cada nível em um vetor de tamanho fixo capaz de armazenar até o limite de 12.200.000 feixes por nível na árvore de feixes para o escritório. Assim, quando se tentou utilizar um número maior que 20 interações o tamanho do vetor utilizado para armazenar os feixes foi excedido. Fato que impossibilitou a obtenção de raios que percorram distâncias acima de 30 metros.

Apesar da limitação do programa desenvolvido, o perfil de potência simulado obtido é suficiente para representar as medidas feitas no escritório, pois

o mesmo conseguiu reproduzir as maiores amplitudes encontradas nos diagramas de potência e retardo que estão no intervalo (0 ns, 100 ns).

Banda de Coerência

As Figuras 105 e 106 ilustram os valores simulados e medidos para a banda de coerência obtidos sobre o *grid* centrado em Tx_1 quando a função autocorrelação $R_H(\Omega)$, dada pela equação (5.2), atinge os níveis 0,7 e 0,9, respectivamente.

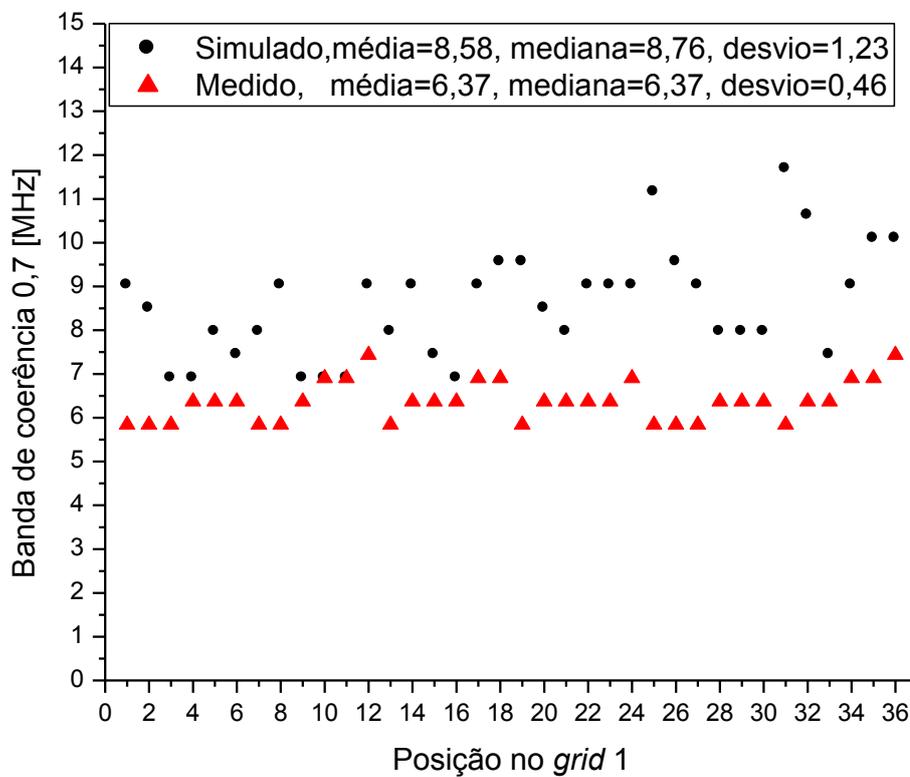


Figura 105- Banda de Coerência 0,7 sobre as posições do *grid* centrado em Tx_1 (Escritório).

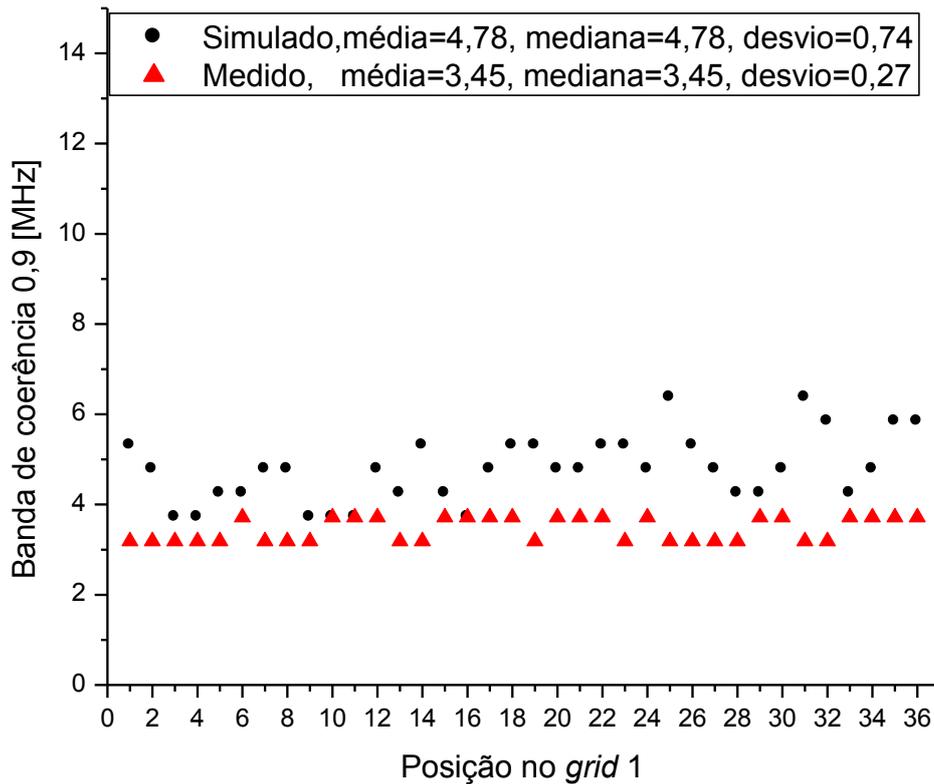


Figura 106- Banda de Coerência 0,9 sobre as posições do *grid* centrado em Tx₁ (Escritório).

Uma análise mais detalhada destas Figuras revela que os valores medidos e simulados da banda de coerência 0,7 e 0,9 são aproximadamente constantes sobre o *grid* centrado na posição Tx₁. No entanto, os valores simulados são, em geral, superiores aos medidos.

Nas posições Tx₂, Tx₃ e Tx₄, os valores medidos e simulados da banda de coerência 0,7 e 0,9 encontrados também se mantiveram aproximadamente constantes sobre as posições do *grid*. Sendo os valores simulados, em geral, foram superiores aos medidos .

Os valores da banda de coerência 0,7 e 0,9 em todas as posições do *grid* centrados em Tx₂, Tx₃ e Tx₄ são mostrados no apêndice A (seção A.4).

A Tabela 12 apresenta a média, a mediana e o desvio padrão dos valores analisados no ambiente simulado. As letras “S” e “M” representam os valores simulados e medidos, respectivamente.

T X 1	Banda de Coerência 0,7 [MHz]					
	Média		Mediana		Desvio	
	S	M	S	M	S	M
	8,58	6,37	8,76	6,37	1,23	0,46
	Banda de Coerência 0,9 [MHz]					
	Média		Mediana		Desvio	
	S	M	S	M	S	M
4,78	3,45	4,78	3,45	0,74	0,27	
T X 2	Banda de Coerência 0,7 [MHz]					
	Média		Mediana		Desvio	
	S	M	S	M	S	M
	3,44	3,72	3,46	3,72	0,3	0,29
	Banda de Coerência 0,9 [MHz]					
	Média		Mediana		Desvio	
	S	M	S	M	S	M
2,04	2,14	2,12	2,12	0,20	0,08	
T X 3	Banda de Coerência 0,7 [MHz]					
	Média		Mediana		Desvio	
	S	M	S	M	S	M
	8,10	6,74	7,70	6,90	1,3	0,38
	Banda de Coerência 0,9 [MHz]					
	Média		Mediana		Desvio	
	S	M	S	M	S	M
4,63	3,67	4,25	3,72	0,71	0,23	
T X 4	Banda de Coerência 0,7 [MHz]					
	Média		Mediana		Desvio	
	S	M	S	M	S	M
	7,54	5,49	7,43	5,31	0,9	0,44
	Banda de Coerência 0,9 [MHz]					
	Média		Mediana		Desvio	
	S	M	S	M	S	M
4,29	3,05	4,25	3,19	0,5	0,23	

Tabela 12- Valores de banda de coerência obtidos nas posições analisadas no escritório.

Uma análise dos valores de banda de coerência mostrados na Tabela 12 revela valores simulados próximos aos medidos para a situação LOS (Tx₄) e NLOS (Tx₁, Tx₂ e Tx₃). Na situação LOS, a diferença entre os valores de banda de coerência 0,7 e 0,9 simulados em relação aos medidos foi de 2,05 MHz e 1,24 MHz, respectivamente. Na situação NLOS, a diferença foi de 1,27 MHz e 0,79 MHz, respectivamente. Esta diferença de valores foi obtida através da média do erro entre valores medidos e simulados para as situações de LOS e NLOS.