

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CARACTERIZAÇÃO E CAPACIDADE DE CANAIS SEM FIO
ENTRE PLATAFORMA HAPS E RECEPTOR TERRESTRE**

Raquel Mendonça Gonçalves

Brasília, Julho de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CARACTERIZAÇÃO E CAPACIDADE DE CANAIS SEM FIO ENTRE
PLATAFORMA HAPS E RECEPTOR TERRESTRE**

RAQUEL MENDONÇA GONÇALVES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

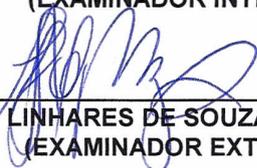
APROVADA POR:



**UGO SILVA DIAS, Dr., ENE/UNB
(ORIENTADOR)**



**RAFAEL TIMÓTEO DE SOUSA JÚNIOR, Dr., ENE/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)**



**AGOSTINHO LINHARES DE SOUZA FILHO, Dr., ANATEL
(EXAMINADOR EXTERNO)**

Brasília, 31 de julho de 2018.

Dedicatória

Dedico este trabalho a Deus, que tem cuidado de cada passo que dou ao longo do caminho.

Raquel Mendonça Gonçalves

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela oportunidade de realizar um Mestrado na Universidade de Brasília. Agradeço aos meus pais e ao meu irmão pelo apoio que tenho todos os dias. Agradeço a todos os parentes e amigos que me acompanham e me dão suporte. Agradeço ao Professor Ugo Silva Dias pela orientação e ensinamentos. Por fim, agradeço ao Vitor Carazza, seu apoio foi fundamental para a conclusão deste desafio.

Raquel Mendonça Gonçalves

RESUMO

Na busca por meios alternativos para prover a comunicação, as plataformas HAPs (do inglês *High Altitude Platforms*) são uma opção para complementar o fornecimento de serviço de comunicação sem fio. Essas plataformas foram concebidas para corresponder à ideia de posicionar um objeto transmissor voando a altitudes próximas ao espaço e estabelecendo enlaces de comunicação com objetos receptores localizados na Terra. Como toda nova tecnologia, o uso de HAPs, por mais que seja promissor, envolve desafios e riscos. Seu uso é pauta de diversos estudos e testes que verificam se a ideia é viável tecnicamente e financeiramente.

Devido aos avanços nos meios de comunicação que utilizam as altitudes próximas ao espaço, é preciso compreender melhor a influência da chuva, das nuvens e dos gases atmosféricos no nível do sinal, e ainda verificar a viabilidade dessa forma de comunicação em território brasileiro. O presente trabalho traz ajustes no modelo de perda de percurso no espaço livre para considerar os principais efeitos climáticos no enlace entre um receptor na terra e uma plataforma HAPs em algumas cidades do Brasil. Além disso, é realizado também um estudo de capacidade do canal para este tipo de comunicação, caracterizando a capacidade de Shannon e a capacidade ergódica para o modelo κ - μ Sombreado em cenários com e sem diversidade espacial. Ao final, é mostrado que os efeitos climáticos alteram consideravelmente a atenuação do sinal, e, a depender das características de desvanecimento do canal, a capacidade ergódica indica as possíveis distâncias de rádio nas quais a comunicação se torna inviável.

Foi concluído, então, que o efeito do multipercurso é o que mais influencia nas variações da capacidade, as características de linha de visada são significantes para a capacidade quando o multipercurso é prejudicial (μ baixo) e, por último, o sombreado possui efeito identificável apenas quando há mais linha de visada (κ alto). Por fim, nos cenários de diversidade, foi possível observar que o emprego desta técnica melhora os resultados de capacidade quando há mais multipercurso e/ou pouca linha de visada e, além disso, mitiga os efeitos do sombreado no desempenho do canal.

ABSTRACT

In the search for alternative means to provide communication, HAPs (High Altitude Platforms) platforms are an option to complement the provision of wireless communication service. These platforms are designed to match the idea of positioning a transmitter object by flying at altitudes near space and establishing communication links with receiving objects located on Earth. Like all new technology, the use of HAPs, however promising, involves challenges and risks. Its use is the guideline of several studies and tests that verify if the idea is feasible technically and financially.

Due to these advances in near space vehicle communication, it is necessary to comprehend the influence of rain, clouds and atmospheric gases at the signal level, and also verify the viability of this form of communication in Brazilian territory. The present project brings adjustments in the free space pathloss model to consider these climatic effects in the link between a receiver on the ground and a HAPs platform in some cities of Brazil. In addition, the channel capacity is also verified for this communication link, characterizing the Shannon capacity and the ergodic capacity for the model κ - μ Shadowed in scenarios with and without spatial diversity. At the end, it is shown that climate change will considerably alter signal attenuation, and, depending on channel fading characteristics, the ergodic capacity indicates the possible radio distances at which communication becomes impracticable.

It was concluded, then, that the effect of multipath is the one that most influences the variations of the capacity, line-of-sight characteristics are significant for capacity when the multipath is detrimental (lower μ) and, finally, the shadowing has identifiable effect only when there is more line-of-sight (higher κ). Finally, in the diversity scenarios, it was possible to observe that the use of this technique improves the capacity results when there is more multipath and/or less line-of-sight and, in addition, it mitigates the effects of the shadowing in the performance of the channel.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	3
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	4
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
2	CONCEITOS BÁSICOS E MODELO DO SISTEMA	6
2.1	SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO HAPS	6
2.2	PERDA DE PERCURSO NO ESPAÇO LIVRE	7
2.3	CARACTERIZAÇÃO DA ATENUAÇÃO POR EFEITOS CLIMÁTICOS E ATMOSFÉRICOS	8
2.3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ATENUAÇÃO POR CHUVA	8
2.3.2	CARACTERIZAÇÃO DA ATENUAÇÃO POR NUVENS	11
2.3.3	CARACTERIZAÇÃO DA ATENUAÇÃO POR ABSORÇÃO GASOSA	13
2.4	CAPACIDADE DO CANAL	17
2.4.1	COMPONENTES DE UM SINAL DE COMUNICAÇÃO	17
2.4.2	CAPACIDADE DE SHANNON	17
2.4.3	CAPACIDADE ERGÓDICA	18
2.5	DIVERSIDADE	21
2.5.1	TÉCNICAS DE DIVERSIDADE	21
2.5.2	DIVERSIDADE APLICADA NO MODELO κ - μ SOMBREADO	22
2.6	CONCLUSÃO	23
3	ANÁLISES E RESULTADOS	24
3.1	CENÁRIO DO SISTEMA	24
3.2	ATENUAÇÃO POR CHUVA	26
3.3	ATENUAÇÃO POR NUVENS	32
3.4	ATENUAÇÃO POR ABSORÇÃO GASOSA	34
3.5	AJUSTE NO MODELO DE PERDA DE PERCURSO	37
3.5.1	RESULTADO DA PERDA DE PERCURSO	37
3.5.2	RESULTADO DA POTÊNCIA RECEBIDA	39
3.6	CAPACIDADE DO CANAL	42
3.6.1	CAPACIDADE DE SHANNON	42
3.6.2	CAPACIDADE ERGÓDICA	45

3.7	DIVERSIDADE ESPACIAL	54
3.8	CONCLUSÃO.....	62
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64

LISTA DE FIGURAS

1.1	Exemplo recentes de uso de HAPs: Aquila UAV - Facebook [4].	2
1.2	Exemplo recentes de uso de HAPs: <i>Project Loon</i> - Google [5].	3
2.1	Camadas da Atmosfera e a localização do HAPs	6
2.2	Sistemas baseados em HAPs [2].	7
2.3	Apresentação esquemática do caminho do Espaço-Terra dando os parâmetros para serem inseridos no processo de previsão de atenuação [10].	11
2.4	As três componentes do sinal em propagação [16].	18
3.1	Esquemático do Cenário de Análise.	24
3.2	Localização das Cidades que são objeto de estudo no Google Maps.	26
3.3	Atenuação por chuva com $p = 0,01\%$ em função da distância para Brasília-DF.	27
3.4	Atenuação por chuva com $p = 0,01\%$ em função da distância para Cuiabá-MT.	27
3.5	Atenuação por chuva com $p = 0,01\%$ em função da distância para Curitiba-PR.	28
3.6	Atenuação por chuva com $p = 0,01\%$ em função da distância para Manaus-AM.	28
3.7	Atenuação por chuva com $f = 20GHz$ em função da distância para Brasília-DF.	30
3.8	Atenuação por chuva com $f = 20GHz$ em função da distância para Cuiabá-MT.	30
3.9	Atenuação por chuva com $f = 20GHz$ em função da distância para Curitiba-PR.	31
3.10	Atenuação por chuva com $f = 20GHz$ em função da distância para Manaus-AM.	31
3.11	Atenuação por nuvens em função da distância para Brasília-DF.	32
3.12	Atenuação por nuvens em função da distância para Cuiabá-MT.	33
3.13	Atenuação por nuvens em função da distância para Curitiba-PR.	33
3.14	Atenuação por nuvens em função da distância para Manaus-AM.	34
3.15	Atenuação por absorção gasosa em função da distância para Brasília-DF.	35
3.16	Atenuação por absorção gasosa em função da distância para Cuiabá-MT.	35
3.17	Atenuação por absorção gasosa em função da distância para Curitiba-PR.	36
3.18	Atenuação por absorção gasosa em função da distância para Manaus-AM.	36
3.19	Perda de percurso em função da distância para Brasília-DF.	38
3.20	Perda de percurso em função da distância para Cuiabá-MT.	38
3.21	Perda de percurso em função da distância para Curitiba-PR.	39
3.22	Perda de percurso em função da distância para Manaus-AM.	39
3.23	Potência recebida em função da distância para Brasília-DF.	40
3.24	Potência recebida em função da distância para Cuiabá-MT.	41
3.25	Potência recebida em função da distância para Curitiba-PR.	41

3.26	Potência recebida em função da distância para Manaus-AM.	42
3.27	Capacidade de Shannon em função da distância para Brasília-DF.	43
3.28	Capacidade de Shannon em função da distância para Cuiabá-MT.	43
3.29	Capacidade de Shannon em função da distância para Curitiba-PR.	44
3.30	Capacidade de Shannon em função da distância para Manaus-AM.	44
3.31	Capacidade Ergódica para $\kappa = 2$, $\mu = 1$ e $m = 2$ em função da distância para Manaus-AM.	46
3.32	Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $\kappa = 0.5$ e $m = 1$ em função da distância para Manaus-AM.	47
3.33	Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $\kappa = 0.5$ e $m = 10$ em função da distância para Manaus-AM.	47
3.34	Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $\kappa = 10$ e $m = 1$ em função da distância para Manaus-AM.	48
3.35	Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $\kappa = 10$ e $m = 10$ em função da distância para Manaus-AM.	49
3.36	Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $m = 1$ e $\mu = 0,1$ em função da distância para Manaus-AM.	49
3.37	Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $m = 1$ e $\mu = 3$ em função da distância para Manaus-AM.	50
3.38	Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $m = 10$ e $\mu = 0,1$ em função da distância para Manaus-AM.	51
3.39	Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $m = 10$ e $\mu = 3$ em função da distância para Manaus-AM.	51
3.40	Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $\kappa = 0.5$ e $\mu = 0,1$ em função da distância para Manaus-AM.	52
3.41	Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $\kappa = 0.5$ e $\mu = 3$ em função da distância para Manaus-AM.	53
3.42	Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $\kappa = 10$ e $\mu = 0,1$ em função da distância para Manaus-AM.	53
3.43	Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $\kappa = 10$ e $\mu = 3$ em função da distância para Manaus-AM.	54
3.44	Capacidade Ergódica para $L = 2$, $\kappa = 2$, $m = 2$ e $\mu = 1$ em função da distância para Manaus-AM.	55
3.45	Capacidade Ergódica para $L = 3$, $\kappa = 2$, $m = 2$ e $\mu = 1$ em função da distância para Manaus-AM.	56
3.46	Capacidade Ergódica para $L = 5$, $\kappa = 2$, $m = 2$ e $\mu = 1$ em função da distância para Manaus-AM.	56
3.47	Capacidade Ergódica para $p = 1\%$, $\kappa = 2$, $m = 2$ e $\mu = 1$ em função da distância para Manaus-AM.	57
3.48	Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $\kappa = 0.5$ e $m = 1$ em função da distância para Manaus-AM.	58

3.49	Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $\kappa = 10$ e $m = 1$ em função da distância para Manaus-AM.	58
3.50	Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $\kappa = 10$ e $m = 10$ em função da distância para Manaus-AM.	59
3.51	Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $m = 1$ e $\mu = 0.1$ em função da distância para Manaus-AM.	60
3.52	Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $m = 1$ e $\mu = 3$ em função da distância para Manaus-AM.	60
3.53	Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $m = 10$ e $\mu = 0.1$ em função da distância para Manaus-AM.	61
3.54	Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $\kappa = 0.5$ e $\mu = 0.1$ em função da distância para Manaus-AM.	61
3.55	Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $\kappa = 0.5$ e $\mu = 3$ em função da distância para Manaus-AM.	62
3.56	Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $\kappa = 10$ e $\mu = 0.1$ em função da distância para Manaus-AM.	63
3.57	Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $\kappa = 10$ e $\mu = 3$ em função da distância para Manaus-AM.	63

LISTA DE TABELAS

2.1	Coeficientes para k_V [11].....	10
2.2	Coeficientes para α_V [11]	10
2.3	Dados espectroscópicos para atenuação por oxigênio [15]	15
2.4	Dados espectroscópicos para atenuação por vapor de água [15]	17
2.5	Modelos Clássicos e Generalizados derivados do κ - μ Sombreado [21]	21
3.1	Parâmetros típicos configurados para o Balanceamento do Enlace	25
3.2	Parâmetros principais de cada cidade para Balanceamento do Enlace.....	25

LISTA DE SIGLAS

Siglas

ERB	<i>Estação Rádio Base</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
FSPL	<i>Free Space Path Loss</i>
HAP	<i>High Altitude Platform</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunication</i>
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
LMDS	<i>Local Multipoint Distribution System</i>
LOS	<i>Line Of Sight</i>
MRC	<i>Maximal-Ratio Combiner</i>
PDF	<i>Probability Density Function</i>
SNR	<i>Signal-Noise Ratio</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicles</i>
WRC	<i>World Radiocommunication Conference</i>

Símbolos Gregos

Ω	<i>Segundo Momento</i>
σ	<i>Desvio Padrão</i>
σ^2	<i>Variância</i>
λ	<i>Comprimento de Onda</i>
κ	<i>Parâmetro da componente de linha de visada</i>
μ	<i>Parâmetro dos clusters de multipercurso</i>
$\Gamma(\cdot)$	<i>Função Gama</i>

Símbolos Latinos

P_t	<i>Potência Transmitida</i>
P_r	<i>Potência Recebida</i>
G	<i>Ganho da Antena</i>
r	<i>Distância entre estação rádio base e móvel</i>
f	<i>Frequência da portadora</i>
c	<i>Constante de propagação no espaço livre</i>
R	<i>Distância entre estação rádio base e móvel</i>
h_b	<i>Altura da antena da estação rádio base em relação ao solo</i>
h_m	<i>Altura da antena do móvel em relação ao solo</i>
I_0	<i>Função de Bessel</i>
m	<i>Parâmetro de sombreamento</i>
k	<i>Fator de Rice</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Em um contexto em que a comunicação é essencial para o desenvolvimento humano, a busca por meios alternativos para provê-la é objeto constante da área de pesquisa e desenvolvimento de todos os países. As plataformas HAPs (do inglês, *High Altitude Platforms*) são uma opção para complementar o fornecimento de serviço de comunicação sem fio. Essas plataformas foram concebidas para corresponder à ideia de posicionar um objeto transmissor (aeronaves, balões, dirigíveis e/ou veículos não tripulados) voando a uma certa altitude e estabelecendo enlaces de comunicação com objetos receptores localizados na Terra [1].

O estudo de HAPs surgiu em 1950, juntamente com a invenção dos satélites, sendo continuado nos anos 1990 pelas ESA (do inglês, *European Space Agency*) e ITU (do inglês, *International Telecommunication Union*) por ser um método de comunicação alternativo aos sistemas terrestres e de satélites [1]. Foi inventado a partir das ideias de implementar um novo tipo de satélite como estações transeptoras em uma altura menor na camada da estratosfera. Este objeto então era destinado a flutuar em cerca de 20 km acima do solo. Nesta localização acredita-se que há efeitos insignificantes em termos de velocidade do vento e fatores climáticos para movimento do objeto. Por essa razão, os HAPs atraem muita atenção da comunidade de telecomunicações por servir como método de rede sem fio complementar aos satélites e sistemas terrestres [1].

Essas plataformas têm uma capacidade potencial de atender a um grande número de usuários situados em uma área geográfica terrestre, usando consideravelmente menos infra-estrutura do que uma rede terrestre [2].

As aplicações de telecomunicação mais promissoras dos HAPs são a telefonia celular, os serviços de sistema de distribuição multiponto local (LMDS) de banda larga e o fornecimento de acesso a redes digitais (Internet, ISDN) [3]. A flexibilidade do sistema permite a utilização de HAPs não apenas a transmissão de sinais de telecomunicação, mas também para aplicações de sensoriamento remoto e para a navegação por satélite [3]. As principais vantagens para os futuros serviços que integram os sistemas baseados em HAPs são a eficiência em custos econômicos para a cobertura das regiões rurais e marítimas, a flexibilidade do sistema devido às plataformas, a mobilidade sob

demanda (por exemplo, em situações de emergência) e a possibilidade de atualizar a carga útil da plataforma a fim de reduzir o risco de obsolescência tecnológica experimentada com os satélites tradicionais [3].

Nos últimos anos, foi evidenciado um crescimento nas pesquisas e aplicações de HAPs nas redes de comunicação por ser um método alternativo que abre uma gama de possibilidades para a configuração de redes permanentes ou não [3]. Por exemplo, com HAPs é possível configurar uma rede permanente para cobrir determinada região ou, no caso de eventos e aglomerações, prover serviço de comunicação apenas durante um período. Esses e outros aspectos do HAPs podem aumentar a disponibilidade do serviço de comunicação, atender diferentes demandas e aumentar as oportunidades de negócio.

Neste contexto, observa-se um movimento crescente de estudos e testes com essa tecnologia, inclusive percebe-se o aumento das expectativas com os avanços no uso de HAPs nos investimentos feitos por grandes empresas na implementação dessa forma de comunicação. A exemplo do Facebook e da Google que já realizaram testes práticos com, respectivamente, um veículo aéreo não tripulado (Aquila UAV - Figura 1.1) e um balão (*Project Loon* - Figura 1.2) e têm planos de construir redes sem fio em diversas localidades com o uso dessa tecnologia.



Figura 1.1: Exemplo recentes de uso de HAPs: Aquila UAV - Facebook [4].



Figura 1.2: Exemplo recentes de uso de HAPs: *Project Loon* - Google [5].

1.2 Definição do Problema

Como toda nova tecnologia, o uso de HAPs, por mais que seja promissor, envolve desafios e riscos. Seu uso é pauta de diversos estudos e testes que verificam se a ideia é viável tecnicamente e financeiramente. Ainda que a pesquisa de HAPs exista há um bom tempo, ainda estão em discussão seus aspectos regulatórios e suas condições de operação nos fóruns de comunicação destinados a essa agenda. O que está definido é a região de operação, os HAPs irão utilizar a camada da estratosfera. Ainda que em alguns casos de pesquisa científica essa camada da atmosfera tenha sido alvo de testes anteriormente, tal altitude nunca foi utilizada antes para sistemas de telecomunicação comerciais. Estabelecer um enlace de comunicação em um cenário novo implica em diversos questionamentos acerca de sua viabilidade.

Em seu cenário de aplicação, o sinal do HAPs é influenciado por efeitos de propagação intrínsecos como chuva, nuvens, absorção gasosa e multipercurso. Esses efeitos são dinâmicos, aleatórios e relevantes, o que dificulta apurar com precisão seus impactos na propagação do sinal e demandam um modelo de perda de percurso específico para sua análise.

Outro desafio no estudo dessa tecnologia é modelar o canal de comunicação com um transmissor que fica em constante deslocamento pela estratosfera, seja por movimentos controlados como no caso do veículo aéreo não tripulado ou por influência de correntes de ar. Além disso esse canal de comunicação pode ser ainda mais complexo quando forem acrescentados no planejamento e na implementação da rede aprimoramentos como diversidade espacial.

Considerando tais desafios, é necessário elaborar estudos criteriosos e específicos para compreender o funcionamento dessa tecnologia nos casos e cenários brasileiros.

1.3 Objetivos do Trabalho

Com o intuito de colaborar com os avanços científicos no uso do HAPs, este trabalho visa:

- Caracterizar a influência da chuva conforme modelo da ITU (Rec. ITU-R P.618-12, 2015) na atenuação do sinal de um enlace com HAPs para as cidades de Brasília-DF, Cuiabá-MT, Curitiba-PR e Manaus-AM nas frequências de 10, 15, 20 e 25 GHz;
- Caracterizar a influência de chuvas conforme modelo da ITU (Rec. ITU-R P.618-12, 2015) na atenuação do sinal de um enlace com HAPs para as cidades de Brasília-DF, Cuiabá-MT, Curitiba-PR e Manaus-AM com percentuais p de chuva iguais a 10, 1, 0,1 e 0,01%;
- Caracterizar a influência de nuvens conforme modelo da ITU (Rec. ITU-R P.840-6, 2013) na atenuação do sinal de um enlace com HAPs para as cidades de Brasília-DF, Cuiabá-MT, Curitiba-PR e Manaus-AM nas frequências de 10, 15, 20 e 25 GHz;
- Caracterizar a influência de gases atmosféricos conforme modelo da ITU (Rec. ITU-R P.676-11, 2016) na atenuação do sinal de um enlace com HAPs para as cidades de Brasília-DF, Cuiabá-MT, Curitiba-PR e Manaus-AM nas frequências de 10, 15, 20 e 25 GHz;
- Propor um ajuste de modelo de perda de percurso para o cenário estudado;
- Obter a curva de perda de percurso para as cidades de Brasília-DF, Cuiabá-MT, Curitiba-PR e Manaus-AM no espaço livre;
- Obter as curvas de perda de percurso para as cidades de Brasília-DF, Cuiabá-MT, Curitiba-PR e Manaus-AM com percentuais p de chuva iguais a 10, 1, 0,1 e 0,01%;
- Obter a curva de potência recebida para as cidades de Brasília-DF, Cuiabá-MT, Curitiba-PR e Manaus-AM no espaço livre;
- Obter as curvas de potência recebida para as cidades de Brasília-DF, Cuiabá-MT, Curitiba-PR e Manaus-AM com percentuais p de chuva iguais a 10, 1, 0,1 e 0,01%;
- Obter a capacidade de Shannon para as cidades de Brasília-DF, Cuiabá-MT, Curitiba-PR e Manaus-AM no espaço livre e com percentuais p de chuva iguais a 10, 1, 0,1 e 0,01%;
- Obter a capacidade ergódica por meio do modelo de desvanecimento κ - μ Sombreado para a cidade de Manaus-AM com percentuais p de chuva iguais a 10, 1, 0,1 e 0,01% com e sem cenário de diversidade;
- Obter a capacidade ergódica por meio do modelo de desvanecimento κ - μ Sombreado para a cidade de Manaus-AM no espaço livre e no caso de p igual a 0,1% com diferentes parâmetros de κ , μ e m com e sem cenário de diversidade.

1.4 Estrutura da Dissertação

O Capítulo 2 traz os conceitos básicos necessários para entendimento e execução deste projeto. Será discutido sobre os sistemas de comunicação HAPS; modelo de perda de percurso e potência recebida; modelos para caracterização da atenuação por chuva, nuvens e absorção gasosa; componentes de pequena e larga escala de um sinal de comunicação; modelo de capacidade de Shannon e modelo de capacidade ergódica κ - μ Sombreado com e sem diversidade espacial.

O Capítulo 3 apresenta os resultados das simulações e implementações realizadas. Desde as curvas de atenuação por fenômenos climáticos e atmosféricos até gráficos com a capacidade ergódica para casos de diversidade com base no modelo κ - μ Sombreado.

Por fim, o Capítulo 4 apresenta as conclusões do presente trabalho e sugere possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Conceitos Básicos e Modelo do Sistema

2.1 Sistemas de Comunicação HAPs

O sistema de comunicação baseado em HAPs pode assumir diferentes configurações. O enlace é composto por um ou mais transmissores situados em objetos que flutuam ou voam na estratosfera, dentre as altitudes de 20 e 50 km [6]. A localização do HAPs nas camadas da atmosfera pode ser visualizado na Figura 2.1.

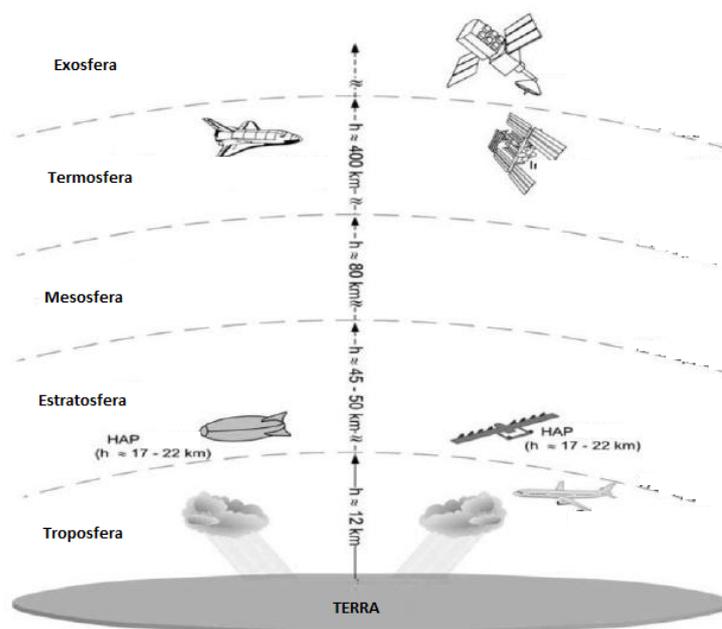


Figura 2.1: Camadas da Atmosfera e a localização do HAPs

Além dos transmissores, há também um ou mais receptores que podem ser fixos ou em deslocamento na superfície terrestre. Esses receptores podem ser dispositivos móveis como aparelhos celulares ou ainda ERB's (Estações Rádio Base) que por sua vez irão distribuir o sinal para os usuários. O enlace é configurado para que tenha linha de visada, ou seja, para que não haja obstáculos entre o transmissor e o receptor. As ilustrações dessas diferentes configurações podem ser

vistas na Figura 2.2.

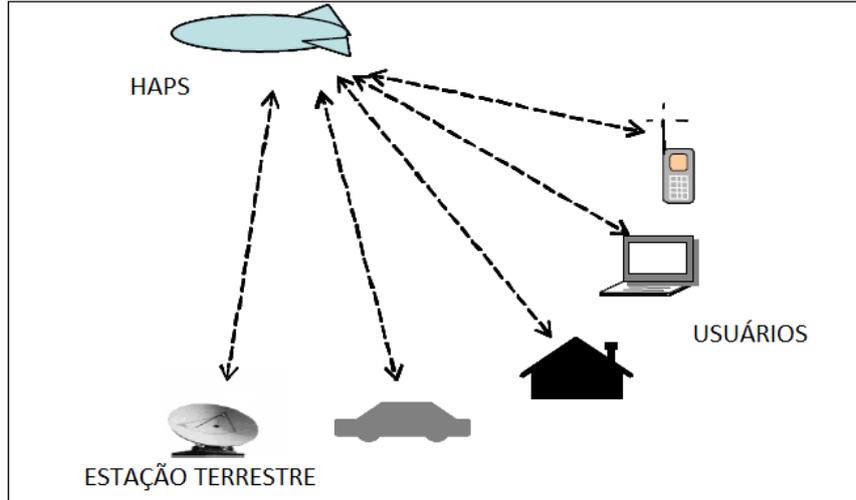


Figura 2.2: Sistemas baseados em HAPs [2].

Vale ressaltar que um dos principais parâmetros do enlace HAPs é a frequência de operação. A União Internacional de Telecomunicações aprovou várias faixas de frequência para a operação de HAPs. Na WRC-97 (do inglês *World Radiocommunication Conference* do ano de 1997), as bandas de 47,2-47,5 GHz e 47,9-48,2 GHz foram alocadas para serviços fixos [7]. A WRC-2000, devido a preocupações com a atenuação por chuvas nessas bandas de frequência do WRC-97, concordou em alocar a faixa de frequência de 18 a 32 GHz para comunicações sem fio de banda larga [6], [8]. Também em 2000, a ITU alocou as bandas de 1885-1980 MHz, 2010-2025 MHz, 2110-2170 MHz e 2110-2160 MHz para a utilização nos sistemas de comunicação de terceira geração [9]. Além dessas bandas de frequência mencionadas anteriormente, na WRC-12 (conferência de 2012), as bandas de 6440-6520 MHz (enlace de descida, *downlink*) e de 6560-6640 MHz (enlace de subida, *uplink*) foram alocadas para serviços fixos [6].

2.2 Perda de Percurso no Espaço Livre

A perda de percurso de um sinal consiste na atenuação ou decaimento da potência ao longo da distância entre transmissor e receptor, que acarretará, em ambiente de espaço livre, na diminuição da potência recebida.

O enlace de comunicação HAPs pode ser configurado em linha de visada. Neste caso, pode-se considerar o modelo de Friis dado por

$$P_r(\text{dBm}) = P_t + G_t + G_r - \text{Loss}, \quad (2.1)$$

em que P_r , P_t , G_t , G_r e Loss representam, respectivamente, potência recebida, potência transmitida, ganho na transmissão, ganho na recepção e atenuação (perdas) no percurso.

A atenuação utilizada no modelo de Friis costuma se basear no modelo de atenuação do espaço

livre (FSPL, do inglês *Free Space Path Loss*) definido pelo IEEE (Std. 145, 1983) e descrito por

$$FSPL(dB) = 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f + 92.44 \quad , \quad (2.2)$$

em que d e f são respectivamente a distância em km entre o transmissor e o receptor e a frequência em GHz do sinal.

Entretanto este modelo de atenuação não leva em consideração os efeitos da chuva, das nuvens, dos gases atmosféricos e outros, de forma que descrever o enlace entre receptor e HAPs apenas com a atenuação do espaço livre pode ser superficial, otimista e distante da realidade. Para complementar o modelo FSPL, este trabalho mostra a implementação de modelos ITU-R para os efeitos de atenuação por chuva, nuvens e absorção gasosa.

2.3 Caracterização da atenuação por efeitos climáticos e atmosféricos

No planejamento de enlaces espaço-terra para sistemas de comunicação (como no caso dos HAPs), vários efeitos sofridos pelo sinal propagado devem ser considerados. Dentre eles os efeitos da atmosfera não ionizada, que são dinâmicos, aleatórios e relevantes em todas as frequências, mas tornam-se críticos acima de 1 GHz e para ângulos de baixa elevação [10]. Como uma forma de modelar os impactos desses efeitos na atenuação do sinal, a ITU desenvolveu modelos que são implementados neste trabalho e descritos a seguir.

2.3.1 Caracterização da Atenuação por Chuva

Em contato com as gotas de chuva, o sinal é absorvido, espalhado e conseqüentemente atenuado, especialmente nas frequências acima de 10 GHz [10]. O modelo da ITU-R mais recente para a atenuação por chuva é composto pelas recomendações ITU-R P.618-12 de 2015 (*Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space Telecommunication system*), ITU-R P.838-3 de 2005 (*Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*), ITU-R P.839-4 de 2013 (*Rain height model for prediction methods*) e ITU-R P.837-6 de 2012 (*Characteristics of precipitation for propagation modeling*), [10] a [13].

Neste caso, a atenuação prevista para o percentual p de chuva excedida igual a 0,01% de um ano médio é definida como

$$A_{0.01}(dB) = r_R L_E \quad , \quad (2.3)$$

em que r_R e L_E são respectivamente a atenuação de chuva específica em (dB/km) e o comprimento de caminho específico (km).

O comprimento de caminho específico é obtido por

$$L_E(km) = L_R v_{0.01} \quad , \quad (2.4)$$

em que $v_{0,01}$ é o fator de ajuste vertical. A variável L_R é obtida a partir da determinação de outra variável, ζ , que por sua vez é descrita por

$$\zeta(\text{graus}) = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_s}{L_G - r_{0,01}} \right) , \quad (2.5)$$

em que h_s é a altitude acima do nível do mar da região estudada.

O parâmetro h_R da Equação 2.4 é a altura da chuva e esta pode ser obtida, conforme a ITU-R P.839-4 de 2013 [12], por meio da seguinte equação

$$h_R(\text{km}) = h_0 + 0.36 , \quad (2.6)$$

em que h_0 é altura isotérmica acima do nível do mar em sua média anual da região estudada em km obtida conforme gráficos e mapas em [12].

O parâmetro L_G é a projeção horizontal do raio que liga o receptor a altura h_R , como pode ser visto na Figura 2.3, e é descrito por

$$L_G(\text{km}) = L_s \cos \theta , \quad (2.7)$$

em que θ é o ângulo de elevação entre o receptor e o transmissor. A variável L_s é o comprimento do caminho inclinado que pode ser obtido, se $\theta \geq 5^\circ$, como

$$L_s(\text{km}) = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} , \quad (2.8)$$

ou, se $\theta < 5^\circ$, como

$$L_s(\text{km}) = \frac{2(h_R - h_s)}{\left(\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right)^{1/2} + \sin \theta} , \quad (2.9)$$

em que R_e é o raio efetivo de curvatura da terra equivalente a 8500 km. Vale ressaltar que, se $h_R - h_s \leq 0$, então a atenuação por chuva para qualquer percentual de tempo será zero e não será necessário incluí-la nos cálculos.

Retornando à Equação 2.5, a variável $r_{0,01}$ corresponde ao fator de redução horizontal para 0,01% do tempo e pode ser obtido por meio de

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38 (1 - e^{-2L_G})} , \quad (2.10)$$

em que f corresponde à frequência de operação do enlace em GHz e γ_R corresponde à atenuação específica que é dada por

$$\gamma_R = k_V (R_{0,01})^{\alpha_V} , \quad (2.11)$$

e, neste caso, $R_{0,01}$ é a taxa de chuva excedida para 0,01% do tempo de um ano médio que é estimada conforme os mapas na ITU-R P.837-6 de 2012 [13], se $R_{0,01}$ é igual a 0 não haverá atenuação por chuva e esta não precisará ser considerada no planejamento. Por sua vez, os coeficientes dependentes da frequência, k_V e α_V são obtidos conforme a ITU-R P.838-3 de 2005 [11] para o

caso da polarização vertical e estão descritos nas Equações 2.12 e 2.13 a seguir.

$$\log_{10} k_V = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k \quad . \quad (2.12)$$

$$\alpha_V = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad . \quad (2.13)$$

Os valores das constantes para a , b , c , m_k , m_α , c_k e c_α são apresentados nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Tabela 2.1: Coeficientes para k_V [11]

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3.80595	0.56934	0.81061	-0.16398	0.63297
2	-3.44965	-0.22911	0.51059	-0.16398	0.63297
3	-0.39902	0.73042	0.11899	-0.16398	0.63297
4	0.50167	1.07319	0.27195	-0.16398	0.63297

Tabela 2.2: Coeficientes para α_V [11]

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.07771	2.33840	-0.76284	-0.053739	0.83433
2	0.56727	0.95545	0.54039	-0.053739	0.83433
3	-0.20238	1.14520	0.26809	-0.053739	0.83433
4	-48.2991	0.791669	0.116226	-0.053739	0.83433
5	48.5833	0.791459	0.116479	-0.053739	0.83433

Após determinar a variável ζ , descrita na Equação 2.5, é possível obter o parâmetro L_R que aparece na Equação 2.4. Se $\zeta > \theta$ então

$$L_R(km) = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \quad , \quad (2.14)$$

nos demais casos define-se L_R como

$$L_R(km) = \frac{(h_R h_s)}{\sin \theta} \quad . \quad (2.15)$$

O fator de ajuste vertical $v_{0.01}$ utilizado para os cálculos da Equação 2.4 é obtido por meio de

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31 (1 - e^{-(\theta/(1+\chi))}) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0.45 \right)} \quad , \quad (2.16)$$

em que, se o módulo a latitude da região em que se encontra o receptor em graus (φ) for menor do que 36° ,

$$\chi = 36 - |\varphi| \quad , \quad (2.17)$$

e, nos demais casos ($|\varphi| \geq 36^\circ$), $\chi = 0$.

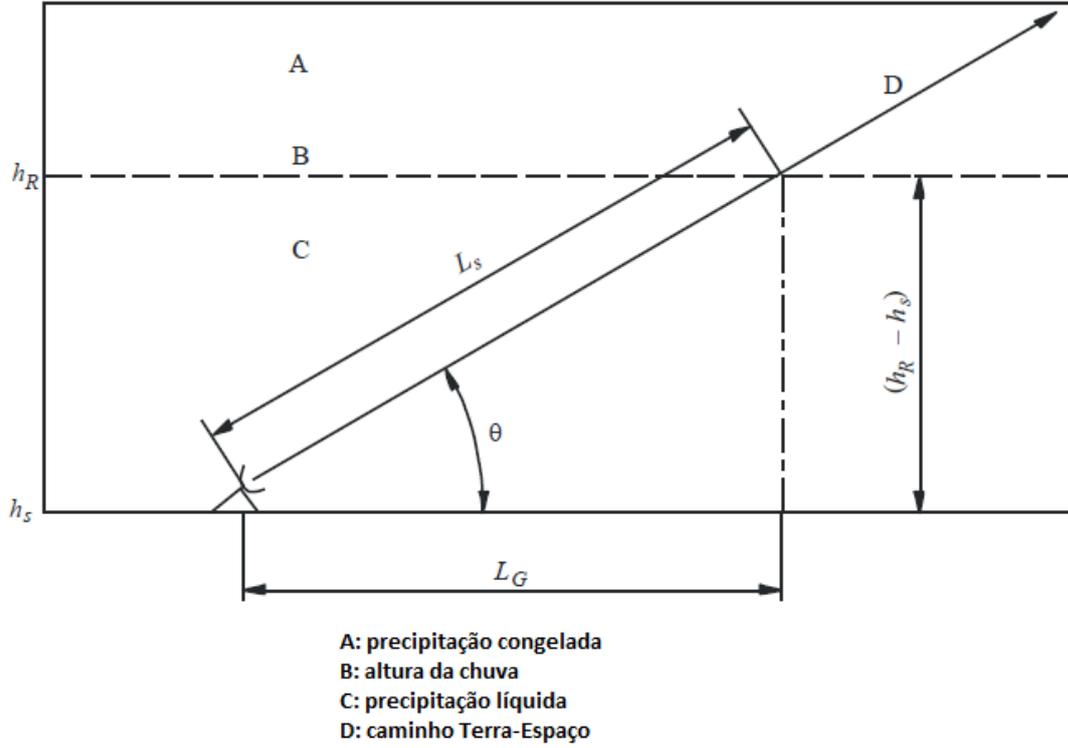


Figura 2.3: Apresentação esquemática do caminho do Espaço-Terra dando os parâmetros para serem inseridos no processo de previsão de atenuação [10].

Para outros percentuais de tempo para a chuva excedida em um ano médio, mais especificamente, para p no intervalo de 0,001% a 10%, a atenuação em dB pode ser estimada pela Equação (2.18) de extrapolação,

$$A_R(p) = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-[0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p) \sin \theta]}. \quad (2.18)$$

Se $p \geq 1\%$, então $\beta=0$, se $p < 1\%$, β pode ser expresso conforme a Equação (2.19), em que φ é a latitude da região em graus.

$$\beta = \begin{cases} 0, & |\varphi| \geq 36^\circ \\ -0.005(|\varphi| - 36), & |\varphi| < 36^\circ \text{ e } \theta \geq 25^\circ \\ -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25 \sin \theta, & \\ |\varphi| < 36^\circ \text{ e } \theta < 25^\circ \end{cases} \quad (2.19)$$

2.3.2 Caracterização da Atenuação por Nuvens

Nas nuvens a atenuação se dá por absorção do sinal e depende da temperatura e da quantidade de água ao longo do percurso. De acordo com a recomendação da ITU, ITU-R P.840-6 de 2013 [14],

a atenuação por nuvens é dada por

$$A_C(dB) = \frac{L_{red}K_l}{\sin \theta}, \quad 90^\circ \geq \theta \geq 5^\circ, \quad (2.20)$$

em que L_{red} (kg/m²) corresponde ao conteúdo colunar total de água líquida que é determinado por meio de mapas contidos em [14], θ ao ângulo de elevação e K_l é o coeficiente de atenuação específica. Por sua vez K_l é descrito por

$$K_l(dB/km)/(g/m^3) = \frac{0.819f}{\varepsilon''(1 + \eta^2)}, \quad (2.21)$$

em que f é a frequência de operação do enlace, e η é dado por

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''}. \quad (2.22)$$

A permissividade dielétrica complexa da água, ε'' e ε' , é obtida por

$$\varepsilon'' = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p [1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s [1 + (f/f_s)^2]}, \quad (2.23)$$

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{[1 + (f/f_s)^2]} + \varepsilon_2. \quad (2.24)$$

Nesses casos as variáveis ε_0 , ε_1 e ε_2 , e também as frequências de abrandamento primária (f_p) e secundária (f_s) estão descritas nas respectivas Equações 2.25, 2.26, 2.27, 2.28 e 2.29 a seguir.

$$\varepsilon_0 = 77.66 + 103.3(\iota - 1), \quad (2.25)$$

$$\varepsilon_1 = 0.0671\varepsilon_0, \quad (2.26)$$

$$\varepsilon_2 = 3.52, \quad (2.27)$$

$$f_p(GHz) = 20.20 - 146(\iota - 1) + 316(\iota - 1)^2, \quad (2.28)$$

$$f_s(GHz) = 39.8f_p. \quad (2.29)$$

A variável ι corresponde a

$$\iota = 300/T, \quad (2.30)$$

em que T é a temperatura em Kelvin(K) da nuvem e correspondente a 0°C, ou seja, 273,15 K.

2.3.3 Caracterização da Atenuação por Absorção Gasosa

A atenuação devido à absorção por gases atmosféricos depende principalmente da frequência, do ângulo de inclinação, da altitude acima do nível do mar e da densidade de vapor de água (umidade absoluta). O modelo ITU-R P.676-11 de 2016 [15] para essa atenuação é representado por

$$A_G = \frac{h_o\gamma_o + h_w\gamma_w}{\sin\theta} \quad , \quad (2.31)$$

em que h_o é a altura equivalente de ar seco, h_w é a altura equivalente de vapor de água (km), γ_o é a atenuação específica do ar seco (dB/km), γ_w é a atenuação específica do vapor de água (dB/km) e θ é o ângulo de elevação. Neste caso a altura equivalente de ar seco h_o é obtida por meio de

$$h_o = \frac{6.1}{1 + 0.17r_p^{-1.1}}(1 + t_1 + t_2 + t_3) \quad , \quad (2.32)$$

dos quais:

$$t_1 = \frac{4.64}{1 + 0.066r_p^{-2.3}} \exp \left[- \left(\frac{f - 59.7}{2.87 + 12.4 \exp(-7.9r_p)} \right)^2 \right] \quad , \quad (2.33)$$

$$t_2 = \frac{0.14 \exp(2.12r_p)}{(f - 118.75)^2 + 0.031 \exp(2.2r_p)} \quad , \quad (2.34)$$

$$t_3 = \frac{0.0114}{1 + 0.14r_p^{-2.6}} f \frac{-0.0247 + 0.0001f + 1.61 \times 10^{-6}f^2}{1 - 0.0169f + 4.1 \times 10^{-5}f^2 + 3.2 \times 10^{-7}f^3} \quad , \quad (2.35)$$

$$r_p = \frac{(p + e)}{1013.25} \quad , \quad (2.36)$$

em que f , p e e são, respectivamente, a frequência de operação, pressão de ar seco (geralmente igual a 1013.25 hPa) e a pressão parcial do vapor de água (em hPa) que pode ser obtida por

$$e = \frac{\rho T}{216.7} \quad , \quad (2.37)$$

em que ρ é a densidade do vapor de água que segundo [15] é $7.5g/m^3$ e T é a temperatura média na superfície da terra, em Kelvin.

Vale ressaltar que, como forma de conferir e validar o modelo, nos casos em que $f < 70$ GHz a condição apresentada a seguir na Equação 2.38 deve ser obedecida.

$$h_o \leq 10.7r_p^{0.3} \quad . \quad (2.38)$$

Já a altura equivalente de vapor de água h_w utilizada na Equação 2.31 é, nos casos em que $f \leq 350$ GHz, dada por

$$h_w = 1.66 \left(1 + \frac{1.39\sigma_w}{(f - 22.235)^2 + 2.56\sigma_w} + \frac{3.37\sigma_w}{(f - 183.31)^2 + 4.69\sigma_w} + \frac{1.58\sigma_w}{(f - 325.1)^2 + 2.89\sigma_w} \right) \quad , \quad (2.39)$$

em que

$$\sigma_w = \frac{1.013}{1 + \exp[-8.6(r_p - 0.57)]} \quad . \quad (2.40)$$

Para resolver a Equação 2.31 é necessário determinar os parâmetros γ_o de atenuação específica do ar seco (dB/km) e γ_w de atenuação específica do vapor de água (dB/km). O primeiro é dado por

$$\gamma_o = 0.1820f \left(\sum_i S_i F_i + N_D''(f) \right) \quad . \quad (2.41)$$

O parâmetro $N_D''(f)$ é obtido por meio de

$$N_D''(f) = fp\iota^2 \left[\frac{6.14 \times 10^{-5}}{d \left[1 + \left(\frac{f^2}{d} \right) \right]} + \frac{1.4 \times 10^{-12} p \iota^{1.5}}{1 + 1.9 \times 10^{-5} f^{1.5}} \right] \quad , \quad (2.42)$$

em que $\iota = 300/T$ e d é o parâmetro de largura para o espectro Debye dado por

$$d = 5.6 \times 10^{-4} (p + e) \iota^{0.8} \quad . \quad (2.43)$$

O parâmetro S_i para o oxigênio que aparece na Equação 2.41 é obtido por meio de

$$S_i = a_{1i} \times 10^{-7} p \iota^3 \exp[a_{2i}(1 - \iota)] \quad . \quad (2.44)$$

Já o parâmetro F_i para o oxigênio que aparece na Equação 2.41 é obtido por meio de

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right] \quad , \quad (2.45)$$

em que, para este caso do oxigênio,

$$\Delta f = a_{3i} \times 10^{-4} (p \iota^{0.8 - a_{4i}} + 1.1e\iota) \quad , \quad (2.46)$$

$$\delta = (a_{5i} + a_{6i}\iota) \times 10^{-4} (p + e) \iota^{0.8} \quad . \quad (2.47)$$

Os parâmetros f_i , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 e a_6 para os cálculos referentes ao oxigênio são descritos na Tabela 2.3.

Para resolver a Equação 2.31 é ainda necessário determinar o parâmetro γ_w de atenuação específica do vapor de água (dB/km). Este é dado por

$$\gamma_w = 0.1820f \sum_i S_i F_i \quad . \quad (2.48)$$

O parâmetro S_i para o vapor de água que aparece na Equação 2.48 é obtido por meio de

$$S_i = b_{1i} \times 10^{-1} e \iota^{3.5} \exp[b_{2i}(1 - \iota)] \quad . \quad (2.49)$$

Tabela 2.3: Dados espectroscópicos para atenuação por oxigênio [15]

f_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
50.474214	0.975	9.651	6.690	0.000	2.566	6.850
50.987745	2.529	8.653	7.170	0.000	2.246	6.800
51.503360	6.193	7.709	7.640	0.000	1.947	6.729
52.021429	14.320	6.819	8.110	0.000	1.667	6.640
52.542418	31.240	5.983	8.580	0.000	1.388	6.526
53.066934	64.290	5.201	9.060	0.000	1.349	6.206
53.595775	124.600	4.474	9.550	0.000	2.227	5.085
54.130025	227.300	3.800	9.960	0.000	3.170	3.750
54.671180	389.700	3.182	10.370	0.000	3.558	2.654
55.221384	627.100	2.618	10.890	0.000	2.560	2.952
55.783815	945.300	2.109	11.340	0.000	-1.172	6.135
56.264774	543.400	0.014	17.030	0.000	3.525	-0.978
56.363399	1331.800	1.654	11.890	0.000	-2.378	6.547
56.968211	1746.600	1.255	12.230	0.000	-3.545	6.451
57.612486	2120.100	0.910	12.620	0.000	-5.416	6.056
58.323877	2363.700	0.621	12.950	0.000	-1.932	0.436
58.446588	1442.100	0.083	14.910	0.000	6.768	-1.273
59.164204	2379.900	0.387	13.530	0.000	-6.561	2.309
59.590983	2090.700	0.207	14.080	0.000	6.957	-0.776
60.306056	2103.400	0.207	14.150	0.000	-6.395	0.699
60.434778	2438.000	0.386	13.390	0.000	6.342	-2.825
61.150562	2479.500	0.621	12.920	0.000	1.014	-0.584
61.800158	2275.900	0.910	12.630	0.000	5.014	-6.619
62.411220	1915.400	1.255	12.170	0.000	3.029	-6.759
62.486253	1503.000	0.083	15.130	0.000	-4.499	0.844
62.997984	1490.200	1.654	11.740	0.000	1.856	-6.675
63.568526	1078.000	2.108	11.340	0.000	0.658	-6.139
64.127775	728.700	2.617	10.880	0.000	-3.036	-2.895
64.678910	461.300	3.181	10.380	0.000	-3.968	-2.590
65.224078	274.000	3.800	9.960	0.000	-3.528	-3.680
65.764779	153.000	4.473	9.550	0.000	-2.548	-5.002
66.302096	80.400	5.200	9.060	0.000	-1.660	-6.091
66.836834	39.800	5.982	8.580	0.000	-1.680	-6.393
67.369601	18.560	6.818	8.110	0.000	-1.956	-6.475
67.900868	8.172	7.708	7.640	0.000	-2.216	-6.545
68.431006	3.397	8.652	7.170	0.000	-2.492	-6.600
68.960312	1.334	9.650	6.690	0.000	-2.773	-6.650
118.750334	940.300	0.010	16.640	0.000	-0.439	0.079
368.498246	67.400	0.048	16.400	0.000	0.000	0.000
424.763020	637.700	0.044	16.400	0.000	0.000	0.000
487.249273	237.400	0.049	16.000	0.000	0.000	0.000
715.392902	98.100	0.145	16.000	0.000	0.000	0.000
773.839490	572.300	0.141	16.200	0.000	0.000	0.000
834.145546	183.100	0.145	14.700	0.000	0.000	0.000

Já o parâmetro F_i para o vapor de água que aparece na Equação 2.48 é obtido por meio de

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right] , \quad (2.50)$$

em que, para este caso do vapor de água, $\delta = 0$ e

$$\Delta f = b_{3i} \times 10^{-4} (p \ell^{b_{4i}} + b_{5i} e \ell^{b_{6i}}) . \quad (2.51)$$

Os parâmetros f_i , b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , b_5 e b_6 para os cálculos referentes ao oxigênio são descritos na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Dados espectroscópicos para atenuação por vapor de água [15]

f_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
22.235080	.1079	2.144	26.38	.76	5.087	1.00
183.310087	2.273	.668	29.06	.77	5.022	.85
321.225630	.0470	6.179	24.04	.67	4.398	.54
325.152888	1.514	1.541	28.23	.64	4.893	.74
380.197353	11.67	1.048	28.11	.54	5.063	.89
448.001085	10.41	1.405	25.64	.66	5.028	.67
556.935985	497.0	.159	30.86	.69	4.552	1.00
752.033113	243.4	.396	30.86	.68	4.352	.84
1780.00000	17506.00	.952	196.3	2.00	24.15	5.00

2.4 Capacidade do Canal

2.4.1 Componentes de um sinal de comunicação

Em canais de rádio, devido aos múltiplos percursos que o sinal pode percorrer, o sinal recebido se comporta como um processo aleatório. Historicamente, a modelagem e a caracterização do canal são uma das partes mais difíceis dos projetos de sistemas sem fio. A potência de um sinal transmitido, propagado e recebido no receptor é variada com o tempo, com aspectos geográficos, com a frequência do sinal e outras características do meio. Para melhor caracterizar o canal de comunicação, o sinal é visto como uma combinação dos efeitos de pequena (aleatórios) e de larga escala (aleatórios ou determinísticos). A Figura 2.4 apresenta as três componentes do sinal em propagação.

As características de perda de percurso (do inglês *path loss*) e sombreamento ou desvanecimento lento (do inglês *shadowing* ou *slow fading*) fazem parte da componente de larga escala, caracterizada por distâncias grandes e variações lentas. Por outro lado, a componente em pequena escala é dada por flutuações rápidas e aleatórias de amplitude e fases do sinal de rádio, chamada de desvanecimento rápido (do inglês *fast fading*). Ao chamar um canal de determinístico significa que este considera apenas o efeito de perda de percurso e, ao chamar um canal de aleatório, significa que este considera também os efeitos de desvanecimento rápido e sombreamento.

Para garantir que o sinal chegue no receptor com uma taxa mínima desejada de erro, uma certa relação sinal-ruído deve ser garantida. Uma das formas de mensurar este aspecto é por meio da capacidade do canal. Este trabalho então utiliza o modelo da capacidade de Shannon e o modelo generalizado κ - μ Sombreado para determinar capacidade ergódica.

2.4.2 Capacidade de Shannon

Para determinar a capacidade de um canal determinístico é utilizado a capacidade de Shannon, que corresponde à taxa máxima de transmissão de dados sem erros que pode trafegar por meio dele. A unidade desta medida é bits por segundo e como obtê-la está descrito na Equação (2.52),

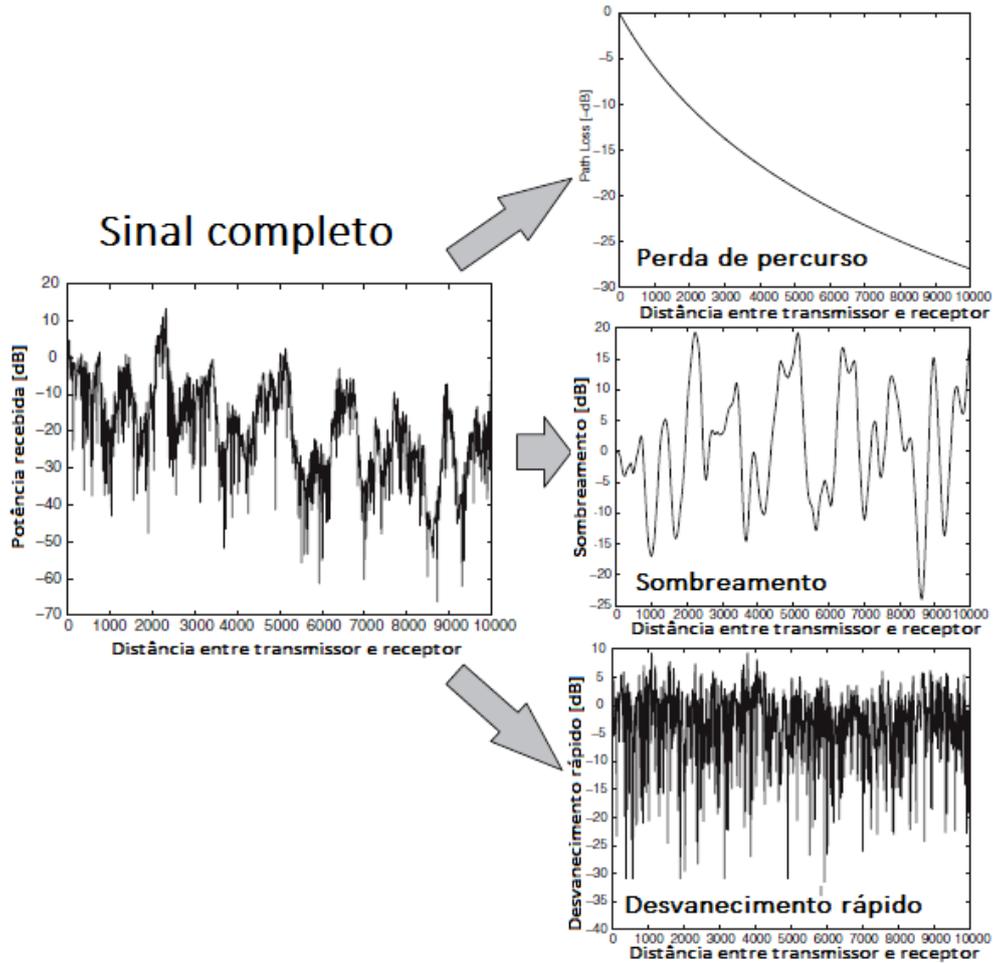


Figura 2.4: As três componentes do sinal em propagação [16].

sendo γ a relação sinal-ruído (SNR) e B a largura de banda,

$$C = B \log_2(1 + \gamma). \quad (2.52)$$

Para determinar a relação sinal-ruído (razão entre as potências do sinal e do ruído), é preciso obter a potência do ruído, apresentada na Equação (2.53), na qual os parâmetros k , B , NF e T são, respectivamente, a constante de Boltzmann, a largura de banda do sinal, o fator de ruído e a temperatura absoluta,

$$N_{in} = k \times B \times NF \times T. \quad (2.53)$$

2.4.3 Capacidade Ergódica

Para a caracterização da capacidade de um canal aleatório é utilizada a capacidade ergódica. A capacidade ergódica (bps/Hz) é definida como a máxima taxa média atingida sobre todos os blocos de desvanecimento. Esta leva em consideração a distribuição probabilística da componente

de variação do sinal por multipercurso (desvanecimento rápido) e pode ser calculada como

$$C = \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad , \quad (2.54)$$

em que γ é a variável aleatória da qual se considera a distribuição probabilística [17].

Para caracterizar essa distribuição será utilizado o modelo generalizado κ - μ Sombreado [17] que engloba os casos especiais de Rice Sombreado, Rice, Nakagami, Gaussiana Unilateral, κ - μ e Rayleigh.

O modelo de desvanecimento da distribuição κ - μ Sombreada se baseia na generalização do modelo físico correspondente à distribuição κ - μ [18] [19]. Neste caso é considerado um sinal estruturado em *clusters* de ondas que se propagam em um ambiente não homogêneo [19]. Dentro de cada cluster, as ondas de multipercurso são consideradas como tendo ondas difusas com potências idênticas e um componente dominante com certa potência arbitrária [19]. Enquanto as ondas difusas *intracluster* têm fases aleatórias e tempos de atraso similares, os *spreads* de tempo de atraso *intercluster* são considerados relativamente grandes [19]. Em contraste com o modelo κ - μ que assume um componente dominante determinístico dentro de cada *cluster*, o modelo κ - μ Sombreado assume que os componentes dominantes de todos os *clusters* podem flutuar aleatoriamente como consequência do sombreamento [19].

No modelo físico para a distribuição κ - μ Sombreada, a potência recebida W pode ser expressada em termos das componentes em fase e em quadratura do sinal em desvanecimento por

$$W = \sum_{i=1}^n (X_i + \xi p_i)^2 + (Y_i + \xi q_i)^2 \quad , \quad (2.55)$$

em que n é um número natural, X_i e Y_i são processos Gaussianos mutuamente independentes (com $E[X_i] = E[Y_i] = 0$, $E[X_i^2] = E[Y_i^2] = \sigma^2$) e p_i e q_i são números reais [17]. Cada termo da soma representa um *cluster* de multipercurso e n é o número de *clusters* [17]. A variável aleatória $X_i + jY_i$ modela as componentes difusas do i -ésimo *cluster* e é uma Gaussiana complexa circularmente simétrica já que o número de componentes é considerado grande o suficiente para que o teorema do limite central se aplique [17]. Em cada *cluster*, a potência total das componentes difusas é $2\sigma^2$, enquanto a componente dominante do i -ésimo *cluster* é dada por uma variável aleatória complexa $\xi p_i + j\xi q_i$, cuja potência é $p_i^2 + q_i^2$ já que ξ é uma variável aleatória de potência normalizada [17].

Esse modelo possui três parâmetros principais para formulação da distribuição κ - μ Sombreada [17]:

- m : Parâmetro de sombreamento. Todas as componentes dominantes exibem uma flutuação por sombreamento comum que é representada pela amplitude aleatória ξ , que é uma variável aleatória Nakagami- m com parâmetro de modelagem m e $E[\xi^2] = 1$;
- μ : Número de *clusters* de multipercurso. O número natural n pode ser substituído na Equação 2.55 pela extensão real e não negativa μ , o que leva a uma distribuição mais geral

e flexível;

- κ : Parâmetro relacionado à componente dominante do sinal. A razão entre a potência das componentes dominantes e a potência das componentes difusas é representada pelo κ que é definido como:

$$\kappa = \frac{\sum_{i=1}^{\mu} p_i^2 + q_i^2}{2\sigma^2\mu} . \quad (2.56)$$

Assume-se então que que $\gamma \sim \delta_{\kappa\mu}(\bar{\gamma}, \kappa, \mu, m)$ é uma variável aleatória com média $\bar{\gamma}$ e parâmetros de modelagem κ, μ e m reais e não negativos [17]. γ representa a SNR instantânea no receptor e modela o canal de desvanecimento e pode ser definida como

$$\gamma \triangleq \frac{\bar{\gamma}W}{\bar{W}} , \quad (2.57)$$

em que $\bar{\gamma} \triangleq E[\gamma]$ [17] e

$$\bar{W} = E[W] = 2\sigma^2\mu + \sum_{i=1}^{\mu} p_i^2 + q_i^2 . \quad (2.58)$$

A função densidade de probabilidade (PDF - do inglês *probability density function*) de γ correspondente à distribuição κ - μ Sombreada é dada por [17] como

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{\mu^{\mu}m^m(1+\kappa)^{\mu}}{\Gamma(\mu)\bar{\gamma}(\mu\kappa+m)^m} \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right)^{\mu-1} \times e^{-\mu(1+\kappa)\gamma/\bar{\gamma}} {}_1F_1\left(m, \mu; \frac{\mu^2\kappa(1+\kappa)}{\mu\kappa+m} \frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right) , \quad (2.59)$$

em que ${}_1F_1(\cdot)$ é a função Hipergeométrica confluyente definida em [20].

A função densidade acumulada (CDF - do inglês *cumulative density function*) de γ correspondente à distribuição κ - μ Sombreada é dada por [17] como

$$F_{\gamma}(\gamma) = \frac{\mu^{\mu-1}m^m(1+\kappa)^{\mu}}{\Gamma(\mu)(\mu\kappa+m)^m} \left(\frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{\mu} \gamma^{\mu} \times \Phi_2\left(\mu-m, m; \mu+1; -\frac{\mu(1+\kappa)\gamma}{\bar{\gamma}}, -\frac{\mu(1+\kappa)}{\bar{\gamma}} \frac{m\gamma}{\mu\kappa+m}\right) , \quad (2.60)$$

em que $\Phi_2(\cdot)$ é a função Hipergeométrica confluyente bivariada definida em [20].

A capacidade ergódica obtida em [17], após algumas manipulações algébricas, para o modelo de desvanecimento κ - μ Sombreado é representada por

$$C_{erg} = \left(\frac{m}{\mu\kappa+m}\right)^{m-\mu} \frac{1}{\Gamma(\mu-m)\log(2)} \times G_{1,0:2,2:1,2}^{0,1:1,2:1,1} \left[\begin{matrix} 1-\mu \\ - \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1, 1 \\ 1, 0 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1+m-\mu \\ 0, 1-\mu \end{matrix} \middle| \frac{\bar{\gamma}(\mu\kappa+m)}{0, 1-\mu}, \frac{\mu\kappa}{m} \right] , \quad (2.61)$$

em que $G[\cdot]$ é a função Meijer G [18] e $\bar{\gamma}$ é a SNR média do sinal.

Por fim, a Tabela 2.5 resume todos os modelos derivados do κ - μ Sombreado, que são obtidos quando se fixa os parâmetros em determinados valores reais ou os tende para determinados limites.

Tabela 2.5: Modelos Clássicos e Generalizados derivados do κ - μ Sombreado [21]

Canais	Parâmetros κ - μ Sombreado
One-Sided Gaussian	a) $\underline{\mu} = 0.5, \underline{\kappa} \rightarrow 0$ b) $\underline{\mu} = 0.5, \underline{m} = 0.5$
Rayleigh	a) $\underline{\mu} = 1, \underline{\kappa} \rightarrow 0$ b) $\underline{\mu} = 1, \underline{m} = 1$
Nakagami-m	a) $\underline{\mu} = m, \underline{\kappa} \rightarrow 0$ b) $\underline{\mu} = m, \underline{m} = m$
Nakagami-q (Hoyt)	$\underline{\mu} = 1, \underline{\kappa} = (1 - q^2)/2q^2, \underline{m} = 0.5$
Rician with parameter K	$\underline{\mu} = 1, \underline{\kappa} = K, \underline{m} \rightarrow \infty$
κ - μ	$\underline{\mu} = \mu, \underline{\kappa} = \kappa, \underline{m} \rightarrow \infty$
η - μ	$\underline{\mu} = 2\mu, \underline{\kappa} = (1 - \eta)/2\eta, \underline{m} = \mu$
Rician Shadowed	$\underline{\mu} = 1, \underline{\kappa} = K, \underline{m} = m$

2.5 Diversidade

2.5.1 Técnicas de diversidade

O efeito do desvanecimento em um sinal pode ser prejudicial para um enlace de comunicação, a diversidade é um recurso comumente utilizado para mitigar essa interferência do desvanecimento e melhorar a confiabilidade da mensagem transmitida e o desempenho do canal. A diversidade consiste em transmitir o sinal utilizando dois ou mais canais de comunicação com características diferentes, ou seja, são geradas réplicas de um mesmo sinal de modo que essas versões do sinal experimentem desvanecimentos e interferência em níveis diferentes. Essas versões do sinal que utilizam multipercursos são combinadas no receptor e resultam em um ganho de diversidade que estabiliza o enlace e melhora o desempenho da comunicação.

Há diferentes técnicas de diversidade, as principais são listadas a seguir:

- Diversidade de tempo: várias versões do mesmo sinal são transmitidas em instantes de tempo diferentes. Alternativamente, um código de correção de erro de encaminhamento redundante é adicionado e a mensagem é distribuída no tempo por meio da intercalação de bits antes de ser transmitida, o que evita erros e/ou simplifica a correção destes;
- Diversidade de frequência: o sinal é transmitido usando vários canais de frequência ou espalhado por um amplo espectro que é afetado pelo desvanecimento seletivo de frequência;
- Diversidade espacial: o sinal é transmitido por caminhos de propagação diferentes, usando múltiplas antenas transmissoras (diversidade de transmissão) e/ou múltiplas antenas receptoras (diversidade de recepção). No último caso, uma técnica de combinação de diversidade é aplicada antes que ocorra o processamento de sinal adicional;
- Diversidade de polarização: várias versões de um sinal são transmitidas e recebidas através de antenas com diferentes polarizações. Há aplicação de uma técnica de combinação de diversidade no lado do receptor.

Este trabalho em suas análises utiliza a diversidade espacial na recepção e a técnica de combinação que processa os ramos de sinal recebidos é a MRC (do inglês *Maximal-Ratio Combiner*). Nesta técnica, a resultante é dada pela soma de cada ramificação de sinal após ser multiplicada por um fator de ponderação proporcional à amplitude do sinal. Ao final, os ramos com sinal forte são amplificados, enquanto os sinais fracos e ruídos são atenuados.

2.5.2 Diversidade aplicada no modelo κ - μ Sombreado

O modelo κ - μ Sombreado é adaptado para o caso em que há diferentes ramos de sinal, ou seja, para quando a variável aleatória com distribuição κ - μ Sombreada é composta por sinais que são somados para composição do sinal final de acordo com a técnica de combinação MRC [22].

Neste caso considera-se uma variável aleatória com distribuição κ - μ Sombreada X_l dada por [18] como

$$X_l = \sum_{i=1}^{n_l} (W_{i,l} + jV_{i,l}) + (\vartheta_l a_{i,l} + j\vartheta_l b_{i,l}) \quad , \quad (2.62)$$

em que $W_{i,l}$ e $V_{i,l}$ são variáveis aleatórias Gaussianas com média zero e mutualmente independentes de variância σ^2 ; n_l é um número natural, $a_{i,l}$ e $b_{i,l}$ são números reais; e ϑ_l é uma variável aleatória com distribuição Nakagami- m com parâmetro de modelagem m e parâmetro de espalhamento $\Omega_l = 1$ [22]. $W_{i,l} + jV_{i,l}$ é uma variável aleatória Gaussiana complexa circularmente simétrica que representa a componente difusa do i -ésimo *cluster* [22]. Por outro lado $\vartheta_l a_{i,l} + j\vartheta_l b_{i,l}$ denota a componente de linha de visada (LOS, do inglês *Line of Sight*) com potência $a_{i,l}^2 + b_{i,l}^2$. A flutuação de sombreado comum de todos os *clusters* é representada pela variável aleatória de potência normalizada ϑ_l ; para casos de LOS determinísticos, $\vartheta_l = 1$ [22].

A potência Y_l de X_l é dada por [18]

$$Y_l = \sum_{i=1}^{n_l} (W_{i,l} + \vartheta_l a_{i,l})^2 + (V_{i,l} + \vartheta_l b_{i,l})^2 \quad . \quad (2.63)$$

Neste caso de diversidade, se todos os sinais somados forem representados por variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.) de acordo com o modelo κ - μ Sombreado, a PDF é dada por [22]

$$f_\gamma(\gamma) = \left(\frac{L\mu(1+\kappa)}{\bar{\gamma}} \right)^{L\mu} \left(\frac{m}{m+\kappa\mu} \right)^{Lm} \frac{\gamma^{L\mu-1}}{\Gamma(L\mu)} \times e^{-\frac{L\mu(1+\kappa)}{\bar{\gamma}}\gamma} {}_1F_1 \left(Lm; L\mu; \frac{L\kappa\mu^2(1+\kappa)\gamma}{\bar{\gamma}(m+\kappa\mu)} \right) \quad , \quad (2.64)$$

em que L corresponde ao número de ramos utilizados na recepção.

Para o cálculo da capacidade ergódica com a possibilidade de mais de um ramo de sinal utiliza-se [22]

$$C(\bar{\gamma}) = \frac{A}{\ln 2} \sum_{k=0}^{\infty} \tilde{D}_k \sum_{j=0}^{\infty} C_{j,k} \left(\frac{\eta}{\bar{\gamma}} \right)^{-j} \times G_{32}^{13} \left(\frac{\bar{\gamma}}{\eta} \left| \begin{matrix} 1, 1, 1 - \epsilon - j \\ 1, 0 \end{matrix} \right. \right) \quad , \quad (2.65)$$

em que $A, \eta, \epsilon, \tilde{D}_k$ e $C_{j,k}$ são definidos, conforme [22], por

$$A = \prod_{l=1}^L \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_l} \right)^m, \quad (2.66)$$

em que $\lambda_1 = \min_l[\lambda_l]$ e $[\lambda_l]_{l=1}^L$ são os autovalores da matriz \mathbf{DC} , sendo \mathbf{D} uma matriz diagonal com as entradas $(\mu_l \kappa_l / m)_{l=1}^L$ e \mathbf{C} é uma matriz positiva $L \times L$ definida por

$$\mathbf{C} \triangleq \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{\rho_{12}} & \dots & \sqrt{\rho_{1L}} \\ \sqrt{\rho_{21}} & 1 & \dots & \sqrt{\rho_{2L}} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \sqrt{\rho_{L1}} & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix}_{L \times L} \quad (2.67)$$

sendo ρ_{ij} o coeficiente de correlação dado por

$$\rho_{ij} = \rho_{ji} = \frac{\text{Cov}(\tilde{\vartheta}_i^2, \tilde{\vartheta}_j^2)}{\sqrt{\text{Var}(\tilde{\vartheta}_i^2) + \text{Var}(\tilde{\vartheta}_j^2)}}; 0 \leq \rho_{ij} \leq 1; i, j = 1, \dots, L, \quad (2.68)$$

$$\eta = \sum_{l=1}^L \mu_l (1 + \kappa_l), \quad (2.69)$$

$$\epsilon = \sum_{l=1}^L \mu_l, \quad (2.70)$$

$$\tilde{D}_k = \frac{\delta_k}{\lambda_1^{Lm+k} \Gamma(\epsilon)} \left(1 + \frac{1}{\lambda_1} \right)^{-(Lm+k)}, \quad (2.71)$$

em que os coeficientes δ_k podem ser obtidos recursivamente como

$$\delta_{k+1} = \frac{m}{k+1} \sum_{i=1}^{k+1} \left[\sum_{j=1}^L \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_j} \right)^i \right] \delta_{k+1-i}, k = 0, 1, \dots, \quad (2.72)$$

$$C_{j,k} = \frac{(Lm+k)_j}{(\epsilon)_j j!} \left(\frac{\eta}{\bar{\gamma} \left(1 + \frac{1}{\lambda_1} \right)} \right)^j. \quad (2.73)$$

2.6 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos necessários para a realização das simulações e análises necessários a este trabalho. No próximo capítulo serão abordados os desenvolvimentos realizados, os resultados obtidos por meio do *software* Mathematica e suas respectivas análises.

Capítulo 3

Análises e Resultados

3.1 Cenário do sistema

Para a melhor compreensão da tecnologia objeto deste trabalho, são realizadas simulações que tem como base um enlace de comunicação com o uso de HAPs. O enlace é caracterizado por um receptor fixo na superfície terrestre e um transmissor móvel, representando o HAPs. A posição inicial do HAPs é logo acima do receptor, e esse transmissor se desloca para o leste sem variar a sua altitude posicionada em 20 km (conforme especificações convencionadas na literatura [6]). Para este cenário, a distância entre o receptor e transmissor (distância de rádio) varia de 20 a 102 km (considerando que o HAPs se desloca em média 100 km do ponto de partida logo acima do receptor [6]), dependendo do ângulo de inclinação ao longo do deslocamento. O esquemático do cenário do sistema encontra-se na Figura 3.1.

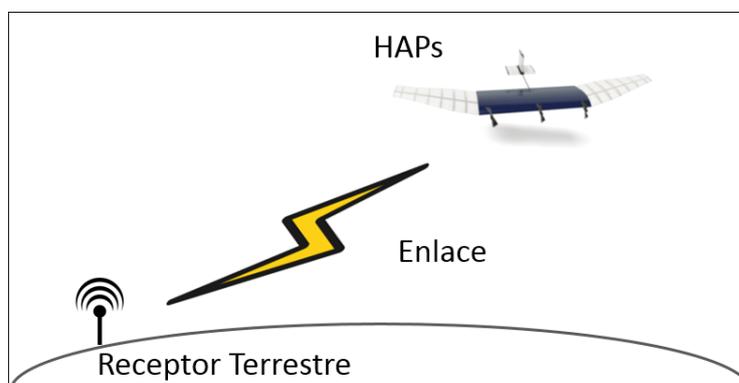


Figura 3.1: Esquemático do Cenário de Análise.

Os parâmetros típicos utilizados para balanceamento do enlace de comunicação com uso de HAPs estão descritos na Tabela 3.1 [23].

De forma a caracterizar a utilização de HAPs no Brasil, foram selecionadas 4 cidades que apresentam diferentes características climáticas e geográficas (como por exemplo, taxa de chuva, temperatura média e altitude) presentes no país, o que faz com que o sinal do enlace configurado assumira comportamentos distintos em cada uma das localizações permitindo uma análise mais

Tabela 3.1: Parâmetros típicos configurados para o Balanceamento do Enlace

Parâmetros	Valores
Frequência de Operação (GHz)	20
Potência de Transmissão (W)	10
Ganho da Antena de Transmissão (dBi)	20
Ganho da Antena de Recepção (dBi)	35
Largura de Banda (MHz)	20
Fator de Ruído	3
Potência do Ruído de Fundo (dBm)	-98
Polarização	Vertical

completa da aplicação de HAPs em território brasileiro.

As cidades selecionadas com base na representatividade de diferentes parâmetros que influenciam os efeitos de atenuação por fenômenos climáticos e atmosféricos foram: Brasília capital do país e situada no Distrito Federal, Cuiabá capital do estado do Mato Grosso, Curitiba capital do estado do Paraná e Manaus capital do estado do Amazonas. As localizações das respectivas cidades no mapa do país está apresentada na Figura 3.2 por meio dos pontos de marcação azuis.

Os parâmetros referentes às condições climáticas e geográficas de cada uma das cidades estão na Tabela 3.2, de acordo com [13], [14], [15] e com o Instituto Nacional de Meteorologia.

Tabela 3.2: Parâmetros principais de cada cidade para Balanceamento do Enlace

Cidade	Latitude (φ)	Altitude (h_s)	Temperatura média ($T^{\circ}C$)	Conteúdo colunar de água (L_{red})	Taxa de Chuva (R_{001})
Brasília - DF	-15,77972°	1171m	21°C	3	80
Cuiabá - MT	-15,5014°	165m	26,1°C	3	30
Curitiba - PR	-25,4284°	925m	17,1°C	3	60
Manaus - AM	-3,117034°	92m	27,4°C	4	100



Figura 3.2: Localização das Cidades que são objeto de estudo no Google Maps.

3.2 Atenuação por Chuva

Para a análise da atenuação por chuva no sinal, foram obtidos dois resultados: o primeiro referente à atenuação em função da distância de rádio para as frequências de operação de 10, 15, 20 e 25 GHz, considerando o percentual p de chuva excedido em um ano médio igual a 0,01%; e, para obtenção do segundo, a frequência foi fixada em 20 GHz e o percentual p de chuva excedida em um ano médio foi variado, recebendo os valores de 0,01%, 0,1%, 1,0% e 10%.

As Figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 apresentam o primeiro resultado do estudo de atenuação por chuva.

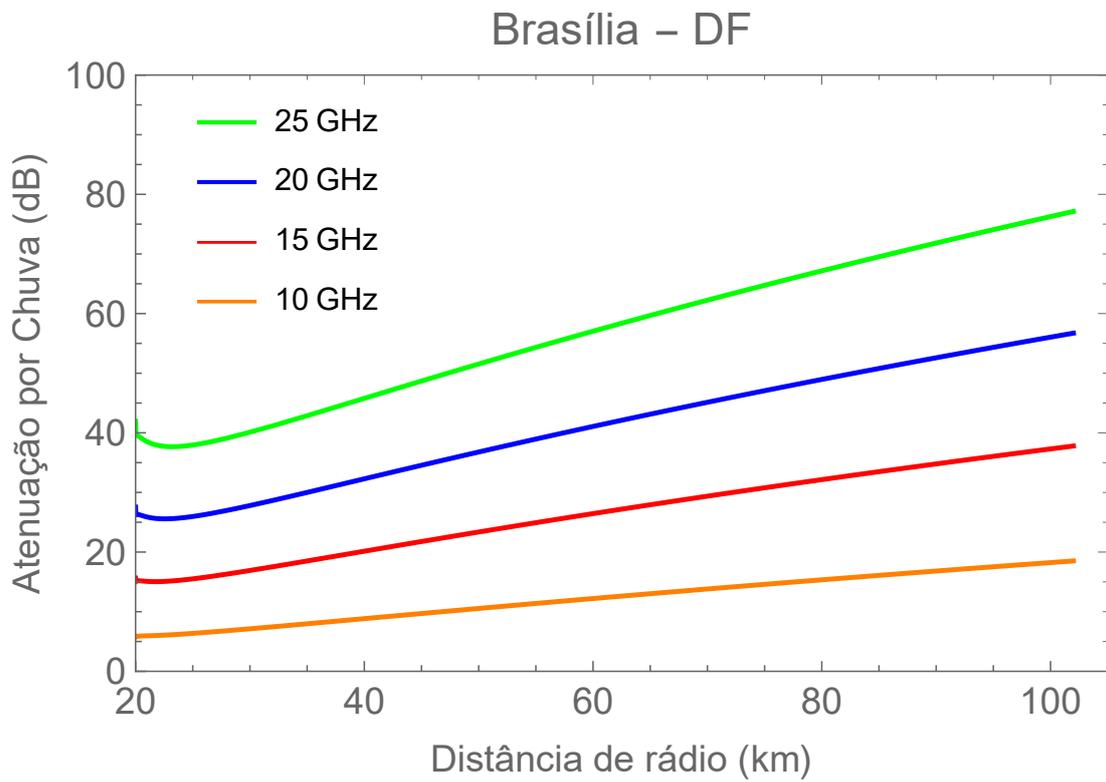


Figura 3.3: Atenuação por chuva com $p = 0,01\%$ em função da distância para Brasília-DF.

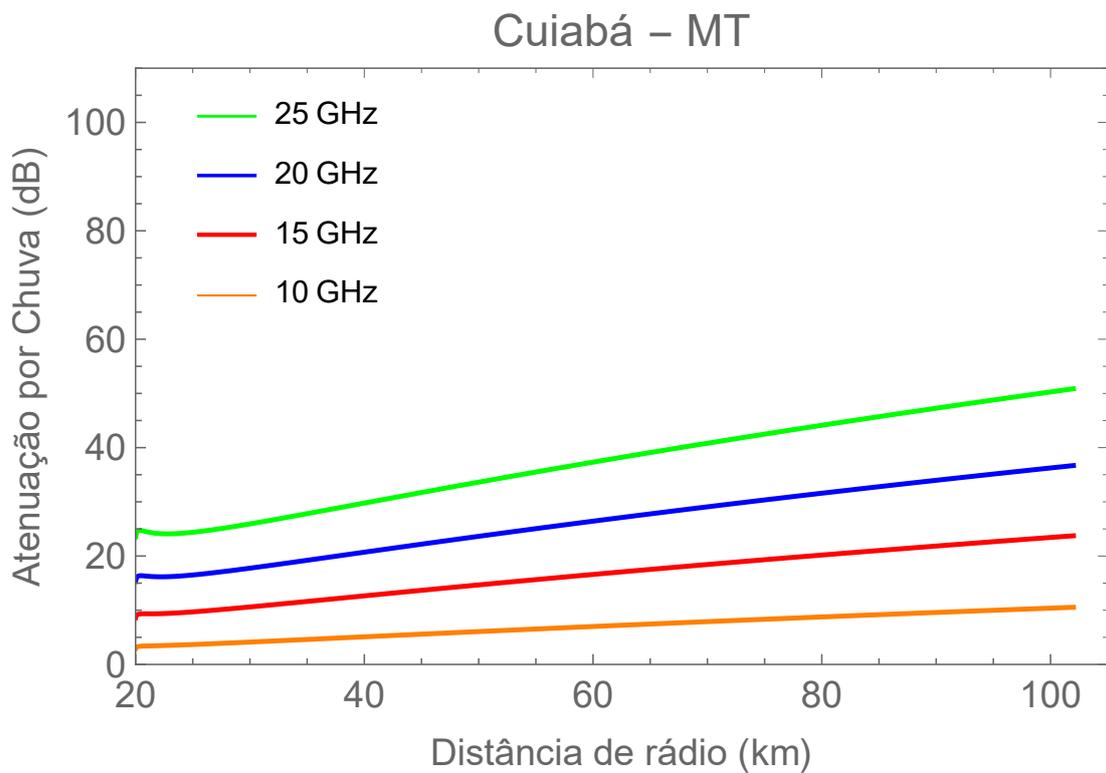


Figura 3.4: Atenuação por chuva com $p = 0,01\%$ em função da distância para Cuiabá-MT.

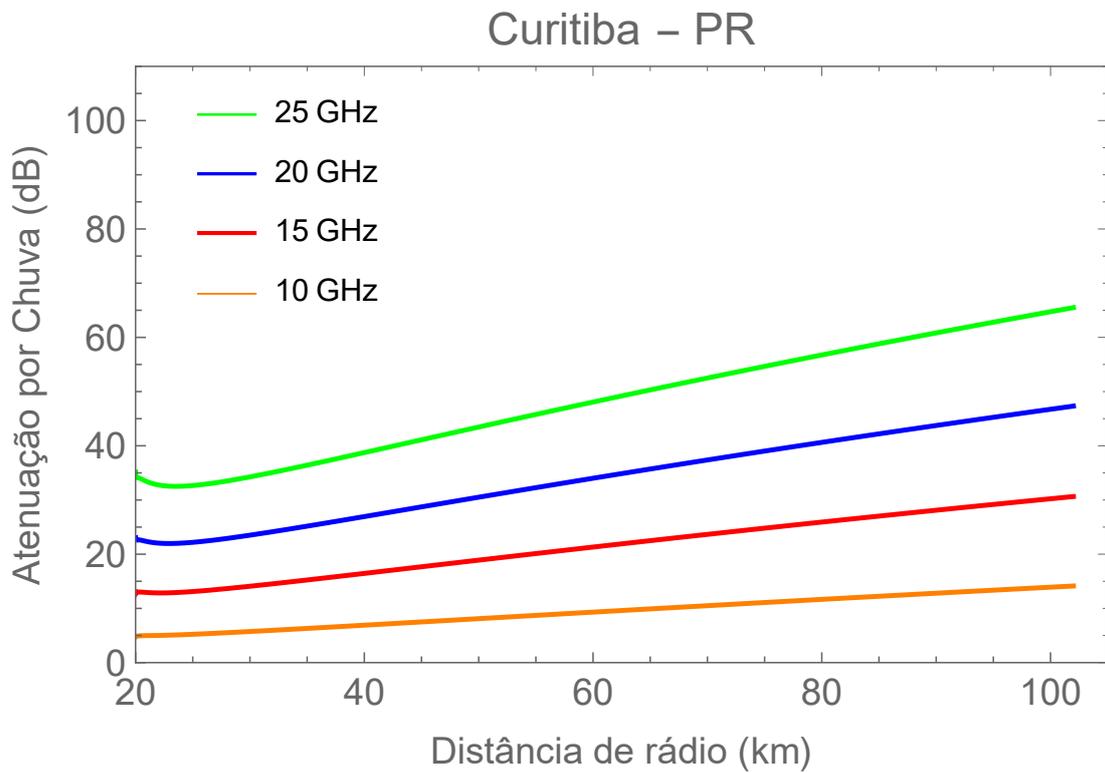


Figura 3.5: Atenuação por chuva com $p = 0,01\%$ em função da distância para Curitiba-PR.

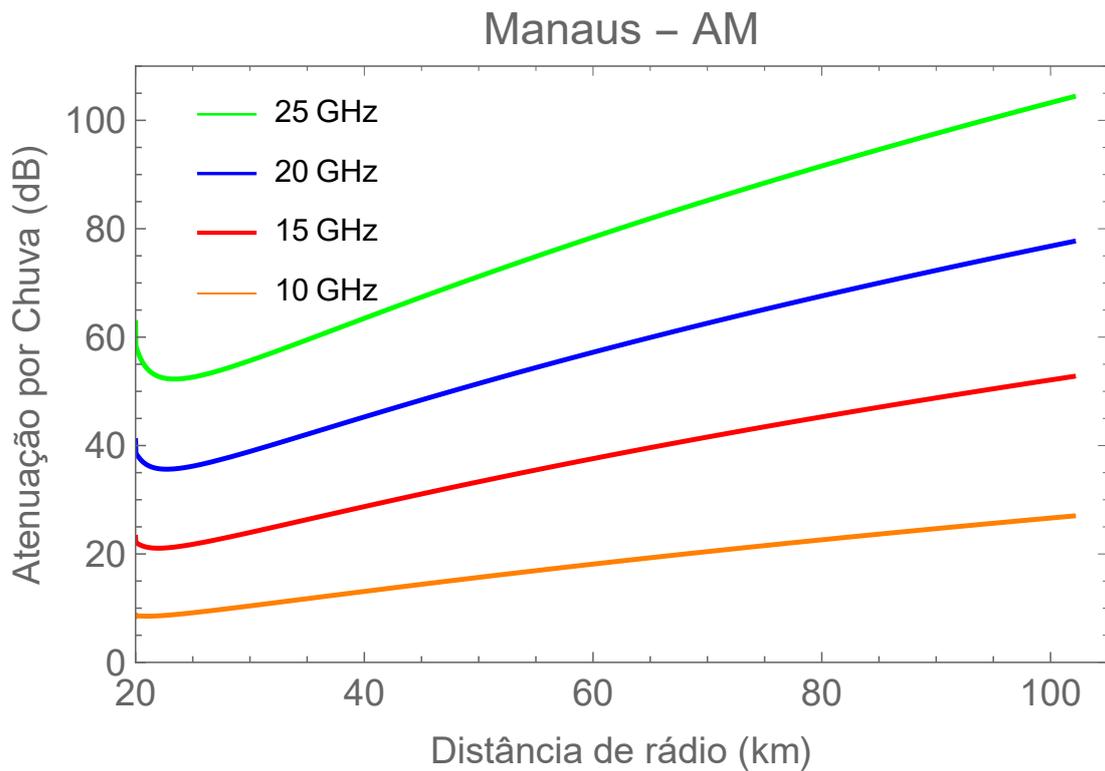


Figura 3.6: Atenuação por chuva com $p = 0,01\%$ em função da distância para Manaus-AM.

Como esperado, os sinais com as frequências de operação maiores sofrem mais com os efeitos da

chuva. Do ponto de vista comparativo entre as cidades, Cuiabá mostra a menor atenuação, ou seja é a melhor das quatro cidades nesse aspecto, já que no pior cenário (maior frequência utilizada - 25 GHz, e maior distância de rádio possível - 100 km) apresenta atenuação por chuva por volta de 50 dB. Após Cuiabá, a cidade com melhor desempenho é Curitiba que, no seu pior cenário, apresenta atenuação por chuva em torno de 65 dB, em seguida vem a cidade de Brasília com atenuação por chuva no pior cenário em 75 dB. O pior desempenho pertence à cidade de Manaus que possui atenuação acima de 100 dB em seu pior cenário.

A mesma classificação é válida para o aumento da atenuação de uma frequência para outra, ou seja, o aumento do espaçamento entre as curvas. Por exemplo no caso de Cuiabá, no qual a atenuação inicial quando o HAPs está logo acima do receptor (20 km de distância) e operando na frequência de 20 GHz, é pouco maior que 15 dB, já na mesma distância mas com a frequência de 25 GHz a atenuação é 25 dB, configurando um espaçamento de 10 dB. Nos casos de Curitiba, Brasília e Manaus esse mesmo espaçamento é, respectivamente, 12, 15 e 20 dB, sendo que na distância de 100 km esse espaçamento se configura maior ainda.

Com isso percebe-se a influência da taxa de chuva excedida para p igual a 0,01% do tempo de um ano médio ($R_{0,01}$): à medida que este valor aumenta (Cuiabá - 30, Curitiba - 60, Brasília - 80 e Manaus - 100), maior será a atenuação no canal.

No segundo estudo, como discorrido anteriormente, a frequência foi fixada em 20 GHz e o percentual p de chuva foi variado, recebendo os valores de 0,01%, 0,1%, 1,0% e 10%.

Esse percentual representa a parte do tempo na qual o serviço pode ficar indisponível devido a atenuação por chuva. Em planejamentos com maior folga para falhas, pode ser aceitável que o serviço esteja disponível 90% do tempo referente a um ano médio, assim o percentual de indisponibilidade de serviço ocasionado por uma atenuação maior do que o planejado devido a chuvas deve ser no máximo 10%. Já em planejamentos mais rígidos demanda-se que o serviço esteja disponível, por exemplo, 99,99% do tempo, o que faz com que o percentual de chuva excedido ao planejado que possa afetar o planejamento seja de 0,01%.

Isso significa que, ao se analisar a atenuação por chuva de acordo com esse percentual p , quanto menor o p maior vai ser a influência da atenuação na disponibilidade do serviço, ou seja, essa atenuação por chuva excedida vai ser mais significativa em percentuais pequenos e deverá ser considerada no planejamento e simulação do enlace.

Os resultados das simulações desses casos que variam o percentual p para as cidades estão apresentados nas Figuras 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10.

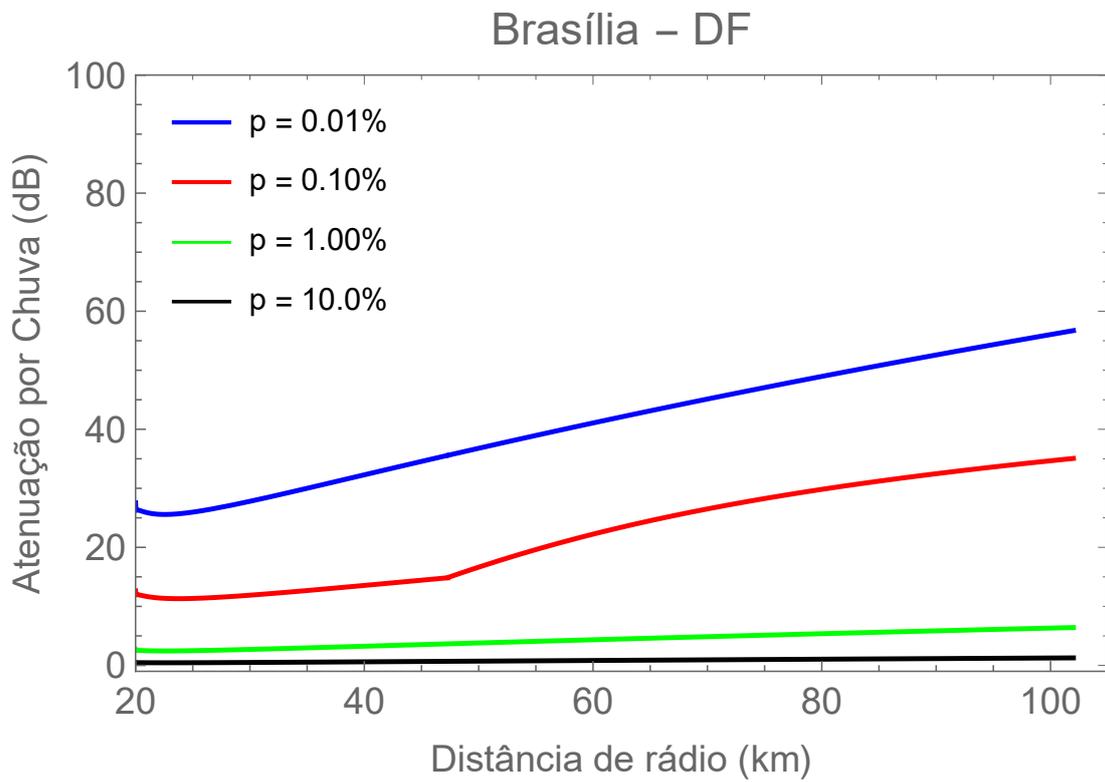


Figura 3.7: Atenuação por chuva com $f = 20GHz$ em função da distância para Brasília-DF.

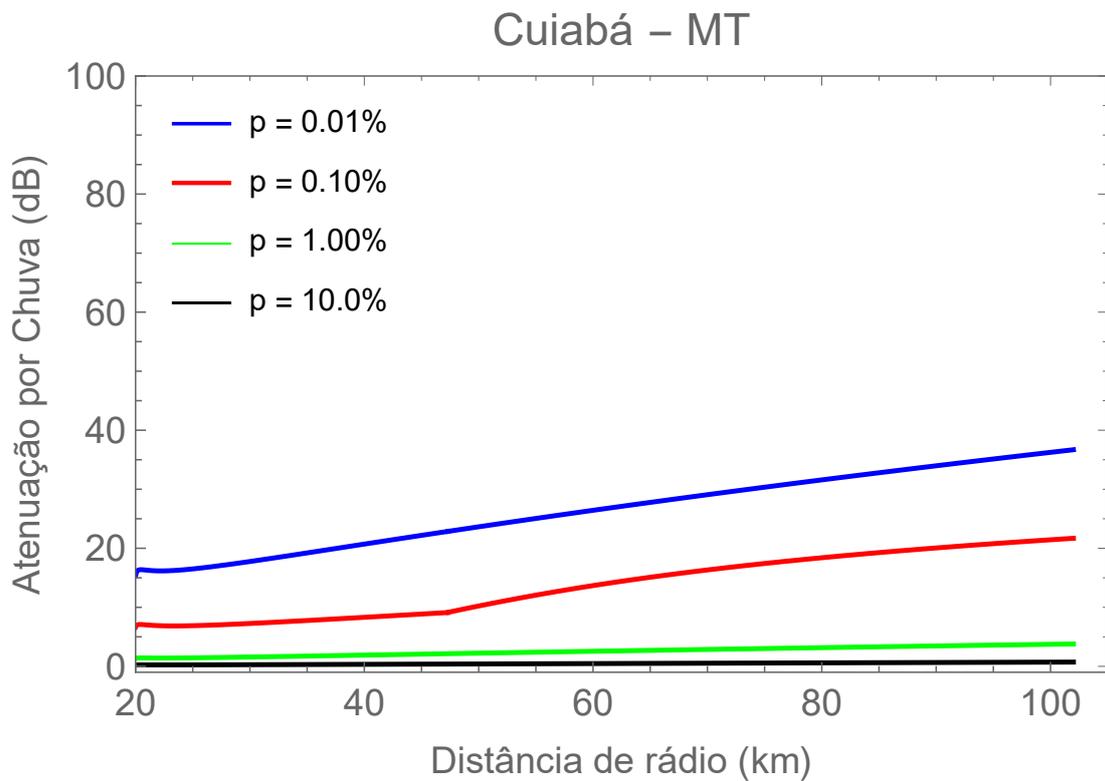


Figura 3.8: Atenuação por chuva com $f = 20GHz$ em função da distância para Cuiabá-MT.

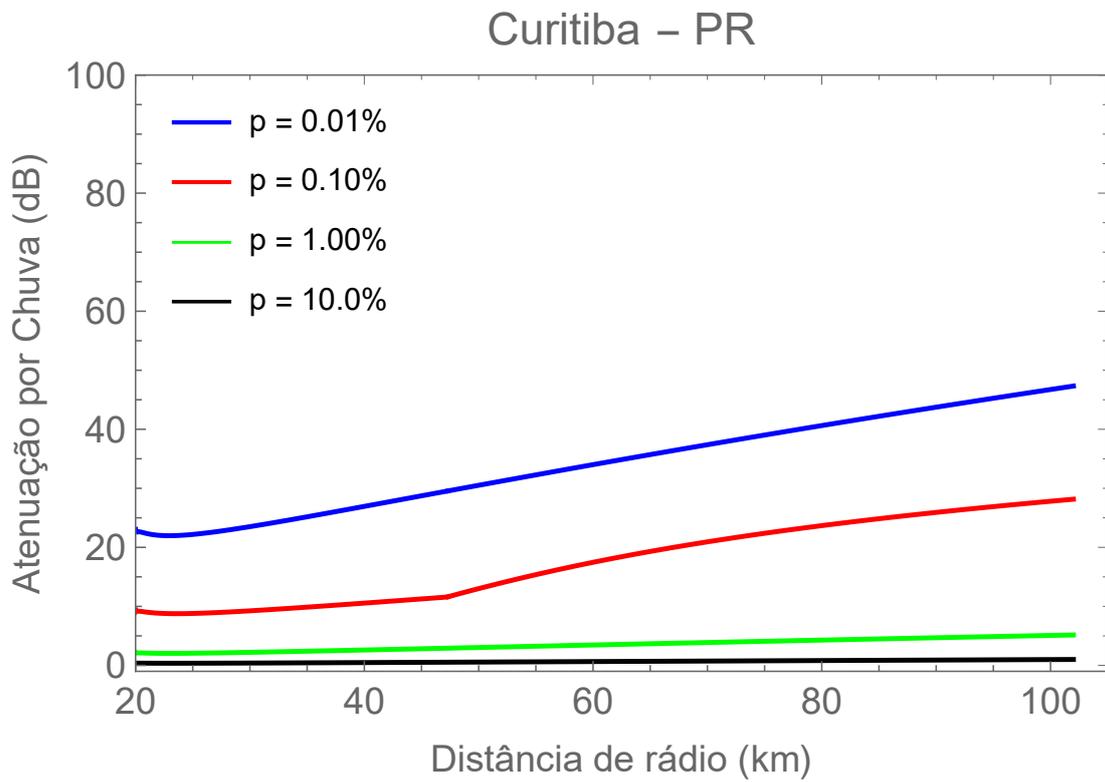


Figura 3.9: Atenuação por chuva com $f = 20GHz$ em função da distância para Curitiba-PR.

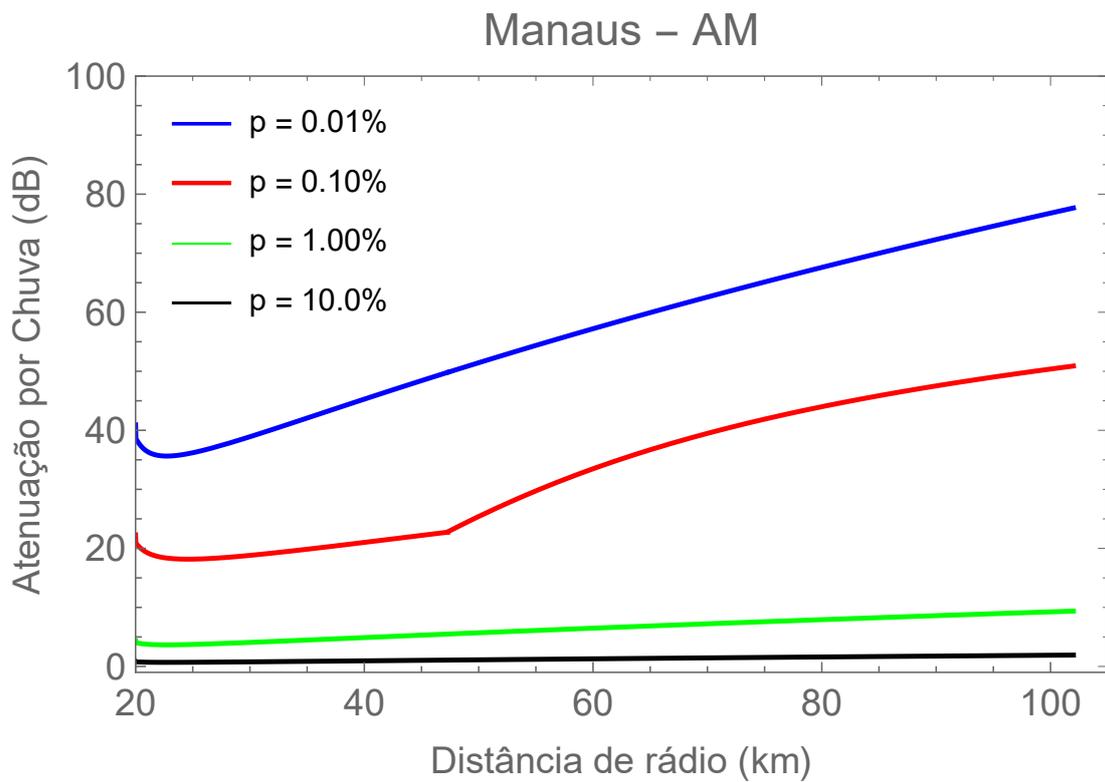


Figura 3.10: Atenuação por chuva com $f = 20GHz$ em função da distância para Manaus-AM.

Ao analisar os gráficos apresentados, conclui-se que as atenuações por chuva para p igual a 0,01% e 0,1% são muito mais significantes do que nos casos de p igual a 1,0% e 10%, como abordado anteriormente, sendo imprescindível para o planejamento da rede considerar o cenário de aumento da precipitação e sua conseqüente atenuação. Além da influência do percentual p , as diferenças no valor da $R_{0,01}$ para cada cidade também implicam na intensidade da atenuação, principalmente para p igual a 0,01% e 0,1%.

3.3 Atenuação por Nuvens

Para a obtenção das curvas de atenuação por nuvem, a frequência de comunicação foi o parâmetro variado e assumiu os valores de 10, 15, 20 e 25 GHz. Os resultados desse estudo são apresentados nas Figuras 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14.

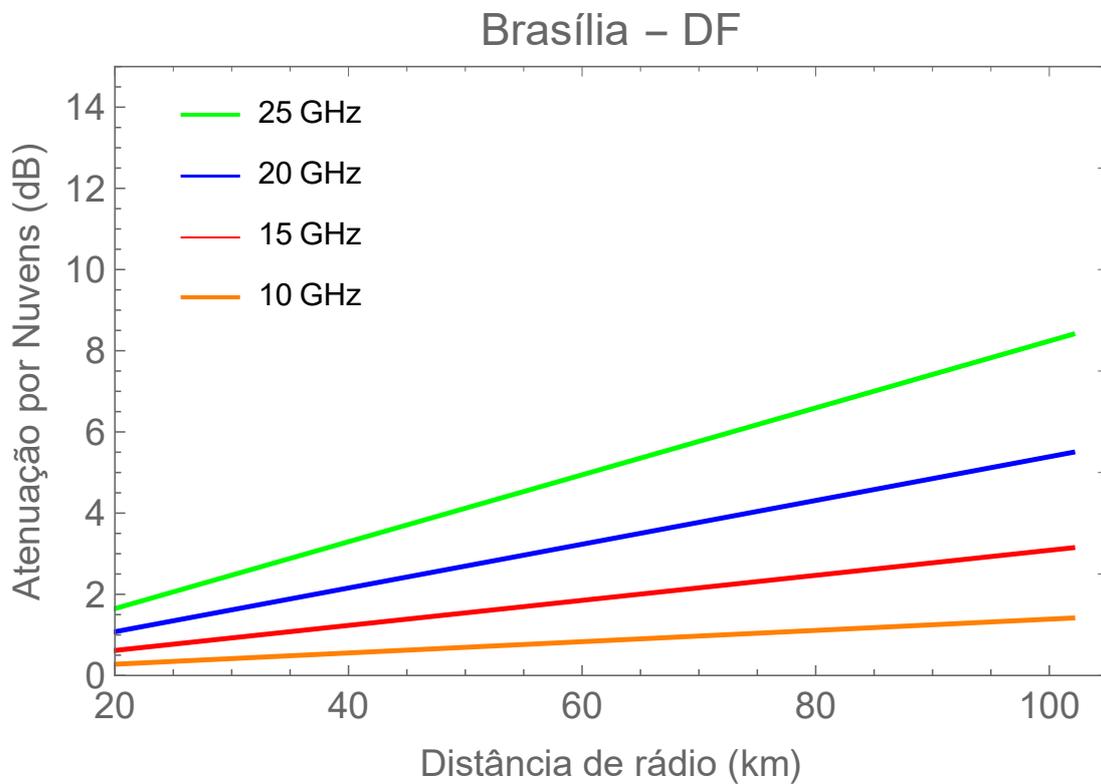


Figura 3.11: Atenuação por nuvens em função da distância para Brasília-DF.

Cuiabá – MT

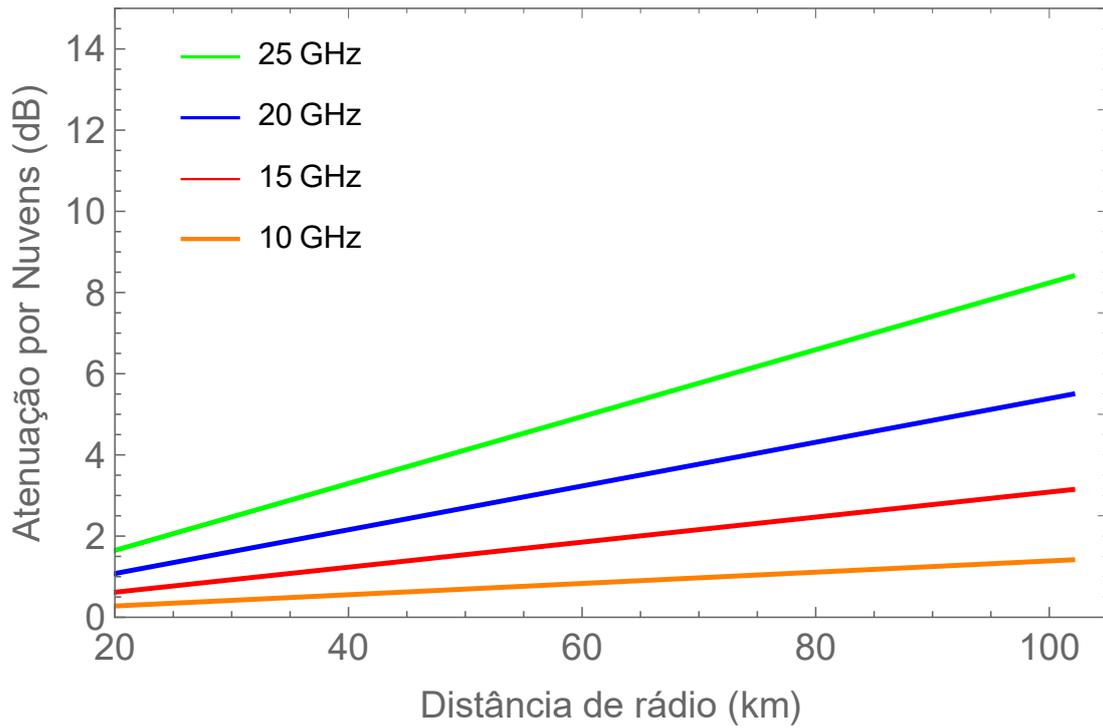


Figura 3.12: Atenuação por nuvens em função da distância para Cuiabá-MT.

Curitiba – PR

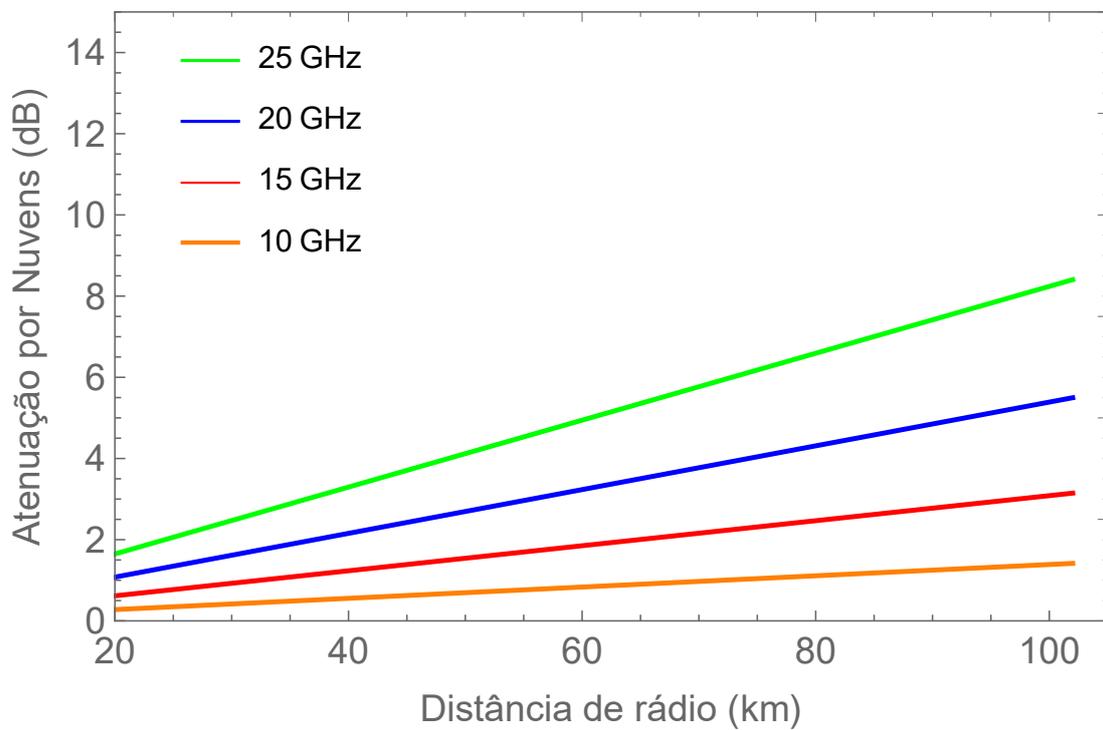


Figura 3.13: Atenuação por nuvens em função da distância para Curitiba-PR.

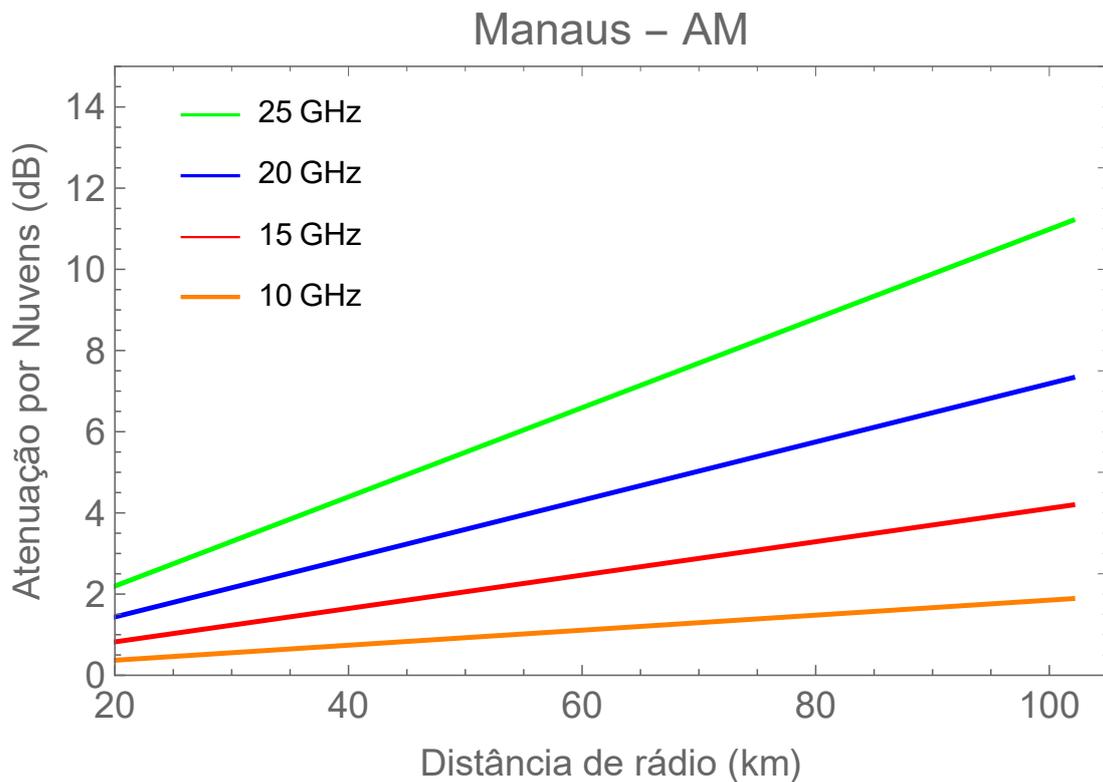


Figura 3.14: Atenuação por nuvens em função da distância para Manaus-AM.

Ao analisar as curvas obtidas identifica-se que o comportamento da atenuação por nuvens nas cidades de Brasília, Cuiabá e Curitiba é o mesmo. Isso se dá porque o conteúdo colunar total de água líquida, L_{red} , nessas três cidades é o mesmo e igual a 3 kg/m^2 , de acordo com os mapas contidos em [14]. A cidade de Manaus, por sua vez, possui L_{red} igual a 4 kg/m^2 e assim apresenta atenuação por nuvens maior do que as outras três cidades.

3.4 Atenuação por Absorção Gasosa

As curvas da atenuação por absorção gasosa, apresentadas nas Figuras 3.15, 3.16, 3.17 e 3.18, foram obtidas por meio da variação da frequência de comunicação que assumiu os valores de 10, 15, 20 e 25 GHz.

Na análise das curvas observa-se que as diferenças de uma cidade para outra são mínimas e praticamente imperceptíveis, isso se dá ao fato de a temperatura da superfície da terra T ser único parâmetro que varia entre as cidades, esse parâmetro influencia na determinação da pressão parcial do vapor de água (Equação 2.37) que possui um peso menor nos resultados do modelo de previsão de atenuação por absorção gasosa.

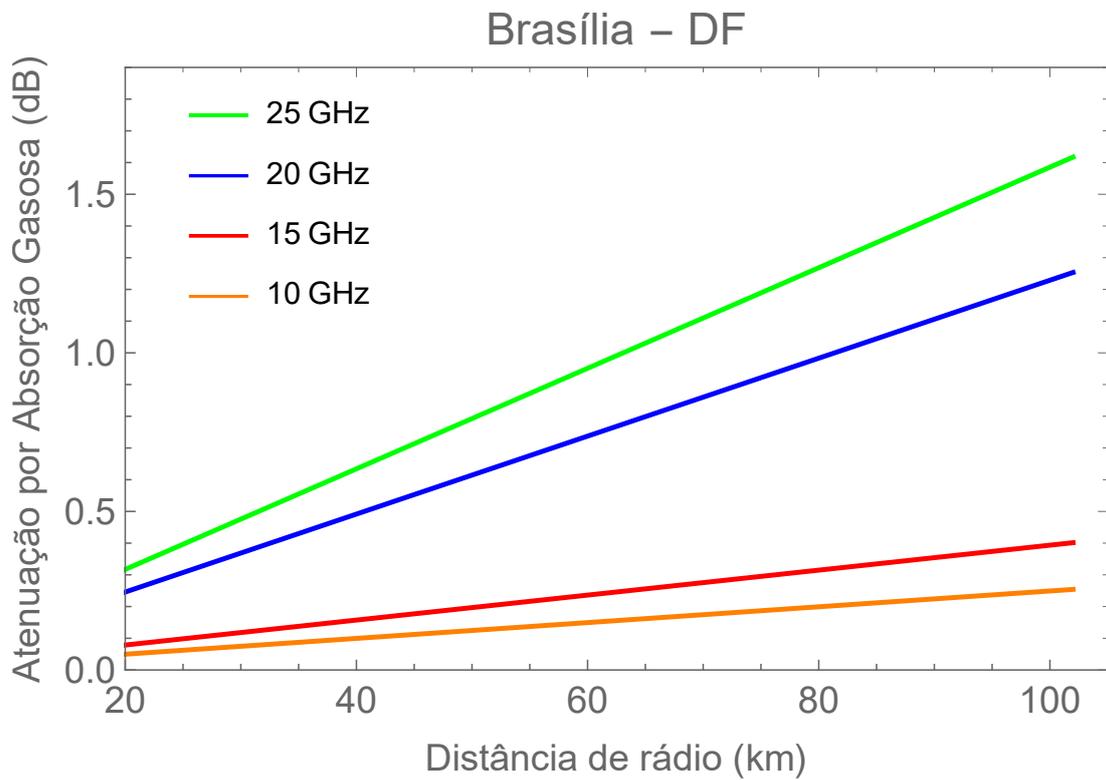


Figura 3.15: Atenuação por absorção gasosa em função da distância para Brasília-DF.

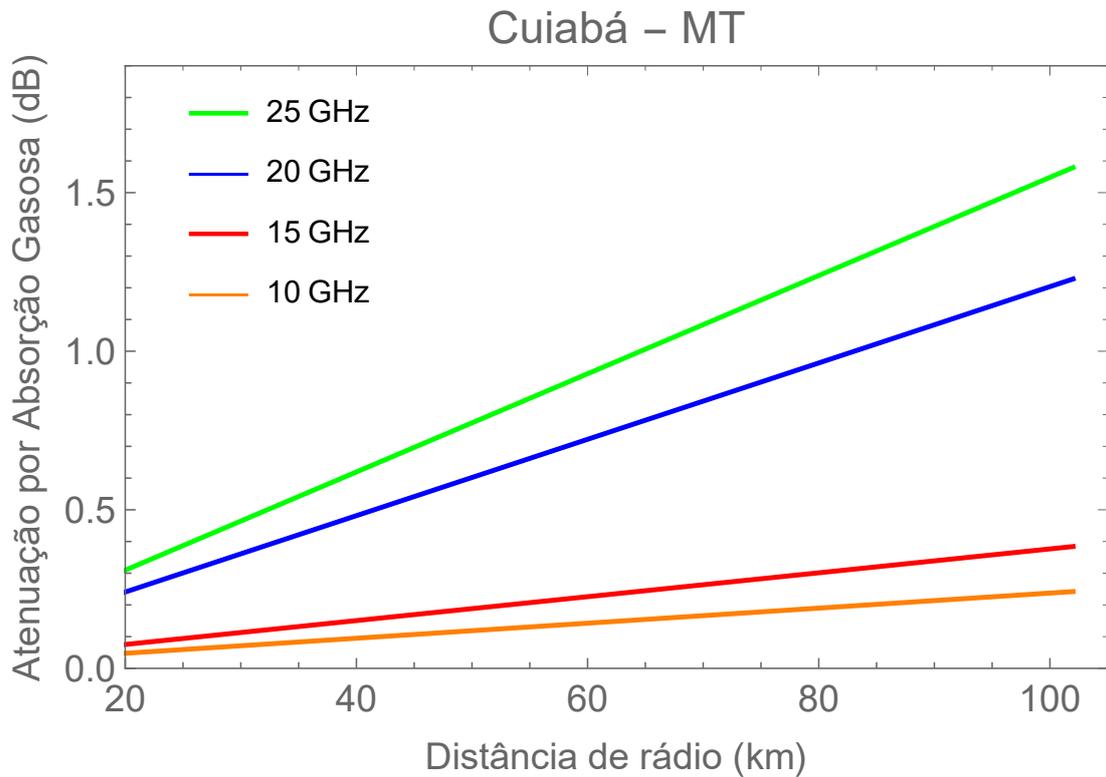


Figura 3.16: Atenuação por absorção gasosa em função da distância para Cuiabá-MT.

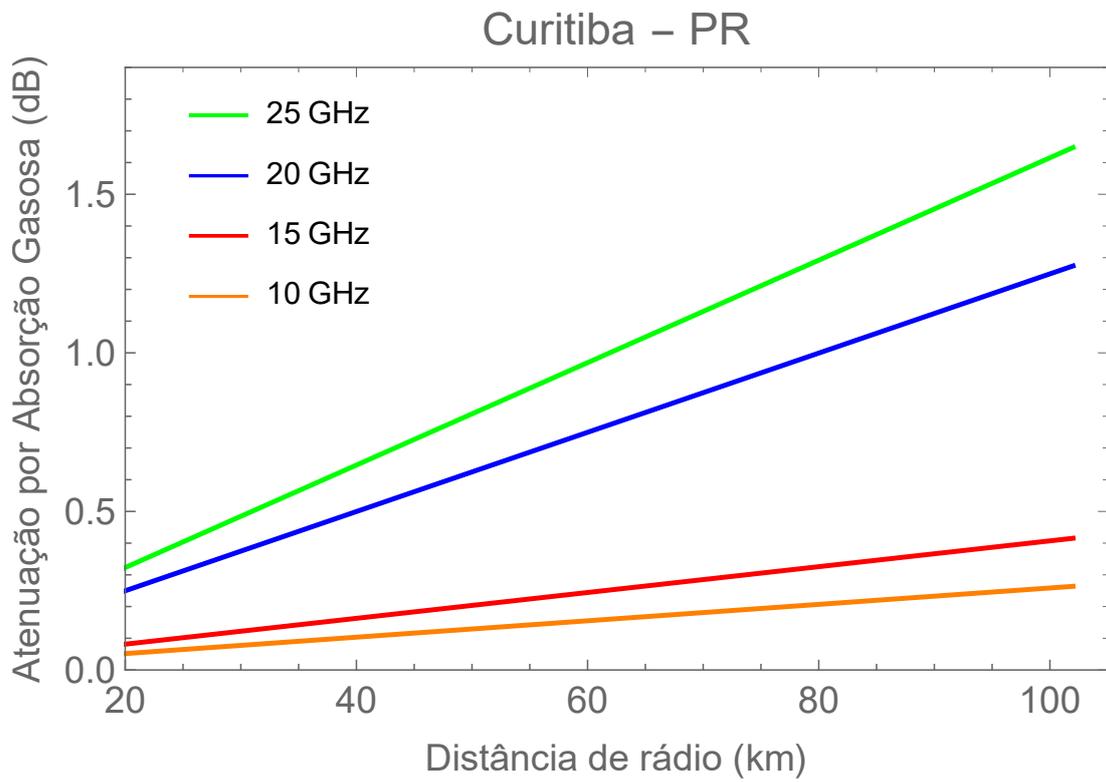


Figura 3.17: Atenuação por absorção gasosa em função da distância para Curitiba-PR.

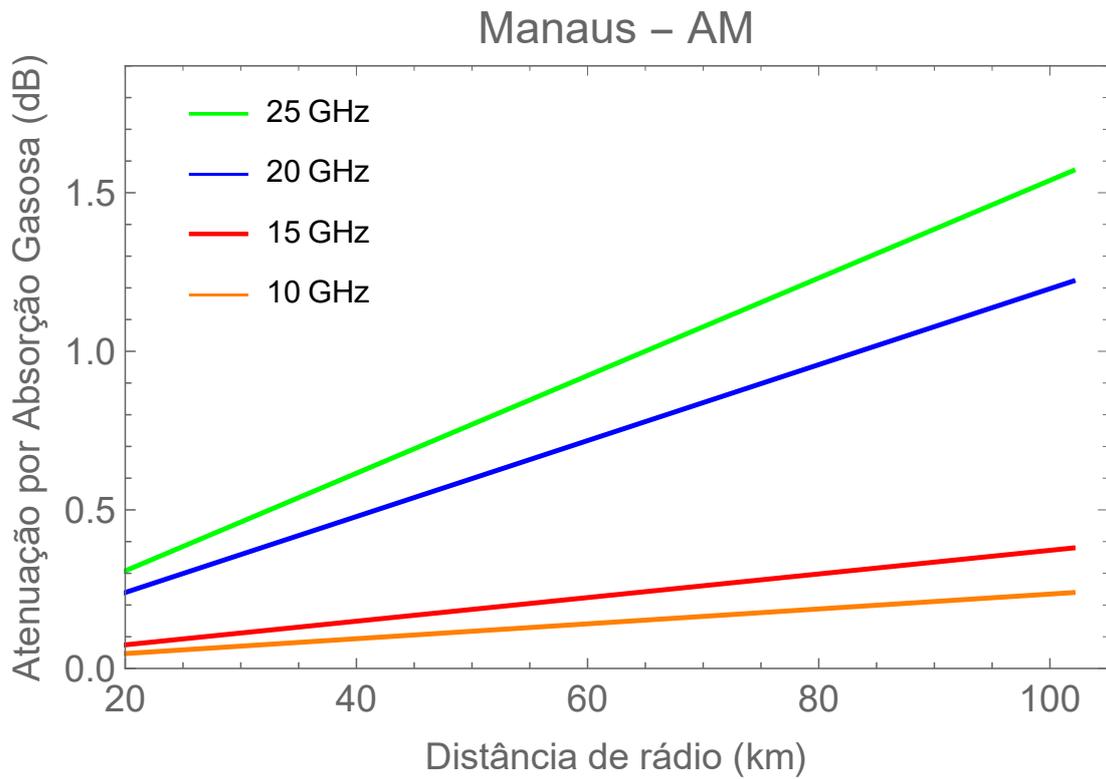


Figura 3.18: Atenuação por absorção gasosa em função da distância para Manaus-AM.

3.5 Ajuste no Modelo de Perda de Percurso

Por meio dos resultados obtidos é possível observar que, dentre os tipos de atenuação por efeitos climáticos e atmosféricos analisados no início deste capítulo, a chuva é o fenômeno que tem mais efeito na comunicação, entretanto os outros dois não podem ser desprezados pois tornam o modelo de atenuação do sinal mais preciso.

Para analisar a potência recebida pelo receptor de forma mais precisa, ou seja, considerando os efeitos de atenuação por chuva, nuvens e absorção gasosa é necessário adaptar o modelo de perda de percurso no espaço livre. O ajuste consiste na combinação das atenuações desses fenômenos (atmosféricos e climáticos) com o modelo de atenuação no espaço livre, e assim utilizar essa nova perda de percurso nos cálculos de potência.

A atenuação correspondente aos efeitos climáticos e atmosféricos [10] é representada por

$$A_T = A_G + A_C + A_R \quad , \quad (3.1)$$

em que A_G é a atenuação por absorção gasosa, A_C por nuvens e A_R por chuva.

Dessa forma o ajuste de perda de percurso proposto é representado pelo $Loss_2$ descrito na Equação (3.2) a seguir.

$$Loss_2(dB) = A_T + FSPL. \quad (3.2)$$

Assim, para obter a potência recebida, utiliza-se, na Equação 2.1, o valor de $Loss_2$ em substituição do valor de $Loss$ obtido originalmente conforme o modelo FSPL descrito na Equação 2.2. Dessa forma a potência recebida será determinada por

$$P_r(dBm) = P_t + G_t + G_r - Loss_2. \quad (3.3)$$

3.5.1 Resultado da Perda de Percurso

Após fixar a frequência em 20 GHz e variar os percentuais p de chuva em 0,01%, 0,1%, 1,0% e 10% para a obtenção de $Loss_2$ na Equação 3.2, foram obtidas as curvas de da Perda de Percurso em função da distância de rádio do enlace. A título de comparação foi acrescentada no gráfico a curva de perda de percurso no espaço livre de acordo com a Equação 2.2. Os resultados alcançados são apresentados nas Figuras 3.19, 3.20, 3.21 e 3.22.

Observa-se que a influência dos fenômenos climáticos e atmosféricos é significativa para o desempenho do enlace, principalmente nos valores de p igual a 0,01% e 0,1%. Manaus, devido à sua alta atenuação por chuva, se destaca com os maiores valores de perda de percurso.

Brasília – DF

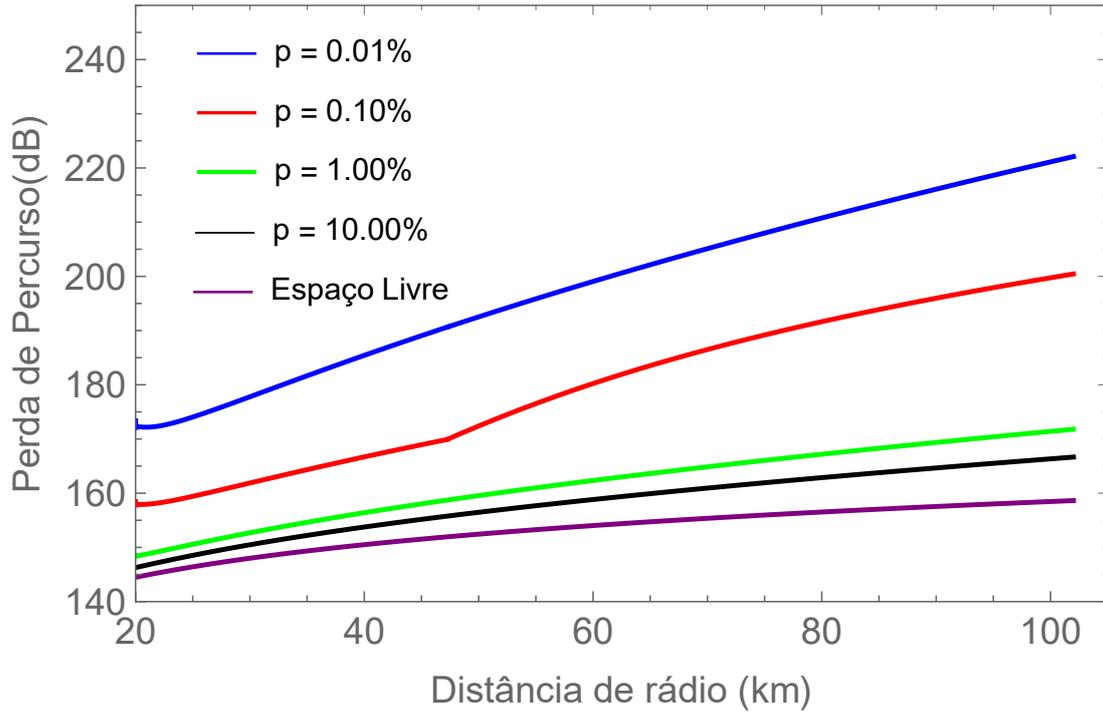


Figura 3.19: Perda de percurso em função da distância para Brasília-DF.

Cuiabá – MT

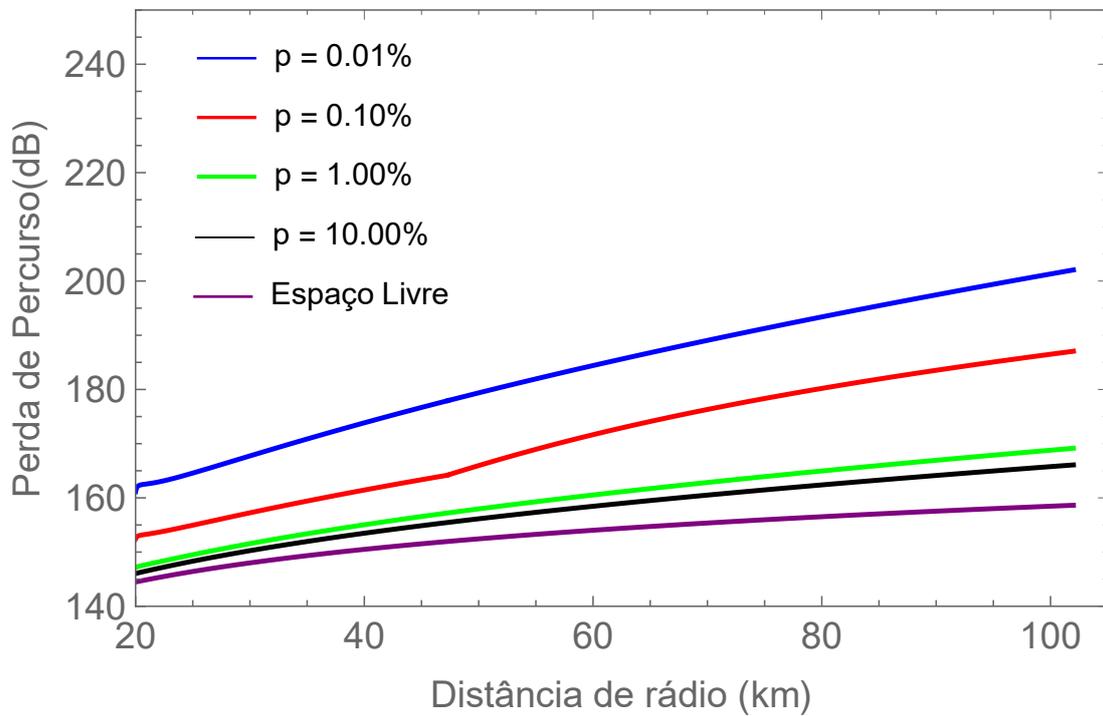


Figura 3.20: Perda de percurso em função da distância para Cuiabá-MT.

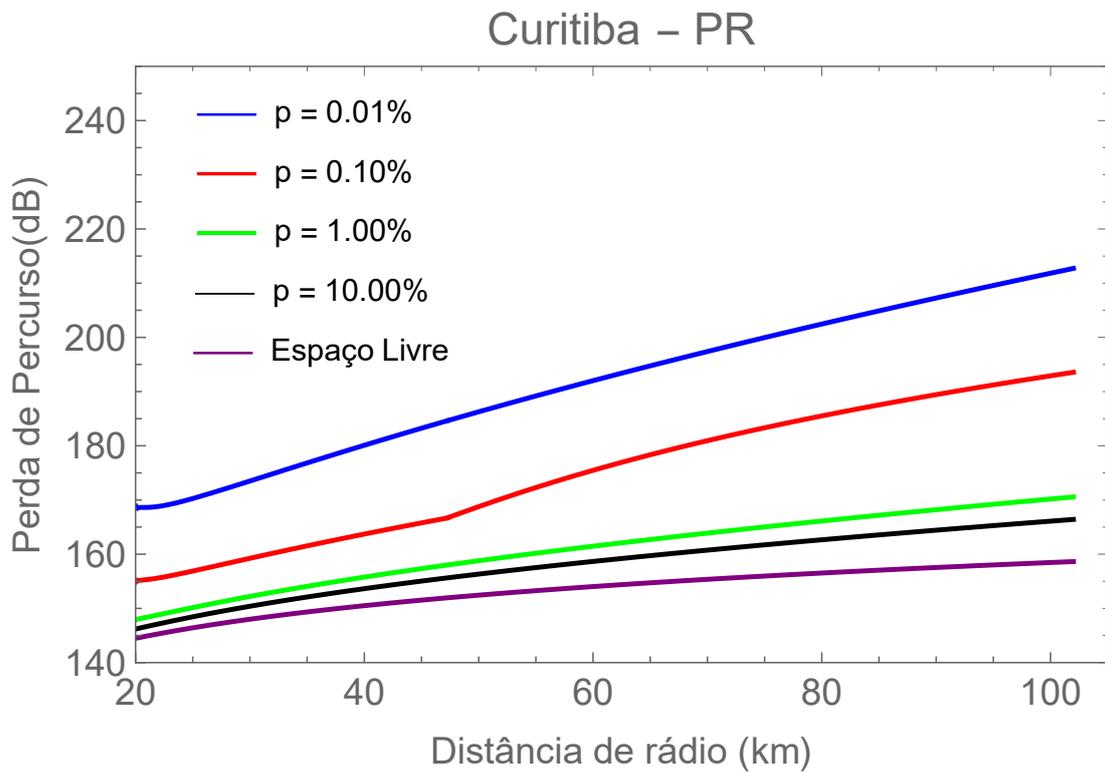


Figura 3.21: Perda de percurso em função da distância para Curitiba-PR.

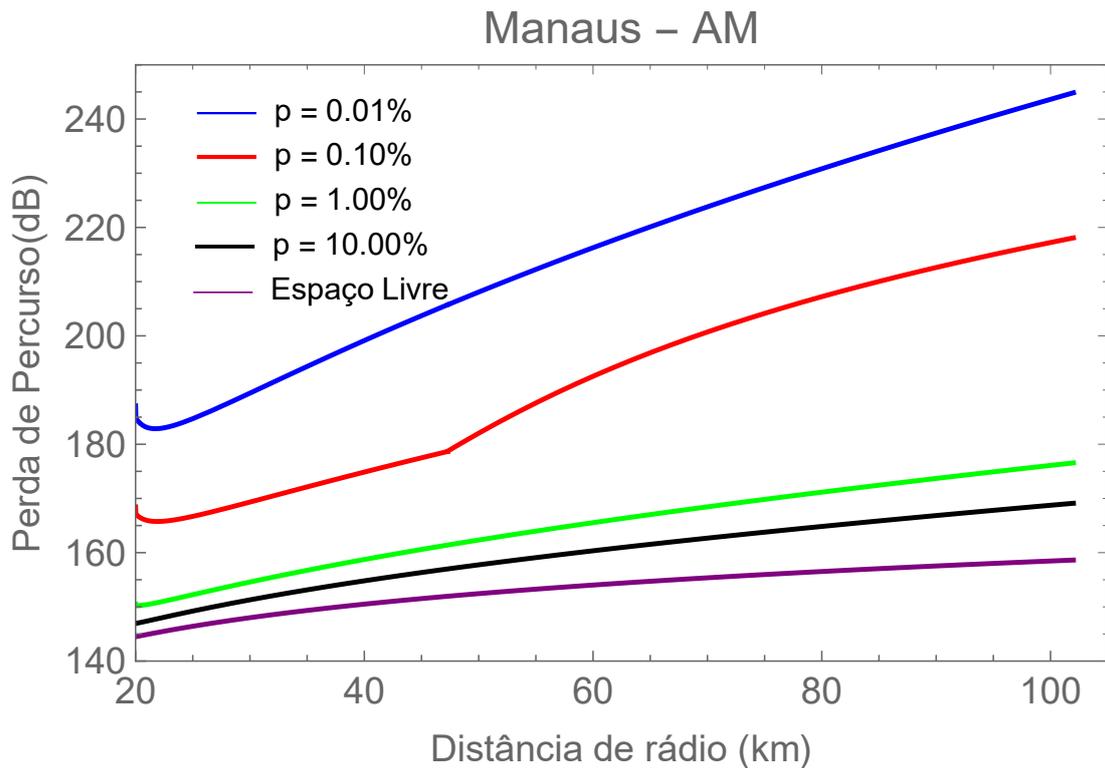


Figura 3.22: Perda de percurso em função da distância para Manaus-AM.

3.5.2 Resultado da Potência Recebida

As curvas de potência recebida para cada cidade foram obtidas utilizando as respectivas perdas de percurso para o espaço livre $Loss$ e segundo o modelo proposto $Loss_2$ (com p assumindo os

valores de 0,01%, 0,1%, 1,0% e 10%) para os parâmetros de balanceamento de enlace contidos na Tabela 3.1. Os gráficos com os resultados da potência recebida em função da distância de rádio para cada cidade estão nas Figuras 3.23, 3.24, 3.25 e 3.26.

Ao analisar as curvas observa-se que, principalmente em Brasília e Manaus, a potência recebida cai consideravelmente quando a distância de rádio aumenta. Por exemplo, para p igual a 0,01% e distância igual a 80 km, a potência recebida no enlace de Brasília é aproximadamente -120 dBm e a potência recebida no enlace de Manaus é menor do que -130 dBm. Nesses casos o que pode permitir a viabilidade da comunicação HAPs é a linha de visada entre o receptor e transmissor, entretanto é necessário analisar a capacidade do canal, para realmente verificar se a comunicação via HAPs é viável.

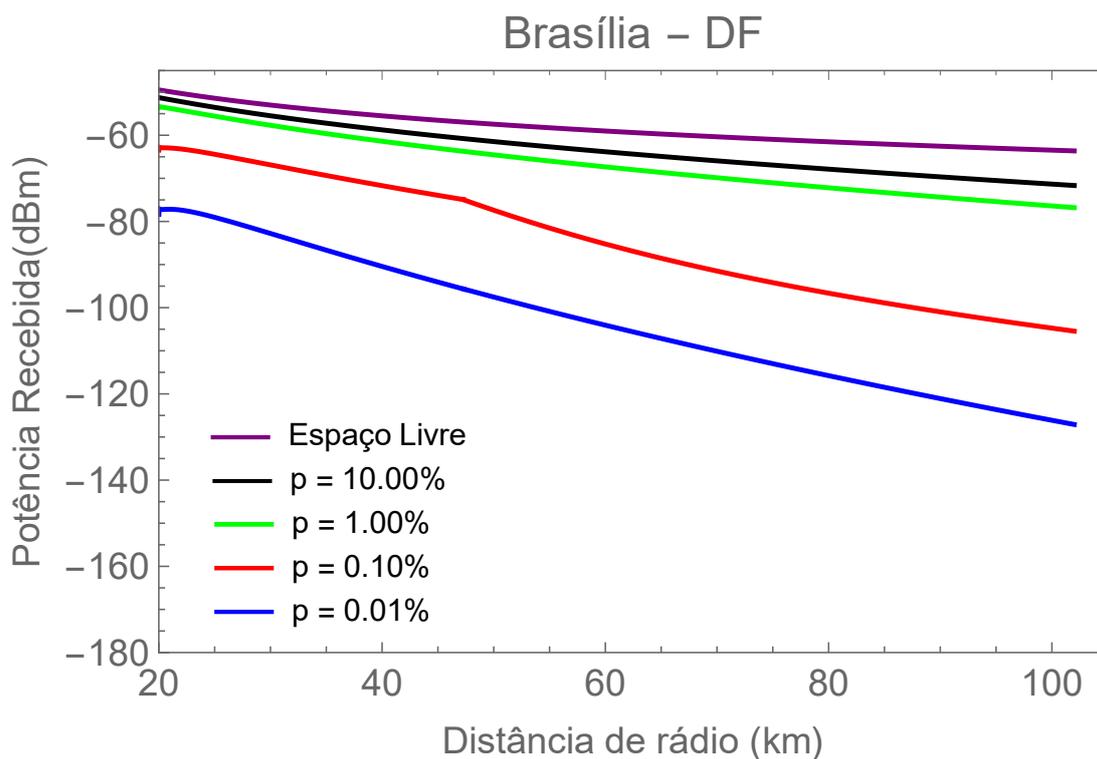


Figura 3.23: Potência recebida em função da distância para Brasília-DF.

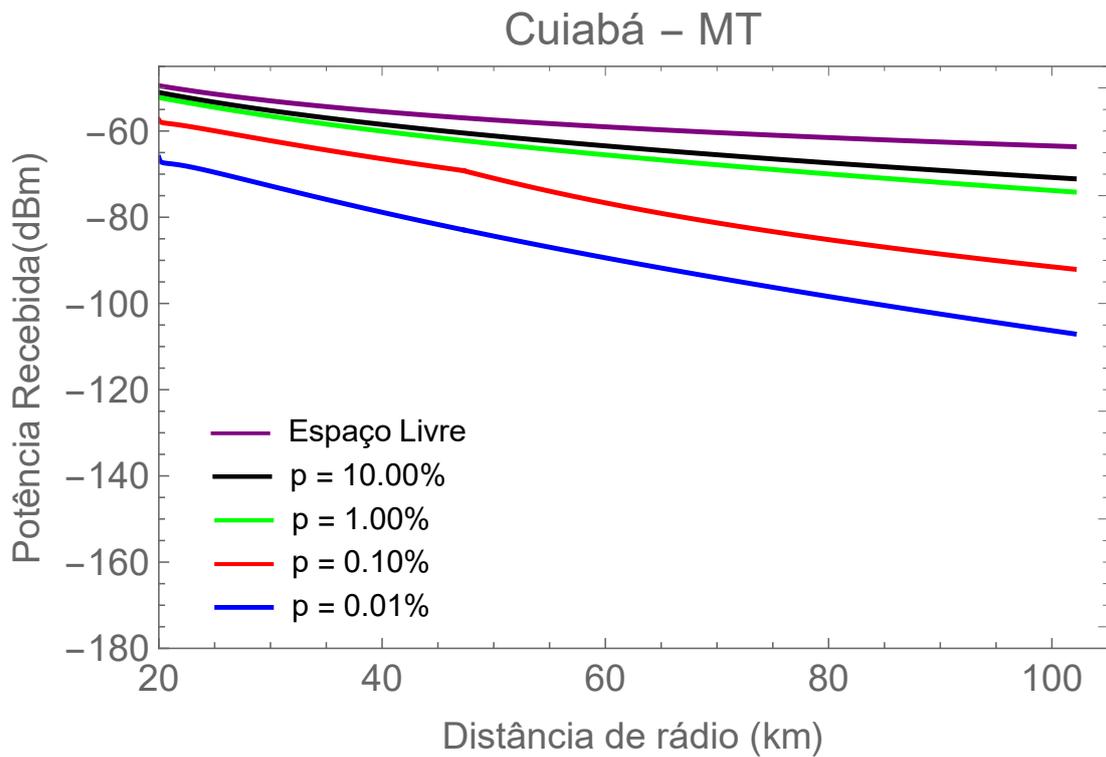


Figura 3.24: Potência recebida em função da distância para Cuiabá-MT.

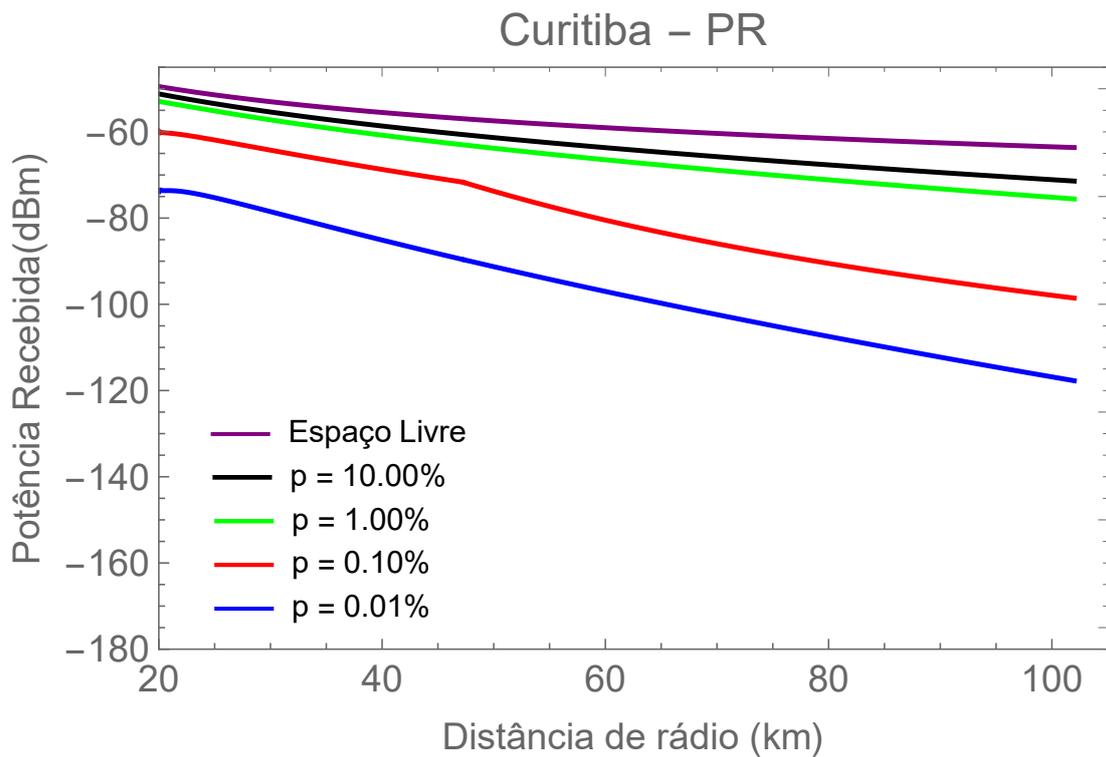


Figura 3.25: Potência recebida em função da distância para Curitiba-PR.

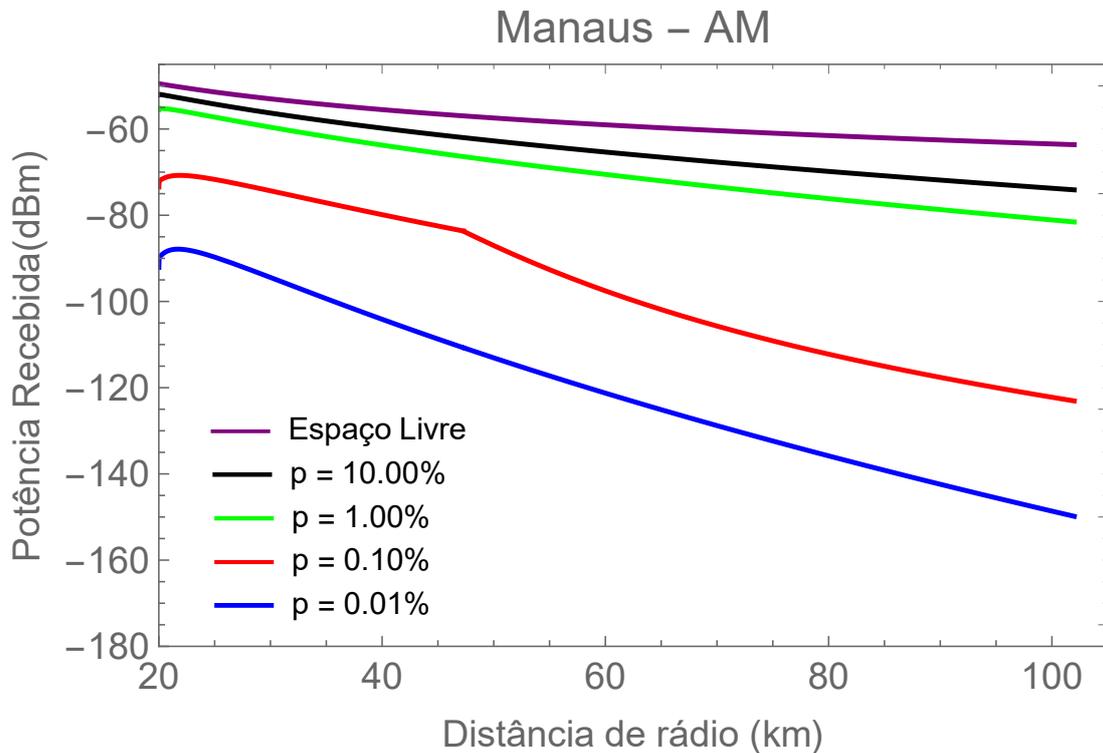


Figura 3.26: Potência recebida em função da distância para Manaus-AM.

3.6 Capacidade do Canal

3.6.1 Capacidade de Shannon

Ao implementar o cálculo da capacidade de Shannon para as potências recebidas representadas nas Figuras 3.23, 3.24, 3.25 e 3.26, foi possível observar a quantidade de bits por segundo que podem trafegar sem erro no canal em função da distância de rádio, esses resultados estão apresentados nas Figuras 3.27, 3.28, 3.29 e 3.30.

Ao observar as figuras, fica claro que não considerar as atenuações por efeitos climáticos atmosféricos e calcular a capacidade do canal, superestima o desempenho do enlace. A comunicação é prejudicada quando a quantidade de bits por segundo que possa trafegar sem erro no canal diminui, atualmente, com menos de 10 Mbps a viabilidade de tráfego de dados fica comprometido. Para fins de comparação, considera-se que a comunicação se torna inviável quando a taxa atinge 0 Mbps. No caso de p igual a 0,1%, a comunicação se torna inviável em Brasília próximo aos 100 km, em Cuiabá e Curitiba não é identificada inviabilidade antes dos 102 km e, em Manaus, aos 70 km o enlace se torna inviável. Para p igual a 0,01%, a situação é ainda mais crítica; a inviabilidade é atingida em Brasília próximo aos 60 km, em Cuiabá o enlace fica inviável próximo aos 95 km, na cidade de Curitiba isso ocorre em torno de 75 km e, em Manaus, próximo aos 40 km.

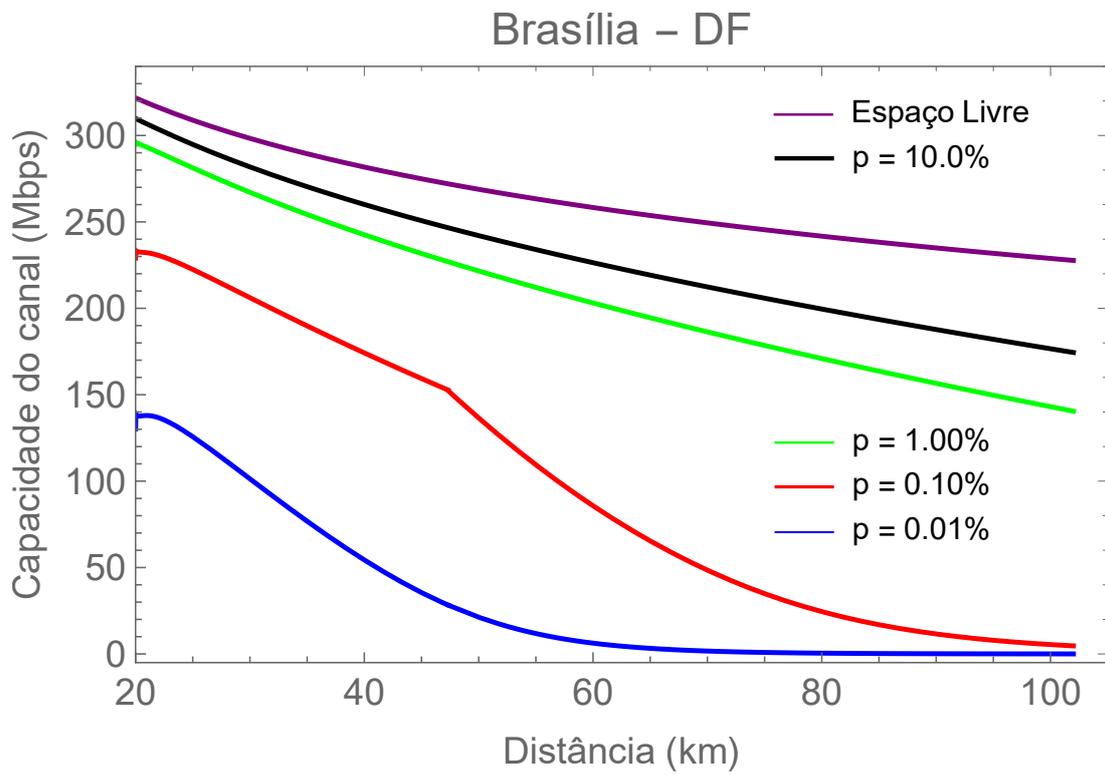


Figura 3.27: Capacidade de Shannon em função da distância para Brasília-DF.

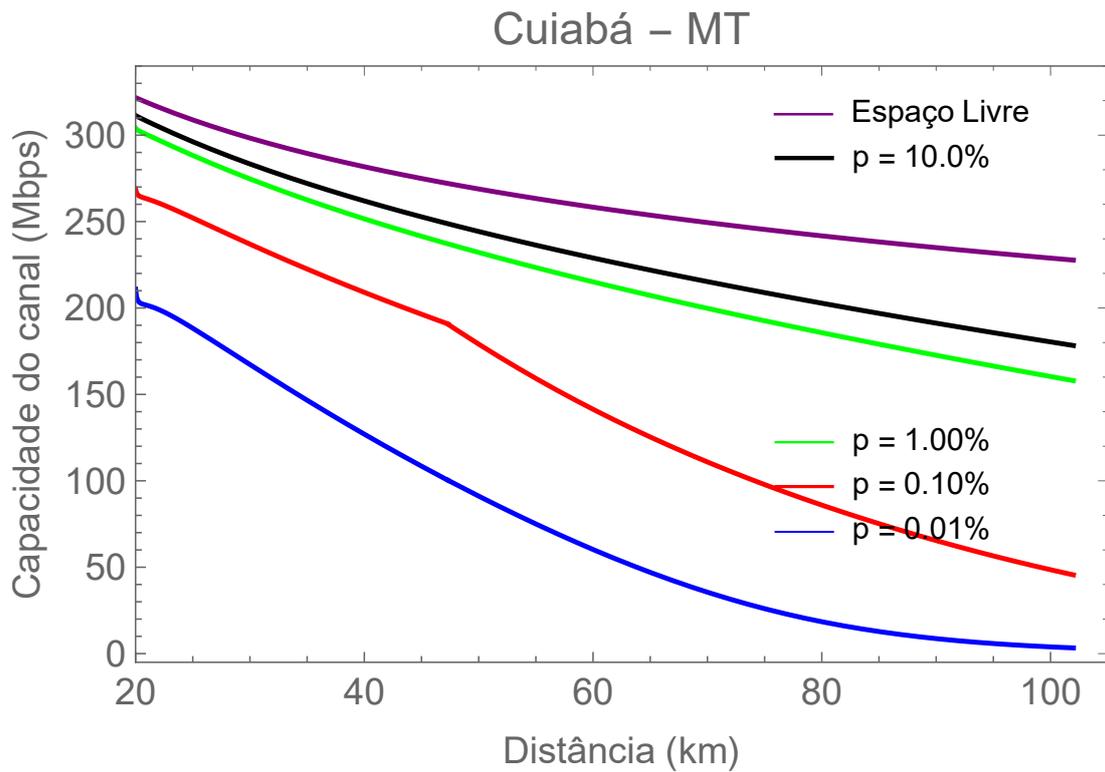


Figura 3.28: Capacidade de Shannon em função da distância para Cuiabá-MT.

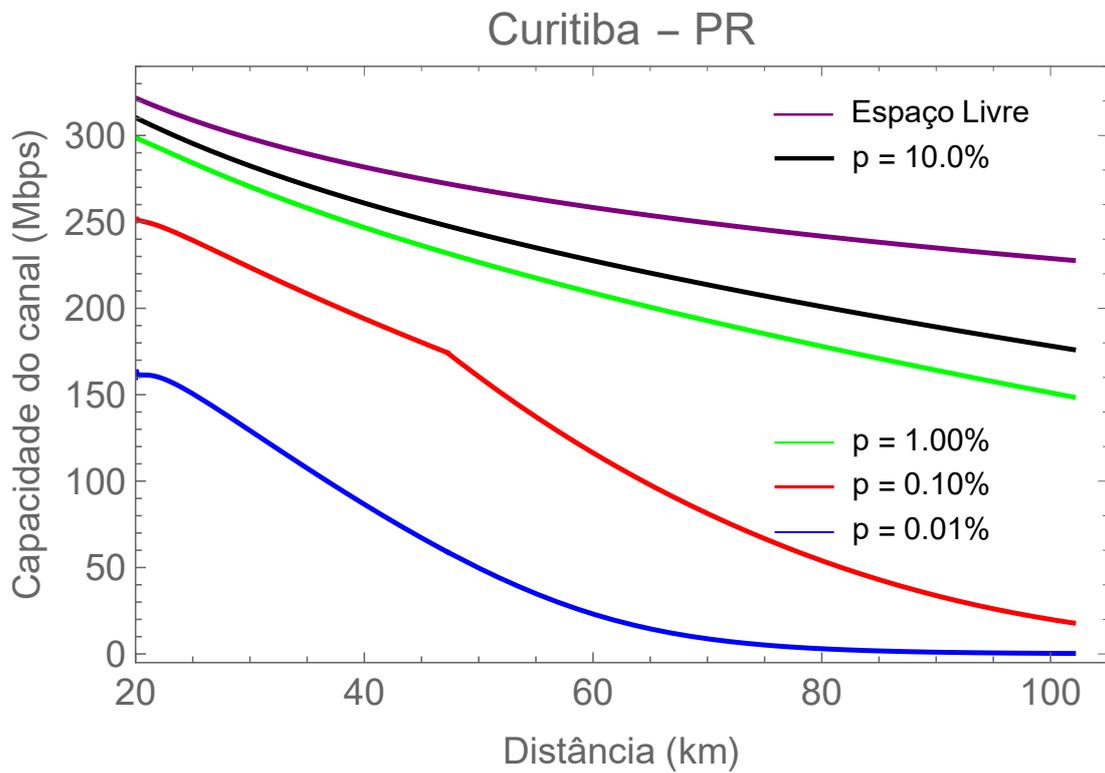


Figura 3.29: Capacidade de Shannon em função da distância para Curitiba-PR.

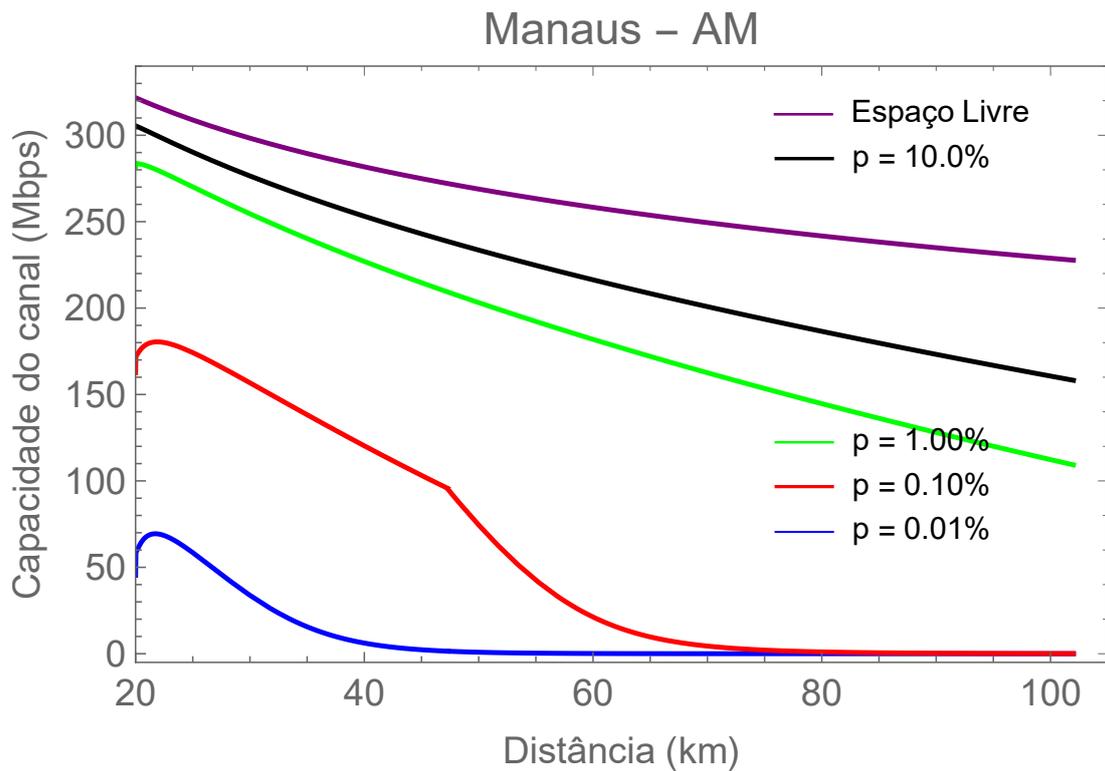


Figura 3.30: Capacidade de Shannon em função da distância para Manaus-AM.

Esse resultado chama a atenção para a necessidade de um planejamento de rede detalhado

de forma a viabilizar a comunicação por HAPs nas regiões brasileiras, principalmente em cidades com mais precipitação, já que a capacidade do canal depende fortemente dos percentuais p de chuva. Como forma de solucionar essa situação, pode-se usufruir de mais HAPs para que o raio de cobertura por HAP fique mais limitado e a distância de rádio entre receptor e transmissor menor. Também é necessário considerar que nos períodos de seca, como os que ocorrem na cidade de Brasília, a capacidade do canal decai de forma gradual e similar ao modelo de espaço livre, assim, o que fora antes configurado fica superdimensionado e aumenta as chances de interferência co-canal, dessa forma também é necessário reconfigurar os enlaces e o número de HAPs.

3.6.2 Capacidade Ergódica

Para a análise da Capacidade Ergódica utilizando o modelo de distribuição κ - μ Sombreado, há a possibilidade de variação de diferentes parâmetros para a obtenção de resultados em cenários distintos. Dentre as alterações disponíveis estão: a cidade de estudo, modelo de perda de percurso (espaço livre ou modelo espaço livre ajustado), percentual p de chuva, frequência de operação, parâmetro κ relacionado à componente de LOS, parâmetro μ relacionado ao multipercurso e o parâmetro m relacionado ao sombreamento.

De forma a tornar o estudo mais objetivo e eficiente, para obtenção das curvas de Capacidade Ergódica, configurou-se a frequência de operação em 20 GHz, a potência do ruído de fundo P_N em -98 dBm e utilizou-se a cidade de Manaus, por esta configurar o cenário cuja potência recebida é a mais prejudicada pelos efeitos de atenuação devido a fenômenos climáticos e atmosféricos. Todos os resultados obtidos para a cidade de Manaus servem para compreensão do que ocorreria nas outras cidades, a diferença está apenas nos valores de atenuação do sinal que variam de uma região para outra.

Os estudos referentes à Capacidade Ergódica são feitos em função da distância de rádio e relacionam a influência dos percentuais p de chuva ao peso dos parâmetros κ , μ e m e também a influência dos próprios parâmetros κ , μ e m entre si.

3.6.2.1 Capacidade Ergódica para diferentes percentuais p

Neste primeiro caso, a análise da capacidade em função da distância de rádio consiste em caracterizar como a capacidade, com parâmetros κ , μ e m fixos e comumente utilizados, varia de acordo com o percentual p de chuva para o modelo de perda de percurso ajustado e de acordo com o modelo de perda de percurso no espaço livre. As curvas foram obtidas para κ igual a 2, μ igual a 1 e m igual a 2, esse resultado é apresentado na Figura 3.31.

Neste caso de $\kappa = 2$, $\mu = 1$ e $m = 2$, observa-se que, assim como no caso da Capacidade de Shannon, o modelo de perda de percurso e o percentual p de chuva influenciam muito na Capacidade Ergódica. Como a Capacidade Ergódica é calculada em bps/Hz para obter a quantidade de bits por segundo que trafegam no canal aleatório sem erro basta multiplicar a capacidade ergódica pela largura de banda, definida como 20 MHz na Tabela 3.1.

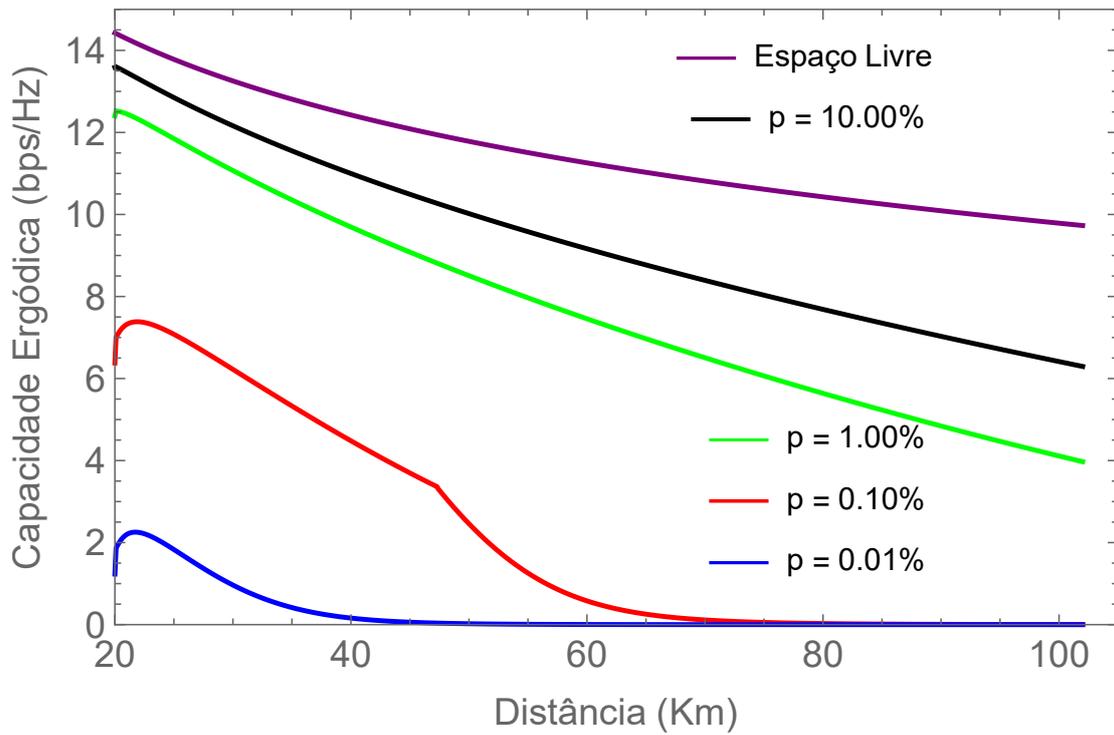


Figura 3.31: Capacidade Ergódica para $\kappa = 2$, $\mu = 1$ e $m = 2$ em função da distância para Manaus-AM.

Observa-se essa influência já bem clara no caso da distância de 30 km, a taxa para o Espaço Livre é 270 Mbps, já no caso de p igual a 1% esse valor cai para 220 Mbps, por fim para p igual a 0.1% e 0,01% esse valor é, respectivamente, 120 Mbps e 20 Mbps. Chama a atenção também o fato de que, no caso do Espaço Livre e de p igual a 10 e 1%, a comunicação é viável ao longo de toda a distância de rádio. Porém, para p igual a 0.1%, a comunicação se torna inviável antes de 65 km e, para p igual a 0,01%, a comunicação já se torna inviável a partir de 35 km. Mais a frente este trabalho analisará o desempenho do canal com o uso de diversidade, que pode ser uma ferramenta para aumentar a capacidade principalmente nesses casos em que a chuva excedida é maior (p igual a 0,1 e 0,01%).

De forma a prosseguir com os estudos de capacidade, será utilizado o percentual de p igual a 1% para obtenção de curvas com base na variação de dos valores de κ , μ e m . Assim, nos resultados a seguir, será possível identificar como a capacidade se comporta frente às diferentes configurações desses parâmetros.

3.6.2.2 Capacidade Ergódica para p igual a 1%

A Figura 3.32 apresenta as curvas de Capacidade Ergódica, para valor de κ mais baixo (0.5) e o valor de m igual a 1 (também considerado baixo), quando varia-se μ entre 0.1, 0.5, 1.5 e 3. Já a Figura 3.33 apresenta as curvas também variando μ entre 0.1, 0.5, 1.5 e 3 para κ mais baixo (0.5), entretanto com um valor de m mais alto e igual a 10. Percebe-se que para valores de κ mais baixos, independente de o m ser mais baixo ou mais alto, a variação do μ é significativa para capacidade enquanto este assume valores menores, após 0.5 a variação ou não de μ impacta menos

na capacidade.

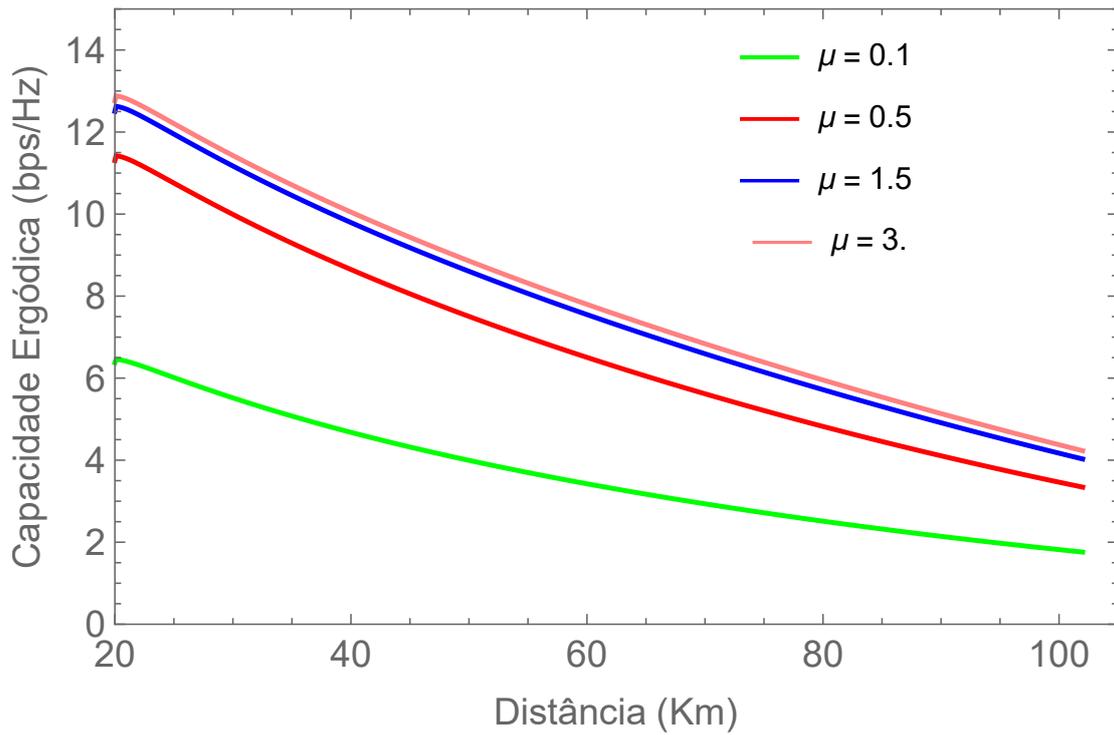


Figura 3.32: Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $\kappa = 0.5$ e $m = 1$ em função da distância para Manaus-AM.

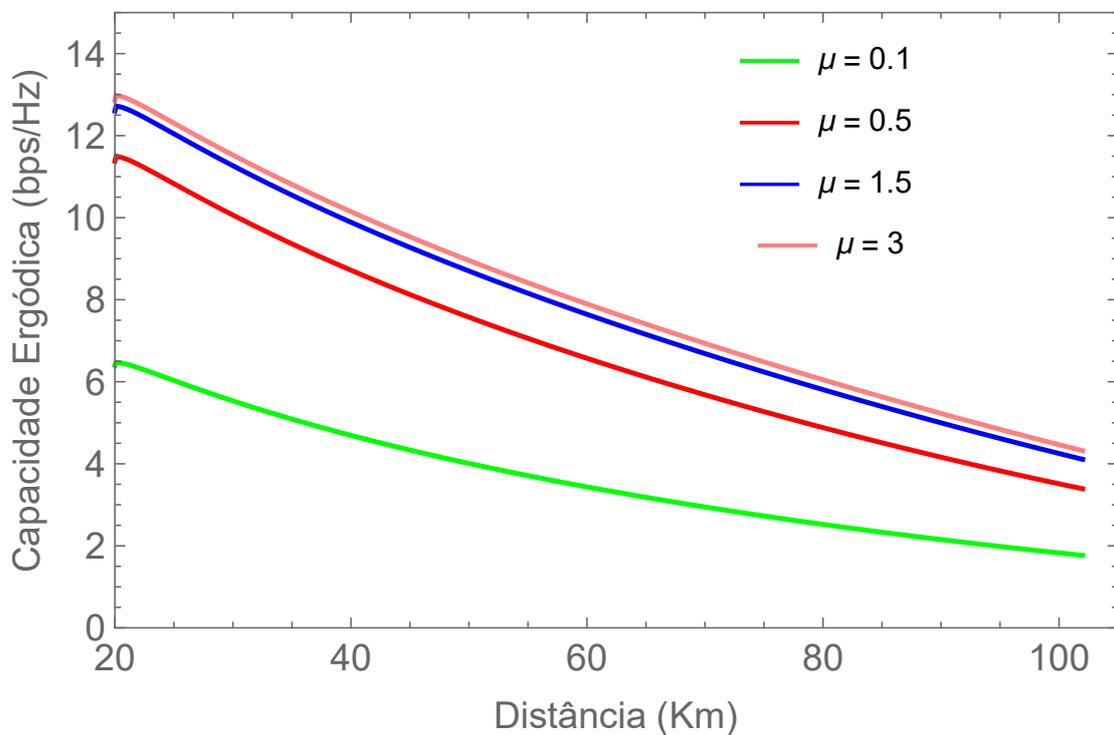


Figura 3.33: Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $\kappa = 0.5$ e $m = 10$ em função da distância para Manaus-AM.

A seguir as curvas obtidas são para analisar como é o comportamento da capacidade ao variar o μ para valores mais altos de κ . A Figura 3.34 apresenta as curvas de Capacidade Ergódica, para valor de κ igual a 10 e o valor de m igual a 1, quando varia-se μ entre 0,1, 0,5, 1,5 e 3. Já a Figura 3.35 apresenta as curvas também variando μ entre 0,1, 0,5, 1,5 e 3 para κ igual a 10, entretanto com um valor de m mais alto e igual a 10.

Observa-se que também para valores de κ mais altos, independente de o m ser mais baixo ou mais alto, a variação do μ é significativa para capacidade enquanto este assume valores menores, após 0.5 a variação de μ impacta ainda menos na capacidade. Também é possível visualizar que, no caso de valores de κ mais altos, a capacidade aumenta, isso se dá pelo fato da razão entre a componente dominante e as componentes difusas ser mais alta. Esse aumento também fica mais notável para m mais alto já que assim o sombreamento não é tão presente, conforme pode ser visto na Figura 3.35.

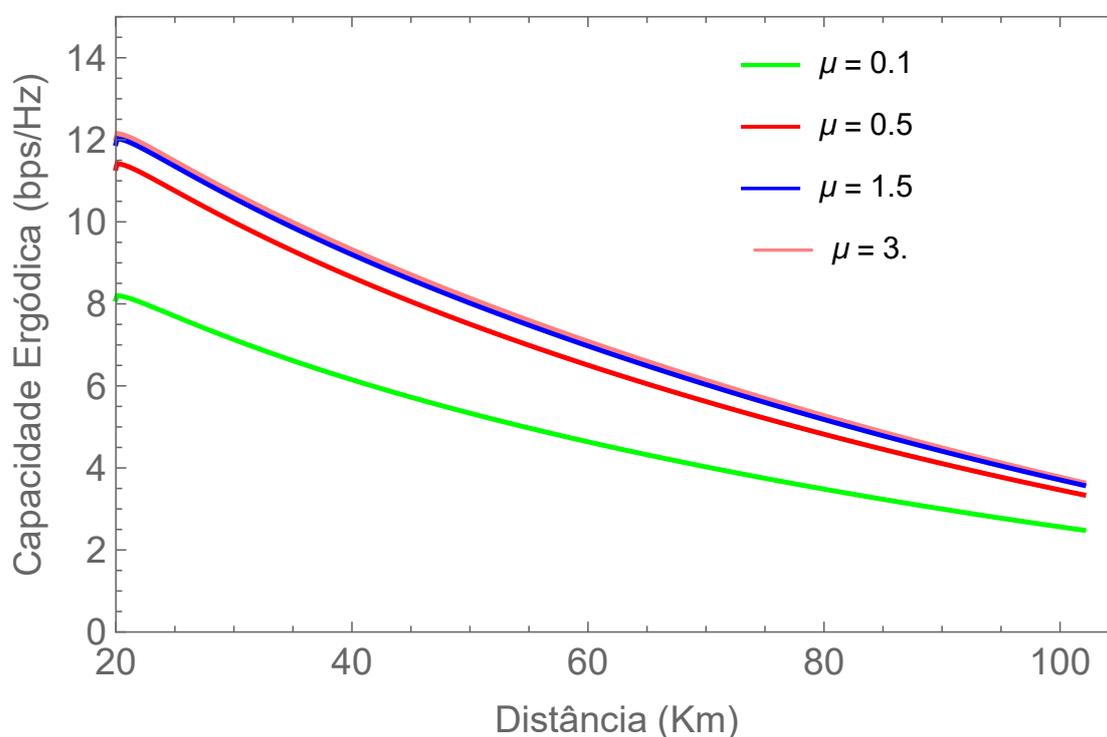


Figura 3.34: Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $\kappa = 10$ e $m = 1$ em função da distância para Manaus-AM.

Os próximos estudos são realizados com a variação do parâmetro κ em diferentes cenários. A Figura 3.36 apresenta as curvas de Capacidade Ergódica, para valor de m igual a 1 (mais baixo) e o valor de μ igual a 0,1 (também baixo), quando varia-se κ entre 0.5, 5, 8 e 10. Já a Figura 3.37 apresenta as curvas também variando κ entre 0.5, 5, 8 e 10 para m igual a 1, entretanto com um valor de μ mais alto e igual a 3. Observa-se que para valores de m e μ pequenos a capacidade cai e a variação de κ influencia nos resultados. Já para valores pequenos de m e valores altos de μ , a capacidade segue a curva que começa entre 12 e 14 bps/Hz e a variação de κ não influencia no espaçamento entre as curvas, ou seja, a existência ou não de LOS não é significativa quando o μ é alto (há pouco efeito de multipercurso) e, mesmo com mais efeito de sombreamento (m baixo) é

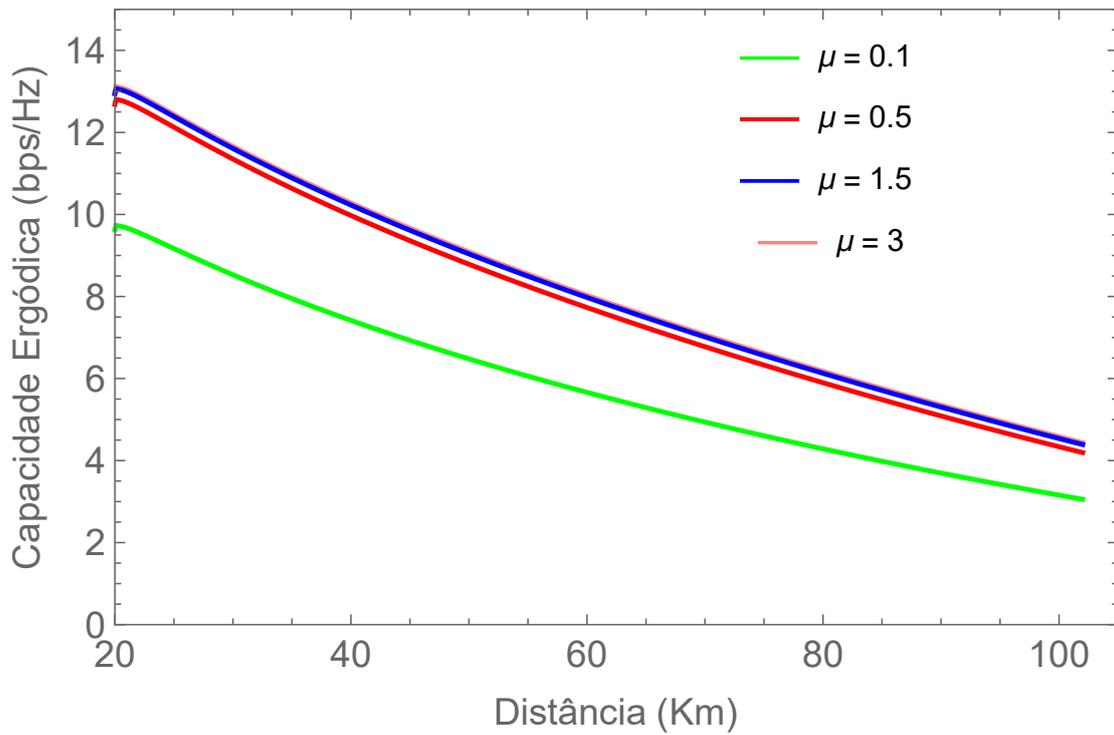


Figura 3.35: Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $\kappa = 10$ e $m = 10$ em função da distância para Manaus-AM.

possível manter o canal.

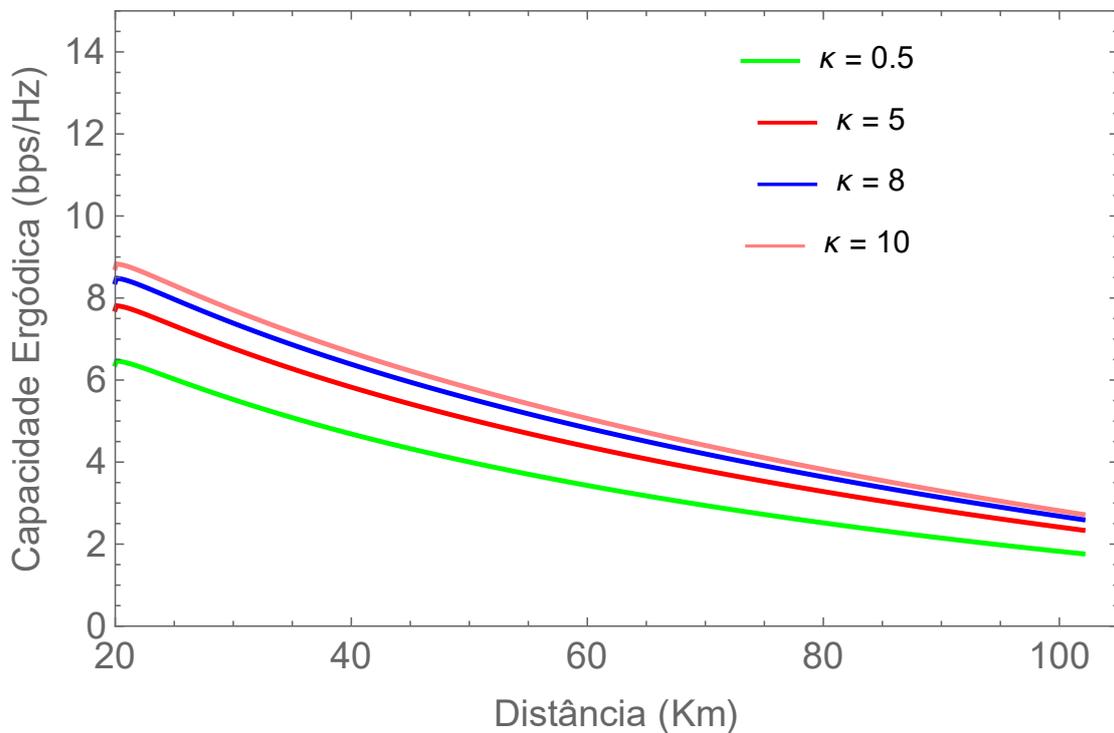


Figura 3.36: Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $m = 1$ e $\mu = 0,1$ em função da distância para Manaus-AM.

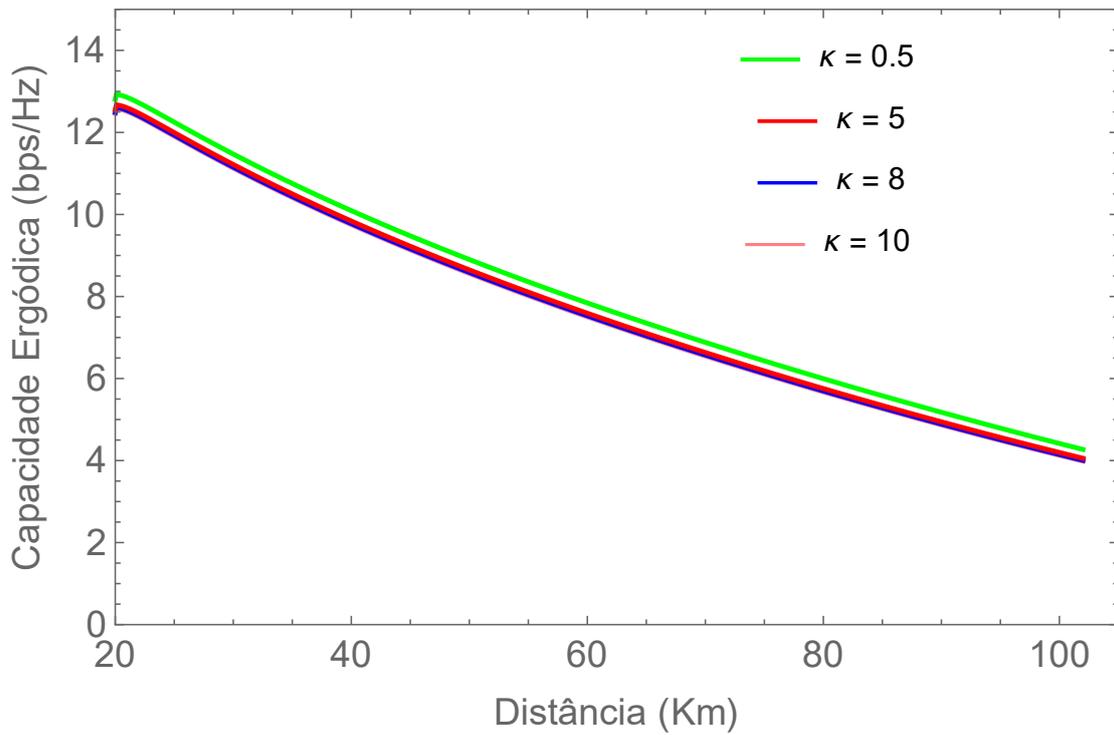


Figura 3.37: Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $m = 1$ e $\mu = 3$ em função da distância para Manaus-AM.

Neste momento as curvas obtidas são para analisar como é o comportamento da capacidade ao variar o κ para valores mais altos de m . A Figura 3.38 apresenta as curvas de Capacidade Ergódica, para valor de m igual a 10 (mais alto) e o valor de μ igual a 0,1, quando varia-se κ entre 0.5, 5, 8 e 10. Já a Figura 3.39 apresenta as curvas também variando κ entre 0.5, 5, 8 e 10 para m igual a 10, entretanto com um valor de μ mais alto e igual a 3. Ao comparar os resultados da Figura 3.36 com os da Figura 3.38 percebe-se que o aumento de m , ou seja, a diminuição do efeito de sombreamento aumenta os valores de capacidade e o espaçamento entre as curvas. Entretanto ainda que se configure o m em 10, para valores altos de μ não há alteração da capacidade e a variação do κ continua sem influenciar na curva como pode ser visto na Figura 3.39.

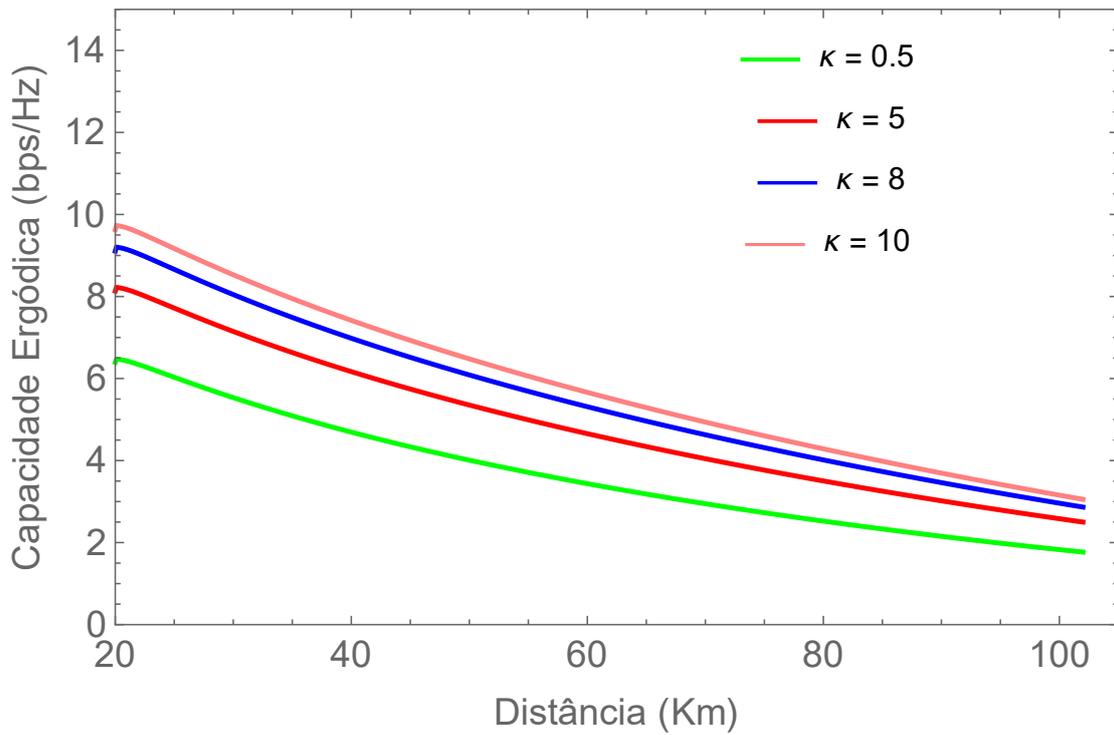


Figura 3.38: Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $m = 10$ e $\mu = 0,1$ em função da distância para Manaus-AM.

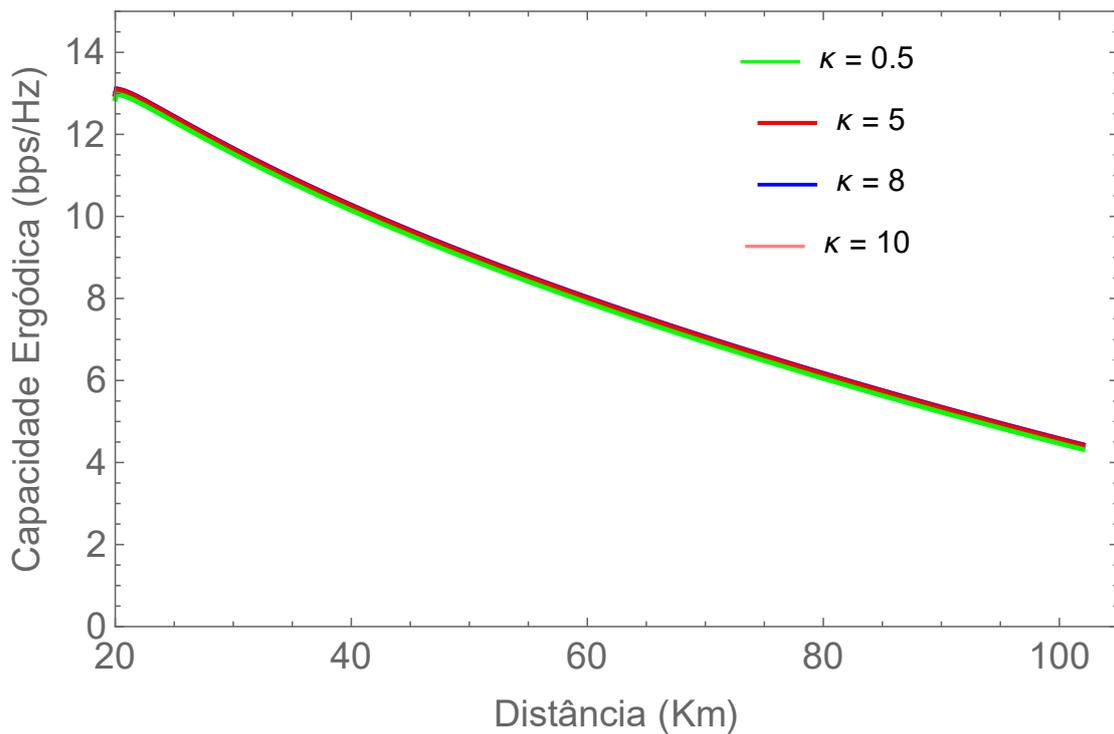


Figura 3.39: Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $m = 10$ e $\mu = 3$ em função da distância para Manaus-AM.

Por fim, os últimos estudos consistem em avaliar o comportamento das curvas com a variação de m em diferentes cenários. A Figura 3.40 apresenta as curvas de Capacidade Ergódica, para

valor de κ igual a 0.5 (mais baixo) e o valor de μ igual a 0,1, quando varia-se m entre 0.5, 2, 5 e 10. Já a Figura 3.41 apresenta as curvas também variando m entre 0.5, 2, 5 e 10 para κ igual a 0.5, entretanto com um valor de μ mais alto e igual a 3. Nos dois gráficos fica claro que para valores baixos de κ a alteração de m não causa nenhuma influência, porém o aumento do μ melhora o valor da capacidade.

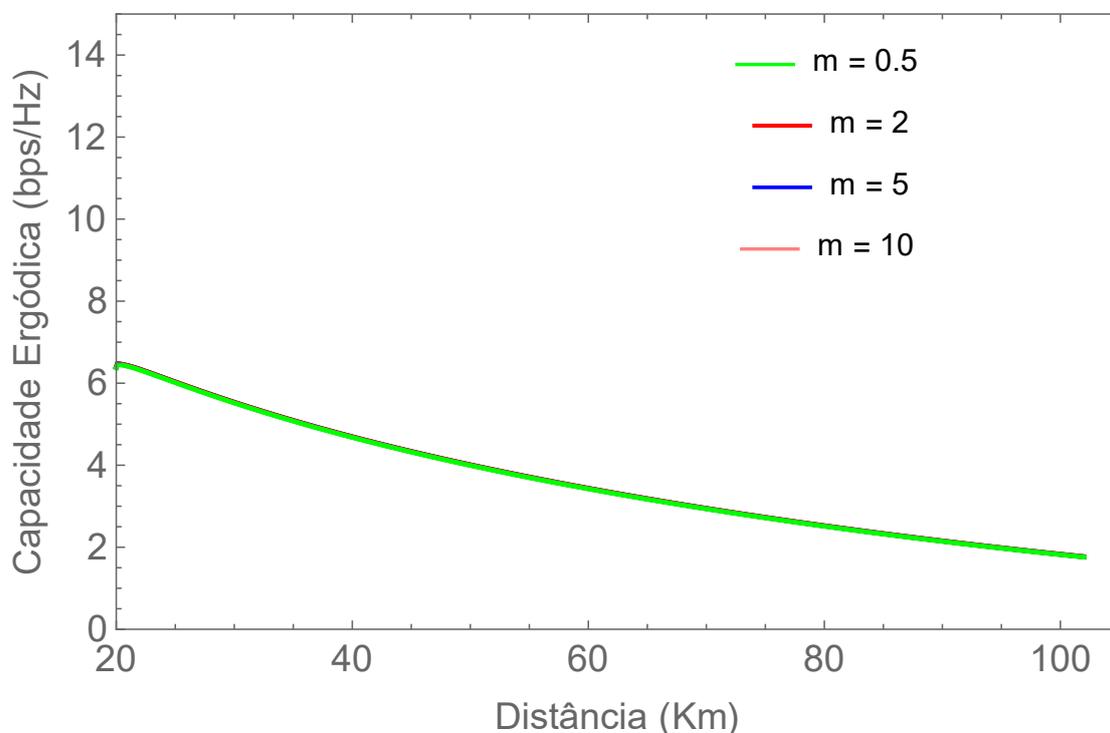


Figura 3.40: Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $\kappa = 0.5$ e $\mu = 0,1$ em função da distância para Manaus-AM.

A Figura 3.42 apresenta as curvas de Capacidade Ergódica, para valor de κ igual a 10 (mais alto) e o valor de μ igual a 0,1, quando varia-se m entre 0.5, 2, 5 e 10. Já a Figura 3.43 apresenta as curvas também variando m entre 0.5, 2, 5 e 10 para κ igual a 10, entretanto com um valor de μ mais alto e igual a 3. No caso de maior LOS (κ alto) as variações em m , ou seja, os efeitos de sombreamento são significantes para o sinal quando m tem valores menores do que 2. Por mais que se tenha uma boa linha de visada, se o número de *clusters* for pequeno, o efeito do sombreamento pesa bastante na capacidade.

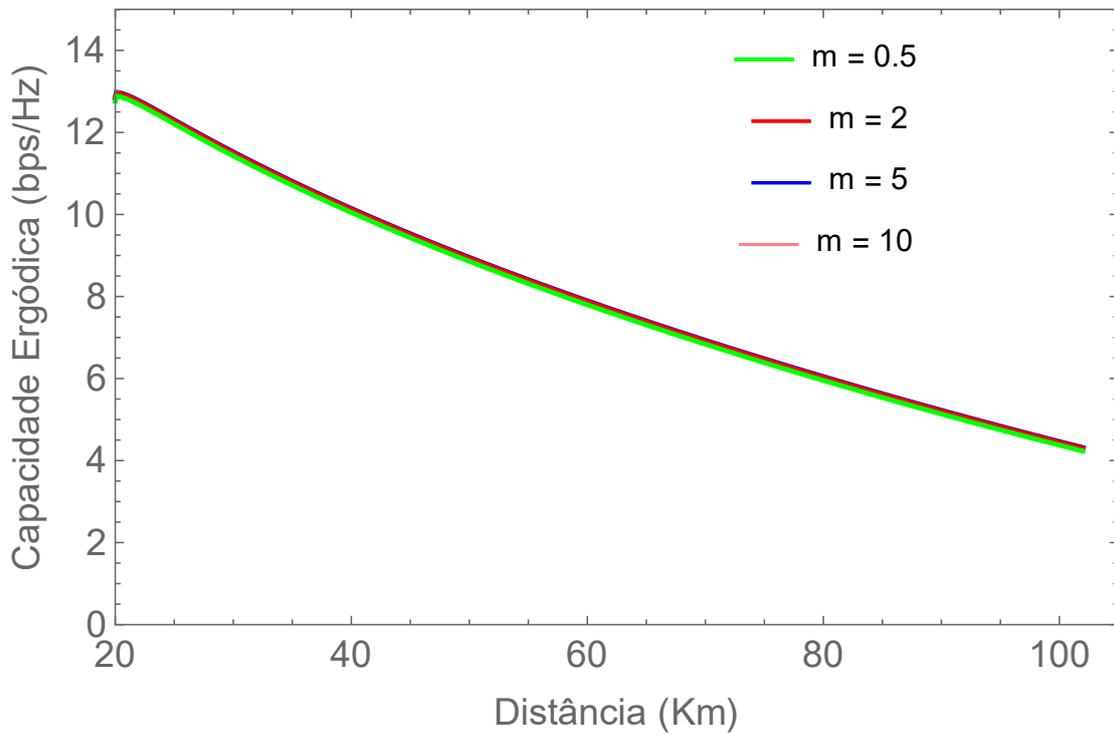


Figura 3.41: Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $\kappa = 0.5$ e $\mu = 3$ em função da distância para Manaus-AM.

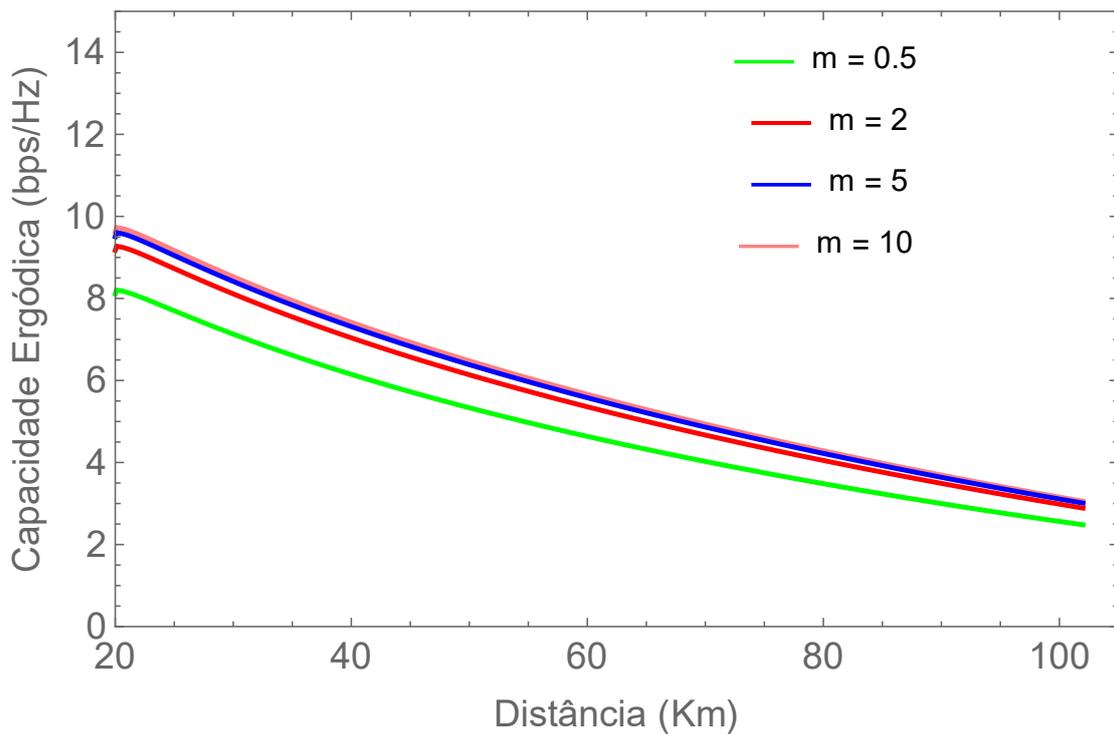


Figura 3.42: Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $\kappa = 10$ e $\mu = 0,1$ em função da distância para Manaus-AM.

Por fim, dado os cenários analisados, conclui-se que, para obter taxa de transmissão que favoreça a comunicação, é importante observar os parâmetros de desvanecimento do canal, de forma a limitar

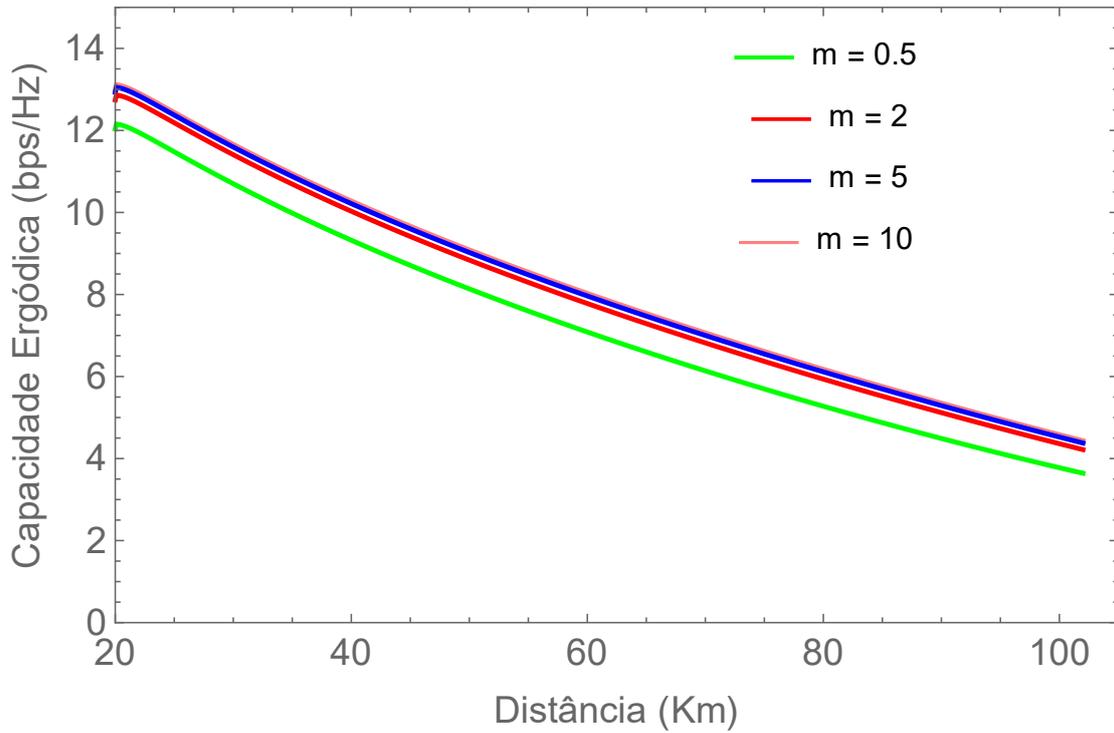


Figura 3.43: Capacidade Ergódica para, $p = 1\%$, $\kappa = 10$ e $\mu = 3$ em função da distância para Manaus-AM.

a distância entre o receptor e transmissor em um cenário com HAPs e dimensionar o sistema para garantir cobertura na área desejada.

Por meio dos resultados até aqui obtidos é possível identificar que a influência do multipercorso nas variações das curvas é a que mais se destaca tanto para valores baixos de m (muito efeito de sombreamento) e κ (pouca significância da componente dominante em linha de visada) quanto para valores altos de m e κ , principalmente quando a quantidade de *clusters* é menor. Já as características de linha de visada (κ) influenciam nas alterações do sinal quando o multipercorso é prejudicial, ou seja, existem poucos *clusters* e μ é baixo. O efeito do sombreamento, por sua vez, é identificável apenas quando há muita significância da componente dominante do sinal (κ alto).

Como abordado anteriormente a diversidade espacial é uma técnica que pode colaborar para melhoramento na capacidade do canal já que colabora para mitigar a interferência dos efeitos de desvanecimento na comunicação.

3.7 Diversidade Espacial

O estudo de diversidade será realizado para os mesmos cenários analisados para o caso da capacidade ergódica e seu objetivo é identificar se há melhora na capacidade com o uso de diversidade espacial de antenas.

Além da possibilidade de variação de diferentes parâmetros para a obtenção de resultados em cenários distintos já abordados na capacidade ergódica como: a cidade de estudo, modelo de perda

de percurso, percentual p de chuva, frequência de operação, κ , μ e m ; com a diversidade também pode ser variado o número de ramos L . De forma a possibilitar as comparações com os estudos anteriores, para obtenção das curvas de Capacidade Ergódica nos casos de diversidade, configurou-se a frequência de operação em 20 GHz, a potência do ruído de fundo P_N em -98 dBm e utilizou-se a cidade de Manaus.

3.7.0.1 Capacidade Ergódica com Diversidade para diferentes percentuais p

Neste primeiro caso, a análise da capacidade em função da distância de rádio consiste em caracterizar como a capacidade, no caso de diversidade espacial com parâmetros κ , μ e m fixos e comumente utilizados, varia de acordo com o percentual p de chuva para o modelo de perda de percurso ajustado e de acordo com o modelo de perda de percurso no espaço livre. As curvas foram obtidas para κ igual a 2, μ igual a 1 e m igual a 2, para L igual a 2 ramos (Figura 3.44), para L igual a 3 ramos (Figura 3.45) e para L igual a 5 ramos (Figura 3.46).

Ao comparar as Figuras 3.44, 3.45 e 3.46 com a Figura 3.31, percebe-se que há uma melhora de 0,25 bps/Hz nas curvas de capacidade quando se configuram 2 ramos de sinal, para 3 e 5 ramos a diferença não é tão perceptível. Entretanto em todos os caso de L a inviabilidade do canal em p igual 0,1 e 0,01% permanece em 65 e 35 km respectivamente.

Para que a influência da quantidade de ramos na capacidade do canal fique mais clara, foram plotadas as curvas para p igual a 1% em um mesmo gráfico contido na Figura 3.47.

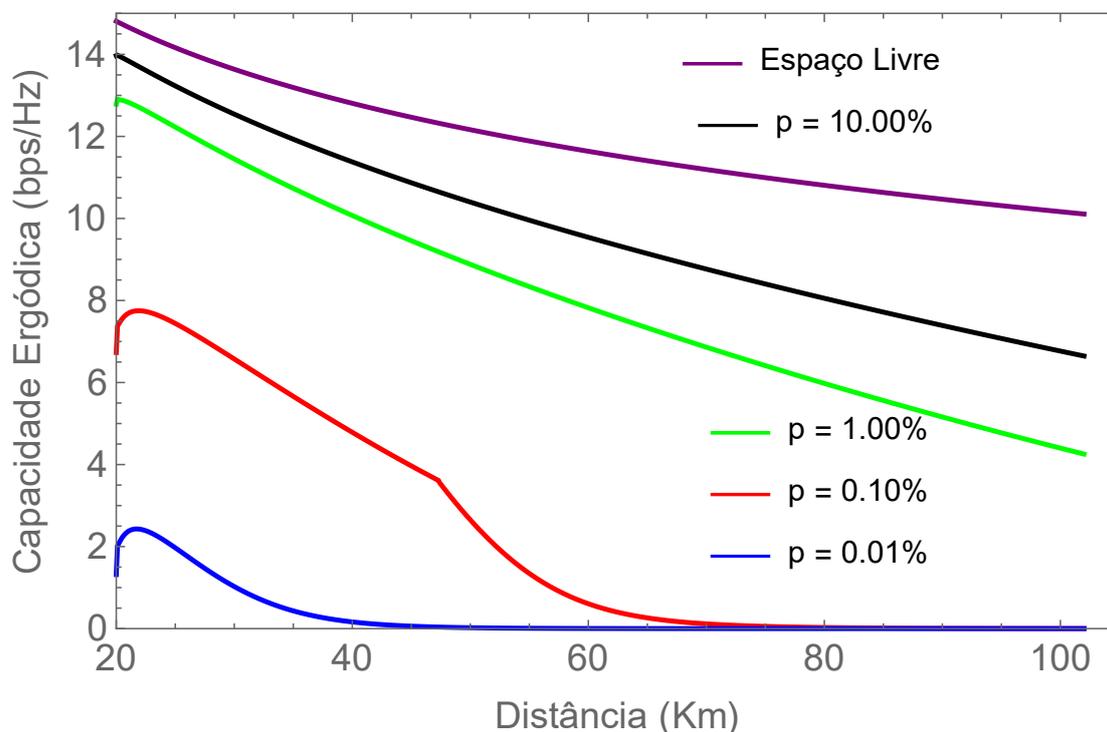


Figura 3.44: Capacidade Ergódica para $L = 2$, $\kappa = 2$, $m = 2$ e $\mu = 1$ em função da distância para Manaus-AM.

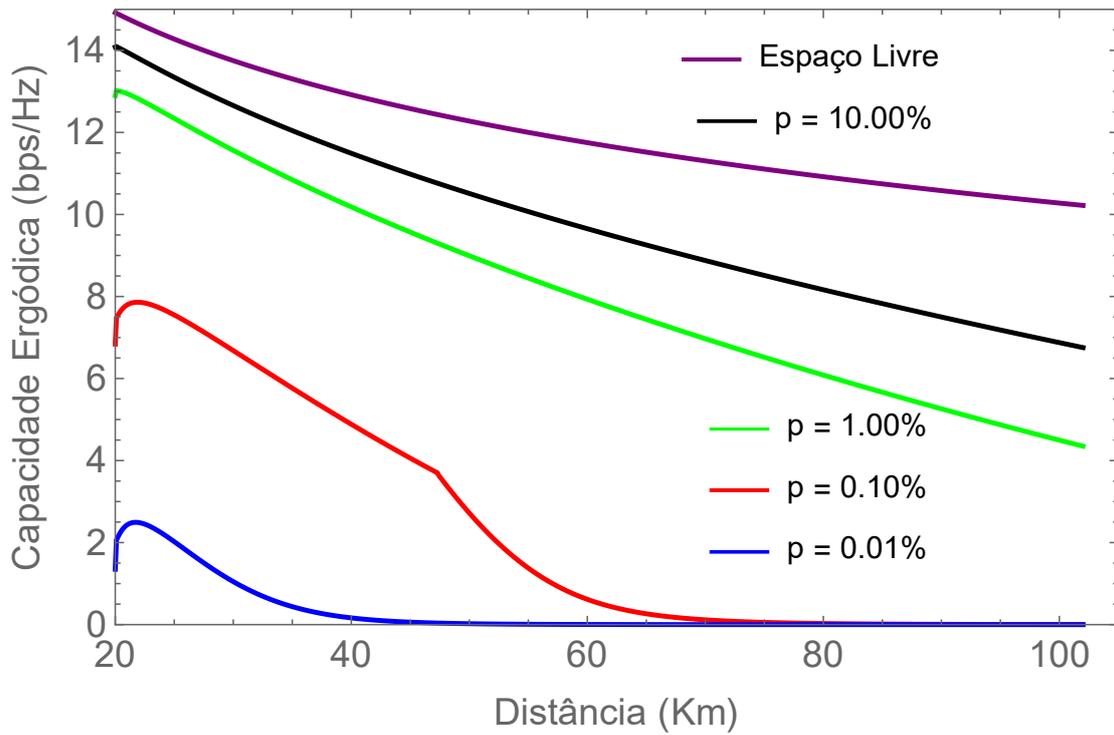


Figura 3.45: Capacidade Ergódica para $L = 3$, $\kappa = 2$, $m = 2$ e $\mu = 1$ em função da distância para Manaus-AM.

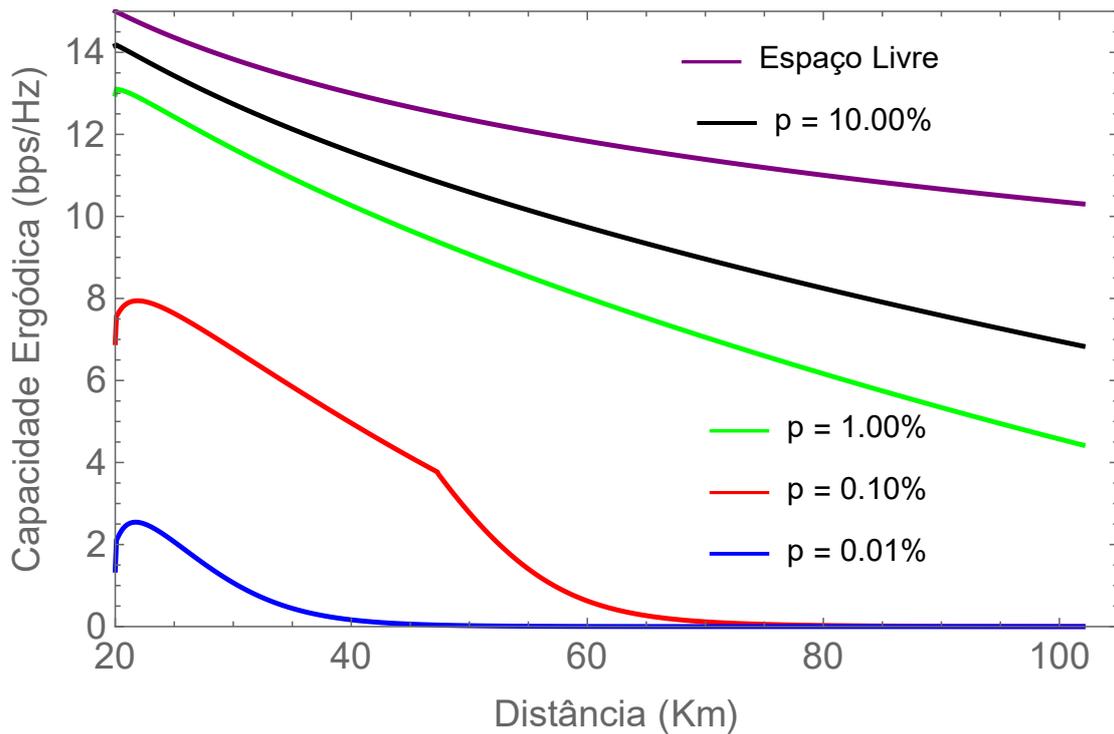


Figura 3.46: Capacidade Ergódica para $L = 5$, $\kappa = 2$, $m = 2$ e $\mu = 1$ em função da distância para Manaus-AM.

Para prosseguir com os estudos de capacidade ergódica quando há diversidade, serão analisados casos com base na variação de dos valores de κ , μ e m para p igual a 1% e L igual a 3 ramos de

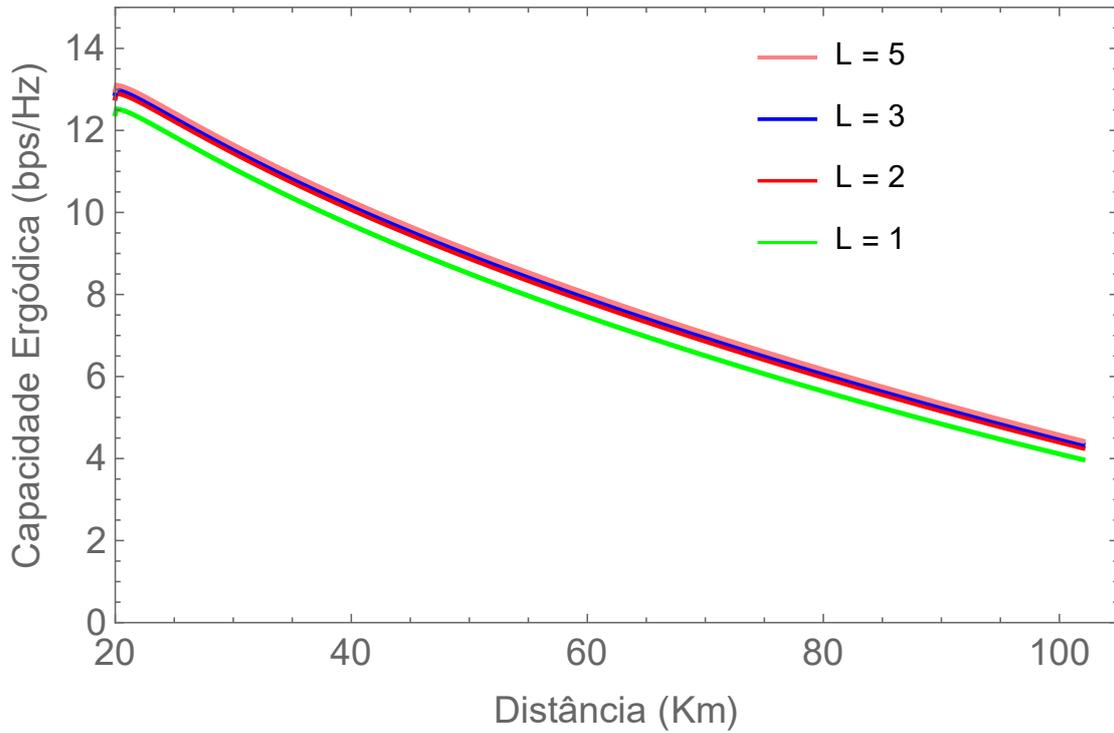


Figura 3.47: Capacidade Ergódica para $p = 1\%$, $\kappa = 2$, $m = 2$ e $\mu = 1$ em função da distância para Manaus-AM.

sinal. Assim, nos resultados a seguir, será possível identificar como a capacidade se comporta frente às diferentes configurações desses parâmetros para o caso de diversidade.

3.7.0.2 Capacidade Ergódica com Diversidade para p igual a 1% e $L = 3$

A Figura 3.48 apresenta as curvas de Capacidade Ergódica, para valor de κ igual 0.5 e o valor de m igual a 1, quando varia-se μ entre 0.1, 0.5, 1.5 e 3. Não é necessário simular essas curvas para m igual a 10, já que na Figura 3.33 foi constatado que não há mudanças nesse caso. É notável a melhora na capacidade causada pela diversidade para μ igual a 0.1 e 0.5, principalmente para o caso de $\mu = 0.1$ que agora se inicia em 10 bps/Hz ao invés de 6,5 bps/Hz.

A seguir as curvas obtidas são para analisar como é o comportamento da capacidade ao variar o μ para valores mais altos de κ no cenário de diversidade. A Figura 3.49 apresenta as curvas de Capacidade Ergódica, para valor de κ igual a 10 e o valor de m igual a 1, quando varia-se μ entre 0.1, 0.5, 1.5 e 3. Já a Figura 3.50 apresenta as curvas também variando μ entre 0.1, 0.5, 1.5 e 3 para κ igual a 10, entretanto com um valor de m mais alto e igual a 10.

Ao comparar os resultados com as Figuras 3.34 e 3.35, observa-se que a diversidade melhora significativamente a capacidade, com destaque para $\mu = 0.1$, com 3 ramos também houve a diminuição do espaçamento entre as curvas e o aumento de m de 1 para 10 não causou impacto aparente na capacidade.

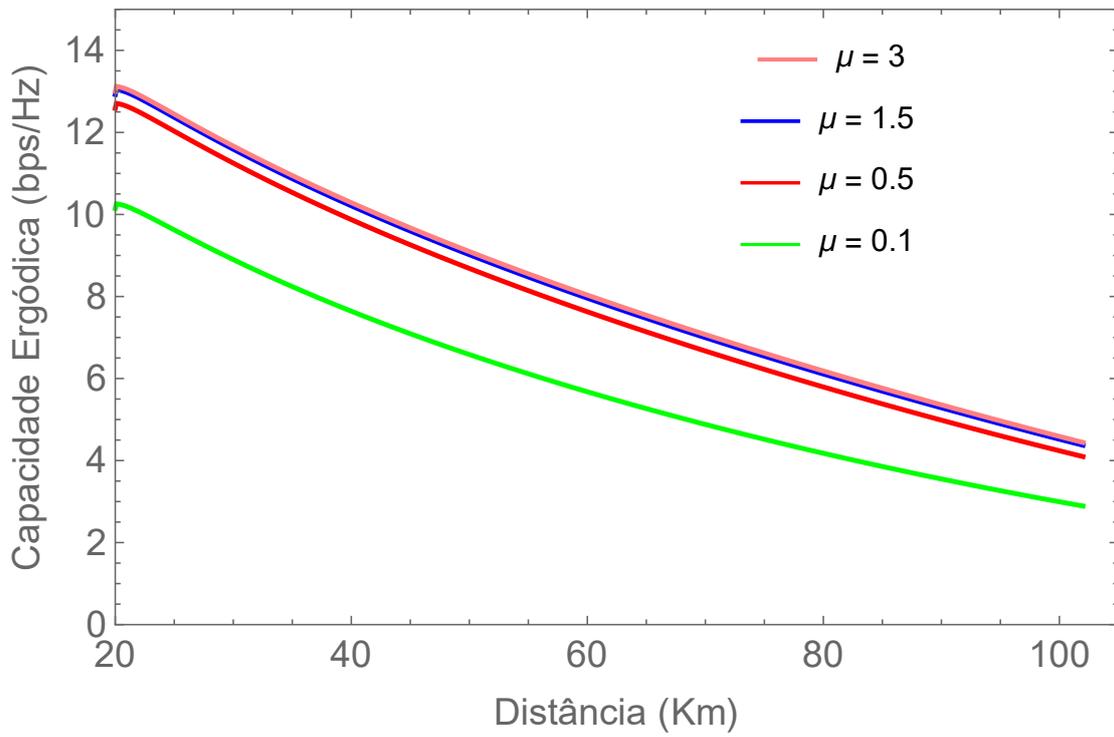


Figura 3.48: Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $\kappa = 0.5$ e $m = 1$ em função da distância para Manaus-AM.

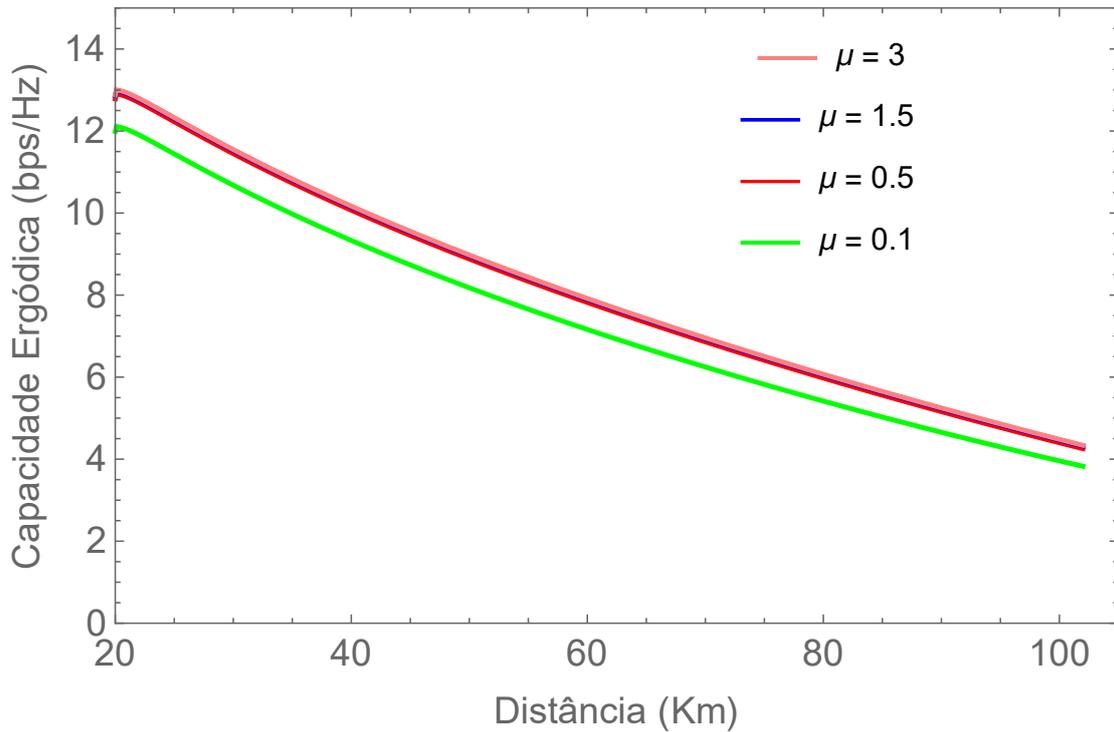


Figura 3.49: Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $\kappa = 10$ e $m = 1$ em função da distância para Manaus-AM.

Os próximos estudos são realizados com a variação do parâmetro κ em diferentes cenários. A

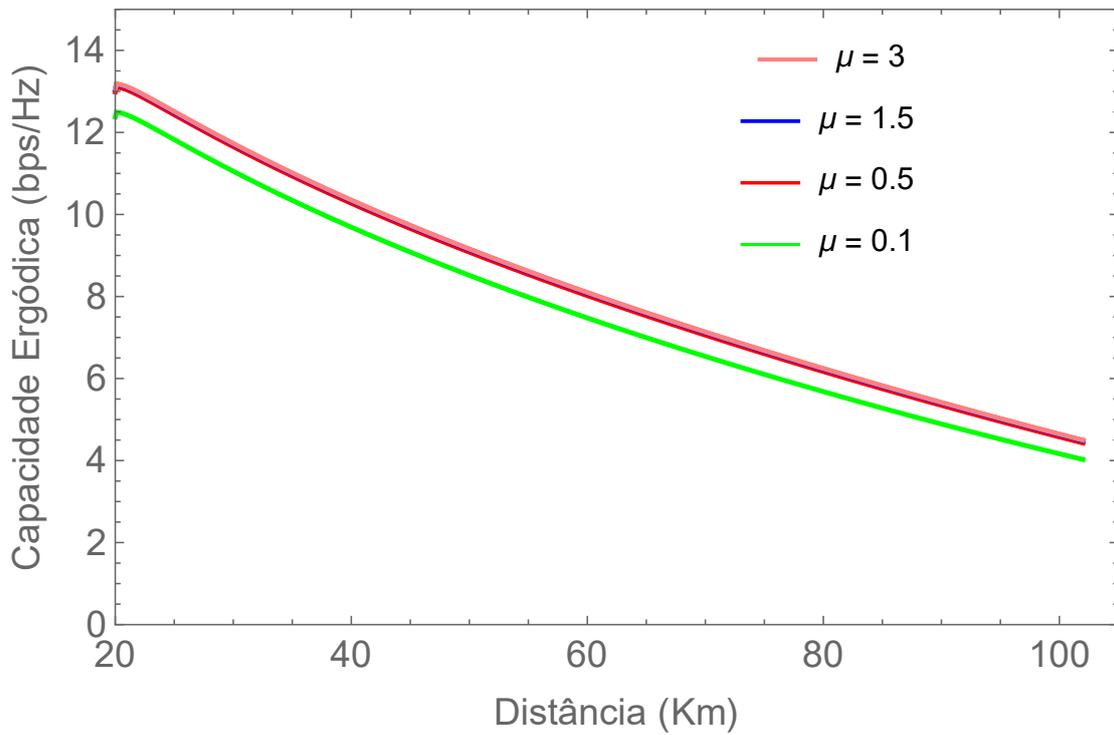


Figura 3.50: Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $\kappa = 10$ e $m = 10$ em função da distância para Manaus-AM.

Figura 3.51 apresenta as curvas de Capacidade Ergódica, para valor de m igual a 1 e o valor de μ igual a 0.1, quando varia-se κ entre 0.5, 5, 8 e 10. Já a Figura 3.52 apresenta as curvas também variando κ entre 0.5, 5, 8 e 10 para m igual a 1, entretanto com um valor de μ mais alto e igual a 3. No primeiro caso a capacidade aumentou de forma notável porém o comportamento das curvas se manteve similar ao da Figura 3.36. No segundo caso, ao comparar-se com a Figura 3.37, o comportamento das curvas foi o mesmo, entretanto o aumento na capacidade foi pequeno.

Ao variar o κ para valores m igual a 10, observa-se não há mudança nem na capacidade nem no comportamento das curvas para o cenário de diversidade (Figura 3.53), diferentemente de quando não havia implementação dessa técnica. Ou seja, com o uso de diversidade, a existência ou não do sombreado não afeta o comportamento do sinal.

Esses últimos estudos consistem em avaliar o comportamento das curvas com a variação de m . A Figura 3.54 apresenta as curvas de Capacidade Ergódica, para valor de κ igual a 0.5 e o valor de μ igual a 0.1, quando varia-se m entre 0.5, 2, 5 e 10. Já a Figura 3.55 apresenta as curvas também variando m entre 0.5, 2, 5 e 10 para κ igual a 0.5, entretanto com um valor de μ mais alto e igual a 3. Nos dois gráficos fica claro que para valores baixos de κ a alteração de m não causa nenhuma influência ainda que com diversidade. No primeiro há melhora da capacidade com o uso de diversidade, porém para valores altos de μ , ou seja, para casos em que há pouco efeito negativo de multipercurso a diversidade não causa impacto na capacidade.

Por fim, a Figura 3.56 apresenta as curvas de Capacidade Ergódica, para valor de κ igual a 10 e o valor de μ igual a 0.1, quando varia-se m entre 0.5, 2, 5 e 10. Já a Figura 3.57 apresenta as

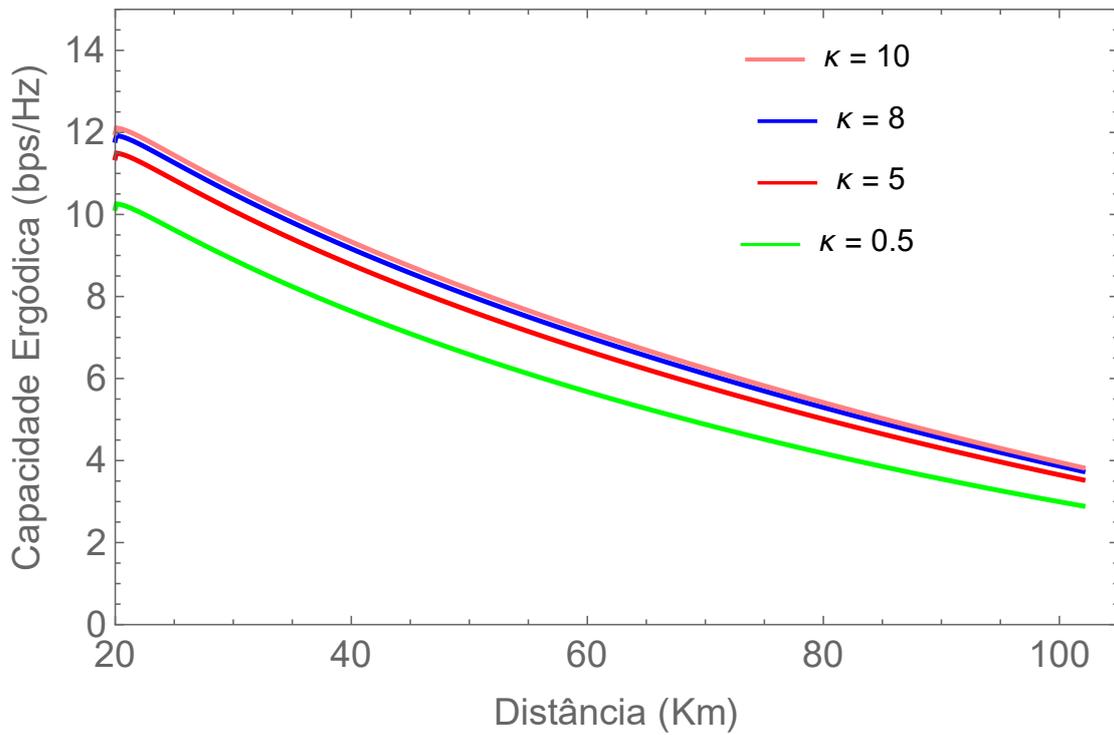


Figura 3.51: Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $m = 1$ e $\mu = 0.1$ em função da distância para Manaus-AM.

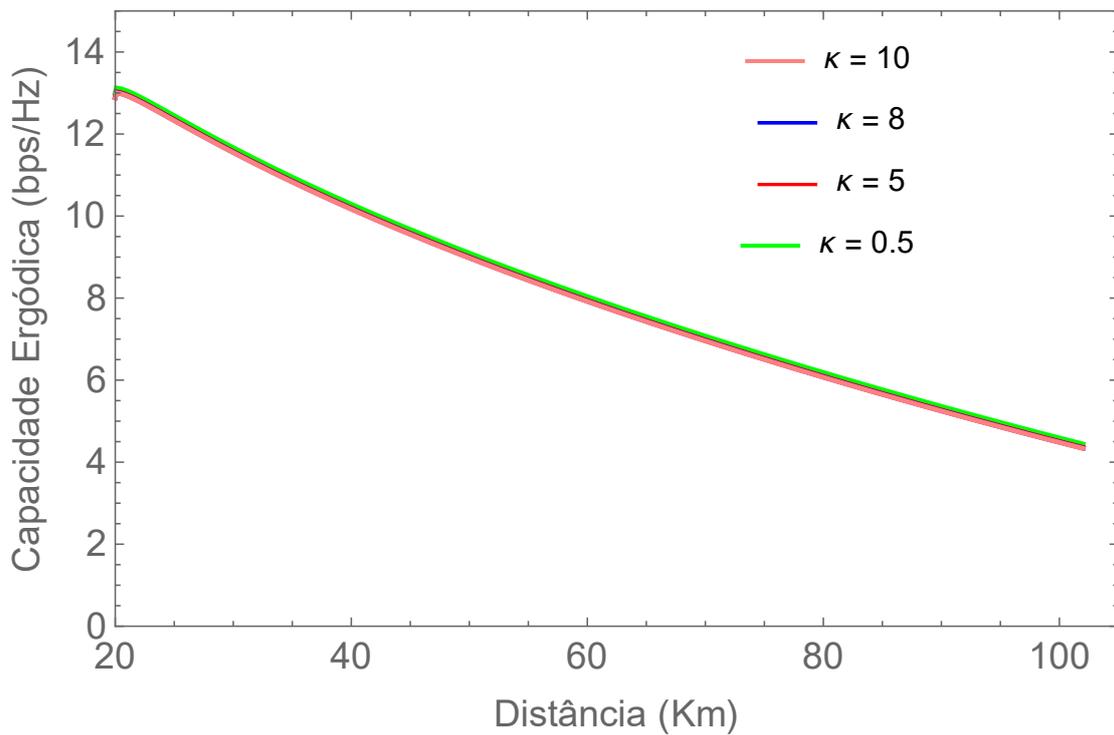


Figura 3.52: Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $m = 1$ e $\mu = 3$ em função da distância para Manaus-AM.

curvas também variando m entre 0.5, 2, 5 e 10 para κ igual a 10, entretanto com um valor de μ

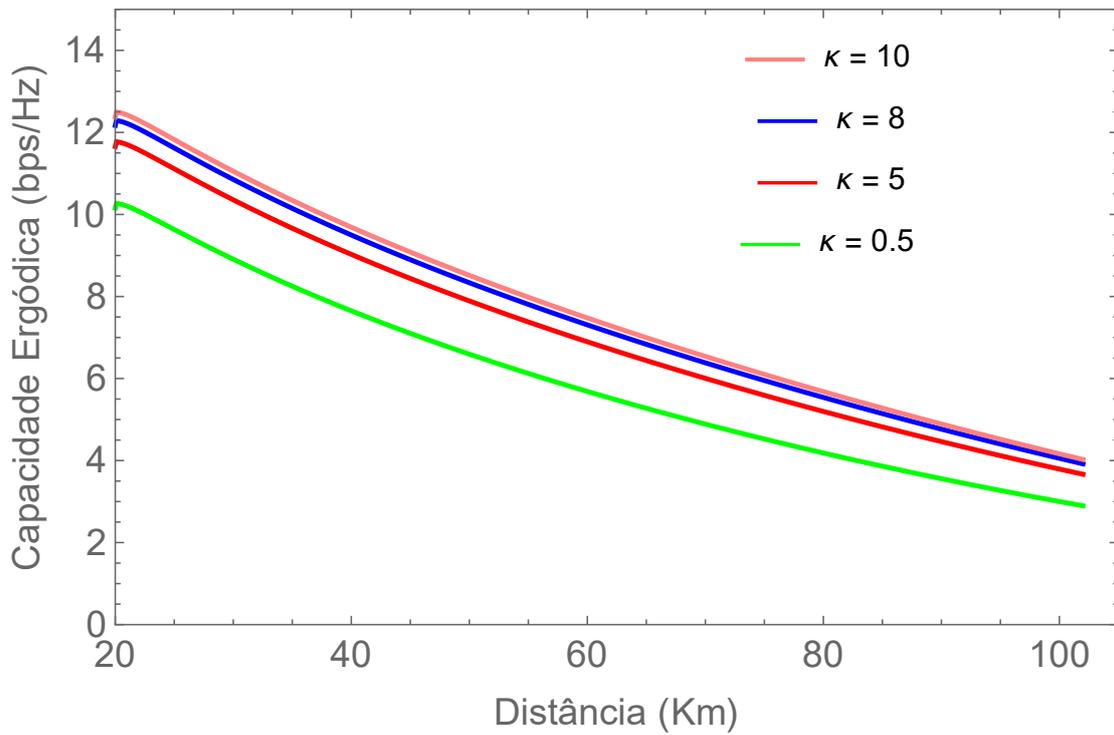


Figura 3.53: Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $m = 10$ e $\mu = 0.1$ em função da distância para Manaus-AM.

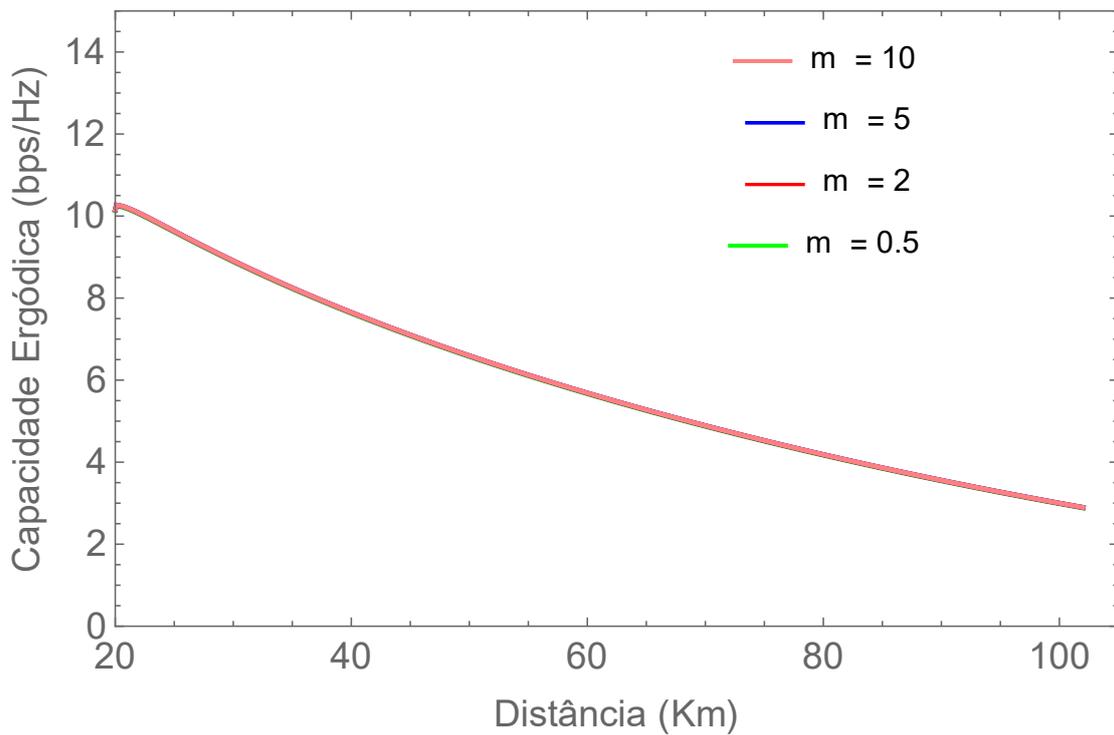


Figura 3.54: Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $\kappa = 0.5$ e $\mu = 0.1$ em função da distância para Manaus-AM.

mais alto e igual a 3. Para esse caso em que há maior significância da componente dominante e

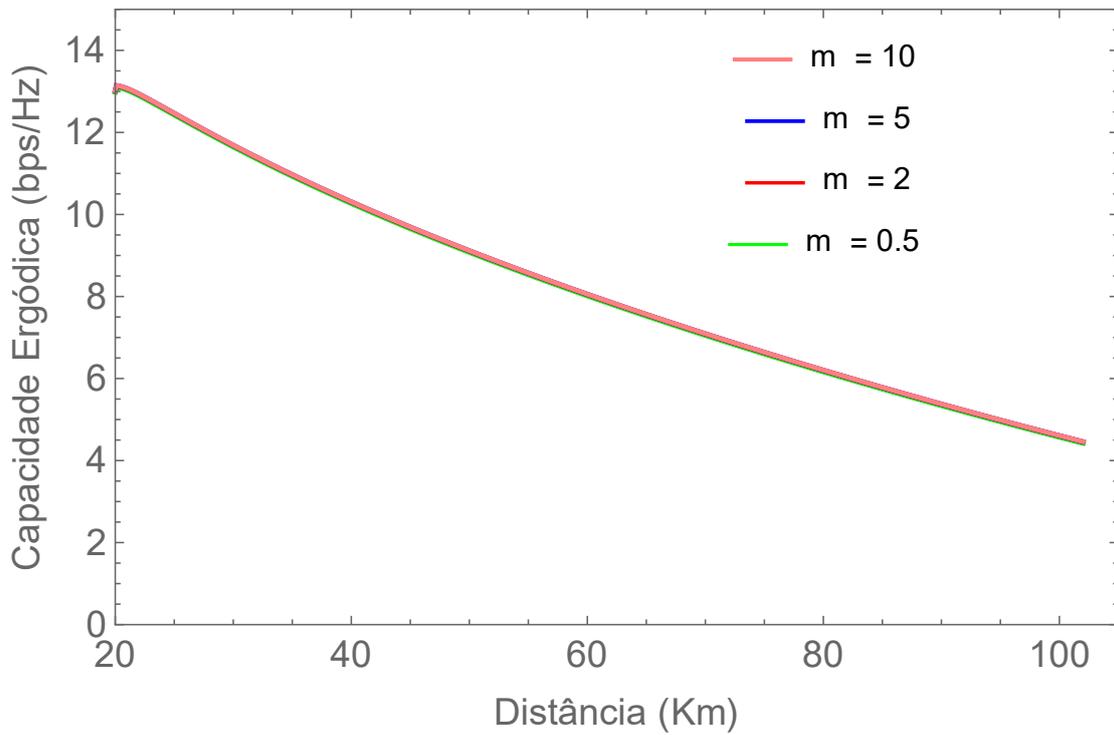


Figura 3.55: Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $\kappa = 0.5$ e $\mu = 3$ em função da distância para Manaus-AM.

diversidade espacial, há aumento da capacidade no caso de $\mu = 0.1$ e o efeito do sombreamento não causa muito espaçamento entre as curvas.

Conclui-se que a técnica de diversidade melhora a capacidade do canal quando há efeitos prejudiciais de multipercurso (valores mais baixos de μ) e/ou pouca linha de visada, além disso a utilização de mais ramos do sinal mitiga os efeitos negativos do sombreamento sobre a capacidade.

3.8 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos ao longo desse trabalho, dentre eles os efeitos dos fenômenos climáticos e atmosféricos na propagação do sinal e os estudos de capacidade em cenários com e sem diversidade espacial. No próximo capítulo serão apresentadas as considerações finais sobre o trabalho.

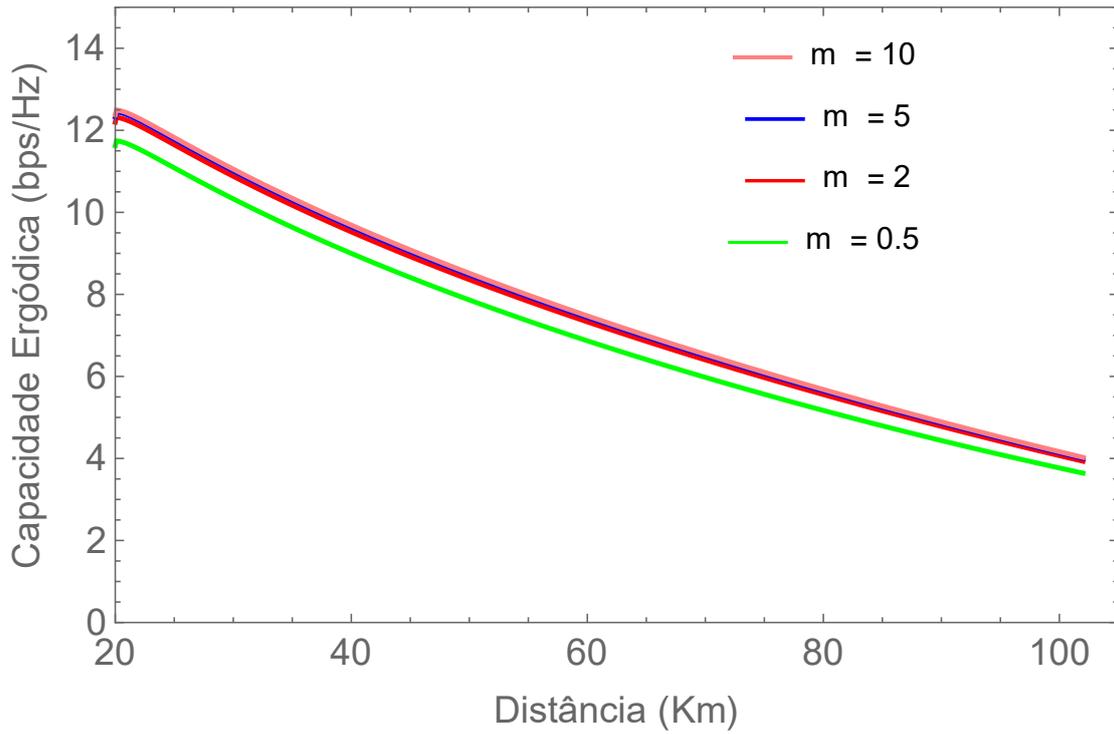


Figura 3.56: Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $\kappa = 10$ e $\mu = 0.1$ em função da distância para Manaus-AM.

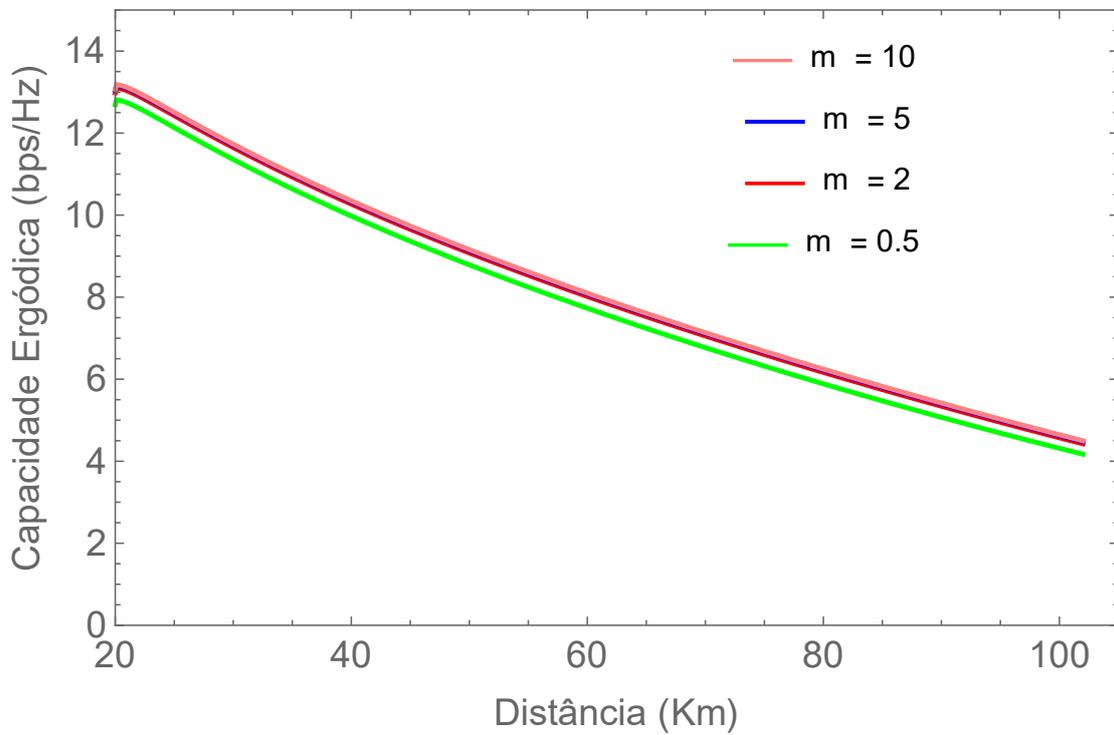


Figura 3.57: Capacidade Ergódica para $L = 3$, $p = 1\%$, $\kappa = 10$ e $\mu = 3$ em função da distância para Manaus-AM.

Capítulo 4

Considerações Finais

Este trabalho pode ser dividido em três fases: simular um enlace de comunicação entre um HAPs e um receptor terrestre considerando os efeitos de atenuação por chuva, nuvens e absorção gasosa para as cidades de Brasília-DF, Cuiabá-MT, Curitiba-PR e Manaus-AM; realizar estudo de capacidade para cenário sem diversidade espacial por meio dos modelos de Shannon e κ - μ Sombreado; e analisar a capacidade ergódica para cenários com diversidade.

Na primeira parte, identificou-se os efeitos climáticos e atmosféricos por meio de curvas de atenuação para diferentes frequências de operação em cada uma das cidades, foi constatado que a chuva é o fenômeno que mais prejudica a comunicação, entretanto a atenuação por nuvens e absorção gasosas não são desprezíveis. Dessa forma, simular o enlace apenas para o espaço livre não é a forma mais precisa de fazê-lo, este trabalho então propõe um modelo de perda de percurso que leva em consideração os fenômenos climáticos e atmosféricos. Assim, por meio desse modelo, foi possível simular um enlace de comunicação com HAPs e verificar que, das cidades analisadas, a que teve o pior cenário de potência recebida foi Manaus, devido sua maior precipitação.

A segunda fase pode ser dividida em dois momentos. O primeiro foi a obtenção da capacidade de Shannon em função da distância de rádio para diferentes percentuais p de chuva para as quatro cidades e definir as distâncias de rádio para as quais a comunicação fica inviável. O segundo momento corresponde ao estudo da capacidade ergódica, que foi feito apenas para a cidade de Manaus, no qual foi possível identificar os casos e as distâncias de rádio para os quais a comunicação é inviável e ainda como se comporta a capacidade frente às diferentes configurações de κ , μ e m . Foi concluído que o efeito do multipercurso é o que mais influencia nas variações da capacidade, as características de linha de visada são significantes para a capacidade quando o multipercurso é prejudicial (μ baixo) e, por último, o sombreamento possui efeito identificável apenas quando há mais linha de visada (κ alto).

Por fim, por meio dos estudos nos cenários de diversidade foi possível observar que a melhora na capacidade é mais notável de 1 para 2 ramos de sinal, menor de 2 para 3 ramos, e desprezível de 3 para 5 ramos. Assim, conclui-se que o emprego da técnica de diversidade melhora os resultados de capacidade quando há mais multipercurso e/ou pouca linha de visada e, além disso, mitiga os efeitos do sombreamento no desempenho do canal.

Com a realização deste trabalho e suas análises foi possível constatar a importância dos efeitos climáticos e atmosféricos no sinal em um enlace HAPs-terra, e a necessidade de considerá-los no modelo de perda de percurso. Para então caracterizar a potência recebida, analisar a capacidade do canal, definir quais as distâncias de rádio máximas para garantir a qualidade do serviço e assim realizar o planejamento de rede definindo a quantidade de HAPs necessária para prover cobertura a uma determinada região. Seguindo os passos realizados nesse projeto é possível planejar e implementar o uso de HAPs em cenários brasileiros.

Por fim, sugere-se alguns trabalhos futuros para dar continuidade a este estudo. São eles:

- Montar enlace prático de HAPs com uso de balão atmosférico para realizar medições práticas com e sem diversidade;
- Realizar medições práticas em diferentes cenários de chuva e seca;
- Realizar medições práticas para diferentes frequências de operação;
- Obter e analisar a capacidade do canal nas medições realizadas.

Referências Bibliográficas

- [1] Iskandar, Dimas Rinarso Putro, “Performance Evaluation of Broadband WiMAX Services over High Altitude Platforms (HAPs) Communication Channel” 2008, The Fourth International Conference on Wireless and Mobile Communications.
- [2] José Luis Cuevas-Ruíz, José A. Delgado-Penín, “Channel Modeling and Simulation in HAPS Systems”, 2004, European Wireless.
- [3] Fabio Dovis, Roberto Fantini, Marina Mondin, and Patrizia Savi, “Small-Scale Fading for High-Altitude Platform (HAP) Propagation Channels”, 2002, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 20, No. 3, April 2002.
- [4] Projeto Aquila, The Guardian, Abril 2017 [Online]. Disponível em <https://www.theguardian.com/business/2016/jul/21/facebook-solar-powered-internet-plane-test-flight-aquila>
- [5] Projeto Loon, Google, Abril 2017 [Online]. Disponível em <https://plus.google.com/+ProjectLoon>
- [6] ITU-R, “Facilitating access to broadband applications delivered by high-altitude platform stations”, International Telecommunication Union, Genebra, Suíça, ITU-R Resolution 160, 2015.
- [7] ITU-R, “Preferred characteristics of systems in the fixed service using high altitude platforms operating in the bands 47.2-47.5 GHz and 47.9-49.2 GHz”, International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, ITU-R Resolution 122, 1997.
- [8] ITU-R, “Technical and operational characteristics for the fixed service using high altitude platform stations in the frequency range 18-32 GHz”, International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, ITU-R [Ka HAPS], 2000.
- [9] ITU-R, “Minimum performance characteristics and operational conditions for high altitude platform stations providing IMT-2000 in the bands 1885-1980 MHz, 2010-2025 MHz and 2110-2170 MHz in region 1 and 3 and 1885-1980 MHz and 2110-2160 MHz in region 2”, International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, ITU-R Recommendation F.1456, 2000.
- [10] ITU-R, “Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space Telecommunication system.” Rec. ITU-R P.618-12, 2015.

- [11] ITU-R, “Specific attenuation model for rain for use in prediction methods.” Rec. ITU-R P.838-3, 2005.
- [12] ITU-R, “Rain height model for prediction methods.” Rec. ITU-R P.839-4, 2013.
- [13] ITU-R, “Characteristics of precipitation for propagation modeling.” Rec. ITU-R P.837-6, 2012.
- [14] ITU-R, “Attenuation due to clouds and fog.” Rec. ITU-R P.840-6, 2013.
- [15] ITU-R, “Attenuation by atmospheric gases.” Rec. ITU-R P.676-11, 2016.
- [16] Simon R. Saundres, Alejandro Aragón Zavala, “Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems”, Second Edition, 2007.
- [17] Celia García-Corrales, Francisco J. Cañete and José F. Paris, “Capacity of κ - μ Shadowed Fading Channels”, International Journal of Antennas and Propagation, Hindawi Publishing Corporation, Article ID 975109, 2014.
- [18] J. F. Paris, “Statistical characterization of κ - μ shadowed fading channels”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 63, no. 2, pp. 518-526, 2014.
- [19] M. D. Yacoub, “The and the κ - μ distribution” IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 49, pp. 68-81, Feb. 2007.
- [20] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, “Table of Integrals, Series, and Products”, Academic Press, 7th edition, 2007.
- [21] Laureano Moreno-Pozas, F. Javier Lopez-Martinez, José F. Paris and Eduardo Martos-Naya. “The κ - μ Shadowed Fading Model: Unifying the κ - μ and η - μ Distributions” IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume: 65, Issue: 12, 2016.
- [22] Manav R. Bhatnagar. “On the Sum of Correlated Squared Shadowed Random Variables and Its Application to Performance Analysis of MRC” IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014.
- [23] Masayuki Oodo, Ryu Miura, Teruhisa Hori, Takayuki Morisaki, Kanshiro Kashiki and Mikio Suzuki, “Sharing and Compatibility Study between Fixed Service Using High Altitude Platform Stations (HAPS) and Other Services in the 31/28 GHz Bands”, 2002, Wireless Personal Communications 23: 3–14, Kluwer Academic Publishers.