



**MEDIÇÕES E ANÁLISE DE DESVANECIMENTO
APLICADO À HAPS**

RUAN PERASSA COELHO

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

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

**MEDIÇÕES E ANÁLISE DE DESVANECIMENTO
APLICADO À HAPS**

RUAN PERASSA COELHO

Orientador: PROF. DR. UGO SILVA DIAS, ENE/UNB

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BRASÍLIA-DF, 16 DE JUNHO DE 2019.

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

**MEDIÇÕES E ANÁLISE DE DESVANECIMENTO
APLICADO À HAPS**

RUAN PERASSA COELHO

APROVADA POR:

Prof. Dr. Ugo Silva Dias, ENE/UnB
Orientador

Prof. Adnoiran Judson de D. Braga, ENE/UnB
Examinador interno

Prof. Marco Antonio Maruques Marinho, PPGEE/UnB
Examinador interno

BRASÍLIA, 16 DE JUNHO DE 2019.

Agradecimentos

Agradeço a todas e todos aqueles que estiveram comigo durante todo esse caminhar, aos que estão ainda aqui e aos que já partiram. Todos compuseram de alguma maneira o presente trabalho, direta ou indiretamente, e cada participação foi especialmente importante.

Resumo

O principal objetivo desta tese é obter dados empíricos da potência de um sinal de internet em 2.45 GHz, processá-los e analisá-los. A meta da análise é comparar os dados empíricos com funções de densidade de probabilidade (PDF) e de distribuição acumulada (CDF), dada pelos modelos de distribuição log-normal e $\kappa - \mu$ para a caracterização de desvanecimento em larga escala ou, mais especificamente, o sombreamento. A montagem do experimento tentou se aproximar de um modelo em menor escala de HAP (Plataformas de Alta Altitude) e buscou uma caracterização aproximada para esse tipo de enlace. Portanto, esse trabalho descreve o experimento realizado, os resultados numéricos obtidos e suas análises.

Palavras-chave: sombreamento, HAPS, desvanecimento em pequena escala.

Abstract

The main objective of this thesis is to obtain empirical power data from a 2.45 GHz internet signal, process it and analyze it. The analysis' goal is to compare empirical data with theoretical probability density functions (PDF) and cumulative distribution functions (CDF), given by the log-normal and a $\kappa - \mu$ distribution models for the characterization of large scale fading or, more specifically, the shadowing. The mounting of this experiment aimed to build a small scale HAP (High Altitude Platform) and aimed at an approximate characterization for this kind of link. Therefore, this work describes the experiment done, the numerical results obtained and its analysis.

Keywords: shadowing, HAPS, small scale fading.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	PLATAFORMA DE ALTA ALTITUDE (HAPS)	2
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	8
2.1	DESVANECIMENTO	9
2.1.1	DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL	11
2.1.2	DISTRIBUIÇÃO $\kappa - \mu$	11
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	14
3.1	ELABORAÇÃO E PREPARO	14
3.1.1	ESTRUTURA DE SUSTENTAÇÃO	14
3.1.2	INVÓLUCRO	18
3.1.3	FORMULAÇÃO DO EXPERIMENTO	20
3.2	IMPLEMENTAÇÃO E COLETA DE DADOS	21
3.2.1	PRIMEIRO LANÇAMENTO - 07/03/2019	22
3.2.2	SEGUNDO LANÇAMENTO - 25/03/2019	26
4	RESULTADOS E ANÁLISE	30
4.1	RESULTADOS GRÁFICOS	31
4.2	ANÁLISE E PONDERAÇÕES	49
5	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
	APÊNDICE	54

LISTA DE FIGURAS

1.1	Diferentes modelos estruturais de HAPS.	2
1.2	Exemplo de arquitetura HAPS com o projeto HeliNet.	3
1.3	Exemplos de HAPS pelo Projeto Loon.....	6
1.4	Funcionamento simplificado do sistema HAPS pelo Projeto Loon.....	7
2.1	Propagação por multipercurso.....	10
3.1	Montagem de um componente do sistema HAPS no projeto Loon.....	15
3.2	Guia de montagem do site PublicLab.....	16
3.3	Balão de cloropreno.....	17
3.4	Parte da tabela informativa dos balões de cloropreno. A linha em destaque refere-se ao balão utilizado nos experimentos.	18
3.5	Projeto 3D do invólucro de acrílico.	19
3.6	Fotografias do invólucro fabricado para a realização do experimento.	20
3.7	Tela do aplicativo Homedale para os gráficos dos sinais que se deseja visualizar.	21
3.8	Possíveis locais: (1) sobre o auditório da FT, (2) sobre o corredor do departamento de engenharia civil e (3) sobre o corredor do departamento de engenharia elétrica.	22
3.9	Marcações da ancoragem para o primeiro lançamento.	23
3.10	Registros visuais do primeiro lançamento.	24
3.11	Registros visuais do primeiro lançamento.	25
3.12	Marcações da ancoragem para o segundo lançamento.....	27
3.13	Registros visuais do segundo lançamento.	28
3.14	Registros visuais do segundo lançamento.	29
4.1	CDF's da 1ª amostra.	31
4.2	PDF's da 1ª amostra(lognormal).	31
4.3	PDF's da 1ª amostra($\kappa - \mu$).	32
4.4	CDF's da 2ª amostra.	32
4.5	PDF's da 2ª amostra(lognormal).	33
4.6	PDF's da 2ª amostra($\kappa - \mu$).	33
4.7	CDF's da 3ª amostra.	34
4.8	PDF's da 3ª amostra(lognormal).	34
4.9	PDF's da 3ª amostra($\kappa - \mu$).	35

4.10	CDF's da 4ª amostra.	35
4.11	PDF's da 4ª amostra(lognormal).	36
4.12	PDF's da 4ª amostra($\kappa - \mu$).	36
4.13	CDF's da 5ª amostra.	37
4.14	PDF's da 5ª amostra(lognormal).	37
4.15	PDF's da 5ª amostra($\kappa - \mu$).	38
4.16	CDF's da 6ª amostra.	38
4.17	PDF's da 6ª amostra(lognormal).	39
4.18	PDF's da 6ª amostra($\kappa - \mu$).	39
4.19	CDF's da 7ª amostra.	40
4.20	PDF's da 7ª amostra(lognormal).	40
4.21	PDF's da 7ª amostra($\kappa - \mu$).	41
4.22	CDF's da 8ª amostra.	41
4.23	PDF's da 8ª amostra(lognormal).	42
4.24	PDF's da 8ª amostra($\kappa - \mu$).	42
4.25	CDF's da 9ª amostra.	43
4.26	PDF's da 9ª amostra(lognormal).	43
4.27	PDF's da 9ª amostra($\kappa - \mu$).	44
4.28	CDF's da 10ª amostra.	44
4.29	PDF's da 10ª amostra(lognormal).	45
4.30	PDF's da 10ª amostra($\kappa - \mu$).	45
4.31	CDF's da 11ª amostra.	46
4.32	PDF's da 11ª amostra(lognormal).	46
4.33	PDF's da 11ª amostra($\kappa - \mu$).	47
4.34	CDF's da 12ª amostra.	47
4.35	PDF's da 12ª amostra(lognormal).	48
4.36	PDF's da 12ª amostra($\kappa - \mu$).	48

LISTA DE TABELAS

1.1	Tabela comparativa entre as diferentes modalidades de tecnologias de comunicação em radiofrequência(traduzida livremente de [1]).	4
1.2	Alocação do espectro para tecnologia HAPS.	5

LISTA DE CÓDIGOS FONTE

template–FT–UnB/PDFCDF.m.....	54
template–FT–UnB/PDF_KPMU.m.....	57
template–FT–UnB/CDF_KPMU.m	58

Capítulo 1

Introdução

Há, atualmente, cerca de 50% da população mundial ainda sem nenhum tipo de acesso à internet [2], seja por meio de computadores ou por dispositivos celulares. Esse número causa, naturalmente, uma certa estranheza para quem vive em qualquer meio urbano: o número de celulares em cidades é quase sempre igual ou maior à população que nela habita. Logo, o contato com a rede mundial de informação é algo trivial, talvez até banalizado. O Brasil, assim como outros países emergentes (Índia, África do Sul,...), tem uma enorme disparidade entre o serviço de telecomunicações prestado aos centros urbanos e às comunidades rurais [3, 4]. Estas, por sua vez, compõem boa parte do território brasileiro e agregam uma quantidade considerável de sua população; por via de regra, são estas as populações com menor escolaridade e menor acesso à educação e ao lazer [5].

O contexto socioeconômico das telecomunicações em locais de difícil acesso e com poucos investimentos estruturais, tanto privados quanto públicos, surge como a primeira motivação para esse trabalho. É natural o entendimento de que as tecnologias mais utilizadas hoje para a disseminação da rede mundial são parcialmente ineficazes ou inadequadas para prover o serviço de conexão à internet para essas áreas – novamente, por falta de interesse (difícil rentabilidade, tecnologias ainda não bem desenvolvidas) tanto privado quanto público. O projeto, portanto, foca em uma alternativa que vem se provando tanto teoricamente quanto empiricamente eficaz e com potencial retorno: a tecnologia HAP (High Altitude Platform) [6, 7].



Figura 1.1: Diferentes modelos estruturais de HAPS.

1.1 Plataforma de Alta Altitude (HAPS)

Apesar de estar ganhando cada vez mais espaço na academia e na vida pública, o fundamento da tecnologia é mais antigo que os próprios satélites: remete aos zepelins do século XIX, quando aeronaves flutuavam em baixas altitudes com ou sem pilotos humanos à bordo. Contudo, somente após a metade do século XX que se iniciaram as propostas de laços de comunicação através dessa tecnologia, de forma auxiliar e integrativa aos sistemas de satélite ou, também, de forma totalmente autônoma. As Plataformas de Alta Altitude são conhecidas dentro da literatura por outras denominações, como Stratospheric Platforms (SPFs), High Altitude Aeronautical Platforms (HAAPs) ou, mais recentemente, High Altitude Long Endurance (HALE) e High Altitude Long Loiter (HALL) [1, 8]. Todas as variedades citadas acima tem alguns, senão todos, fatores em comum:

- Aeronave flutuante, como zepelin, ou balão preenchidos com gás hélio;
- Seu espaço aéreo é puramente estratosférico, variando entre 20km a 50km de altitude;
- Possuem geração solar acoplada para alimentação de seu sistema;
- As plataformas não são tripuladas.

A posição da plataforma é, por definição, quasi-estática tanto em relação a um ponto fixo da Terra quanto a um móvel [1, 6, 8] e o serviço de banda larga a ser prestado possui uma ampla gama de escolhas: rádio, TV, Internet, hotspot W-LAN, circuitos privados ponto a ponto a altas taxas. As escolhas mais recentes tem sido de redes 3G e 4G e, possivelmente, em um futuro próximo, 5G [9]. Trata-se, fundamentalmente, de um veículo flutuante que carrega consigo uma carga – desde um simples transceptor até circuitos mais elaborados – autoalimentada, com mecanismos embutidos de pouso e movimentação aérea, o que torna o lançamento e o reparo, tanto programado quanto emergencial, ágeis e de implementação simplificada quando comparados aos outros sistemas de enlaces de micro-ondas terrestre e sistemas de satélite.

Dada a posição do transceptor em relação aos usuários terrestres, i.e. um sistema que forneça conectividade a internet para áreas rurais, o sistema HAP incorpora algumas vantagens observadas em sistemas de satélite e em sistemas terrestres concomitantemente com uma maior robustez a adversidades típicas destes dois outros sistemas. Por exemplo, um enlace HAP-estação terrestre/usuário sofre menores atrasos em sua transmissão que enlaces satélite-estação terrestre/usuário, uma vez que estes são mais longos, e também seu sinal transmitido é menos afetado por sombreamento e distorções de multipercursos comparado a enlaces terrestres, devido aos ângulos de chegada maiores. Popularmente, diria-se que os sistemas HAPs possuem “o melhor de dois mundos”. A tabela 1.1 apresenta um comparativo entre as três tecnologias (terrestre, satélite e HAP).

Logicamente, não possui apenas vantagens em relação aos sistemas já implementados em larga escala. Antes de listá-las, é importante notar que mesmo sem uma implementação oficial dessa tecnologia, já existe regulamentação sobre seu uso e suas capacidades. Encontram-se nas normas do ITU-R [10, 11] definições importantes para os HAPs que delimitam o alcance de frequência, banda e outros fatores técnicos. A área de cobertura é dividida pela WRC-97 em três grupos de cobertura: urbana (UAC ou Urban Area Coverage), suburbana (SAC ou Suburban Area Coverage) e rural (RAC ou Rural Area Coverage), cada uma dessas representando uma faixa de ângulo de elevação mínimo e uma faixa de distância entre o receptor terrestre e o ponto subplataforma (SPP). Os valores numéricos das categorias supracitadas estão disponíveis em [10].

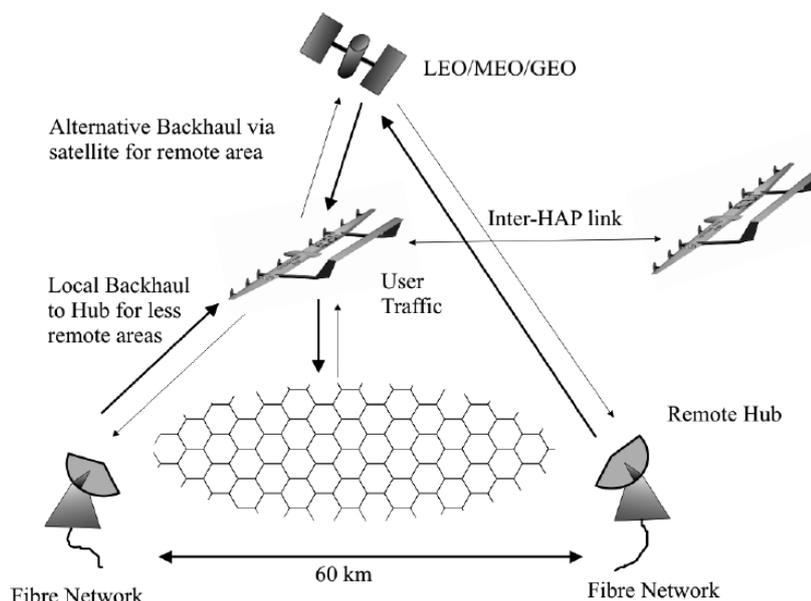


Figura 1.2: Exemplo de arquitetura HAPS com o projeto HeliNet.

O alcance de um sistema HAP, como mencionado em [12], pode chegar a cobertura de países inteiros. Dois desses casos são Japão e Grécia, onde estimou-se uma rede de 16 e 18 HAPs interconectados, respectivamente, com ângulos de elevação mínimos de 10° para prestar serviço de banda larga. As fontes encontradas citam que é possível satisfazer as condições

Tabela 1.1: Tabela comparativa entre as diferentes modalidades de tecnologias de comunicação em radiofrequência(traduzida livremente de [1]).

Tópico	Rede sem fio terrestre	Satélite	HAPS
Disponibilidade e custo de terminais móveis	Mercado trabalha com grandes volumes, resultando em unidades de pequeno potência e preço	Demandas especiais formam terminais volumosos com tempo de vida reduzido	Comparável com terrestre
Atraso de propagação	Baixo	Pode ser alto a depender do sinal(voz para GEO, por exemplo)	Baixo
Riscos à saúde por emissões	Terminais de baixa potência oferecem pouco risco	Terminais de alta potência(pode ser abreviado com projetos de antenas cuidadosos)	Níveis de potência similares aos terrestres(exceto para área de grande cobertura)
Duração de lançamento	Lançamento em fases; custo inicial substancial para prover cobertura com sucesso comercial	Serviço somente inicia depois que todo o sistema foi implementado	Uma plataforma e uma unidade de apoio terrestre são suficiente para eficácia
Crescimento do sistema	Divisão de célula para aumentar capacidade, necessita reprojeter sistema; atualização e reparação fáceis dos equipamentos	Capacidade do sistema só aumenta colocando mais satélites; atualização de hardware apenas trocando satélites	Capacidade aumenta via modificando tamanho de feixe e adicionando plataformas; atualização de equipamento relativamente fácil
Complexidade do sistema devido a movimentação das componentes	Somente usuários são móveis	Movimentação de LEOs e GEOs é uma grande fonte de complexidade especialmente para os links intersatélites	De baixa até moderada
Complexidade e custo de operação	Bem compreendida	Alta para GEOs e LEOs - dado os lançamentos contínuos de reposição	Algumas propostas requerem pousos frequentes para reabastecimento
Qualidade do canal	Desvanecimento Rayleigh limita a distância e a taxa de dados; pathloss cerca de 50dB/década	Canal próximo ao espaço livre com desvanecimento Rician; perda de caminho até 20dB/década	Canal próximo ao espaço livre com distâncias comparáveis às terrestres
Cobertura indoor	Cobertura substancial alcançada	Em geral, não disponível	Cobertura substancial possível
Abrangência de cobertura geográfica	Alguns quilômetros por estação	Largas regiões para GEO e global para LEO e MEO	Algumas centenas de quilômetros por plataforma(200km)
Diâmetro da célula	0.1-1.0 km	50km para LEOs; mais de 400km para GEOs	1-10km
Sombreamento pelo terreno	Causa falha na cobertura; necessita equipamento adicional	Apenas um problema em ângulos de elevação pequenos	Similar a satélites
Infraestrutura de comunicação e força	Diversas estações base para serem instaladas, energizadas e linkadas por cabo ou microondas	Um único gateway lida com o tráfego de uma larga área	Comparável com satélite
Custo	Varia com o sistema	Centenas de milhões de dólares para GEOs e alguns bilhões para LEO	Ainda não preciso, mas menos do que sistemas terrestres com muitas estações base e muito menos que satélites

mínimas de serviço para o ângulo de elevação mínimo de 5°, contudo é comumente praticado um ângulo mínimo de 15° [6, 8]. Dado o seu longo alcance e o custo estimado moderado de lançamento e manutenção, um sistema de comunicação por HAPs apresenta relativa superioridade em funcionalidade e custo por usuário em áreas com densidades populacionais baixas, como pequenas cidades isoladas em ilhas ou desertos.

A alocação do espectro também é definida pela ITU e segue as linhas gerais destacadas na tabela 1.2.

Tabela 1.2: Alocação do espectro para tecnologia HAPS.

Faixa de frequência	Região	Direção do link	Tipo de Serviço	Serviços compartilhados
47.2-47.5GHz 47.9-48.2GHz	Global	Up e downlinks	Serviços fixos	Serviços fixos e móveis; uplinks de serviços fixos de satélite
31.0-31.3GHz	40 países ao redor do mundo(20 na Ásia, Rússia, África e nas Américas do Norte e do Sul)	Uplink	Serviço fixo	Serviços fixos e móveis; serviço para ciência espacial em certas áreas
27.5-28.35 GHz	40 países ao redor do mundo(20 na Ásia, Rússia, África e nas Américas do Norte e do Sul)	Downlink	Serviço fixo	Serviços fixos e móveis; uplinks de serviços fixos de satélite
1885-1980 MHz 2010-2025 MHz 2110-2170 MHz	Europa, África, Rússia, Oriente Médio, Mongólia, Ásia, Irã e países do Pacífico	Up e downlinks	IMT-2000	Serviços fixos e móveis(em particular, IMT-2000 terrestre e PCS)
1885-1980 MHz 2110-2160 MHz	Américas do Norte e do Sul	Up e downlinks	IMT-2000	Serviços fixos e móveis(em particular, IMT-2000 terrestre e PCS)

Com o traçado das linhas descritivas base dos aspectos funcionais e técnicos dos sistemas HAPs, é possível citar algumas desvantagens e dificuldades:

- A manutenção da posição quasi-estacionária em relação a um ponto fixo na Terra é ainda de difícil implementação, mesmo se tratando da estratosfera onde o regime de ventos é menos caótico e tem registrado menores velocidades médias que em menores altitudes. Possíveis soluções são um controle contínuo automatizado via motores elétricos do voo e do conjunto de antenas e uma possível rede de HAPs que se movimentam conjuntamente com o regime de ventos;
- Uma vez que seus serviços foram alocados em frequências bem altas, desde 28GHz para o downlink em países da Ásia, África e Américas até 48GHz para up e downlinks globalmente, os sistemas HAPs devem enfrentar grandes atenuações por chuva em suas transmissões, uma vez que é comprovado que para essas faixas de frequência a absorção e reflexão por chuva são fatores determinantes na qualidade do sinal recebido;

- A carga das HAPs necessitará de energia para seu funcionamento e, como citado anteriormente, não existe fonte externa à própria HAP. É necessário realizar um trade off entre a capacidade do sistema de comunicação e a potência que o sistema de energia será capaz de fornecer. Logicamente, outros fatores como codificação, modulação e projeto de antenas são cruciais para que existe um balanço pleno e funcional;
- As características de cada HAP varia muito com o sistema ao qual está conectado: como base repetidora para sistemas essencialmente terrestres, como apoio para redes de satélite, como um sistema integrado de diversos HAPs com bases terrestre ou usuários privados ou até uma mistura de todos esses em diversos locais e etapas. Assim, a definição de canais e a alocação de recursos é particular para cada caso e torna a tarefa de implementar os sistemas HAPs algo inovador e complexo.

Existem algumas universidades e empresas privadas que puseram em prática experimentos com elaboração material rebuscada, buscando entender a dinâmica funcional de um sistema HAP que procurasse um fornecimento de serviço estável, regular e de qualidade para comunidades isoladas. Segundo a base de artigos SCOPUS, no período de vinte e cinco anos de 1990 a 2015, foram publicados 1220 artigos sobre HAPs, em sua maioria artigos acadêmicos – apenas 10% do total correspondem a empresas e outros [7]. Todavia, diversos projetos liderados por instituições públicas e privadas não acadêmicas podem ser destacados como pioneiros na busca por compreensão da tecnologia. Dentre eles, é possível citar HeliNet (UE), CAPANINA (UE), Loon (Google, EUA), Aquila (Facebook, EUA), Estratobus (Thales Alenia Space, França), entre outros.



(a) Balão e carga sobrevoando área montanhosa.



(b) Teste com o sistema completo em Porto Rico.

Figura 1.3: Exemplos de HAPS pelo Projeto Loon.

Especificamente, o projeto Loon foi um grande referencial para a realização desse trabalho, na teoria e na prática. Um dos objetivos primários do projeto corresponde à instigação inicial dessa tese: a conectividade para áreas remotas [13, 14]. O projeto Loon, criado pela Google e, atualmente, liderado por equipe própria (após desvinculação da Google em 2015), visa criar acesso a rede mundial para populações que possuem pouca ou nenhuma capacidade de fazê-lo e sem um prospecto futuro muito positivo na área. Sua referência é importante porque diversos testes foram realizados, inclusive em cidades do Piauí durante o

ano de 2014, provendo serviço de conexão banda larga para acesso a internet e através de frequências mais baixas que não sofrem tanta mitigação de sinal por chuva e outros fatores atmosféricos - como é o caso de estudo aqui formalizado.

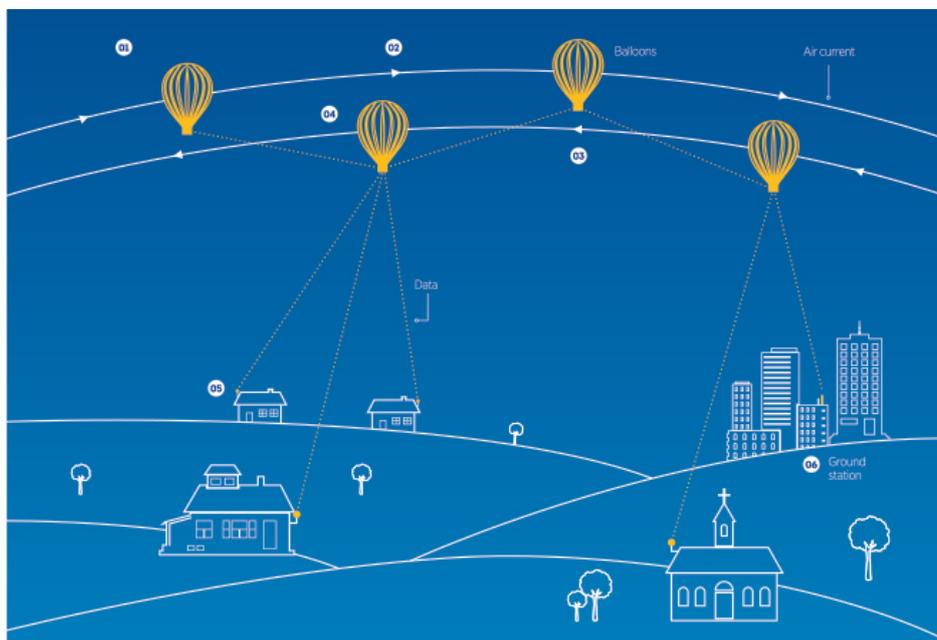


Figura 1.4: Funcionamento simplificado do sistema HAPS pelo Projeto Loon.

O presente trabalho foi proposto como uma investigação de fatores técnicos que corroborem com a atual literatura desenvolvida para comunicações sem fio, em específico sistemas HAP, e contribuam para uma discussão mais frutífera e prática dessa tecnologia. Alguns tópicos como codificação e projeto de antenas, ambos centrais para o desenvolvimento e aplicação de redes por HAPs, serão colocados como secundário por falta de recursos, tempo e propriedade do autor para uma sua discussão profunda e séria. Nos textos citados da bibliografia, pode-se encontrar mais detalhes sobre as adaptações e especificidades dessas técnicas em redes sem fio com HAPs. Através do compilado resultando das informações colhidas e apresentadas, é notória a dificuldade de implementação e teste em sistemas de telecomunicação estratosféricos, o que torna impraticável a realização de experimentos em escala real para uma tese de graduação. Conseqüentemente, o conteúdo apresentado é derivado de uma aproximação à plataformas atmosféricas, em uma escala mais próxima à realidade do autor - tanto técnica como financeira. Não se propõe, portanto, a validar trabalhos teóricos e empíricos prévios, mas realizar uma verificação situacional e adicionar informação ao ambiente acadêmico a respeito da implementação da tecnologia de plataformas de alta altitude para o âmbito de redes sem fio.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

Afim de determinar os aspectos técnicos essenciais para implementação dessa tecnologia, os estudos de caso são importantes para identificar características locais. O desvanecimento do sinal - superficialmente, a variação da potência do sinal no tempo por elementos físicos do canal de comunicação como chuva, nuvens, prédios, carros e movimentação do par transmissor/receptor - é um fator importante para a escolha de parâmetros justos à execução de redes sem fio. O desvanecimento será rapidamente explicado com o intuito de solidificar a estrutura empírica sugerida no próximo capítulo.

O problema de propagação de ondas é assunto anterior à redes móveis, contudo compõe um dos grandes desafios ao avanço tecnológico nessa área. O que diversos engenheiros e cientistas tem feito para melhorar o desempenho de suas redes - no fim, torná-las rentáveis - é compreender cada vez melhor o canal pelo qual a onda se propaga, o canal de comunicação entre o(s) transmissor(es) e o(s) receptor(es) de um certo sistema. Como citadas, são muitas as contribuições negativas para a distorção do sinal recebido e, estrategicamente, é sensato preparar seu sinal para que possa sofrer as devidas mitigações sem, ultimamente, perder a estrutura original de sua mensagem. Com esse intuito, a modelagem de canal é uma ferramenta importante porque permite que se anteveja, com um erro mínimo, as alterações que serão realizadas sobre o sinal transmitido.

Existem duas grandes categorias de modelos para a propagação de ondas dentro do universo de redes móveis: os modelos estatísticos e os modelos geométricos - com eventuais interseções [15]. Nessa tese, o foco se concentra no primeiro grupo, modelagens estatísticas, com uma maior ênfase em dois modelos principais, o modelo de distribuição log-normal [15, 16, 17] e o modelo de distribuição $\kappa - \mu$ [18, 19].

Fundamentalmente, a primeira atenuação que o sinal sofre é quantizada pela equação de perda de caminho de Friss para o espaço livre

$$L_s(d) = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (2.1)$$

onde a perda é quadraticamente proporcional a distância e o inverso vale para o comprimento de onda.

A equação é o modelo mais simples de canais de comunicação existente e, portanto, a base para todos os outros. Após os trabalhos empíricos de Okumura e a consecutiva transmutação de seus resultados em equações paramétricas por Hata, delimitou-se uma relação ainda mais próxima com a realidade de transmissão de sinais via redes sem fio, demonstrada pela equação abaixo. Nesta, $\overline{L}_p(d)$ é a perda de caminho média sentida pelo sinal de comunicação, d_0 é um ponto fixo localizado no campo distante (região de Fraunhofer) da antena transmissora (geralmente escolhido como potências de dez) e n é um fator circunstancial a variar - assumindo o valor $n = 2$ em condições de espaço livre. Todos os elementos da equação estão em dB .

$$\overline{L}_p(d)[dB] = L_s(d_0)[dB] + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2.2)$$

É notável que o modelo acima é, apesar de lógico, incompleto. Não são contabilizados dentro desse modelo quaisquer um dos fenômenos bem conhecidos como a reflexão, a refração, a difração e o espalhamento, naturais à propagação. Diversos autores sugeriram modelagens para contabilização desses fenômenos, de modelagens mais simples e intuitivas como as zonas de Fresnel até modelos complexos como o mais recente Doyis-Fantini [20]. Novamente, a ênfase será nas abordagens probabilísticas, portanto os modelos geométricos não serão abordados.

2.1 Desvanecimento

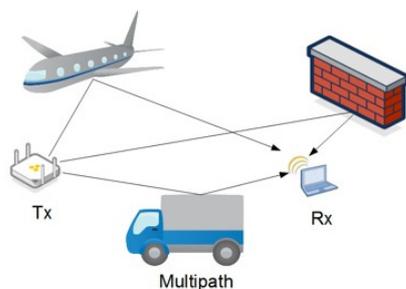
O desvanecimento do sinal, uma forma de atenuação do sinal, dá-se pelos fenômenos supracitados da reflexão, refração, difração e espalhamento do sinal e ocorrem em qualquer meio de propagação que não seja o espaço livre. A medida que ocorrem, resultam em diferentes efeitos no sinal recebido dependendo do grau de importância do fenômeno no canal de transmissão. Por exemplo, Zonas de Fresnel são importantes ferramentas quando se trata de redes de micro-ondas terrestres entre duas torres com níveis de solo elevados entre elas; aqui, o fenômeno característico é a difração [16, 17]. Em linhas gerais, caracterizam-se o conjunto desses fenômenos como *desvanecimento em larga escala*. Segue uma breve descrição individual:

- Reflexão: ocorre quando o sinal transita entre dois meios (ex.: ar e parede), fazendo com que todo o sinal seja refletido de volta para o primeiro meio. Via de regra, há reflexão na incidência de ondas planas sobre superfícies lisas e de dimensões relativamente maiores ao comprimento de onda do sinal;
- Refração: da mesma maneira que a reflexão, ocorre quando o sinal transita entre dois

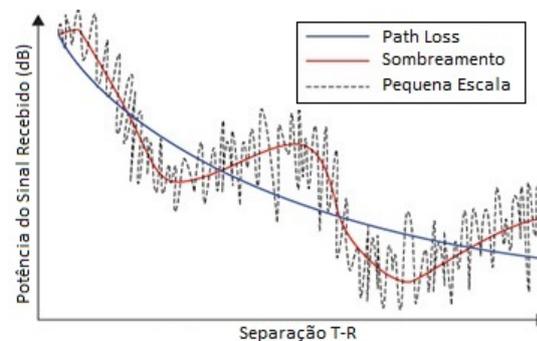
meios com densidades diferentes. Nesse caso, o sinal não retorna ao primeiro meio, mas continua através do segundo com mudança de angulatura e amplitude;

- Difração: é resultado da incidência do sinal sobre pontas acentuadas do terreno durante o percurso T-R, fazendo com que parte do sinal se dobre e apareça mesmo atrás do obstáculo (NLOS);
- Espalhamento: é resultado da incidência do sinal sobre obstáculos da mesma ordem de tamanho que o comprimento de onda do sinal, como rugosidades de uma superfície ou outros objetos maiores, como galhos, folhas e postes.

Outros eventos naturais, como chuva, absorção por gases e cintilamento, são importantes para a caracterização do canal de comunicação, principalmente para frequências na faixa de dezenas de GHz, onde passam a ser preponderantes na mitigação do sinal. O trabalho se propõe realizar experimentos em faixas mais baixas de frequência - 2 a 3 GHz - e foca, devidamente, em efeitos que são mais intensos para estas. Em redes móveis, a existência de anteparos no trajeto do sinal cria flutuações no nível de potência medido no sinal recebido, uma vez que chegam ao transmissor, em um dado instante t diversas variações do sinal transmitido, as quais são simplesmente o sinal original alterado por algum dos fenômenos mencionados; o efeito causado por essas alterações foi nomeado *sombreamento*. O sombreamento, portanto, é a flutuação do sinal recebido devido às componentes de *multipercurso* que chegam ao receptor com diferentes amplitudes, fases e ângulos de chegada do sinal LOS (ou do multipercurso de maior potência).



(a) Desenho explicativo da propagação por multipercurso em redes móveis.



(b) Gráfico com a superposição dos efeitos de desvanecimento do sinal.

Figura 2.1: Propagação por multipercurso.

Os obstáculos, em sua maioria estáticos, não são idênticos para a mesma distância d como raio de um círculo cujo centro é a antena de transmissão e, portanto, a perda de caminho do sinal depende de um fator local.

2.1.1 Distribuição Log-Normal

Através de repetidas medições empíricas de diversos canais, foi possível chegar a uma relação como a descrita abaixo:

$$L_p(d)[dB] = \overline{L_p}(d)[dB] + X_\sigma \quad (2.3)$$

onde o fator X_σ é uma variável aleatória com distribuição *gaussiana (normal)* de probabilidade - quando os níveis de potência do sinal são medidos em dB. Portanto, a perda de caminho sofrida pelo sinal é, também, uma variável aleatória com distribuição *log-normal*. Ao final, tem-se que a perda de caminho é descrita, por esse modelo, em termos de n , d_0 e σ , que é o desvio padrão da distribuição gaussiana e cujo valor, calculado a partir de amostras experimentais, também é apresentado em dB.

A função de densidade de probabilidade aplicada a redes móveis que possui essa distribuição é da forma:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2 * \pi * \sigma_{dB}^2}} * \exp \left[\frac{-(z_{dBm} - \mu)^2}{2 * \sigma_{dB}^2} \right]; \quad (2.4)$$

Nesta equação, o parâmetro μ é a potência média em *dBm*. A CDF, por sua vez, é calculada através da função:

$$F_x(X) = 1 - Q\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right); \quad (2.5)$$

Essa distribuição, encontrada por procedimento experimental, é forte e representa uma boa aproximação de alguns canais de comunicação em redes móveis. Assim, esse é o primeiro modelo referência para a análise feita nessa tese.

2.1.2 Distribuição $\kappa - \mu$

Em um canal de comunicação de redes sem fio, é natural que exista movimento na trajetória T-R, seja das antenas seja de objetos que se encontram entre estas. Essa mobilidade de anteparos nos quais o sinal pode sofrer quaisquer um dos fenômenos mencionados anteriormente faz com que o canal seja, de forma natural, caracterizado como variante no tempo: o sinal recebido, na verdade, é uma soma de diversas componentes atrasadas temporalmente, com diferentes ângulos de chegada, amplitudes e fases.

Contudo, a movimentação modifica as componentes do sinal, atrasando-as em intervalos curtos de tempo - ou, melhor dizendo, na ordem de grandeza do próprio intervalo de transmissão do sinal. Dessa maneira, o desvanecimento aqui ocorre em intervalos próximos ao inverso da banda do sinal: é, portanto, denominado *desvanecimento em pequena escala*.

A rápida flutuação do sinal em pequenos intervalos ou pequenas distâncias de transmissão, o efeito Doppler de modulação aleatória da frequência e a dispersão temporal causada

pelos multipercursos são os três possíveis efeitos desse tipo de desvanecimento. A atenção será voltado, prioritariamente, para o primeiro desses efeitos mencionados: níveis medidos de potência variando rapidamente - consideravelmente mais rápido do que os efeitos de larga escala.

Modelos como a distribuição de Rayleigh (caso em que não existe a componente LOS) e Rice (caso no qual existe uma componente de linha de visada) são bem conhecidos e baseiam-se na descrição estatística do desvanecimento em pequena escala. Ambos utilizam parâmetros individuais e funções de densidade de probabilidade e de probabilidade acumulada para descrever o fenômeno matematicamente.

O segundo modelo referência para esse trabalho é uma generalização desses e outros modelos que se intersectam (como o modelo Nakagami- m , Nakagami- q , ou Hoyt, e Weibull). Essa modelagem, chamada de distribuição $\kappa - \mu$, é mais complexa e realista que a distribuição log normal, levando em consideração os efeitos de pequena escala resultantes do espaço físico de propagação do sinal e resultando em outras distribuições, como as mencionadas acima, em casos especiais.

A distribuição $\kappa - \mu$ é descrita minuciosamente em [18] e esse trabalho fará apenas um breve resumo das características, deduções e análises estruturais dessa distribuição, apresentando os parâmetros e as equações mais importantes.

Como pode-se intuir, a parametrização aqui conta com duas variáveis: κ , que representa a razão entre a potência total das componentes dominantes e a potência total das componentes dispersas, e μ , um fator matemático encontrado pela equação

$$\mu = \frac{E^2(R^2)}{V(R^2)} * \frac{1 + 2\kappa}{(1 + \kappa)^2} \quad (2.6)$$

sendo R é o envelope do sinal recebido e $E[.]$ e $V[.]$ são, respectivamente, a esperança e a variância de $[.]$. O envelope é da forma

$$R^2 = \sum_{i=1}^n (X_i + p_i)^2 + \sum_{i=1}^n (Y_i + q_i)^2 \quad (2.7)$$

para o qual X_i e Y_i são processos Gaussianos mutuamente independentes de média zero e desvio padrão σ^2 , enquanto p_i e q_i são as médias dos valores das componentes de fase e quadratura das ondas de multipercurso de cada célula i , respectivamente, para um total de células n .

Uma vez que pode-se escrever a potência do sinal $W = R^2$, com a potência normalizada da forma $\Omega = \frac{W}{\bar{w}}$ e $\bar{w} = E(W)$, tem-se que μ pode ser reescrito como

$$\mu = \frac{1}{V(\Omega)} \frac{1 + 2\kappa}{(1 + \kappa)^2} \quad (2.8)$$

Conjuntamente com essa representação do fator, o modelo descreve a função de densidade de probabilidade do processo aleatório W - que é, de fato, a soma de vários processos estocásticos independentes na forma $W = \sum_{i=1} nW_i$ - no seguinte equacionamento:

$$f_{\Omega}(\omega) = \frac{\mu(1 + \kappa)^{\frac{\mu+1}{2}}}{\kappa^{\frac{\mu+1}{2}} \exp(\mu\kappa)} \omega^{\frac{\mu-1}{2}} \exp[-\mu(1 + \kappa)\omega] I_{\mu-1}[2\mu\sqrt{\kappa(1 + \kappa)}\omega] \quad (2.9)$$

na qual $I_{\nu}[\cdot]$ é a função de Bessel modificada de primeira ordem, como descrita em [21]. Neste momento, é importante o comentário que a soma de variáveis aleatórias com distribuições $\kappa - \mu$, idêntica ou não idênticamente distribuídas, podem ser *bem aproximadas* por uma variável aleatória de distribuição $\kappa - \mu$, sendo a aproximação para variáveis idênticamente distribuídas mais precisa que para o caso de distribuições não idênticas - ambivalente para os equacionamentos sobre o envelope ou sobre a potência do sinal.

Faz-se necessária a estimação dos parâmetros para o ajuste das curvas de ambas PDF e CDF. O valor de μ pode ser encontrado pela fórmula 2.8. enquanto κ pode ser avaliado pelo estimador(as esperanças estão em função do envelope normalizado, i.e $\rho = \frac{R}{\hat{r}}$, onde $\hat{r} = \sqrt{E(R^2)}$ é o valor *rms* de R).

$$\kappa^{-1} = \frac{\sqrt{2}[E(\rho^4) - 1]}{\sqrt{2E^2(\rho^4) - E(\rho^4) - E(\rho^6)}} - 2 \quad (2.10)$$

Para concluir a breve introdução ao modelo, apresenta-se ainda uma simplificação da utilização dos dois parâmetros embutidos na escolha de apenas um parâmetro m . É possível visualizar, a partir da equação 2.8, que

$$m = \mu \frac{(1 + \kappa)^2}{1 + 2\kappa} \quad (2.11)$$

e, a partir desse resultado e consecutivas manipulações matemáticas como descrito no apêndice do artigo [20], a PDF resultante que sintetiza o modelo com apenas um parâmetro é encontrada(em termos do envelope normalizado).

$$f_P(\rho) = \frac{4mI_1(4m\rho)}{\exp[2m(1 + \rho^2)]} + \left[1 - \frac{\sqrt{2m\pi}}{\exp(m)} I_{0.5}(m)\right] \delta(\rho) \quad (2.12)$$

Através da equação 2.11, nota-se que há uma faixa entre 0 e m para a escolha de μ , uma vez que(fixado o valor de m) $\mu = 0$ para $\kappa \rightarrow \infty$ e $\mu = m$ para $\kappa \rightarrow 0$. Assim, é possível um controle mais estático da mudança de parâmetros para quaisquer ajuste das curvas de densidade de probabilidade e de probabilidade acumulada (a PDF em função de m permitiu um melhor entendimento dos ajustes finos realizados após a fase de medições).

Capítulo 3

Procedimento Experimental

Esse capítulo se dividirá em duas grandes partes, para que o processo como um todo seja explicado de maneira sequencial e inteligível. A primeira será uma explicação geral sobre a elaboração do projeto, na qual se descreve as limitações e capacidades que surgiram ao longo do planejamento para que se entendam as decisões tomadas quanto às variáveis presentes (local, data, materiais, equipamentos,...).

Uma segunda parte trata da implementação, detalhando as partes físicas do procedimento escolhidas e utilizadas, eventuais trocas e mudanças na realização e a sequência de eventos que se deu a medida que se realizava a fase empírica desse trabalho.

Neste capítulo, os eventos serão descritos cronologicamente na tentativa de ilustrar todo o processo do autor, que considera crucial o entendimento das várias etapas e desafios encontrados ao longo do percurso.

3.1 Elaboração e Preparo

A partir do conhecimento dos fundamentos teóricos e da motivação inicial, foi possível estruturar o escopo do experimento que se almejava realizar. Em um primeiro momento, o projeto Loon foi a inspiração central para os moldes do procedimento empírico: uma estação suspensa (não necessariamente estratosférica) com uma carga transmissora e um receptor terrestre próximo ao solo.

3.1.1 Estrutura de Sustentação

O conjunto de equipamentos, dentro do projeto Loon, que compõem genericamente a estrutura HAPS - a parte do sistema de comunicação - são: um balão, cujo material foi desenvolvido pela própria equipe e, portanto, restrito; um conjunto transceptor com um design próprio de antenas; uma placa solar para alimentar todos os sistemas (o que inclui o inversor na carga); uma bomba conectada a um reservatório de gás hélio para a mudança de altitude

do balão; controladores de voo como transceptores óticos para comunicação entre balões, entre outros componentes desconhecidos ao público geral. Sendo esta a motivação primordial, o intuito foi se basear nessa arquitetura física e montar uma simulação em escala reduzida, permitindo que se explorasse a criação de um estudo empírico viável conjuntamente com a implementação procedimental de realizar tal estudo dada as condições ambientais e as restrições orçamentárias.

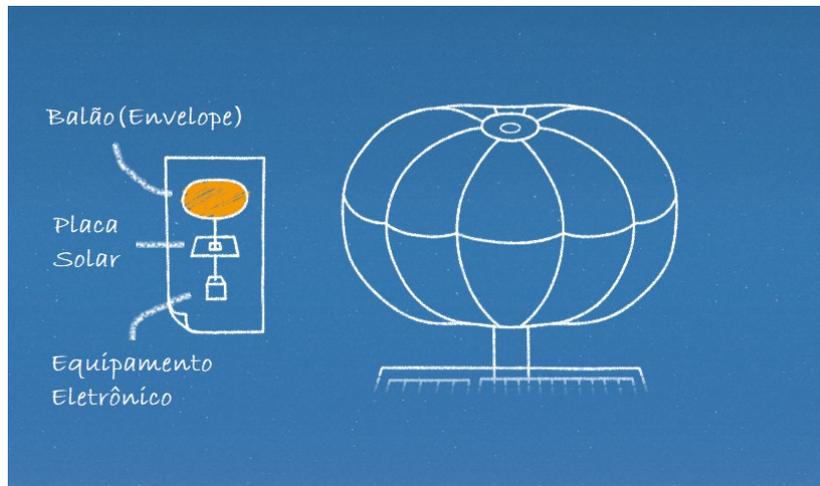


Figura 3.1: Montagem de um componente do sistema HAPS no projeto Loon.

Desejava-se suspender uma carga composta, essencialmente, de um roteador (com sua fonte), um amplificador, uma antena e um invólucro que pudesse resistir às intempéries climáticas - principalmente, vento e chuva - mantendo seu conteúdo interior intacto. Naturalmente, uma busca na rede por experimentos semelhantes foi feita, procurando uma referência de trabalhos já realizados ou em realização. Encontrou-se um grupo estadunidense de compartilhamento de soluções e criações inovadoras denominado **Public Lab** [22], o qual possuía um pacote de mapeamento área por balão. O pacote era constituído de, basicamente, um balão de *cloropreno* (um tipo de borracha sintética) com, aproximadamente, 1.7 metros de diâmetro, um rolo de 305 metros de linha Dacron enrolada em um carretel de 21 centímetros, luvas de couro para proteção contra queimaduras, três cliques giratórios para a conexão da carga ao balão, mosquetões para a conexão entre carga e a linha de fixação terrestre, e ainda um manual de instruções sobre todos os passos, desde montagem até aterrissagem do sistema.

Todas as informações contidas nesse website são disponíveis gratuitamente, além do website se organizar em torno de uma comunidade D.I.Y. ("Do It Yourself", ou "Faça Você Mesmo"), o que o aproxima bastante do funcionamento empírico dessa tese. Diversas pessoas compraram esse pacote de mapeamento e relataram, nos grupos de discussão online, os procedimentos que realizaram, com descrições e dados dos produtos finais e ponderações positivas sobre a qualidade ferramental do pacote. Por isso, entendeu-se que os materiais e a arquitetura desse projeto de mapeamento seriam um ótimo parâmetro. Obviamente, o projeto de mapeamento do Public Lab foi apenas uma linha guia para o desenvolvimento desse trabalho, uma vez que diversas disparidades deviam ser consideradas:

An Illustrated Guide to
**Grassroots Mapping with
Balloons and Kites**

To learn more, visit <http://grassrootsmapping.org>

Do you want to make maps? Do you need satellite images but can't afford them? Do you want to see your home from above?

Follow these instructions and you can, for as little as \$100!

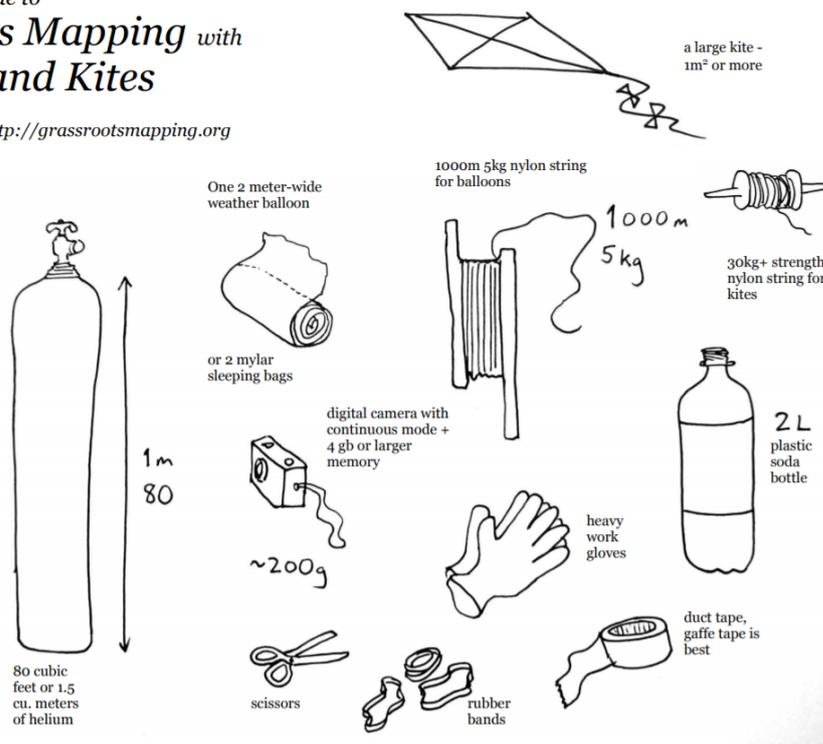


Figura 3.2: Guia de montagem do site PublicLab.

- A carga total do projeto de mapeamento deveria ser, a depender do material, consideravelmente mais leve que a projetada para o experimento dessa dissertação. Enquanto aquele utiliza câmeras fotográficas baratas e pedaços de garrafa de plástico para proteger o conteúdo interno, o modelo idealizado para este era de levar diversos equipamentos eletrônicos e suas respectivas fontes - além de um possível *cooler* e cabos de rede e força;
- Enquanto o mapeamento pode ser realizado em poucas horas (algumas vezes, menos ainda), as coletas para o experimento em pauta demorariam relativamente mais, uma vez que diversas localizações deveriam ser testadas e cada localização teria uma melhor amostragem quanto maior o período de medição;
- Em geral, os locais de mapeamento escolhidos são abertos, com pouca ou nenhuma probabilidade de danos a edificações ou transeuntes no cenário da queda do balão. No caso dessa tese, ambos tipos de danos devem ser evitados ao máximo e implicam uma demanda de maior controle da posição e trajetória do balão (mesmo fixado) e, conseqüentemente, arquitetura e materiais mais seguros e duradouros;
- Aditivo ao item anterior, a medição a ser realizada no experimento tem como requisito proximidade a áreas urbanas e suburbanas, dada a dependência de fontes de rede e força para os equipamentos. Assim, a altura a ser atingida pelo sistema de suspensão seria, necessariamente, menor do que aquela alcançada na maioria dos projetos de mapeamento. Com o risco de atingir árvores, linhas de transmissão e edificações, o

sistema de ancoragem deveria contar com múltiplos pontos de apoio e locais isentos de tráfego de pessoas e carros, evitando possíveis acidentes e também danos às cordas de fixação;

- O invólucro do sistema de mapeamento é bem mais simples, composto genericamente apenas de uma garrafa de plástico cortada e moldada para envolver a câmera fotográfica. Entretanto, no caso desse trabalho, seria necessário o invólucro muito mais resistente à chuva e ao vento, pois qualquer acúmulo de água pode não somente prejudicar os equipamentos suspensos como também os equipamentos em solo que estão conectados, interrompendo precocemente o experimento e inviabilizando-o. Existiriam, apesar de pequenos, riscos a pessoas também.



Figura 3.3: Balão de cloropreno.

O balão, dentre as peças fundamentais, foi um grande desafio para a execução desse projeto. Houve uma extensa procura por um material resistente, duradouro e que suportasse, uma vez inflado, a carga (de início, desconhecida) por um período longo o bastante para que as medições fossem realizadas. O melhor resultado obtido foi o balão que compunha o pacote de mapeamento aéreo, composto de cloropreno e já testado em voos com hélio em alturas semelhantes às alturas desejadas nessa projeto. A partir de uma estimativa do peso, percebeu-se que não seria seguro - ou, até mesmo, possível - levar a carga esperada com o balão de 1.7 metros de diâmetro, cuja *capacidade de suspensão* é de 2.13 kg e tempo médio de suspensão de 8 dias, conforme a imagem 3.4. Optou-se pelo maior tamanho disponível, um balão de cloropreno de 7.561mm^3 de volume (2.4m de diâmetro) e com capacidade de suspensão de até 7.03kg e tempo médio de suspensão de 18 dias. Assim, superava-se a a estimativa do peso da carga e ganhava-se uma margem segura de sustentação a medida que o balão esvaziasse.

A ação dos ventos sobre o balão suspenso, imaginou-se, seria de empurrá-lo em diversas direções, sendo necessários diversos pontos de ancoragem conectados ao balão por linhas resistentes à tração e, possivelmente, à abrasão. Inicialmente, optou-se pela escolha do pacote

Cloudbuster™ Chloroprene Balloons					
4' (1.2m) Chloroprene	4' (1.2m)	1.7 lb. (771g)	45 cu. ft. (1.274m ³)	5	4-5 days
5.5' (1.7m) Chloroprene	5.5' (1.7m)	4.7 lb. (2.13kg)	87 cu. ft. (2.464m ³)	2	8 days
8' (2.4m) Chloroprene	8' (2.4m)	15.5 lb. (7.03kg)	267 cu. ft. (7.561m ³)	1	18+ days

Figura 3.4: Parte da tabela informativa dos balões de cloropreno. A linha em destaque refere-se ao balão utilizado nos experimentos.

de mapeamento aéreo - a linha Dacron -, contudo a restrição orçamentária e a dificuldade de encontrar um fornecedor fizeram com que se escolhesse uma linha de pesca multifilamento de $0.6mm^2$ com resistência à tração de até 100kg. A escolha foi feita a partir da intuição e de estimativas sobre as possíveis forças. O fato de que deveriam existir pontos de apoio radialmente espalhados corroborou com a ideia de que a linha de pesca seria resistente o suficiente.

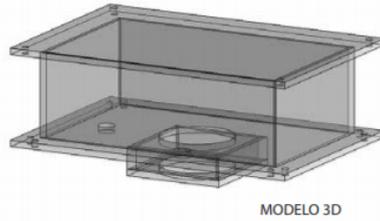
3.1.2 Invólucro

Sabia-se que, uma vez que diversos fatores físicos poderiam causar danos irreversíveis aos aparelhos e inviabilizar o experimento, o material da caixa seria determinante para sua funcionalidade. O material deveria ser leve - apesar de se ter uma boa margem de peso -, praticamente impenetrável a chuvas e vento e resistente a forças de tração (dependente da arquitetura). Procurava-se que fosse também eletricamente isolante, evitando efeitos prejudiciais ao sinal de comunicação transmitido e impondo mais uma barreira para eventuais acidentes com humanos. Algumas opções iniciais foram: madeira, papelão, vidro, acrílico ou uma mescla de alguns citados, dentre os quais o acrílico oferecia o maior número de vantagens acumuladas sem desvantagens tão relevantes. Além de impermeável, é transparente (adiciona maior visibilidade dos componentes, o que ajuda na detecção de cintilamentos), é leve, pode ser furado (o que permitiria a inserção dos cabos com o mínimo de área aberta possível) e moldado com rapidez na produção.

Naturalmente, o formato que surgiu e manteve-se foi o de uma caixa, onde todas as placas (laterais, topo e fundo) poderiam ser coladas umas nas outras com firmeza, certificando uma fina selagem. Ainda, o formato de paralelepípedo introduzia facilidade para realizar o dimensionamento, evitando torções de cabos, e otimizava o encaixe, economia de material, rapidez de produção e mobilidade para a inserção dos equipamentos, pontos de conexão e transporte. Tomaram-se todas as medidas dimensionais dos equipamentos a serem inseridos e projetou-se a caixa, adequando as entradas dos cabos e a abertura da antena para a disposição física específica desses aparelhos.

Uma vez projetado, o invólucro de acrílico foi manufaturado e testes foram realizados para verificar a efetividade da montagem como planejado. Com o roteador e amplificador funcionando dentro da caixa, o sinal transmitido foi observado com o intuito de identificar alguma anomalia na qualidade do sinal que poderia ser causada pela própria caixa.

ESQUEMA CAIXA



MODELO 3D

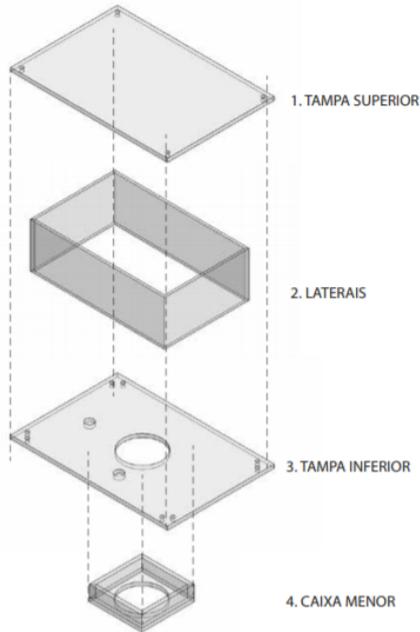


Figura 3.5: Projeto 3D do invólucro de acrílico.

Haviam já sido escolhidos o transmissor, o amplificador e a antena, pois eram os materiais disponíveis para uso imediato ao se decidir realizar o projeto. O receptor foi, naturalmente, determinado como o laptop do autor, uma vez que nele seriam também armazenados e processados os dados. Ponderou-se utilizar um osciloscópio móvel do Laboratório de Redes de Comunicação para medir e guardar o sinal, mas não era possível salvar as medidas em formato processável pelo MatLab (software utilizado para o processamento dos dados), além do fato do equipamento ser caro e sensível (todos os usos nesse projeto seriam *outdoor*).

Verificou-se, ao fim, o bom funcionamento de todos os equipamentos nesta etapa do projeto e prosseguiu-se para a implementação.

É relevante mencionar que o preço dos materiais e da manufatura, os prazos de entrega e a disponibilidade de alguns dos componentes foram fatores decisivos nas escolhas feitas e, apesar de não serem o foco da discussão, foram cruciais para a realização do projeto da maneira como ocorreu.



(a) Caixa de acrílico recém feita.



(b) Caixa de acrílico com equipamentos dentro.

Figura 3.6: Fotografias do invólucro fabricado para a realização do experimento.

3.1.3 Formulação do Experimento

O objetivo central é obter medições da potência do sinal e comparar analiticamente as distribuições probabilísticas da mesma com as oferecidas por modelos teóricos. De acordo com a motivação do projeto e com os equipamentos disponíveis, decidiu-se operar na frequência de 2.4GHz, na qual o efeito de desvanecimento é preponderante entre outros efeitos mitigadores.

Um transmissor fica suspenso no ar através de um balão e envia um sinal de comunicação para o solo, onde um receptor o capta. Um programa chamado **Homedale** - um software livre de monitoramento de redes Wi-Fi [23]- é utilizado para registrar a potência do sinal a cada 1s, período suficiente para perceber as perdas ocorridas por desvanecimento em larga escala(e algum pouco em pequena escala). O arquivo de registro é formatado para que o programa Matlab possa reconhecê-lo e, dentro deste, processá-lo. O resultado são as curvas das funções de densidade de probabilidade (PDF) e de probabilidade acumulada (CDF) empíricas e teóricas, onde os modelos lognormal e $\kappa - \mu$ são as referências.

Idealmente, as medições seriam durante todos os períodos do dia e em vários pontos de

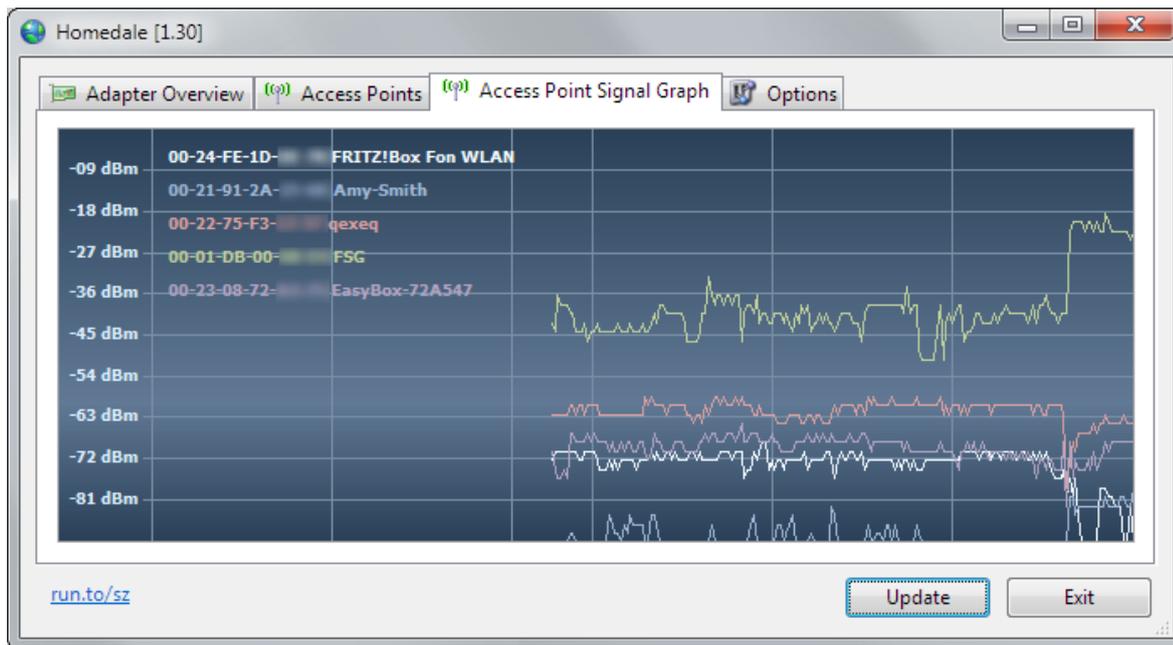


Figura 3.7: Tela do aplicativo Homedale para os gráficos dos sinais que se deseja visualizar.

raios crescentes ao redor do transmissor. Pela reduzida disponibilidade de tempo e por outros fatores técnicos, as medições foram feitas, preferencialmente, em distâncias próximas e em localidades espalhadas radialmente com o balão como referência, não podendo ser repetidas para as mesmas localidades em diferentes momentos do mesmo dia.

Nenhum outro parâmetro foi observado e registrado com relevância para o experimento, como largura de banda, área de cobertura, capacidade do canal ou outros. O foco é tão somente a verificação das características de perda por multipercurso.

3.2 Implementação e Coleta de Dados

Ao se obterem todos os materiais necessários (com algumas exceções), o processo seguiu para a decisão da altura de suspensão, dos locais de preparo, fixação e ponto central e, finalmente, as datas para implementação do sistema e para as medições.

Desde o início, o autor estava propício a realizar o experimento em cima das instalações da Faculdade de Tecnologia, na Universidade de Brasília. A arquitetura do conjunto de edifícios foi estudada, visando uma boa área de alcance na qual o autor pudesse coletar as medidas mantendo sempre uma linha de visada com o transmissor. Imediatamente abaixo do balão, deveria existir saídas de força e rede que estivessem em local privado, como sala de reuniões ou sala de professores, para que se evitasse qualquer tipo de intervenção não desejada por terceiros.

Assim, três posições foram levantadas como possibilidades: exatamente no ponto central da faculdade, em cima do corredor do departamento de engenharia elétrica e sobre o auditório da FT. O telhado do auditório fornecia as melhores condições, pois:



Figura 3.8: Possíveis locais: (1) sobre o auditório da FT, (2) sobre o corredor do departamento de engenharia civil e (3) sobre o corredor do departamento de engenharia elétrica.

- os cabos de força e rede seriam puxados da sala do técnico do auditório (decidido em conjunto com o próprio), Marco, e garantiria-se a segurança da conexão;
- ao redor do auditório há diversos locais disponíveis para a medição com LOS, mesmo em condições adversas como chuva;
- o acesso a maioria dos pontos de fixação seria restrito, uma vez que o telhado tem acesso limitado, assegurando que também não houvesse intervenção de terceiros;
- o telhado do auditório corresponde ao ponto mais alta das edificações da faculdade e a sala técnica é elevada, assim economizando tanto nas linhas fixas quanto nos cabos de força e rede.

O local foi decidido e, após a autorização da diretoria da FT, o centro do telhado do auditório foi definido como o ponto central de fixação do sistema. Houveram dois lançamentos, o primeiro no início de abril e o segundo ao final do mesmo mês, e cada um será descrito separadamente para maior detalhamento.

3.2.1 Primeiro Lançamento - 07/03/2019

A direção da faculdade não permitiu que se realizasse alterações na estrutura física do telhado. Portanto, apenas o que já estava disponível no telhado poderia ser usado para ancoragem, o que impossibilitou uma disposição mais uniforme dos pontos de fixação. Haviam

algumas canos de PVC com abraçadeiras metálicas parafusadas, a cada metro, que carregavam os fios conectados às condensadoras das máquinas de ar condicionado do auditório. Escolheram-se estes pontos para fixar as cordas, sempre em torno do ponto em que estava parafusado, além da base metálica, também bem fixada com parafusos, de uma grande antena parabólica na parte inferior do telhado.



Figura 3.9: Marcações da ancoragem para o primeiro lançamento.

A altura desejada foi de, aproximadamente, vinte metros acima do nível do solo, uma vez analisada as redondezas do centro de suspensão e com o conhecimento da capacidade de transmissão do aparelho (testada anteriormente). No dia escolhido para o voo ancorado, a equipe foi formada por Ruan (autor), Gustavo, Gustavo e Natália. Todos estavam a par do experimento previamente e conheciam os procedimentos a serem seguidos, os quais eram:

1. Montar a carga, inserindo roteador, amplificador, antena, *cooler*, fontes e adaptadores dentro da caixa de acrílico, conectando ambos os cabos de força e rede e verificando o bom funcionamento dos aparelhos e da rede. Após montá-la, deixá-la próxima ao local onde seria conectada ao balão;
2. Encher o balão, selar sua boca com lacres de plástico fazendo uma "orelha" com a mesma e inserir um mosquetão de alumínio nessa volta. Após, prender uma das cordas de fixação, que estará sendo segurada por um dos integrantes em um ponto próximo ao balão;
3. Acoplar a carga ao balão e suspê-lo até o nível do telhado, de onde seriam puxadas as outras linhas de apoio. A carga, nesse momento, já está em funcionamento pleno e resta apenas a ancoragem;

4. Levitar o balão para altura desejada, medida através de trena eletrônica, e regular o comprimento das cordas deixando-as bem presas e esticadas.

Durante a realização da tarefa, que começou às 9 horas, ventava bastante, principalmente acima da altura do telhado. Isso dificultou bastante as etapas 3 e 4, que dependiam da estabilidade do balão para que as linhas fossem estavelmente ajustadas, evitando o risco de colisão tanto do balão quanto da carga com objetos sobre o telhado (antenas e condensadoras). As cordas foram amarradas, contudo antes que pudessem ser ajustadas, uma chuva bem forte com rajadas de vento começou. Toda a equipe desceu do telhado, retirando dali todo o equipamento; o balão já estava ancorado em todos os pontos previstos, porém houve pouco tempo para ajustes finos na altura do balão.



(a) Enchimento do balão com gás hélio.



(b) Suspensão do balão ao telhado para ajustar a ancoragem.

Figura 3.10: Registros visuais do primeiro lançamento.

O procedimento terminou por volta das 16 horas da tarde, momento em iniciou a chover no local. A tempestade, não prevista para esse horário nas previsões meteorológicas, foi inesperada e causou alguns estragos na estrutura do sistema: um dos seis pontos de apoio se rompeu, enquanto outros dois ficaram presos em partes anguladas das condensadoras e somente puderam ser retirados no dia seguinte. Assim, as primeiras medições, feitas durante a madrugada do dia oito de março (08/03/2019) obtiveram as medidas do balão em uma altura um pouco menor do que a esperada pelo experimento.

Na manhã seguinte, o autor subiu novamente ao telhado e ajustou todas as cordas que

foram danificadas ou estavam presas, regulou a altura do balão e fez mais algumas medidas. Durante a manhã e a tarde, uma chuva leve e ventos fortes atingiram o balão. Ao final da tarde, outra tempestade atingiu o local, novamente prendendo algumas das cordas. Foram feitas medições durante todo esse dia, apesar da constante precipitação ter dificultado a coleta de dados em locais abertos.

Às 10 horas da manhã do terceiro dia (09/03/2019), o balão se rompeu e a carga caiu sobre o telhado do auditório. Imediatamente, o autor acessou o telhado e recuperou a carga, cujo invólucro havia quebrado com a queda mantendo todo o conteúdo interno intacto. A caixa foi aberta, os cabos de força e rede foram retirados e mantidos sobre o telhado, protegidos das intempéries. Não se pode apontar certamente a causa do rompimento do balão e, apesar de diversas hipóteses possíveis, nada conclusivo foi percebido ou encontrado.

Com a possibilidade de um segundo lançamento, os seguintes apontamentos foram feitos:



(a) Balão suspenso sobre o auditório da FT.



(b) Carga sobre o telhado do auditório após a queda.

Figura 3.11: Registros visuais do primeiro lançamento.

- O balão não foi enchido perto da sua capacidade máxima, o que reduziu o tempo máximo de flutuação. O tanque que foi requerido possuía um volume de $7.8mm^3$ de gás hélio, enquanto o máximo cabível dentro do balão, segundo as informações já apresentadas, era de $7.561mm^3$. O fornecedor do gás não disponibilizava nenhum equipamento além do próprio tanque e um medidor de pressão, que apenas controlava a velocidade de saída do gás. Assim, tanto a liberação de gás hélio quanto o controle da entrada ao balão deviam ser feitos manualmente - e pela própria equipe do projeto.

Deveria-se, portanto, encontrar alguma maneira de melhorar o controle de gás para poder inflar o balão com mais tranquilidade e eficácia;

- A embocadura do tanque era bem larga e a colocação do balão nela era imprecisa, fazendo com que se parasse diversas vezes o processo de enchimento para que pudesse ser ajustada e se evitasse o vazamento de gás. Para o lançamento seguinte, alguma adaptação deveria ser procurada para otimizar a inserção de gás no balão;
- As linhas de pesca escolhidas mostraram-se muito finas, apesar de bem resistentes, e foram extremamente difíceis de se lidar tanto no chão, separando-as para serem colocadas em seus devidos pontos de ancoragem, quanto já conectadas ao balão flutuante. Alguma outra corda, mais espessa com a mesma resistência, seria uma ótima troca, pois facilitaria o trabalho e evitaria tantas subidas ao telhado apenas para liberação de cordas presas;
- Durante todos os dias, com uma intensidade bem menor no segundo e terceiro, a chuva e os ventos atacaram com bastante intensidade o sistema - com a suspeita de que tenham sido esses os fatores predominantes para o vazamento de gás e eventual rompimento do balão. Aguardar uma semana com uma previsão mais adequada seria interessante, apesar do serviço meteorológico não ter identificado com precisão o clima dos dias do primeiro lançamento;
- Era imprescindível melhorar a disposição radial dos pontos de fixação, uma vez que a não uniformidade dos mesmos mostrou um desequilíbrio alarmante quando os ventos aumentavam sua força. Seria necessário, portanto, utilizar outras estruturas que não estavam no telhado e expor as cordas em locais mais acessíveis a outros indivíduos, ganhando mais estabilidade de voo.

Esperava-se, atendendo as novas demandas e mantendo os aspectos já funcionais do sistema, que poderia-se ter um maior tempo de voo com uma altura adequada e menos intervenções a serem feitas ao decorrer da coleta de dados.

3.2.2 Segundo Lançamento - 25/03/2019

Após o hiato de quase três semanas, encontrou-se uma boa previsão de clima e decidiu-se aproveitá-la. O intervalo entre lançamentos serviu para adequar o processo de lançamento do balão: foi adquirida uma nova corda de fixação de multifilamento plástico que possuía menor resistência a tração e maior diâmetro, uma mangueira que acoplasse na boca de saída do tanque e um balão de $0.4mm^3$ que seria inflado primeiro, fazendo com que se retirasse uma quantidade satisfatória de gás do tanque e se assegurasse o enchimento quase completo do balão de cloropreno. Além disso, foram coladas, nas arestas da tampa e do fundo da caixa, alguns pedaços de flutuadores espaguete, utilizados em piscinas, promovendo uma maior segurança para o invólucro no caso de queda.

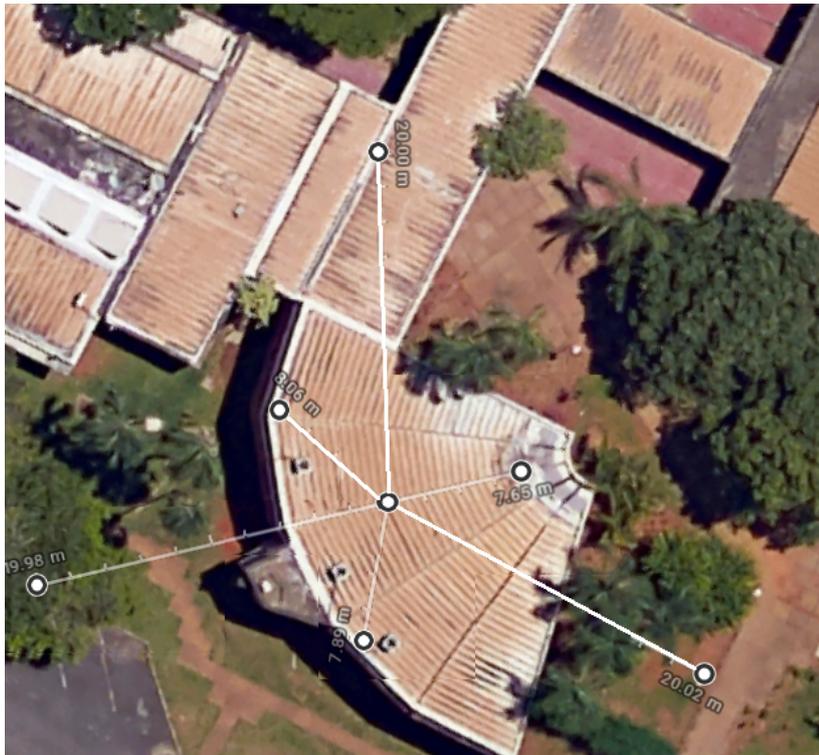


Figura 3.12: Marcações da ancoragem para o segundo lançamento.

A equipe, dessa vez composta por Ruan, Natália, Átila e Pedro, conseguiu economizar tempo em diversas tarefas, deixando já fixadas as cordas em seus pontos com nós soltos, com o intuito de um rápido ajuste no caso de chuva repentina, e apenas conectando a caixa ao balão uma vez que este estivesse sobre o telhado (os cabos de força e rede haviam sido deixados protegidos próximo a uma das condensadoras). O menor balão foi enchido duas vezes e, após isso, o balão de cloropreno foi inflado até o ponto em que a equipe se sentiu confortável. Apesar de não se ter atingido a extensão máxima, acredita-se que o balão estava bem próximo dela.

O processo iniciou próximo das 9 horas da manhã e se estendeu até às 13 horas da tarde, quando foi possível iniciar as medições. O balão sofreu fortes pancadas de vento e bastante precipitação pluviométrica durante a tarde e a noite, o que impossibilitou a medição de novos locais. A coleta de dados foi retomada na manhã seguinte, quando foi possível identificar um cabo rompido, que foi prontamente removido e um novo foi colocado. Ainda que foi possível inflar com uma dose consideravelmente maior de gás no segundo lançamento do que no primeiro lançamento, percebeu-se que o balão havia esvaziado consideravelmente do primeiro para o segundo dia, como provável consequência das fortes e contínuas rajadas de vento. No segundo dia de coleta, o dia inteiro foi aproveitado para se realizarem medições do sinal.

Pode-se obter a amostragem do sinal de diversos pontos diferentes no segundo lançamento. Um fator crucial foi a ausência de chuva durante as manhãs e as tardes no segundo dia de lançamento, iniciando-se no final da tarde e prolongando-se até tarde da noite. A



(a) Término da preparação do balão.



(b) Detalhe da carga levitada no segundo lançamento.

Figura 3.13: Registros visuais do segundo lançamento.

estabilidade do balão foi melhorada através da ancoragem mais uniformemente distribuída, com quatro dos pontos de fixação estando sobre o próprio telhado do auditório - incluindo um pivô - e outros três em locais mais distantes, sendo dois próximos ao solo e um último sobre o telhado mais baixo do corredor em frente ao auditório.

No início do terceiro dia, por volta das 9 horas da manhã, o segundo balão se rompeu. Durante a ventania que acometeu o local no dia anterior, as cordas de ancoragem forçaram as proteções laterais da caixa (flutuadores espaguete) para fora, desprotegendo a caixa no momento de queda. Assim, após a segunda queda, o invólucro foi bem mais danificado, também sofrendo danos a antena e o *cooler*. Os aparelhos e os cabos foram prontamente retirados do telhado e, assim, finalizou-se a etapa de coleta de dados.



(a) Balão suspenso logo após o lançamento.



(b) Sistema sobre o auditório após a queda.

Figura 3.14: Registros visuais do segundo lançamento.

Capítulo 4

Resultados e Análise

Os dados obtidos pela amostragem do sinal foram gravados em arquivos CSV ("Comma-Separated Values") e processados através de um código feito em MatLab. Ao total, somaram-se doze medições realizadas e coletadas, feitas de locais e distâncias distintas. Cada uma será apresentada na forma de gráfico (ao final do processamento), especificando-se o tempo de duração de cada coleta e o local de medição.

A função *marcumq* oferecida pelo software Matlab consegue apenas calcular valores para μ inteiro. Como era necessária uma maior elasticidade nos valores desse parâmetro para o ajuste fino das curvas teóricas, utilizou-se uma outra função *marcumq* obtida em [24]. O arquivo que contém a função é de domínio público e não é licenciado ou possui quaisquer direitos de autoria, sendo assim livre para uso.

O código é apresentado na versão íntegra nos apêndices desse trabalho e, estruturalmente, possui os seguintes objetivos:

- Ler o arquivo de dados com a medição da potência do sinal, em dBm;
- Criar uma matriz com duas colunas, sendo a primeira os possíveis valores que a variável assume e a segunda as probabilidades com que ocorreram nessa transmissão;
- Elabora as curvas da PDF e CDF para a correlata amostragem, calculando, a partir da mesma, os parâmetros necessários para que se crie as curvas teóricas relacionadas;
- Esboça os gráficos de ambas as funções, empíricas e teóricas (modelos lognormal e $\kappa - \mu$).

São apresentados os resultados e os primeiros comentários analíticos. Todas as distâncias foram lidas a partir de uma trena eletrônica, aproximando-se da distância entre transmissor e receptor.

4.1 Resultados Gráficos

Nº. da Coleta	Início da Coleta	Término da Coleta	Nº. de Amostras	Separação T-R
01	19h54	21h57	6192	31,072m

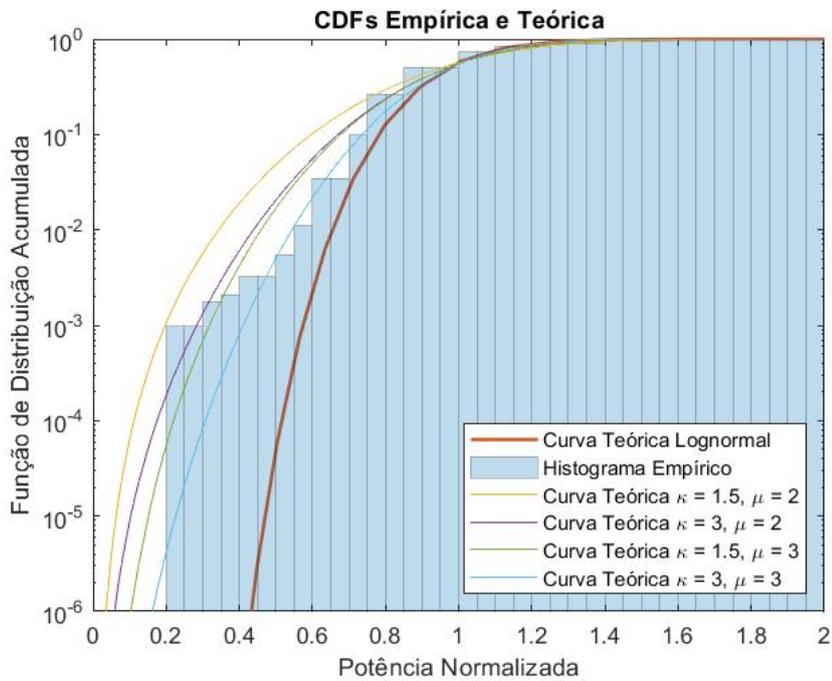


Figura 4.1: CDF's da 1ª amostra.

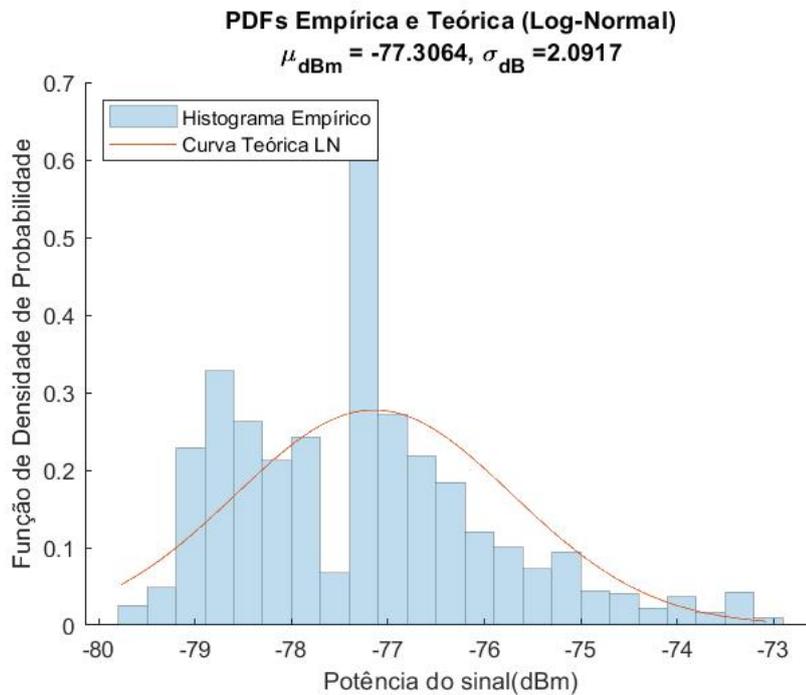


Figura 4.2: PDF's da 1ª amostra(lognormal).

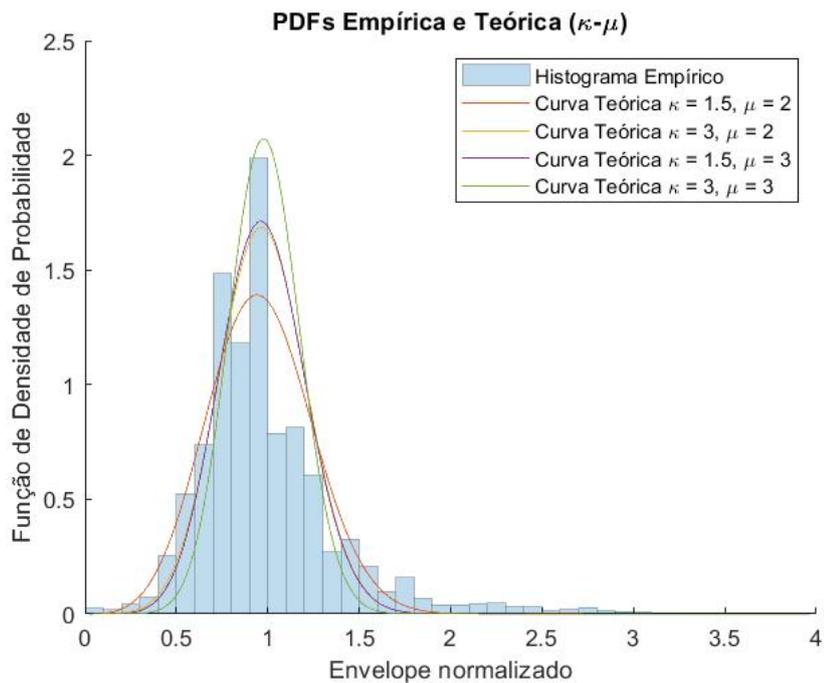


Figura 4.3: PDF's da 1ª amostra($\kappa - \mu$).

Nº. da Coleta	Início da Coleta	Término da Coleta	Nº. de Amostras	Separação T-R
02	22h44	00h55	6790	31,072m

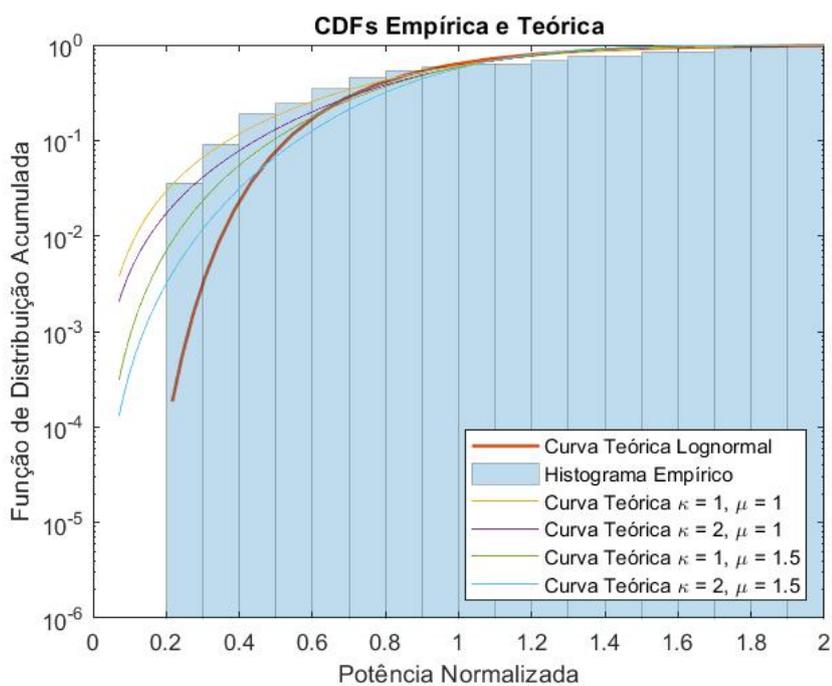


Figura 4.4: CDF's da 2ª amostra.

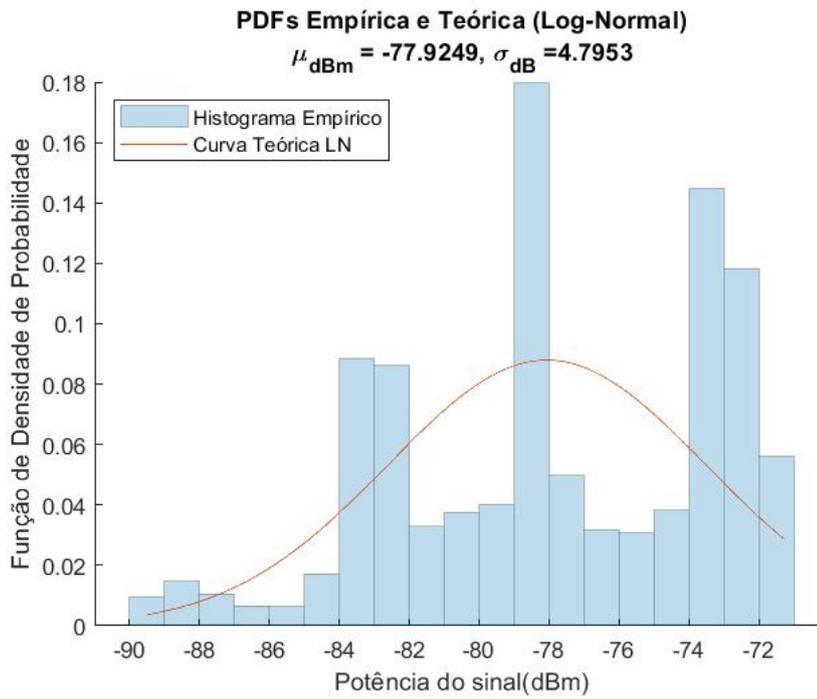


Figura 4.5: PDF's da 2ª amostra(lognormal).

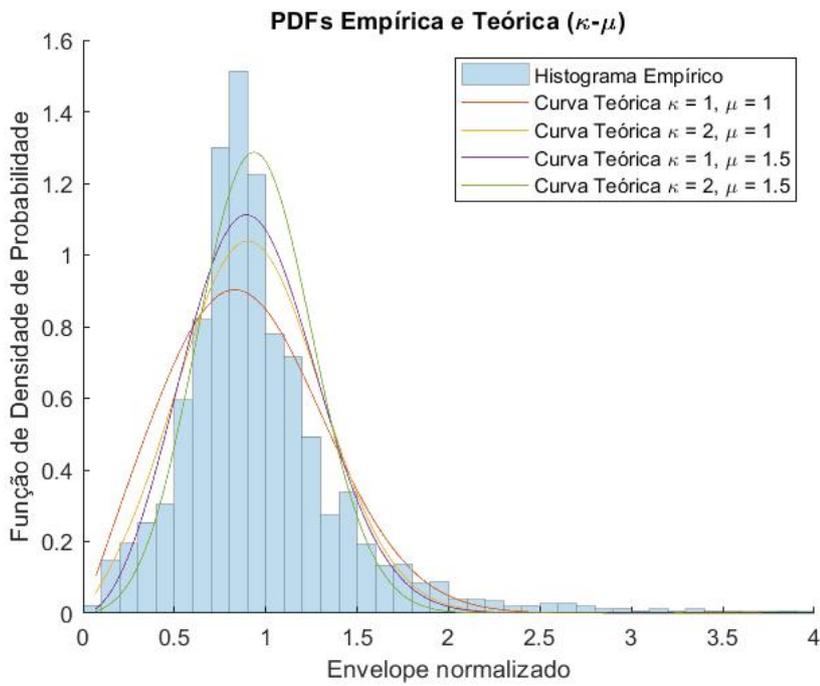


Figura 4.6: PDF's da 2ª amostra($\kappa - \mu$).

Nº. da Coleta	Início da Coleta	Término da Coleta	Nº. de Amostras	Separação T-R
03	00h57	02h54	4467	31,072m

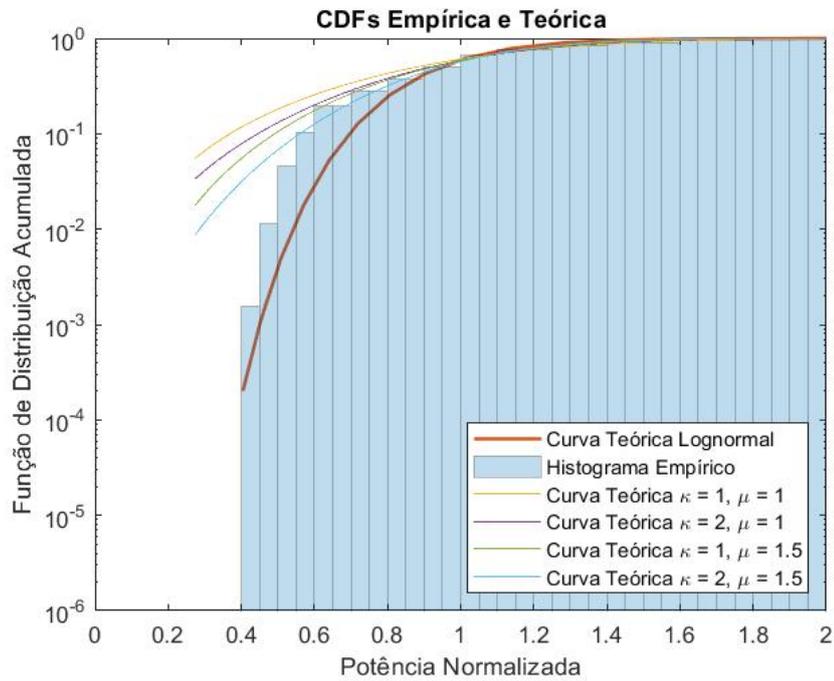


Figura 4.7: CDF's da 3ª amostra.

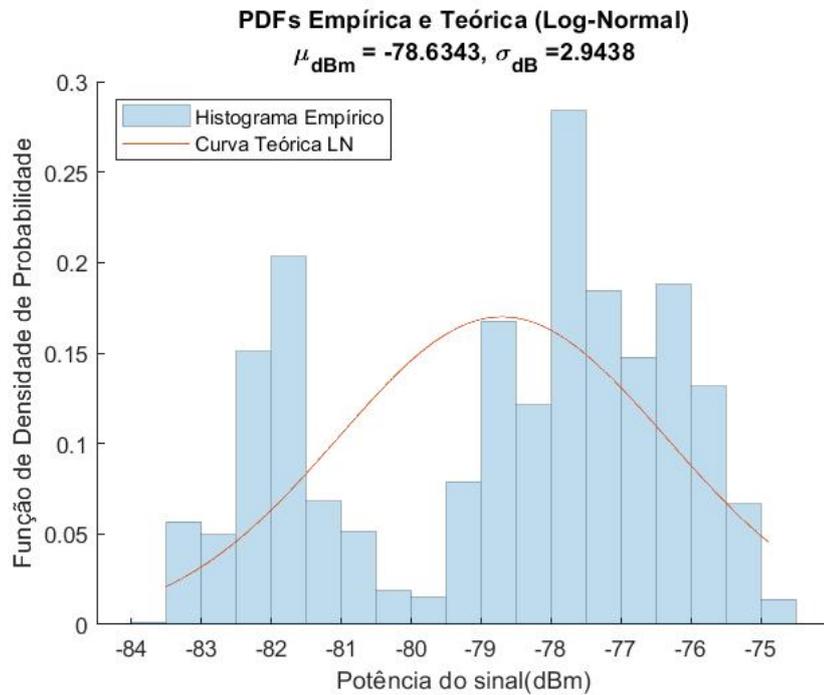


Figura 4.8: PDF's da 3ª amostra(lognormal).

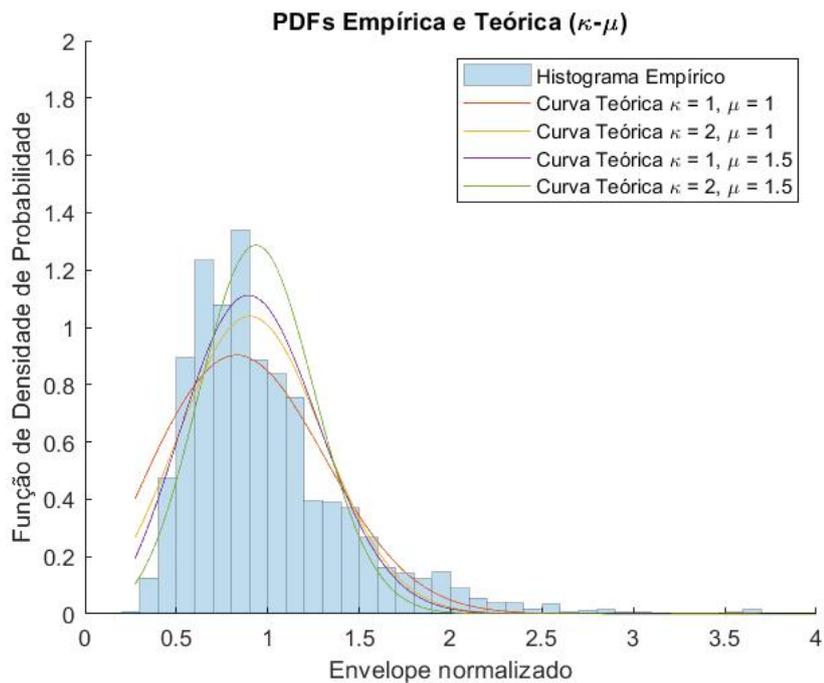


Figura 4.9: PDF's da 3ª amostra($\kappa - \mu$).

Nº. da Coleta	Início da Coleta	Término da Coleta	Nº. de Amostras	Separação T-R
04	02h37	05h45	9815	34,720m

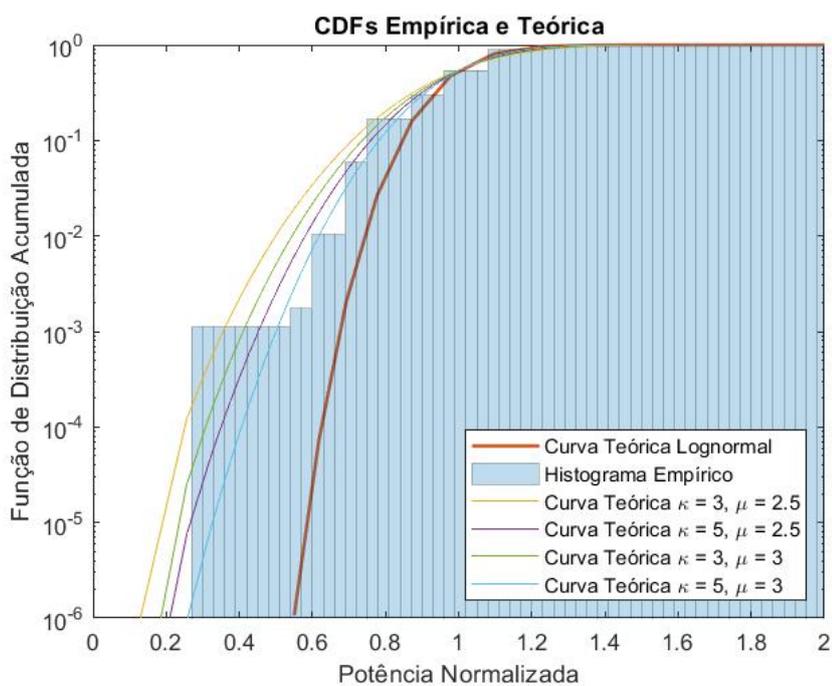


Figura 4.10: CDF's da 4ª amostra.

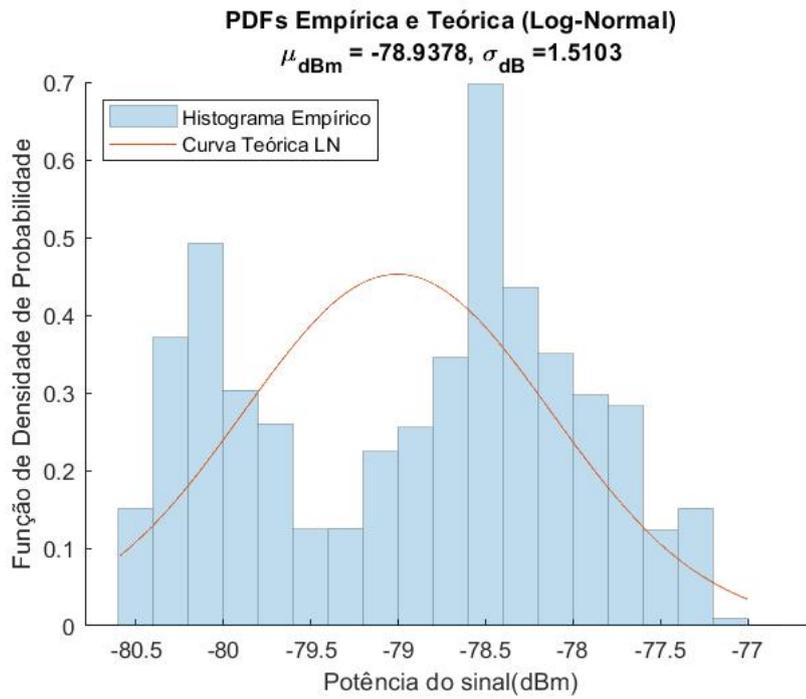


Figura 4.11: PDF's da 4ª amostra(lognormal).

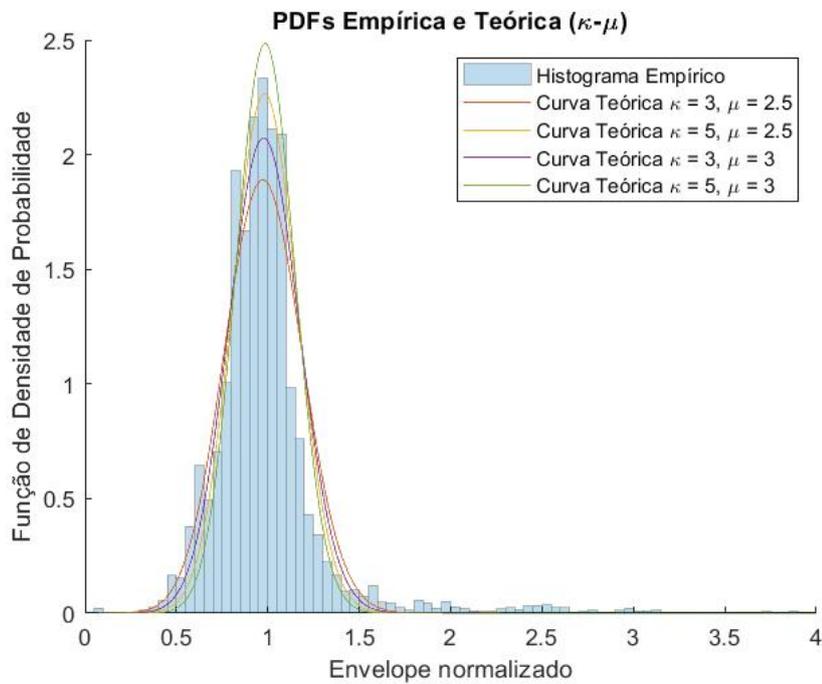


Figura 4.12: PDF's da 4ª amostra($\kappa - \mu$).

Nº. da Coleta	Início da Coleta	Término da Coleta	Nº. de Amostras	Separação T-R
05	06h24	08h24	6159	31,072m

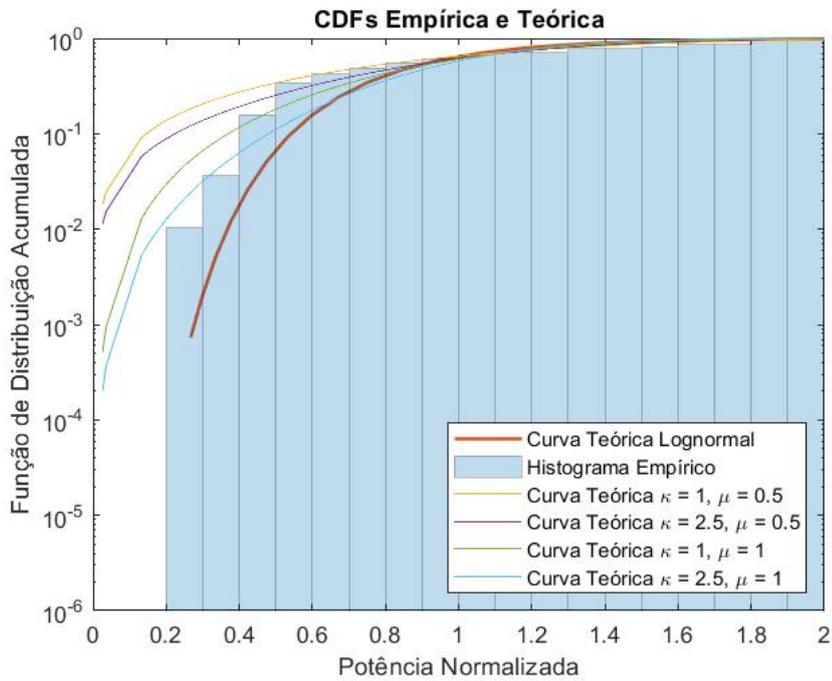


Figura 4.13: CDF's da 5ª amostra.

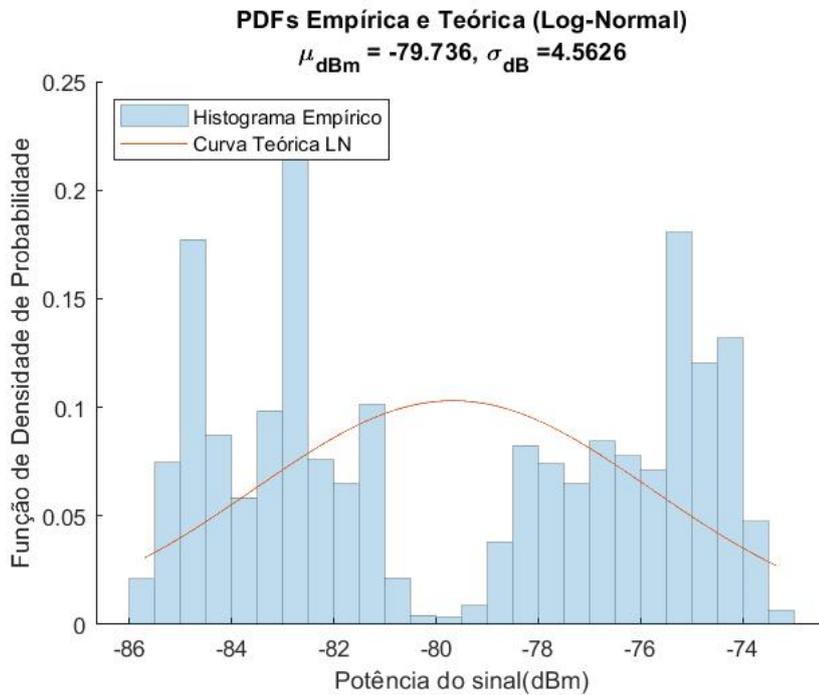


Figura 4.14: PDF's da 5ª amostra(lognormal).

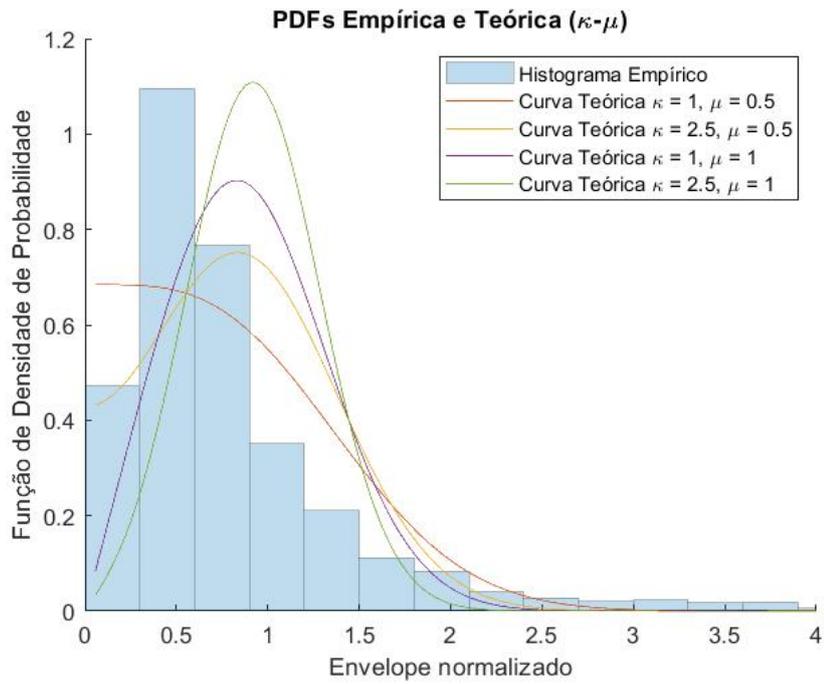


Figura 4.15: PDF's da 5ª amostra($\kappa - \mu$).

Nº. da Coleta	Início da Coleta	Término da Coleta	Nº. de Amostras	Separação T-R
06	10h24 15h55	10h28 18h57	210 9234	31,072m

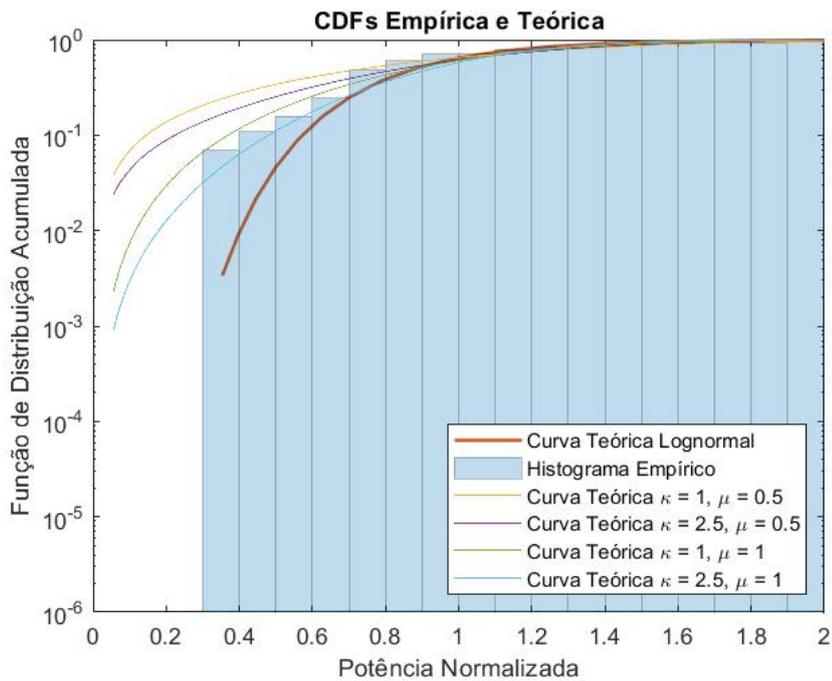


Figura 4.16: CDF's da 6ª amostra.

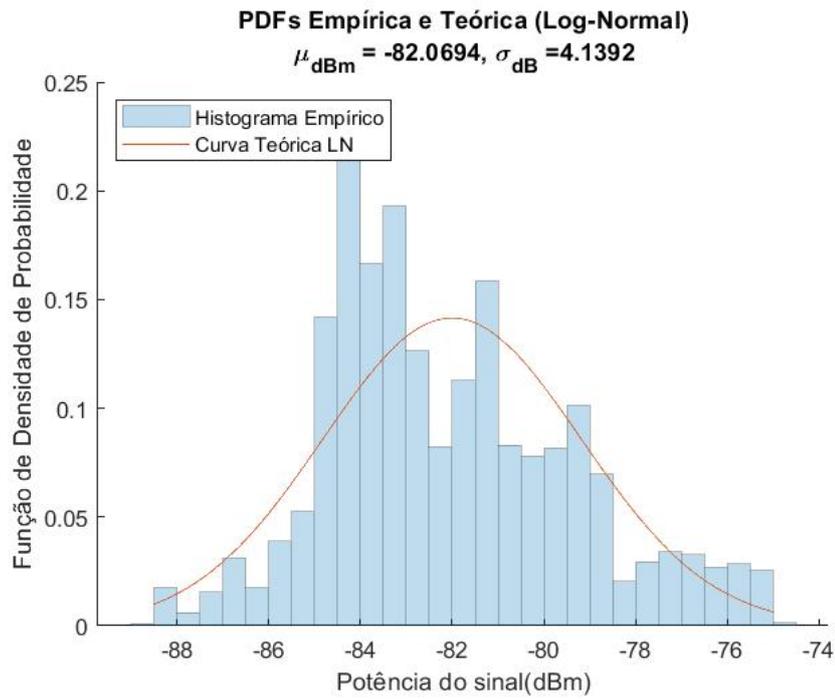


Figura 4.17: PDF's da 6ª amostra(lognormal).

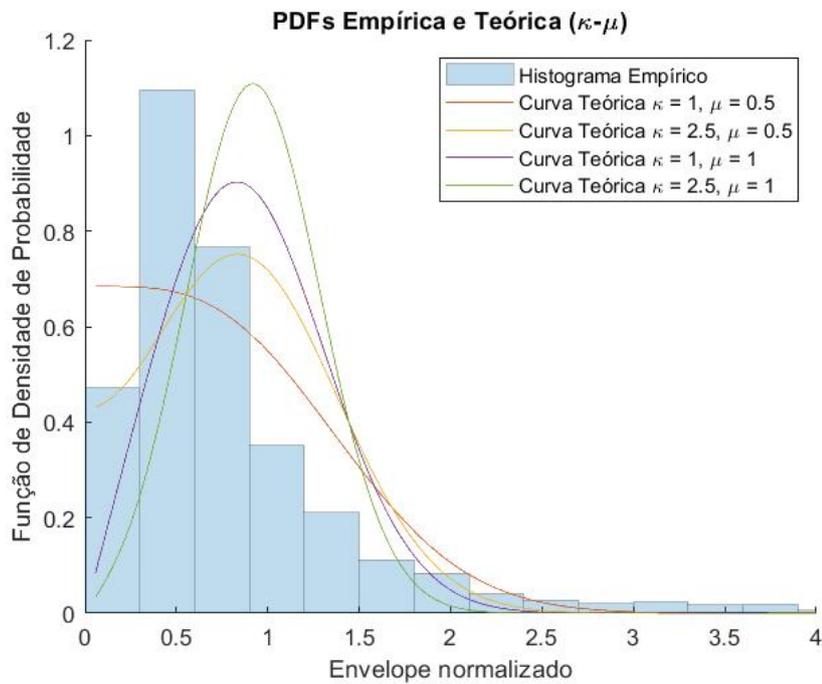


Figura 4.18: PDF's da 6ª amostra($\kappa - \mu$).

Nº. da Coleta	Início da Coleta	Término da Coleta	Nº. de Amostras	Separação T-R
07	19h20	20h06	2388	31,072m

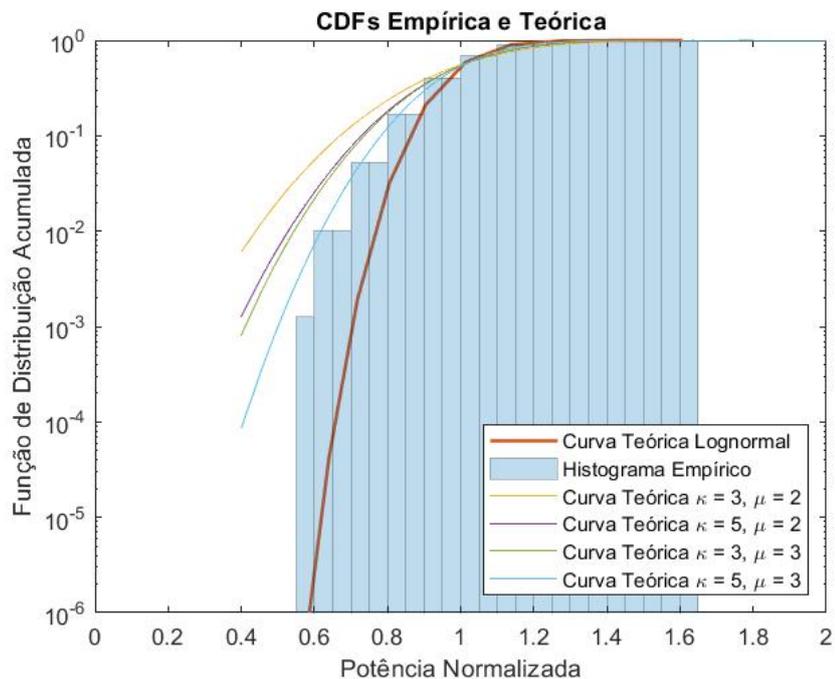


Figura 4.19: CDF's da 7ª amostra.

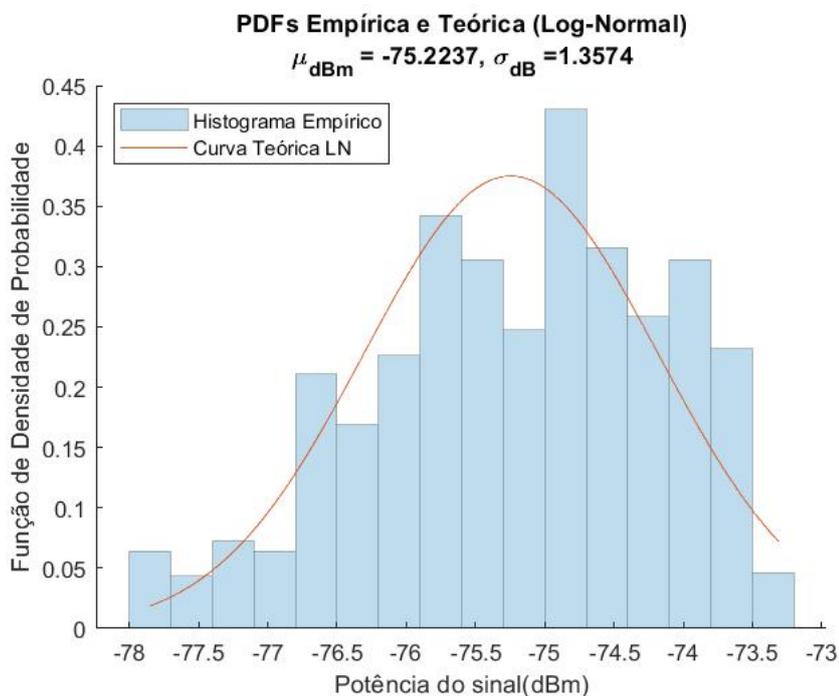


Figura 4.20: PDF's da 7ª amostra(lognormal).

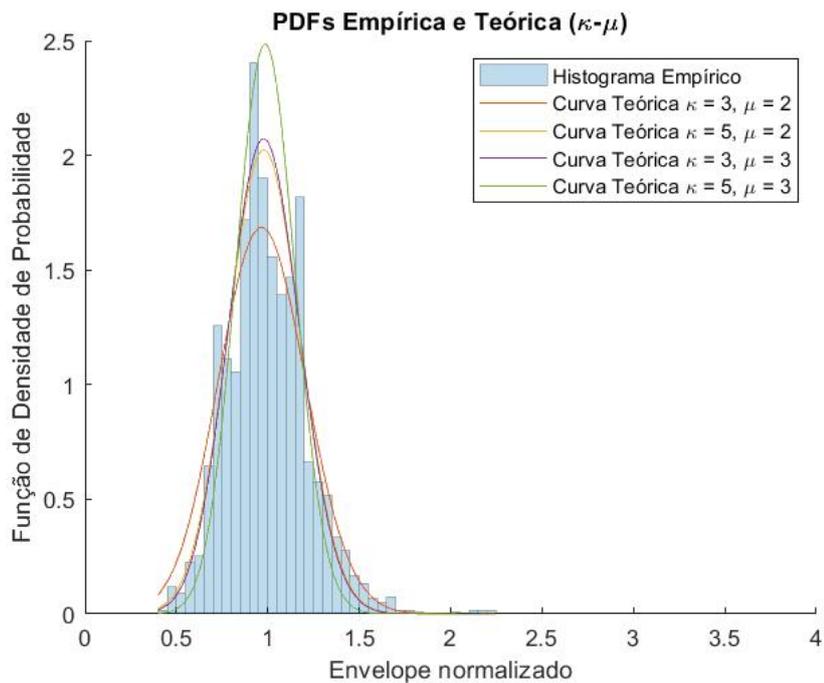


Figura 4.21: PDF's da 7ª amostra($\kappa - \mu$).

Nº. da Coleta	Início da Coleta	Término da Coleta	Nº. de Amostras	Separação T-R
08	12h46	15h31	7866	29,444m

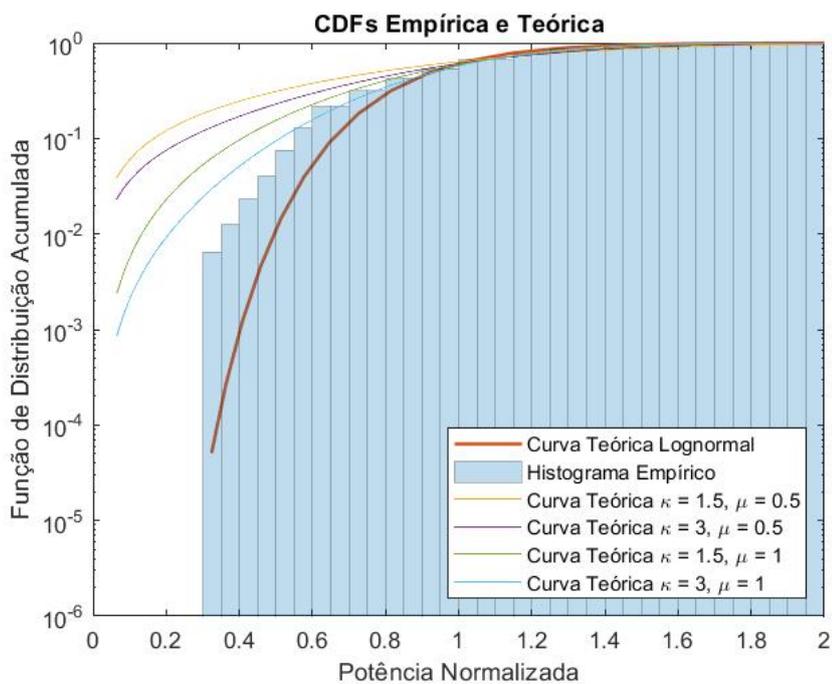


Figura 4.22: CDF's da 8ª amostra.

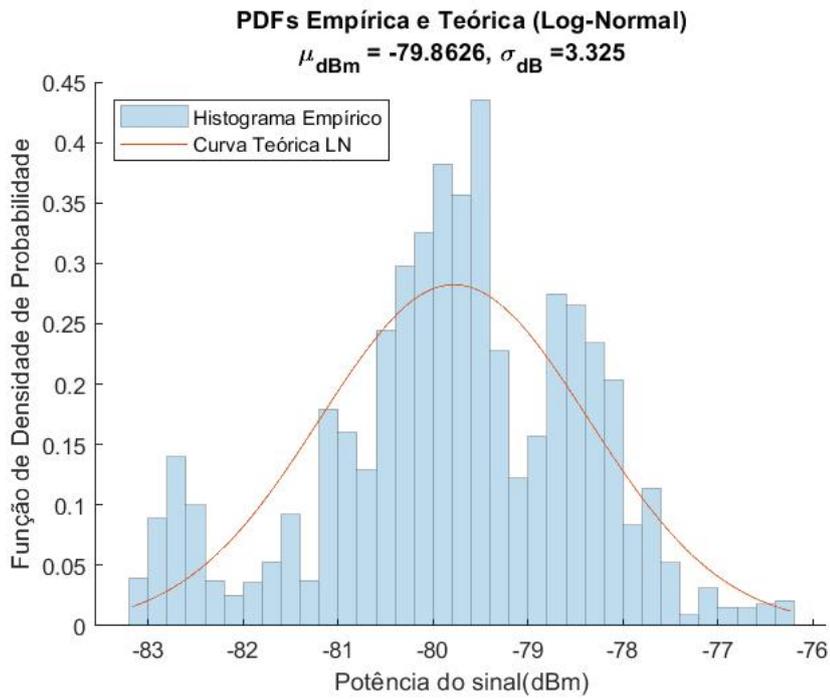


Figura 4.23: PDF's da 8ª amostra(lognormal).

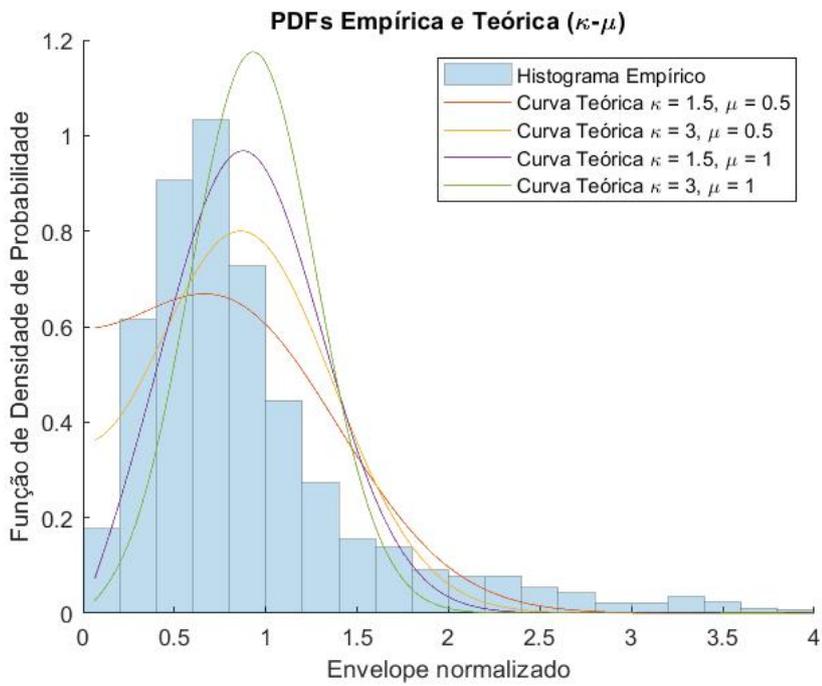


Figura 4.24: PDF's da 8ª amostra($\kappa - \mu$).

Nº. da Coleta	Início da Coleta	Término da Coleta	Nº. de Amostras	Separação T-R
09	09h12	11h13	6643	28,013m

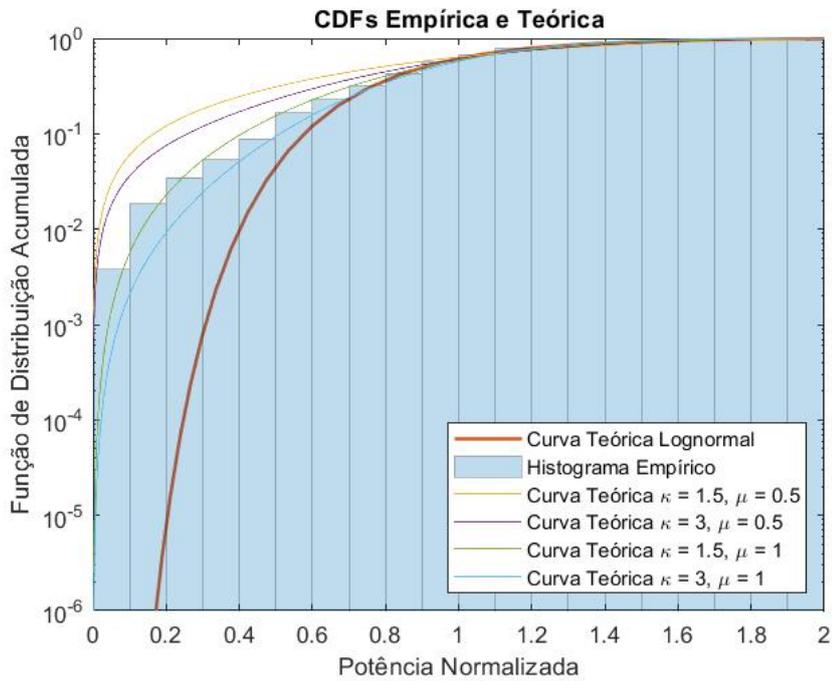


Figura 4.25: CDF's da 9ª amostra.

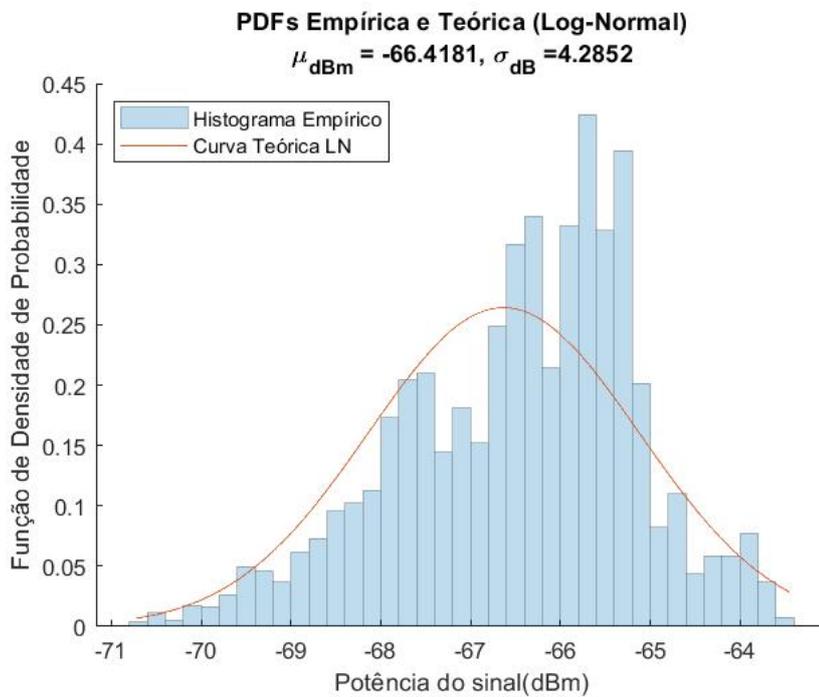


Figura 4.26: PDF's da 9ª amostra(lognormal).

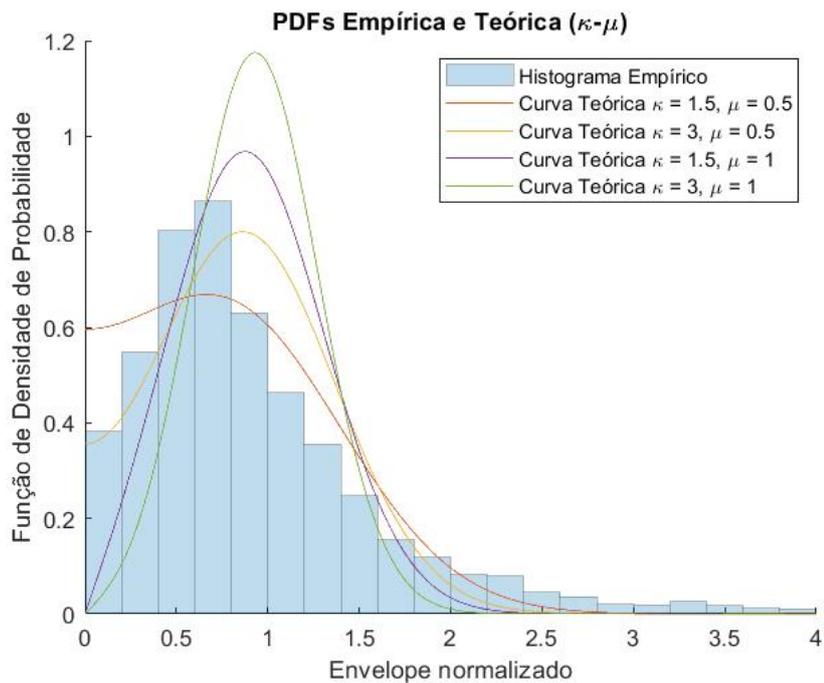


Figura 4.27: PDF's da 9ª amostra($\kappa - \mu$).

Nº. da Coleta	Início da Coleta	Término da Coleta	Nº. de Amostras	Separação T-R
10	14h44	17h07	4744	25,454m

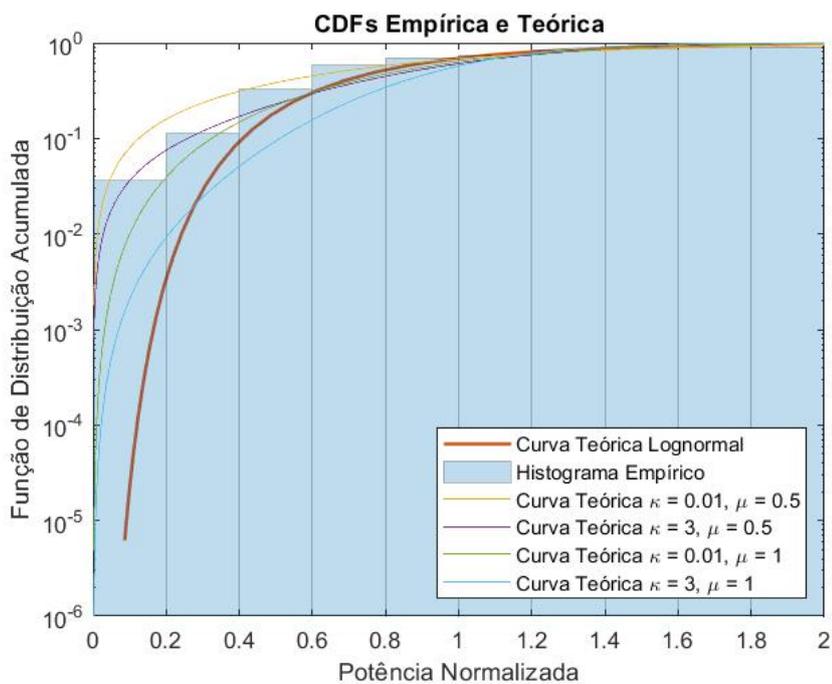


Figura 4.28: CDF's da 10ª amostra.

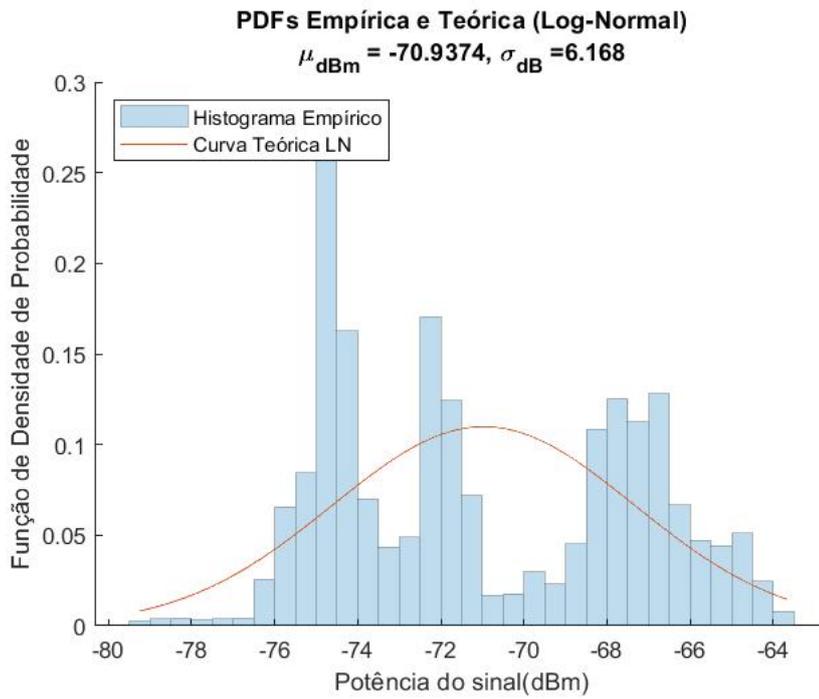


Figura 4.29: PDF's da 10ª amostra(lognormal).

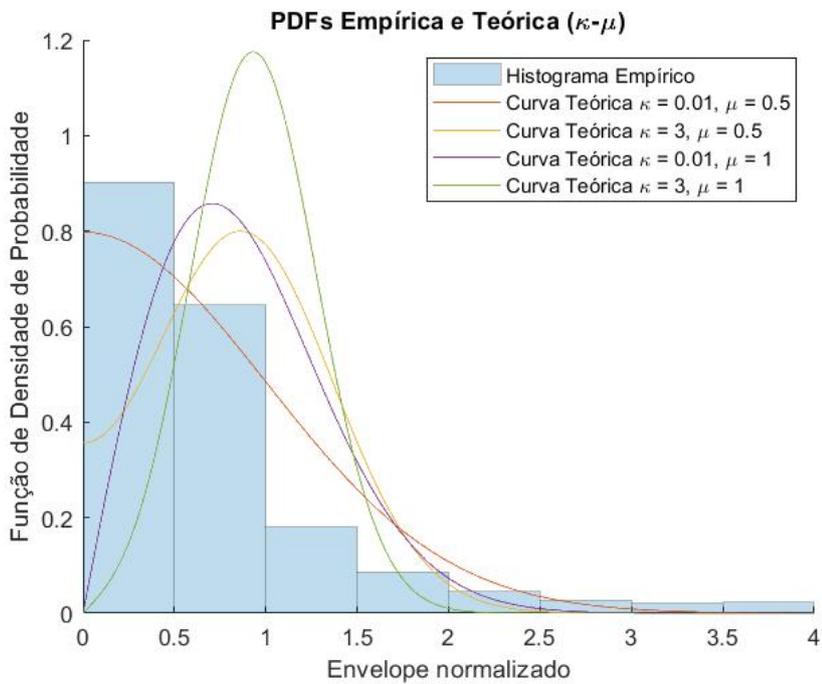


Figura 4.30: PDF's da 10ª amostra($\kappa - \mu$).

Nº. da Coleta	Início da Coleta	Término da Coleta	Nº. de Amostras	Separação T-R
11	17h09	20h04	4898	28,700m

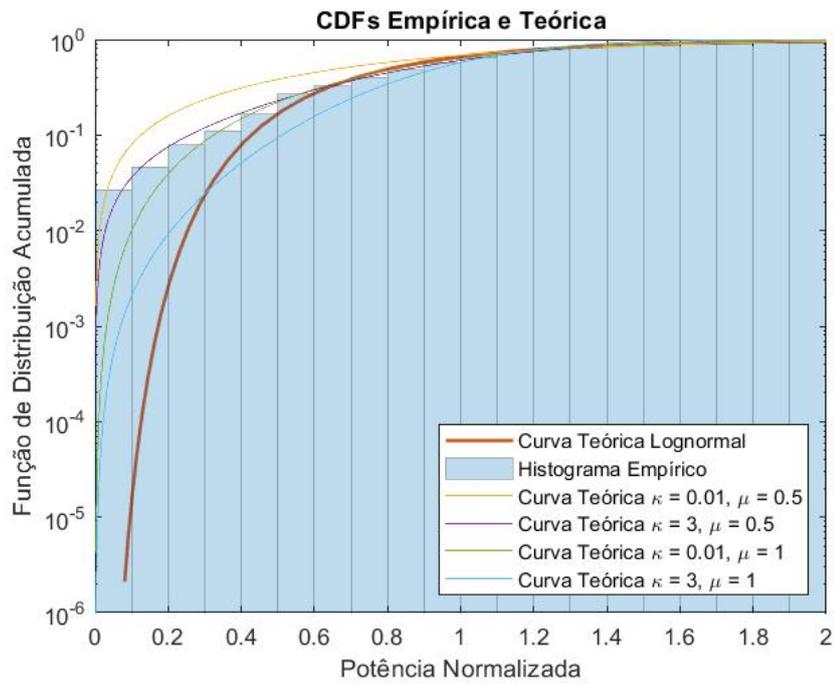


Figura 4.31: CDF's da 11ª amostra.

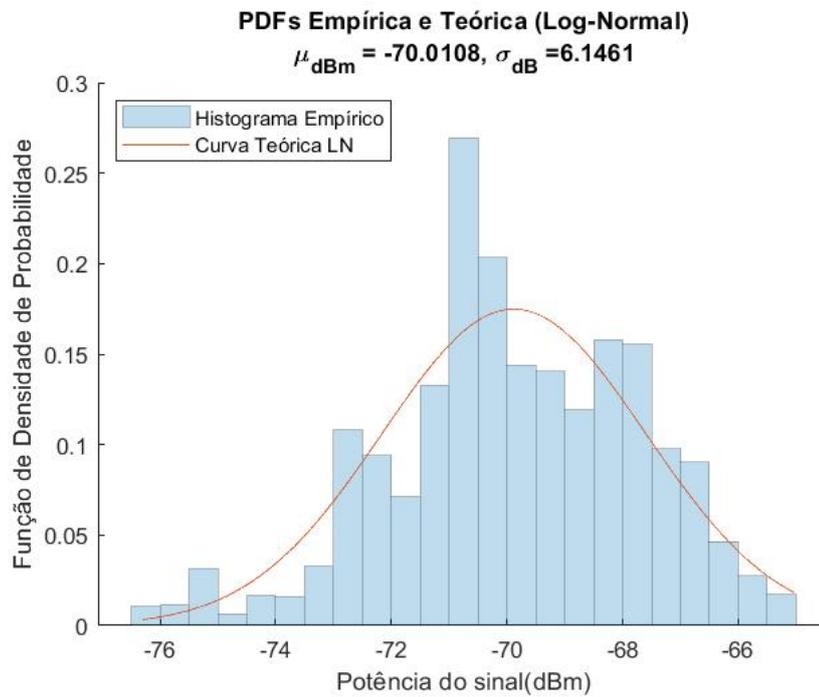


Figura 4.32: PDF's da 11ª amostra(lognormal).

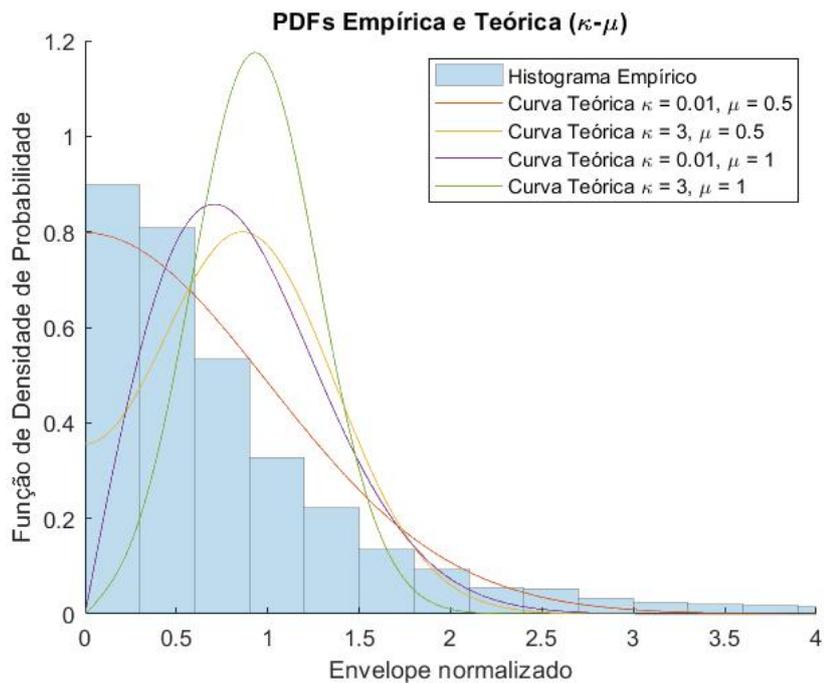


Figura 4.33: PDF's da 11ª amostra($\kappa - \mu$).

Nº. da Coleta	Início da Coleta	Término da Coleta	Nº. de Amostras	Separação T-R
12	20h32	23h13	6173	33,063m

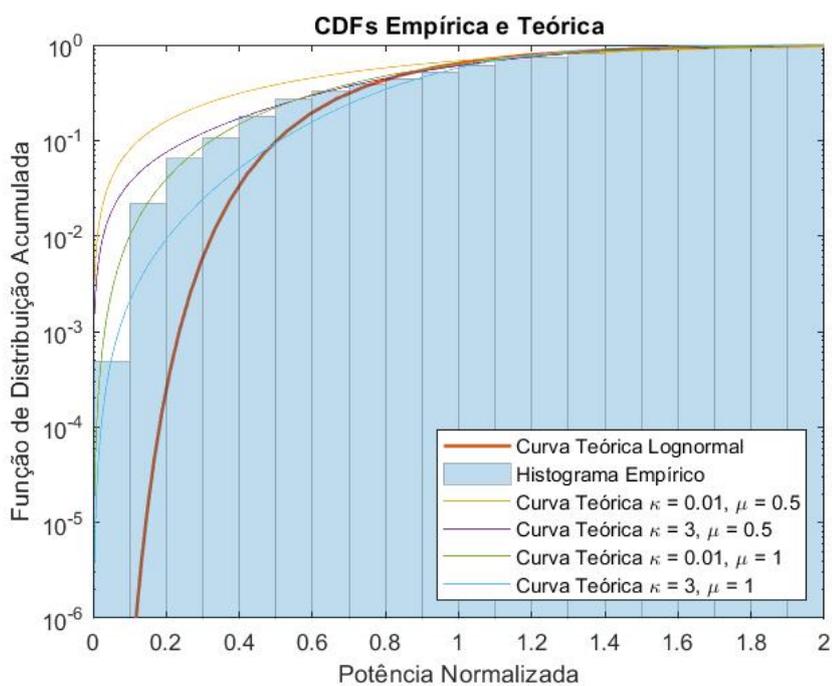


Figura 4.34: CDF's da 12ª amostra.

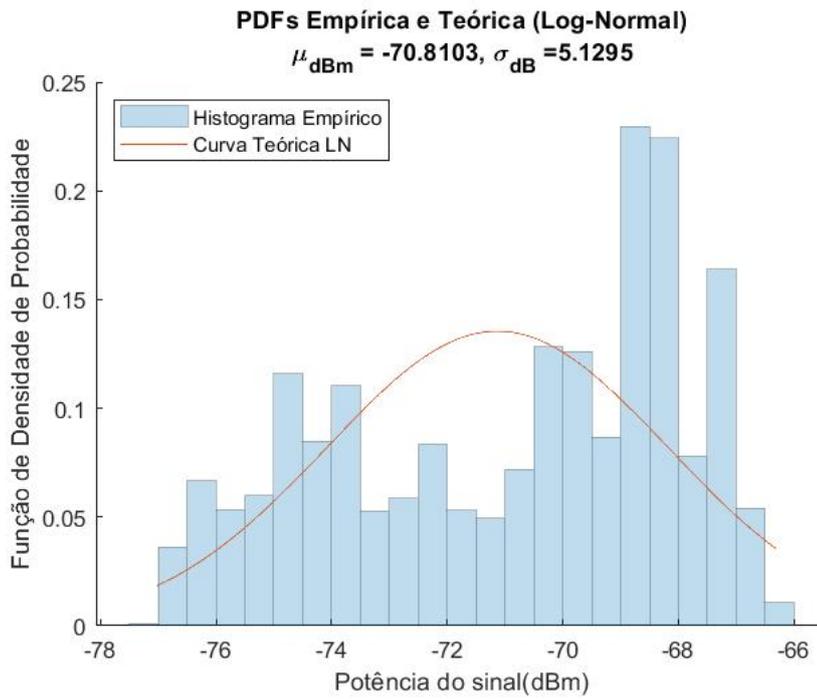


Figura 4.35: PDF's da 12ª amostra(lognormal).

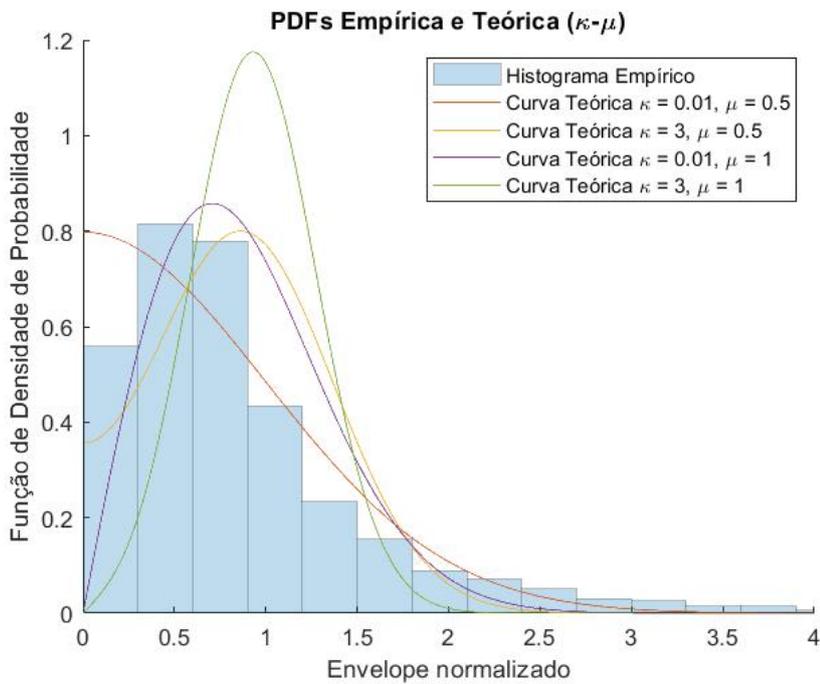


Figura 4.36: PDF's da 12ª amostra($\kappa - \mu$).

4.2 Análise e Ponderações

Em quase todos os gráficos que apresentam as curvas das funções de distribuição acumulada, exceto talvez pela 3ª amostragem, a distribuição $\kappa - \mu$ possui alguma combinação de valores dos seus parâmetros que a aproxima bastante da CDF empírica. Nota-se, ainda, que as amostragens 1-9 apresentaram curvas bem aproximadas para $\kappa > 1$, o que indica uma maior potência das componentes dominantes (no caso, LOS) em comparação às ondas dispersas. As amostragens 10-12 apresentaram $\kappa \hat{=}$, o que indica que houve algum bloqueio das ondas dominantes (eliminando total ou parcialmente a linha de visada) e as ondas dispersas tiveram uma contribuição maior na potência do sinal recebido. Visualmente, a curva teórica da CDF lognormal apresenta boa proximidade para valores de alta frequência, mas erra consideravelmente quando tenta estimar a distribuição acumulada para valores com baixa frequência.

Para as curvas de densidade de probabilidade lognormal, nota-se uma clara disparidade dos valores obtidos empiricamente e a aproximação teórica realizada a partir dos valores fornecidos pela amostragem. Pode-se apontar que o janelamento realizado para retirar o desvanecimento de pequena escala do vetor amostragem, restando assim apenas as componentes de *pathloss* e sombreamento, foi feito com imprecisão e poderia ter sido otimizado. Porém, uma observação interessante foi feita: a medida que a largura da janela de média local aumenta, a curva teórica lognormal se aproxima da amostragem empírica, enquanto a curva teórica $\kappa - \mu$ perde sua acurácia. Percebe-se, portanto, a necessidade de um modelo misto que aborde ambos os tipos de desvanecimentos.

A versatilidade e aplicabilidade da distribuição $\kappa - \mu$ para modelar canais com desvanecimento em pequena escala é ótima, pois a manipulação dos dois parâmetros disponíveis permite ajustes finos com maior precisão do que outros modelos mais simples, como o lognormal. Isso permite o ajuste do seu sistema para um erro mínimo desejável, evitando a superestimação dos efeitos de mitigação de sinal pelo canal de comunicação.

As coletas duraram entre uma a três horas, aproximadamente, e verificou-se que a amostragem era suficiente para o menor intervalo e sem identificações de maior verossimilhança entre modelo e canal para as amostragens mais longas. Foi possível detectar o efeito de desvanecimento em pequena escala mesmo com um período de amostragem grande, sendo impossível identificar a componente de sombreamento sem que fosse tratado o vetor amostragem a partir da média móvel.

Uma vez que há linha de visada entre os aparelhos transmissor e receptor e, para faixas de frequência como a utilizada (2.4GHz), diversos efeitos atmosféricos são pouco relevantes, é possível extrapolar os resultados para maiores distâncias, entendendo que as perdas de caminho seriam maiores mantendo, ainda assim, distribuições de probabilidade acumulada e densidade de probabilidade semelhantes às curvas lognormal e $\kappa - \mu$ - que deve ser preponderante uma vez que haverá, essencialmente, locomoção da antena transmissora.

Capítulo 5

Conclusão

Muito do que foi realizado nesse trabalho nunca havia sido realizado e registrado, fazendo com que se necessitasse, em diversas etapas, do processo de teste, falha e otimização. Ainda assim, o projeto prosseguiu e mostrou-se eficaz para realizar coletas de dados de redes móveis suspensas em estruturas aéreas.

Os pontos positivos mais relevantes ao longo de toda a realização de ambos experimento e dissertação são:

- A importância da verificação da teoria com a efetividade da prática para o campo tanto das redes móveis quanto, mais especificamente, de sistemas de comunicação HAPS;
- A compreensão do ato de projetar e concretizar um experimento dentro da área de comunicações móveis, elevando a compreensão sobre a construção e implementação de sistemas como esse;
- A visualização da proximidade entre os modelos lognormal e $\kappa - \mu$ com a caracterização real do canal de comunicação, enfatizando que mesmo um modelo simples, como o lognormal, possui uma ótima aplicabilidade ao se projetar links móveis e que modelos mais complexos se aproximam ainda mais dos efeitos observados empiricamente.

As dificuldades da logística para os voos baloieiros também são relevantes e foram determinantes para os rumos que o trabalho, como um todo, tomou. Idealmente, o projeto seria mais interessante, na visão do autor, caso:

- O balão fosse suspenso em maiores alturas ($\cong 100\text{m}$), o que dependeria de uma melhor estrutura de ancoragem e um clima ameno;
- Uma maior carga fosse levitada, podendo-se adicionar uma maior antena, i.e. aumentar o raio da célula do sistema e um maior amplificador;
- Fosse utilizado um osciloscópio para a obtenção dos dados, uma vez que este forneceria informações sobre as características do próprio sinal, além dos dados de potência

com uma maior precisão(maior frequência de amostragem), permitindo uma análise mais profunda sobre esse tipo de link de comunicação;

- Obtivesse-se algum financiamento para a pesquisa, uma vez que os custos são altos para obtenção dos balões, dos tanques de gás hélio e de toda a aparelhagem que assegura a estabilidade e segurança do sistema.

Foi possível, com uma boa acurácia, obter as curvas das funções de densidade de probabilidade e probabilidade acumulada e reafirmar a validade e competência dos modelos teóricos obtidos através da literatura. A compreensão da modelagem de canal para sistemas HAPs foi aprofundada e suas implicações práticas, em um certo grau, verificadas, o que foi um dos objetivos principais desse trabalho desde seu início. Ressalta-se, aqui, a importância dessa tecnologia para o acesso a redes móveis em locais remotos e acredita-se que esse projeto reforça a relevância desse tópico para futuros trabalhos.

Dentre as perspectivas futuras para a continuação dessa dissertação, seria possível: um tratamento mais preciso e otimizado da amostragem, evidenciando ainda mais os fatores que compõem o sinal recebido e facilitando a análise *a posteriori* dos fenômenos presentes no canal de comunicação; uma metodologia matemática mais rigorosa, com a possível aplicação da *divergência de Kullback-Liebler* no intuito de quantizar a proximidade entre modelagem e realidade; através do uso de equipamentos mais sofisticados, um aprofundamento na teoria de telecomunicações através de informações essenciais para o desenvolvimento de sistemas em redes móveis como capacidade ergódica, quantidade de somreamento e taxa de informação.

Referências Bibliográficas

- [1] ARAGÓN-ZAVALA, J. L. C.-R. A.; DELGADO-PENÍN, J. A. *High Altitude Platforms for Wireless Communications*. 1. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, Ltd, 2008. ISBN 9780470510612.
- [2] SOCIAL, W. A. *Digital in 2018: World's Internet Users Pass the 4 Billion Mark*. Janeiro 2018. <https://wearesocial.com/blog/2018/01/global-digital-report-2018>. Acesso em: 04 fev. 2019.
- [3] EXAME. *Um terço dos domicílios não tem acesso à internet*. Julho 2018. <https://exame.abril.com.br/tecnologia/um-terco-dos-domicilios-no-brasil-nao-tem-acesso-a-internet/>. Acesso em: 02 fev. 2019.
- [4] EBC. *Internet chega a 78% das escolas públicas urbanas e a 13% das rurais*. Dezembro 2015. <http://agenciabrasil.ebc.com.br/educacao/noticia/2015-12/acesso-internet-chega-78-das-escolas-publicas-urbanas-e-22-das-rurais>. Acesso em: 02 fev. 2019.
- [5] G1. *Brasil urbano x Brasil rural*. Agosto 2015. <http://especiais.g1.globo.com/educacao/2015/censo-escolar-2014/brasil-urbano-x-brasil-rural.html>. Acesso em: 02 fev. 2019.
- [6] TOZER, T.; GRACE, D. High-altitude platforms for wireless communications. *Electronics Communication Engineering Journal*, p. 127–137, Junho 2001.
- [7] D'OLIVEIRA, F.; MELO, F.; DEVEZAS, T. High-altitude platforms — present situation and technology trends. *J. Aerosp. Technol. Manag.*, v. 8, n. 3, p. 249–262, Jul. - Set.
- [8] OLADIPO, A. *Stratospheric Propagation And HAPs Channel Modeling*. Agosto 2007.
- [9] AIRBUSDEFENCE. *Network for the Sky: Airbus successfully tests stratospheric 4G/5G defence communications with balloon demonstration*. Setembro 2018. <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2018/09/>

Network-for-the-Sky-Airbus-successfully-tests-stratospheric-4G-5G-defen.html. Acesso em: 05 fev. 2019.

- [10] UNION, I. T. *Fixed Service. Recommendation F.1500: Preferred Characteristics of Systems in the Fixed Service using High Altitude Platforms Operating in the Bands 47.2–47.5 GHz and 47.9–48.2 GHz*. Genebra, Maio 2000. 1-14 p.
- [11] UNION, I. T. *Spectrum needs of high-altitude platform stations broadband links operating in the fixed service*. Genebra, Npvembro 2018. 1-18 p.
- [12] MOHAMMED, A. et al. The role of high-altitude platforms (haps) in the global wireless connectivity. *Proceedings of the IEEE*, v. 99, n. 11, p. 1939–1953, Novembro 2011.
- [13] PROJETO Loon. <https://loon.com/>.
- [14] REVIEW, M. T. *Project Loon*. Fevereiro 2015. <https://www.technologyreview.com/s/534986/project-loon/>. Acesso em: 04 fev. 2019.
- [15] SHANKAR, P. M. *Fading and Shadowing in Wireless Systems*. 1. ed. [S.l.]: Springer Science+Business Media, 2012. ISBN 9781461403661.
- [16] RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1996. ISBN 0130422320.
- [17] GOLDSMITH, A. *Wireless Communications*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005. ISBN 0521837162.
- [18] YACOUB, M. D. The $\kappa - \mu$ distribution and the $\eta - \mu$ distribution. *IEEE Antenas Propag. Mag.*, v. 49, n. 1, p. 68–81, Fevereiro 2007.
- [19] PARIS, J. F. Statical characterization of $\kappa - \mu$ shadowed fading. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, v. 63, n. 2, p. 518–526, Fevereiro 2014.
- [20] DOVIS, F. et al. Small-scale fading for high-altitude platform(hap) propagation channels. *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*, v. 20, n. 3, p. 641–647, Abril 2002.
- [21] GRADSHTEYN, I.; RYZHIK, I. *Table of Integrals, Series, and Products*. 7. ed. [S.l.]: Elsevier Academic Press, 2007. ISBN 0123736374.
- [22] PUBLIC Lab. <https://publiclab.org/>.
- [23] HOMEDALE. <https://www.the-sz.com/products/homedale/>.
- [24] MARCUM Q. <https://github.com/USNavalResearchLaboratory/TrackerComponentLibrary/blob/master/Mathematical%20Functions/MarcumQ.m>.

Apêndice

Código Principal

```
1  %%%PROGRAMA INTEIRO%%
2
3  clear
4  arqv = input('Digite o nome da tabela:', 's');
5
6  %Abre o arquivo CSV e o transforma para um array.
7
8  tabela = readtable(arqv);
9  ti = tabela(:,1);
10 r1d = tabela(:,2);
11 c_1 = isa(ti, 'cell');
12 c_2 = isa(r1d, 'cell');
13 if c_1 == 1
14     t = str2double(ti);
15 elseif c_1 == 0
16     t = ti;
17 end
18 if c_2 == 1
19     rr = str2double(r1d);
20 elseif c_2 == 0
21     rr = r1d;
22 end
23
24 %Calcula a media e o desvio padrao das amostras , depois monta uma PDF
25 %teorica com esses valores e plota os graficos teoricos e empiricos.
26
27 mdp = mean(rr);
28 sig = std(rr+30);
29
30 mdp_w = 10^((mdp/10) -3); %Transforma dBm em W
31 pot_w = 10.^((rr/10) -3); %Transforma dBm em W
32 pot_n = pot_w/mdp_w; %Normaliza os valores
33
34 rr_e = sqrt(pot_w); %Envelope
```

```

35 rr_n = rr_e/mean(rr_e); %Envelope normalizado
36 rr_u = unique(rr_n);
37
38 %Modelo Log-normal
39
40 ma = movavg(rr,'simple',round(0.03*length(rr))); %M dia local com ...
    janela de 3% do comprimento do vetor amostragem para ...
    identificar o vetor de sombreamento
41 ma_u = unique(ma); %Vetor com valores nicos dentro do ...
    vetor de m dia local
42 mdp_ma = mean(ma); %M dia do vetor de m dia local
43 sig_ma = std(ma); %Desvio padr o do vetor de m dia local
44 ma_u_n = ma_u/mean(ma_u); %Vetor com valores nicos normalizado
45
46 pdf_ger = ...
    (1/sqrt(2*pi*sig_ma^2))*exp(-(ma_u-mdp_ma).^2)/(2*sig_ma^2); ...
    %Equacao da PDF log-normal para gerar a curva teorica
47 cdf_ger = (1/2)*(1+erf((unique(rr)-mdp)/(sig))); ...
    %Equacao da CDF log-normal para gerar a ...
    curva teorica
48
49 %Modelo kappa-mu
50 %Inicialmente , tentou-se utilizar o estimador fornecido pelo ...
    artigo de
51 %referencia , mas os resultados nao foram satisfatorios: os valores ...
    de kappa
52 %e mu eram recorrentemente numeros complexos. Assim, optou-se pelo ...
    ajuste
53 %manual dos parametros e deixou-se as equacoes utilizadas nas ...
    tentativas de
54 %ajuste automatico.
55
56 %Primeiro , calculavam-se o 4 e o 6 momentos do envelope ...
    normalizado:
57 %m_4 = mean(rr_n.^4); 4 momento do envelope normalizado
58 %m_6 = mean(rr_n.^6); 6 momento do envelope normalizado
59
60 %Depois , eram encontrados , em sequencia , kappa e mu:
61 %kp = abs(-(((sqrt(2)*(m_4 - 1))/sqrt(2*((m_4)^2)-m_4-m_6)) - ...
    2)^-1); %Kappa
62 %mu = (1/var(ho_1))/(sig*(1+kp)^2); %Mu
63
64 %Funcao que calcula os valores da pdf para um dado kappa , mu e um ...
    vetor
65 %amostragem
66
67 kp = [1 2.5]; %Inserir valores compat veis com o histograma emp rico
68 mu = [0.5 1];
69

```

```

70 ff = rr - ma;          %O vetor de desvanecimento em pequena ...
    escala e o vetor amostragem menos o vetor de sombreamento
71 ho_e = 10.^((ff/10) -3); %Vetor desvanecimento em pequena escala ...
    com valores em [W]
72 ho_n = ho_e/mean(ho_e); %Vetor desvanecimento em pequena escala ...
    normalizado
73 ho_1 = unique(ho_n);   %Vetor com valores nicos dentro do vetor ...
    de desvanecimento em pequena escala
74
75 PDF_kpmu = PDF_KPMU(mu, kp, ho_1);   %Calculo da pdf de kappa-mu
76
77 CDF_kpmu = CDF_KPMU(mu, kp, ho_1);   %Calculo da cdf de kappa-mu
78
79 %Plotagem dos graficos
80
81 %PDF
82 %SOMBREAMENTO
83 figure
84 hold on
85
86 histogram(ma, 'normalization', 'pdf', 'EdgeAlpha', 0.25, 'FaceAlpha', 0.25)
87 plot(ma_u, pdf_ger);
88
89 title({'PDFs Emp rica e Te rica (Log-Normal)'; ['\mu_{dB} = ...
    ', num2str(mdp), ', \sigma_{dB} = ', num2str(sig)]})
90 xlabel('Pot ncia do sinal(dBm)')
91 ylabel('Fun o de Densidade de Probabilidade')
92
93 hold off
94
95 legend({'Histograma Emp rico', 'Curva Te rica ...
    LN'}, 'Location', 'northwest')
96
97 %DESVANECIMENTO EM PEQUENA ESCALA
98
99 figure
100 hold on
101
102 histogram(ho_n, 'normalization', 'pdf', 'EdgeAlpha', 0.25, 'FaceAlpha', 0.25)
103 plot(ho_1, PDF_kpmu)
104 axis([xmin xmax ymin ymax]) %Define os valores limites dos eixos ...
    para melhorar a visualizacao das funcoes
105
106 title('PDFs Emp rica e Te rica (\kappa-\mu)')
107 xlabel('Envelope normalizado')
108 ylabel('Fun o de Densidade de Probabilidade')
109
110 lgd = legend({'Histograma Emp rico', ['Curva Te rica \kappa = ...
    ', num2str(kp(1)), ', \mu = ', num2str(mu(1)), ''], ['Curva Te rica ...

```

```

\kappa = ',num2str(kp(2))', '\mu = ',num2str(mu(1))],[ 'Curva ...
Te rica \kappa = ',num2str(kp(1))', '\mu = ...
',num2str(mu(2))],[ 'Curva Te rica \kappa = ',num2str(kp(2))', ...
\mu = ',num2str(mu(2))]],'Location','northeast');
111
112 %CDF
113 figure
114 semilogy(rr_u ,cdf_ger , 'Linewidth',1.5 , 'Color' ,[0.8500 0.3250 0.0980 ]);
115 hold on
116 histogram(rr_n , 'normalization','cdf', 'EdgeAlpha',0.25 , 'FaceAlpha',0.25 , 'FaceColor' ,[0
0.4470 0.7410 ])
117 semilogy(ho_1 ,CDF_kpmu , 'Linewidth',0.5);
118 axis([xmin xmax ymin ymax]) %Define os valores limites dos eixos ...
para melhorar a visualizacao das funcoes
119
120 title('CDFs Emp rica e Te rica')
121 xlabel('Pot ncia Normalizada')
122 ylabel('Fun o de Distribui o Acumulada')
123
124 hold off
125
126 lgd = legend({'Curva Te rica Lognormal','Histograma ...
Emp rico' ,['Curva Te rica \kappa = ',num2str(kp(1))', '\mu = ...
',num2str(mu(1))','],[ 'Curva Te rica \kappa = ...
',num2str(kp(2))', '\mu = ',num2str(mu(1))],[ 'Curva Te rica ...
\kappa = ',num2str(kp(1))', '\mu = ',num2str(mu(2))],[ 'Curva ...
Te rica \kappa = ',num2str(kp(2))', '\mu = ...
',num2str(mu(2))]],'Location','southeast');

```

Código Função $\kappa - \mu$

Função de Densidade de Probabilidade

```

1 function valor = PDF_KPMU(mu,kp,ho)
2
3 valor = [];
4
5 for i=1:1:length(mu) %A funcao foi separada em tres partes: ...
uma constante(dependente de kappa e mu), uma funcao de ho e a ...
funcao de bessel modificada de primeira ordem.
6 for j=1:1:length(kp)
7 cte ...
=(2*mu(i)*(1+kp(j))^((mu(i)+1)/2))/((kp(j)^((mu(i)-1)/2))*exp(mu(i)*kp(j)))
8 g_w = (ho.^mu(i)).*exp(-mu(i)*(1+kp(j))).*ho.^2);
9 b_ct = 2*mu(i)*sqrt(kp(j)*(1+kp(j)))*ho;
10 if ((-pi)<angle(b_ct)<(pi/2))& floor(mu(i)-1)~=mu(i)-1 ...
%Funcao de Bessel modificada de primeira ordem: para ...

```

```

    diferentes valores de mu e diferentes fases do valor ...
    inserido na funcao de Bessel, a formulacao e adaptada..
11     inv_b = ...
        exp(-(pi/2)*(mu(i)-1)*1j)*besselj(mu(i)-1,exp((pi/2)*1j)*b_ct);
12 elseif ((pi/2)<angle(b_ct)<(pi)) & floor(mu(i)-1)~=mu(i)-1
13     inv_b = ...
        exp((3*pi/2)*(mu(i)-1)*1j)*besselj(mu(i)-1,exp(-(3*pi/2)*1j)*b_ct);
14 elseif floor(mu(i)-1)==mu(i)-1
15     inv_b = (1j^(-(mu(i)-1)))*besselj(mu(i)-1,1j*b_ct);
16 end
17
18     vet = cte*g_w.*inv_b;
19     valor = [valor vet];
20 end
21 end
22
23 end

```

Função de Distribuição Acumulada

```

1 function valor = CDF_KPMU(mu,kp,ho)
2
3 valor = [];
4
5 for i=1:1:length(mu)
6     for j=1:1:length(kp)
7         a = sqrt(2*kp(j)*mu(i));
8         b = sqrt(2*(1+kp(j))*mu(i))*ho;
9
10        vet = 1 - MarcumQ(mu(i),a,b); %Funcao definida por MarcumQ.m, ...
            na qual e possivel calcular a marcumq para valores de ...
            mu=i/2, para i=1,2,3,...
11        valor = [valor vet];
12    end
13 end
14
15 end

```