

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Este capítulo tem o intuito de analisar: (1) os níveis de interferência produzidos por pontos de acesso sobre o receptor móvel devido ao espalhamento do sinal pela chuva; e (2) o desempenho do método proposto no quarto capítulo. De forma a compreender a maneira pela qual foi feita a simulação, este capítulo inicialmente descreverá os cenários das simulações, apresentando também o posicionamento das estações rádio base, o esquema de geração e localização dos usuários e os cálculos realizados com base no método proposto no capítulo 4.

Os resultados obtidos nesta simulação são apresentados logo a seguir, em função das principais medidas de níveis de interferências, representados em histogramas correspondentes a diversas frequências de operação. Adicionalmente, o número de iterações realizadas em cada um dos cenários será apresentado.

5.1 Parâmetros de Entrada

Para o desenvolvimento da simulação, são necessários os seguintes parâmetros de entrada: parâmetros do ambiente, tipo de cenário, características dos pontos de acesso e dos equipamentos de usuários. A seguir, será apresentada uma descrição dos parâmetros de entrada da ferramenta de simulação, que podem ser modificados de acordo com o propósito de cada estudo particular do fenômeno do espalhamento. Os valores adotados para os parâmetros estão listados nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3.

Tabela 5.1: Parâmetros iniciais para a simulação.

Parâmetros para a simulação	
Tipo de área	Urbana
Diâmetro da célula de chuva (m)	$3300 R^{-0.08}$
Taxa de precipitação R (mm/h)	Variável
Densidade do vapor d'água (g/m^3)	7.5
Pressão (hPa)	1013
Temperatura ($^{\circ}C$)	25
Distribuição de tamanho de gota de chuva	De Wolf

Tabela 5.2: Parâmetros iniciais para os pontos de acesso.

Parâmetros para os pontos de acesso	
Localização do Ponto de Acesso (PA)	Fixo
Tipo de antena	Setorial
Número de setores	4
Altura do Ponto de Acesso (m)	5
Polarização da antena	Vertical
Potência de transmissão do PA (dBm)	24
Frequência (GHz)	Variável
Ganho da antena do PA (dBi)	23
Elevação da Antena ($^{\circ}$)	0
Largura de banda (MHz)	1000
Ângulo de meia potência da antena (graus)	Variável

Tabela 5.3: Parâmetros iniciais para o equipamento de usuário.

Parâmetros para os equipamentos de usuário	
Localização dos Equipamentos dos Usuários (UE)	Variável
Tipo de antena	Omnidirecional
Altura do equipamento do usuário (m)	1.5
Ganho da antena do equipamento usuário (dBi)	2

5.2 Organização da Simulação

Após a entrada dos parâmetros requeridos para a simulação, inicia-se o cálculo para a determinação do nível de interferência de acordo com os dados especificados e o método proposto. Logo em seguida, o programa entra em ciclos, realizando, para cada usuário sorteado aleatoriamente, o cálculo da relação entre as potências desejada e interferente (S/I) devida aos pontos de acesso.

A Figura 5.1 ilustra como os módulos, denominados funções ou sub-rotinas, e procedimentos estão organizados na ferramenta de simulação. A ferramenta de simulação usada neste trabalho foi desenvolvida em Matlab e permite acompanhar o processamento em tempo real de maneira gráfica e ordenada.

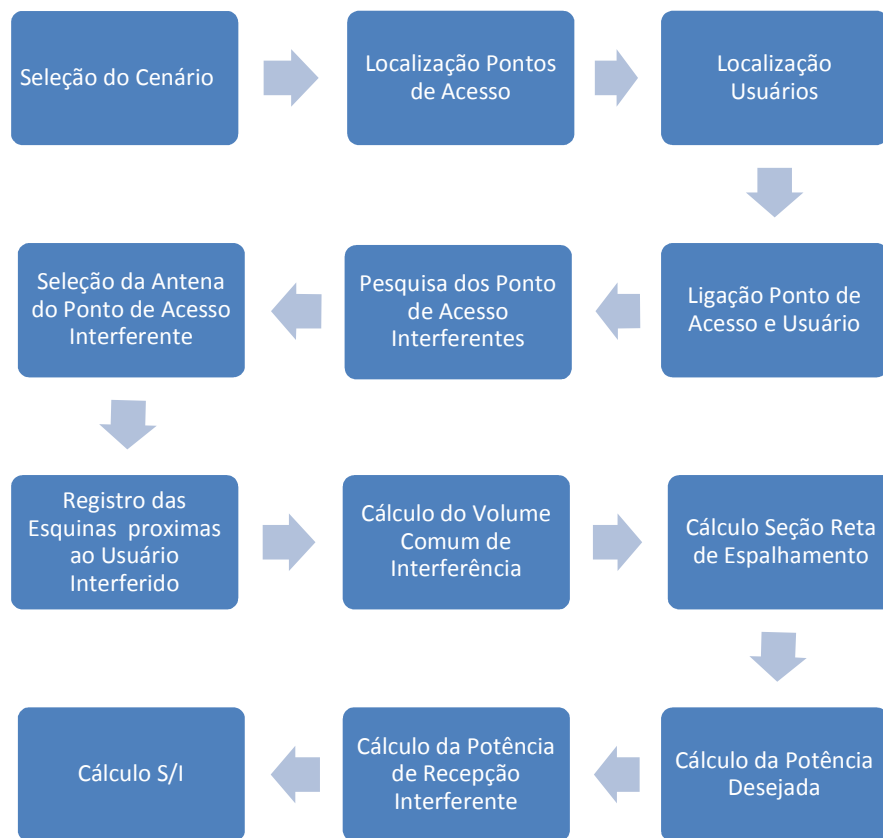


Figura 5.1: Organização dos módulos da ferramenta da simulação.

Na Figura 5.1, os módulos representam as principais sub-rotinas implementadas na plataforma de simulação, apresentando resultados que se

convertem em parâmetros iniciais para o módulo seguinte. Para calcular a interferência total no terminal do usuário, é necessário determinar quais são as estações rádio base que operam na mesma frequência que o terminal do usuário.

5.2.1 Descrição do Cenário

Como primeiro passo para desenvolver a simulação, foram constituídos cenários que se aproximem dos ambientes de uma rede móvel celular. A simulação em um ambiente urbano é um dos casos de teste mais realísticos, considerando as estruturas que este possui: os prédios, ruas, parques e calçadas. Os ambientes de simulação planejados para este trabalho são urbanos. Foram desenvolvidos de forma tridimensional em Matlab, considerando as larguras das ruas e prédios com alturas semelhantes às existentes em uma área urbana. Serão apresentados os dois tipos de modelos de cenários que serão utilizados nas simulações: um regular, como é o mapa de uma pequena área de Madrid e outro irregular, como o mapa de Ipanema, Rio de Janeiro. O cenário regular é diferenciado do cenário irregular basicamente pela geometria nas medidas das ruas e os blocos dos prédios.

5.2.1.1 Cenário Urbano Regular: Mapa de Madrid

Este cenário foi adaptado do mapa de referência proposto pelo grupo METIS, que atualmente trabalha em desenvolvimentos de sistemas 5G operando nas frequências de ondas milimétricas nas áreas urbanas [11]. Este modelo é baseado em uma estrutura realista bem dimensionada dentro da cidade de Madrid, mostrado na Figura 5.2. O cenário considerado no mapa de Madrid tem as seguintes dimensões: 765 metros (de oeste a leste) por 1095 metros (de Sul ao Norte). Entre os vários tipos de estruturas modelados, encontram-se:

- As ruas têm uma largura de 18 metros;
- As avenidas possuem uma largura de 30 metros;
- Blocos grandes de prédios com dimensões de 120 metros por 120 metros;
- Blocos pequenos de prédios com dimensões de 30 metros por 120 metros;
- Parques e calçadas.

Os prédios são altos, semelhantes nos tamanhos e dispostos em fileiras separadas por ruas. Admite-se também que as ruas são paralelas entre si, de forma semelhante. Para um melhor enfoque, a região em que serão feitas as simulações foram representadas na cor azul escura na Figura 5.2. Observa-se que esta região é finita e que pontos de acesso e terminais de usuários situados nas suas bordas estariam, em grande parte, submetidos artificialmente a condições de espaço livre. Para evitar possíveis efeitos artificiais das bordas nos resultados da simulação, esta região foi cercada por células idênticas às da estrutura central, representadas na cor azul clara. Adicionalmente, os parques estão representados pela cor verde.

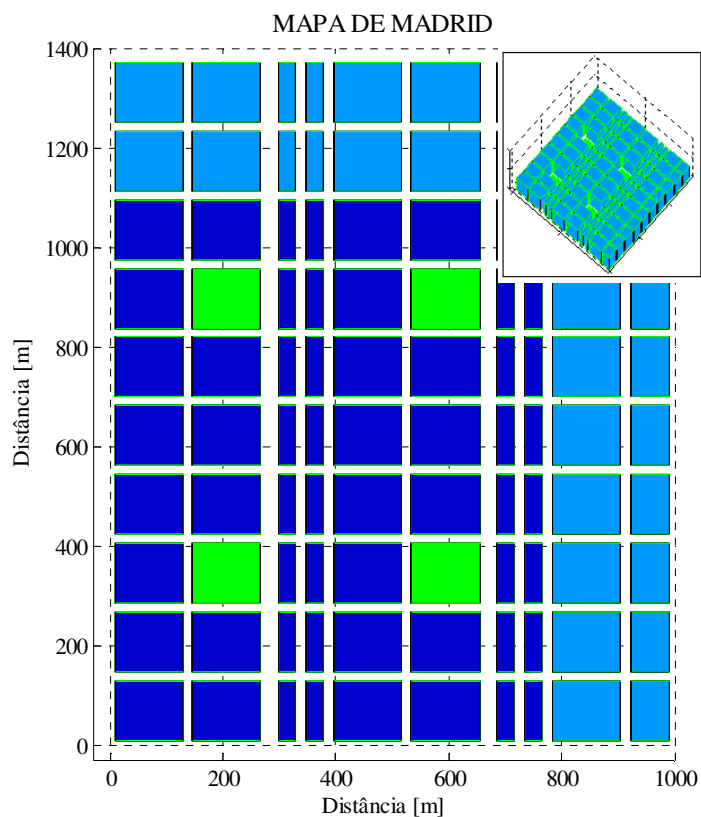


Figura 5.2: Mapa de Madrid, Espanha (reproduzido de [11]).

5.2.1.2 Cenário urbano irregular: mapa de Ipanema, Rio de Janeiro

Foi também desenvolvido um cenário de estrutura irregular baseado em banco de dados do Instituto Pereira Passos (IPP), departamento de pesquisas da Prefeitura do Município do Rio de Janeiro, contendo coordenadas geográficas das estruturas e prédios que formam parte do bairro de Ipanema.

A região a ser atendida pela rede celular é de aproximadamente $5,68 \text{ km}^2$, cuja área de cobertura está mostrada no mapa do *Google Earth* na Figura 5.3.



Figura 5.3: Área de cobertura, Ipanema, Rio de Janeiro, (reproduzida do mapa do *Google Earth*).

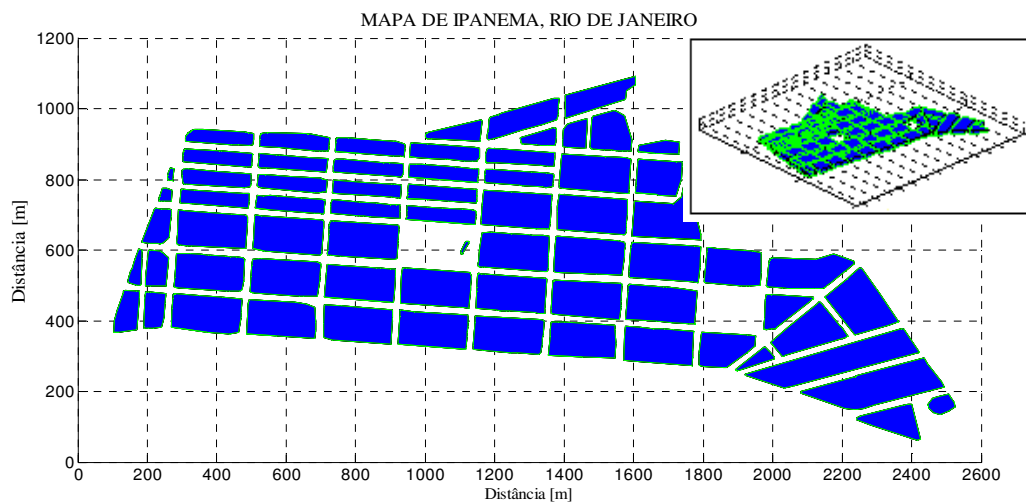


Figura 5.4: Mapa de Ipanema, Rio de Janeiro, construído a partir de dados do IPP.

No cenário de Ipanema, existem vários tipos de estruturas que foram modeladas. Entre elas, igualmente se encontram ruas, prédios, parques e veredas.

Para a simulação deste mapa, primeiramente foi realizada a transformação das coordenadas geográficas expressadas em longitude e latitude para um sistema

de coordenadas expressadas em metros medidos a partir de origem arbitrária, para maior facilidade nos cálculos. O mapa simulado de Ipanema pode ser observado na Figura 5.4. Observa-se nesta Figura maior diversidade de formatos, dimensões e orientações dos diversos blocos em relação à observada no mapa de Madrid.

5.2.2 Posicionamento dos Pontos de Acesso

5.2.2.1 Posicionamento dos pontos de acesso no mapa de Madrid

Os pontos de acesso no Mapa de Madrid são fixos e estão distribuídos nas esquinas das ruas, para que as antenas obtenham melhor cobertura em linha de visada. De fato, como descrito no capítulo 2, as perdas de penetração na ausência de linha de visada são muito altas nas frequências correspondentes a ondas milimétricas. Os eixos das antenas dos pontos de acesso apontarão para o norte, leste, sul e oeste. Isto é, terão 4 setores, com azimute de 0° , 90° , 180° e 270° , respectivamente. Cada antena de um ponto de acesso cobriu uma rua com um feixe diretivo. Os pontos de acesso, que permanecerão fixos, estão representados por pontos vermelhos na Figura 5.5. Suas coordenadas estão listadas na Tabela 5.4.

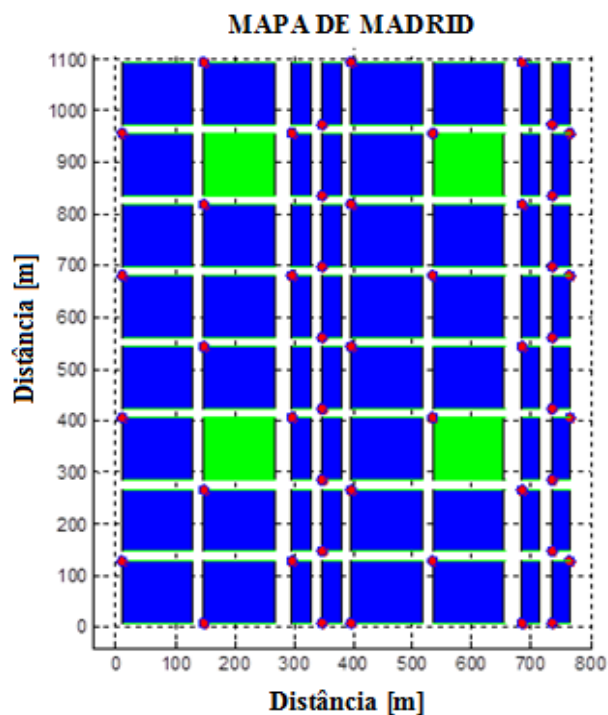


Figura 5.5: Localização dos pontos de acesso no mapa de Madrid.

Tabela 5.4: Posicionamento dos Pontos de Acesso no Mapa de Madrid.

Localização dos Pontos de Acesso					
Pontos de Acesso	Distância Eixo X [m]	Distância Eixo Y [m]	Ponto de Acesso	Distância Eixo X [m]	Distância Eixo Y [m]
PA_1	9	129	PA_25	396	819
PA_2	9	405	PA_26	396	1095
PA_3	9	681	PA_27	534	129
PA_4	9	957	PA_28	534	405
PA_5	147	9	PA_29	534	681
PA_6	147	267	PA_30	534	957
PA_7	147	543	PA_31	684	9
PA_8	147	819	PA_32	684	267
PA_9	147	1095	PA_33	684	543
PA_10	297	129	PA_34	684	819
PA_11	297	405	PA_35	684	1095
PA_12	297	681	PA_36	735	9
PA_13	297	957	PA_37	735	147
PA_14	348	9	PA_38	735	285
PA_15	348	147	PA_39	735	423
PA_16	348	285	PA_40	735	561
PA_17	348	423	PA_41	735	699
PA_18	348	561	PA_42	735	837
PA_19	348	699	PA_43	735	975
PA_20	348	837	PA_44	765	129
PA_21	348	975	PA_45	765	405
PA_22	396	9	PA_46	765	681
PA_23	396	267	PA_47	765	957
PA_24	396	543			

5.2.2.2 Posicionamento dos pontos de acesso no mapa de Ipanema

Os pontos de acesso no mapa de Ipanema, Rio de Janeiro, foram localizados nas esquinas dos blocos dos prédios e também no meio dos blocos, para gerar uma melhor cobertura. Estes pontos de acesso estão representados por pontos vermelhos na Figura 5.6. Suas coordenadas estão listadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Posicionamento dos Pontos de Acesso no Mapa de Ipanema.

Localização dos Pontos de Acesso					
Pontos de Acesso	Distância Eixo X [m]	Distância Eixo Y [m]	Ponto de Acesso	Distância Eixo X [m]	Distância Eixo Y [m]
PA_1	274.40	476.89	PA_29	829.34	736.11
PA_2	491.38	460.06	PA_30	1045.47	720.82
PA_3	708.07	444.24	PA_31	404.57	825.06
PA_4	927.02	429.28	PA_32	618.18	808.52
PA_5	1143.53	415.66	PA_33	834.38	792.58
PA_6	1362.65	397.47	PA_34	1049.46	779.70
PA_7	1577.82	383.54	PA_35	1266.84	765.36
PA_8	1794.61	367.92	PA_36	1483.90	750.52
PA_9	381.88	586.79	PA_37	1678.60	733.97
PA_10	600.83	571.49	PA_38	311.55	924.99
PA_11	816.27	554.74	PA_39	524.19	930.37
PA_12	1031.43	544.14	PA_40	740.84	919.53
PA_13	1251.19	527.77	PA_41	955.37	902.40
PA_14	1467.36	511.39	PA_42	1175.76	887.19
PA_15	1684.47	496.65	PA_43	1393.91	873.44
PA_16	1886.37	486.65	PA_44	1611.34	859.04
PA_17	2058.95	472.09	PA_45	406.45	881.21
PA_18	289.79	712.94	PA_46	620.68	866.41
PA_19	510.41	699.62	PA_47	836.54	851.06
PA_20	726.27	683.80	PA_48	1054.09	837.70
PA_21	940.93	669.00	PA_49	1271.40	822.70
PA_22	1162.69	648.90	PA_50	1481.34	978.36
PA_23	1377.62	640.40	PA_52	1993.39	338.67
PA_24	1592.75	622.47	PA_54	2238.01	359.58
PA_25	1810.79	607.95	PA_55	2239.68	244.93
PA_26	1990.69	577.94	PA_56	2399.36	164.33
PA_27	396.00	767.06	PA_57	190.05	378.90
PA_28	613.66	750.32	PA_58	201.87	600.60

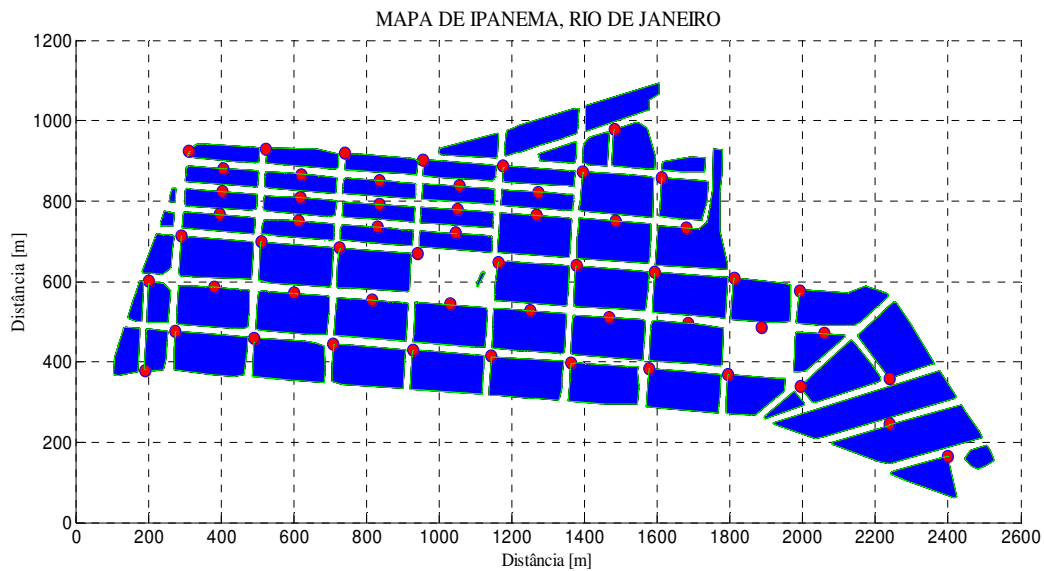


Figura 5.6: Localização dos pontos de acesso no Mapa de Ipanema, Rio de Janeiro.

5.2.3 Posicionamentos dos Usuários

Para as simulações, foram escolhidos $M = 1000$ usuários, cujas posições horizontais (X , Y) foram determinadas aleatoriamente sobre as ruas de acordo com distribuições uniformes, sendo suas alturas mantidas constantes. Os valores dos parâmetros das antenas dos usuários foram especificados na Tabela 5.3. As possíveis posições dos usuários estão representadas pelos pontos amarelos nos cenários de Madrid e Ipanema, como é mostrado nas Figuras 5.7 e 5.8, respectivamente.

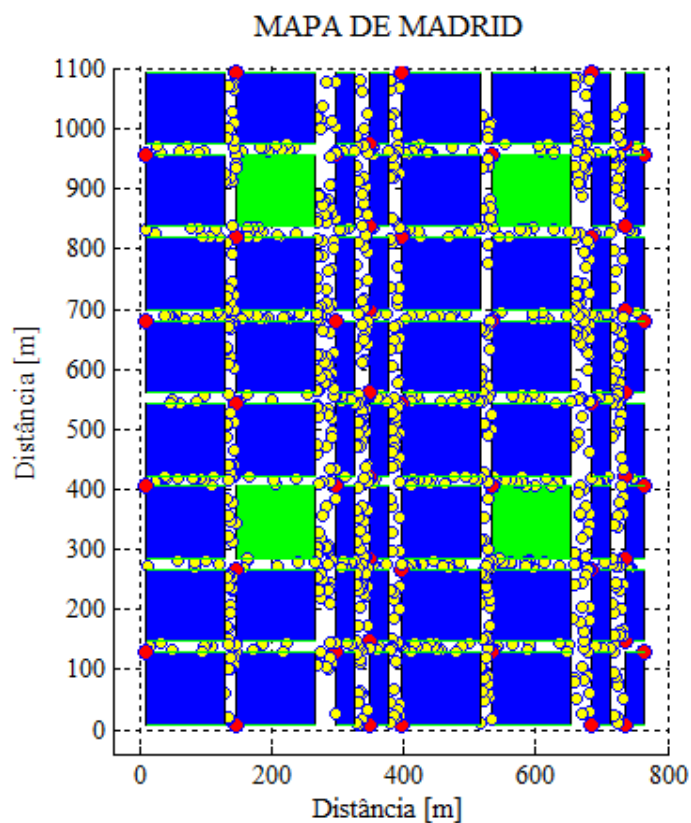


Figura 5.7: Simulação da posição dos usuários em Madrid.

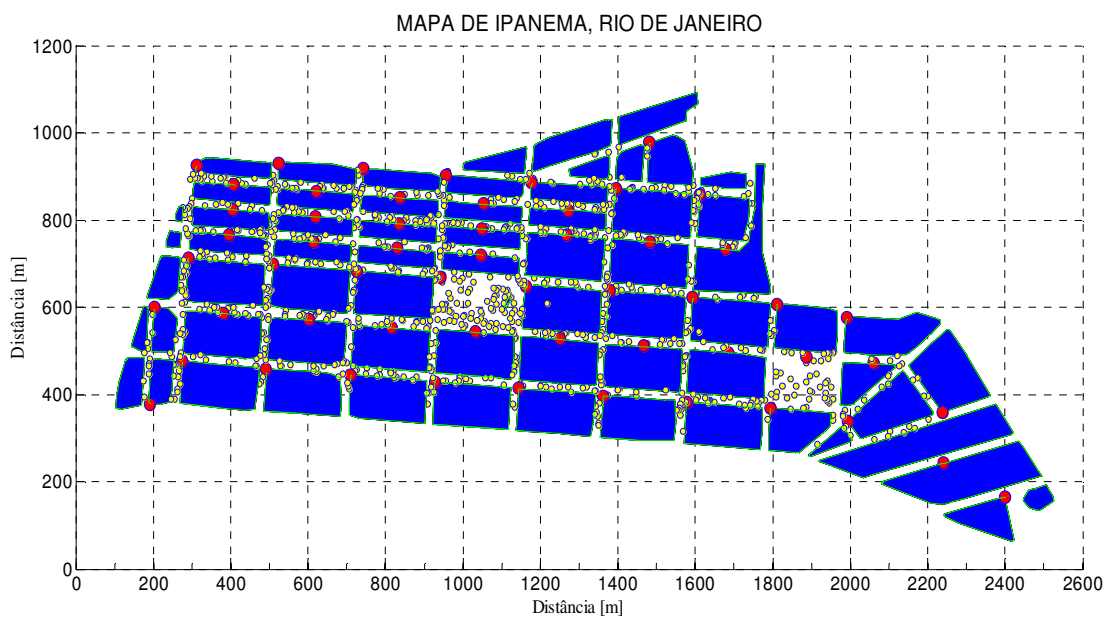


Figura 5.8: Simulação da posição dos usuários em Ipanema.

5.2.4 Ligação entre Ponto de Acesso e Usuário

Para simular a ligação de um ponto de acesso a um usuário, deve-se assegurar a existência de linha de visada entre estes pontos. Para tanto, verifica-se a ausência de interseções entre o segmento de reta que une o transmissor e o receptor com os segmentos de retas que formam os polígonos que representam as bases dos prédios.

Para o cálculo da distância entre transmissor e receptor, é utilizada a norma euclidiana:

$$d = \sqrt{(X_j - X_k)^2 + (Y_j - Y_k)^2 + (Z_j - Z_k)^2} \quad (5.1)$$

onde X_j , Y_j e Z_j são as coordenadas do equipamento de usuário e X_k , Y_k e Z_k são coordenadas do ponto de acesso.

$$EU_j = (X_j, Y_j, Z_j)$$

$$PA_k = (X_k, Y_k, Z_k)$$

Calcula-se a distância entre o usuário e cada um dos pontos de acesso desobstruídos. Desta forma, determina-se o ponto de acesso a uma distância mínima, com o qual o usuário estabelecerá uma ligação.

Para exemplificar o processamento realizado pela ferramenta de simulação, descrito na Figura 5.1, foi selecionado um usuário do mapa de Madrid situado na posição:

$$EU_j = (278, 813, 1.5) \text{ [m]}$$

Verifica-se na Figura 5.7 que o PA que cumpre com as condições de linha de visada e distância mínima têm as seguintes coordenadas:

$$PA = (297, 681, 5) \text{ [m]}$$

Aplicando a equação 5.1, a distância entre o PA e o usuário é:

$$d = \sqrt{(278 - 297)^2 + (813 - 681)^2 + (1.5 - 5)^2}$$

$$d = 133.40 \text{ m}$$

5.2.5 Pesquisa dos Pontos de Acesso Interferentes

Para encontrar pontos de acesso que interfiram com o receptor, uma sub-rotina identifica aqueles situados no interior de um círculo centrado no receptor de raio ρ igual a 300 metros. Pela proximidade, estes são os pontos de acesso que geram interferências mais severas.

Na simulação, foram identificados os seguintes pontos de acesso interferentes listados na Tabela 5.6, que não têm linha de visada com o receptor, mas que ficam dentro do círculo de raio igual a 300 m centrado no receptor (o usuário selecionado do mapa de Madrid).

Tabela 5.6: Os pontos de acessos interferentes e suas distâncias ao receptor.

PA Interferentes	Coordenadas [m]	Distância ao receptor [m]
PA_3	(9, 681, 5)	299.66
PA_8	(147, 819, 5)	131.18
PA_25	(396, 819,5)	118.20
PA_29	(534, 681, 5)	288.04
PA_30	(534, 957, 5)	293.74

A ferramenta de simulação realiza os cálculos de espalhamento correspondentes aos 5 transmissores interferentes e calcula a potência interferente resultante.

5.2.6 Seleção da Antena do Ponto de Acesso Interferente e Registro do Azimute Correspondente

Em seguida, é identificada a antena de cada ponto de acesso que gera a interferência no receptor móvel, registrando seu azimute. As seleções das antenas dos pontos de acesso interferentes são feitas em relação à posição do usuário e às

esquinas que formam as bases dos volumes de espalhamento. Este procedimento é realizado por uma sub-rotina que identifica a esquina que oferece linhas de visada ao receptor e ao ponto de acesso, assim como o percurso de menor distância entre os extremos. Esta configuração é mostrada na Figura 5.9 para o caso limite em que o receptor e ao ponto de acesso estão muito afastados da esquina, iluminando-a totalmente.

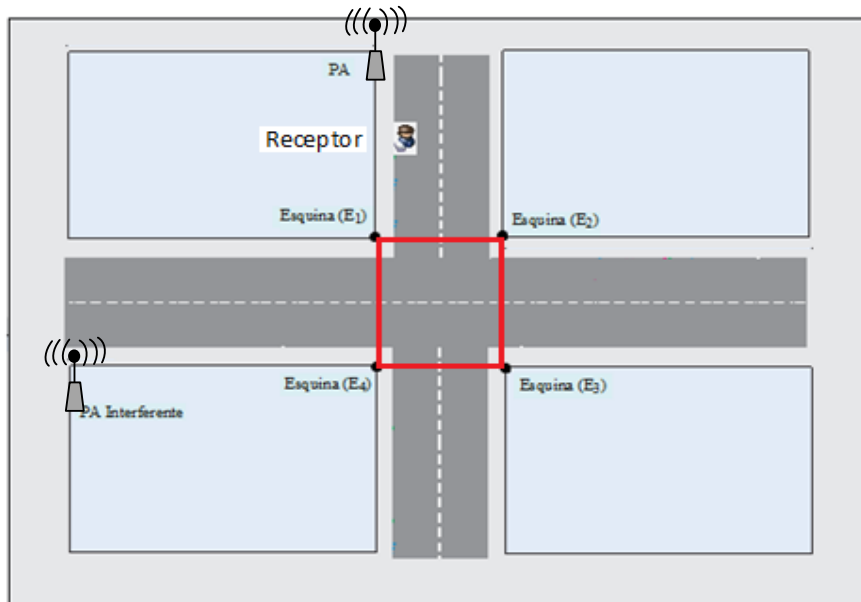


Figura 5.9: Representação dos pontos de acesso, esquinas, usuário e base do volume comum.

Continuando o exemplo, tem-se a associação apresentada na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Setores Interferentes dos Pontos de Acesso.

PA Interferentes	Coordenadas [m]	Número do Setor Interferente do PA
PA_3	(9, 681, 5)	2
PA_8	(147, 819, 5)	2
PA_25	(396, 819, 5)	4
PA_29	(534, 681, 5)	4
PA_30	(534, 957, 5)	4

Na representação do número do setor interferente da Tabela 5.7, tem-se a seguinte associação (setor, azimute): (1,0°), (2, 90°), (3, 180°), (4, 270°).

5.2.7 Cálculo da Potência Desejada no Receptor

O cálculo da potência desejada no receptor é realizado por intermédio da fórmula de Friis:

$$P_R = P_t + G_t + G_r - l_e - l_g - l_c \quad [dBm] \quad (5.2)$$

onde: P_R é a potência desejada na recepção.

P_t é a potência transmitida.

G_t e G_r são os ganhos das antena transmissora e receptora, respectivamente.

l_e é a perda de espaço livre.

l_g é a atenuação mediana devida aos gases atmosféricos.

l_c é a atenuação devida à chuva, correspondente à taxa de precipitação adotada.

- Cálculo de perda por espaço livre

O cálculo de l_e foi descrito na equação (2.1):

$$l_e = 92.4 + 20 \log f(GHz) + 20 \log d(km) \quad [dB]$$

$$l_e = 92.4 + 20 \log (30) + 20 \log (0.1334)$$

$$l_e = 104.45 \text{ dB}$$

- Cálculo de atenuação por gases atmosféricos

As perdas medianas l_g devidas aos gases atmosféricos são calculadas pela equação (3.7):

$$l_g = \gamma d = (\gamma_o + \gamma_w)d \quad [dB]$$

onde γ_o e γ_w são as atenuações específicas para o oxigênio e o vapor d'água, respectivamente, e d é o comprimento do enlace.

No presente caso, a equação (3.8) fornece 0.0191 dB/km para a atenuação específica devida ao oxigênio e a equação (3.15) fornece 0.0750 dB/km para a atenuação específica devida ao vapor d'água. Calculando a atenuação por gases atmosféricos por intermédio da equação (3.7) para a distância já calculada na seção 5.2.4, tem-se:

$$l_g = (0.0191 + 0.0750) 0.1334 \text{ [dB]}$$

$$l_g = \mathbf{0.0125 \text{ dB}}$$

Observa-se que, para a frequência de 30 GHz, a atenuação devida a gases atmosféricos é mínima, devida às curtas distâncias existentes entre um receptor e um ponto de acesso.

- Cálculo de atenuação por chuva

Como os percursos de interesse são muito curtos, pode-se supor que a taxa de precipitação é uniforme ao longo dos mesmos. Aplicando a equação (3.19), a perda devida à chuva l_c correspondente à taxa de precipitação de 75 mm/h é:

$$l_c = k R^\alpha d \text{ [dB]}$$

Para a frequência de 30 GHz e polarização vertical, obtêm-se os valores $k=0.22910$ e $\alpha=0.91290$. Substituindo na equação acima:

$$l_c = 0.22910 (75)^{0.91290} 0.1334$$

$$l_c = \mathbf{1.5738 \text{ dB}}$$

Portanto, a potência desejada no receptor, usando a equação (5.2), é igual a:

$$P_R = P_t + G_t + G_r - l_e - l_g - l_c \text{ [dBm]}$$

$$P_R = \mathbf{30\text{dbm} + 24\text{dBm} + 2\text{dBm} - 104.45\text{dB} - 0.01 \text{ dB} - 1.57 \text{ dB}}$$

$$P_R = -50.03 \text{ dBm}$$

5.2.8 Cálculo da Potência Interferente no Receptor

Para o cálculo da potência interferente no receptor, será aplicado o método baseado no radar biestático para frequências na faixa de ondas milimétricas, já descrito na equação (4.2) do capítulo 4.

$$P_i = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \frac{G_t G_r \eta A V}{r_i^2 r_r^2} \quad [\text{dBm}]$$

5.2.8.1 Cálculo da seção reta de espalhamento

Para o cálculo da seção reta de espalhamento, foi usada a expressão (4.3):

$$\eta_R = \frac{2\pi^5}{3\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 Z_R \quad \left[\frac{m^2}{m^3} \right]$$

- Cálculo do índice de refração

Para determinar o índice de refração, foram usadas as equações (4.12) a (4.14). Substituindo os valores da temperatura $t = 25^\circ\text{C}$ e a frequência de operação $f = 30 \text{ GHz}$, tem-se:

$$\epsilon_s = 78.54[1.0 - 4.579 \times 10^{-3}(25 - 25.0) + 1.19 \times 10^{-5}(25 - 25.0)^2 - 2.8 \times 10^{-3}(25 - 25.0)^3] = 78.54$$

$$\epsilon_\infty = 5.27137 + 0.0216474 (25) - 0.00131198 (25)^2 = 4.9926$$

$$\lambda_s = 0.00033836 \exp\left(\frac{2513.98}{(25 + 273)}\right) = 1.5601$$

Substituindo estes resultados nas equações (4.10) e (4.11):

$$\epsilon' = 4.9926 + \frac{(78.54 - 4.9926)}{\left(1 + \left(\frac{1.5601}{1.0}\right)^2\right)} = 26.4098$$

$$\epsilon'' = \frac{(78.54 - 4.9926) \left(\frac{1.5601}{1}\right)}{\left(1 + \left(\frac{1.5601}{1}\right)^2\right)} = 33.4138$$

Portanto, as equações (4.7) e (4.8) fornecem o valor para o índice de refração complexo m :

$$n_r = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\sqrt{\epsilon' + \epsilon''} + \epsilon'} = 5.8737$$

$$n_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\sqrt{\epsilon' + \epsilon''} - \epsilon'} = 2.8444$$

$$\mathbf{m} = (n_r + i n_i) = \mathbf{5.8737 + 2.8444 i}$$

- Cálculo da refletividade do radar

Para a refletividade do radar, foi usado o resultado obtido a partir da distribuição proposta por De Wolf [38], conforme indicado no desenvolvimento da seção 4.1.1.3 segundo a expressão (4.16):

$$Z = 3.39953 \times 10^{-16} R^{1.46298} \left[\frac{\text{m}^6}{\text{m}^3} \right]$$

Substituindo na equação da seção reta de espalhamento (4.3), obtém-se:

$$\eta_R = \frac{2\pi^5}{3 (100)^4} \left| \frac{(5.8737 + 2.8444 i)^2 - 1}{(5.8737 + 2.8444 i)^2 + 1} \right| 3.39953 \times 10^{-16} R^{1.46298}$$

$$\eta_R = \mathbf{0.0035} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{m}^3} \right]$$

Para calcular $\eta = \eta_R/S$, será utilizada a expressão (4.5). Assim, o fator S foi calculado para cada um dos casos apresentados na Tabela 5.8. O ângulo de espalhamento φ , formado entre as direções ao transmissor interferente e ao receptor, observadas a partir do centro do volume comum, foi descrito na Figura 4.1.

Tabela 5.8: Resultados dos ângulos e as seções retas de espalhamento.

PA Interferente	Coordenadas [m]	Ângulo de Espalhamento (°)	Fator S (linear)	Seção reta de espalhamento (η) [$\frac{m^2}{m^3}$]
PA_3	(9, 681, 5)	89.98	2.3155	$(1.5115) \times 10^{-3}$
PA_8	(147, 819, 5)	108.27	2.4768	$(1.4131) \times 10^{-3}$
PA_25	(396, 819, 5)	81.23	2.2411	$(1.5617) \times 10^{-3}$
PA_29	(534, 681, 5)	82.81	2.2543	$(1.5525) \times 10^{-3}$
PA_30	(534, 957, 5)	93.66	2.3476	$(1.4909) \times 10^{-3}$

5.2.8.2 Cálculo das distâncias ao volume comum

Em seguida, a ferramenta de simulação determina as distâncias dos centros dos volumes comuns ao usuário e a cada um dos pontos de acesso interferentes. Estas distâncias estão mostradas na Tabela 5.9 para o cenário de Madrid.

Tabela 5.9: Resultados das distâncias entre o Ponto de Acesso interferente, volume comum e usuário.

PA Interferentes	Coordenadas [m]	Distância do PA interferente ao volume comum [m]	Distância do volume comum ao usuário [m]
PA_3	(9, 681, 5)	273.14	123.11
PA_8	(147, 819, 5)	135.29	15.91
PA_25	(396, 819, 5)	114.4	16.90
PA_29	(534, 681, 5)	252.24	111.03
PA_30	(534, 957, 5)	252.97	166.30

5.2.8.3 Cálculo das atenuações por gases atmosféricos e devida à chuva

A Tabela 5.10 mostra os resultados calculados pelas equações (3.7), (3.8) e (3.15), para as atenuações devidas aos gases atmosféricos e à chuva nos enlaces interferentes no cenário de Madrid.

Tabela 5.10: Resultados das atenuações entre o ponto de acesso interferente e o usuário.

PA Interferentes	Coordenadas [m]	Atenuação por gases atmosféricos [dB]	Atenuação pela chuva [dB]
PA_3	(9, 681, 5)	0.03	4.67
PA_8	(147, 819, 5)	0.01	1.78
PA_25	(396, 819, 5)	0.01	1.54
PA_29	(534, 681, 5)	0.03	4.28
PA_30	(534, 957, 5)	0.03	4.94

5.2.8.4 Cálculo do volume comum de espalhamento

Os volumes comuns entre os feixes das antenas do transmissor interferente e o receptor interferido e os ângulos de espalhamento são calculados. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.11. Para o cálculo de volume comum, é muito importante determinar o ângulo de azimute da antena do ponto de acesso, assim como conhecer a largura do feixe de meia potência e a esquina que ele ilumina, mostrada na Figura 5.9. O feixe da antena do ponto de acesso interferente é aproximado por um modelo piramidal de base quadrada. Seu eixo coincide com o original e, nos planos horizontal e vertical, seu ângulo interno coincide com a largura do feixe de meia potência da antena. Esta aproximação define quatro arestas laterais do feixe piramidal. Em seguida, a ferramenta de simulação determina as interseções destas arestas com as duas faixas planas e verticais definidas pelos vértices das esquinas que sejam mais próximas e mais distantes do ponto de acesso interferente. Por exemplo, no caso do ponto de acesso localizado à esquerda da Figura 5.9, a faixa plana mais próxima seria definida pelas arestas verticais que contêm as esquinas E_1 e E_4 . Semelhantemente, a faixa plana mais distante seria definida pelas arestas verticais que contêm as esquinas E_2 e E_3 . O volume comum é definido pelas oito interseções resultantes. Para pontos de acesso muito afastados da esquina, o volume comum é limitado inferiormente pela base formada pelas esquinas E_1 a E_4 , mostrada em vermelho na Figura 5.9. Neste caso, o volume comum é limitado superiormente pelas interseções da face

superior do feixe piramidal com as arestas verticais que contêm as mesmas esquinas.

A partir dos oito vértices do volume comum, pontos intermédios podem ser determinados de modo a subdividi-lo em pequenos poliedros. Determinando os pontos centrais destes poliedros e seus volumes, um cálculo mais preciso da potência espalhada a partir da equação do radar biestático pode ser realizado.

Tabela 5.11: Resultados do cálculo do volume comum.

PA Interferentes	Coordenadas [m]	Volume [m ³]	Ângulo de Espalhamento [°]
PA_3	(9, 681, 5)	14249.20	89.98
PA_8	(147, 819, 5)	10013.34	108.27
PA_25	(396, 819 ,5)	9514.85	81.23
PA_29	(534, 681, 5)	16836.10	82.81
PA_30	(534, 957, 5)	18281.48	93.66

A potência recebida pelo equipamento do usuário associada a cada um dos transmissores interferentes é obtida pela substituição de cada um dos parâmetros já encontrados na equação do radar biestático. A Tabela 5.12 mostra os resultados das potências recebidas pelo equipamento do usuário correspondentes a cada um dos cinco pontos de acesso interferentes.

Tabela 5.12: Resultados do cálculo das potências interferentes.

PA Interferentes	Coordenadas [m]	Potência Interferente [dBm]
PA_3	(9, 681, 5)	-96.56
PA_8	(147, 819, 5)	-73.58
PA_25	(396, 819 ,5)	-72.85
PA_29	(534, 681, 5)	-95.37
PA_30	(534, 957, 5)	-96.10

5.2.9 Cálculo da Relação S/I

A relação S/I é determinada pela diferença entre potência desejada P_r e a potência interferente total P_i produzida pelo conjunto de pontos de acesso que ficam muito próximos ao usuário.

$$\frac{S}{I} = P_r - P_i \text{ [dB]} \quad (5.3)$$

Para o cálculo da potência interferente total P_i , as potências individuais são convertidas em unidades lineares e a soma dos valores resultantes é convertida na unidade original (*dBm*). Para o exemplo, os valores da Tabela 5.12 fornecem $P_i = -70.15$ dBm. Finalmente, a relação S/I entre a potência do sinal desejado e interferente é determinada segundo a expressão (5.3):

$$S/I = -50.03 - (-70.15) \text{ [dB]}$$

$$S/I = 20.12 \text{ [dB]}$$

5.3 Análise dos Resultados

Nesta seção, serão apresentados os resultados da aplicação da ferramenta de simulação aos cenários, usuários localizados aleatoriamente e pontos de acesso já descritos. Para cada cenário, os cálculos descritos no fluxograma da Figura 5.1 e detalhados nas seções 5.2.4 a 5.2.9 foram repetidos para cada um dos $M = 1000$ usuários. Os resultados serão apresentados nas formas de histogramas e de funções de distribuições cumulativas (CDFs) da relação S/I.

5.3.1 Resultados no Cenário Urbano Regular

As simulações realizadas pela ferramenta de simulação, supondo as condições descritas nas Tabelas 5.1 a 5.3 e utilizando o método proposto, estão descritas na Figura 5.10. Esta Figura mostra o percentual de ocorrência de valores de S/I compreendidos nos intervalos $(2n-1, 2n+1)$, sendo n um inteiro arbitrário.

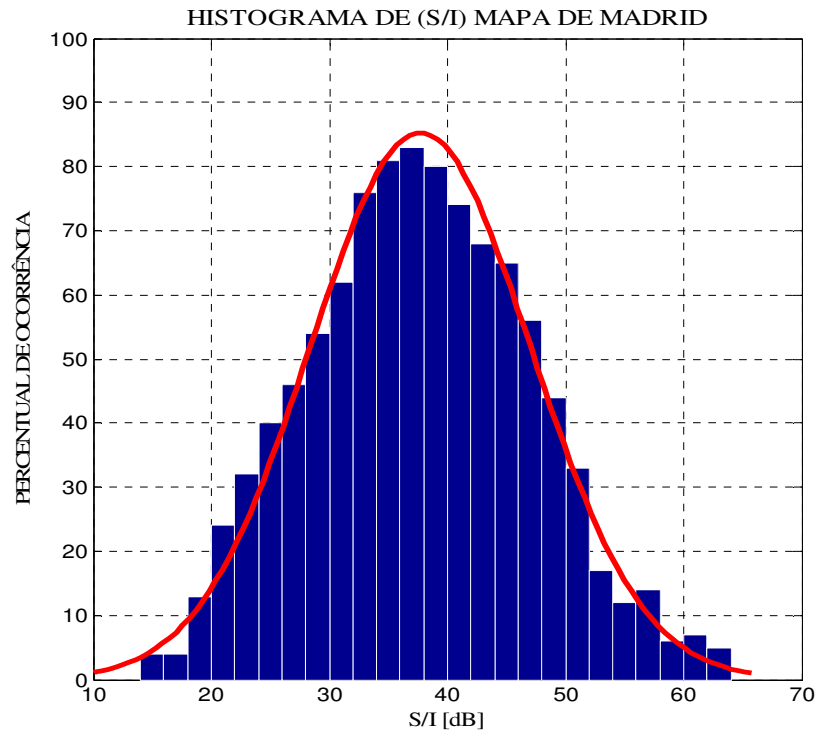


Figura 5.10: Histograma (percentual de ocorrência) de S/I para o mapa de Madrid e ajuste Normal, supondo $f = 30$ GHz.

Para analisar os efeitos de mudanças de parâmetros e cenários, as CDFs serão utilizadas ao longo deste trabalho, como pode ser observado na Figura 5.11. A principal dificuldade na validação dos resultados das presentes simulações é a falta de estudos e medidas correspondentes na faixa de ondas milimétricas nas áreas urbanas na presença de chuva, porque ainda estão em desenvolvimento os sistemas 5G.

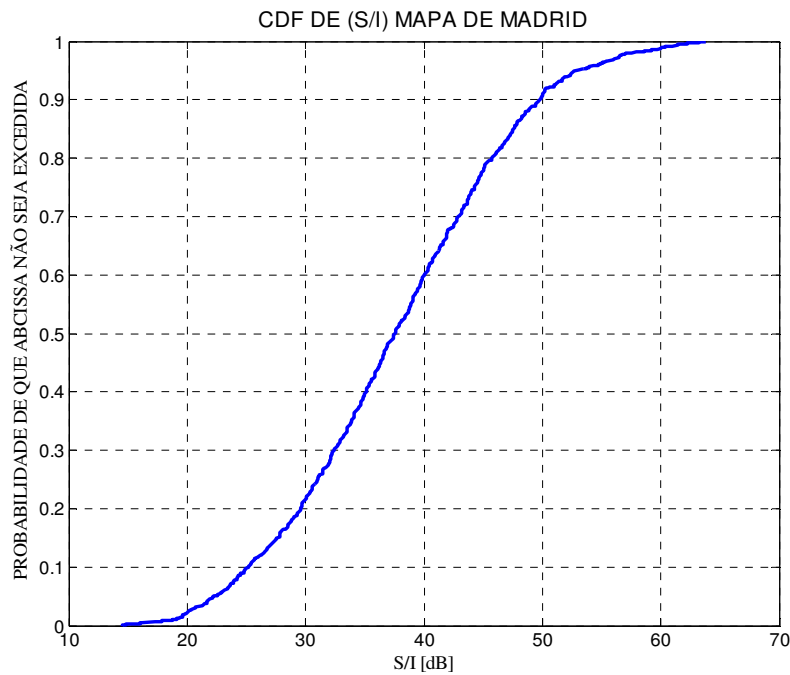


Figura 5.11: CDF para a relação S/I supondo o mapa de Madrid, baseada na frequência de 30 GHz e antenas de pontos de acesso com feixe de meia potência de 10°.

5.3.1.1 Mudando a frequência de operação

Em seguida, a frequência de operação será modificada e os níveis de interferência serão analisados e comparados. As frequências de interesse são as que estão na faixa das ondas milimétricas e provavelmente serão utilizadas nos sistemas 5G: 30 GHz, 38 GHz, 60 GHz ou 70 GHz. Os demais parâmetros de entrada descritos nas Tabelas 5.1 a 5.3 foram mantidos.

A Figura 5.12 apresenta os resultados das simulações com a mesma localização dos usuários e os pontos de acesso, mas variando a frequência. O mesmo formato da Figura 5.10 foi utilizado em cada um dos quatro painéis.

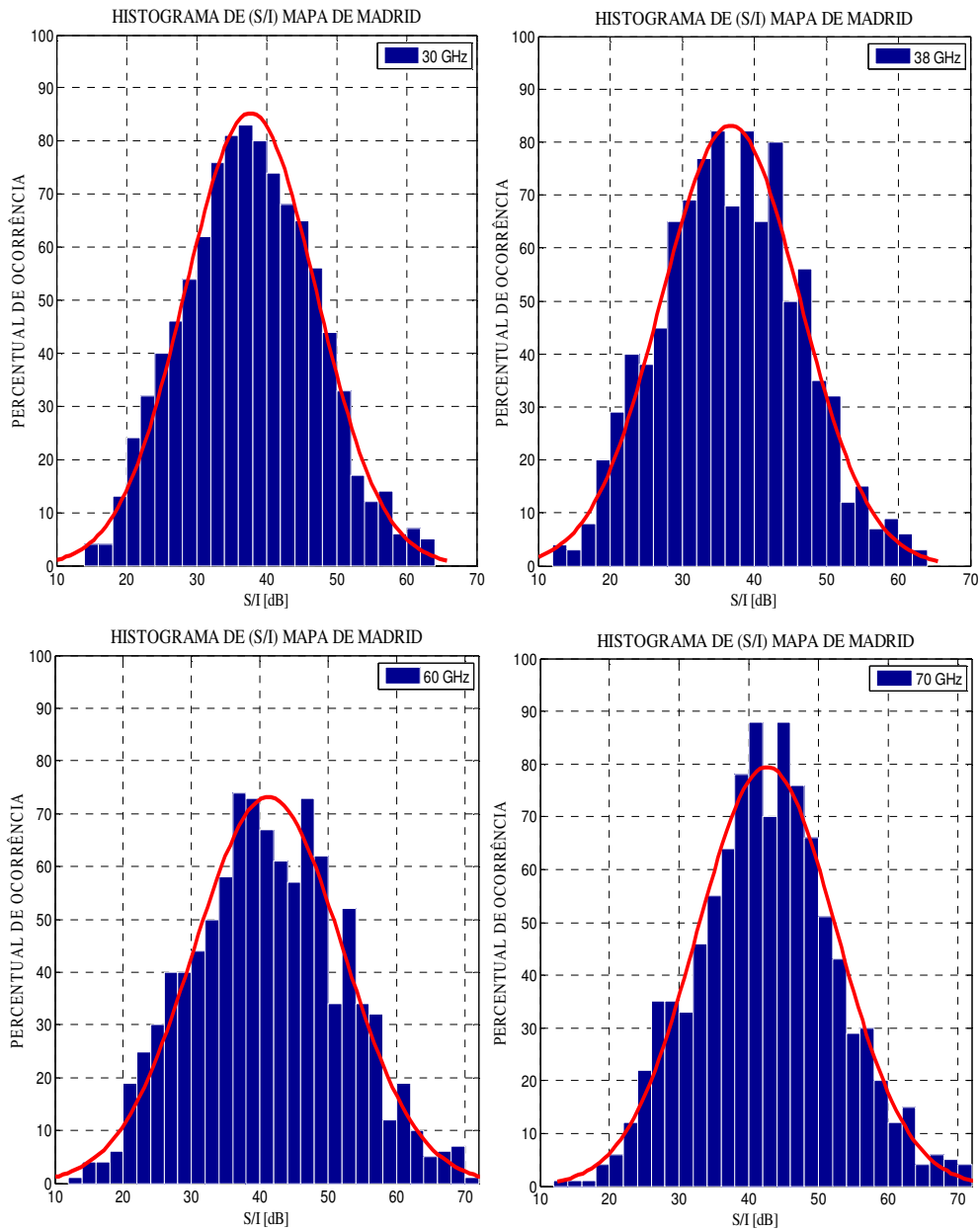


Figura 5.12: Histogramas (percentuais de ocorrência) de S/I para o mapa de Madrid e para as frequências de operação iguais a 30 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 70 GHz, conforme indicado nas legendas correspondentes, mantidos os demais parâmetros de entrada descritos nas Tabelas 5.1 a 5.3.

As simulações realizadas apresentam valores mínimos para a relação S/I iguais a 14.57 dB, 12.86 dB, 13.79 dB e 13.82 dB para as frequências 30 GHz, 38 GHz, 60 GHz ou 70 GHz, respectivamente. Após um decréscimo inicial, há um

aumento discreto. A Tabela 5.13 apresenta diversos indicadores de S/I para o mapa de Madrid e as frequências de 30 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 70 GHz.

Tabela 5.13: Indicadores de S/I para o mapa de Madrid e as frequências iguais a 30 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 70 GHz.

Frequência	S/I Mínimo [dB]	S/I Máximo [dB]	Média	Desvio Padrão
30 GHz	14.57	63.79	37.71	9.35
38 GHz	12.86	63.29	36.73	9.59
60 GHz	13.79	70.35	41.25	10.90
70 GHz	13.82	70.74	42.60	10.03

Para observar a diferença entre as relações S/I obtidas para as diferentes frequências possíveis para sistemas 5G, as CDFs resultantes das simulações realizadas para cada frequência de operação selecionada estão apresentadas na Figura 5.13.

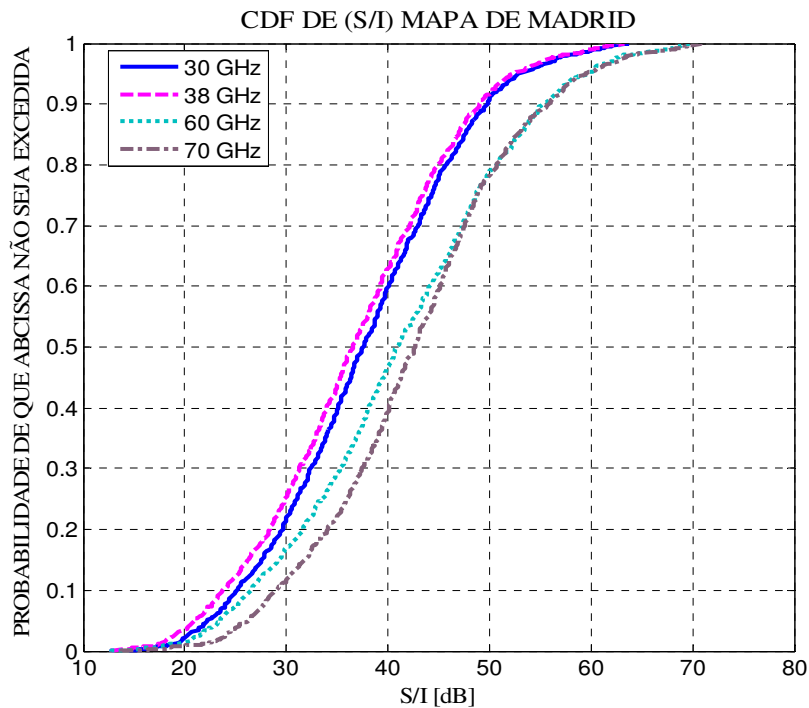


Figura 5.13: CDFs de S/I para o mapa de Madrid e para as frequências de operação iguais a 30 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 70 GHz, mantidos os demais parâmetros de entrada descritos nas Tabelas 5.1 a 5.3.

Seja um valor fixo da relação S/I (por exemplo, 30 dB). A Figura 5.13 mostra que a probabilidade de que este valor não seja excedido é maior para a frequência de 38 GHz e menor para a frequência de 70 GHz (no exemplo, 0.25 e 0.12, respectivamente). Consequentemente, para um dado valor da potência desejada S , a probabilidade de que a potência interferente I seja intensa é maior na frequência de 38 GHz que na frequência de 70 GHz. Esta observação é parcialmente consistente com o fato de que a atenuação devida à chuva aumenta com a frequência na faixa de interesse. Esta tendência não seria modificada pelo espalhamento biestático propriamente dito.

A Figura 5.13 também indica que a que a potência interferente é mais intensa na frequência de 38 GHz que na frequência de 30 GHz, contrariando a explicação apresentado ao final do parágrafo anterior. Na Figura 5.14, os níveis de S/I foram calculados para cinco usuários fixos em função da frequência de operação. Observa-se que esta função apresenta um mínimo na frequência de 41 GHz. Esta é a frequência que causa mais interferência, pela combinação dos efeitos devidos ao espalhamento e a atenuação devidos à chuva, observando que o último depende dos comprimentos dos enlaces.

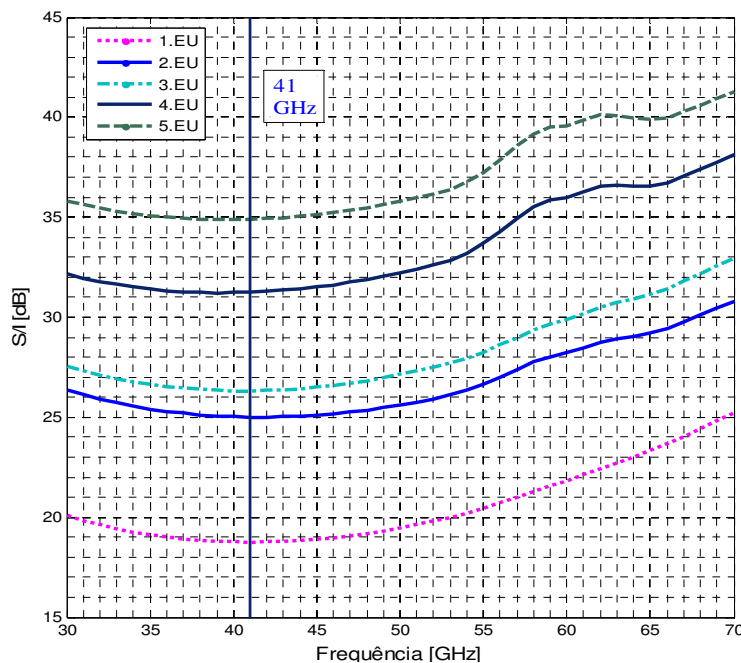


Figura 5.14: Dependência entre a relação entre S/I e a frequência de operação para cinco usuários fixos.

5.3.1.2 Mudando a taxa de precipitação

Agora, a taxa de precipitação será alterada na simulação, mantendo-se os valores dos demais parâmetros de entrada das Tabelas 5.1 a 5.3. Em particular, a frequência de operação foi fixada em 30 GHz. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.15 e 5.16, utilizando os formatos das anteriores, respectivamente.

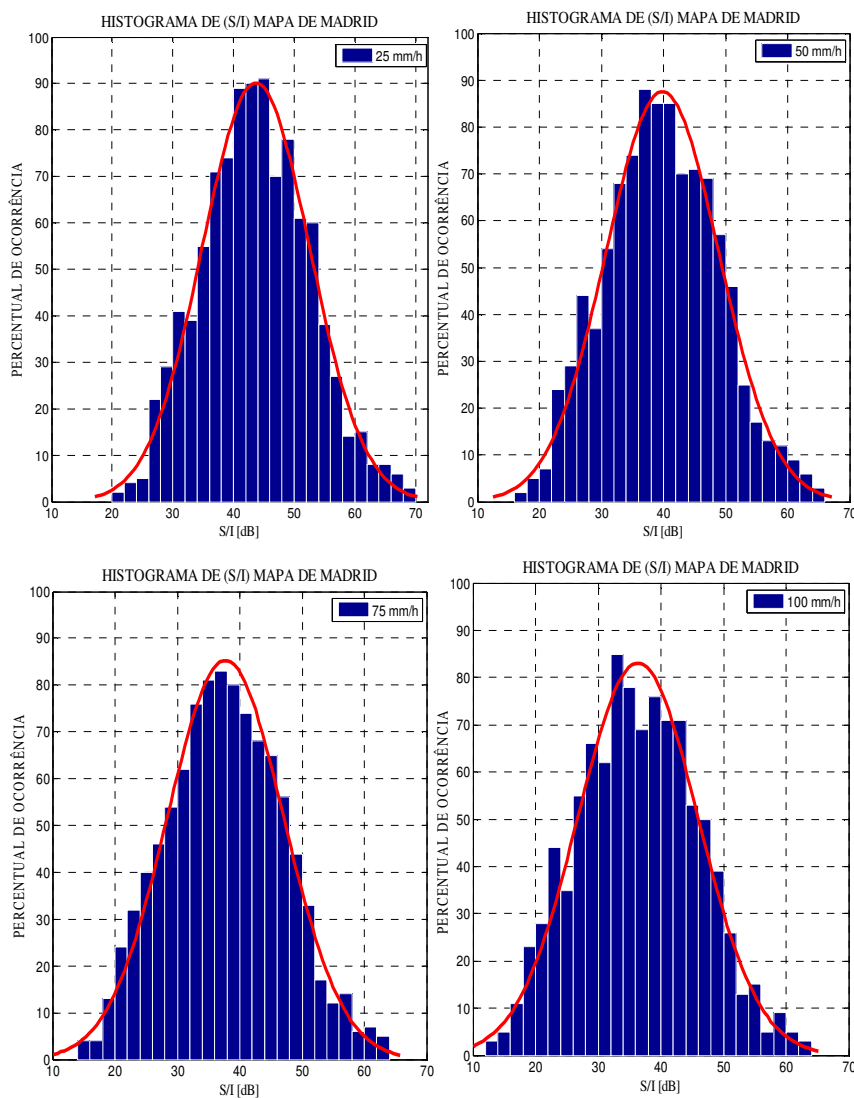


Figura 5.15: Histogramas (percentuais de ocorrência) de S/I para o mapa de Madrid e para as taxas de precipitação iguais a 25 mm/h, 50 mm/h, 75 mm/h, 100 mm/h, conforme indicado nas legendas correspondentes, mantidos os parâmetros de entrada descritos nas Tabelas 5.1 a 5.3, supondo $f = 30$ GHz.

A simulação indica que os valores mínimos da relação S/I são 21.49 dB, 17.12 dB, 14.57 dB e 12.77 dB para as taxas de precipitação adotadas (25 mm/h, 50 mm/h, 75 mm/h e 100 mm/h), respectivamente. A Tabela 5.14 apresenta valores médios decrescentes da relação S/I em função da taxa de precipitação. A Figura 5.16 confirma estes resultados e indica de que forma a relação S/I se degrada (isto é, de que forma a potência interferente aumenta) à medida que a taxa de precipitação também aumenta.

Tabela 5.14: Indicadores de S/I para o mapa de Madrid e as taxas de precipitação iguais a 25 mm/h, 50 mm/h, 75 mm/h e 100 mm/h, supondo $f = 30$ GHz.

Taxa de Precipitação	S/I Mínimo [dB]	S/I Máximo [dB]	Média	Desvio Padrão
25 mm/h	21.49	68.98	43.70	8.85
50 mm/h	17.12	65.50	39.80	9.10
75 mm/h	14.57	63.80	37.71	9.35
100 mm/h	12.77	62.81	36.35	9.60

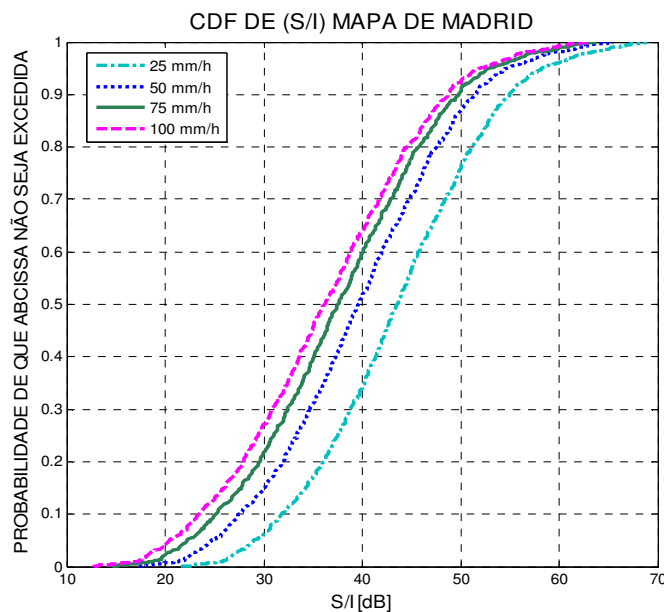


Figura 5.16: CDFs de S/I para o mapa de Madrid, frequência de 30 GHz e as taxas de precipitação iguais a 25 mm/h, 50 mm/h, 75 mm/h, 100 mm/h, mantidos os demais parâmetros de entrada descritos nas Tabelas 5.1 a 5.3.

5.3.1.3 Mudando a distribuição de tamanhos de gota de chuva

Nesta parte da simulação, a distribuição de tamanhos de gotas de chuva foi modificada. Além do modelo proposto por De Wolf [38], foram separadamente adotados os modelos de Marshall e Palmer [36] e da Recomendação ITU-R P.452-16 [4]. Para a distribuição Marshall e Palmer, a relação entre a refletividade Z e a taxa de precipitação R é representada pela expressão:

$$z = 200 R^{1.6}$$

Para a distribuição da recomendação ITU-R P.452-16, tem-se:

$$z = 400 R^{1.4}$$

A Figura 5.17 mostra que a distribuição usada pela Recomendação ITU-R P.452-16 gera os menores níveis de interferência (maiores níveis da relação S/I), ao passo que a distribuição de Marshall e Palmer gera os maiores níveis de interferência, confirmado pelos valores médios mostrados na Tabela 5.15. Estes resultados foram obtidos para $f = 30$ GHz.

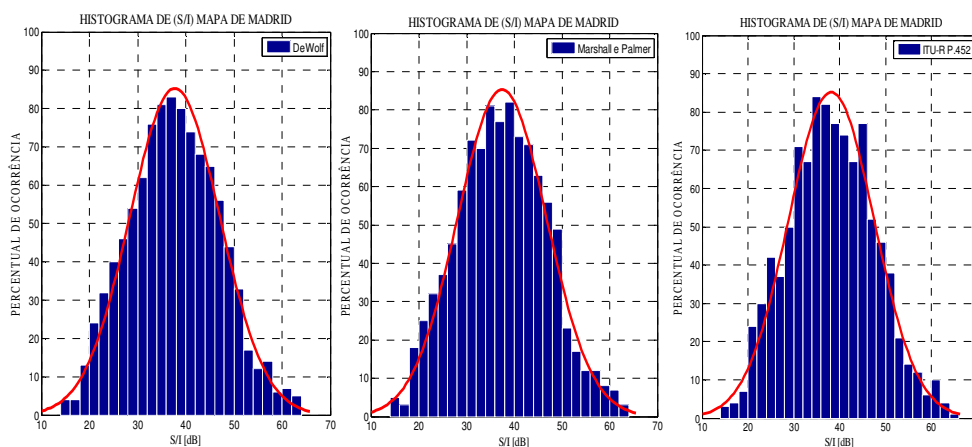


Figura 5.17: Histogramas (percentuais de ocorrência) de S/I para o mapa de Madrid e para as distribuições de tamanho de gota: De Wolf, Marshall e Palmer e ITU-R P.452, conforme indicado nas legendas correspondentes, mantidos os demais parâmetros de entrada descritos nas Tabelas 5.1 a 5.3, supondo $f = 30$ GHz.

Tabela 5.15: Indicadores de S/I para o mapa de Madrid, considerando as distribuições de tamanho de gota: ITU-R P.452-16, De Wolf e Marshall e Palmer, supondo $f = 30$ GHz.

Distribuição do Tamanho da Gota de Chuva	S/I Mínimo [dB]	S/I Máximo [dB]	Média	Desvio Padrão
ITU-R P.452-16	15.04	64.26	38.18	9.35
De Wolf	14.57	63.79	37.71	9.35
Marshall e Palmer	14.30	63.53	37.44	9.35

Entretanto, a Figura 5.18 também mostra que a distribuição cumulativa da relação S/I não é significativamente afetada pelas diferentes distribuições de tamanhos de gota de chuva. Este resultado poderia ser inferido da Figura anterior e da Tabela 5.15. Além de fornecer uma CDF da relação S/I intermediária, foi visto anteriormente que a distribuição proposta por De Wolf [38] corrige problemas associados à distribuição de Marshall e Palmer [36].

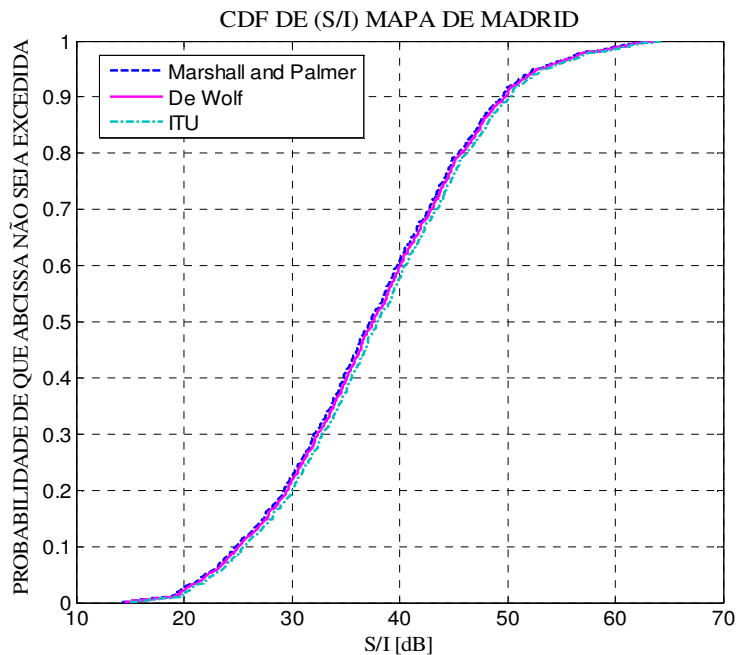


Figura 5.18: CDFs de S/I para o mapa de Madrid e os modelos de distribuição do tamanho da gota como são Marshall e Palmer, De Wolf e ITU-R P.452-16, mantidos os demais parâmetros de entrada descritos nas Tabelas 5.1 a 5.3 e supondo $f = 30$ GHz.

5.3.1.4 Mudando a largura do feixe de meia potência da antena transmissora

Agora, a largura do feixe de meia potência da antena transmissora será alterada na simulação, mantendo-se os valores dos demais parâmetros de entrada das Tabelas 5.1 a 5.3. Em particular, a frequência de operação foi fixada em 30 GHz. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.19 e 5.20.

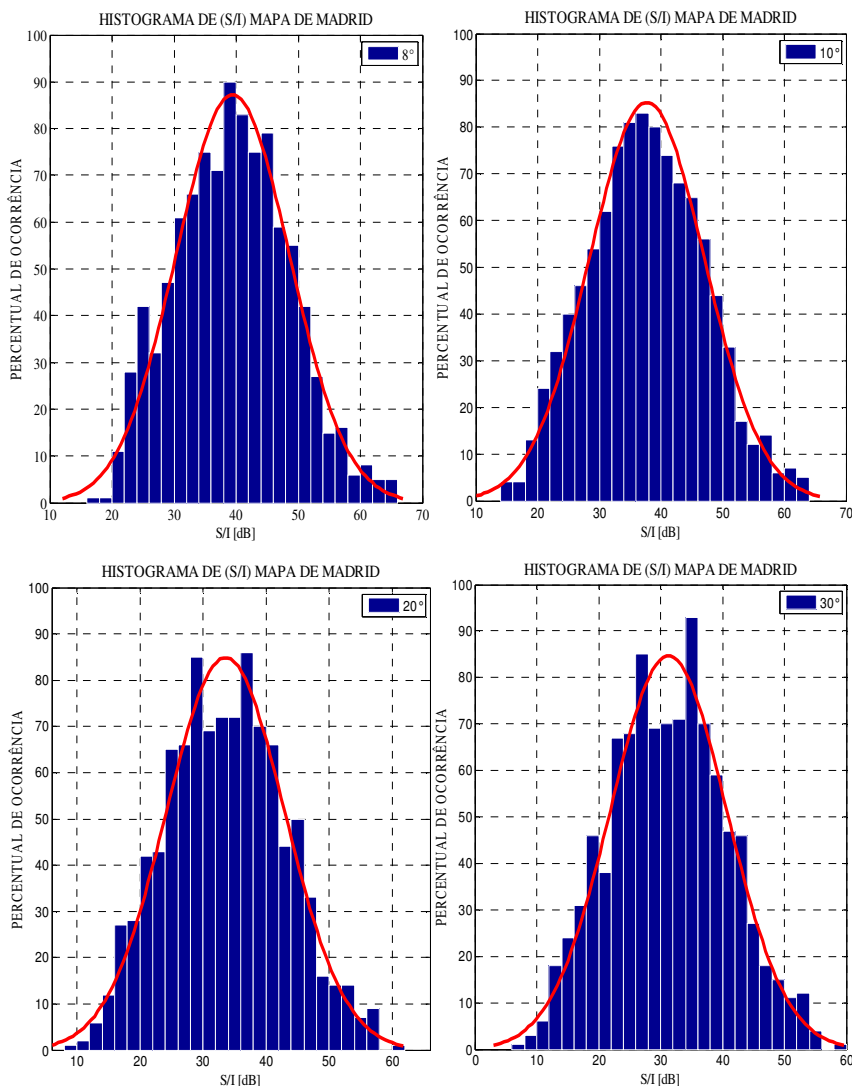


Figura 5.19: Histogramas (percentuais de ocorrência) de S/I para o mapa de Madrid e para as larguras do feixe de média potência da antena interferente: 8°, 10°, 20°, 30°, conforme indicado nas legendas correspondentes, mantidos os parâmetros de entrada descritos nas Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e supondo $f = 30$ GHz.

A Tabela 5.16 mostra a média da distribuição normal, permitindo concluir que, na medida em que se incrementa o ângulo de meia potência do feixe da antena interferente, a potência interferente também cresce. A Figura 5.20 confirma estes resultados e indica de que forma a relação S/I se degrada à medida que o ângulo de meia potência do feixe da antena interferente aumenta.

Tabela 5.16: Resultados de S/I para o mapa de Madrid e os ângulos de meia potência iguais a 8°, 10°, 20° e 30°, supondo $f = 30$ GHz.

Ângulo de Meia Potência (HPBW)	S/I Mínimo [dB]	S/I Máximo [dB]	Média	Desvio Padrão
8°	17.09	65.10	39.46	9.14
10°	14.57	63.79	37.71	9.35
20°	9.50	60.75	33.58	9.40
30°	6.08	58.93	31.27	9.42

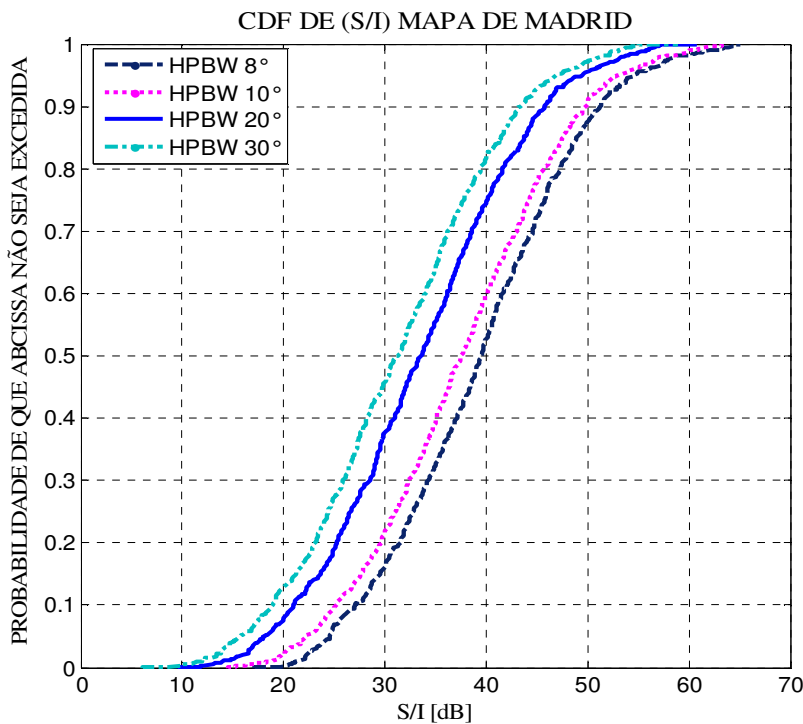


Figura 5.20: CDFs de S/I para o mapa de Madrid e os ângulos de meia potência da antena transmissora iguais a 8°, 10°, 20°, 30°, mantidos os demais parâmetros de entrada descritos nas Tabelas 5.1 a 5.3 e $f = 30$ GHz.

5.3.1.5 Calculando a interferência com linha de visada direta de um ponto de acesso

Nesta seção, foram feitos os mesmos cálculos da relação S/I descritos na seção 5.3.1.1. Entretanto, foi adicionada a interferência causada por um transmissor com linha de visada direta ao usuário. As CDFs resultantes das simulações realizadas para cada frequência de operação selecionada estão apresentadas na Figura 5.21.

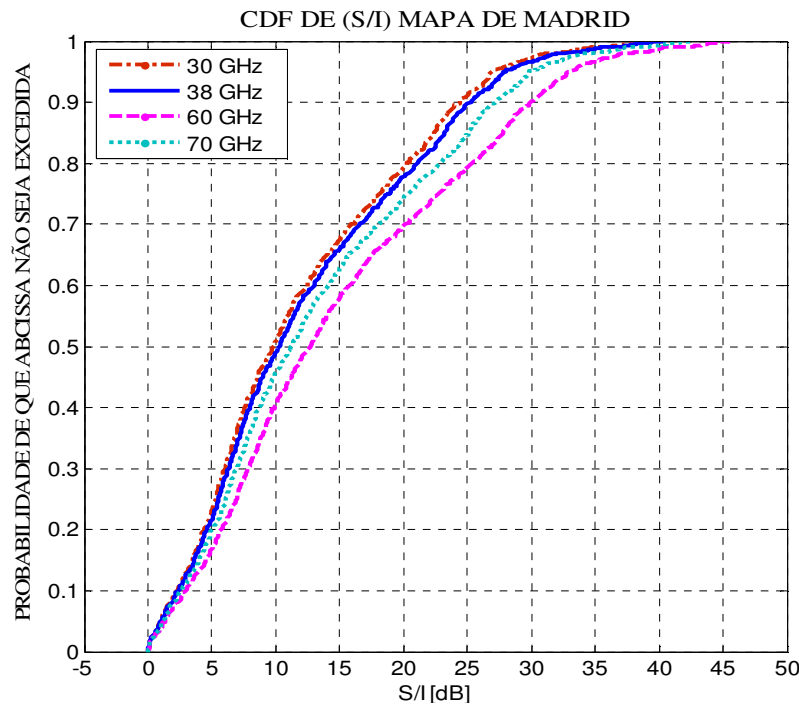


Figura 5.21: CDFs de S/I para o mapa de Madrid e para as frequências de operação iguais a 30 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 70 GHz, considerando a interferência adicional com linha de visada direta ao usuário.

Como se observa na Figura 5.21 e na coluna de valores médios da Tabela 5.17, a frequência de 30 GHz gera mais interferências. Por outro lado, a frequência de operação de 60 GHz é a que menos gera interferência. Isto se deve à atenuação por gases e chuva no lance com linha de visada direta entre o ponto de acesso interferente e o usuário. É particularmente preocupante observar que valores de S/I inferiores a 10 dB ocorrem com altas probabilidades.

Tabela 5.17: Indicadores de S/I para o mapa Madrid e as frequências iguais a 30 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 70 GHz, considerando a interferência adicional com linha de visada direta ao usuário.

Frequência	S/I Mínimo [dB]	S/I Máximo [dB]	Média	Desvio Padrão
30 GHz	0	39.64	11.93	8.53
38 GHz	0	40.54	12.39	8.79
60 GHz	0	45.59	14.96	10.27
70 GHz	0	42.60	13.43	9.39

5.3.1.6 Calculando o efeito do ruído térmico

Para este caso, foram feitos os mesmos cálculos da relação S/I descritos na seção 5.3.1.1. Entretanto, a potência do ruído térmico foi adicionada à interferência causada pela chuva, resultando na relação S/(I+N). As CDFs resultantes das simulações realizadas para as relações S/I e S/(I+N), supondo as temperaturas de 17°C e 40°C estão apresentadas na Figura 5.22. A primeira temperatura é típica. A segunda supõe que a temperatura de ruído do sistema receptor aumentará substancialmente na presença da chuva.

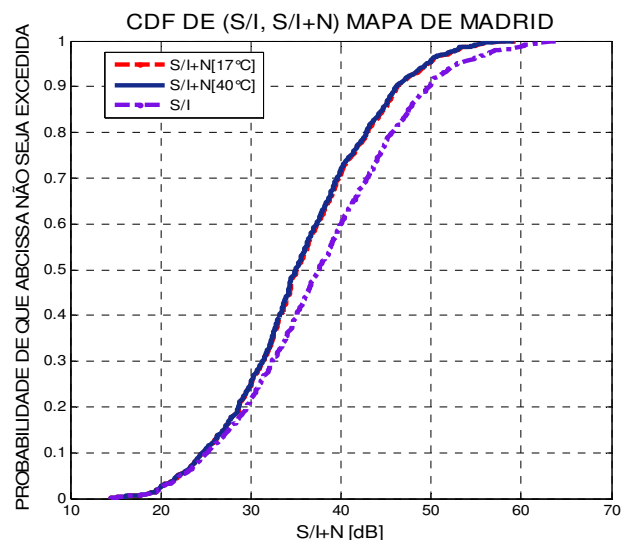


Figura 5.22: CDFs de S/I para o mapa de Madrid e para a frequência de operação igual a 30 GHz, considerando os efeitos da potência do ruído térmico nas temperaturas de 17°C e 40°C.

A Tabela 5.18 mostra a média da distribuição normal, permitindo concluir que, à medida que se incrementa a temperatura de ruído, a relação $S/(I+N)$ se degrada. A Figura 5.22 confirma estes resultados e indica de que forma a relação $S/(I+N)$ se degrada à medida que a temperatura de ruído aumenta. Em particular, observa-se que valores críticos da relação $S/(I+N)$ (inferiores a 15 dB) são definidos apenas pela potência do sinal interferente, tornando irrelevante a potência do ruído térmico.

Tabela 5.18: Indicadores de S/I para o mapa Madrid e para a frequência de operação igual a 30 GHz, considerando os efeitos do ruído térmico.

Frequência	Mínimo [dB]	Máximo [dB]	Média	Desvio Padrão
30 GHz (S/I)	14.57	63.79	37.71	9.35
30 GHz (S/I+N) [17°C]	14.56	59.38	35.65	8.21
30 GHz (S/I+N) [40°C]	14.51	59.31	35.53	8.16

5.3.2 Resultados no Cenário Urbano Irregular

Finalmente, serão apresentados os resultados obtidos pelas simulações realizadas com base no cenário irregular (mapa de Ipanema). As posições dos pontos de acesso e dos usuários no cenário podem ser observadas nas Figuras 5.6 e 5.8. Para analisar os efeitos de diversos parâmetros, foram adotados procedimentos semelhantes aos utilizados na seção 5.3.1. Isto é, o parâmetro sob investigação das Tabelas 5.1 a 5.3 foi modificado repetidamente, enquanto os demais permaneceram inalterados.

5.3.2.1 Mudando a frequência de operação

Mudando a frequência de operação e mantendo os valores dos demais parâmetros iniciais já especificados nas Tabelas 5.1 a 5.3, foram obtidas as CDFs para a relação S/I apresentadas na Figura 5.23. Esta Figura mostra que as curvas têm um comportamento semelhante ao observado para suas correspondentes no caso do cenário regular (ver Figura 5.13). De fato, probabilidade de ocorrência de

interferência mais intensa é maior na faixa de 38 GHz (com um valor médio de 39.27 dB), e menor a frequência de 70 GHz (com um valor médio de 43.10 dB). Estes valores médios, juntamente com outros indicadores para a relação S/I, são apresentados na Tabela 5.19.

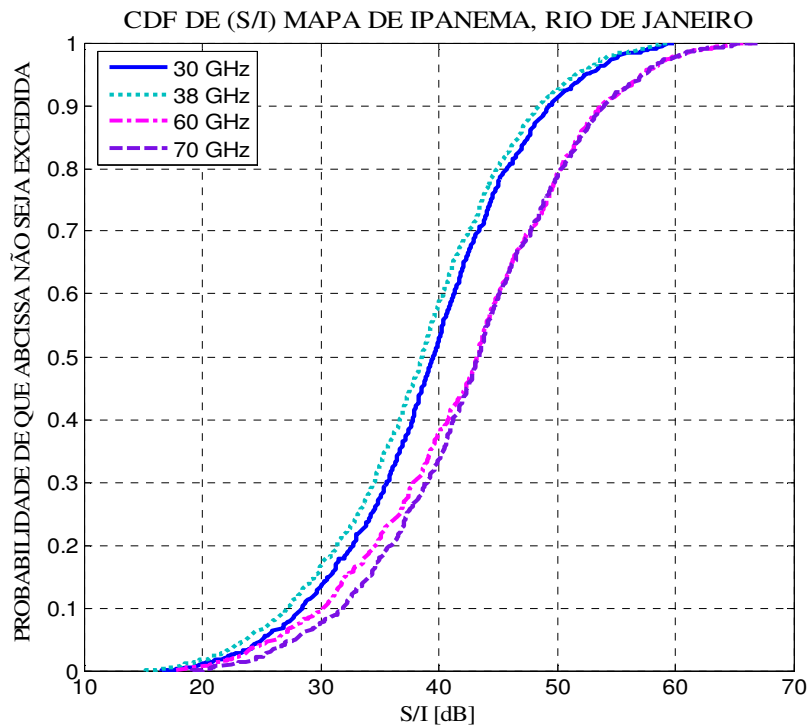


Figura 5.23: CDFs de S/I para o mapa de Ipanema, Rio de Janeiro e para as frequências de operação iguais a 30 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 70 GHz, mantidos os demais parâmetros de entrada descritos nas Tabelas 5.1 a 5.3.

Tabela 5.19: Indicadores de S/I para o mapa de Ipanema, Rio de Janeiro, e as frequências iguais a 30 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 70 GHz.

Frequência	S/I Mínimo [dB]	S/I Máximo [dB]	Média	Desvio Padrão
30 GHz	16.52	59.83	39.27	8.01
38 GHz	15.15	59.33	38.25	8.19
60 GHz	17.69	66.69	42.51	9.21
70 GHz	19.17	67.10	43.10	8.63

Comparando as Tabelas 5.13 e 5.19, observa-se que os valores médios para a relação S/I para a frequência de 38 GHz são iguais a 36.73 dB e 38.25 dB para os mapas de Madrid e Ipanema, respectivamente. A diferença entre os dois valores é devida ao volume de espalhamento e à distância dos pontos de acesso, que é maior no caso de Ipanema.

5.3.2.2 Mudando a taxa de precipitação

Mudando a taxa de precipitação e mantendo os demais parâmetros de entrada já especificados nas Tabelas 5.1 a 5.3, os resultados apresentados na Figura 5.24 foram obtidos para as correspondentes CFDs da relação S/I , para a frequência de 30 GHz.

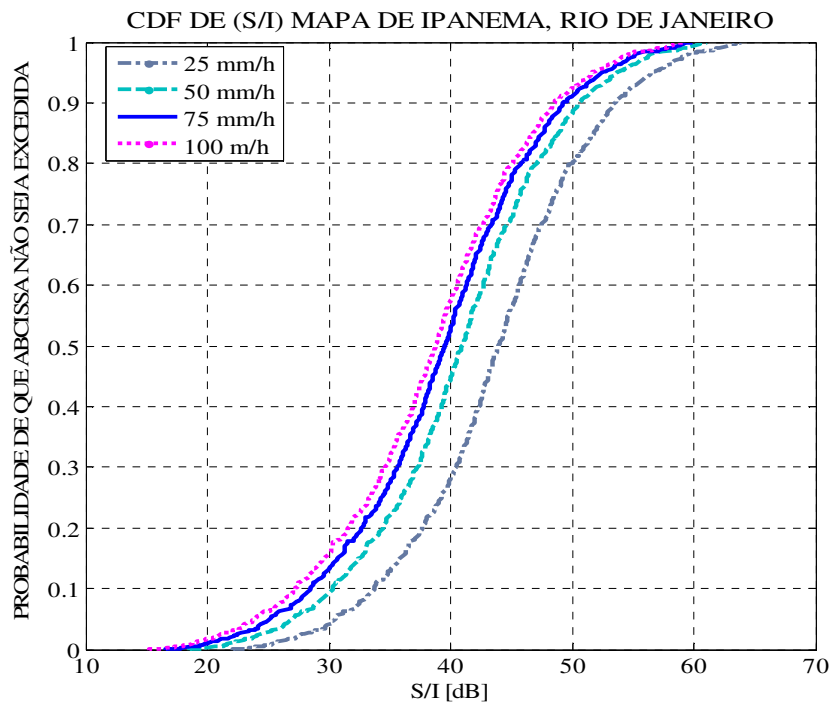


Figura 5.24: CDFs de S/I para o mapa de Ipanema e as taxas de precipitação iguais a 25 mm/h, 50 mm/h, 75 mm/h, 100 mm/h, mantidos os demais parâmetros de entrada descritos nas Tabelas 5.1 a 5.3 e a frequência de 30 GHz.

A Figura 5.24 indica de que forma a relação S/I se degrada à medida que a taxa de precipitação aumenta. De fato, esta Figura mostra que níveis menores de

interferência são obtidos para uma taxa de precipitação igual a 25 mm/h, com o valor mínimo de 22.06 dB para a relação S/I. Ao contrário, níveis maiores são obtidos para 100 mm/h, com o valor mínimo de 15.20 dB para a relação S/I, como mostra a Tabela 5.20.

Tabela 5.20: Resultados de S/I para o mapa de Ipanema, Rio de Janeiro, para as taxas de precipitação iguais a 25 mm/h, 50 mm/h, 75 mm/h e 100 mm/h e a frequência de 30 GHz.

Taxa de Precipitação	S/I Mínimo [dB]	S/I Máximo [dB]	Média	Desvio Padrão
25 mm/h	22.06	63.91	43.85	7.63
50 mm/h	18.48	61.10	40.75	7.82
75 mm/h	16.52	59.85	39.27	8.02
100 mm/h	15.20	59.22	38.39	8.18

Comparando as Tabelas 5.14 e 5.20, observam-se os seguintes valores de S/I mínimos para uma taxa de precipitação de 100 mm/h: 12.77 dB e 15.20 dB para os mapas de Madrid e Ipanema, respectivamente. A diferença existente é devida à seção reta de espalhamento e seu efeito sobre o volume de espalhamento calculado a partir da distribuição do tamanho de gota chuva.

5.3.2.3 Mudando a distribuição de tamanhos de gota de chuva

Nesta parte da simulação, a distribuição de tamanhos de gotas de chuva foi modificada, como mostra a Figura 5.25. Esta Figura mostra que a distribuição usada pela Recomendação ITU-R P.452-16 gera os menores níveis de interferência (maiores níveis da relação S/I), ao passo que a distribuição de Marshall e Palmer gera os maiores níveis de interferência. Estes resultados são também observados nos valores médios da relação S/I mostrados na Tabela 5.21, sendo evidente que as diferenças não são significativas.

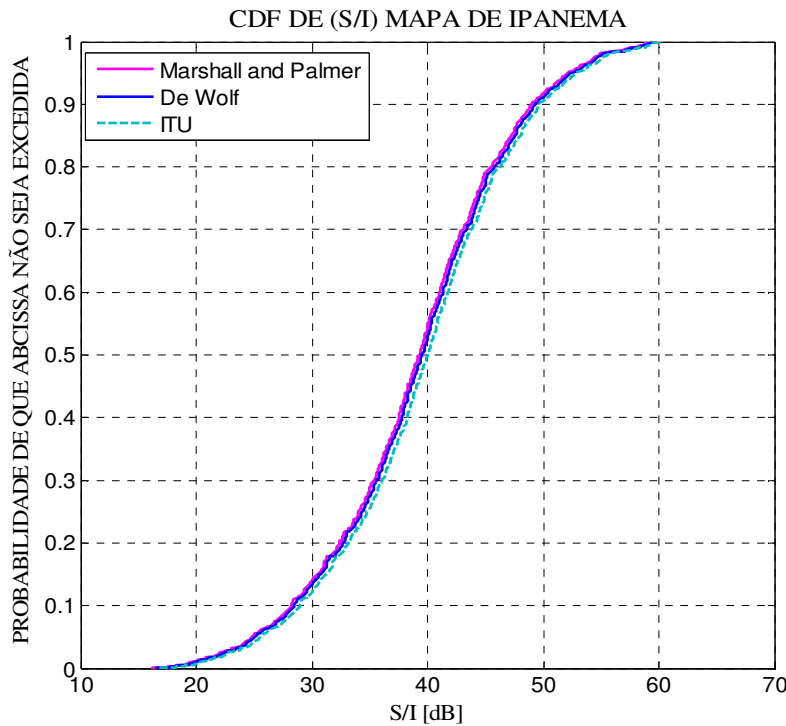


Figura 5.25: CDFs de S/I para o mapa de Ipanema e os modelos de distribuição do tamanho da gota propostas por Marshall e Palmer, De Wolf e ITU-R P.452-16, mantidos os demais parâmetros de entrada descritos nas Tabelas 5.1 a 5.3 e a frequência de 30 GHz.

Tabela 5.21: Indicadores de S/I para o mapa de Ipanema, supondo as distribuições de tamanho de gota: ITU-R P.452-16, De Wolf e Marshall e Palmer e a frequência de 30 GHz.

Distribuição do Tamanho da Gota de Chuva	S/I Mínimo [dB]	S/I Máximo [dB]	Média	Desvio Padrão
ITU-R P.452	16.99	60.32	39.73	8.00
De Wolf	16.52	59.83	39.27	8.02
Marshall e Palmer	16.25	59.59	38.99	8.01

Comparando as Tabelas 5.15 e 5.21, observam-se os seguintes valores de S/I mínimos para uma distribuição Marshall e Palmer: 14.30 dB e 16.25 dB para os mapas de Madrid e Ipanema, respectivamente. A diferença existente é devida à seção reta de espalhamento e seu efeito sobre volume de espalhamento.

5.3.2.4 Mudando a largura do feixe de meia potência da antena transmissora

Nesta seção, serão apresentados os resultados da simulação do efeito da largura do feixe de meia potência da antena interferente na CDF da relação S/I. Estes resultados estão apresentados na Figura 5.26.

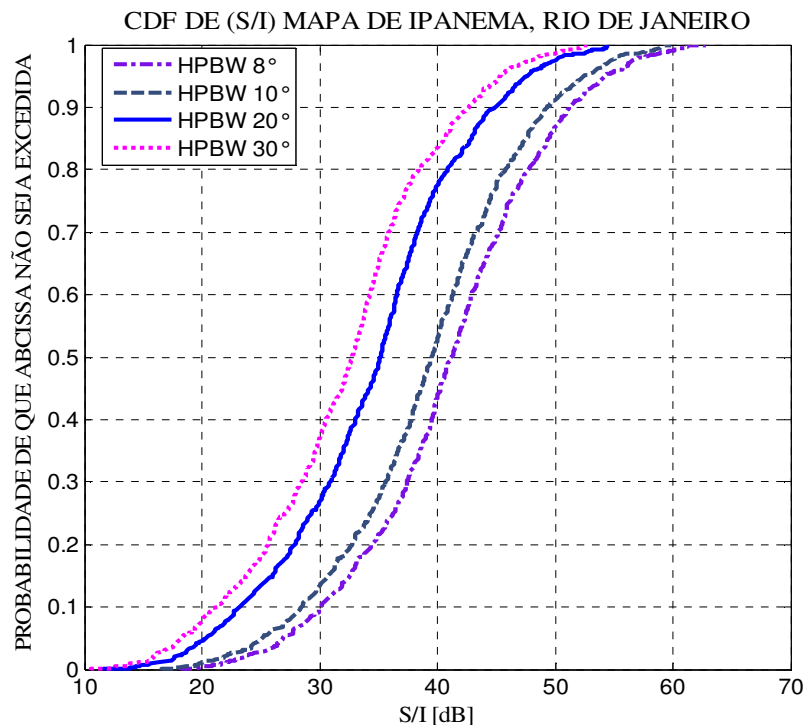


Figura 5.26: CDFs de S/I para o mapa de Ipanema, Rio de Janeiro, considerando os ângulos de meia potência da antena transmissora iguais a 8°, 10°, 20°, 30°, mantidos os demais parâmetros de entrada descritos nas Tabelas 5.1 a 5.3 e a frequência de 30 GHz.

A Figura 5.26 mostra que, como esperado, a intensidade da interferência cocanal aumenta significativamente com a largura do feixe de meia potência da antena interferente. A Tabela 5.22 mostra a média da distribuição normal ajustada aos resultados da simulação. Os valores apresentados também permitem concluir que a potência interferente aumenta com o ângulo de meia potência do feixe da antena interferente.

Tabela 5.22: Indicadores de S/I para o mapa de Ipanema, Rio de Janeiro, considerando ângulos de meia potência iguais a 8°, 10°, 20°, 30° e a frequência de 30 GHz.

Ângulo de Meia Potência (HPBW)	S/I Mínimo [dB]	S/I Máximo [dB]	Média	Desvio Padrão
8°	18.15	62.80	41.07	8.06
10°	16.52	59.86	39.27	8.02
20 °	11.60	54.66	34.50	8.01
30 °	10.54	52.72	32.23	7.92

Comparando as Tabelas 5.16 e 5.22, observam-se os seguintes valores de S/I mínimo para um ângulo de meia potência de 10°: 14.57 dB e 16.52 dB para o mapa de Madrid e para o mapa de Ipanema, respectivamente. A diferença existente é devida ao volume de espalhamento que existe entre a interseção dos feixes e as esquinas das ruas.