



**ANÁLISE DA POTÊNCIA DE RECEPÇÃO
DO *BEACON* DO SGDC EM BANDA K_A
NA PRESENÇA DE CHUVA**

CAIO CESAR GOULART BOMFIM

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

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

**ANÁLISE DA POTÊNCIA DE RECEPÇÃO
DO *BEACON* DO SGDC EM BANDA KA
NA PRESENÇA DE CHUVA**

CAIO CESAR GOULART BOMFIM

Orientador: PROF. UGO SILVA DIAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**PUBLICAÇÃO PPGEE - PPGEE-796/22
BRASÍLIA-DF, 15 DE DEZEMBRO DE 2022.**

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

**ANÁLISE DA POTÊNCIA DE RECEPÇÃO
DO *BEACON* DO SGDC EM BANDA KA
NA PRESENÇA DE CHUVA**

CAIO CESAR GOULART BOMFIM

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

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Ugo Silva Dias
Orientador

Prof. Leonardo Rodrigues Araújo Xavier de Menezes, UnB
Examinador interno

Prof. Gilberto Arantes Carrijo, UFU
Examinador externo

BRASÍLIA, 15 DE DEZEMBRO DE 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA

CAIO CESAR GOULART BOMFIM

Análise da Potência de Recepção do *Beacon* do SGDC na Presença de Chuva

2022xv, 71p., 201x297 mm

(ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2022)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Elétrica

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CAIO CESAR GOULART BOMFIM (2022) Análise da Potência de Recepção do *Beacon* do SGDC na Presença de Chuva. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGE-796/22, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 71p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: CAIO CESAR GOULART BOMFIM

TÍTULO: Análise da Potência de Recepção do *Beacon* do SGDC na Presença de Chuva.

GRAU: Mestre ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de Mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor se reserva a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de Mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

CAIO CESAR GOULART BOMFIM

Brasília - DF - Brasil

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, à minha esposa por todo apoio e incentivo diários, aos meus pais, aos quais dedico esta dissertação, por terem forjado meu caráter e educação no caminho da qualificação, da resiliência e do conhecimento. Retribuo à minha irmã, pelo incentivo e por não me deixar desanimar perante as dificuldades e obstáculos do caminho. Afinal, como diria Malesherbes "Os homens fariam maiores coisas, se não julgassem tantas coisas impossíveis". Agradeço aos colegas da Telebras, especialmente ao Fernando Cota e à Marcia Nunes, por todo auxílio na obtenção e tratamento de dados. Por último, mas não menos importante, agradeço ao meu orientador Professor Ugo Silva Dias pelos ensinamentos e condução durante todo o processo de orientação e escrita deste trabalho.

Caio Cesar Goulart Bomfim

RESUMO

Os sistemas de comunicação via satélite têm tido um crescimento vertiginoso nos últimos anos devido ao surgimento e expansão de novas tecnologias que demandam cada vez mais banda. Essa constante evolução tem impulsionado a indústria no sentido de desenvolver tecnologias de comunicação com maior capilaridade, eficiência e inteligência. Pautado nesta constatação, este trabalho realiza a análise dos efeitos da atenuação devido à chuva em banda Ka no enlace de recepção da antena *gateway* de Brasília. Inicialmente, descreve-se a penetrabilidade do acesso à internet nas regiões do Brasil e o atual cenário das comunicações via satélite no país. É realizada a contextualização histórica dos sistemas espaciais, a descrição das órbitas e aplicações e a explanação sobre os sistemas espacial, de controle, usuário e a arquitetura do Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações, SGDC, incluindo a cadeia de rastreamento e os recursos utilizados para extração e tratamento dos dados manipulados. Medidas do sinal do *beacon* foram obtidas por meio da *gateway* de Brasília durante todo o ano de 2021 e tais medidas embasaram o desenvolvimento deste trabalho. Volumes pluviométricos mensais foram obtidos entre os anos de 2010 e 2020 e foram confrontados com os volumes verificados no ano de 2021 a fim de constatar a representatividade dos dados de potência recebida do *beacon* obtidos para a elaboração deste trabalho. Por meio dos dados obtidos, propôs-se o valor de *clear sky* a partir do qual foi construída uma tabela descrevendo tempos de atenuação, número de eventos e porcentagem de tempo anual para a faixa de atenuação de 1 a 30 dB. Estuda-se ainda a correlação entre a quantidade de eventos de chuva e a porcentagem de tempo em que o sinal do *beacon* é atenuado abaixo do nível de *clear sky* durante as estações do ano. Por fim, obtém-se uma tabela que considera os intervalos de tempo de 30-60, 60-120, 120-300 e 300-1200 segundos, por nível de atenuação considerado. Utilizando-se desses dados, é demonstrado o comportamento temporal anual de atenuação do sinal de beacon por faixa de atenuação e é proposto um modelo matemático capaz de representar, com uma boa precisão, o intervalo de referência considerado, que é o intervalo de 30-60 segundos. Além disso, são propostos fatores de escalonamento capazes de reduzir os demais intervalos estudados, ao intervalo de referência considerado. A presente investigação propõe dois modelos estatísticos capazes de representar fidedignamente o comportamento anual do sinal de beacon na presença de chuva, na região de Brasília. Os resultados comprovam a aplicabilidade e precisão dos modelos propostos no dimensionamento de sistemas de radiofrequência que operam em banda Ka.

ABSTRACT

The satellite communication systems has had a vertiginous growth in recent years due to the emergence and expansion of new technologies that demand more and more bandwidth. This constant evolution has driven the industry to develop communication technologies with higher capillarity, efficiency and intelligence. Based on this finding, this work performs the analysis of the effects of attenuation due to rain in Ka band on the reception link of the gateway antenna in Brasilia. Initially, the penetrability of internet access in the regions of Brazil and the current scenario of satellite communications in the country are described. The historical contextualization of the space systems, the description of the orbits and its applications and the explanation of the space, control, user segments and the architecture of the SGDC system are carried out, including the tracking chain and the resources used to extract and process the manipulated data. Beacon signal measurements were obtained through the Brasilia gateway throughout 2021 and such measurements supported the development of this work. Monthly rainfall volumes were obtained between the years 2010 and 2020 and were compared with the volumes verified in the year 2021 in order to check the representativeness of the power data measured from the beacon. Through the data obtained, the clear sky value was proposed, from which a table was constructed describing attenuation times, number of events and percentage of annual time for the attenuation range 1 to 30 dB. The correlation between the amount of rain events and the percentage of time in which the beacon signal is attenuated below the clear sky level during seasons, is also studied. Finally, a table is obtained that considers the time intervals of 30-60, 60-120, 120-300 and 300-1200 seconds, per considered attenuation level. Using these data, the annual temporal behavior of attenuation of the beacon signal by attenuation range is demonstrated and a mathematical model capable of representing, with good precision, the reference interval considered, which is the interval of 30-60 seconds. In addition, scaling factors capable of reducing the other studied intervals to the reference interval are proposed. The present investigation proposes two statistical models capable of reliably representing the annual behavior of the beacon signal in the presence of rain, in the region of Brasilia. The results prove the applicability and precision of the proposed models in the dimensioning of radiofrequency systems that operate in Ka band.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	3
1.3	MOTIVAÇÃO	5
1.4	OBJETIVOS.....	5
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	6
2	CONCEITOS BÁSICOS	8
2.1	SATÉLITE DE COMUNICAÇÃO	8
2.2	CONTEXTO HISTÓRICO	8
2.3	ÓRBITAS, APLICAÇÕES E ARQUITETURA DOS SISTEMAS DE COMU- NICAÇÕES VIA SATÉLITE	9
2.4	ORIGEM E CONTEXTUALIZAÇÃO DO SGDC	12
2.5	ARQUITETURA DO SGDC	13
2.6	CONCLUSÃO	18
3	CADEIA DE RASTREIO DA ANTENA DE BRASÍLIA, OBTENÇÃO E TRATA- MENTO DOS DADOS	19
3.1	SISTEMAS UTILIZADOS NA OBTENÇÃO E PROCESSAMENTO DO SINAL DO BEACON	19
3.2	DEFINIÇÃO DO SINAL DE <i>Beacon</i> E FUNÇÕES DA CADEIA DE RASTREIO	20
3.3	DIAGRAMA DE BLOCOS DA CADEIA DE RASTREIO E SEU FUNCIONA- MENTO.....	20
3.4	CONCLUSÃO	22
4	CONCEITOS E TRATAMENTO DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO	23
4.1	COMPARAÇÃO DO VOLUME DE CHUVA MENSAL NO ANO DE 2021 COM A MÉDIA ENTRE OS ANOS DE 2010 A 2020	23
4.2	DEFINIÇÃO DO VALOR DE <i>Clear Sky</i> DO <i>Beacon</i>	25
4.3	LIMITE, DURAÇÃO E EVENTO DE ATENUAÇÃO.....	27
4.4	APRESENTAÇÃO DA POTÊNCIA DE <i>Beacon</i> MEDIDA E ANÁLISES	29
4.5	ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ANUAL DE EVENTOS E PORCENTAGENS DE TEMPOS MENSAIS DE ATENUAÇÃO	32

4.6	COMPORTAMENTO SAZONAL DAS PORCENTAGENS DE TEMPO E EVENTOS DE CHUVA	35
4.7	CONCLUSÃO	35
5	MODELAGEM ESTATÍSTICA DA ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA EM BANDA KA.....	36
5.1	MODELO DE DURAÇÃO DE ATENUAÇÕES	37
5.2	DISTRIBUIÇÃO DOS INTERVALOS DE ATENUAÇÃO	39
5.3	FATORES DE ESCALONAMENTO.....	40
5.3.1	FATORES DE ESCALONAMENTO PELA MÉDIA	41
5.3.2	FATORES DE ESCALONAMENTO PELA MODA	42
5.4	MODELO HÍBRIDO UTILIZANDO OS FATORES DE ESCALONAMENTO PELA MÉDIA E PELA MODA	43
5.5	MODELO PROPOSTO - MODELO ÚNICO	44
5.6	CÁLCULO DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO E DA RAÍZ DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO.....	45
5.7	APRIMORAMENTO DO MODELO PROPOSTO - MODELO HÍBRIDO.....	46
5.8	CÁLCULO DO EQM E DO REQM PARA O MODELO HÍBRIDO	47
5.9	COMPARAÇÃO DA RECOMPOSIÇÃO DOS INTERVALOS UTILIZANDO O MODELO ÚNICO E O MODELO COMPOSTO.....	48
5.9.1	RECOMPOSIÇÃO PELO MODELO ÚNICO	48
5.9.2	RECOMPOSIÇÃO PELO MODELO HÍBRIDO	49
5.10	CONCLUSÃO	50
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

LISTA DE FIGURAS

1.1	Satélites em Operação no Brasil por Banda de Radiofrequência [7].	3
1.2	Satélites Geoestacionários em Operação no Brasil [7].	3
2.1	Sistema de Comunicação Via Satélite e Seus Segmentos [14].	11
2.2	Cobertura do SGDC em Banda Ka.	14
2.3	Diagrama de Blocos da Carga Útil em Banda Ka.	14
2.4	Segmentos de Controle, Solo e Espacial do SGDC.	15
3.1	Cadeia de Rastreamento da Antena de Brasília.	21
4.1	Comparativo do Volume de Chuva Mensal de 2021 com a Média Mensal dos Dez Anos Anteriores.	25
4.2	Função Densidade Acumulada da Potência Recebida do <i>Beacon</i> no Ano de 2021.	27
4.3	Variação do <i>Beacon</i> , Tempo e Evento de Atenuação.	28
4.4	Distribuição Anual de Eventos de Chuva por Faixa de Atenuação.	34
4.5	Distribuição Anual de Eventos de Chuva por Faixa de Atenuação.	34
5.1	Distribuição dos Intervalos de Atenuação Considerados no ano de 2021.	39
5.2	Intervalos Reduzidos ao Intervalo de Referência pela Média dos Fatores de Escalonamento.	42
5.3	Intervalos Reduzidos ao Intervalo de Referência pela Moda dos Fatores de Escalonamento.	43
5.4	Intervalos Reduzidos ao Intervalo de Referência Utilizando o Modelo Híbrido - Moda e Média.	44
5.5	Comparação entre os Dados Medidos e o Modelo Proposto Considerando o Intervalo de Referência.	45
5.6	Comparação entre os Dados Medidos e o Modelo Híbrido Proposto Considerando Duas Distribuições.	47
5.7	Recomposição das Distribuições Obtidas Por Meio da Coleta do <i>Beacon</i> Utilizando o Modelo Único.	49
5.8	Recomposição das Distribuições Obtidas Por Meio da Coleta do <i>Beacon</i> Utilizando o Modelo Híbrido.	50

LISTA DE TABELAS

1.1	Principais Bandas, Faixas de Frequência e suas Aplicações nas Comunicações Via Satélite.....	2
1.2	Porcentagem de Domicílios com Acesso à Internet por Situação.....	2
4.1	Duração, Número de Eventos e Porcentagem de Tempo Excedidos por Faixa de Atenuação.	29
5.1	Duração de Atenuação por Nível de Atenuação e Intervalo de Tempo para o Ano de 2021.	37
5.2	Fatores de Escalonamento por Nível de Atenuação.	40

LISTA DE TERMOS E SIGLAS

5G	Quinta Geração de Tecnologias Móveis
ACU	Antenna Control Unit
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
BDC	Block Down Converter
BUC	Block Up Converter
CETIC	Centro Regional de Estudos para o Desenvolvimento da Sociedade da Informação
CMC	Communication Management Center
CMS	Carrier Monitoring System
CMT	Communication Monitoring Tool
COM	Communications
COPE-P	Centro de Operações Espaciais Principal
COPE-S	Centro de Operações Espaciais Secundário
DEMUX	Demultiplexers
DOCON	Downconverters
DSS	Dynamic Satellite Simulator
EQM	Erro Quadrático Médio
FDA	Função Distribuição Acumulada
FDS	Flight Dynamics System
FUNAI	Fundação Nacional do Índio
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde

GC	Ground Monitoring
GEO	Geosynchronous Equatorial Orbit
GM	Ground Monitoring
GPS	Global Positioning System
HPA	High Power Amplifiers
HTS	High Throughput Satellite
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IoT	Internet of Things
LCTWTA	Linearized Channelizer Travelling Wave Tube Amplifier
LEO	Low Earth Orbit
LHCP	Left Hand Circular Polarization
LNA	Low Noise Amplifier
MC	Monitoring and Control
MEO	Medium Earth Orbit
MOP	Monitoring Plan
NWP	Numerical Weather Prediction
ODMUX	Output Demultiplexers
PCS	Payload Control System
PDP	Payload Definition Plan
PNBL	Plano Nacional de Banda Larga
RADAR	Radio Detection and Ranging
REQM	Raíz do Erro Quadrático Médio
RHCP	Right Hand Circular Polarization
RR	Reconfiguration Report

RTS	Real Time System
SCT	System Capacity Tool
SERPRO	Serviço de Processamento de Dados
SGDC	Satélite Geostacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas
SMC	Satellite Management Center
TCR	Telemetry, Command and Ranging
Telebras	Telecomunicações Brasileiras S.A
TRK	Tracking Receiver
TWTA	Traveling Wave Tube Amplifier
UIT	União Internacional das Telecomunicações
ULPC	Uplink Power Control
VSAT	Very Small Aperture Terminal

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Nível de Atenuação
EQM	Erro Quadrático Médio
$REQM$	Raíz do Erro Quadrático Médio
TE_{30-60}	Tempo de Atenuação Acumulado Estimado Para o Intervalo de 30-60 segundos
$TE_{30-60(3-14dB)}$	Tempo de Atenuação Acumulado Estimado para o Intervalo de 30-60 segundos Considerando Atenuações de 3 a 14dB
$TE_{30-60(14-30dB)}$	Tempo de Atenuação Acumulado Estimado para o Intervalo de 30-60 segundos Considerando Atenuações de 14 a 30dB
TM_{30-60}	Tempo de Atenuação Acumulado Medido Para o Intervalo de 30-60 segundos

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

O crescimento mundial e exponencial no uso de serviços de Internet e multimídia levou ao planejamento ambicioso e à evolução dos sistemas comerciais de comunicação via satélite de banda larga. Os novos sistemas propostos devem fornecer serviços interativos bidirecionais para suportar taxas de dados agregadas na faixa de 1 a 100 Gbps por satélite, graças a aplicação do conceito *multibeam*, com feixes estreitos e explorando o reuso de frequência [1]. Com as alocações nas frequências mais baixas para banda C e Ku já congestionadas, a União Internacional das Telecomunicações, UIT, concedeu licenças a organizações de satélite para operar sistemas de satélite de banda larga no espectro de banda Ka, que é muitas vezes referido como 20 a 30 GHz [2], mas que, pela definição adotada pelo UIT, utiliza frequências entre 17,7 GHz e 21,2 GHz para a recepção das estações terrenas e 27,5 GHz a 31,0 GHz para a transmissão [3].

Com o início da implantação da quinta geração tecnologias móveis, 5G, do desenvolvimento da internet das coisas, IoT, do inglês *Internet of Things*, existe a expectativa de existir entre 50 e 80 bilhões de dispositivos conectados no mundo [4]. Além disso, a crescente introdução de aplicações e dispositivos sem fio e a necessidade por aumento de largura de banda são assuntos urgentes e importantes no cenário das telecomunicações mundiais. Nesse contexto, no Brasil, uma tecnologia que tem se despontado cada dia mais como uma alternativa na universalização dos serviços, é a das comunicações via satélite, que possui alta capilaridade, agilidade de instalação e alcance, características essenciais e muito importantes quando se objetiva levar serviços de banda larga a um país de dimensões continentais como o Brasil, onde nem sempre o atendimento por meios cabeados é economicamente viável ou possível, principalmente nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste.

Há algumas décadas, os satélites tornaram-se absolutamente essenciais na sociedade moderna e seu campo de aplicação está em constante expansão. Hoje em dia, são amplamente utilizados em várias áreas, como navegação, previsão do tempo, gestão de desastres

ou telecomunicações. De fato, os satélites de telecomunicações geoestacionários podem oferecer cobertura global, o que os torna particularmente atraentes para levar Internet de banda larga em áreas isoladas onde o acesso às redes terrestres permanece muito limitado.

Os dados transmitidos dos satélites para a Terra são transmitidos por ondas de rádio cuja frequência está compreendida entre 1 e 40 GHz. As frequências dentro desta faixa são classificadas em faixas de frequência, dedicadas a aplicações específicas para comunicações por satélite, mas também compartilhadas com outros sistemas como sistemas fixos terrestres sem fio, instrumentos de sensoriamento remoto por micro-ondas, radar ou sistemas de posicionamento. Esses rótulos de banda de frequência (L, S, C, X, Ku, Ka e Q/V) são detalhados na Tabela 1.1

Tabela 1.1: Principais Bandas, Faixas de Frequência e suas Aplicações nas Comunicações Via Satélite.

Banda	Faixa de Frequência	Aplicação em Comunicações Via Satélite
L	1-2 GHz	Serviços Móveis
S	2-3 GHz	Serviços Móveis
C	4-6 GHz	Televisão e Comunicação Ponto-a-Ponto
X	7-9 GHz	Comunicações Militares
Ku	11-16 GHz	Televisão, Comunicação Ponto-a-Ponto, Banda Larga
Ka	20-30 GHz	Banda Larga
Q/V	40-50 GHz	Sistemas Futuros de Banda Larga

A grande vantagem na utilização de sistemas de comunicação via satélite, é que apenas um satélite geoestacionário tem capacidade de cobrir até um terço da área de globo terrestre [5].

Em levantamento realizado no ano de 2021 pelo Centro Regional de Estudos para o Desenvolvimento da Sociedade da Informação, CETIC, conforme demonstrado pela Tabela 1.2, o acesso à internet estava presente em 83,2% das residências em zonas urbanas e em apenas 70,5% dos domicílios localizados em zonas rurais no país [6].

Tabela 1.2: Porcentagem de Domicílios com Acesso à Internet por Situação.

Área/Ano	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Urbana	55,5%	58,6%	65,1%	70,2%	74,5%	85,9%	83,2%
Rural	22,3%	25,9%	33,6%	43,9%	51,4%	64,8%	70,5%

Para complementar a cobertura ofertada pelas redes cabeadas de fibra ótica, os satélites geoestacionários do tipo HTS, do inglês *High Throughput Satellite*, possuem como principais características a utilização da tecnologia de cobertura *multispot*, que permite a utilização da técnica do reuso de frequências e permite uma alta capacidade de tráfego de dados. Esses satélites têm sido utilizados para prover cobertura em locais de difícil acesso e que necessitam de taxas de transmissão consideráveis para utilizarem aplicações com boa qualidade de serviço.

Os satélites do tipo HTS de Banda Ka têm apresentado um crescimento rápido e já representam a terceira colocação na quantidade de satélites em operação no Brasil. Atualmente, segundo a Agência Nacional de Telecomunicações, ANATEL, a quantidade de satélites em operação no Brasil e as bandas de frequência utilizadas por eles são descritas nas Figuras 1.1 e 1.2 [7].

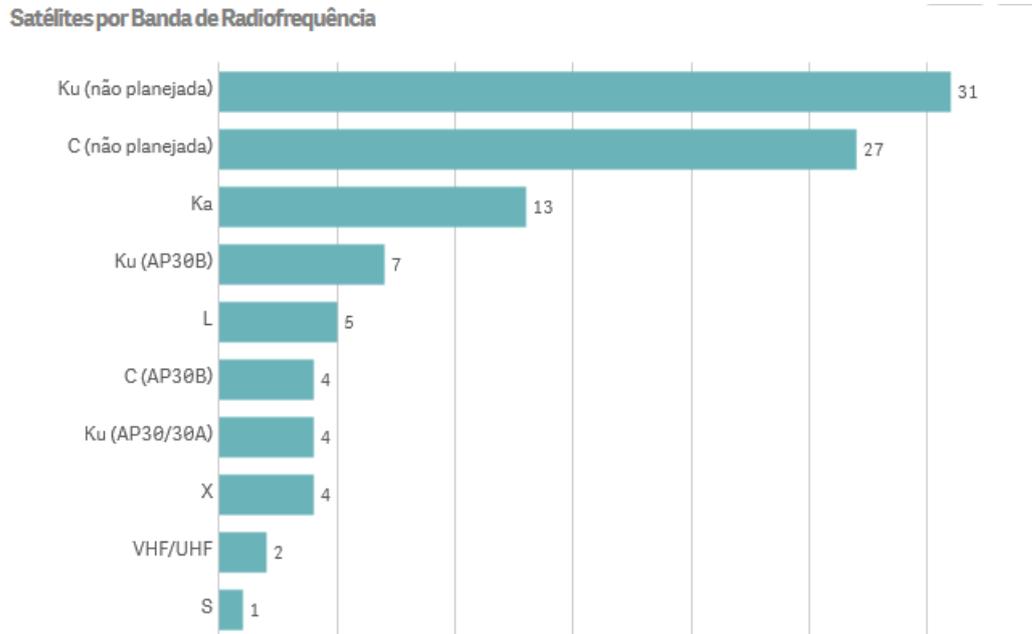


Figura 1.1: Satélites em Operação no Brasil por Banda de Radiofrequência [7].



Figura 1.2: Satélites Geoestacionários em Operação no Brasil [7].

1.2 Definição do problema

No Brasil, atualmente, o satélite em operação do tipo HTS de maior capacidade e cobertura é o Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas, SGDC, que é um satélite de propriedade da Telebras, uma empresa estatal brasileira, constituída na forma de

sociedade de economia mista, e que opera na banda Ka. No Capítulo 2 o SGDC, suas funcionalidades e arquitetura serão mais bem detalhados.

Por trabalhar em frequências mais altas, se comparado às bandas C e Ku, existem frequências suficientes disponíveis no espectro eletromagnético de forma a viabilizar a utilização de maiores taxas de transmissão e o atendimento a mais usuários.

Como as frequências mais altas são mais afetadas por efeitos climáticos como a chuva, um dos principais desafios é ter uma taxa de transmissão de dados satisfatória e, ao mesmo tempo, possuir disponibilidade no enlace de radiofrequência, com uma relação sinal-ruído satisfatória, para garantir a comunicação entre a antena *gateway* e o terminal do usuário, e vice-versa.

Os efeitos da propagação de ondas de rádio são fatores fundamentais a serem considerados no desenvolvimento e desempenho de sistemas de comunicação espaciais. O efeito degradante da chuva no caminho de transmissão é um dos maiores problemas associados aos sistemas de comunicação via satélite, particularmente para aqueles que operam em frequências acima de 10 GHz [8]. Nessas frequências, os efeitos de absorção e espalhamento devido à chuva podem causar uma redução na amplitude do sinal transmitido (atenuação) o que, por sua vez, reduz a confiabilidade e o desempenho do enlace de comunicação via satélite [8].

Durante o dimensionamento de satélites, os projetistas utilizam muitas vezes modelos como o ITU-R [9], que se baseiam em dados atmosféricos produzidos por um modelo numérico de previsão do clima NWP, do inglês *Numerical Weather Prediction*, que, por sua vez, possuem uma resolução grosseira em tempo e espaço [10]. Métodos NWP procuram estimar a taxa de precipitação em uma determinada região da terra e, baseado nessas estimativas, realizar o dimensionamento da carga útil do satélite. Contudo, podem haver limitações para muitas regiões cujas estimativas não são tão precisas e isso pode ocasionar erros de sub ou sobre dimensionamento dos sistemas. Sendo assim, estudos específicos do comportamento do regime de chuvas têm sido realizados por diversos países a fim de obter uma ou mais distribuições estatísticas que estimem com eficácia o comportamento anual de chuvas em regiões de interesse.

Este trabalho propõe utilizar e analisar medidas de atenuação do sinal de *beacon* obtidas a partir da cadeia de rastreamento da antena *gateway* de Brasília. Além disso, utiliza-se de dados de precipitação obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia, INMET [11], e, a partir da análise desses dados de chuva e do comportamento anual do sinal do *beacon*, propõem-se modelos estatísticos para representar a distribuição anual de chuva em Brasília, de forma a obter sistemas matemáticos com boa representatividade, permitindo um dimensionamento mais preciso dos sistemas de comunicação por radiofrequência.

1.3 Motivação

Atenuações devido à chuva em frequências acima de 10 GHz introduzem um parâmetro aleatório no projeto de sistemas de comunicações via satélite. Qualquer incerteza nas especificações de um sistema se traduz em custo ou diminuição de lucro devido à indisponibilidade do sistema, ou despesas adicionais por superdimensionamento. Um grande esforço tem sido direcionado nas últimas décadas pela indústria e pela comunidade acadêmica, no sentido de compreender melhor os efeitos de propagação da banda Ka [12]. Sendo assim, o prévio conhecimento estatístico sobre o comportamento da atenuação no enlace satélite-terra é necessário antes de um sistema eficiente, do ponto de vista operacional e financeiro, ser projetado.

Diante da complexidade e do aumento expressivo da utilização dos sistemas de comunicações via satélite, é necessário que se estude o comportamento dos efeitos de propagação que influenciam na qualidade dos sinais e propor modelos que possam contribuir na predição do comportamento das chuvas.

Além disso, não foram encontrados estudos publicados na literatura sobre os efeitos de propagação em sistemas de satélite, operando banda a Ka, em ambiente de cerrado brasileiro, o que foi um forte motivador para a elaboração desta dissertação.

1.4 Objetivos

Objetiva-se nesta dissertação, estudar os efeitos da chuva no enlace de comunicação em Banda Ka entre o satélite SGDC e a *gateway* de Brasília, localizada nas dependências da Base Aérea de Brasília, por meio da análise de potência recebida do sinal do *beacon* do satélite durante o ano de 2021. Tais medições foram realizadas utilizando a cadeia de rastreamento da antena *gateway* de Brasília, de onde as medições foram realizadas. Em seguida, os dados das medidas foram retirados e estocados em servidores de armazenamento. Através desses servidores as informações foram obtidas e analisadas, permitindo a confecção desta dissertação. Além disso, dados de chuva obtidos por meio do INMET, também foram utilizados para embasar os estudos desenvolvidos.

Com os dados obtidos a partir das medições citadas acima, este trabalho objetiva:

- Descrever o sistema do SGDC e sua arquitetura;
- Apresentar o princípio de funcionamento da cadeia de rastreamento da antena *gateway* de Brasília e como os dados de potência recebida do *beacon* são obtidos;
- Apresentar a arquitetura de servidores onde os dados históricos são armazenados e como eles são obtidos;

- Apresentar as medições de chuva realizadas pelo INMET durante o ano de 2021 comparado com a média obtida dos dez anos anteriores (2010 – 2020);
- Avaliar e propor o valor de *clear sky*, que será usado como referência no desenvolvimento deste trabalho, baseado na análise estatística da variação anual do sinal;
- Obter a tabela de tempos excedidos em segundos para diversos valores de atenuação, a porcentagem de tempo no ano para cada atenuação e a quantidade de eventos considerados;
- Avaliar a distribuição mensal de eventos de chuva medidos para o ano de 2021;
- Avaliar a porcentagem de tempo mensal, para determinadas atenuações, que o sinal ficou abaixo do nível de *clear sky* considerado;
- Apresentar tabela de intervalos de tempo em segundos para diversos valores de atenuação;
- Apresentar as curvas de atenuação para os intervalos de tempo considerados no estudo;
- Propor fatores de escalonamento que permitam reduzir as curvas que representam intervalos maiores na curva que representa o menor intervalo estudado;
- Propor modelo estatístico que represente o menor intervalo considerado no estudo;
- Verificar se um modelo híbrido possui uma precisão melhor ou pior;
- Analisar medidas de erro.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. Os Capítulos 1 e 2 apresentam as características e conceitos das comunicações via satélite, a estrutura do projeto SGDC, seu princípio de funcionamento, arquitetura dos sistemas utilizados na obtenção de dados e a forma como essas informações foram obtidas. Tais capítulos prestam informações úteis e importantes para contextualizar as comunicações via satélite, suas particularidades e embasar a obtenção, processamento e utilização dos dados utilizados no desenvolvimento deste trabalho. O Capítulo 2 apresenta os conceitos básicos das comunicações via satélite e suas modalidades. É citada a definição de satélite, seu breve contexto histórico, suas órbitas, principais aplicações e arquitetura típica. Finalmente, apresenta-se a arquitetura dos sistemas SGDC, suas subdivisões, funções básicas e aplicações. O Capítulo 3 aborda a arquitetura da cadeia de rastreamento da antena *gateway* de Brasília, seus equipamentos, características e como a medida de potência do sinal de *beacon* é recebida, processada e armazenada. Além disso, aborda-se a arquitetura de rede, servidores e estações de trabalho utilizadas para acessar as

informações da medida de potência de beacon, obtidas por meio da cadeia de rastreamento da antena.

No Capítulo 4 são apresentados dados comparativos das médias dos volumes de chuva mensais dos últimos dez anos com o volume registrado em 2021, o número de eventos de chuva detectados por mês e suas atenuações e, por fim, as porcentagens de tempos mensais em que o sinal enfrentou determinados níveis de atenuações. Além disso, são expostos os resultados referentes à obtenção do nível de *clear sky* baseado na análise do sinal de *beacon* durante o ano de 2021.

Análises de atenuação do sinal são realizadas e uma tabela que relaciona níveis de atenuação com seus respectivos tempos excedidos é apresentada e analisada. O Capítulo 5 apresenta outra tabela em forma de níveis de atenuações correlacionados à intervalos de tempos. Tais dados são apresentados também de forma gráfica. Posteriormente, estudam-se modelos estatísticos que visam representar os intervalos de tempo de atenuações obtidos no ano de 2021. Os resultados objetivam aproximar os modelos estatísticos calculados com os dados reais obtidos para o menor intervalo considerado, chamado neste trabalho de intervalo de referência. Além disso, para os demais intervalos considerados, são analisados e propostos fatores de escalonamento que visam reduzir as medições dos intervalos de maior duração, no intervalo de referência. Por fim, por meio dos cálculos de erros, busca-se demonstrar quanto o modelo matemático proposto se ajusta ao intervalo de referência e, utilizando os fatores de escalonamento propostos, aos demais intervalos de tempo medidos para diversos valores de atenuação.

Por fim, o Capítulo 6 tem como objetivo expor as conclusões finais do trabalho, as contribuições deste na análise dos efeitos da chuva nas comunicações via satélite em banda Ka e a indicação de sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Conceitos Básicos

Os sistemas de comunicação via satélite são complexos e estão expostos a diversos fenômenos atmosféricos e climáticos que podem prejudicar a relação sinal-ruído e, conseqüentemente, a qualidade das comunicações. Os canais de comunicação sem fio são aleatórios e não oferecem uma análise simples.

O entendimento do conceito de satélite, suas aplicações, órbitas e características se faz necessário para contextualizar a análise realizada e fornecer conceitos necessários ao entendimento desta dissertação.

Este capítulo traz uma explicação sobre os conceitos necessários para a compreensão do conceito de satélite, o contexto histórico do surgimento das comunicações via satélite, principais órbitas e suas aplicações. Além disso, são descritos os segmentos, espacial, de solo e de usuário. Por fim, é explicada a origem do SGDC, sua arquitetura, cobertura e subsistemas envolvidos em sua operação.

2.1 Satélite de Comunicação

Um satélite de comunicação é definido como um satélite artificial que orbita em torno de um corpo de massa maior, por exemplo, a terra, e que recebe um sinal de comunicação de uma estação terrestre transmissora, amplifica, possivelmente o processa, e, posteriormente, o transmite de volta à terra para a recepção de uma ou mais estações terrenas receptoras [13], também conhecidas como VSATs, do inglês *Very Small Aperture Terminal*.

2.2 Contexto Histórico

Os satélites surgiram após o final da Segunda Guerra Mundial, como consequência do desenvolvimento tecnológico de mísseis e das micro-ondas. A experiência adquirida no uso combinado dessas duas tecnologias deu origem a era das comunicações via satélite e

da chamada corrida espacial. Essa tecnologia permitiu complementar as coberturas e os atendimentos que já eram realizados por meios terrestres cabeados.

A corrida espacial foi uma série de demonstrações competitivas de tecnologia entre os Estados Unidos e a União Soviética, com o objetivo de mostrar superioridade em missões espaciais. Foi uma consequência da Guerra Fria em meados do século XX, um conflito global tenso que colocou as ideologias do capitalismo e do comunismo uma contra a outra.

Do final da década de 1950 até meados da década de 1970, as duas superpotências estiveram envolvidas em uma acirrada competição sobre quem poderia conquistar o espaço sideral primeiro. Começando com o lançamento do primeiro satélite e culminando com uma missão conjunta entre as duas superpotências, a corrida espacial foi um período único na exploração espacial.

A era espacial teve início em 1957 com o lançamento do satélite artificial “Sputnik” pela então União Soviética. Os anos seguintes foram marcados pela chamada “*Corrida Espacial*” entre Estados Unidos e União Soviética com uma série de experimentos, como: felicitações natalinas feitas pelo “*SCORE*” (1958) pelo então presidente americano Eisenhower, o primeiro satélite de reflexão “*ECHO*” (1960), armazenamento e transmissão realizada pelo “*COURIER*” (1960), primeiro satélite com alimentação elétrica “*TELSTAR e RELAY*” (1962) e o primeiro satélite geostacionário “*SYNCOM*” (1963). Em 1965 o primeiro satélite comercial do tipo geostacionário foi lançado. Trata-se do “*INTELSAT-1*” ou “*Early Bird*” [14]. Em 1969, na missão Apollo 11, Neil Armstrong se torna o primeiro homem a pisar na Lua. Em 1970, na missão Apollo 13, ocorre um acidente com um dos tanques de oxigênio, mas os astronautas conseguem retornar à Terra por meio do módulo lunar. Em 1971 o Salyut é lançado pela União Soviética se tornando a primeira estação espacial. Finalmente, em julho de 1975, há um alívio nas tensões entre Estados Unidos e União Soviética permitindo o lançamento de uma missão conjunta entre as duas superpotências, chamada de projeto de Teste Apollo-Soyuz [15].

Do final dos anos 70 até os dias atuais, a indústria aeroespacial se desenvolveu de forma vertiginosa e atualmente existem mais de 6500 satélites em órbita, dos quais aproximadamente 3000 são satélites desativados [16], sendo que a principal aplicação desses satélites é para fins de comunicação.

2.3 Órbitas, Aplicações e Arquitetura dos Sistemas de Comunicações Via Satélite

Satélites de comunicação podem ser encontrados em várias órbitas. Um satélite pode girar em torno do centro da terra seguindo a trajetória de um círculo ou de uma elipse. A trajetória é caracterizada pela excentricidade, que tem o valor nulo para órbitas circulares e valores positivos para órbitas elípticas. Tanto a órbita circular quanto a elíptica são per-

turbadas pelo efeito não esférico da terra, variações locais na densidade da terra, a atração gravitacional de outros corpos celestes e etc.

A trajetória de um satélite em órbita se baseia em um plano que contenha o centro da terra. Esse plano faz um ângulo com o plano equatorial, chamado de ângulo de inclinação, que permanece nominalmente constante. Outro aspecto importante das órbitas são os seus períodos que irão se traduzir nos tempos de cobertura que cada satélite, localizado em determinada órbita, irá fornecer a um determinado ponto situado na terra [17].

As principais órbitas utilizadas nas comunicações via satélite são:

- Baixa órbita, LEO, do inglês *Low Earth Orbit* – possui altitude de aproximadamente 1.000 km e seu período orbital é em torno de uma hora e trinta minutos. A baixa órbita é amplamente usada em satélites de observação e de comunicação como, por exemplo, os satélites da “*Iridium*” e “*SpaceX*”, respectivamente.
- Média órbita, MEO, do inglês *Medium Earth Orbit* – possui altitude de aproximadamente 15.000 km e seu período orbital é em torno de seis horas. A média órbita é amplamente utilizada para satélites de geolocalização, como é o caso do Sistema de Posicionamento Global, GPS, do inglês *Global Positioning System*.
- Órbita geoestacionária, GEO, do inglês *Geosynchronous Equatorial Orbit* – possui uma altitude de aproximadamente 36.000 km, orbita no plano equatorial e seu período orbital é de vinte e três horas, cinquenta e seis minutos e quatro segundos. A órbita geoestacionária é a mais utilizada atualmente, principalmente nos satélites que provém serviços de comunicação e transmissão, do inglês *broadcast*, como, por exemplo, o SGDC.

Independente da órbita em que o satélite se encontra, os sistemas de comunicação via satélite são compostos pelos segmentos, espacial, de solo e de controle. Esses sistemas estão representados pela Figura 2.1 [14].

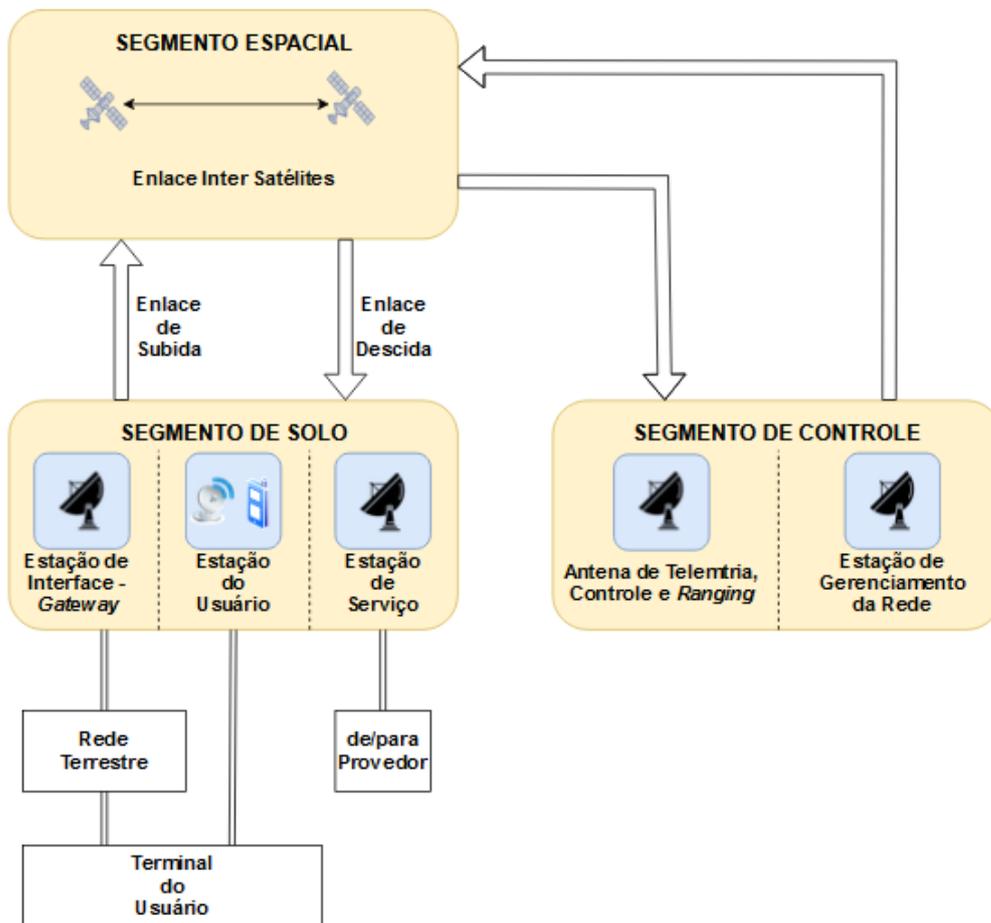


Figura 2.1: Sistema de Comunicação Via Satélite e Seus Segmentos [14].

O segmento espacial é composto por um ou mais satélites organizados em uma constelação. Um satélite é constituído pela sua carga útil e por sua plataforma. A carga útil é constituída de antenas de transmissão e recepção e todos os equipamentos eletrônicos que suportam a transmissão dos sinais de radiofrequência. Existem basicamente dois tipos de carga útil. A primeira é a carga útil transparente, onde a potência de uma portadora é amplificada e sua frequência é abaixada. O ganho de potência é da ordem de 130 dB. A conversão de frequência é requerida para aumentar a isolamento entre a entrada da recepção e a saída de transmissão. Outro tipo de carga útil é a regenerativa de feixe múltiplo onde as portadoras de *uplink* são demoduladas. A conversão de frequência é obtida modulando as portadoras geradas na placa na frequência de *downlink*. As portadoras moduladas são então amplificadas e entregues ao *transponder* de destino. A plataforma consiste em todos os subsistemas que permitem a carga útil funcionar corretamente, como a propulsão, energia elétrica, controle térmico, estrutura, controle de órbita e atitude e etc.

O segmento de controle é composto pelas instalações de solo para controle e monitoramento dos satélites, também chamadas estações TCR, do inglês *Telemetry, Command and Ranging*, e para o gerenciamento do tráfego e recursos associados ao satélite. Essas estações são essenciais para a operacionalização dos sistemas de comunicação via satélite. Essas es-

tações são responsáveis por receber e processar todas as telemetrias enviadas pelo satélite, além de enviar todos os telecomandos para alterar parâmetros da carga útil e da plataforma. Por fim, outra função essencial é a realização do *ranging*, que visa calcular a distância entre a estação TCR e o satélite. Esse cálculo é essencial nas determinações de órbita e realização de manobras.

Já o segmento de solo consiste nas estações terrenas de tráfego, que podem variar de alguns centímetros, no caso das VSATs, até dezenas de metros, no caso das *gateways*, a depender da frequência de operação. As estações terrenas geralmente estão conectadas com os terminais de usuários por meio de uma rede terrestre ou, no caso das VSATs, conectadas diretamente por meio de um canal de rádio.

No caso do SGDC, as antenas *gateways* de Brasília e do Rio de Janeiro possuem função híbrida, que agrega, na mesma antena, as funções de *gateway* e TCR. Portanto, para essas antenas, os segmentos de controle e usuário estão juntos.

2.4 Origem e Contextualização do SGDC

O projeto do SGDC, instituído pelo decreto número 7.769, de 28 de junho de 2012 [18], foi criado para atender as finalidades de:

- Atender à demanda de comunicações estratégicas do ministério da defesa, na época totalmente dependente de empresas estrangeiras;
- Atender os municípios distantes da rede de transporte de fibra ótica, completando assim a totalidade do território nacional, dentro do Plano Nacional de Banda Larga, PNBL;
- Atender às redes de governo, principalmente as atinentes aos ministérios das comunicações, educação, Serviço Federal de Processamento de Dados, SERPRO, Fundação Nacional de Saúde, FUNASA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais, IBAMA, Fundação Nacional do Índio, FUNAI, bancos e demais órgãos estaduais e municipais.

A Telebras e o Ministério da Defesa são os responsáveis pela gestão e operação do SGDC. Um importante requisito de segurança do satélite é o domínio total do comando e controle do satélite por equipes e entidades brasileiras.

O satélite foi construído, integrado e testado na França pela empresa Thales Alenia Space com acompanhamento técnico da Telebras, Visiona, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, e Ministério da Defesa.

O lançamento do SGDC ocorreu no dia 05 de maio de 2017 no centro espacial da Guiana, localizado na Guiana Francesa. O satélite atende ao uso dual, militar e civil, sendo operado por duas estações de solo para controle, gerenciamento e monitoramento da operação

do satélite e dos serviços embarcados, sendo um Centro de Operações Espaciais Principal, COPE-P, em Brasília, e um Centro de Operações Espaciais Secundário, COPE-S, no Rio de Janeiro.

Até o momento, após mais de 5 anos de operação, o SGDC provê comunicações seguras em todo o território nacional, atingindo os locais mais inóspitos do Brasil com comunicação por dados de alto desempenho, garantindo a soberania e a disponibilidade das comunicações civis e militares em mais de 20.000 pontos, incluindo escolas públicas, postos de fronteira, tribos indígenas, unidades de segurança pública, unidades de saúde, associações comunitárias e etc [19].

2.5 Arquitetura do SGDC

O SGDC é um sistema complexo e conta com diversas estruturas e subsistemas que desempenham funções distintas, porém complementares.

A explicação e contextualização desses subsistemas e suas funções é de grande importância para a compreensão das aplicações, funções e objetivos de cada entidade do sistema. No escopo desta dissertação, a descrição dos sistemas, bem como os resultados obtidos, se dão por meio do uso exclusivo da carga útil civil do satélite utilizando exclusivamente o sinal do *beacon* em banda Ka.

O segmento espacial é composto por um único satélite, no caso o SGDC. O satélite possui um total de 32 *transponders* ativos no enlace direto que se traduzem em 67 canais, que, por sua vez, se ramificam em 67 feixes, representando a cobertura do SGDC demonstrada na Figura 2.2. No enlace reverso, o satélite conta com 8 *transponders* ativos que se traduzem em 5 canais, um para cada *gateway*, que estão localizadas nas cidades de Brasília, Rio de Janeiro, Campo Grande, Florianópolis e Salvador.

O satélite funciona como um repetidor de sinais, ou seja, o sinal que é transmitido pelas *gateways* é recebido pelo satélite após propagar no espaço por aproximadamente 36.000km, o que reduz substancialmente a sua potência devido às atenuações atmosféricas e de espaço livre. Sendo assim, para que o sinal que chega das *gateways* no satélite seja retransmitido, é necessário que esse sinal seja inicialmente amplificado por amplificadores de baixo ruído, LNA, do inglês *Low Noise Amplifier*, a fim de restabelecer a sua relação sinal-ruído que é afetada devido à distância de propagação. Posteriormente, o sinal passa pelos demultiplexadores, DEMUX, do inglês *Demultiplexers*, onde o sinal é dividido em bandas de frequências menores e, posteriormente, tem sua frequência reduzida por meio dos conversores de frequência, DOCON, do inglês *Downconverters*. Em seguida, o sinal é amplificado novamente pelos LCTWTA, do inglês *Linearized Channelizer Travelling Wave Tube Amplifier*, separado utilizando dos demultiplexadores de saída ODMUX, do inglês *Output Demultiplexer* e, por fim, retransmitido para os 67 feixes de cobertura. Além disso, é dentro da carga útil que o sinal do *beacon*, que é o sinal utilizado para a elaboração do estudo abordado neste trabalho,

é gerado e transmitido para a terra.

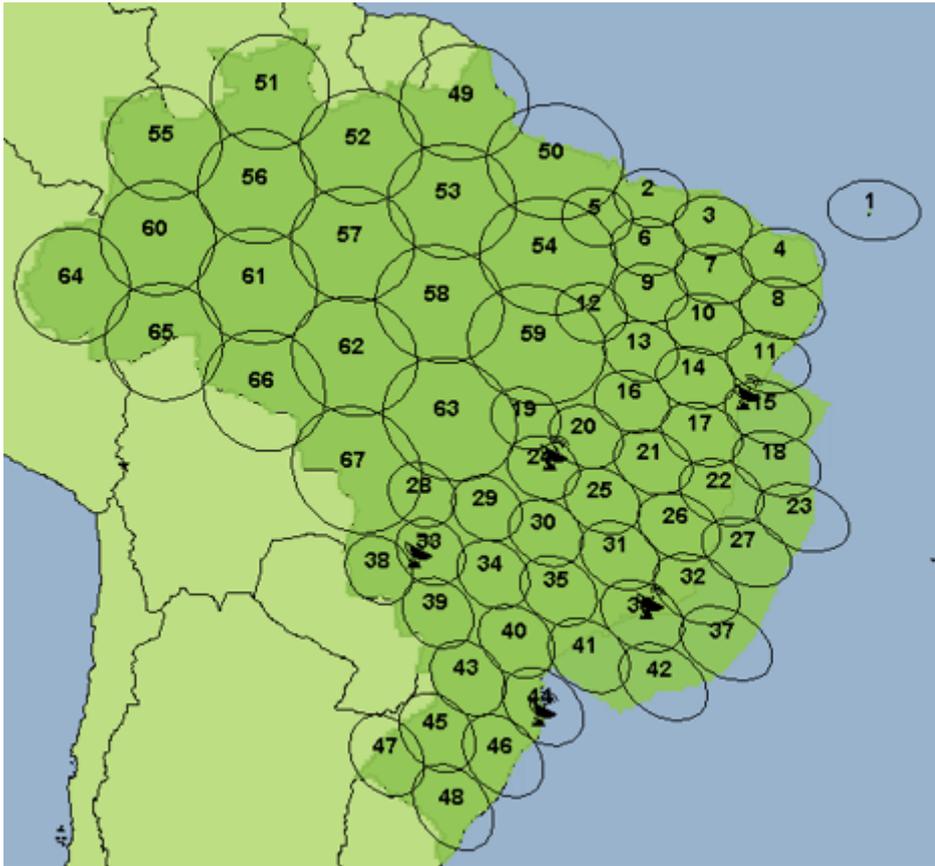


Figura 2.2: Cobertura do SGDC em Banda Ka.

O diagrama de blocos da carga útil em banda Ka do SGDC pode ser sintetizado conforme a Figura 2.3.

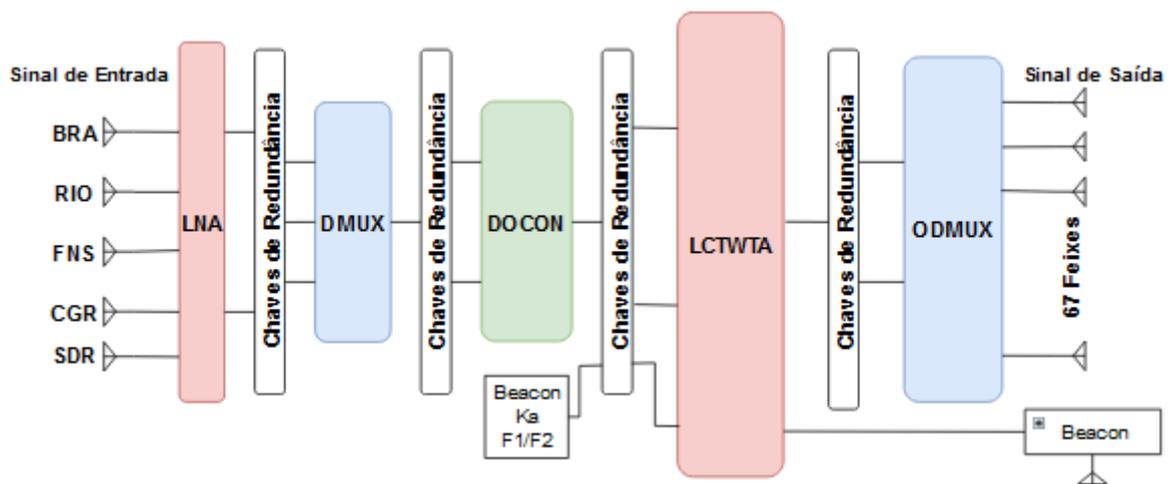


Figura 2.3: Diagrama de Blocos da Carga Útil em Banda Ka.

No caso do SGDC, o segmento de controle, solo e espacial, com seus devidos subsistemas, são sintetizados pela Figura 2.4.

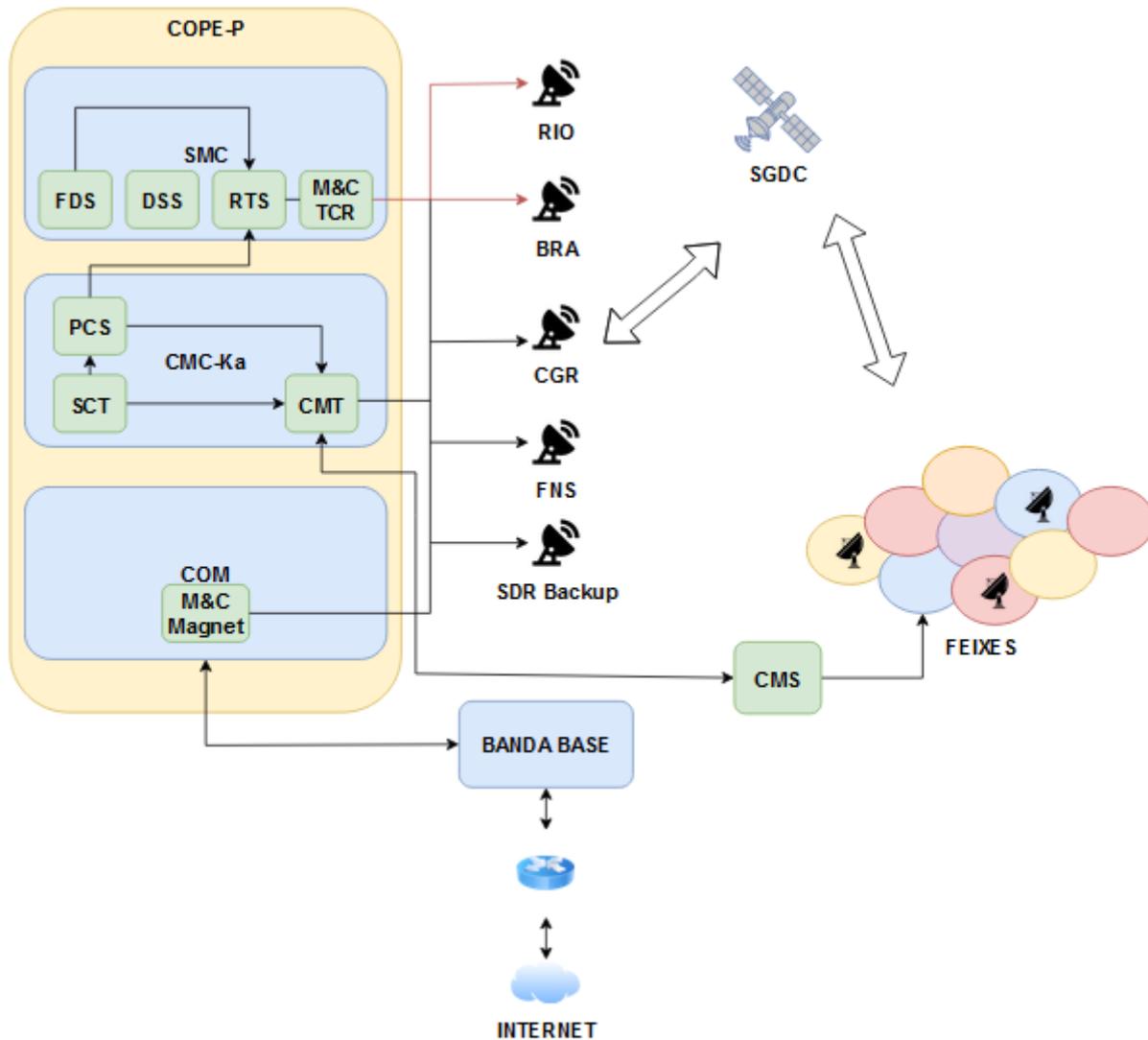


Figura 2.4: Segmentos de Controle, Solo e Espacial do SGDC.

O segmento de controle do SGDC é composto por duas antenas TCR, uma nominal em Brasília e outra redundante no Rio de Janeiro. A função dessas duas antenas no escopo do projeto é receber as telemetrias do satélite e enviar telecomandos para alterar parâmetros, realizar manobras ou procedimentos quando necessário. Além disso, sistemas adjacentes ao de TCR também fazem parte do segmento de controle.

O sistema responsável por processar e interpretar as telemetrias recebidas do satélite e gerar telecomandos, é o sistema de gerenciamento do satélite, SMC, do inglês *Satellite Management System*, que, por sua vez, é composto por outros subsistemas que possuem as seguintes funções:

- Sistema de dinâmica de voo, FDS, do inglês *Flight Dynamics System*, que tem função de, baseado nas telemetrias recebidas pelas estações TCR, estimar o movimento orbital do satélite e gerar procedimentos visando corrigir a trajetória e a órbita do satélite de forma periódica.

- Simulador dinâmico do satélite, DSS, do inglês *Dynamic Satellite Simulator*, tem o objetivo de, por meio de um simulador, com todas as telemetrias alinhadas com as do satélite, testar e validar procedimentos em ambiente simulado, antes de aplicá-los a bordo.
- Sistema de tempo real, RTS, do inglês *Real Time System*, que é o sistema mais importante e sensível do segmento de controle, tem a função de interpretar telemetrias, analisar seu comportamento histórico, analisar possíveis falhas ou quedas de desempenho, propor e executar procedimentos de contingência no satélite, realizar o monitoramento, tanto da carga útil quanto da plataforma, e realizar procedimentos de reconfiguração da carga útil. É por meio do RTS que os dados de potência do *beacon* foram acessados para permitir a elaboração deste trabalho.
- Controle e Monitoramento TCR, M&C TCR, do inglês *Monitoring and Control TCR*, que tem a função de agregar em um único sistema o gerenciamento e o controle de todos os equipamentos que envolvem o subsistema de TCR. Além disso, é possível analisar dados de monitoramento dos equipamentos de solo, GM, do inglês *Ground Monitoring*, com perspectiva histórica e de tempo real, realizar investigações e controlar, por meio do controle de solo, GC, do inglês *Ground Command*, os equipamentos que compõem a antena TCR, tanto em Brasília quanto no Rio de Janeiro.

O sistema de gerenciamento da comunicação, CMC, do inglês *Communication Management Center*, tem a função de monitorar e gerar procedimentos para o RTS realizar reconfigurações na carga útil da banda Ka, realizar o monitoramento de portadoras no enlace direto de subida, utilizando de um sistema de monitoramento de portadoras acoplado à saída dos amplificadores de alta potência, HPA, do inglês *High Power Amplifier*, das *gateways*, realizar o monitoramento das portadoras no enlace direto de descida em parte dos 67 feixes por meio das estações de monitoramento de tráfego e alterar configurações na carga útil do satélite.

- A ferramenta de capacidade do sistema, SCT, do inglês *System Capacity Tool*, tem a função de armazenar a configuração básica da carga útil em banda Ka do satélite. Por meio dessa ferramenta, é possível configurar a ativação ou desativação de *transponders*, alterar o ganho de equipamentos, gerar o plano de definição da carga útil, PDP, do inglês *Payload Definition Plan*, e o plano de monitoramento, MOP, do inglês *Monitoring Plan*, que serão os parâmetros e limites a serem monitorados pelas estações de monitoramento que utilizam o sistema de monitoramento de portadores, CMS, do inglês *Carrier Monitoring System*.
- O sistema de controle da carga útil, PCS, do inglês *Payload Control System*, tem o objetivo de realizar a interface entre o SCT e o RTS. O PCS recebe do RTS dados de telemetria filtrados apenas para os equipamentos da carga útil em banda Ka. Dessa forma, é possível monitorar apenas os equipamentos que compõem a carga útil do satélite. Além disso, o PDP, gerado pelo SCT, é interpretado e compilado pelo PCS,

gerando para o RTS o relatório de configuração, RR, do inglês *Reconfiguration Report*, que são as alterações que deverão ser aplicadas na carga útil a fim de buscar um novo dimensionamento dos recursos de radiofrequência do satélite. Essas alterações, sumarizadas pelo RR, são traduzidas no RTS em telecomandos que são enviados para o satélite por meio da TCR.

- A ferramenta de monitoramento da comunicação, CMT, do inglês *Communication Monitoring Tool*, tem a função de agregar o monitoramento e controle de todas as dezessete estações CMS. As estações CMS se dividem em duas categorias. A primeira categoria trata das cinco estações que se encontram junto às *gateways*. Essas estações possuem a capacidade de realizar o monitoramento das portadoras que estão sendo transmitidas pela *gateway* e, além disso, conseguem monitorar as portadoras de descida do feixe em que a *gateway* se encontra e de feixes adjacentes devido ao alto ganho das antenas *gateway*. A segunda categoria trata das demais treze CMS que são estações bem menores e menos complexas que as *gateways* e que possuem a função de apenas monitorar as portadoras de descida em alguns dos 67 feixes que formam a cobertura do SGDC. Essas estações foram posicionadas em regiões estratégicas de forma a permitir o maior monitoramento possível das portadoras que estão sendo retransmitidas do satélite para a terra e de modo a monitorar portadoras que sejam transmitidas por todos os amplificadores, TWTAs, do inglês *Traveling Wave Tube Amplifier*, do satélite.

O segmento de solo é composto pelo sistema de comunicações, COM, do inglês *Communications*, que integra a parte de comunicação de todas as antenas do projeto SGDC. O sistema de COM é composto por um único subsistema de monitoramento e controle chamado de *Magnet*. Esse sistema tem a função de agregar todo o gerenciamento das cinco *gateways* do projeto SGDC, lembrando que as antenas de Brasília e Rio de Janeiro são antenas que possuem a função de COM e TCR, portanto são pertencentes aos segmentos de controle e solo simultaneamente. O sistema de COM faz a interface entre a banda base e o satélite, sendo um dos sistemas mais sensíveis e importantes quando se trata de disponibilidade e monetização do satélite. Além disso, de forma semelhante ao subsistema de TCR, o sistema de COM faz o controle e o monitoramento remoto e em tempo real de todos os equipamentos pertencentes a cada uma das cinco *gateways*, garantindo as boas práticas de operação e a integridade do sistema.

As VSATs, que são os terminais de usuário que trabalham em conjunto com a banda base, também fazem parte do escopo do segmento solo, porém, no SGDC, por questões estratégicas e contratuais, a operação e manutenção do sistema de banda base e das VSATs é realizada em parceria com a empresa americana Viasat.

2.6 Conclusão

Neste capítulo foram abordados conceitos gerais dos sistemas de comunicação via satélite, contexto histórico, órbitas, aplicações e coberturas. Posteriormente, foram apresentados a arquitetura da carga útil do SGDC, sua cobertura específica, seus segmentos de solo, espacial e de controle, bem como a apresentação dos sistemas e subsistemas utilizados na operação do satélite. A apresentação de tais arquiteturas são importantes e embasam o leitor a ter uma melhor compreensão do Capítulo 3, onde a cadeia de rastreamento da antena *gateway* de Brasília e o detalhamento da obtenção e tratamento dos dados de potência recebida do *beacon* são explanados.

Capítulo 3

Cadeia de Rastreio da Antena de Brasília, Obtenção e Tratamento dos Dados

A constante busca pelo aprimoramento de modelos estatísticos baseados em medições e experimentos que representam com maior precisão os efeitos degradantes naturais nas comunicações por rádio frequência, tem impulsionado pesquisas e modelagens a fim de criar modelos com maior precisão.

Nesse contexto, busca-se neste Capítulo, apresentar a cadeia de rastreio da antena de Brasília, como os dados foram obtidos, armazenados e processados.

3.1 Sistemas Utilizados na Obtenção e Processamento do Sinal do Beacon

Os dados de potência de recepção do *beacon* são obtidos e processados pela cadeia de rastreio da antena de Brasília, por amplificadores de baixo ruído, conversores de frequência, receptor de rastreio, TRK, do inglês *Tracking Receiver*, servidores e aplicações, que serão detalhados neste capítulo.

Existem três diferentes métodos para estudar efeitos de propagação em ondas de rádio, como: detecção e distanciometria por rádio, RADAR, radiômetro e o sinal do *beacon*. O método de análise do sinal do *beacon* do satélite é um dos mais importantes, confiáveis e baratos se comparado aos demais métodos [20]. Por tais motivos, a análise do sinal do *beacon* foi o método utilizado nas análises que contemplam este estudo. O *beacon* é um sinal de referência sem modulação com frequência e potência fixas e que é transmitido normalmente por satélites.

Normalmente, há um *transponder* dedicado no satélite para a transmissão desse sinal. Geralmente, o sinal do *beacon* é gerado por um oscilador de cristal com baixa intermodulação e ruído de fase. Isso significa que a maior parte da energia estará concentrada em uma

largura de banda muito pequena e em uma frequência central. No caso do SGDC, o sinal de *beacon* é gerado no satélite com uma frequência de 19600 MHz e com uma potência fixa de transmissão de 24 dBm.

3.2 Definição do Sinal de *Beacon* e Funções da Cadeia de Rastreo

Por ser um sinal de radiofrequência, o tratamento e o processamento do sinal de *beacon* se dá de forma muito semelhante aos demais sinais de comunicação via satélite. Entretanto, por ser um sinal de extrema importância para diversos subsistemas do segmento espacial, de controle e de comunicação, o sinal do *beacon* possui, em cada uma das cinco antenas de solo do SGDC, uma cadeia de rastreo dedicada apenas para recebê-lo e processá-lo.

A cadeia de rastreo do SGDC possui basicamente duas funções. A primeira é obter medições em tempo real do sinal do beacon para fornecer essa informação aos demais sistemas, como é o caso dos controladores dos blocos conversores de subida, BUC, do inglês *Block Up Converter*, responsáveis por amplificar e converter, de banda L para banda Ka, os sinais de radiofrequência provenientes da banda base. De posse do sinal de recepção do *beacon*, os BUCs podem, dinamicamente, controlar sua atenuação interna, para compensar atenuações causadas por atenuações atmosféricas. A segunda função é fornecer os sinais de soma e erro aos equipamentos da cadeia de rastreo para que o sistema de rastreo possa funcionar de forma eficaz. No escopo deste trabalho, o sinal processado de soma e erro recebido pelo TRK, foi utilizado para estudar os efeitos de atenuação durante o ano de 2021.

3.3 Diagrama de Blocos da Cadeia de Rastreo e Seu Funcionamento

O esquemático da cadeia de rastreo da antena de Brasília está evidenciado na Figura 3.1. O sinal de recepção do *beacon*, transmitido pelo satélite, é tratado por duas cadeias distintas, uma proveniente da cadeia de COM, ou seja, utilizada para as aplicações de comunicações comerciais do satélite, e a outra oriunda da cadeia de rastreo, utilizada para fornecer informações de atenuação do sinal do *beacon* ao receptor de rastreo.

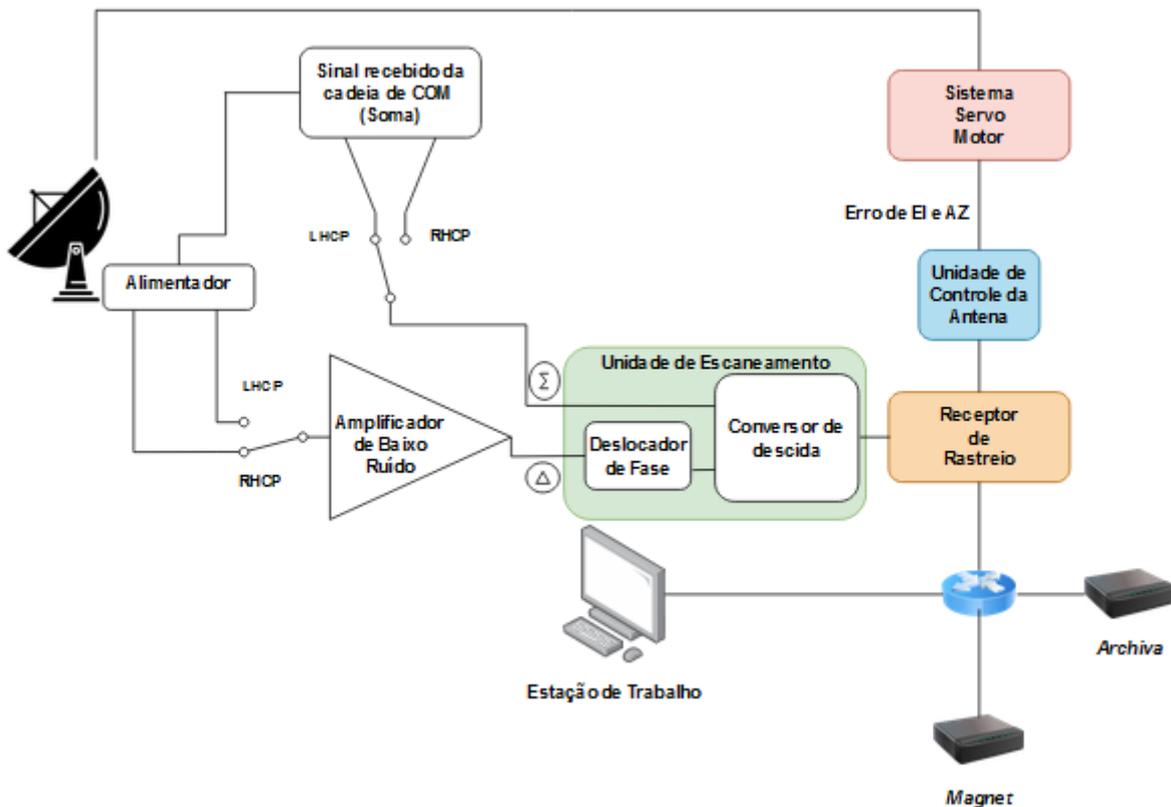


Figura 3.1: Cadeia de Rastreamento da Antena de Brasília.

Tanto os sinais provenientes da cadeia de COM, quanto os sinais provenientes da cadeia de rastreamento, são recebidos em duas polarizações concomitantemente. São elas, a polarização circular da mão direita, RHCP, do inglês *Right Hand Circular Polarization*, e a polarização circular da mão esquerda, LHCP, do inglês *Left Hand Circular Polarization*. Em ambas cadeias, é possível selecionar de qual polarização o sinal do *beacon* será extraído. Isso garante maior confiabilidade e disponibilidade no caso de alguma falha em uma das polarizações, seja na transmissão do *beacon* pelo satélite, seja nas cadeias de recepção de COM ou rastreamento.

O sinal do *beacon* recebido pela cadeia de COM, chamado de “soma”, é inserido na cadeia de rastreamento diretamente na unidade de escaneamento no bloco conversor de descida, BDC, do inglês *Block Down Converter*, responsável por transladar a frequência do sinal de *beacon* de 19600 MHz (Banda Ka) para 1350 MHz (Banda L). Já o sinal do *beacon* da cadeia de rastreamento, chamado de “erro”, é inserido diretamente no LNA de rastreamento e, posteriormente, colocado na unidade de escaneamento, onde o sinal é deslocado em fase, para que o modo monopulso de apontamento da antena funcione corretamente. Após essa etapa, ainda na unidade de escaneamento, o sinal oriundo da cadeia de rastreamento também é convertido em frequência pelo BDC para 1350 MHz.

Com ambas amostras do sinal de *beacon* na saída do BDC, os sinais de soma e erro são entregues ao receptor de rastreamento, onde informações de potência recebida do *beacon* e erro

de fase são processadas. Após isso, esses dados são transmitidos do receptor de rastreamento para os servidores e para a unidade de controle da antena. As informações de potência recebida são processadas e armazenadas por até seis meses no servidor *Magnet*, que é o nome da aplicação comercial utilizada para monitorar e controlar os equipamentos da antena. O servidor *Magnet* se conecta, por intermédio de um roteador, ao servidor *Archiva*, onde os dados de períodos anteriores a seis meses ficam armazenadas, e a uma estação de trabalho, por meio da qual os servidores são acessados. Já os erros de fase, que também são processados pelo receptor de rastreamento, são armazenados nos servidores e traduzidos em correções dos ângulos de azimute e elevação. Essas correções são aplicadas pela unidade de controle da antena, ACU, do inglês *Antenna Control Unit*, nos servos motores da antena que buscam, dinamicamente, em modo nominal, os ângulos de azimute e elevação da antena cuja potência de recepção do sinal de *beacon* seja a maior possível, traduzindo-se em um apontamento ótimo chamado de monopulso.

O monopulso, também conhecido como comparação simultânea de lóbulos, é um método de determinação da localização angular de uma fonte de radiação, como é o caso do sinal de *beacon* [21].

As medidas da potência recebida do *beacon* realizadas em Brasília, foram feitas com a antena apontada em modo monopulso, recebendo a maior potência possível do *beacon*, ou seja, quando o valor de referência em *clear sky* for atenuado, é porque há uma condição adversa de propagação e não apontamento equivocado da antena.

3.4 Conclusão

Neste capítulo a cadeia de rastreamento, seus equipamentos e funcionamento foram explicados e detalhados. Também foi explicado como os dados de correção dos ângulos de apontamento da antena são processados pelo receptor de rastreamento, interpretados pela ACU e traduzidos em movimento no sistema servo motor da antena. Além disso, elucidou-se como os dados de potência recebida do *beacon* são interpretados pelo receptor de rastreamento, armazenados nos servidores e acessados.

Capítulo 4

Conceitos e Tratamento de Dados de Precipitação

Neste capítulo são apresentados dados históricos sobre o volume de chuva mensal entre os anos de 2010 e 2021. Além disso, é explanada a metodologia utilizada para se obter o valor de *clear sky*. A partir desse valor, são geradas tabelas de tempos de atenuação excedidos, por faixa de atenuação. Essa tabela, obtida através das medidas de potência recebida do sinal do *beacon* durante o ano de 2021, irá embasar os modelos desenvolvidos e propostos no Capítulo 5.

Por fim, são correlacionadas algumas faixas de atenuação estudadas com as estações do ano e períodos que apresentam maiores e menores volumes de chuva na região Centro-Oeste.

4.1 Comparação do Volume de Chuva Mensal no Ano de 2021 com a Média entre os Anos de 2010 a 2020

Antes de analisar o comportamento das chuvas no ano de 2021 e nos dez anos anteriores, é importante contextualizar o tipo de clima em que a cidade de Brasília está inserida e suas principais características. O clima predominante no cerrado brasileiro é o tropical sazonal, de inverno seco. A temperatura média anual fica em torno de 23°C, sendo que as médias mensais apresentam pequena estacionalidade. Em geral, a precipitação média anual fica entre 1200 e 1800 mm. Ao contrário da temperatura, a precipitação média mensal apresenta uma grande estacionalidade, concentrando-se nos meses de primavera e verão (outubro a março), que é a estação chuvosa. Curtos períodos de seca, chamados de veranicos, podem ocorrer em meio a esta estação.

No período de maio a setembro os índices pluviométricos mensais reduzem-se bastante, podendo chegar à zero, resultando em uma estação seca com duração de três a cinco meses. No início deste período a ocorrência de nevoeiros é comum nas primeiras horas das manhãs,

formando-se grandes quantidades de orvalho sobre as plantas e umedecendo o solo. Já no período da tarde os índices de umidade relativa do ar caem bastante, podendo baixar a valores próximos a 15%, principalmente nos meses de julho e agosto [22] [23].

De posse das características climáticas do Cerrado, bioma no qual a cidade de Brasília está inserida, para verificar a aplicabilidade do estudo proposto nesta dissertação, faz-se necessário avaliar, se o ano de 2021, ano do qual os dados de potência recebida do *beacon* da antena de Brasília foram utilizados, foi um ano cuja distribuição mensal do volume de chuva foi representativa. Para poder embasar essa decisão, obteve-se junto ao Instituto Nacional de Meteorologia, INMET, as estatísticas mensais dos volumes de chuva entre os anos de 2010 e 2020 para estação meteorológica com dados disponíveis mais próxima do COPE-P [11].

A partir desses dados, calcula-se a média de chuva mensal no intervalo dos dez anos considerados e foi possível verificar que a distribuição do volume de chuva de 2021 foi bem próxima da média calculada, demonstrando que o estudo realizado neste trabalho para o ano de 2021 é estatisticamente representativo. Na Figura 4.1, observa-se que, com exceção dos meses de janeiro e fevereiro, os meses de março, abril e maio tiveram em 2021 um volume de chuva menor que a média dos últimos dez anos. Os meses de junho, julho e agosto, apresentam volumes muito baixos e impactam muito pouco na análise pluviométrica realizada. Setembro de 2021 foi um mês que choveu metade da média histórica dos dez anos considerados. Já os meses de outubro, novembro e dezembro tiveram, em 2021, um volume maior que a média considerada. No volume anual, o ano de 2021 teve um volume pluviométrico de 1774 mm de chuva enquanto a média anual entre 2010 e 2020 apresentou um volume pluviométrico de 1424 mm.

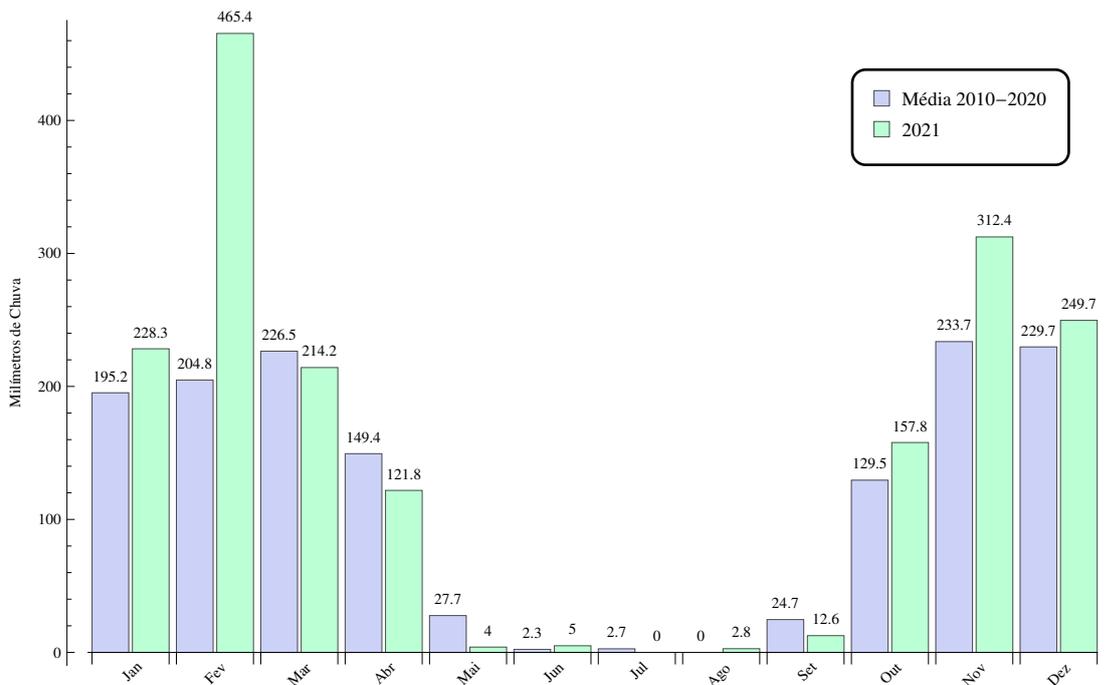


Figura 4.1: Comparativo do Volume de Chuva Mensal de 2021 com a Média Mensal dos Dez Anos Anteriores.

Analisando a Figura 4.1, vale ressaltar que o mês de fevereiro de 2021 foi o mais chuvoso desde o início das medições na capital federal, que ocorreu em 1962 [24] e o mês de novembro de 2021 também teve chuvas acima da média dos anos anteriores [25].

4.2 Definição do Valor de *Clear Sky* do *Beacon*

Um importante passo a ser considerado na análise dos efeitos atmosféricos nas comunicações via satélite é a definição do valor de *clear sky* do sinal do *beacon*, ou seja, o valor no qual a potência do *beacon* recebida pelas cadeias de rastreamento e COM, é máxima.

Existem basicamente dois métodos de se determinar o nível de *clear sky* do *beacon*. O primeiro consiste em analisar, durante algumas semanas, o nível médio de potência recebida nas cadeias de recepção e, baseado nessa observação empírica, determinar o nível médio do sinal de *beacon* em *clear sky*. Esse método é geralmente utilizado no momento da implantação da antena *gateway*, no início da operação, quando dados estatísticos de longo prazo ainda não estão disponíveis para determinação do valor de referência *clear sky*. O segundo consiste em analisar a potência recebida do sinal do *beacon* por mais tempo e propor um valor de *clear sky* mais representativo, uma vez que um período maior é considerado, assim como o número de amostras.

A possibilidade de transmitir dados a uma determinada taxa de transmissão também depende do nível de potência da onda eletromagnética recebida pelo terminal do usuário. Um nível de energia insuficiente, resultará em perda de dados. As perdas de potência entre o

satélite e os terminais terrestres são causadas principalmente pela diluição da onda no espaço durante sua propagação e por alguns fenômenos atmosféricos. Em particular, os gases atmosféricos e, mais importante, a presença de hidrometeoros atenua as ondas eletromagnéticas. As teorias de espalhamento de Rayleigh ou Mie nos dizem que o nível de atenuação depende da razão entre o diâmetro do hidrometeoro e o comprimento de onda [26] [27]. O nível de atenuação pode atingir várias dezenas de decibéis no caso de precipitação líquida. Além disso, para um determinado estado atmosférico a atenuação tende a aumentar significativamente com a frequência. A ocorrência de perdas de propagação superiores a um determinado limite, atrelada à forma como a informação é modulada, resulta em perda de dados e consequente degradação ou indisponibilidade do enlace, resultado em perdas econômicas.

A atenuação devido à chuva em um enlace espaço-terra pode ser caracterizada pela medição na terra das flutuações de potência dos sinais de *beacon* emitidos por satélites em relação ao nível de *clear sky* definido. Como o sinal transmitido pelo satélite tem potência constante, as flutuações da potência recebida estão ligadas às flutuações do desvanecimento troposférico sofrido pelo sinal durante sua propagação.

Além disso, as escalas temporais de variação das atenuações de vapor de água, oxigênio, nuvens e chuva diferem significativamente, o que nos permite discriminar os vários contribuintes para a atenuação troposférica. Em particular, a atenuação da chuva domina amplamente a atenuação total e pode ser facilmente deduzida da flutuação do *beacon* [28]. Outra possibilidade é isolar a atenuação devido à chuva dos demais componentes usando medições radiométricas simultâneas, que podem ser usadas para quantificar nuvens e atenuação gasosa.

Para determinar o nível de *clear sky* utilizado neste trabalho, utilizou-se o segundo método. Por meio do sistema descrito na Figura 3.1, utilizando o terminal do usuário, acessou-se o servidor do Archiva para obter a GMs referentes ao nível de potência recebida do *beacon* durante todo o ano de 2021. O tempo entre as amostras é de aproximadamente 1 segundo e, a partir dessas informações, foi gerada a Função Distribuição Acumulada, FDA, com os valores de potência recebida do *beacon* durante o ano de 2021.

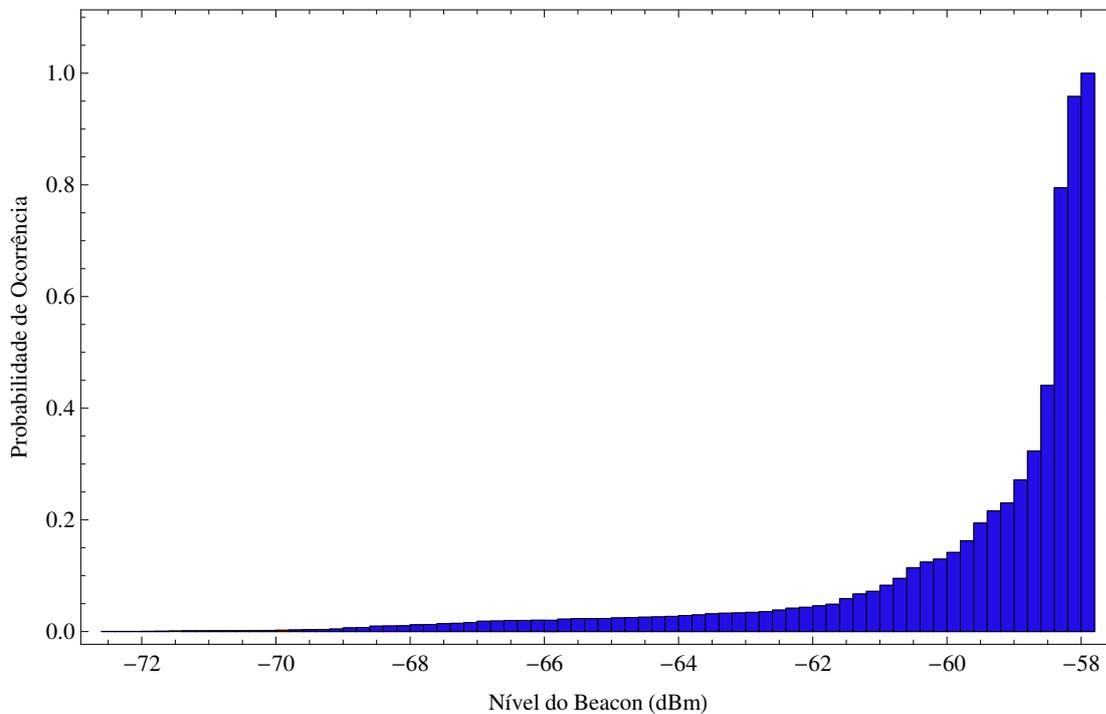


Figura 4.2: Função Densidade Acumulada da Potência Recebida do *Beacon* no Ano de 2021.

Com base na análise das informações representadas pelas Figura 4.2, definiu-se o valor de *clear sky* a ser considerado neste estudo como sendo de $-57,7$ dBm, uma vez que este foi o valor com maior número de ocorrências durante o ano de 2021.

Em posse da potência de transmissão do beacon realizada pelo satélite, do valor de referência *clear sky* e do valor de potência medida na recepção da *gateway*, é possível realizar a comparação dos níveis de sinal e determinar a atenuação experimentada pelo mesmo ao longo do caminho de propagação [29].

4.3 Limite, Duração e Evento de Atenuação

O limite de atenuação e a duração da atenuação são dois conceitos importantes que auxiliam a compreensão do estudo desenvolvido.

O limite de atenuação é o valor de potência abaixo do qual será considerado que o sinal está atenuado. Neste trabalho, o limite de atenuação considerado é o valor de *clear sky* definido na sessão anterior, de $-57,7$ dBm.

A UIT define a duração da atenuação como sendo o intervalo de tempo em que o sinal de recepção está abaixo do limite de atenuação [30].

Após o limite de atenuação, foram definidas faixas de atenuação a cada um dB para que seja possível quantificar o tempo, por faixa de atenuação, em cada evento de chuva de 2021, em que o sinal ficou atenuado.

Um evento de atenuação é definido como sendo o número de vezes em que o sinal do *beacon* rompeu o limite de atenuação em um certo patamar e se recuperou. Para cada violação, para um determinado nível de atenuação, é computado um evento, independentemente de sua duração. Geralmente, eventos de mesma magnitude são separados por intervalos longos de horas ou dias [31].

A Figura 4.3 exemplifica o comportamento da recepção do sinal do *beacon*, na presença de chuva, ao longo do tempo.

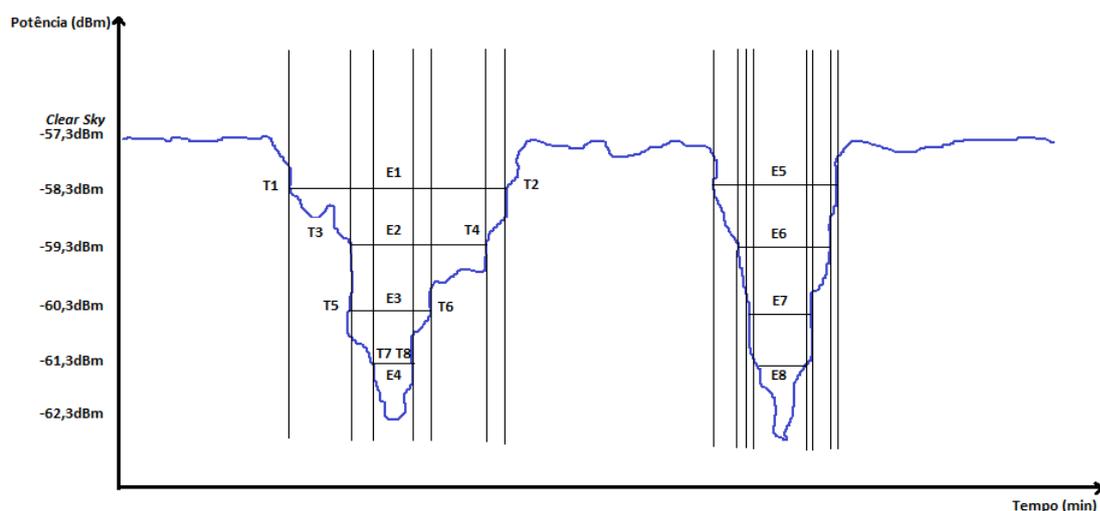


Figura 4.3: Variação do *Beacon*, Tempo e Evento de Atenuação.

A Figura 4.3 facilita o entendimento dos conceitos de limite, duração e evento de atenuação. Por exemplo, no início da análise, o sinal de potência recebida do sinal de beacon encontra-se no nível de -57,3 dBm, portanto nenhuma atenuação está presente no momento. Devido a um evento de chuva, em T1 o sinal passa a ser recebido com -58,3 dBm, ou seja, com 1 dB de atenuação em relação ao nível de clear sky. Nesse momento, inicia-se o contador de tempo para a atenuação de 1 dB. Após isso, a intensidade do sinal continua caindo até atingir, em T3, o nível de -59,3 dBm, ou seja, 2 dB de atenuação, quando o contador de tempo para atenuação de 2 dB é iniciado. Posteriormente, o sinal continua a ter sua potência reduzida e atinge a potência de -60,3 dBm, isto é, 3 dB de atenuação em relação ao *clear sky*. Em T5 o contador de tempo é iniciado para a atenuação de 3dB. Por último, com a intensificação da chuva, em T7 o sinal atinge -61,3 dBm, ou seja, com 4 dB de atenuação em relação ao nível de clear sky, quando o contador para esse patamar de atenuação é acionado. Esse primeiro evento descrito, exemplifica o início e a intensificação da chuva, como cada limiar de atenuação do sinal do *beacon* é atingido e em que momento os contadores de tempo são acionados.

Após isso, com melhora das condições climáticas, tem-se nos instantes T8, T6, T4 e T2 a desativação dos contadores de tempo para as atenuações de 4, 3, 2 e 1 dB, respectivamente, à medida que o sinal do *beacon* retorna gradativamente para o nível de *clear sky*. Além disso, tem-se os registros dos eventos de chuva, representados por E1, E2, E3, E4, para cada

faixa de atenuação de 1 a 4 dB, respectivamente. Ainda na Figura 4.3, há o exemplo de um segundo cenário de chuva representado, para efeitos de melhor compreensão, apenas em termos de eventos de chuva. Nesse segundo cenário considerado no exemplo, a atenuação devido a efeitos climáticos também atinge, em instantes de tempo diferentes, as atenuações de 1 a 4 dB em relação ao nível de referência. Portanto, assim como no exemplo do primeiro cenário de chuva, os contadores para cada nível de atenuação são ativados e, posteriormente, desativados quando o nível do sinal de *beacon* recebido retorna gradativamente ao nível de *clear sky* e novos eventos, representados por E5, E6, E7 e E8, para cada nível de atenuação, são gerados. Para cada atenuação causada no sinal de *beacon* que o degrade abaixo do nível de referência, o processo aqui exemplificado ocorre e os intervalos de tempo para cada nível de atenuação, bem como os eventos gerados, são armazenados.

O processo descrito acima foi utilizado neste trabalho para medir o comportamento da atenuação do beacon recebido pela antena *gateway* de Brasília durante o ano de 2021.

4.4 Apresentação da Potência de *Beacon* Medida e Análises

Com os mesmos dados de potência de recepção do *beacon* retirados do servidor *Archiva* para realizar a definição do nível de *clear sky*, apresentou-se, por meio da Tabela 4.1, as informações de limiares de atenuação, tempos excedidos de atenuação, número de eventos e porcentagem de tempo anual em que o sinal do *beacon* experimentou determinada atenuação.

Tabela 4.1: Duração, Número de Eventos e Porcentagem de Tempo Excedidos por Faixa de Atenuação.

Atenuação	30 s	60 s	120 s	300 s	1200 s	3600 s
1 dB	7114970	6795408	6478730	5953099	4580602	3106758
Eventos	18301	10076	6165	3344	1041	288
% Tempo	22,56%	21,55%	20,54%	18,88%	14,52%	9,85%
2 dB	2646620	2595336	2508664	2292176	1416502	590826
Eventos	1165	851	610	391	158	54
% Tempo	8,39%	8,23%	7,95%	7,27%	4,49%	1,87%
3 dB	1852899	1814089	1747573	1571753	835896	214940
Eventos	660	480	362	251	95	24
% Tempo	5,88%	5,75%	5,54%	4,98%	2,65%	0,68%
4 dB	1434976	1403270	1346308	1192167	561849	85530
Eventos	450	346	267	189	72	8
% Tempo	4,55%	4,45%	4,27%	3,78%	1,78%	0,27%
5 dB	1163436	1135991	1085610	945502	387504	41249
Eventos	352	273	223	158	47	3
% Tempo	3,69%	3,60%	3,44%	3,00%	1,23%	0,13%

Atenuação	30 s	60 s	120 s	300 s	1200 s	3600 s
6 dB	972767	948489	902263	775388	288123	24203
Eventos	300	250	195	119	33	1
% Tempo	3,08%	3,01%	2,86%	2,46%	0,91%	0,08%
7 dB	829896	807703	766246	654192	221159	15803
Eventos	248	194	153	101	22	1
% Tempo	2,63%	2,56%	2,43%	2,07%	0,70%	0,05%
8 dB	718316	698289	660366	557951	175310	7409
Eventos	226	179	138	85	18	1
% Tempo	2,28%	2,21%	2,09%	1,77%	0,56%	0,02%
9 dB	626397	608316	573790	482511	139739	0
Eventos	200	162	122	69	15	0
% Tempo	1,99%	1,93%	1,82%	1,53%	0,44%	0,00%
10 dB	550257	533689	502583	421704	111673	0
Eventos	183	142	110	66	11	0
% Tempo	1,74%	1,69%	1,59%	1,34%	0,35%	0,00%
11 dB	485441	470555	442185	369645	92114	0
Eventos	147	113	89	61	11	0
% Tempo	1,54%	1,49%	1,40%	1,17%	0,29%	0,00%
12 dB	431232	417671	391233	323872	74898	0
Eventos	131	104	80	54	9	0
% Tempo	1,37%	1,32%	1,24%	1,03%	0,24%	0,00%
13 dB	382794	370274	345920	283577	61189	0
Eventos	132	101	72	50	8	0
% Tempo	1,21%	1,17%	1,10%	0,90%	0,19%	0,00%
14 dB	339266	327930	305997	248254	49649	0
Eventos	118	95	68	45	6	0
% Tempo	1,08%	1,04%	0,97%	0,79%	0,16%	0,00%
15 dB	300626	290210	270519	217987	40991	0
Eventos	98	83	66	39	6	0
% Tempo	0,95%	0,92%	0,86%	0,69%	0,13%	0,00%
16 dB	266166	256361	238037	191182	32525	0
Eventos	95	78	62	37	5	0
% Tempo	0,84%	0,81%	0,75%	0,61%	0,10%	0,00%
17 dB	234804	225652	208632	166717	25479	0
Eventos	95	75	58	30	4	0
% Tempo	0,74%	0,72%	0,66%	0,53%	0,08%	0,00%
18 dB	206472	198110	182529	146110	19764	0
Eventos	87	70	48	27	2	0
% Tempo	0,65%	0,63%	0,58%	0,46%	0,06%	0,00%
19 dB	181361	173696	159946	127688	16664	0

Atenuação	30 s	60 s	120 s	300 s	1200 s	3600 s
Eventos	84	67	44	23	1	0
% Tempo	0,58%	0,55%	0,51%	0,40%	0,05%	0,00%
20 dB	159171	152171	140406	112044	15135	0
Eventos	82	55	40	21	1	0
% Tempo	0,50%	0,48%	0,45%	0,36%	0,05%	0,00%
21 dB	139325	133419	122992	97948	13625	0
Eventos	65	52	36	21	1	0
% Tempo	0,44%	0,42%	0,39%	0,31%	0,04%	0,00%
22 dB	121482	116050	107053	84760	12127	0
Eventos	59	46	34	18	1	0
% Tempo	0,39%	0,37%	0,34%	0,27%	0,04%	0,00%
23 dB	105437	100566	92661	73462	10635	0
Eventos	55	41	29	18	1	0
% Tempo	0,33%	0,32%	0,29%	0,23%	0,03%	0,00%
24 dB	90941	86678	79787	62703	9155	0
Eventos	53	40	28	17	1	0
% Tempo	0,29%	0,27%	0,25%	0,20%	0,03%	0,00%
25 dB	77803	74083	68139	53127	7699	0
Eventos	50	36	26	15	1	0
% Tempo	0,25%	0,23%	0,22%	0,17%	0,02%	0,00%
26 dB	65877	62736	57595	44589	6255	0
Eventos	44	33	25	14	1	0
% Tempo	0,21%	0,20%	0,18%	0,14%	0,02%	0,00%
27 dB	55078	52384	47897	36915	4962	0
Eventos	42	31	23	12	1	0
% Tempo	0,17%	0,17%	0,15%	0,12%	0,02%	0,00%
28 dB	44952	42771	38967	30068	3693	0
Eventos	40	29	22	11	1	0
% Tempo	0,14%	0,14%	0,12%	0,10%	0,01%	0,00%
29 dB	35641	33924	30718	23909	2454	0
Eventos	38	26	18	11	1	0
% Tempo	0,11%	0,11%	0,10%	0,08%	0,01%	0,00%
30 dB	27066	25807	23298	17885	1221	0
Eventos	33	23	15	10	1	0
% Tempo	0,09%	0,08%	0,07%	0,06%	0,00%	0,00%

A Tabela 4.1 objetiva analisar de forma excedida os tempos de atenuação e deve ser

interpretada da seguinte forma: para uma atenuação do *beacon* de 5 dB e um tempo excedido (maior ou igual) a 120 segundos, houve durante o ano de 2021:

- 1.085.610 é o somatório de tempo em segundos, maior ou igual a 120 segundos, em que a atenuação do sinal ficou maior ou igual a 5 dB;
- 223 eventos de chuva que geraram uma atenuação no sinal maior ou igual a 5 dB e que duraram 120 ou mais segundos;
- 3,44% é a porcentagem de tempo que os 1.085.610 segundos representam no tempo de 1 ano.

De forma geral, analisando a Tabela 4.1, que leva em conta o comportamento da potência recebida do *beacon* no ano de 2021, observa-se que, para níveis de atenuação mais baixos, há um número maior de eventos associados e uma duração de tempo maior para o menor tempo excedido analisado, que é de 30 segundos. A medida que o nível de atenuação aumenta, constata-se uma tendência de redução na quantidade de eventos, bem como nas durações dos tempos de atenuação e, conseqüentemente, a porcentagem de tempo anual em que a atenuação ocorre, também apresenta comportamento decrescente. O mesmo vale para quando se analisa o tempo excedido, ou seja, para tempos excedidos menores, tem-se tempos de atenuação maiores e, à medida que o tempo excedido analisado aumenta, os tempos acumulados de atenuação tendem a reduzir.

Além disso, pode-se inferir da Tabela 4.1 que patamares de atenuações de menores magnitudes ocorrem com uma frequência muito maior que níveis de atenuações mais significantes, e tendem a durar maiores intervalos de tempo. Já as atenuações de maiores magnitudes, que possuem maior impacto no desempenho dos sistemas, ocorrem em menor quantidade e têm um tempo de atenuação menor se comparado a níveis de atenuação mais baixos.

4.5 Análise da Distribuição Anual de Eventos e Porcentagens de Tempos Mensais de Atenuação

Com a utilização da mesma base de dados utilizada para a confecção da Tabela 4.1, para níveis de atenuação de 3, 5, 10, 15 e 20 dB, obtém-se a Figura 4.4 objetivando demonstrar a distribuição anual de eventos para as faixas de atenuação citadas anteriormente.

Ao analisar a Figura 4.4, pode-se observar que durante o verão, período que se estende entre os dias 21 de dezembro e 20 de março, onde há uma grande incidência de chuva na região Centro-Oeste, o número de eventos tende a ser consideravelmente alto, principalmente para as atenuações que vão até 5 dB. Para as atenuações de 10, 15 e 20 dB, o número de eventos de atenuação tende a ser, respectivamente, em torno de 4, 8 e 9 vezes menor que o número de eventos registrados para o menor nível de atenuação considerado nesta análise.

Durante o inverno, que se inicia em 21 de junho e termina em 22 de setembro, o número de eventos de chuva é muito baixo para todos os níveis de atenuação analisados, exceto para o mês de junho de 2021, quando ocorreram em torno de 25 eventos de chuva de baixa magnitude, com atenuação próxima de 3dB. Para os demais níveis de atenuação considerados, não houve eventos relevantes durante o inverno.

Para as estações do outono, que ocorre entre os dias 20 de março e 21 de junho, e primavera, que se inicia em 22 de setembro e termina em 21 de dezembro, que são estações intermediárias, observam-se comportamentos distintos. Considerando o outono, a partir do mês de março, observa-se a diminuição gradativa dos eventos de atenuação para todas as faixas consideradas, indicando a entrada no período de seca na região Centro-Oeste. Por outro lado, analisando a estação da primavera, a partir do mês de setembro, é possível observar um aumento vertiginoso do número de eventos de atenuação registrados para todos os níveis considerados, indicando o início da estação chuvosa na região do cerrado brasileiro.

Ainda com os dados da Tabela 4.1, para os mesmos níveis de atenuação de 3, 5, 10, 15 e 20 dB, construiu-se a Figura 4.5 visando demonstrar a distribuição anual de porcentagem de tempos de atenuação ou chuva para as faixas de atenuação citadas anteriormente.

Observa-se pela Figura 4.5 que durante o verão, por haver maior incidência de chuva, a porcentagem de tempo em que sinal fica sujeito a atenuações tende a ser mais alta para os níveis de 3 e 5 dB. Para as atenuações de 10, 15 e 20 dB, a porcentagem de tempo tende a ser menor conforme indicam os dados da Tabela 4.1.

Durante o inverno, a porcentagem de tempo de atenuação é baixa para todos os níveis de atenuação analisados, exceto para o mês de junho de 2021, que, devido à presença de alguns eventos de chuva, apresentou um valor próximo de 0,2% do tempo de atenuação em segundos, para eventos de atenuação de 3 dB. Para os demais níveis de atenuação considerados, não houve eventos relevantes durante o inverno. Para as estações do outono e primavera, têm-se comportamentos opostos. No outono, assim como ocorre para os eventos de atenuação, observa-se a diminuição gradativa das porcentagens de tempo de atenuação para todas as faixas consideradas, indicando a entrada no período de seca na região Centro-Oeste. Por outro lado, na primavera, observa-se um comportamento ascendente da porcentagem de tempos de atenuações registradas para todos os níveis considerados, indicando o início da estação chuvosa na região do cerrado brasileiro.

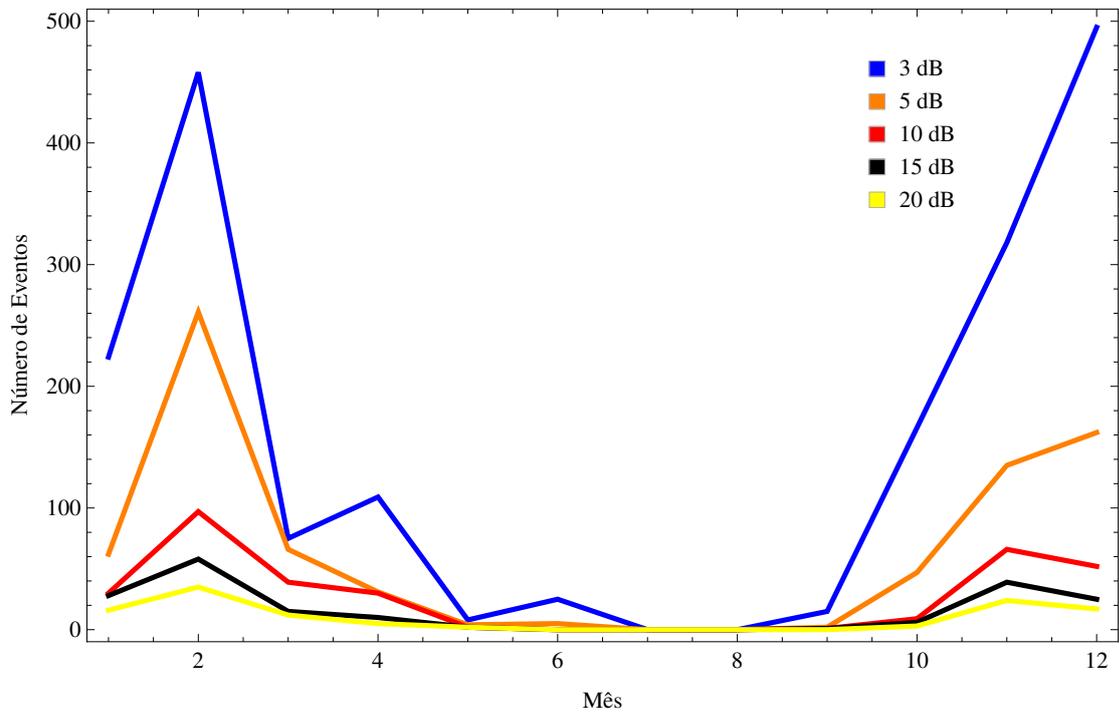


Figura 4.4: Distribuição Anual de Eventos de Chuva por Faixa de Atenuação.

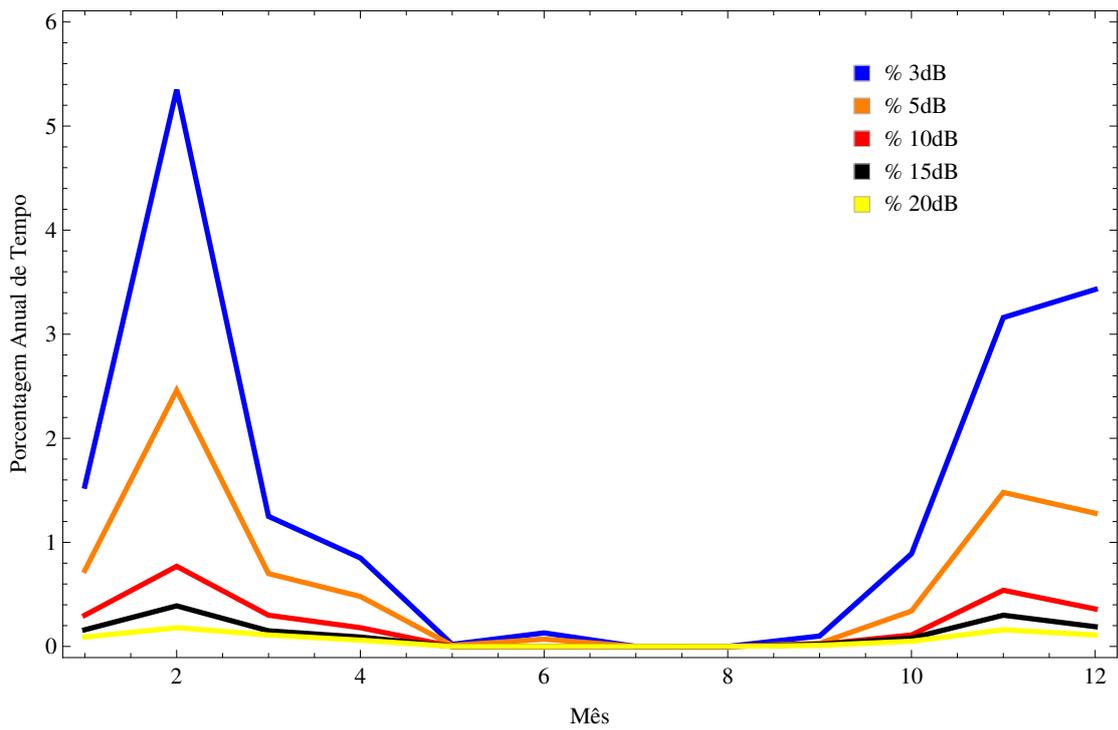


Figura 4.5: Distribuição Anual de Eventos de Chuva por Faixa de Atenuação.

4.6 Comportamento Sazonal das Porcentagens de Tempo e Eventos de Chuva

Com base na interpretação dos dados da Tabela 4.1, da Figura 4.4 e da Figura 4.5, pode-se inferir que o número de eventos e suas durações estão intimamente ligados com as estações do ano. A estação chuvosa, caracterizada principalmente pelos meses que compõem a primavera e o verão, tem um efeito dominante na frequência e duração dos eventos de chuva, enquanto a estação seca, caracterizada pelos meses que compõem o outono e o inverno, possui um número baixo de eventos e com durações bem menores se comparadas aos meses do período de chuva.

4.7 Conclusão

Neste capítulo apresentaram-se os dados dos volumes de chuva mensais do ano de 2021 comparados com a média mensal dos dez anos anteriores. Além disso, explica-se como o valor de *clear sky* do *beacon* foi obtido e utilizado no escopo deste estudo. Posteriormente, apresentam-se os resultados das medidas anuais do *beacon* em forma de tabela de atenuações e tempos excedidos, obtida por meio dos dados de potência recebida do *beacon* na *gateway* de Brasília. Explica-se como os dados da tabela devem ser interpretados e, por fim, é apresentada a distribuição mensal de eventos e a porcentagem de tempo de chuva por faixa de atenuação, ambas para o ano de 2021, fazendo um paralelo com as estações do ano e períodos de chuva e seca na região Centro-Oeste.

Capítulo 5

Modelagem Estatística da Atenuação Devido à Chuva em Banda Ka

Um bom modelo estatístico de atenuações devido à chuva deve ser capaz de prever taxas de chuva onde dados pluviométricos estiverem disponíveis ou puderem ao menos ser obtidos por meio das estações meteorológicas [32].

Os modelos preditivos baseados na potência de pico do sinal, nível de atenuação e duração de atenuações, que é o modelo utilizado neste trabalho, são os modelos mais aceitos uma vez que, nos sistemas práticos, quando o sinal de recepção é atenuado acima de uma determinada margem, o conhecimento exato da atenuação tem pouca ou nenhuma relevância. Isso significa que, uma vez que o sistema percebe um sinal com potência inferior ao seu limiar de recepção, também conhecido como sensibilidade, não é relevante se a potência do sinal continua decaindo, ou não. Portanto, é muito importante conhecer a duração dos eventos de atenuação que um sistema está exposto, uma vez que esse conhecimento, aliado ao conhecimento do limiar de potência de recepção, permite estimar a disponibilidade do sistema de comunicação [32].

Para sistemas que utilizam o controle de potência no enlace de subida, ULPC, do inglês *Uplink Power Control*, como é o caso do SGDC, também é importante conhecer as durações das atenuações para diferentes níveis considerados, uma vez que nesses sistemas também há um limite de potência adicional que pode ser fornecida à cadeia de transmissão da *gateway* para mitigar efeitos de desvanecimento.

Visando propor um modelo que represente a precipitação na região da *gateway* de Brasília, o objetivo deste capítulo é apresentar a tabela de intervalos de tempo e atenuação excedidos, que foi obtida por meio da Tabela 4.1, demonstrar graficamente o comportamento dos intervalos de atenuação com os intervalos de tempo de 30-60, 60-120, 120-300 e 300-1200 segundos para os dados de potência recebida do *beacon*.

Posteriormente, são apresentados fatores de escalonamento pelos quais é possível aproximar as curvas dos intervalos de 60-120, 120-300 e 300-1200 segundos com a curva do

intervalo de referência adotado de 30-60 segundos. Tais fatores são trabalhados tanto pela média, quanto pela moda dos mesmos, para cada intervalo considerado.

Por fim, são propostos dois modelos matemáticos (único e híbrido), por meio dos quais os dados medidos, no intervalo de 30-60 segundos, podem ser representados com uma boa precisão. Por fim, são calculados o erro quadrático médio e a sua raiz quadrática, demonstrando o quão assertivo os modelos propostos são.

5.1 Modelo de Duração de Atenuações

O objetivo da maior parte dos estudos de análise de dados é desenvolver um modelo preditivo que permite o cálculo de parâmetros necessários usando uma equação geral que representa satisfatoriamente o comportamento dos dados analisados. O modelo de duração de atenuações deve, idealmente, ser capaz de estimar o tempo acumulado de duração da atenuação, em qualquer nível, por interpolação.

Os modelos desenvolvidos neste trabalho utilizam a potência de recepção do sinal de *beacon* do SGDC na frequência de 19600 MHz. As durações de tempo das atenuações anuais nessa frequência, utilizadas na forma de intervalos, são aplicadas na construção dos modelos. A ideia é que os modelos propostos sejam capazes de estimar qual será a duração de tempo de atenuação para diferentes intervalos e níveis de atenuação.

Antes de discutir os modelos, é importante explicar o formato dos dados utilizados na construção do modelo. A Tabela 4.1 mostra a duração anual das atenuações para a frequência do *beacon* do SGDC. A única diferença entre a Tabela 5.1 e a Tabela 4.1, é que a Tabela 5.1, apresentada nesta sessão, apresenta as durações das atenuações na forma de intervalos ao invés do formato de duração excedida. Apenas os dados de tempo (em segundos) são utilizados, porque o tempo em que o sinal é exposto aos fenômenos de atenuação tem maior relevância que a quantidade de eventos de atenuação quando é analisada a disponibilidade de um sistema da comunicação via satélite.

No projeto prático de sistemas de satélite, é importante que se saiba por quanto tempo, ou por qual porcentagem de tempo, uma atenuação pode durar. A Tabela 5.1 lista as durações de atenuações para os intervalos de 30-60, 60-120, 120-300 e 300-1200 segundos, considerando atenuações de 1 a 30 dB em relação ao nível de *clear sky*.

Tabela 5.1: Duração de Atenuação por Nível de Atenuação e Intervalo de Tempo para o Ano de 2021.

Atenuação (dB)	30-60 <i>s</i>	60-120 <i>s</i>	120-300 <i>s</i>	300-1200 <i>s</i>
1 dB	319562	316678	525631	1372497
2 dB	51284	86672	216488	875674
3 dB	38810	66516	175820	735857

Atenuação (dB)	30-60 s	60-120 s	120-300 s	300-1200 s
4 dB	31706	56962	154141	630318
5 dB	27445	50381	140108	557998
6 dB	24278	46226	126875	487265
7 dB	22193	41457	112054	433033
8 dB	20027	37923	102415	382641
9 dB	18081	34526	91279	342772
10 dB	16568	31106	80879	310031
11 dB	14886	28370	72540	277531
12 dB	13561	26438	67361	248974
13 dB	12520	24354	62343	222388
14 dB	11336	21933	57743	198605
15 dB	10416	19691	52532	176996
16 dB	9805	18324	46855	158657
17 dB	9152	17020	41915	141238
18 dB	8362	15581	36419	126346
19 dB	7665	13750	32258	111024
20 dB	7000	11765	28362	96909
21 dB	5906	10427	25044	84323
22 dB	5432	8997	22293	72633
23 dB	4871	7905	19199	62827
24 dB	4263	6891	17084	53548
25 dB	3720	5944	15012	45428
26 dB	3141	5141	13006	38334
27 dB	2694	4487	10982	31953
28 dB	2181	3804	8899	26375
29 dB	1717	3206	6809	21455
30 dB	1259	2509	5413	16664

A abordagem utilizada na construção dos modelos é dividida em três partes. A primeira parte consiste em analisar o comportamento das atenuações, de 1 a 30 dB, para os diferentes intervalos utilizados. Na análise desenvolvida neste trabalho, o menor intervalo, ou seja, 30-60 segundos, é escolhido como o intervalo de referência. A segunda parte propõe a busca e obtenção de fatores, que se aplicados aos valores medidos do intervalo de referência, estimem os demais intervalos considerados. Já a terceira e última parte, propõe a obtenção de modelos matemáticos tais que o tempo de atenuação estimado é função do nível de atenuação para o intervalo de 30-60 segundos.

5.2 Distribuição dos Intervalos de Atenuação

A Figura 5.1 demonstra graficamente como é o comportamento dos intervalos de atenuação do *beacon* medidos no ano de 2021.

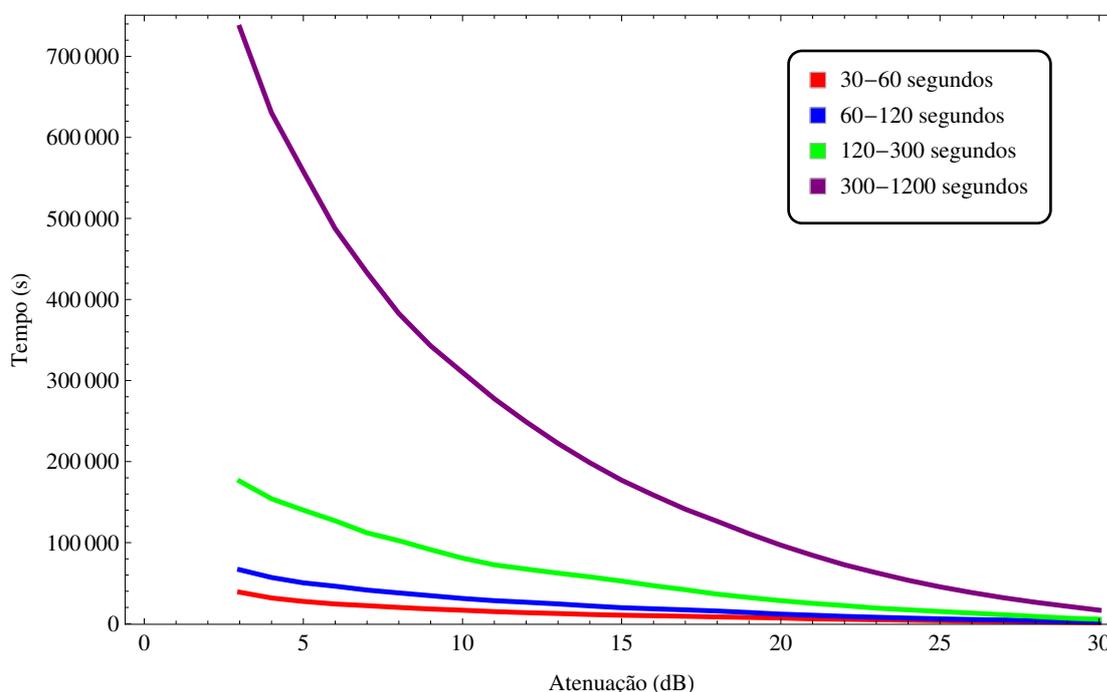


Figura 5.1: Distribuição dos Intervalos de Atenuação Considerados no ano de 2021.

O gráfico representado pela Figura 5.1 deve ser interpretado da seguinte forma: considerando a curva que representa o intervalo de 120-300 segundos (verde), houve aproximadamente 150.000 segundos de redução de potência do *beacon* para atenuações maiores ou iguais a 5 dB.

Pela análise dos dados obtidos, pode-se concluir que os tempos de atenuação para intervalos de tempos menores tendem a serem menores e, à medida que os intervalos aumentam, há um respectivo aumento dos tempos de atenuação, para uma mesma atenuação analisada.

Na análise desenvolvida neste capítulo, consideraram-se atenuações acima de 3 dB, pois, oscilações no sinal do *beacon* inferiores a esse patamar são geralmente causadas por efeitos troposféricos como a cintilações, presença de nuvens, vapores de água e absorção devido ao oxigênio [33] o que, além de pouco interferirem na potência recebida do sinal, não representam as atenuações devido à chuva, foco principal deste trabalho, nem costumam causar danos significativos em sinais de radiofrequência em banda Ka.

5.3 Fatores de Escalonamento

Conforme elucidado, objetiva-se obter fatores de escalonamento, por meio dos quais, as curvas que representam os intervalos de maior duração, possam ser reduzidas e representadas pelo intervalo de referência considerado. Sendo assim, o caminho reverso pode ser feito. Ou seja, uma vez que se possui medições anuais da atenuação do sinal do *beacon* para o intervalo de 30-60 segundos, aplicando os fatores de escalonamento propostos, é possível representar estatisticamente os demais intervalos sem possuir, de fato, as medições para esses intervalos.

Para a obtenção dos fatores de escalonamento, estudaram-se as relações dos tempos considerados nos intervalos de maior duração com o intervalo de referência. Para isso, para cada intervalo (60-120, 120-300, 300-1200 segundos) e nível de atenuação, foi calculada a razão de tempo, neste trabalho chamada de “fator”, do intervalo considerado com o tempo do intervalo de referência. O resultado dessas razões pode ser observado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Fatores de Escalonamento por Nível de Atenuação.

Atenuação	Fator 60-120 s	Fator 120-300 s	Fator 300-1200 s
1 dB	1,63	4,20	16,98
2 dB	1,69	4,22	17,07
3 dB	1,71	4,53	18,96
4 dB	1,80	4,86	19,88
5 dB	1,84	5,11	20,33
6 dB	1,90	5,23	20,07
7 dB	1,87	5,05	19,51
8 dB	1,89	5,11	19,11
9 dB	1,91	5,05	18,96
10 dB	1,88	4,88	18,71
11 dB	1,91	4,87	18,64
12 dB	1,95	4,97	18,36
13 dB	1,95	4,98	17,76
14 dB	1,93	5,09	17,52
15 dB	1,89	5,04	16,99
16 dB	1,87	4,78	16,18
17 dB	1,86	4,58	15,43
18 dB	1,86	4,36	15,11
19 dB	1,79	4,21	14,48
20 dB	1,68	4,05	13,84
21 dB	1,77	4,24	14,28
22 dB	1,66	4,10	13,37
23 dB	1,62	3,94	12,90
24 dB	1,62	4,01	12,56

Atenuação	Fator 60-120 s	Fator 120-300 s	Fator 300-1200 s
25 dB	1,60	4,04	12,21
26 dB	1,64	4,14	12,20
27 dB	1,67	4,08	11,86
28 dB	1,74	4,08	12,09
29 dB	1,87	3,97	12,50
30 dB	1,99	4,30	13,24

De posse da razão entre os tempos dos intervalos maiores considerados e os tempos do intervalo de referência, é possível perceber, por meio dos resultados da Tabela 5.2, que as razões, considerando um único intervalo, não se alteram muito no intervalo de atenuações considerado. Sendo assim, para cada intervalo, buscou-se avaliar os fatores de escalonamento pela média e pela moda dos valores.

5.3.1 Fatores de Escalonamento pela Média

Utilizando a média dos fatores de escalonamento por intervalo de tempo demonstrados na Tabela 5.2, obtém-se os valores de 1,8, 4,55 e 16 para os intervalos 60-120, 120-300, 300-1200 segundos, respectivamente.

Conforme demonstrado pela Figura 5.2, ao utilizar a média dos fatores de escalonamento para cada intervalo considerado, observa-se uma boa aproximação para atenuações superiores a 14 dB. Para valores inferiores, a utilização da média dos fatores superestima os intervalos de tempo considerados se comparado ao intervalo de referência, representado pela curva em vermelho.

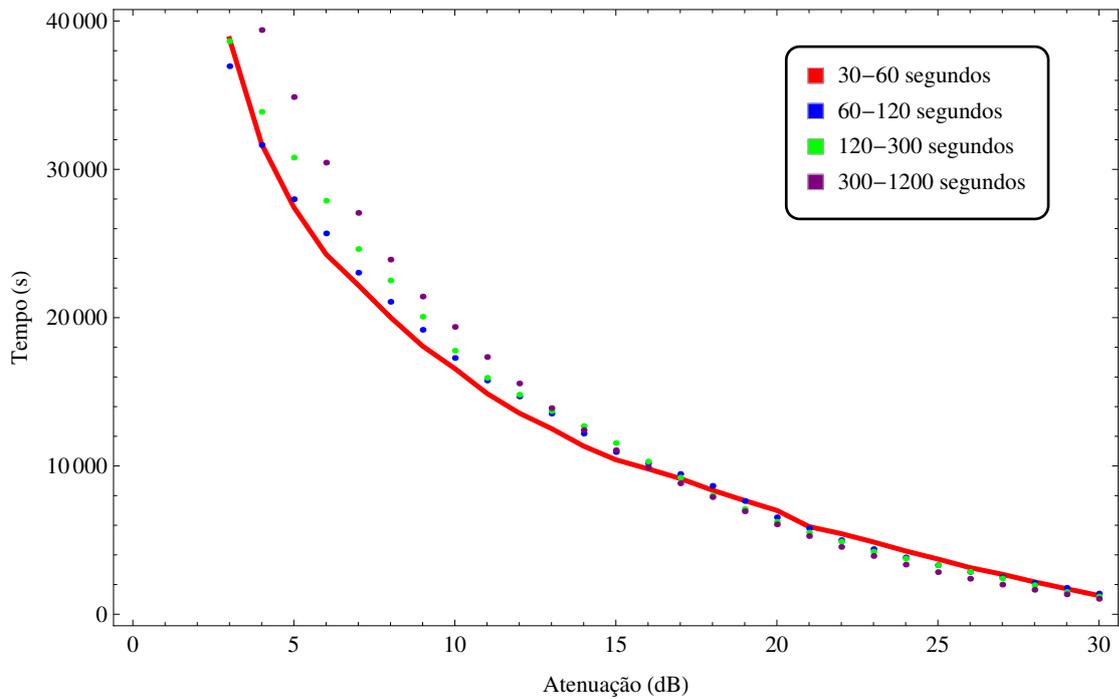


Figura 5.2: Intervalos Reduzidos ao Intervalo de Referência pela Média dos Fatores de Escalonamento.

5.3.2 Fatores de Escalonamento pela Moda

Utilizando a moda dos fatores de escalonamento por intervalo demonstrados na Tabela 5.2, obtém-se os valores de 1,87, 5,11 e 18,96 para os intervalos 60-120, 120-300, 300-1200 segundos respectivamente.

Conforme demonstrado pela Figura 5.3, ao utilizar a moda dos fatores de escalonamento para cada intervalo considerado, observa-se uma boa aproximação para atenuações até 14 dB. Após este valor, a utilização da moda dos fatores subestima os intervalos de tempo considerados se comparado ao intervalo de referência, representado pela curva em vermelho.

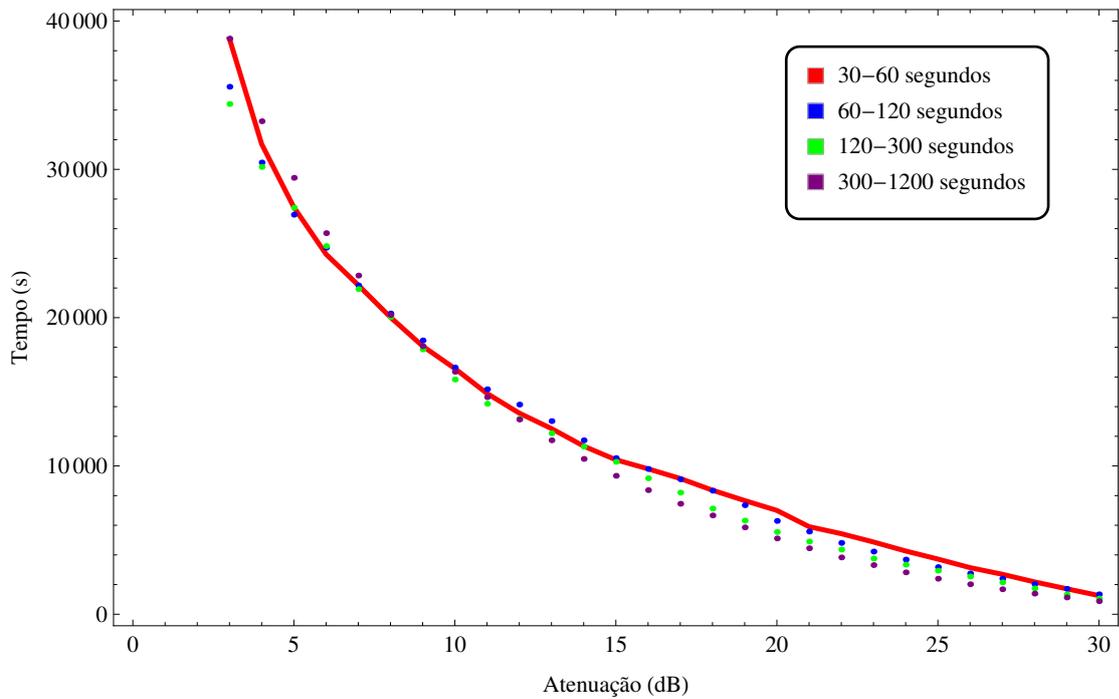


Figura 5.3: Intervalos Reduzidos ao Intervalo de Referência pela Moda dos Fatores de Escalonamento.

5.4 Modelo Híbrido Utilizando os Fatores de Escalonamento Pela Média e Pela Moda

Conforme explanado, a utilização dos fatores de escalonamento pela média e pela moda apresentam características distintas em relação a cada nível de atenuação abordado nesta dissertação, que varia de 3 dB a 30 dB. Para níveis de atenuação entre 3 dB e 14 dB a utilização de fatores de escalonamento obtidos através da moda, se mostraram mais aderentes. Já para os níveis de atenuações superiores a 14 dB, os fatores de escalonamento dos intervalos superiores, obtidos através da média, se mostraram mais precisos.

Buscando melhorar a forma como essas estimativas dos intervalos maiores, ou seja, 60-120, 120-300 e 300-1200 segundos, aderem ao intervalo de referência, foi proposto na Figura 5.4 um modelo híbrido, que apresenta maior aderência dos intervalos maiores ao intervalo de referência, quando comparado aos modelos que utilizam, exclusivamente, a moda ou a média.

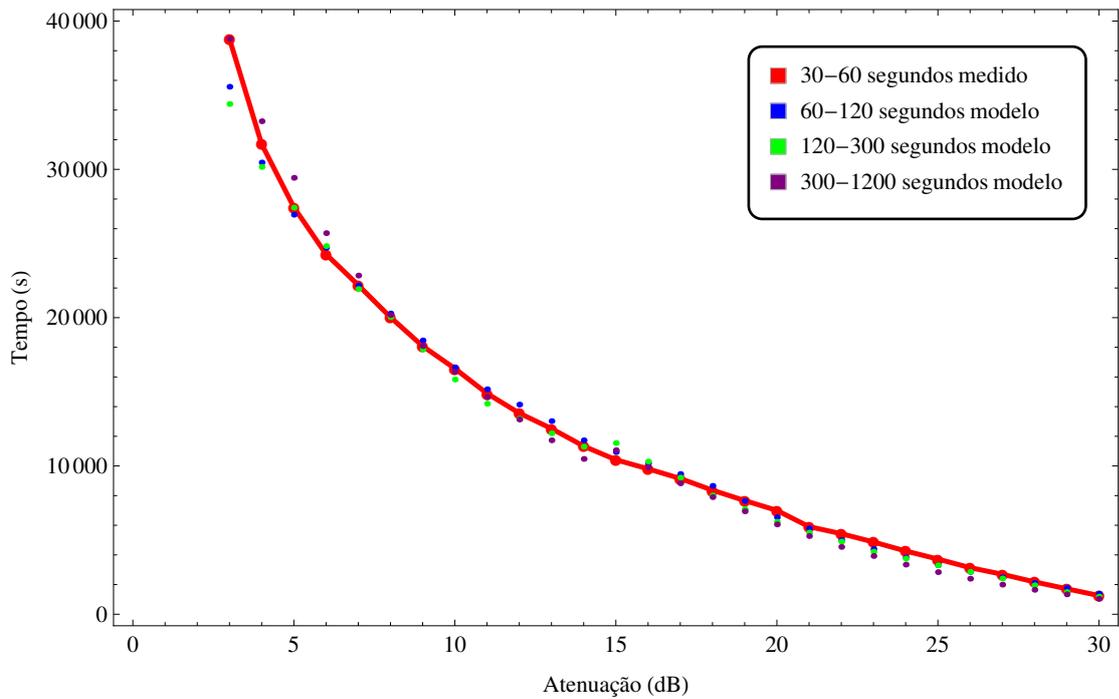


Figura 5.4: Intervalos Reduzidos ao Intervalo de Referência Utilizando o Modelo Híbrido - Moda e Média.

5.5 Modelo Proposto - Modelo Único

O modelo proposto neste trabalho, visa representar o intervalo de referência considerado por meio do qual, utilizando os fatores de escalonamento, será possível representar as distribuições dos demais intervalos estudados.

A equação desenvolvida utiliza os dados de potência recebida do *beacon* do SGDC, na estação *gateway* de Brasília, a partir dos quais os intervalos de atenuação foram obtidos e utilizados na construção da equação. A ideia é que o modelo seja capaz de dizer, inicialmente, para o microclima e região que a antena de *gateway* está inserida, qual será o tempo de atenuação para diferentes níveis de atenuação, considerando o intervalo de referência. Posteriormente, aplicando os fatores de escalonamento, obter os tempos de atenuação para os demais intervalos.

Procedimentos estatísticos, regressões e ajustes de curvas foram utilizados para obter resultados aderentes e promissores representados pela Equação 5.1.

$$TE_{30-60} = 869,481 + 48998,7e^{-0,112457A} \quad (5.1)$$

em que TE_{30-60} é o tempo de atenuação acumulado estimado em segundos e A é o nível de atenuação considerado em dB.

A abordagem utilizada neste trabalho foi de estabelecer um intervalo de referência, no caso de 30-60 segundos, de forma que todo o estudo esteja baseado na interdependência

relativa do nível de atenuação, intervalo de atenuação considerado e duração do intervalo de atenuação.

Após o tratamento e simulação dos dados, a curva exponencial representada em azul na Figura 5.5, apresentou a melhor adesão aos valores medidos, sendo escolhida como referência para o prosseguimento dos estudos.

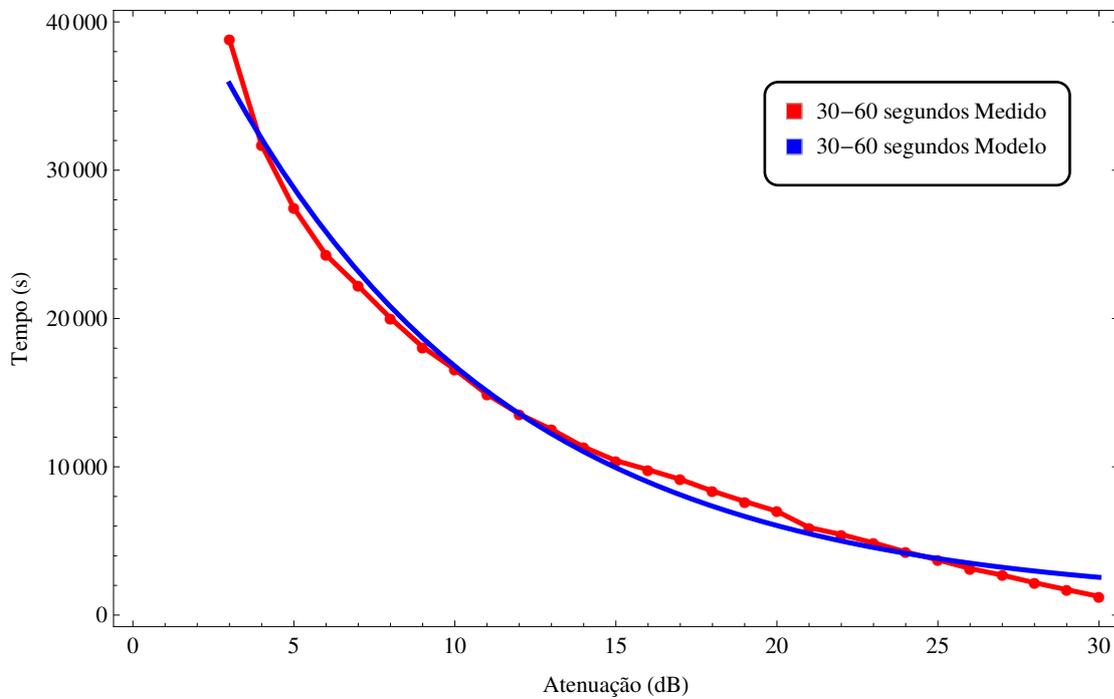


Figura 5.5: Comparação entre os Dados Medidos e o Modelo Proposto Considerando o Intervalo de Referência.

A Figura 5.5 demonstra o quão aderente o modelo, representado pela curva em azul, está consonante com os dados coletados do *beacon*, representado pela curva em vermelho, para o intervalo de referência. Graficamente, é possível observar que as curvas estão praticamente sobrepostas, exceto para alguns níveis de atenuação, que o modelo pode sobre ou subestimar o tempo de atenuação acumulado para determinado patamar de atenuação.

5.6 Cálculo do Erro Quadrático Médio e da Raíz do Erro Quadrático Médio

A fim de avaliar a diferença entre a Equação 5.1 estimadora e o valor verdadeiro da duração de tempo obtida para o intervalo de referência, o cálculo do Erro Quadrático Médio, EQM, é um importante critério para avaliar a eficácia de um estimador, uma vez que ele considera a média do quadrado do erro, com o erro sendo o montante pelo qual o estimador difere da quantidade estimada. Por esse motivo, o EQM tem a característica de identificar muito bem erros, uma vez que seus valores são elevados a segunda potência quando detecta-

dos [34] [35].

De posse dessas informações, utiliza-se a Equação 5.2 para calcular o EQM do modelo proposto.

$$EQM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (TE_{30-60} - TM_{30-60})^2 \quad (5.2)$$

Em que n é o número de amostras utilizadas no cálculo do EQM, TE_{30-60} é o tempo de atenuação acumulado estimado e TM_{30-60} é o tempo de atenuação acumulado medido. No caso deste trabalho, considerando os níveis de atenuação de 3 a 30dB, o resultado obtido para o EQM no intervalo de referência foi de $911.960s^2$.

Uma consideração a ser feita sobre o EQM é que esse modelo dá um peso maior aos maiores erros, já que, ao ser calculado, cada erro é elevado ao quadrado individualmente e, após isso, a média é calculada.

A Raiz do Erro Quadrático Médio, REQM, representada pela Equação 5.3, é a raiz quadrada do EQM. O EQM é medido em unidade quadrática do valor trabalhado, enquanto o REQM é medido em unidade linear do valor trabalhado, no caso deste trabalho, segundos. O REQM é uma medida do quão próximo da linha de regressão as amostras obtidas estão, ou seja, ele é útil para verificar a acurácia de modelos [36].

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (TE_{30-60} - TM_{30-60})^2} \quad (5.3)$$

No caso estudado no escopo deste trabalho, obteve-se um REQM de 954,966s, ou aproximadamente 16 minutos. Isso quer dizer que o desvio médio entre os pontos estimados e os pontos medidos é de 16 minutos, o que demonstra que o modelo utilizado estima de forma representativa o comportamento anual da chuva em Brasília considerando o intervalo de referência.

5.7 Aprimoramento do Modelo Proposto - Modelo Híbrido

Com a verificação dos primeiros resultados expostos pela modelo proposto pela Equação 5.1, a fim de buscar uma melhoria da representatividade do intervalo de referência, é proposta uma nova abordagem para modelar o comportamento das atenuações verificadas no intervalo de 30-60 segundos.

Essa nova abordagem, objetiva dividir o problema em duas partes. A primeira parte consiste em buscar uma distribuição que modele o intervalo de referência considerado para as atenuações de 3 a 14 dB. Este modelo está representando pela Equação 5.4.

$$TE_{30-60(3-14dB)} = -17092.ln(A) + 55844 \quad (5.4)$$

em que $TE_{30-60(3-14dB)}$ é o tempo de atenuação acumulado estimado em segundos para atenuações que vão de 3 a 14 dB e A é o nível de atenuação considerado em dB.

A segunda parte consiste em buscar uma distribuição que modele o intervalo de referência considerado para as atenuações de 14 a 30 dB. Este modelo está representando pela Equação 5.5.

$$TE_{30-60(14-30dB)} = -9995,32 + 37874,2e^{-0,0405707A} \quad (5.5)$$

em que $TE_{30-60(14-30dB)}$ é o tempo de atenuação acumulado estimado em segundos para atenuações que vão de 14 a 30 dB e A é o nível de atenuação considerado em dB.

Ao utilizar as Equações 5.4 e 5.5 para os intervalos de atenuação de 3 a 14 dB e de 14 a 30 dB, respectivamente, obtém-se um modelo híbrido, representando por uma distribuição logarítmica e por uma distribuição exponencial. Ambas estão representadas na Figura 5.6.

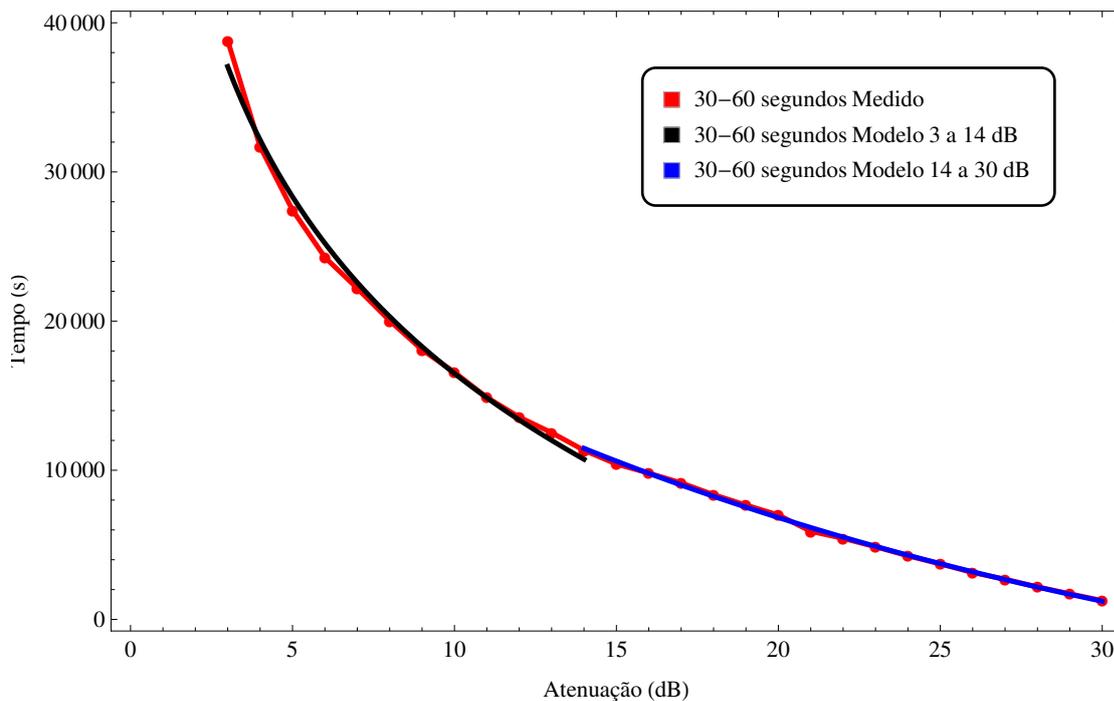


Figura 5.6: Comparação entre os Dados Medidos e o Modelo Híbrido Proposto Considerando Duas Distribuições.

5.8 Cálculo do EQM e do REQM Para o Modelo Híbrido

Com o objetivo de comparar o modelo inicialmente proposto, modelado apenas por uma distribuição exponencial, com o modelo híbrido, modelado por uma distribuição logarítmica e outra exponencial, calcula-se, para o modelo híbrido, o EQM e a REQM, através das

Equações 5.2 e 5.3.

Obtém-se, para o EQM e a REQM do modelo híbrido proposto, os valores de 224,371, 10s e 473,678s, respectivamente. Ou seja, a REQM obtido é de aproximadamente 8 minutos. Isso quer dizer que o desvio médio entre os pontos estimados e os pontos medidos é de aproximadamente 8 minutos, o que demonstra que o modelo híbrido, representado por duas distribuições, tem o dobro de precisão quando comparado ao modelo inicial proposto, modelado apenas por uma distribuição, cuja REQM calculada foi de aproximadamente 16 minutos.

5.9 Comparação da Recomposição dos Intervalos Utilizando o Modelo Único e o Modelo Composto

De forma a buscar a recomposição, utilizando os modelos matemáticos propostos, das distribuições dos intervalos 60-120, 120-300 e 300-1200 segundos medidos e demonstrados pela Figura 5.1, é representada nessa sessão, a recomposição utilizando os dois métodos estudados.

Em ambas recomposições, as premissas dos fatores de escalonamento adotadas anteriormente também são adotadas. Ou seja, para níveis de atenuações considerados de 3 a 14 dB são utilizados os fatores de escalonamento baseados pela moda dos fatores. Já para níveis de 15 a 30dB são utilizados fatores de escalonamento balizados pela média dos fatores.

5.9.1 Recomposição Pelo Modelo Único

A fim de buscar a recomposição do modelo medido experimentalmente que é apresentado pela Figura 5.1, é utilizada a Equação 5.1, referente ao modelo único proposto, visando observar a precisão da reconstrução quando comparada aos dados obtidos através da coleta do sinal de *beacon*. Através da Figura 5.7, é possível verificar que o modelo tem boa aproximação.

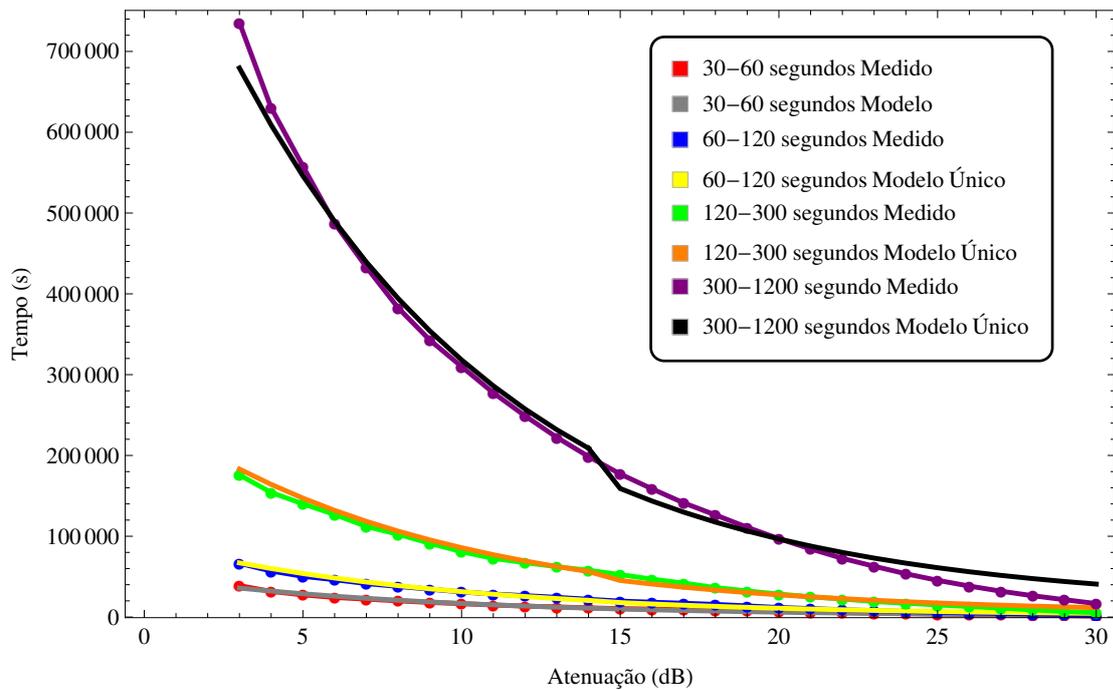


Figura 5.7: Reconposição das Distribuições Obtidas Por Meio da Coleta do *Beacon* Utilizando o Modelo Único.

5.9.2 Reconposição Pelo Modelo Híbrido

Da mesma maneira, a fim de buscar a reconposição do modelo medido experimentalmente que é apresentado pela Figura 5.1, são utilizadas as Equações 5.4 e 5.5, referente ao modelo híbrido proposto, visando observar a precisão da reconstrução quando comparada aos dados obtidos através da coleta do sinal de *beacon*. Através da Figura 5.8, é possível verificar que o modelo tem uma aproximação ainda melhor que o modelo único, conforme é esperado pelo fato do modelo híbrido ter apresentado uma REQM bem inferior ao modelo único.

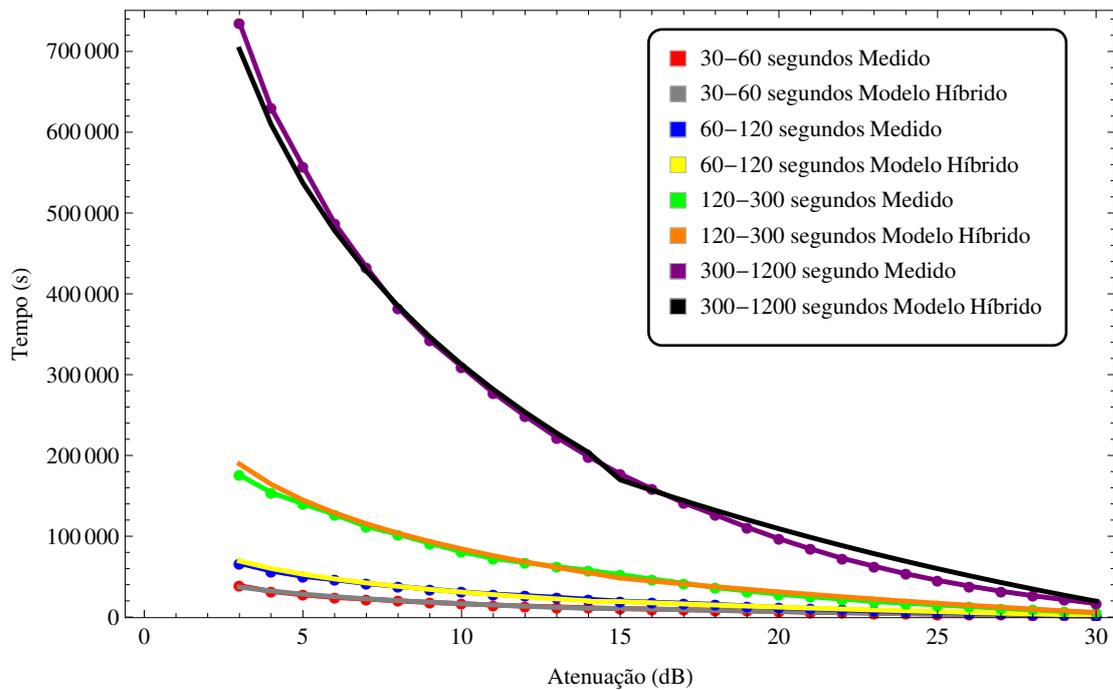


Figura 5.8: Recomposição das Distribuições Obtidas Por Meio da Coleta do *Beacon* Utilizando o Modelo Híbrido.

5.10 Conclusão

No Capítulo 5 foram apresentados os fatores de escalonamento dos intervalos superiores, quando comparados ao intervalo de referência. Posteriormente, utilizando-se desses fatores de escalonamento, buscou-se demonstrar como as curvas dos intervalos de atenuações maiores se comportam quando se utiliza a média e moda dos fatores de escalonamento para cada intervalo superior considerado. Dessa forma, foi demonstrado que a utilização dos fatores de escalonamento balizados pela moda aderem de forma melhor aos dados medidos experimentalmente, principalmente para os níveis de atenuação entre 3 e 14 dB. Já a utilização dos fatores de escalonamento balizados pela média, têm uma adesão melhor para níveis de atenuação entre 14 e 30 dB.

Propõe-se ainda uma modelagem matemática, representada pela Equação 5.1 e baseada em uma distribuição exponencial, chamada de "Modelo Único", que visa representar o intervalo de referência medido experimentalmente. Para o modelo único proposto, obteve-se, através da utilização da Equação 5.3, o valor da REQm, que foi de aproximadamente 16 minutos.

Posteriormente, visando aprimorar o modelo único, propõe-se o chamado "Modelo Híbrido". Tal modelo, representado pelas Equações 5.4 e 5.5, também objetiva representar matematicamente o intervalo de referência medido experimentalmente baseando-se em duas distribuições, uma logarítmica e a outra exponencial. Para o modelo híbrido proposto, também foi calculado o valor da REQm, obtendo-se um valor de aproximadamente 8 minu-

tos.

Por fim, são reconstruídos e comparados os intervalos superiores modelados pelo Modelo Único e pelo Modelo Híbrido, demonstrando a aderência dos valores estimados por esses modelos, com os valores medidos experimentalmente.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresenta a análise dos dados de potência do sinal do *beacon* do SGDC obtidos por meio da cadeia de rastreamento da antena *gateway* de Brasília durante todo o ano de 2021.

Apresentou-se o sistema do SGDC juntamente com o segmento espacial, de usuário e de controle. Posteriormente, detalhou-se a cadeia de rastreamento da antena de Brasília, seus elementos, princípio de funcionamento e como os dados foram obtidos por meio dela.

A partir dessa contextualização, os dados de potência recebida foram apresentados na forma da Tabela 4.1, salientando estatísticas importantes como o número de eventos, porcentagem de tempo e tempo excedido para cada patamar de atenuação. De posse da Tabela 4.1, foi possível desenvolver a Tabela 5.1 que apresenta os dados da Tabela 4.1 na forma de intervalos de atenuação. Os intervalos considerados nesse estudo foram: 30-60 segundos, adotado como intervalo de referência e utilizado como base neste trabalho, 60-120, 120-300 e 300-1200 segundos. Com os dados de tempo na forma de intervalos, foi possível analisar graficamente o comportamento de cada intervalo estudado. Além disso, propôs-se a utilização de fatores de escalonamento que buscam reduzir os intervalos maiores ao intervalo de referência. Esses fatores foram propostos de duas maneiras distintas, uma utilizando-se da média dos fatores e outra utilizando-se da moda.

Além disso, para o intervalo de referência, propôs-se um modelo matemático baseado em uma única distribuição exponencial que visa reproduzir a distribuição anual de intervalos de atenuação medida de forma empírica. Para esse modelo, calculou-se o EQM e REQM, demonstrando por meio desses cálculos que o desvio médio do modelo proposto em relação aos dados obtidos é de aproximadamente 16 minutos, o que em uma base anual de tempo, representa um valor muito baixo, demonstrando a robustez do modelo proposto.

Posteriormente, propõe-se uma outra abordagem no desenvolvimento do modelo, dividindo a análise em duas partes. Sendo que a primeira considera atenuações de 3 a 14 dB e segunda considera as atenuações de 14 a 30 dB. Nessa nova abordagem proposta, apresentam-se duas distribuições, sendo a primeira uma distribuição logarítmica, que trata

os níveis de atenuação de 3 a 14 dB, e a segunda uma distribuição exponencial, que leva em consideração os níveis de atenuação de 14 a 30 dB. Esse novo modelo é chamado de modelo híbrido. Para este modelo, os valores de EQM e REQM também foram calculados e, baseado nos resultados obtidos, o desvio médio do modelo híbrido em relação aos dados medidos experimentalmente é de aproximadamente 8 minutos, o que em uma base anual de tempo, representa um valor ainda mais baixo quando comparado ao modelo único. Portanto, o modelo híbrido desenvolvido mostra-se mais preciso que o modelo único inicialmente proposto.

Em posse dos modelos e dos fatores de escalonamento obtidos no desenvolvimento deste trabalho, é possível reproduzir os efeitos da chuva em um sinal de radiofrequência em 19600 MHz para a região e microclima de Brasília. A aplicabilidade desse método no dimensionamento correto de sistemas de radiofrequência é de grande relevância e permite um conhecimento preciso sobre como o sinal eletromagnético é afetado por efeitos pluviométricos para determinada região. Assim, os sistemas podem ser projetados com disponibilidade, robustez e margem mais precisas, evitando-se projetos sub ou superestimados, em que o sistema não atinja a disponibilidade e requisitos necessários ou que se desperdice recursos financeiros, respectivamente.

Os resultados apresentados e analisados possuem oportuna utilidade para uso em aplicações que envolvam sistemas de telecomunicações via satélite baseados na banda Ka. Diante da exposição dos resultados obtidos neste trabalho, observa-se o valor contributivo da análise e dos estudos em prol dos avanços tecnológicos do setor de comunicações via satélite. As principais contribuições deste trabalho envolvem a investigação das estatísticas de canal, mais precisamente do sinal do *beacon* recebido pela antena *gateway* de Brasília, utilizando a modelagem estatística para buscar representar os efeitos de atenuação devido à chuva no sinal estudado.

Não obstante, o reconhecimento das contribuições deste trabalho, muitos estudos importantes ainda devem ser realizados a fim de se aprimorar o desenvolvimento e de se permitir a implementação de técnicas mais precisas para a estimar o comportamento estatístico de um sinal de rádio frequência na presença de chuva. Desta forma, apresentam-se, a seguir, as recomendações para o aprofundamento das análises e sugestões para futuros trabalhos.

- Realizar medições em diferentes localidades do país com características climáticas distintas;
- Avaliar o comportamento de sistemas operando em outras faixas de frequência;
- Mensurar as características dos sinais por período superior a um ano, visando obter um modelo mais preciso;
- Aprimorar o modelo de tempo de atenuação proposto;
- Analisar demais efeitos de propagação e como eles podem influenciar na potência do sinal recebido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INIGO, P. et al. Review of terabit/s satellite, the next generation of hts systems. In: IEEE. *2014 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC)*. [S.l.], 2014. p. 318–322.
- [2] YEN, L. Satellite communications for the millennium. In: IEEE. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Transmitting Waves of Progress to the Next Millennium. 2000 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (C)*. [S.l.], 2000. v. 2, p. 530–533.
- [3] ERIC, C. An open standard for ka-band interoperable satellite antennas. In: IEEE. *MILCOM 2019-2019 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*. [S.l.], 2019. p. 76–81.
- [4] GINESTE, M. et al. Narrowband iot service provision to 5g user equipment via a satellite component. In: IEEE. *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. [S.l.], 2017. p. 1–4.
- [5] JO, K. Y. *Satellite communications network design and analysis*. [S.l.]: Artech house, 2011.
- [6] CETIC.BR. *Domicílios com Acesso à Internet*. https://data.cetic.br/cetic/explore/?pesquisa_id=1&unidade=Domic%C3%ADlios. Acessado 05 de junho de 2022.
- [7] ANATEL. *Satélites em Operação Comercial no Brasil*. <https://informacoes.anatel.gov.br/paineis/espectro-e-orbita/satelites-em-operacao-comercial-no-brasil>. Acessado 05 de junho de 2022.
- [8] IPPOLITO, L. J. Radio propagation for space communications systems. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 69, n. 6, p. 697–727, 1981.
- [9] SERIES, P. Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems. *Recommendation ITU-R*, p. 618–12, 2015.
- [10] NEBULONI, R. et al. Assessment of rain fade mitigation techniques for high throughput satellites by a time series synthesizer. In: IEEE. *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. [S.l.], 2015. p. 1–5.

- [11] METEOROLOGIA, I. I. N. de. *Banco de Dados Meteorológicos*. <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acessado 14 de julho de 2022.
- [12] VOGEL, W. Measurements of satellite beacon attenuation at 11.7, 19.04, and 28.56 ghz and radiometric site diversity at 13.6 ghz. *Radio Science*, AGU, v. 17, n. 06, p. 1511–1520, 1982.
- [13] JR, L. J. I. *Satellite communications systems engineering: atmospheric effects, satellite link design and system performance*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2017.
- [14] MARAL, G.; BOUSQUET, M.; SUN, Z. *Satellite communications systems: systems, techniques and technology*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2020.
- [15] SPACE.COM. *What Was the Space Race? Origins, events and timeline*. <https://www.google.com.br/search?hl=pt-BRq=%22What+Was+the+Space+Race%3F+Origins,+events+and+timeline%22>. Acessado 01 de outubro de 2022.
- [16] AFFAIRS, U. N. O. for O. S. *Online Index of Objects Launched into Outer Space*. https://www.unoosa.org/oosa/osoindex/search-ng.jsp?lf_id=?c=%7B%22filters%22:%5B%5D, Acessado 01 de julho de 2022.
- [17] BRAUN, T. M.; BRAUN, W. R. *Satellite communications standards*. Wiley-IEEE Press, 2021.
- [18] N°7.769, D. . J. D. . D. *Dispões sobre a gestão do planejamento, da construção e do lançamento do Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas – SGDC*. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/decreto/D7769.htm. Acessado 02 de julho de 2022.
- [19] COMUNICAÇÕES, M. das. *Wi-Fi Brasil - Panorama Geral*. <https://www.gov.br/mcom/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/wi-fi-brasil>. Acessado 05 de julho de 2022.
- [20] BAHRI, R. et al. Typical ka band satellite beacon receiver design for propagation experimentation. In: IEEE. *7th International Symposium on Telecommunications (IST'2014)*. [S.l.], 2014. p. 145–149.
- [21] SHERMAN, S. M.; BARTON, D. K. *Monopulse principles and techniques*. [S.l.]: Artech House, 2011.
- [22] MARCUZZO, F. F. N.; CARDOSO, M. R. D.; FARIA, T. G. *Chuvas no cerrado da região centro-oeste do brasil: análise histórica e tendência futura*. 2012.
- [23] COUTINHO, L. M. *O bioma do cerrado. Eugen Warming e o cerrado brasileiro: um século depois*, 2002.

- [24] INMET. *INMET Divulga Previsão Climática Para os Próximos 4 Meses no Distrito Federal*. <https://portal.inmet.gov.br/noticias/inmet-divulga-previs> Acessado 01 de agosto de 2022.
- [25] INMET. *Comparativo de Chuvas em Novembro de 2020 e 2021 no Brasil*. <https://portal.inmet.gov.br/noticias/comparativo-de-chuvas-em-novembro-2020-e-2021-no-brasil>. Acessado 01 de agosto de 2022.
- [26] GUNN, K. L. S.; EAST, T. W. R. The microwave properties of precipitation particles. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Wiley Online Library, v. 80, n. 346, p. 522–545, 1954.
- [27] OGUCHI, T. Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometeors. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 71, n. 9, p. 1029–1078, 1983.
- [28] DAHMAN, I. et al. Rain attenuation prediction model for satellite communications based on the météo-france ensemble prediction system pearp. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Copernicus GmbH, v. 18, n. 12, p. 3327–3341, 2018.
- [29] SAFAAI-JAZI, A.; AJAZ, H.; STUTZMAN, W. L. Empirical models for rain fade time on ku-and ka-band satellite links. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, v. 43, n. 12, p. 1411–1415, 1995.
- [30] ITU-R, R. Prediction method of fade dynamics on earth-space paths. *ITU-R P. 1623*, 2003.
- [31] VOGEL, W.; TORRENCE, G.; ALLNUTT, J. Rain fades on low elevation angle earth-satellite paths: comparative assessment of the austin, texas, 11.2 ghz experiment. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 81, n. 6, p. 885–896, 1993.
- [32] UPTON, S.; LARSON, J. Analysis of fading characteristics for communications applications. *ESA Special Publication*, v. 292, p. 247–250, 1989.
- [33] ALAWADI, T. A. *Investigation of the effects of cloud attenuation on satellite communication systems*. Tese (Doutorado) — Cranfield University, School of Engineering, 2012.
- [34] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Applied statistics and probability for engineers*. [S.l.]: John wiley & sons, 2010.
- [35] CHICCO, D.; WARRENS, M. J.; JURMAN, G. The coefficient of determination r-squared is more informative than smape, mae, mape, mse and rmse in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, PeerJ Inc., v. 7, p. e623, 2021.
- [36] MOODY, J. What does rmse really mean. *Towards Data Science-Medium*, 2019.