

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTATÍSTICA E MODELAGEM  
QUANTITATIVA

Everton Lüdke

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE RECEPÇÃO DE DADOS DIGITAIS POR  
SATÉLITE GEOESTACIONÁRIO EM BANDA KU EM REGIÃO  
MESOTÉRMICA ÚMIDA NO BRASIL POR SÉRIES TEMPORAIS**

Santa Maria, RS  
2021

Everton Lüdke

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE RECEPÇÃO DE DADOS DIGITAIS POR SATÉLITE  
GEOESTACIONÁRIO EM BANDA KU EM REGIÃO MESOTÉRMICA ÚMIDA NO  
BRASIL POR SÉRIES TEMPORAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização em Estatística e Modelagem Quantitativa, Área de Concentração em Probabilidade e Estatística Aplicadas, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Especialista em Estatística e Modelagem Quantitativa**. Defesa realizada por videoconferência.

Orientador: Prof. Dr. Cleber Bisognin

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Vanessa Siqueira Peres da Silva

Santa Maria, RS  
2021

**Everton Lüdke**

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE RECEPÇÃO DE DADOS DIGITAIS POR SATÉLITE  
GEOESTACIONÁRIO EM BANDA KU EM REGIÃO MESOTÉRMICA ÚMIDA NO  
BRASIL POR SÉRIES TEMPORAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização em Estatística e Modelagem Quantitativa, Área de Concentração em Probabilidade e Estatística Aplicadas, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Especialista em Estatística e Modelagem Quantitativa**.

**Aprovado em 30 de setembro de 2021:**

---

**Cleber Bisognin, Dr. (UFSM)**  
**(Presidente/Orientador)**

---

**Vanessa Siqueira Peres da Silva, Dra. (UFSM)**  
**(Coorientadora)**

---

**Rogemar André Riffel, Dr. (UFSM)**

---

**Hans Rogério Zimmermann, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2021

## **DEDICATÓRIA**

A todos os membros da minha família que não mediram esforços no passado para que eu conseguisse me tornar que sou.

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer aos meus orientadores, Prof. Cleber e Profa Vanessa pelo apoio e paciência na condução desse trabalho e pelas inestimáveis críticas e sugestões.

Agradeço, também, a minha família pela compreensão e palavras de encorajamento, sempre tão abundantes e generosas.

Nomes de grandes mentes do passado como os diversos autores citados cujos trabalhos pioneiros me propiciaram ter inspiração de desenvolver esse trabalho, sendo incontáveis e, muitas vezes, desconhecidos e perdidos na história.

E, finalmente, deixo um especial carinho e agradecimento ao corpo docente do Curso de Especialização em Estatística e Modelagem Quantitativa da UFSM que propiciaram um amplo espaço para debates em torno dessa área de pesquisa tão fascinante e que não medem esforços no dia a dia para manter o curso no mais alto padrão.

Somos lo que hacemos, pero somos,  
principalmente, lo que hacemos para  
cambiar lo que somos

(Eduardo Galeano)

## RESUMO

### ANÁLISE DA QUALIDADE DE RECEPÇÃO DE DADOS DIGITAIS POR SATÉLITE GEOESTACIONÁRIO EM BANDA KU EM REGIÃO MESOTÉRMICA ÚMIDA NO BRASIL POR SÉRIES TEMPORAIS

AUTOR: Everton Lüdke

Orientador: Cleber Bisognin

Coorientadora: Vanessa Siqueira Peres da Silva

O objetivo do presente estudo é realizar uma investigação quantitativa sobre a qualidade estatística de uma transmissão digital feita por satélite geoestacionário na porção inferior da banda K de micro-ondas, caracterizada por frequências entre 10,2 e 11,5 GHz. Para estabelecer o controle de qualidade da recuperação de dados, foram coletados dados de nível de sinal em região mesotérmica úmida na região central do extremo sul do Brasil a cada intervalo de tempo de dez segundos, desde 16 de outubro de 2019 a 8 de setembro de 2020 coincidente com início de um mínimo de atividade heliomagnética. Ao longo do texto, foi feita uma análise extensiva e completa de todos os possíveis fatores de degradação da qualidade estatística do fluxo de dados digitais e concluímos que ciclones extratropicais no litoral sul brasileiro, chuvas leves a moderadas, interferência de alinhamento do disco solar com a linha de visada do satélite não são fatores que alteram a qualidade dos dados para fins práticos. Foi descoberto uma variabilidade sazonal do nível de sinal com o ciclo diurno-noturno sendo que a amplitude do sinal recebido é menor durante o trânsito solar, provavelmente pelo aquecimento atmosférico que produz complexos fenômenos de absorção das micro-ondas nessa faixa de frequência. Esses ciclos não podem ser interpretados por modelos ARMS ou ARIMA de Box-Jenkins com eficiência, sendo que o modelo de Holt-Winters é o mais adequado para inferir as propriedades observadas de periodicidade. A qualidade do sistema desenvolvido para detecção de sinais digitais de satélite também é avaliada com métodos estatísticos. Acredita-se que os resultados discutidos nesse trabalho possam ser aplicados a futuros estudos sobre a qualidade de transmissão em outras frequências de internet digital via satélite como o 5G (acima de 26 GHz) e 6G (7-20 GHz) sendo improváveis que ocorra perda de qualidade abaixo de 12 GHz em enlaces digitais disponibilizadas para o território brasileiro.

**Palavras-chave:** Satélite geoestacionário. Qualidade de transmissão digital. Séries Temporais. Holt-Winters.

## ABSTRACT

### ANALYSIS OF THE RECEPTION QUALITY OF DIGITAL DATA BY GEOSTATIONARY SATELLITE IN KU-BAND IN A HUMID MESOTHERMAL REGION IN BRAZIL BY TIME SERIES

AUTHOR: Everton Lüdke

ADVISOR: Cleber Bisognin

CO-ADVISOR: Vanessa Siqueira Peres da Silva

The objective of the present study is to carry out a quantitative investigation into the statistical quality of a digital transmission made by a geostationary satellite in the lower portion of the microwave K band, characterized by frequencies between 10.2 and 11.5 GHz. To establish quality control of data retrieval, signal level data was collected in humid mesothermal region in the central region of the extreme south of Brazil at each ten-second time interval, from October 16, 2019 to September 8, 2020, coinciding with the beginning of a minimum of heliomagnetic activity. Throughout the text, an extensive and complete analysis of all possible factors of degradation of the statistical quality of the digital data flow and we conclude that extratropical cyclones on the southern Brazilian coast, light to moderate rains, interference with the alignment of the solar disk with the satellite's line of sight are not factors that alter the quality of the data for purposes practical. Seasonal signal level variability with the day-night cycle was discovered and the amplitude of the received signal is smaller during solar transit, probably due to atmospheric heating that produces complex solar phenomena. absorption of microwaves in this frequency range. These cycles cannot be interpreted by ARMS or ARIMA Box-Jenkins models efficiently, with the Holt-Winters model being the most suitable for inferring the observed properties of Frequency. The quality of the system developed for detecting digital satellite signals is also assessed using statistical methods. It is believed that the results discussed in this work can be applied to future studies on transmission quality on other frequencies. of digital internet via satellite such as 5G (above 26 GHz) and 6G (7-20 GHz) and loss of quality below 12 GHz available for Brazilian territory is unlikely to happen.

**Keywords:** Geostationary satellite. Digital transmission quality. Time series. Holt-Winters.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Diagrama de conexão elétrica dos diferentes módulos para coleta de informações estatísticas sobre a intensidade de sinal para canais mais baixos do transponder do satélite SKY. .... 21
- Figura 2 – Imagens obtidas pelo satélite Goes-16 dos ciclones extratropicais que atingiram o estado durante o ano de coleta de dados. .... 28

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Simulação da probabilidade de erro de um bit para modulação QPSK usada em transmissão de internet via satélite. ....	20
Gráfico 2 – Identificação de padrões de interferência solar em um período de coleta de dados a partir de 03/04/2012 usando o software PicoLog. O gráfico inferior mostra o detalhe da variação de amplitude do sinal recebido devido a captação do ruído solar correspondente ao pico "b". ....	25
Gráfico 3 – Previsão de atividade do ciclo solar 25 segundo análise por séries temporais pelo NOAA (NOAA, 2021). ....	27
Gráfico 4 – Estatística de ruído interno do sistema medidor de potência de RF (sensor HP8483A, medidor HP438A e osciloscópio digital PicoScope 2208). ....	34
Gráfico 5 – Gráfico de espalhamento $y(k)$ versus $y(k - 1)$ para avaliar a "memória" do sistema medidor com os dados da figura anterior. ....	35
Gráfico 6 – Gráfico da autocorrelação ACF. ....	36
Gráfico 7 – Gráfico da autocorrelação parcial. A área hachurada indica o nível de confiança $p=0,05$ . ....	37
Gráfico 8 – Resultados da aplicação do método de Séries Temporais. As linhas em vermelho implicam nas previsões teóricas do modelo obtidas com informações da primeira metade do grupo de dados superpostas aos dados da segunda metade. ....	41

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1	OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO .....	12
1.2	ORGANIZAÇÃO DA PRESENTE MONOGRAFIA.....	13
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>14</b>
2.0.1	Atenuação pelo espaço livre .....	14
2.0.2	Atenuação das micro-ondas pela atmosfera .....	15
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>16</b>
3.1	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA RECEPTOR .....	16
3.2	EFEITOS DE DEGRADAÇÃO DE AMPLITUDE DE SINAL.....	19
3.3	METODOLOGIA DE COLETA DE DADOS .....	21
3.4	INVESTIGAÇÃO DE FONTES DE INTERFERÊNCIA RELEVANTES NO PERÍODO .....	23
3.4.1	Ofuscamento pela passagem solar pelo feixe principal da antena.....	23
3.4.2	Interferência por tempestades geomagnéticas solares .....	26
3.4.3	Fenômenos climatológicos severos .....	27
<b>4</b>	<b>ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS</b> .....	<b>30</b>
4.1	ESTATÍSTICAS DE RUÍDO DO SISTEMA RECEPTOR .....	32
4.2	DECOMPOSIÇÃO DA SÉRIE TEMPORAL .....	38
4.2.1	O modelo de Holt-Winters.....	38
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>42</b>
5.1	SUMÁRIO DOS RESULTADOS OBTIDOS .....	42
5.2	FUTUROS DESENVOLVIMENTOS .....	43
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Um *controle de qualidade estatístico de processo*, o qual pode tanto englobar situações tanto sobre a produção de bens em linhas de montagem e o desempenho de uma equipe ou pessoal qualificado, visa avaliar em até que ponto a produção reflete e obedece a algoritmos de produção pré-estabelecidos.

Tal forma de controle tem como objetivo analisar o processo industrial e criativo, correção de falhas, avaliar necessidades de desenvolvimento de instrumental e máquinas manufaturadoras, buscando a satisfação dos clientes, o desenvolvimento social e comercial das partes envolvidas, eliminar desperdícios (MONTGOMERY, 2016), bem como visar a minimização da produção de resíduos ou expurgos poluentes que possam modificar ou agredir o meio ambiente (DERISIO, 2017). Em engenharia de produção, (MONTGOMERY; RUNGER, 2021) informa diversas metodologias de controle como métodos do ciclo PDCA, 5W2H, análise SWOT e o Diagrama de Ishikawa para recursos humanos e o método da soma acumulada (CUSUM) para produção de bens comercializáveis.

Sem fugir à regra, percebe-se no mundo de hoje, que os diversos setores envolvidos na produção de serviços de telecomunicações sempre envolverão altos custos de produção no setor eletroeletrônico e aeroespacial, folhas pagamento de equipe de projetistas altamente especializados dentro das ofertas de serviços de sistemas de distribuição em tecnologia 4,5 G e 5 G que constituem verdadeiros desafios tecnológicos para a engenharia moderna cuja extensa literatura especializada vem surgindo ao longo desse ano (HUADONG; SANSAVINI; MIN, 2021).

No Brasil e no mundo, tem-se percebido o surgimento de tendências no uso de sinais dos satélites terem suas frequências e número de transponders multiplicados pelo menos três vezes para poder comportar o tráfego de informações necessários que no novo sistema digital 5G irá requerer, transmitindo internet de muito banda larga tanto no campo quanto na cidade. Por exemplo, a EMBRATEL produziu uma nova geração de satélites com mais de 7 toneladas, o StarOne D2 para incluir essa tecnologia no Brasil e América Latina para atender às demandas de sistemas de recepção de TV digital residencial (TVROs), serviços de transferência de sinais de TV 4K entre estúdios, enlaces de internet banda larga para pessoas jurídicas, órgãos governamentais do setor público, conexões entre backbones de grandes centros urbanos e redes de cidades periféricas ("backhaul"), dentre outras aplicações.

No Brasil, em particular, em 2021 ocorreu o leilão das bandas 5G e bandas nas frequências de 700 MHz, 1300 MHz, 3500 MHz e 26 GHz estão disponibilizadas tendo em vista a construção de "smartcities", mostrando o forte interesse político-governamental em explorar financeiramente a faixa de micro-ondas em diversos segmentos do setor industrial e da administração pública, além da expansão da internet para regiões mais remotas do

território brasileiro.

Pelo fato das transmissões serem exclusivamente digitais, certamente envolvem um grande número variável de pacotes de dados disparados entre fontes e destinatários a todo o momento. A qualidade da transmissão de informações digitais, em especial a distribuição de vídeos sob demanda em formato UHD (4 k) via internet ou radioenlace via satélite necessita de uma análise estatística de qualidade cuja literatura é limitada, apesar da necessidade mundial de obter dados concretos sobre esse tema.

Nesse ponto, a implementação de um projeto investigativo de análise de qualidade e previsão ("forecasting") de sinais digitais provenientes de satélites geoestacionários para distribuição de informação digital na região sul do Brasil é necessária pois pode permitir criar conhecimentos práticos para futuros projetos de avaliação das estatísticas de telecomunicações.

No presente trabalho, relato os resultados obtidos de um projeto de monitoramento de qualidade de sinais televisivos na faixa de 10,2-11,5 GHz distribuídos para a região central do Rio Grande do Sul, que é caracterizada por região mesotérmica úmida que é a nova nomenclatura para o que conhecemos por "clima subtropical temperado".

## 1.1 OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO

Na região sul do Brasil, em processo atual de informatização das sociedades e desenvolvimento tecnológico, temos o clima tipo *mesotérmico úmido*. Segundo (BARRY; CHORLEY, 2012), climas tipo mesotérmicos não têm estação seca e com quatro estações do ano similares às regiões temperadas da Europa e América do Norte. Nesse tipo de clima, as características atmosféricas e pluviométricas dependem da ação da massa polar atlântica no outono e inverno, enquanto que no verão e primavera, as características climatológicas são determinadas pela massa tropical atlântica ((CAVALCANTI; DANNI-OLIVEIRA, 2007; CAVALCANTI; FERREIRA, 2021)).

Nesse contexto, elaborei o presente trabalho que propõe uma construção experimental para monitoramento da qualidade de sinais digitais recebidas no extremo sul do Brasil, em uma estação de recepção de TVRO adaptada para amostragem da amplitude do sinal recebido para cinco canais de um transponder de satélite comercial para distribuição de vídeos em formato HDMI, a fim de estabelecer as propriedades estatísticas de qualidade de sinal desde a primavera de 2019 (16 de outubro) até o inverno de 2020 (12 de setembro), a fim de coletar e interpretar resultados sobre o controle estatístico do processo sobre a distribuição de sinais digitais no extremo sul do Brasil.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DA PRESENTE MONOGRAFIA

Esse trabalho escrito, de natureza multidisciplinar entre a Física, Estatística e Engenharia de Telecomunicações deve ter sua revisão de literatura feita à medida que os conceitos necessários para interpretação são requisitados para a argumentação técnica e pelo transcorrer do texto.

Tendo em vista que a teoria revisada até agora indica diversos fatores que podem afetar a qualidade de recepção de um sinal digital, é importante observar os níveis de sinais a fim de poder inferir possíveis limitações na qualidade do sinal distribuídos no extremo sul do Brasil, aonde a literatura é inexistente até a data de hoje.

O texto dessa monografia de final de curso de especialização está organizado na seguinte forma: o capítulo 2 conterá a construção da fundamentação teórico-metodológica do "corpus" experimental, no capítulo 3 os procedimentos experimentais serão descritos, enquanto que no capítulo 4 apresentarei as discussões sobre a modelagem estatística usando séries temporais. Para finalizar, no capítulo 5, teremos as conclusões do presente trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Há muito tempo sabe-se que a transmissão e recepção de sinais de satélites, sejam eles digitais ou analógicos, são realizados pela modulação de informação humana sobre uma onda eletromagnética na faixa das micro-ondas, que são ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda mais curtos que 30 cm (1 GHz) segundo a classificação do espectro eletromagnético.

Micro-ondas podem ser atenuadas pela absorção parcial da intensidade da radiação por átomos, íons, radicais livres, elétrons e prótons livres ou por nuvens eletrônicas em orbitais atômicos e a densa atmosfera terrestre é um ambiente natural que contribui para a perda de sinal, somado à perda de sinal pela propagação da onda no espaço interplanetário, para satélites em órbita da terra.

### 2.0.1 Atenuação pelo espaço livre

A perda de sinal do satélite devido ao percurso da onda eletromagnética ("path loss") ocorre porque a energia da onda eletromagnética se distribui uniformemente por uma superfície esférica centrada no satélite e a área total é diretamente proporcional ao quadrado da distância  $D$  até o satélite.

No caso mais simples de um irradiador isotrópico posicionado no transmissor que irradia ondas eletromagnéticas monocromáticas com um comprimento de onda  $\lambda$ , com ganho  $G_t$ , uma potência transmitida de sinal  $P_t$  em Watts (W) produz uma intensidade de radiação a uma distância  $D$  dada por  $P_t G_t / 4\pi D^2$  medida em  $W/m^2$ . Na superfície da terra, uma antena receptora com área efetiva  $A$  apresentará um ganho  $G_r = 4\pi A / \lambda^2$  e a potência recebida será  $P_r = P_t G_t G_r (\lambda / 4\pi D)^2$ . Nessa expressão, o termo entre parênteses é a perda do fluxo de potência do sinal do satélite devido a geometria de propagação do espaço livre por onde a onda eletromagnética se propaga. Aplicando o logaritmo decimal em ambos os membros dessa equação, usando  $f = c/\lambda$  em GHz, distância  $D$  em km chegamos a fórmula da atenuação em potência pelo espaço livre medida em decibéis, a qual é dependente somente da frequência da onda para satélites geoestacionários como os normalmente empregados para internet via satélite e difusão de TV digital:

$$L(dB) = 92,4 + 20 \log f_{GHz} + 20 \log D_{km} \quad (2.1)$$

Em geral, haverá perdas de sinal devido a atenuação dos cabos de interconexão do sinal embora sejam bem menores que a atenuação geométrica e espera-se que sejam dependente somente da frequência.

Tal modelo simples prevê que o nível de sinal recebido é independente do tempo porque  $f$  e  $D$  são *invariáveis no tempo* para uma radioenlace que envolve satélites geostacionários.

Como satélites geostacionários que transmitem 5G são do tipo geostacionário, a distância entre os transponders e o topo da atmosfera terrestre é constante e, no vácuo interplanetário, espera-se que a atenuação pelo espaço livre seja invariável temporalmente, embora saiba-se que no clima espacial, material ejetado pelo sol nas chamadas tempestades solares durante os períodos de máxima atividade solar no ciclo solar de 11 anos possam alterar esse cenário.

## 2.0.2 Atenuação das micro-ondas pela atmosfera

Como em (PANAGOPOULOS; KANELLOPOULOS, 2002) e (PANAGOPOULOS; ARAPOGLU; COTTIS, 2004) pode-se descrever resultados experimentais clássicos sobre a atenuação atmosférica das micro-ondas, aonde os principais efeitos são do tipo *ionosféricos* para ondas com frequências abaixo de 3 GHz e os *troposféricos* (ou climatológicos) acima dessa frequência. Nos efeitos troposféricos, temos a perda de sinal devido ao *espalhamento hidrometeorológico* (acima de 26 GHz) e *absorção hidrometeorológica* (entre 8 e 26 GHz), aonde as gotículas de água, neve, granizo e gelo em suspensão na parte inferior da atmosfera, que são os hidrometeoros, com a taxa de perda de sinal pelo segundo fator, diretamente proporcional ao quadrado da frequência.

A absorção gasosa pelo vapor de água presente em nuvens, pelo  $O_2$  e  $CO_2$ , além dos gases do efeito estufa e chuva ácida são pertinentes, despolarização das ondas eletromagnéticas, aumento do ruído térmico do céu, e as cintilações troposféricas são outros fatores que podem mitigar a qualidade do sinal.

Portanto, fontes de variabilidade da qualidade do sinal serão consideradas dentre as descritas pela ação atmosférica e climatológica enquanto que a atenuação pelo percurso das micro-ondas pelo meio interplanetário não devem ser variáveis em períodos de baixa atividade solar.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

No presente capítulo, irei revisar os conceitos que norteiam a concepção do presente projeto, com ênfase sugestiva dos principais fatores que definem o ambiente de coleta de dados, começando com a descrição do sistema de recepção digital em bandas de frequências 5G que fazem parte da banda K.

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA RECEPTOR

Tanto para internet via satélite quanto para difusão de canais de televisão em HDTV, as características técnicas dos receptores são similares sendo que somente o sistema de modulação dos sinais e sua inserção na onda eletromagnética portadora do sinal são distintas. Com o advento das técnicas de modulação digital que envolvem fase mas não amplitude da onda, pode-se assumir que a amplitude da onda transmitida é mantida constante no tempo e o nível da transmissão para cada transponder é controlada automaticamente pelos sistemas de transmissão dos satélites.

A onda eletromagnética portadora do sinal se propaga a uma velocidade  $c = 2,999 \times 10^8$  m/s e apresenta um comprimento de onda  $\lambda$  em metros deduzida pelas equações de Maxwell para a propagação da onda no vácuo, sendo que essas grandezas são inter-relacionadas pela seguinte fórmula:

$$f = \frac{c}{\lambda}. \quad (3.1)$$

Atualmente, satélites de difusão de sinais de televisão também incorporam transponders de serviços de internet. Em particular, provedores comerciais como a HughesNet, Sky TV, Claro TV, e satélite Star One D1 da Embratel utilizam a banda Ka para essa finalidade.

As bandas de frequência  $f$  que os satélites empregam utilizam normas internacionais em duas bandas principais, a banda C e a banda K. A banda C compreende as frequências disponíveis para a estação receptora entre 3700 e 4200 MHz mais uma banda C estendida entre 3400-3700 MHz, correspondendo a um intervalo total de banda C completa entre 3400 e 4800 MHz. No Brasil, essa banda é exclusiva para TV analógica e digital via satélite. Como não compreende enlace de dados via internet, suas características não serão estudadas nesse trabalho.

A banda K é usada para transmissão de TV digital com resolução entre 720 (HDMI) e 1080i (HDTV) e internet, sendo do interesse desse trabalho. Essa banda é sub-dividida

pois os critérios técnicos para os instrumentos de detecção são bem diferentes entre si e obedece a seguinte convenção de nomenclatura técnica:

- Banda Ku completa com onda portadora entre 10750 a 12750 MHz;
- Banda Ku baixa, 10700-11700 MHz. Para recepção de televisão doméstica, os sinais nessa faixa são obtidas a partir de conversores posicionados no foco principal das antenas sem tonalidade de alimentação, com frequência do primeiro oscilador local em  $LO=9,75$  GHz correspondendo a um intervalo de frequências de 950-1950 MHz conduzidos pelo cabo RG-6 até o receptor conversor digital;
- Banda Ku alta, banda de sintonia entre 11700 a 12200 MHz. Para TV digital, os sinais de vídeo nessa faixa são obtidos pela inserção de um sinal tonal de 22 kHz que altera a frequência do oscilador local para  $LO=10,60$  GHz. O sinal que vem da antena para o receptor digital estará em uma banda de maior frequência, em 1110-2150 MHz de primeira frequência intermediária que vem pelo cabo RG-6 na direção do receptor;
- Banda Ku estendida nos limites de frequência entre 12200 a 12750 MHz;
- Banda Ka entre 17700 a 21200 MHz, ainda de uso experimental no Brasil e no momento não utilizada por usuários domésticos brasileiros.

Outro parâmetro relevante do sistema receptor de TV digital é a fonte de tensão contínua que é disponibilizada na entrada do receptor para alimentar o conversor colocado no foco principal da antena receptora e seu nível seleciona a polarização. Se estiver entre 11,5 e 14,0 volts, a polarização selecionada por tensão será a vertical. Entre 15,5 e 20,0 V, a polarização será a horizontal.

Nesse trabalho, seleciona-se uma tensão de alimentação de 13,5 volts estabilizada gerada pelo receptor para trabalhar apenas com polarização vertical. A seleção tonal de 22 kHz de banda será mantida desligada durante toda a coleta de dados mantendo o primeiro oscilador local em 9750 MHz e permitindo a recepção de todos os canais de sinais na banda Ku baixa (10700-11700 MHz) disponibilizados na bandas baixa de frequência intermediária entre 950 e 1950 MHz.

Os satélites são posicionados a uma altitude geoestacionária cujo período de rotação do satélite ao redor da terra é exatamente o período de rotação da terra de forma que o movimento relativo é nulo e o satélite estará fixo na esfera celeste, sobre a projeção da linha do equador nessa esfera (declinação nula no equador celeste). A ascensão reta do satélite (longitude) é a distância angular do satélite ao ponto aonde a projeção do meridiano de Greenwich (zero graus de longitude) intercepta o equador celeste. Satélites das regiões das Américas (Norte e Latina) estarão posicionados em longitudes entre 61 e 151 graus oeste de Greenwich. Satélites na área atlântica estarão compreendidos entre 0 a 60 graus oeste.

Como o Brasil é um país com extensa fronteira com o oceano Atlântico, é servido primariamente por satélites com faixa de longitude entre 0 e 60°W. No presente trabalho, escolhemos usar o satélite do serviço Sky TV pelo fato de ter uma boa linha de visada nas coordenadas geográficas de Santa Maria, RS. Para Santa Maria, latitude  $LAT = -29.6914^\circ$  sul (S), longitude  $LON = -53.800829^\circ$  oeste (W) e altitude 139 m acima do nível do mar. Nessas coordenadas geográficas temos 20,88 graus de azimute com respeito a direção norte do meridiano do local e o valor de  $53,44^\circ$  para elevação para apontamento da antena.

No presente ano, o serviço da SKY TV é fornecido por dois satélites colocados muito próximos entre si sem superposição de frequências dos transponders de polarização linear, na longitude equatorial de  $43,1^\circ$ W, ambos com expectativa de vida útil de 15 anos. Um deles é o Intelsat 11 com 16 transponders em banda C e 18 transponders em banda Ku sendo lançado em 05/10/2007 e que transmite para as Américas (banda Ku) e Europa ocidental (banda C). O satélite mais recente é o Sky Brasil-1 que opera exclusivamente em polarização linear em banda Ka/Ku com 60 transponders em banda Ku e 21 transponders na banda Ka, tendo sido lançado em 14/02/2017. Para difusão em TV digital de cobertura em território brasileiro, usa-se os transponders em banda Ku enquanto que os transponders de banda Ka são para canais regionais.

O receptor digital usado foi um modelo padrão da SKY para visualização da transmissão do canal aberto do cliente HD1080i 16:09 padrão NTSC em banda Ku na frequência de portadora de 10722 MHz vertical. Segundo informações do receptor, temos uma taxa de símbolos  $SR = 30000$  símbolos por segundo,  $FEC = 3/4$  e modulação padrão DVB-S com modulação de fase  $8PSK$  ("octal phase shift keying") ou QPSK ("Quadrature Phase Shift Keying") conforme norma EN 302.307. Usando um analisador de espectro medimos que os canais são recebidos entre 10722 até 11382 MHz são separados por cerca de 80 MHz entre si. Esse sistema de modulação assegura que a amplitude do sinal de cada canal não seja afetada pela presença de qualquer tipo de informação de vídeo e áudio que possa ser distribuído pela programação.

Nesse trabalho, definiremos o termo *extinção completa do sinal* quando a imagem monitorada do canal do cliente apresentar quadriculados coloridos dominantes ou desaparecer completamente, o que significa que a taxa de recepção é menor que o limite mínimo de 2 megasímbolos por segundo garantido pelo fabricante e a imagem não pode ser mais reconstituída pelo processador de vídeo MPEG-2 padrão ISO/IEC 13818. Consideramos um sinal válido aquele que produz uma transmissão normal no canal do cliente HD, sem alterações visuais na imagem ou áudio captados.

Para sistemas de internet providos pela HughesNet, a transmissão e recepção da onda portadora é incorporada no mesmo módulo no foco principal da antena enquanto que para TV temos somente a recepção. A transmissão de internet na direção do satélite ocorre entre 14000-14500 MHz e a banda de recepção nessas antenas ocorre entre 11700-12200

MHz (a mesma da banda Ku alta).

Como as frequências da onda portadora para recepção da internet (QPSK) e sinal de TV via satélite (8-PSK) são similares entre si, os resultados obtidos nesse trabalho com observação da amplitude recebidas dos sinais de satélites em banda Ku baixa e correspondente análise por séries temporais podem ser usados para dar subsídios para planejamento de sistemas de recepção de internet sem maiores restrições técnicas entre os dois provedores de serviços de telecomunicações.

### 3.2 EFEITOS DE DEGRADAÇÃO DE AMPLITUDE DE SINAL

No decorrer desse texto, pela palavra *senal* entenderemos a densidade de potência da onda eletromagnética recebida pelo módulo receptor LNB situado no foco principal da antena, esperamos que o mesmo seja uma grandeza temporalmente invariável para recepção de satélites geoestacionários e que se reflete na amplitude do nível de potência de sinal de frequência intermediária disponível no cabo que alimenta o receptor aonde os canais são recebidos que podem ser medidos com uma analisador de espectro ou detetor de potência absoluta. Ambos os equipamentos fornecem um número correspondente à leitura do nível de potência total recebido por todos os canais dentro da banda de e 950-1950 MHz na entrada do receptor usando os ajustes de receptor para polarização vertical e detecção de canais transmitidos pelo satélite em banda Ka.

O sinal total medido  $S_t$  será a soma da potência do sinal transmitido pelo satélite  $P_t$ , corrigido pela ação do ganho total do receptor  $G_r$ , menos as perdas de sinal devido aos cabos e conexões ( $L_c$ ), a atenuação geométrica ( $L_g$ ) e a atenuação atmosférica ( $L_a$ ) mais um termo que contem a contribuição do ruído do receptor  $\eta_r$  mais um ruído atmosférico  $\eta_a$ . Logo, o sinal no cabo de saída da antena será uma contribuição devido a intensidade constante recebida da onda portadora  $S_r$  e as variáveis aleatórias dependentes do tempo  $t$  e que incluem a contribuição total de ruído e atenuação do sistema receptor, juntamente com a contribuição do ruído  $\theta_r$  e a atenuação atmosférica  $\phi_a$ . Todas essas contribuições são aditivas ao sinal captado e assume-se que os termos de ruído possuem função-distribuição de probabilidade (FDP) na forma de ruído Gaussiano ("white noise") com  $\eta(t) = \theta_r(t) + \phi_a(t) \sim N(0, \sigma^2)$ .

$$S_t(t) = S_r + \eta(t) \sim N(P_r, \sigma^2) \quad (3.2)$$

A relação sinal-ruído na banda do canal será  $SNR = P_r/N_0B$  e a banda passante do sinal transmitido é  $B$ .

A energia por bit  $E_b$  é a energia eletromagnética disponibilizada durante o tempo de

duração de um bit dentro de um símbolo, que contém cerca de 12 bits para TV ou 8 bits para mensagens texto via internet. A relação sinal-ruído por símbolo será  $\gamma_S = E_S/N_0$  e  $\gamma_B = E_B/N_0$  é a razão sinal-ruído por para cada bit recebido pelo receptor.

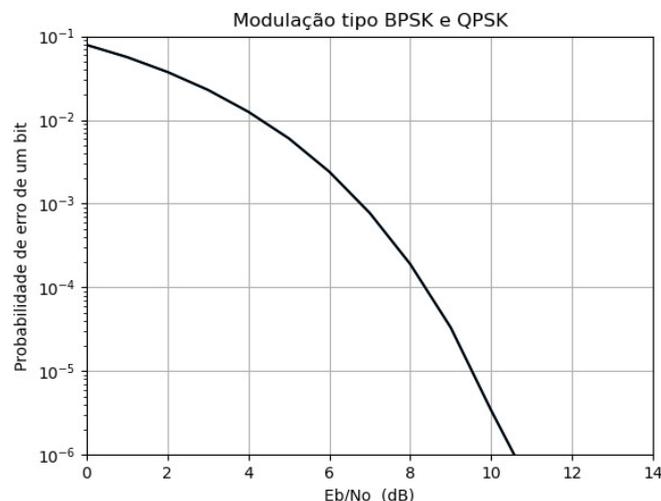
Pela teoria de sistemas de comunicação digitais, sabe-se que probabilidade de erro de um bit transmitido para uma codificação BPSK/QPSK e 8-PSK são dadas em termos da função  $Q$ :

$$P_b(QPSK/BPSK) = Q\left(\sqrt{2\gamma_b}\right) \quad Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-p^2/2} dp \quad (3.3)$$

A probabilidade de erro do símbolo para quantização PSK de  $M = 8$  níveis de fase é dada por:

$$P_s = 1 - \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/M}^{+\pi/M} e^{-\gamma_S \sin^2\theta} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{(z - \sqrt{2\gamma_S} \cos\theta)^2}{2}\right) dz d\theta \quad (3.4)$$

Gráfico 1 – Simulação da probabilidade de erro de um bit para modulação QPSK usada em transmissão de internet via satélite.



Fonte: Próprio autor.

O gráfico 1 acima mostra o resultado da simulação numérica feita pelo autor usando um código escrito em linguagem Python para obter soluções das equações 3.3 e 3.4. Por inspeção verifica-se que, na ausência de ruído, a probabilidade de erro se torna desprezível na prática quando a intensidade recebida na antena receptora for  $E_b/N_0 < 6$ . Isso significa que um eventual aumento do nível de ruído atmosférico (interferência solar que induz variações de temperatura) ou aquecimento da antena e LNB pela luz solar direta em função do nível de sinal propriamente dito é improvável em aumentar a probabilidade de

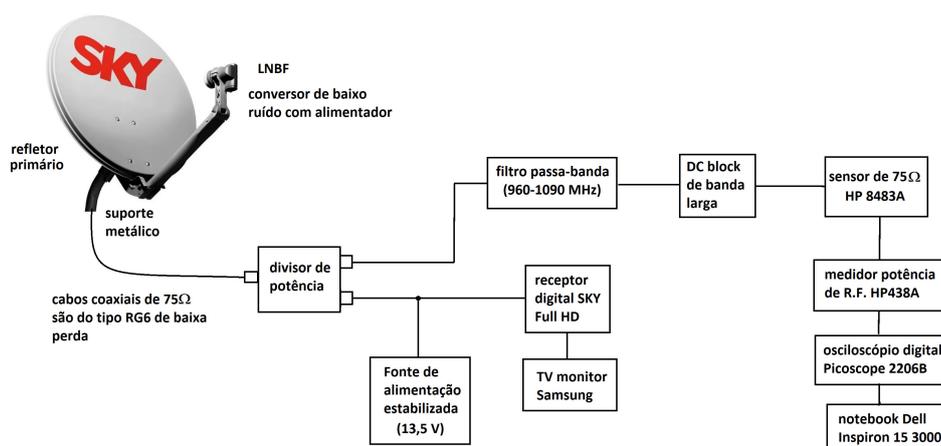
erro, o que constitui o critério estatístico de perda absoluta de sinal e define a qualidade da recepção.

Pode-se esperar, portanto, que o aumento da probabilidade de erro se deverá somente à eventual atenuação do sinal do satélite por instabilidades atmosféricas que seria um mecanismo esperado mais efetivo na degradação do sinal digital tanto de televisão quanto de internet, e não pela contribuição da atmosfera ao ruído térmico na entrada do receptor, que depende de fatores complexos da física atmosférica como o resfriamento radiativo que pode gerar um ciclo diurno-noturno da atenuação de micro-ondas, dentre outros fatores (LIOU, 2002; PETTY, 2006; ANDREWS, 2010).

### 3.3 METODOLOGIA DE COLETA DE DADOS

Os procedimentos metodológicos do corrente trabalho consiste em implementar um sistema de monitoramento da relação sinal-ruído na entrada de um receptor comercial compatível com o serviço Sky TV, instalado nas coordenadas da cidade de Santa Maria, RS próxima ao extremo sul do Brasil. Pela obliquidade de apontamento da antena, é a configuração que apresenta tanto o menor sinal captado pelo satélite, quanto uma maior absorção atmosférica integrada ao longo da linha de visada do satélite, através da atmosfera.

Figura 1 – Diagrama de conexão elétrica dos diferentes módulos para coleta de informações estatísticas sobre a intensidade de sinal para canais mais baixos do transponder do satélite SKY.



Fonte: Próprio do autor.

A figura 1 acima ilustra o diagrama de conexões dos módulos que compõem o sistema de aquisição de dados estatísticos desenvolvido nesse trabalho e que foi utilizado

para monitoramento dos sinais de vídeo digitais em Full HD (1080p) e que pode ser instalável em qualquer ponto do território Brasileiro para avaliação estatística da qualidade do sinal digital produzido por qualquer satélite geoestacionário.

Medidas de calibração do sistema da figura 1 permite especificar que 1 Volt na escala corresponde a 7,97 dBm em medida de nível de sinal e que o nível de ruído com o LNB bloqueado por uma chapa condutora de alumínio corresponde a cerca de -33,4 dBm sem a presença do sinal do satélite.

Dessa forma, quaisquer resultados obtidos pela metodologia experimental consistirão no pior dos cenários para transmissão digital de internet e televisão via satélite em território brasileiro, contribuindo para a importância técnica de qualquer possível resultado obtido, uma vez que o percurso entre o sinal de um satélite geoestacionário sobre o equador será máximo para uma linha de visada que envolva o estado do Rio Grande do Sul.

A antena receptora consiste em um refletor parabólico tipo "offset" com 60 cm de diâmetro modelo SOA107-060X e um LNBF universal de saída simples LNBF BS-60226-1 de baixo ruído, ambos fabricados pela Brasilsat Harald para uso em banda Ka e Ku. O receptor Sky TV empregado foi o recomendado pela provedora de serviço de TV por assinatura para monitoramento da qualidade de imagem digital recebida pelo canal do cliente HDTV. A antena e LNBF instalada foi conectada a um cabo RG-6 de 75 ohms de impedância de alta qualidade com um comprimento total de 6 metros até o receptor. (LECUONA; LACERDA, 2015a) efetuaram testes extensivos sobre o comportamento elétrico e mecânico de tal modelo de antena e mostraram ser bastante estável sob condições normais de instalação (LECUONA; LACERDA, 2015b).

O sinal na extremidade do cabo foi nivelado por um amplificador de linha de 20 dB de ganho e sua saída foi colocada em um divisor de potência de sinal. Uma saída do divisor foi acoplada ao receptor de TV digital. A segunda saída foi conectada a um filtro com banda passante entre 950 e 1800 MHz. A saída do filtro foi colocada em um bloqueador de nível DC em série com um módulo sensor de potência de RF externo de 75 ohms tipo HP8483A com sensor de termopar diferencial interno. O sensor foi acoplado a um medidor de potência digital de micro-ondas tipo HP438A.

A saída analógica do painel traseiro do HP438A produz um sinal entre 0 e 1 volt proporcional à potência de entrada medida pela sonda externa, correspondente ao intervalo de potência média entre de -30 a +20 dBm (50 dB de faixa dinâmica).

O nível de tensão de saída do sinal do medidor de potência foi amostrada continuamente em intervalos de 15 segundos por um osciloscópio analógico PicoScope 2208 de 200 MHz e taxa de amostragem máxima de 1 gigasamples/s. O aplicativo PicoLog rodando em um notebook i7 usando Windows 10 foi usado para armazenamento dos dados em blocos de 20 dias de duração resultando em um arquivo de dados tipo texto que foi transferido ao software R para análise e identificação de séries temporais com respeito a atenuação do sinal pela atmosfera terrestre. A cada final de um período de 20 dias, o

sistema foi completamente recalibrado antes do início de um novo turno de medidas e toda a parte interna de recepção foi mantida a uma temperatura de 21°C por um sistema climatizador de ambiente. O primeiro bloco de dados possibilitou identificar uma sazonalidade nas flutuações do nível de potência do sinal recebido na banda Ka e produzir o código em Python para análise das séries temporais com resultados coincidentes com a análise das rotinas padrão dentro da suíte R.

Os dados foram coletados entre o dia 15 de outubro de 2019 e 15 de agosto de 2020, correspondendo a todas as estações do ano, sob diversas condições climatológicas. A figura

### 3.4 INVESTIGAÇÃO DE FONTES DE INTERFERÊNCIA RELEVANTES NO PERÍODO

Como esse trabalho permite associar fontes de interferência no sinal devido a diversos fatores atenuantes que podem interferir na variabilidade estatística do sinal recebido, temos que levantar os efeitos de todas as prováveis causas, que serão descritas nessa seção.

#### 3.4.1 Ofuscamento pela passagem solar pelo feixe principal da antena

As características de recepção da antena de 60 cm usada na parte experimental desse trabalho foram medidas em ensaios de transmissão e recepção ao ar livre por outros autores. Usando um critério de interferência na área celeste coberta pelo feixe primário da antena.

A interferência da ação solar sobre os lobos secundários foram desprezadas porque sinais coletados pelos mesmos seriam 22 dB abaixo daquele detectado na direção de apontamento principal da antena. Usando um critério de largura do feixe a 5 dB abaixo da sensibilidade máxima na direção de apontamento, teríamos interferência solar em uma área celeste de 3,6 graus de diâmetro, ou cerca de sete vezes máximo tamanho angular solar no verão. Nessa proporção, o tempo de trânsito será definido pela resposta espacial da antena ao invés do tamanho do angular do disco solar.

Assim, com o sol em trânsito direto na direção de apontamento da antena e sabendo que sua velocidade de trânsito é cerca de 4 minutos por grau percorrido na direção leste-oeste, espera-se que um aumento do nível de sinal ocorra por uma duração máxima de aproximadamente 15 minutos.

Outro aspecto a ser identificado como interferência solar, é definir em que período do ano ocorrerá passagem do sol ao fundo do satélite, de forma que a radiação eletromag-

nética solar se some ao sinal recebido pelo satélite. Isso significa que deve-se definir em que época do ano, o satélite, em algum momento, estará exatamente entre o sol e a terra.

Pelo termo *declinação astronômica*, entendemos a distância angular entre a projeção do equador terrestre na esfera celeste e um determinado corpo celeste. Ao contrário das estrelas distantes, a declinação solar  $\delta_{\odot}$  depende fortemente da época do ano, variando entre  $\delta_{\odot} = -23.44^{\circ}$  no solstício de verão (ocorrido entre 20-21 de dezembro de 2019) e  $+23.44^{\circ}$  no solstício de inverno (entre 20 e 21 de junho de 2020). No solstício de inverno, os raios solares incidem perpendicularmente a qualquer posição sobre o trópico de câncer enquanto que no solstício de verão, a incidência perpendicular ocorre no trópico de capricórnio. A direção dos raios solares incidem perpendicularmente sobre a linha do equador celeste nos equinócios de outono (ou equinócio vernal entre 20-21 de março 2020) e equinócio de primavera (22 e 23 de setembro 2020) e em ambos os equinócios,  $\delta_{\odot} = 0^{\circ}$ .

A declinação solar segue a equação da trajetória da eclíptica na esfera celeste e pode ser escrita em função do número de dias siderais decorrido a partir de primeiro de janeiro de cada ano. Se  $N_d$  for o número de dias do ano regular do calendário entre um minuto após a meia-noite de 1 de janeiro de 2020 (10 dias após o solstício de verão no sul do Brasil) em uma aproximação de movimento harmônico simples da translação terrestre, suficiente para pequenos telescópios:

$$\delta_{\odot}(N_p) = -23.44 \cos \left[ \frac{360(N_p + 10)}{365} \right] \quad (3.5)$$

Supondo que  $H$  seja o ângulo horário do sol definido de forma que o sol nasce a -6 horas e se põe a +6 horas com trânsito sobre o meridiano de Santa Maria em  $H=0$  horas,  $\delta_{\odot}$  a declinação solar no dia da medida, o azimute  $AZ$  e a elevação  $EL$  do sol com respeito a direção norte do meridiano local de Santa Maria serão dados pelas seguintes expressões astronômicas simples:

$$\text{sen}(EL) = \text{sen}(\delta_{\odot}) \text{sen}(LAT) + \cos(\delta_{\odot}) \cos(LAT) \cos(H) \quad (3.6)$$

$$\cos(EL) = \sqrt{1 - \text{sen}^2(EL)} \quad (3.7)$$

$$\cos(AZ) = \frac{\text{sen}(\delta_{\odot}) - \text{sen}(LAT) \text{sen}(EL)}{\cos(LAT) \cos(EL)} \quad (3.8)$$

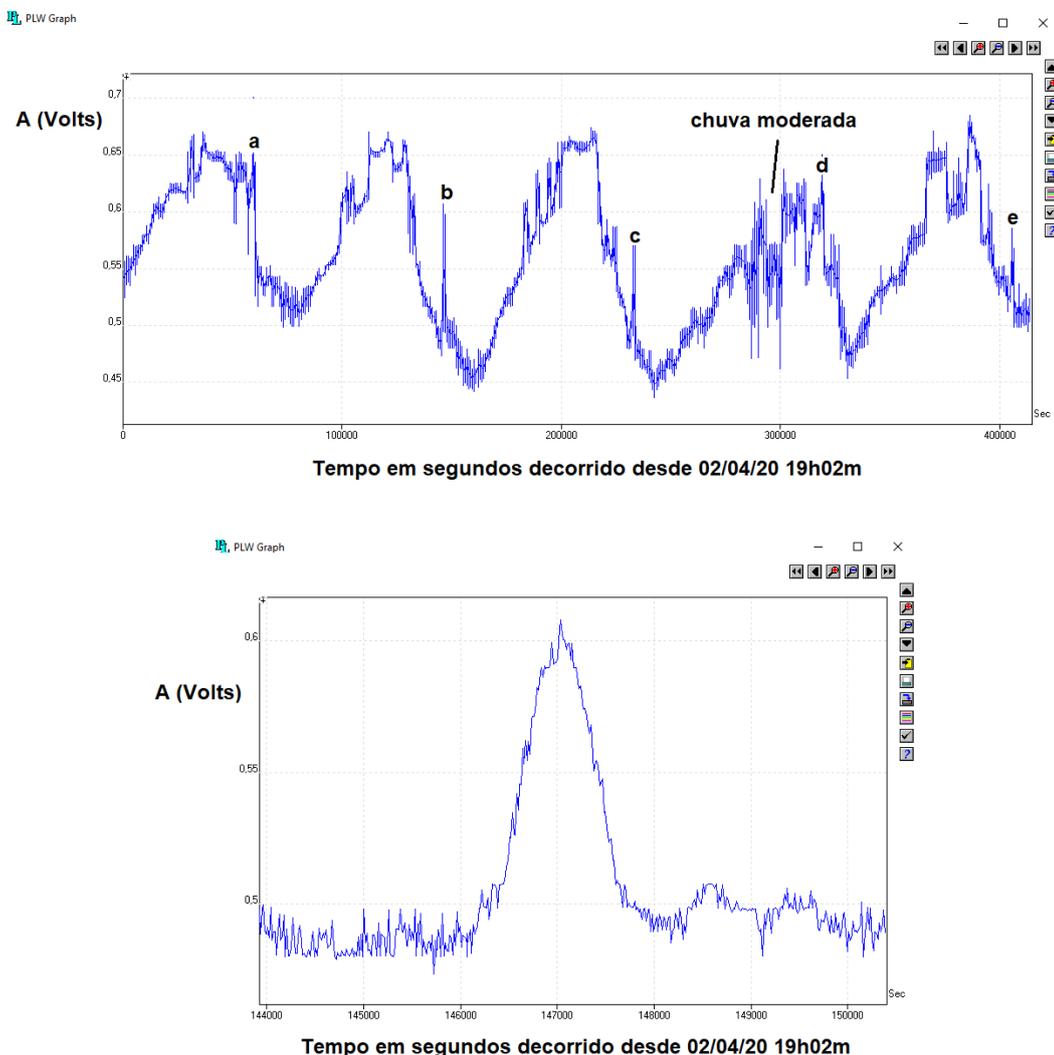
De posse dos valores de azimute e elevação correspondentes às coordenadas do satélite Sky TV (ou Intelsat 11), esse grupo de equações permite prever que o disco solar estará exatamente na mesma direção do feixe principal de apontamento da antena ao satélite em algum momento do dia, quando a declinação solar for  $\delta_{\odot} = 5.1 \pm 1.8$ . Pela equação da evolução da declinação solar ao longo do ano, isso corresponderá a  $94 \pm 4$

dias e  $251 \pm 4$  dias passados o dia 01/01/2020.

A análise dessas equações astronômicas válidas para pequenos telescópios permite, então, concluir que espera-se forte contribuição da captação direta das micro-ondas solares que podem interferir com a potência medida na banda Ka na direção de apontamento da antena no período de 31/03/2020 a 08/04/2020 e entre 04/09/2020 a 12/09/2020.

Durante a duração da interferência solar direta, com previsão de corrupção de cerca de 15 minutos dentro do dia, correspondendo a 60 pontos amostrais durante o trânsito solar em oposição ao satélite.

Gráfico 2 – Identificação de padrões de interferência solar em um período de coleta de dados a partir de 03/04/2012 usando o software PicoLog. O gráfico inferior mostra o detalhe da variação de amplitude do sinal recebido devido a captação do ruído solar correspondente ao pico "b".



Fonte: Próprio autor.

O gráfico 2 (parte superior) mostra a amplitude do sinal versus tempo em segundos decorrido desde as 19 horas do dia 02/04/2020 com a identificação de aumentos bruscos da potência de micro-ondas recebida pela antena (a,b,c,d,e) durante o período aonde se

espera máxima interferência solar e os padrões são identificados com as primeiras letras do alfabeto. Usando o aplicativo Picolog e com uma escala de amplitude de 7,97 dBm/V, percebe-se que a largura dos picos são cerca de 16 minutos e a amplitude média da interferência solar encontrada foi 1,2 dBm, ou cerca de 1/3 da diferença média de amplitude do sinal entre o dia e a noite. Assim, comprovamos que o posicionamento sazonal do satélite na linha de visada direta com o sol sobre o feixe principal da antena são insuficientes para degradar o sinal na faixa de frequências observada.

Ainda com referência aos padrões (a-e) no gráfico 2, medindo os instantes de tempo aonde os mesmos ocorrem, vemos que há uma diferença similar entre as suas ocorrências com valor médio de 86500 segundos ou cerca de 24 horas.

No detalhe inferior do gráfico 2, verifica-se o acréscimo de nível de sinal do pico "b" no trânsito solar mostrando a característica do feixe primário de antena que concorda com os diagramas de radiação obtidos nas medições dos campos eletromagnéticos realizados por (LECUONA; LACERDA, 2015a).

Como a duração dos picos e sua periodicidade de exatamente um dia são critérios esperados para a identificação de incidência direta do sol dentro do feixe primário da antena, podemos confirmar a irrelevância desse efeito na degradação estatística do sinal recebido.

Por outro lado, os valores dos níveis de interferência solar direta não são desprezíveis no protótipo experimental construído e, portanto, devemos excluir os dois períodos anuais de interferência solar direta da análise de séries temporais, segundo as datas calculadas anteriormente.

### **3.4.2 Interferência por tempestades geomagnéticas solares**

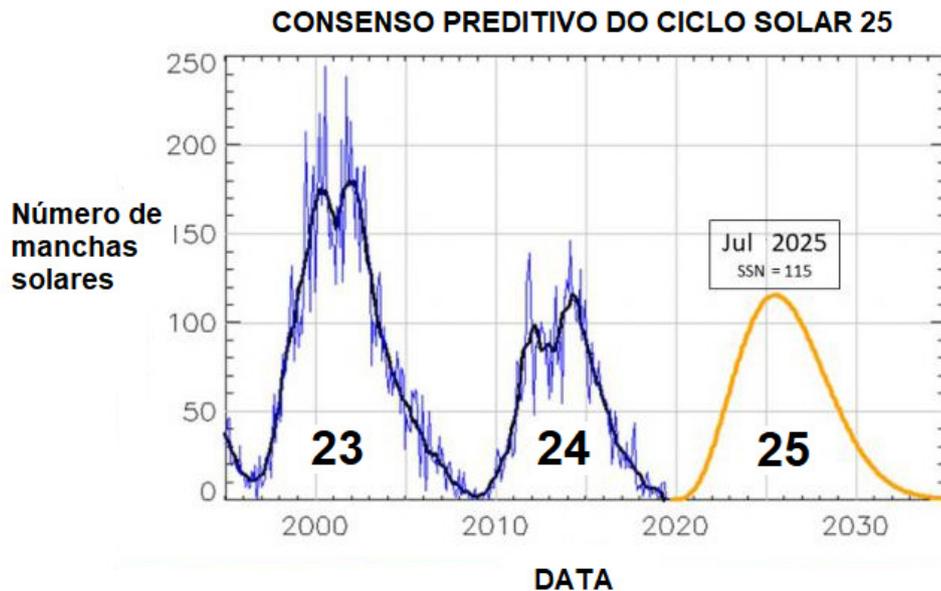
Certamente uma aplicação importante da modelagem por séries temporais é a previsão da atividade solar. A presença de manchas solares ou "coronal holes" ocorre pela redução súbita da temperatura média da superfície solar em algumas regiões e a amplificação do campo magnético local.

Nessas manchas, ocorre intensa atividade heliomagnética e o plasma solar é capturado pelas linhas de campo magnético nos buracos coronais. Material solar pode se desprender dessas regiões e atingir a terra no fenômeno denominado tempestades geomagnéticas solares, que são intensas a ponto de afetar as telecomunicações e a produção de raios X e micro-ondas pela coroa solar. Acredita-se que a incidência de partículas ultrarrelativísticas na porção alta da atmosfera durante máxima atividade solar possa influenciar no aquecimento global e na opacidade atmosférica nas frequências usadas em telecomunicações.

Observando o gráfico 3, temos as previsões do próximo ciclo de atividade solar,

denominado de "Ciclo 25" de modo que o mínimo da atividade solar ocorrerá entre os ciclos 24 e 25, ou seja em abril 2020 com uma duração de mais ou menos seis meses e o ciclo solar 24 será o maior já identificado com um período de 11,4 anos. A previsão do máximo solar indica que pode ocorrer em julho de 2025 com intensidade similar ao ciclo 24, com um valor máximo de 115 buracos coronais (NOAA, 2021).

Gráfico 3 – Previsão de atividade do ciclo solar 25 segundo análise por séries temporais pelo NOAA (NOAA, 2021).



Fonte: Adaptado de (NOAA, 2021) pelo autor.

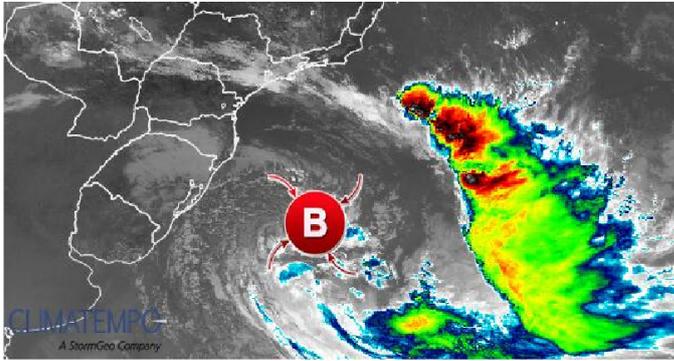
Segundo observações de tempestades geomagnéticas, vemos que desde que a coleta de dados foi iniciada, o número máximo de manchas solares não excedeu 20 unidades e não foram detectadas tempestades geomagnéticas de fraco a moderado no segundo semestre de 2019 e primeiro semestre de 2020.

Isso implica que, como as presentes observações foram praticamente feitas ao redor de um mínimo de ciclo solar (entre o final do ciclo 24 e início do ciclo 25, as séries temporais obtidas para a totalidade do nosso conjunto de dados coletados não será contaminado significativamente por formas de absorção atmosférica ou alterações nas características da transmissão do satélite pela atividade do meio interplanetário ou alterações no clima espacial e serão livres de contaminação pela atividade magnetodinâmica da coroa solar.

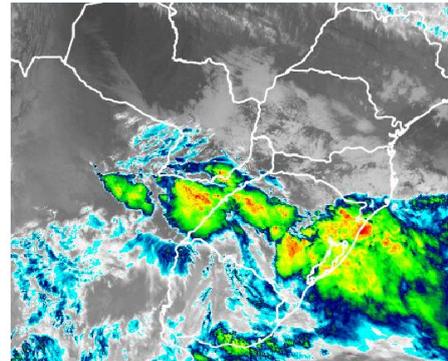
### 3.4.3 Fenômenos climatológicos severos

A figura 2 mostra os dois ciclones extra-tropicais que ocorreram durante os meses de coleta de dados e que são potenciais agentes interferentes pelas alterações atmosféricas violentas que provocam.

Figura 2 – Imagens obtidas pelo satélite Goes-16 dos ciclones extratropicais que atingiram o estado durante o ano de coleta de dados.



Ciclone extratropical de 3 de abril de 2020 10h



Ciclone-bomba em 30 de junho de 2020 6h

Fonte: CPTEC/INPE.

Em 3 de abril de 2020, no período manhã, ocorreu a passagem de um ciclone extratropical que provocou ventos de 153 km/h no litoral sul de Santa Catarina entre 10 e 11 horas e ventos cima de 90 km/h entre 7-10 horas da manhã e forte ressaca no litoral norte do Rio Grande do Sul no dia 4 de abril.

Para esse ciclone que teve efeitos severos no litoral, não foi possível identificar padrões anormais de interferência na recepção do sinal em Santa Maria até dois dias do início da amostragem que possa ser atribuído a presença de um ciclone extratropical moderado na costa dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, em comparação com os demais dias aonde ocorreu um episódio de chuva moderada após 4 dias do horário mais severo de ventos litorâneos e ressaca do mar relatados para a passagem do ciclone.

Em 3 de junho 2020 as 6 horas da manhã, intensas chuvas se iniciaram por causa de um ciclone extratropical repentino e de alta intensidade que a mídia televisiva denominou "ciclone-bomba" bem mais intenso que o anterior e de início repentino.

Ambos os ciclones que ocorreram no período de coleta de dados não apresentaram efeitos de absorção significativa do sinal, na região central do Rio Grande do Sul, por mais que as nuvens de tempestade tenham ocorrido diretamente entre a linha de visada com o satélite.

Por ter havido um longo período de estiagem com temperaturas de verão entre 36 e 42 graus em 2020, e escassos índices pluviométricos com duração anormal no verão e outono, deve-se ter a certeza que a umidade atmosférica de baixa altitude como nuvens de chuva de moderada a forte não contribuíram para contaminar a absorção atmosférica ao

sinal recebido pelo satélite em um nível maior que 0,2 dBm, o que é desprezível em nossa análise por não terem sido associados com alterações na taxa de recepção de bits.

Afastando, então, ação de fontes conhecidas de interferência em possíveis degradações de qualidade estatística do sinal recebido, podemos utilizar os dados coletados para análise preditiva pelo método das séries temporais, o objetivo desse trabalho.

## 4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

A metodologia de análise estatística de dados por séries temporais é uma ferramenta poderosa para detecção e classificação de fenômenos que podem afetar dados obtidos de experimentos, se o prazo da coleta de dados for longo o suficiente para detectá-los. Assim, a variável independente se torna o tempo decorrido desde o início da amostragem de dados, de uma quantidade  $Y$  que representa a quantidade de interesse representada como uma variável estatística.

Por uma série temporal entende-se uma sequência ordenada de valores  $y_t$  de uma variável mensurável de interesse experimental  $Y$  obtida em intervalos de espaçamento iguais entre si, conhecido como "lags".

A análise por séries temporais de sinais recebidos por satélites de telecomunicação permite prever a qualidade da distribuição de informação de uso humano como internet e televisão digital de alta definição.

Assim, pretende-se nesse trabalho usar a técnica estatística da análise por séries temporais (MORETTIN; TOLOI, 2018) para prever uma ou mais das seguintes características da variabilidade temporal:

- **tendência:** permite verificar como a variável estatística se comporta como o tempo, apresentando um comportamento aditivo ou subtrativo com o tempo;
- **sazonalidade:** permite verificar se um dado comportamento é mais expressivo em determinada data ou horário e em que horários são menos evidentes;
- **irregularidades:** são efeitos esporádicos e imprevisíveis que não podem ser caracterizados por um período de ocorrência;
- **efeitos cíclicos:** permite identificar periodicidade entre eventos que alteram os dados de forma não-desprezível ou verificar se algum outro efeito ocorre durante o período total em que a aquisição dos dados ocorreu.

Define-se a propriedade de *estacionariedade* aquela característica que tem um comportamento particular em um período de tempo, com uma alta probabilidade que será repetida em algum momento do futuro. Em geral, espera-se que tenha média e variância constante e uma autocovariância que não dependa do tempo e pode ser removida dos dados por um processo de modelagem regressiva e subtração dos dados pelo modelo para verificar se esses resíduos são de natureza puramente estocástica.

Em um primeiro momento, pode-se usar estatística de rolagem pela simples inspeção visual das amostras da variável aleatória e verificar se a média ou variância dos dados aumenta ou diminui com o tempo mas esse método não pode ser usado para análise de qualidade do processo sob estudo.

Teste ADF (do inglês "Augumented Dickey-Fuller") é o teste estatístico normalmente indicado para confirmar se a série temporal é não-estacionária e envolve uma estatística de teste e alguns valores críticos para tomada de decisão.

Dentro da teoria atual de séries temporais, (MORETTIN; TOLOI, 2018) (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2018), podemos identificar os seguintes sub-modelos genéricos de análise:

1. Ruído branco: também conhecido como "white noise" define uma série de natureza puramente aleatória, com esperança nula da medida para qualquer tempo, variância constante  $\sigma^2$  e é atribuída uma variável aleatória completamente não correlacionada entre si. Como não pode ser identificado um padrão, é impossível seu uso para inferências de quantidades futuras a partir de amostras medidas em um dado instante de tempo e medidas de ruído branco não podem ser descritas por qualquer modelo de série temporal, por definição;
2. AR ou "Autoregressive Model": O valor presente do dado correspondente a variável sob medida depende somente dos seus valores prévios e o modelo no qual depende de uma combinação linear dos seus  $p$  valores prévios é  $AR(p)$ . Os modelos AR são conhecidos por descrever processos autocorrelacionados com componentes puramente aleatórios sobrepostos;
3. MA ou "moving average model" é aquele no qual uma dada medição da variável sob estudo depende somente dos termos de erros aleatórios que seguem características de ruído branco. Assim, um valor medido dependerá da combinação linear dos ruídos associados a  $p$  instantes de tempo prévios em um modelo  $MA(p)$ ;
4. A generalização de modelos AR e MA é chamada  $ARMA(p, q)$  que é simplesmente a contribuição de um modelo  $AR(p)$  a um modelo  $MA(q)$ . Assim, em um modelo ARMA, temos que um dado valor em um instante de tempo dependerá dos  $p$  valores prévios da variável e de  $q$  valores prévios das variâncias dos ruídos brancos.

Uma série temporal é *Estritamente Estacionária* se as distribuições finito-dimensionais (funções de distribuição conjuntas) não dependem do tempo e sim da quantidade de variáveis aleatórias incluídas para o cálculo da função de distribuição. A detecção de séries estritamente estacionárias implica em uma média, variância e covariância também independentes do tempo enquanto que uma série é fracamente estacionária se as covariâncias dependerem do "lag"(NIELSEN, 2019).

Para estabelecer essa avaliação, deve-se usar a função de autocorrelação (ACF)  $\rho_k$  e as funções de autocorrelação parciais (PACF) que fornecem informação sobre a forma na qual as observações da série temporal são relacionadas entre si. A ACF é calculada pela correlação simples entre a observação corrente e o valor de outras observações  $p$  períodos

após o dado  $Y_{t-p}$  que são observação posteriores decorridos desse instante corrente. Por outro lado, a PACF é usada para medir o grau de associação entre valores adjacentes  $Y_t$  e  $Y_{t-p}$  quando os efeitos de "lags" de outros tempos  $t+1, t+2, t+3, \dots, t+p-1$  são removidos.

Define-se então a função de autocorrelação pela seguinte expressão:

$$\rho_k = \text{Corr}(Y_t, Y_{t-p}) = \frac{\text{Cov}(Y_t, Y_{t-p})}{\sqrt{\text{Var}(Y_t)}\sqrt{\text{Var}(Y_{t-p})}} = \frac{\gamma_p}{\gamma_0} \quad (4.1)$$

Na fase de estimação, os parâmetros do modelo ARMA pode ser feito a partir dos termos de erro e são o procedimento de Yule Walker, método dos momentos e método da verossimilhança, entre outros e não encontrei um critério consensual na literatura sobre qual procedimento é o mais relevante para o nosso problema de pesquisa.

Finalmente, na fase de diagnóstico pode-se empregar a análise dos resíduos, valores do critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação Bayesiano (BIC) o critério de informação de Schwarz (SBIC). Outro passo a ser usado é a obtenção do gráfico da ACF residual e teste dos resíduos de modo que o correlatograma dos resíduos de ACF devem estar entre os limites  $(-1, 96/\sqrt{N}$  e  $+1, 96/\sqrt{N})$  onde  $N$  é o número de observações que indicam que os resíduos são do tipo "ruído branco", constituindo um intervalo de confiança que possui nível de 95% é tem como pressuposto que os resíduos possuem distribuição normal com média nula.

Assim, dentro dessa linha de raciocínio, as características espectrais do sistema de monitoramento dos sinais deve ser testado para verificar se cumpre esse requisito estatístico de aplicabilidade do método de decomposição por séries temporais (JOSEPH, 2022).

#### 4.1 ESTATÍSTICAS DE RUÍDO DO SISTEMA RECEPTOR

Um passo muito importante para definir as características do trabalho interpretativo de um procedimento qualquer que envolva a análise por séries temporais é definir a natureza do ruído presente nas observações.

Pelo termo "ruído" define-se a presença de uma componente estocástica superposta ao sinal que contem a informação cujo pesquisador necessita para obter a informação fundamental para a condução da pesquisa (PAPOULIS; PILLAI, 2002).

Diversos autores como (LEON-GARCIA, 2011) e (YATES; GOODMAN, 2014) classificam o ruído em sistemas de medições eletroeletrônicas de acordo com as suas propriedades espectrais e características de ocorrência. Todos eles, entretanto, não apresentam características de autocorrelação e autocorrelação estatisticamente significante para "lags" diferentes de zero e são caracterizadas por uma variância  $\sigma^2$  como estimador principal de dispersão. Portanto, cabem as definições de ruído:

1. Ruído branco ou "white noise": possui densidade espectral constante e a sua distri-

buição de frequências é independente do valor da amplitude ou intervalo de amplitude do ruído;

2. Ruído branco gaussiano: obedece a uma função-distribuição tipo gaussiana, normalmente com média nula e caracterizada exclusivamente por uma variância  $\sigma^2$  e a função-distribuição nunca se anula, apresentando um máximo no valor de amplitude nula.

$$f_G(y, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-y^2/(2\sigma^2)} \quad -\infty < y < +\infty \quad (4.2)$$

3. Ruído de Rayleigh: é um nível de ruído caracterizado por uma média não-nula e uma dispersão, cujo domínio na distribuição de frequências são valores reais positivos e que seguem a uma distribuição de Rayleigh na forma:

$$f_R(y, \sigma^2) = \frac{y}{\sigma^2} e^{-y^2/(2\sigma^2)} \quad y \geq 0 \quad (4.3)$$

Obrigatoriamente, em um diagrama de frequências (histograma), a distribuição da ocorrência versus amplitude lembra uma distribuição  $\chi^2$  de dois graus de liberdade e, desse modo, deve passar pelo ponto de zero crescendo até um máximo, decaindo suavemente para valores crescentes de amplitude;

4. Ruído Riceano: Obedece a uma distribuição de Rice que é uma função bidimensional complexa dependente do número de graus de liberdade, frequência do sinal e sua amplitude.

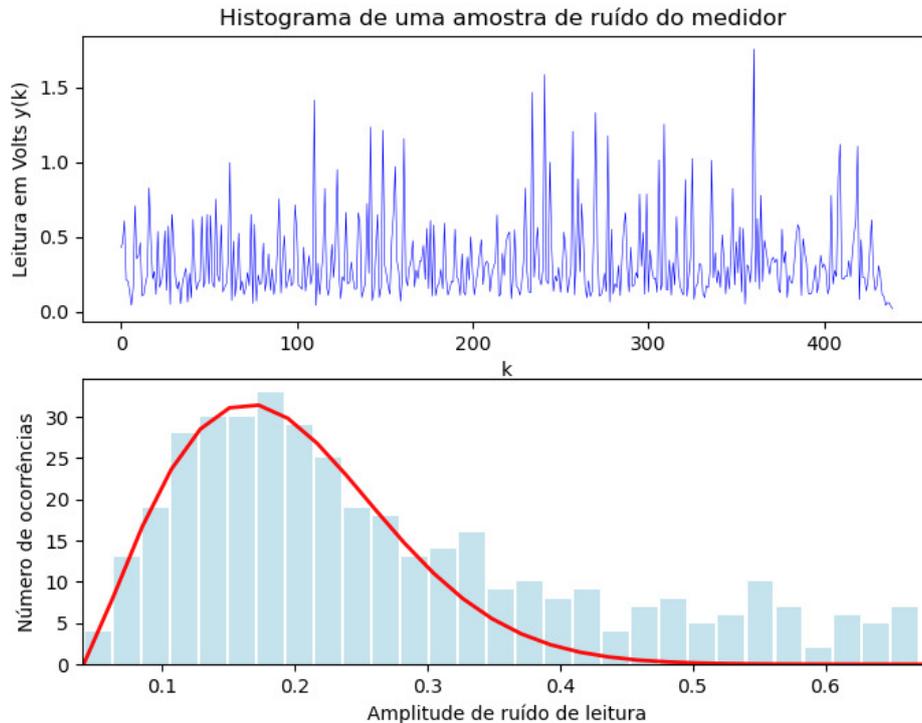
Na construção do sistema, podemos identificar o ruído atmosférico, ruído da antena e conversor LNBF, fontes de ruído cósmico que são independentes da implementação, além da contribuição de ruído do módulo sensor de potência e amplificador logaritmo do medidor de potência do sinal de micro-ondas e o ruído de quantização analógico-digital de 8 bits do osciloscópio digital.

Assim, testes de ruído foram realizados nos dias 14 a 16 de abril de 2020 para avaliar a natureza e classificação do ruído presente na leitura das séries temporais obtidos na saída do medidor de potência de micro-ondas.

O sistema de aquisição digital possui dois modos de operação selecionáveis que permitem isolar a série temporal do ruído. A seleção "DC" permite detectar níveis variáveis de tensão contínua no tempo que incluem a potência do sinal mais ruído e o modo "AC" que isola a passagem da tensão contínua que conduz a informação do nível de potência de micro-ondas do satélite, deixando passar somente as informações de ruído total presente no sistema.

O gráfico 4 a seguir mostra uma sequência de ruído obtida às 8h10m da manhã de 15/04/20 com a duração de 40 minutos, substituindo o modo "DC" pelo "AC", enquanto a

Gráfico 4 – Estatística de ruído interno do sistema medidor de potência de RF (sensor HP8483A, medidor HP438A e osciloscópio digital PicoScope 2208).



Fonte: Próprio autor.

potência de nível médio do sinal do satélite era  $4,25 \times 10^{-7}$  Watts ou -13,72 dBm correspondendo a uma leitura de 0,248 mV, reconectando sua entrada em uma carga puramente resistiva de  $75\Omega$  para assegurar o correto casamento de impedâncias da linha.

A partir dos dados foram obtidos um histograma da amplitude do ruído em mV para os pontos amostrados  $y(k)$  aonde  $k = 0, 1, 2, 3, \dots, N$  é o número de ordem da amostragem do conjunto total de  $N$  pontos amostrais.

As amplitudes e posições das barras no histograma claramente mostram que indica a existência de uma função-distribuição que apresenta um máximo e que decai suavemente após algum valor de máxima frequência. Calculando e superpondo uma distribuição de Rayleigh proposta para esse histograma, pode-se ver que praticamente explica os dados até o valor de leitura de 0,35 volts. A partir disso, a altura das barras flutuam ao redor de um valor médio e a essa ocorrência indica uma densidade constante como requerida pelo modelo de ruído branco ou "white noise" sem distribuição Gaussiana. Isso permite concluir que a distribuição de frequências do sistema receptor pode ser caracterizada por uma superposição de uma possível distribuição de Rayleigh e uma distribuição constante de ruído branco aonde qualquer valor e amplitude é equiprovável para efeitos práticos desse trabalho.

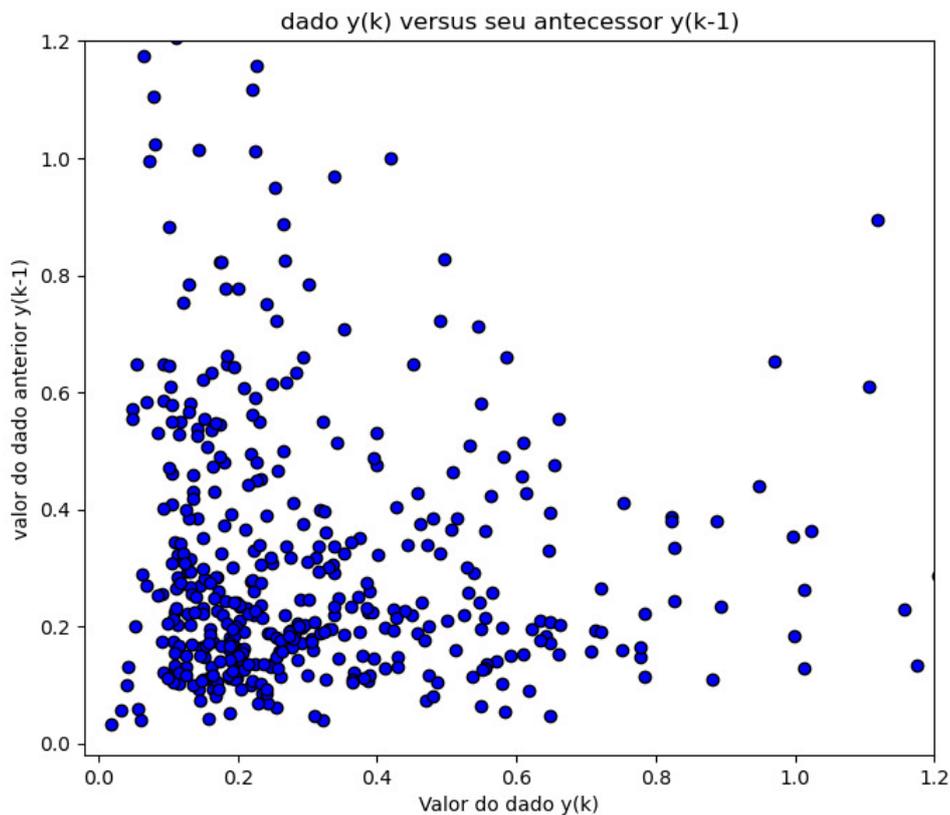
A variância da distribuição de Rayleigh mostrada na curva superposta ao histo-

grama foi calculada pela equação 4.3 usando um código em Python feito pelo autor. Essa análise implicou em cálculo da média  $E(y) = \sigma\sqrt{\pi/2}$  e variância  $Var(y) = (2 - \pi/2)\sigma^2$  com  $\sigma^2 = 0,12$  para a função distribuição de probabilidade de Rayleigh.

Pelo fato da amplificação do medidor ser tipo logarítmica, espera-se que esse natureza do ruído do sistema medidor seja manifestada em todos os tempos, independente do sinal recebido pelo satélite.

A avaliação da "memória" da resposta do sistema quanto a presença de ruído, é necessária e serve para definir o grau de uma eventual série temporal. Para isso, foi feito um "scatter plot" da variável aleatória da medida  $y(k)$  versus a medida predecessora  $y(k - 1)$  onde  $k$  é o número da amostragem (gráfico 5).

Gráfico 5 – Gráfico de espalhamento  $y(k)$  versus  $y(k - 1)$  para avaliar a "memória" do sistema medidor com os dados da figura anterior.

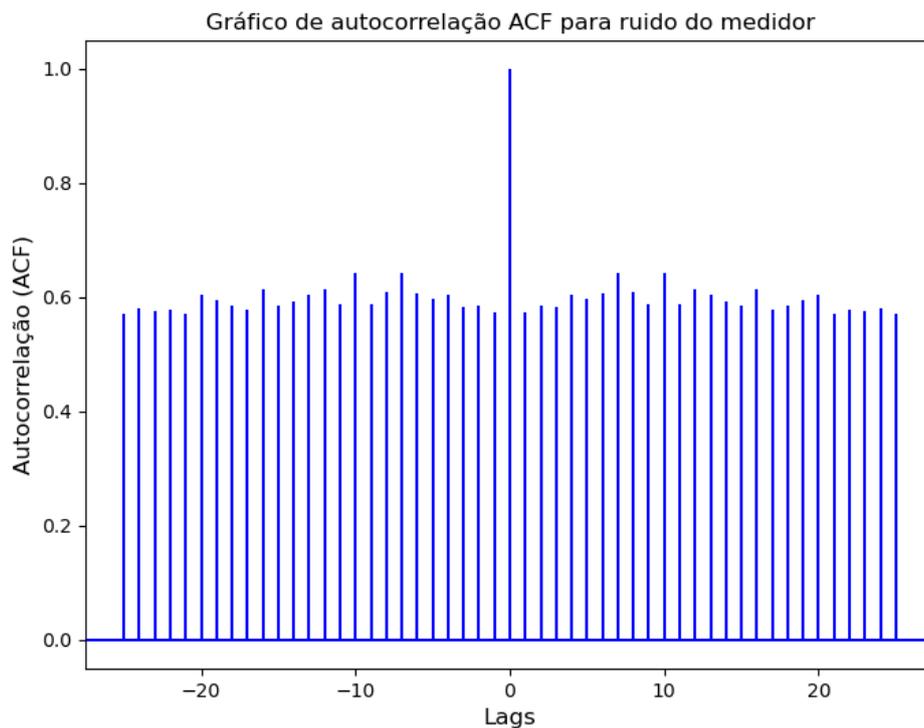


Fonte: Próprio autor.

A inspeção visual do gráfico 5 permite verificar possíveis existências de moderada ou forte correlação entre pontos amostrais adjacentes no tempo através do cálculo da matriz de correlação e avaliar o grau de memória do sistema medidor sem a presença do ruído atmosférico. Felizmente não foi possível detectar uma "memória" do sistema de medição, o que certamente poderia incluir uma série temporal artificialmente inserida nos

dados e que teria que ser isolada e removida dos dados reais, e o sistema não aparente possuir vieses. É improvável que qualquer série temporal obtida no nível de potência do sinal do satélite seja devida ao sistema de aquisição de sinais usados nesse trabalho e a presença de "memórias" nos dados se deverão a fenômenos naturais que interferem na propagação do sinal.

Gráfico 6 – Gráfico da autocorrelação ACF.



Fonte: Próprio autor.

Matriz de Covariância entre  $y(k)$  e  $y(k + 1)$  calculada a partir dos dados da figura indica coeficientes de correlação de Pearson na ordem de zero, indicando que pode-se descartar que o ruído do sistema medidor possui algum viés de memória prévia e que os dados são independentes entre si.

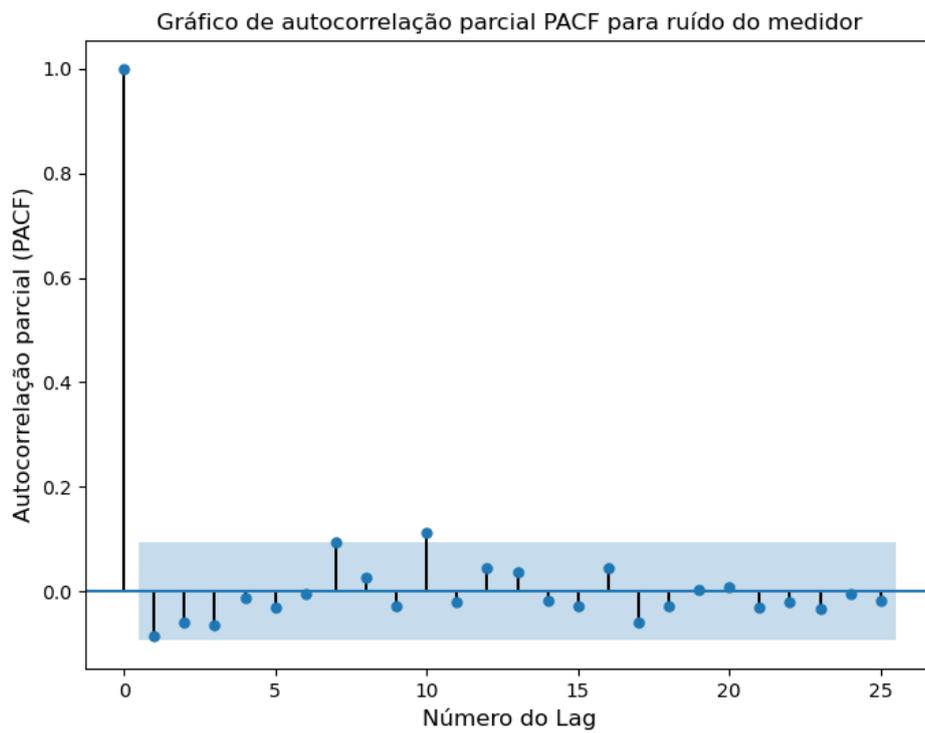
$$\rho = \begin{bmatrix} 0,9973 & -0,0061 \\ -0,0062 & 0,9973 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

A função de autocorrelação é mostrada no gráfico 6. Pode-se ver que existe uma variação da intensidade para cada "lag" em função do atraso, mas que não é expressiva e não existe uma forma de decaimento visualmente detectável ou corte da ACF no amplo limite dos lags utilizados.

A função de autocorrelação parcial (PACF) remove a contribuição ou "bias" de dados prévios, sendo útil para determinar a ordem de séries temporais regressivas. No caso

do ruído do sistema de medição, o gráfico 7 a seguir nos permite verificar que dentro de um nível de significância  $p = 0,05$  existe apenas uma medida em lag=10 que o excede marginalmente. Logo, existe evidência que o ruído não se deve exclusivamente a fenômenos estocásticos que ocorrem ao acaso e não se pode inferir tecnicamente em que parte do sistema de medição está originando esse fenômeno.

Gráfico 7 – Gráfico da autocorrelação parcial. A área hachurada indica o nível de significância  $p=0,05$ .



Fonte: Próprio autor.

## 4.2 DECOMPOSIÇÃO DA SÉRIE TEMPORAL

O aspecto cíclico das séries temporais de absorção diurnas, sem efeitos de precipitação atmosférica pode ser entendido pelo modelo de previsão de comportamento de dados com séries temporais univariadas aonde se verifica uma forma qualquer de alterações sazonais.

### 4.2.1 O modelo de Holt-Winters

O método de Holt original (HOLT, 2004) prevê uma equação de previsão temporal na forma:

$$\hat{h}_{t+h|t} = l_t + h b_t \quad (4.5)$$

Mais duas equações de suavização, uma para o nível do sinal recebido  $l_t$  e outro para a tendência  $b_t$ :

$$l_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)(l_{t-1} + b_{t-1}) \quad (4.6)$$

$$b_t = \beta^*(l_t - l_{t-1}) + (1 - \beta^*)b_{t-1} \quad (4.7)$$

Nas equações, percebe-se a inclusão de pesos estatísticos exponencialmente decrescentes com o intervalo de tempo decorrido desde o instante de tempo presente aonde o nível atual de informação é medido.

A equação de Holt modificada por (WINTERS, 1960) passa a envolver efeitos de suavização exponencial para uma previsão  $F_{i+k}$  a partir do nível descrito pelo tempo  $i + k$  e de uma variação sazonal em  $i+k$  e período de extrapolação  $m$ . é dada por:

$$Y_{i+k} = (L_i + k B_i) S_{i+k-m} \quad (4.8)$$

Pela natureza das observações, os sinais captados são a soma de vários fatores pois todos os efeitos absorptivos e temporais somente se adicionam na saída da antena, com respeito ao sinal enviado pelo transponder e devemos, conceitualmente, escolher uma decomposição aditiva para o método de Holt-Winters de forma que o nível do sinal medido  $Y(t)$  seja uma soma de um termo de tendência  $T(t)$ , mais um termo sazonal  $S(t)$  e mais um termo residual  $\epsilon(t)$ .

$$Y(t) = T(t) + S(t) + \epsilon(t) \quad (4.9)$$

Usando um filtro convolucional aos dados com um período de amostragem de 5760 pontos correspondentes a um ciclo de 24 horas, estima-se o fator de tendência  $T(t)$  que é removido da série temporal  $Y(t)$  e a média dessa série puramente sazonal  $S(t)$  é subtraída novamente para obter os resíduos  $\epsilon(t)$ , decompondo a série em suas constituintes.

Continuando a análise, temos que aplicar os três processos usuais de suavização exponencial de Holt-Winters, definidos como se segue:

1. HWES1 = suavização exponencial simples de Holt-Winters;
2. HWES2 = suavização tipo exponencial dupla de Holt-Winters com termos aditivos e multiplicativos;
3. HWES3 = suavização exponencial tripla de Holt-Winters com termos sazonais, aditivos e multiplicativos.

O gráfico 8 sumariza os passos de análise gráfica combinadas a fim de obter resultados pelo modelo de Holt-Winters.

Com referência ao gráfico 8, no canto superior esquerdo temos uma amostra de sinal monitorado a partir do dia 5 de fevereiro de 2020 com início as 9h40m da manhã, após calibração do sistema, com um total de 42220 pontos amostrais, com o arquivo contendo 175,913 horas de observações.

Pela visualização direta dos dados, a falta de estacionaridade dos dados pode ser avaliada por inspeção e pelo gráfico PACF, que foram abordados em dois grupos de dados de diferentes épocas.

Em adição, podemos usar testes estatísticos de hipóteses chamados de testes de raízes unitárias, (ou "Unit Root Tests"), sendo que os principais testes são, ADH (Augmented Dickey Fuller), Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (ou teste KPSS) e teste de Philips-Perron (teste PP).

Esses testes permitem decidir sobre as seguintes hipóteses estatísticas, a um nível de significância  $p = 0,05$ :

- **H0**: a série temporal é estacionária, hipótese nula.
- **H1**: a série temporal não estacionária e possui raiz unitária, hipótese alternativa.

Calculando a estatística do teste Dickey-Fuller, temos  $ADF = -4.029$  e  $p = 0,00127 < 0,05$  com valores críticos a 1% de -3,43, 5% de -2,86 e 10% com -2,57.

Já pelo teste KPSS, o valor 1.94 foi encontrado com  $p = 0,01 < 0,05$  e valores críticos a 10% de 0,35, a 5% com o valor 0,46 e 2.5% com 0.57.

Pelos testes estatísticos de ADF e KPSS, não rejeitamos a hipótese alternativa que os dados coletados dos níveis de sinais recebidos pelo experimento não sejam estacionários, podendo ser analisados pelo método de decomposição de séries temporais usando a biblioteca *statsmodels* do Python 3.7.

No canto superior direito do gráfico 8, temos a decomposição em séries temporais do tipo adição de onde foram extraídos uma tendência, componente sazonal e o ruído (resíduo). O resíduo apresenta uma média nula, confirmando o que já foi concluído sobre o ruído do sistema nas seções anteriores, para outros grupos de dados.

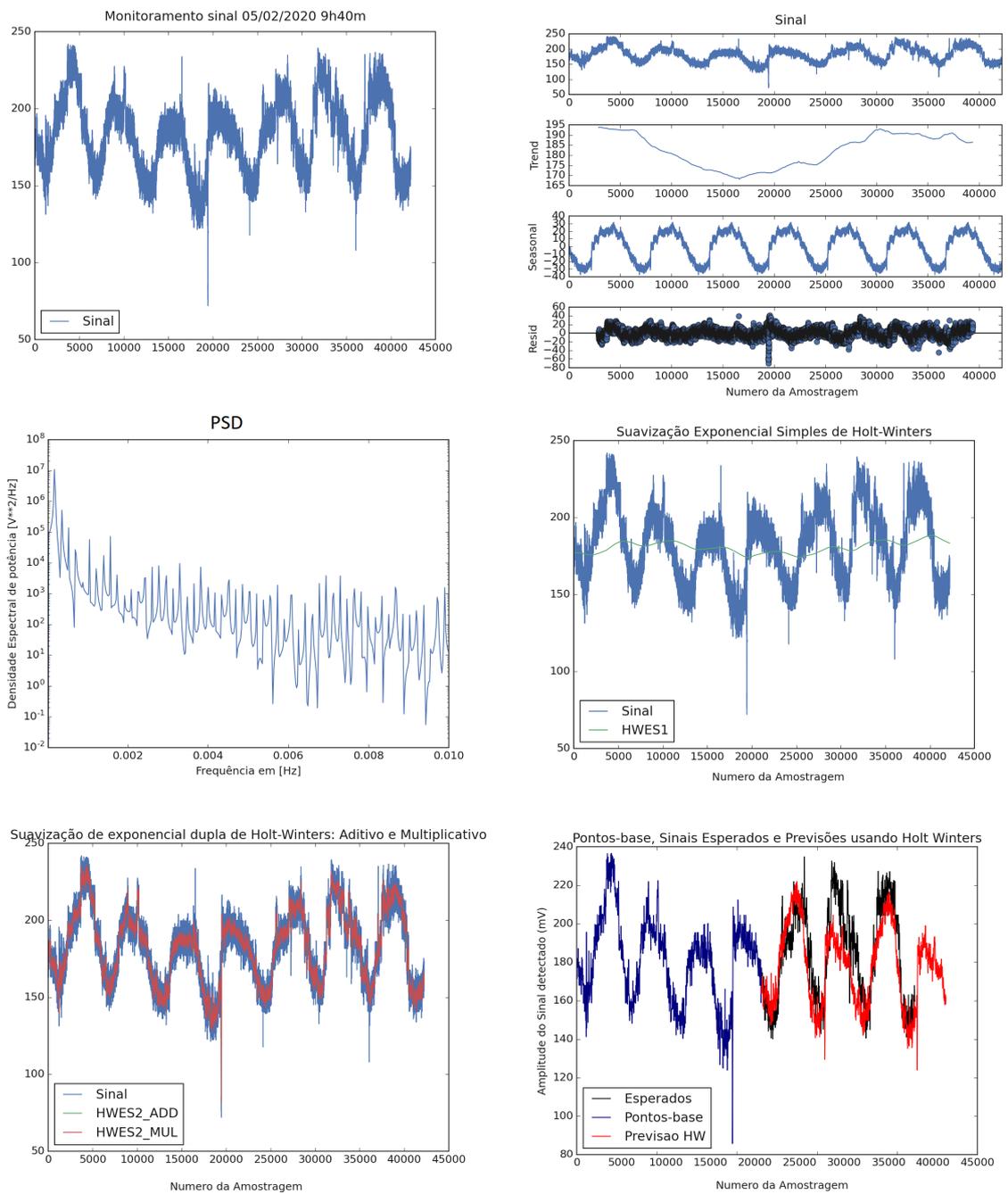
Na parte central à esquerda do gráfico 8, temos a PSD (distribuição espectral de potência, que é obtida a partir dos dados de monitoramento, mostrando a prevalência de uma componente principal de frequência com um máximo de potência espectral coincidindo com a frequência de 0.1721 mHz (milliHertz). O período ajustado pelo algoritmo é 23h27,4 minutos, que é aproximadamente um dia sideral (23h54m), mostrando os efeitos da rotação terrestre sobre a componente sazonal da série temporal, depois que a tendência ("trend") é subtraída.

Na parte central do gráfico 8, à direita, temos os dados superpostos a um modelo HWES1, ou suavização exponencial simples de Holt-Winters. Pode-se ver que não é um bom ajuste e mais componentes periódicas devem ser introduzidas.

No diagrama abaixo à esquerda, temos os dados observados superpostos ao modelo de série temporal de Holt-Winters tipo HWES2 ou suavização tipo exponencial dupla de Holt-Winters com termos aditivos e multiplicativos, o que mostra que tanto a modelagem aditiva quanto a multiplicativa são equivalentes. A aplicação de um modelo triplo HWES3, tanto aditivo quanto multiplicativo, não fornece um ajuste melhor sob o ponto de vista técnico e não é mostrado nessa figura.

Finalmente, a previsão ("forecasting") é a principal característica da modelagem por séries temporais e deve ser testada. Na parte inferior, figura à direita, temos os pontos observados separados em dois grupos. Um de cor azul daonde uma nova modelagem com HWES2 foi refeita e os dados de cor preta são a continuidade dos dados que não foram usado para derivar o modelo, mas são os dados para testar o ajuste. Em vermelho, temos os pontos de ajuste preditivo somados a um nível de ruído residual, que mostra que as características periódicas consistentes com um período similar ao dia sideral são bem reproduzidos pela previsão pelo modelo com suavização exponencial.

Gráfico 8 – Resultados da aplicação do método de Séries Temporais. As linhas em vermelho implicam nas previsões teóricas do modelo obtidas com informações da primeira metade do grupo de dados superpostas aos dados da segunda metade.



Fonte: Próprio autor.

## 5 CONCLUSÃO

Nesse trabalho, apresentamos uma análise estatística de um sistema de monitoramento da qualidade do sinal modulado em QPSK para transmissão de dados via satélite, amostrando a potência recebida por transponders em banda Ku baixa, caracterizadas por micro-ondas no intervalo de frequências entre 10 e 12 GHz (banda Ka), nos meses de primavera de 2019 ao inverno de 2020.

Observando continuamente o nível de potência recebido por uma estação terrena de TVRO da Sky modificada para medidas de amplitude do sinal, foi possível estabelecer um comportamento sazonal que pode ser descrito por séries temporais, em particular com boa predictabilidade usando o método de Holt-Winters.

### 5.1 SUMÁRIO DOS RESULTADOS OBTIDOS

As tarefas de análise e interpretação dos dados permitiram obter conclusões até hoje desconhecidas sobre a propagação de sinais digitais em banda Ku em regiões mesotrópicas, muito raramente discutidas na literatura.

Dessa forma, posso resumir as principais conclusões desse trabalho e concluir que:

a) O sistema idealizado para esse fim possui design e implementação adequados à finalidade de obter séries temporais, podendo ser estendido a outras frequências ou bandas de transmissão de satélite, inclusive a 5G;

b) A precipitação meteorológica que prejudica a taxa de erros de bits para imagens em formato HDMI em banda Ku se deve a chuvas torrenciais de curta duração e com índice pluviométrico extremo, havendo sido detectados somente três eventos que comprometeram o sinal e a ocorrência de ciclones extra-tropicais litorâneas não afetam a qualidade do sinal na regiões centrais dos estados da região sul do Brasil;

c) Modelos ARMA ou ARIMA de Box-Jenkins não são eficientes para modelar as séries temporais, sendo o modelo de Holt-Winters, o mais adequado para inferir as propriedades de periodicidade;

d) Podemos explicar a variabilidade do sinal pela absorção por hidrometeoros, aonde o aquecimento solar matutino tende a diminuir a atenuação das micro-ondas que compreendem o sinal do satélite, enquanto que o resfriamento dos mesmos na forma de partículas congeladas, implicam em uma diferenciação expressiva mas não limitante, da atenuação do sinal;

e) Não foi encontrado evidência que efeitos de incidência solar direta sobre o feixe primário da antena receptora, em época de mínimo solar tenham qualquer contribuição no sentido de comprometer a qualidade da transferência de dados digitais, aonde a captação

da radiação solar por antenas alinhadas com o satélite SKY ocorre durante apenas 15 minutos, durante quatro dias no ano.

## 5.2 FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Como futuros objetivos desse trabalho, pretende-se repetir as observações para avaliar a qualidade da distribuição de sinais digitais em banda Ka (17,7-21,2 GHz) e, posteriormente, em frequências acima de 26 GHz (internet 5G) conforme a liberação do sinal do satélite Star One D2 da EMBRATEL, a fim de avaliar a qualidade da distribuição do sinal à medida que o ciclo solar avança para o máximo de atividade.

As ideias apresentadas nesse trabalho possibilitam dar subsídios técnicos para implementar esquemas similares de análise estatística para a futura tecnologia 6G para telecomunicações, já que possuirá um limite de frequência maior chegando a TeraHertz, que é fortemente afetada pelas condições meteorológicas em países de clima equatorial, tropical e subtropical.

Dentro de tal ambiente, materiais necessários ao aumento da confiabilidade dos serviços pelos gestores em tecnologia da informação foram propostos, tendo em vista o desenvolvimento de instrumental de medição e soluções orientadas para processos industriais, comerciais e de serviços relacionados a diversos setores da Engenharia de Telecomunicações.

Por fim, acredito que o presente trabalho contribuiu para estabelecer critérios de medição para normalização e qualimetria de serviços de distribuição de ciberinformação via enlaces de micro-ondas, empregando frequências mais altas, que se beneficia do controle estatístico de qualidade, da estatística industrial e tomada de decisões usando modelos de previsão.

## REFERÊNCIAS

- ANDREWS, D. G. **An Introduction to Atmospheric Physics**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 237 p.
- BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, Tempo e Clima**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 528 p.
- CAVALCANTI, I.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 208 p.
- CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J. **Clima das Regiões Brasileiras e Variabilidade Climática**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021. 176 p.
- DERISIO, J. **Introdução ao Controle de Poluição Ambiental**. 5. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 232 p.
- HOLT, C. E. Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. **International Journal of Forecasting**, v. 20, n. 1, p. 5–10, 2004.
- HUADONG, M.; SANSAVINI, G.; MIN, X. **Cyber-Physical Distributed Systems: Modeling, Reliability Analysis and Applications**. New York: Wiley, 2021. 224 p.
- HYNDMAN, R. J.; ATHANASOPOULOS, G. P. **Forecasting: Principles and Practice**. 2. ed. Melbourne: Otexts, 2018. 382 p. Disponível em: <http://otexts.com/fpp3/>. Acesso em: 08 novembro 2021.
- JOSEPH, M. **Modern Time Series Forecasting with Python: Explore industry-ready time series forecasting using modern machine learning and deep learning**. Birmingham: Packt Publishing, 2022. 552 p.
- LECUONA, D. A.; LACERDA, L. A. de. Metodologia para realização de testes de uma antena offset de 60 cm banda ku com refletor ultraleve – parte 1: comportamento eletromagnético. **Revista Tecnologia**, v. 36, n. 1, p. 34–49, 2015.
- \_\_\_\_\_. Metodologia para realização de testes de uma antena offset de 60cm banda ku com refletor ultraleve - parte 2: comportamento mecânico. **Revista Tecnologia**, v. 36, n. 1, p. 50–63, 2015.
- LEON-GARCIA, A. **Probability and Random Processes for Electrical Engineering**. 3. ed. New York: Addison-Wesley, 2011. 832 p.
- LIU, K. N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2002. 583 p.
- MONTGOMERY, D. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 7. ed. São Paulo: LTC, 2016. 528 p.
- MONTGOMERY, D.; RUNGER, G. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 7. ed. São Paulo: LTC, 2021. 416 p.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de séries temporais: modelos lineares univariados**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2018. v. 1. 474 p.

NIELSEN, A. **Practical Time Series Analysis: Prediction with Statistics and Machine Learning**. Sebastopol: O'Reilly Media, 2019. 497 p.

NOAA. **Solar cycle progression**: Ises solar cycle sunspot number progression. Boulder, 2021. Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>. Acesso em: 06 abr. 2021.

PANAGOPOULOS, A. D.; ARAPOGLU, P. M.; COTTIS, P. G. Adjacent satellite interference effects as applied to the outage performance of an earth-space system located in a heavy rain climatic region. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 6, n. 3, p. 2–14, 2004.

PANAGOPOULOS, A. D.; KANELLOPOULOS, J. D. Adjacent satellite interference effects as applied to the outage performance of an earth-space system located in a heavy rain climatic region. **Annals of Telecommunications**, v. 9, n. 10, p. 925–9422, 2002.

PAPOULIS, A.; PILLAI, S. U. **Probability, Random Variables and Stochastic Processes**. 4. ed. New York: McGraw Hill, 2002. 852 p.

PETTY, G. **A First Course in Atmospheric Radiation**. 2. ed. Madison: Sundog Publishing, 2006. 459 p.

WINTERS, P. R. Forecasting sales by exponentially weighted moving averages. **Management Science**, v. 6, n. 3, p. 324–342, 1960.

YATES, R.; GOODMAN, D. J. **Probability and Stochastic Processes: A Friendly Introduction for Electrical and Computer Engineers**. 3. ed. New York: Wiley, 2014. 512 p.