

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
COMPUTAÇÃO E SISTEMAS

**MOISÉS JOSÉ DOS SANTOS FREITAS**

**CONTRIBUIÇÕES NO DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO  
DE MONITORES DE CINTILAÇÃO GPS: uma abordagem  
alternativa de baixo custo para uso em larga escala**

São Luís, MA – Brasil  
2019

**MOISÉS JOSÉ DOS SANTOS FREITAS**

**CONTRIBUIÇÕES NO DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO  
DE MONITORES DE CINTILAÇÃO GPS: uma abordagem  
alternativa de baixo custo para uso em larga escala**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Computação e Sistemas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Me. Henrique Mariano Costa do Amaral

Co-orientador: Prof. Dr. Alison de Oliveira Moraes

São Luís, MA – Brasil  
2019

Freitas, Moisés José dos Santos.

Contribuições no desenvolvimento e validação de monitores de cintilação GPS: uma abordagem alternativa de baixo custo para uso em larga escala / Moisés José dos Santos Freitas. – São Luís, 2019.

88f

Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Computação e Sistemas, Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

Orientador: Prof. Me. Henrique Mariano Costa do Amaral.

1.GPS. 2.Ionosfera. 3.Cintilação ionosférica. I.Título

CDU: 629.783

**MOISÉS JOSÉ DOS SANTOS FREITAS**

**CONTRIBUIÇÕES NO DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO  
DE MONITORES DE CINTILAÇÃO GPS: uma abordagem  
alternativa de baixo custo para uso em larga escala**

Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-graduação em Engenharia de  
Computação e Sistemas como parte  
dos requisitos para obtenção do título  
de Mestre em Engenharia de  
Computação.

Aprovado em:    /    /

**BANCA EXAMINADORA**



**Prof. Me. Henrique Mariano Costa do Amaral** (Orientador)  
Mestre em Engenharia de Sistemas e Computação  
Universidade Estadual do Maranhão



**Prof. Dr. Alison de Oliveira Moraes** (Coorientador)  
Doutor em Engenharia Eletrônica e Computação  
Instituto de Aeronáutica e Espaço



**Prof. Dr. Rogério Moreira Lima Silva**  
Doutor em Telecomunicações  
Universidade Estadual do Maranhão

Dedico este trabalho a minha esposa,  
Ariana, aos meus pais, Aparecida e Batista,  
ao meu irmão, Thiago e a Cacau.

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, preciso agradecer a Deus pela minha vida e de todas as pessoas que amo e por ter me dado a capacidade de alcançar tudo o que me proponho a realizar, pois assim eu não tenho medo de seguir sempre em frente.

Agradeço aos meus pais, Maria Aparecida e José Batista, pelo apoio incondicional por toda a vida, mas principalmente durante o período do mestrado. Obrigado por tudo! Agradeço ao meu irmão, Thiago, pela amizade, pelas longas conversas em nosso escritório e incentivos para sempre seguir em frente e não deixar de lutar por um futuro melhor. Um agradecimento especial a minha esposa, Ariana, pelo companheirismo, por estar sempre me incentivando e pela paciência que teve pelas muitas viagens de Teresina-PI a São Luís-MA ao longo dos anos de mestrado que tive que fazer.

Agradeço ao Dr. Alison de Oliveira Moraes por ter me dado a oportunidade de realizar este trabalho sob sua orientação, sempre com muita paciência e me incentivando, ao mesmo tempo em que cobrava qualidade e rigor na execução das pesquisas. Obrigado por tudo, professor!

Agradeço ao professor Me. Henrique Mariano do Amaral pela orientação, pela confiança, amizade e pela paciência que dedicou na orientação deste trabalho. Obrigado por tudo, professor!

Aos pesquisadores do INPE, em especial ao técnico Acácio pelas informações repassadas, ao professor Dr. Eurico Rodrigues de Paula por ter me dado a chance de poder realizar os testes do protótipo no INPE e ao Me. André Ricardo Fazanaro Martinon por ter me ajudado com os testes do protótipo e estar sempre disponível.

Agradeço ao meu amigo e orientador na graduação, Dr. Ronald Gerard Silva, pelo incentivo em participar da seleção deste mestrado. Sem isso, nada disso teria acontecido. Agradeço também ao meu amigo, Herculy Douglas, que esteve comigo na seleção e início do mestrado. Ao longo do mestrado, fiz grandes amigos que vou levar para a vida toda. Agradeço aos meus amigos Adalberto, Brenno e Júlio pelos momentos alegres e pelo companheirismo. Foram muitas caronas, especialmente do Brenno, que me buscava e deixava todos os dias de aula. Obrigado, amigos!

*“A Natureza não esconde seus segredos por malícia,  
mas sim por causa da própria altivez.”*

Albert Einstein

## **Resumo**

O monitor de cintilação é uma ferramenta fundamental para estudo da ionosfera e dos efeitos do clima espacial em sistemas de comunicação espaciais, em especial via satélite. Atualmente, os monitores de cintilação profissionais disponíveis no mercado custam entre US\$ 3.000 e US\$ 20.000. Este trabalho trata do desenvolvimento, teste e validação de um protótipo de monitor de cintilação ionosférico de baixo custo, que atenda os requisitos de qualidade de medidas para pesquisas relacionadas ao tema. As soluções de banco de dados também foram contempladas nesta dissertação. Através desse protótipo é obtido o índice de cintilação S4. Para cumprir estes requisitos básicos, foi utilizada a plataforma Raspberry Pi, dispensando assim o uso de procedimentos de operação complexos e permitindo sua conectividade em rede para operação de múltiplos equipamentos simultaneamente. Com a implementação de uma rede de receptores de baixo custo será possível disponibilizar estes dados para institutos de pesquisa, universidades e até mesmo os centros de lançamento CLA e CLBI.

**Palavras-chave:** Cintilação ionosférica. Posicionamento GNSS. Raspberry Pi.

## **Abstract**

The ionospheric scintillation monitor is a fundamental tool for studying the ionosphere and the effects of space weather on spatial communication systems, especially satellite. Currently, professional scintillation monitors available in the market cost between \$ 3,000 and \$ 20,000. This research is about the development, testing and validation of a prototype low cost ionospheric scintillation monitor that meets the quality requirements of measures for research related to the subject. The database solutions also contemplated in this dissertation. Through this prototype the scintillation index S4 is obtained. To meet these basic requirements, the Raspberry Pi platform was used, thus dispensing with the use of complex operating procedures and allowing its network connectivity to operate multiple equipment simultaneously. By implementing a network of low cost receivers it will be possible to make this data available to research institutes, universities and even the CLA and CLBI launch centers.

**Keywords:** Ionospheric Scintillation. GNSS Positioning. Raspberry Pi.

## Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 2.1 – Disponibilidade Seletiva (a) ligada e (b) desligada (MATSUOKA et al., 2001 apud MATSUOKA, 2003) .....                                                                                                                                  | 21 |
| FIGURA 2.2 – Ilustração das orbitas dos satélites GPS (SEEBER, 2003 apud VANI, 2014).                                                                                                                                                               | 21 |
| FIGURA 2.3 – Ilustração da modulação do código sobre a portadora (RODRIGUES, 2008).                                                                                                                                                                 | 22 |
| FIGURA 2.4 – Blocos de satélites GPS (GPS.gov apud JEREZ, 2017) .....                                                                                                                                                                               | 24 |
| FIGURA 3.1 – Estratificação da atmosfera terrestre (Adaptada de SEEBER, 2008 apud PEREIRA, 2015) .....                                                                                                                                              | 26 |
| FIGURA 3.2 – Processo de fotoionização (POZ, 2010) .....                                                                                                                                                                                            | 27 |
| FIGURA 3.3 – Perfis verticais típicos de densidade eletrônica (RODRIGUES, 2008) .....                                                                                                                                                               | 28 |
| FIGURA 3.4 – Formação do pico de ionização (RODRIGUES, 2008) .....                                                                                                                                                                                  | 28 |
| FIGURA 3.5 – O plasma é elevado até grandes altitudes na região equatorial e desce ao longo das linhas de campo magnético a latitudes de aproximadamente 20° norte e sul (RODRIGUES, 2008) .....                                                    | 30 |
| FIGURA 3.6 – Geometria da trajetória do sinal de GPS (MONICO, 2008) .....                                                                                                                                                                           | 35 |
| FIGURA 4.1 – Geometria do modelo de cintilação ionosférica (MUELLA, 2008) .....                                                                                                                                                                     | 37 |
| FIGURA 4.2 – Índice de cintilação S4 para o satélite 16 no dia 28 de março de 2018 a partir das 22:00 .....                                                                                                                                         | 43 |
| FIGURA 4.3 – Morfologia global das cintilações em sinais da Banda L durante anos de atividade solar (a) máxima e (b) mínima (adaptada de BASU et al., 1988 apud RODRIGUES, 2003) .....                                                              | 44 |
| FIGURA 5.1 – Receptor Septentrio PolaRxS Pro® (NAVTECHGPS, 2018) .....                                                                                                                                                                              | 46 |
| FIGURA 5.2 – Protótipo do monitor baseado no Arduino. (BRAGAIA, 2017) .....                                                                                                                                                                         | 47 |
| FIGURA 5.3 – a) Protótipo do monitor de cintilação ionosférica ao lado do Septentrio. b) Antenas GNSS helicoidais Choke-ring instaladas sobre o prédio do INPE. À esquerda, a antena do monitor Septentrio e à direita, a antena do protótipo ..... | 48 |
| FIGURA 5.4 – Protótipo do monitor de cintilação ionosférica com cooler instalado .....                                                                                                                                                              | 49 |
| FIGURA 5.5 – S4 calculado com os dados obtidos do PRN 16 com o protótipo e o Septentrio no dia 28 de março de 2018 de 22:00 à 00:00 .....                                                                                                           | 49 |

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 5.6 – S4 medidos com o protótipo em função da medida com o Septentrio .....                          | 50 |
| FIGURA 5.7 – Esquema do protótipo do monitor de cintilação ionosférica .....                                | 51 |
| FIGURA 5.8 – Raspberry Pi 3 model B (RASPBerry PI, 2018) .....                                              | 52 |
| FIGURA 5.9 – Tela inicial do Raspbian .....                                                                 | 52 |
| FIGURA 5.10 – Módulo conversor USB para serial CP2102 .....                                                 | 53 |
| FIGURA 5.11 – Exemplo de sentenças NMEA .....                                                               | 54 |
| FIGURA 5.12 – Ultimate GPS Breakout .....                                                                   | 54 |
| FIGURA 5.13 – CP2102 conectado a USB do PC .....                                                            | 55 |
| FIGURA 5.14 – Selecionando o modelo do chip .....                                                           | 55 |
| FIGURA 5.15 – Selecionando a porta USB onde o receptor está instalado .....                                 | 56 |
| FIGURA 5.16 – Selecionando a taxa de transmissão dos dados .....                                            | 56 |
| FIGURA 5.17 – Selecionando o agente de download .....                                                       | 57 |
| FIGURA 5.18 – Selecionando o arquivo de firmware .....                                                      | 57 |
| FIGURA 5.19 – Atualização do firmware concluída .....                                                       | 58 |
| FIGURA 5.20 – Receptor ligado a uma antena GPS automotiva .....                                             | 58 |
| FIGURA 5.21 – Fluxograma do software de captura e envio de dados .....                                      | 60 |
| FIGURA 5.22 – Interface gráfica do software de coleta de dados do monitor de cintilação ionosférica .....   | 61 |
| FIGURA 5.23 – Estrutura do banco de dados usando o RealTime Database do Firebase .....                      | 62 |
| FIGURA 5.24 – Fluxograma do algoritmo do aplicativo Android .....                                           | 65 |
| FIGURA 5.25 – Tela inicial e escolha da data de consulta .....                                              | 66 |
| FIGURA 5.26 – Localização dos monitores ativos .....                                                        | 66 |
| FIGURA 5.27 – Satélites detectados na data de busca .....                                                   | 67 |
| FIGURA 5.28 – Gráfico do S4 em função da hora (UTC) .....                                                   | 67 |
| FIGURA 5.29 – Pontos ionosféricos: interceptação do sinal de GPS com a ionosfera a 350 km de altitude ..... | 68 |

|                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 5.30 – Tela de construção de cenários do Unity Editor .....                                                                                                                              | 69 |
| FIGURA 5.31 – Fluxograma do algoritmo do Skyplot .....                                                                                                                                          | 69 |
| FIGURA 5.32 – Tela inicial e escolha da data de consulta .....                                                                                                                                  | 70 |
| FIGURA 5.33 – Visualização do IPP .....                                                                                                                                                         | 71 |
| FIGURA 5.34 – Visualização do IPP para um período maior .....                                                                                                                                   | 71 |
| FIGURA 5.35 – Gráfico do S4 em função da hora (UTC) .....                                                                                                                                       | 72 |
| FIGURA 6.1 – a) Protótipo e Septentrio PolaRxS Pro® ligados a um mesmo divisor de sinal e b) detalhe do divisor de sinal e do receptor GPS .....                                                | 73 |
| Figura 6.2 – S4 calculado com os dados obtidos do PRN 27 com o protótipo (vermelho) e o Septentrio (azul) no dia 09 de dezembro de 2018 de 00:00 à 01:40 UTC .....                              | 74 |
| FIGURA 6.3 – Relação entre os índices S4 medidos com o protótipo e com o Septentrio .....                                                                                                       | 76 |
| FIGURA 6.4 – Erro na estimativa do índice $S_4^*$ pelo protótipo em relação ao monitor profissional .....                                                                                       | 76 |
| FIGURA 6.5 – Filtro de Kalman aplicado ao S4 calculado com os dados obtidos do PRN 27 com o protótipo (vermelho) e o Septentrio (azul) no dia 09 de dezembro de 2018 de 00:00 à 01:40 UTC ..... | 78 |
| FIGURA 6.6 – Relação entre os índices S4 medidos pelo protótipo e pelo monitor profissional após uso do Filtro de Kalman .....                                                                  | 79 |
| FIGURA 6.7 – Erro na estimativa do índice $S_{4FK}^*$ pelo protótipo em relação ao monitor profissional após uso do Filtro de Kalman .....                                                      | 79 |
| FIGURA 6.8 – Comparação entre os índices S4 obtidos pelo protótipo e pelo monitor profissional .....                                                                                            | 81 |
| FIGURA 6.9 – Comparação entre os índices S4 obtidos pelo protótipo e pelo monitor profissional após aplicação do filtro de Kalman .....                                                         | 82 |

## **Lista de Tabelas**

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 4.1 – Nível de intensidade da cintilação ionosférica ao S4 (MUELLA, 2008) ..... | 43 |
| TABELA 5.1 – Exemplo de dados armazenados no protótipo .....                           | 48 |
| TABELA 6.1 – Classificação da correlação entre as variáveis .....                      | 75 |

## Lista de Abreviaturas e Siglas

|         |                                                                                                       |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AMAS    | Anomalia Magnética do Atlântico Sul                                                                   |
| CALIBRA | <i>Coutring GNSS high accuracy applications limitations due to ionospheric disturbances in Brazil</i> |
| CIGALA  | <i>Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America</i>        |
| EDA     | Efeito Dínamo Atmosférico                                                                             |
| ESF     | Camada F espalhada ( <i>Equatorial Spread F</i> )                                                     |
| EUA     | Estados Unidos da América                                                                             |
| EUV     | Extremo ultravioleta                                                                                  |
| GLONASS | <i>Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>                                                |
| GNSS    | Sistemas Globais de Navegação por Satélite ( <i>Global Navigation Satellite System</i> )              |
| GRT     | teoria da instabilidade Rayleigh-Taylor generalizada                                                  |
| GPS     | Sistema Global de Posicionamento ( <i>Global Positionig System</i> )                                  |
| IDE     | <i>Integrated Development Environment</i>                                                             |
| INPE    | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais                                                             |
| IPP     | <i>Ionospheric Pierce Point</i>                                                                       |
| MATLAB  | <i>software</i> de computação numérica da empresa MathWorks                                           |
| NMEA    | <i>National Marine Electronics Association</i>                                                        |
| OCXO    | Oscilador de cristal controlado por temperatura ( <i>Oven-Controlled</i>                              |
| RTK     | <i>Real Time Kinematic</i>                                                                            |
| SA      | Disponibilidade Seletiva ( <i>Selective Availability</i> )                                            |
|         | <i>Crystal Oscillator</i> )                                                                           |

|      |                                                    |
|------|----------------------------------------------------|
| TEC  | <i>Total Electron Content</i>                      |
| UART | <i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> |

# Sumário

|          |                                                         |           |
|----------|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                       | <b>16</b> |
| 1.1      | Objetivos                                               | 17        |
| 1.2      | Justificativa                                           | 18        |
| 1.3      | Estrutura da dissertação                                | 18        |
| <b>2</b> | <b>Sistema de navegação via satélite</b>                | <b>20</b> |
| 2.1      | Histórico de desenvolvimentos em navegação por satélite | 20        |
| 2.2      | Global Positioning System (GPS)                         | 21        |
| 2.3      | As observáveis GPS                                      | 24        |
| <b>3</b> | <b>Fundamentos da ionosfera de baixas latitudes</b>     | <b>26</b> |
| 3.1      | Formação e estrutura da ionosfera                       | 27        |
| 3.2      | Eletrodinâmica da ionosfera equatorial                  | 29        |
| 3.3      | Refração ionosférica                                    | 31        |
| <b>4</b> | <b>Cintilação em amplitude</b>                          | <b>36</b> |
| 4.1      | Histórico do estudo das cintilações ionosféricas        | 36        |
| 4.2      | Teorias de cintilação ionosférica                       | 37        |
| 4.2.1    | Teoria da tela de fase da camada de irregularidades     | 39        |
| 4.2.2    | Teoria da cintilação fraca                              | 41        |
| 4.3      | Índice de cintilação S4                                 | 42        |
| 4.4      | Morfologia global das cintilações                       | 44        |
| <b>5</b> | <b>Desenvolvimento do protótipo</b>                     | <b>45</b> |
| 5.1      | Desenvolvimentos anteriores                             | 46        |
| 5.2      | A montagem do protótipo                                 | 51        |
| 5.2.1    | Raspberry Pi Model B                                    | 51        |
| 5.2.2    | Módulo conversor USB para serial CP2102                 | 53        |
| 5.2.3    | Receptor GPS                                            | 53        |
| 5.3      | Software de captura de dados                            | 59        |
| 5.4      | Aplicativo Android                                      | 64        |
| 5.5      | Skyplot                                                 | 68        |
| <b>6</b> | <b>Validação e testes</b>                               | <b>73</b> |
| 6.1      | Metodologia de validação do protótipo                   | 73        |
| 6.2      | Filtro de Kalman                                        | 76        |
| 6.3      | Validação dos dados                                     | 79        |
| <b>7</b> | <b>Conclusões e trabalhos futuros</b>                   | <b>83</b> |
| 7.1      | Conclusões                                              | 83        |
| 7.2      | Trabalhos futuros                                       | 84        |
|          | <b>Referências</b>                                      | <b>86</b> |

# 1 Introdução

A ionosfera é a camada da atmosfera distante, em média, 60 km da superfície da Terra e que se estende até cerca de 1000 km de altitude. Ela é formada por gás ionizado, ou plasma, que se forma devido à ação da radiação solar. Pode ser classificada de acordo com a densidade eletrônica e composição química, nas subcamadas D, E e F, em ordem crescente de altitude.

Nas regiões de baixa latitude, as variações na densidade eletrônica da ionosfera são mais expressivas, resultado da alta irradiação solar e da configuração do campo magnético da Terra. Isso favorece o surgimento de irregularidades no plasma da camada F, cujos tamanhos variam de alguns centímetros até centenas de quilômetros. É mais comum que apareçam no período noturno, mas raramente ocorrem no período diurno. Essas irregularidades podem ser detectadas através de radares, foguetes de sondagem, ionossondas ou pela cintilação que causam na fase e na amplitude de ondas de rádio em comunicações via satélite. Apesar de todos os avanços para buscar entender esse fenômeno ele ainda representa um importante desafio para as pesquisas científicas e previsão do clima espacial (CUEVA, 2013).

Em aplicações tecnológicas que necessitam de comunicação via satélite, a refração ionosférica representa a principal fonte de erro nas informações transportadas em ondas de rádio. O erro é função da frequência do sinal e do conteúdo total de elétrons – TEC (do inglês *Total Electron Content*) – presente ao longo da trajetória percorrida pelo sinal na ionosfera. Entretanto, o TEC varia no tempo e no espaço, sendo influenciado pelo ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica, atividade geomagnética, dentre outros fatores (MATSUOKA, 2003).

Percebeu-se que, se por um lado a ionosfera afeta a propagação de ondas de rádio prejudicando a comunicação via satélite por conta das cintilações, por outro, esses sinais carregam a assinatura da presença de irregularidades na densidade eletrônica do plasma ionosférico. Os sinais dos sistemas globais de navegação por satélite ou GNSS (do inglês *Global Navigation Satellite System*) – são hoje utilizados como uma sonda de potencial global para estudo das cintilações ionosféricas, sempre disponível em qualquer lugar da superfície terrestre, independente das condições meteorológicas locais. Dentre os sistemas de navegação por satélite existentes, o sistema norte-americano GPS (do inglês *Global Positioning System*) é

o sistema que possui mais satélites em órbita e foi utilizado nesse trabalho para o estudo da cintilação ionosférica (MONICO, 2008).

Os sinais GPS ao passarem pela ionosfera podem sofrer variações em sua direção e velocidade de propagação, cintilação na fase e amplitude do sinal, o que resulta na degradação do sinal e perda na acurácia no posicionamento. Esses efeitos são mais expressivos nos receptores GPS de única frequência, já que os receptores de dupla frequência permitem efetuar correções que compensam os efeitos da refração ionosférica. Entretanto, os receptores de dupla frequência são bastante caros, o que torna os receptores de uma frequência os mais comuns no posicionamento GPS.

No Brasil, os projetos CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*) e CALIBRA (*Coutering GNSS high accuracy applications limitations due to ionospheric disturbances in Brazil*) representam os principais esforços para estabelecer o monitoramento contínuo da ionosfera sobre o Brasil. Esses projetos contam com 14 estações ativas equipadas com monitores de cintilação ionosférica profissionais Septentrio PolaRxS Pro®. Um monitor de cintilação profissional é um instrumento de custo elevado, cerca de US\$ 20 mil. Por esse motivo, a quantidade de instrumentos dedicados ao estudo da cintilação ionosférica no Brasil é bastante reduzida (MENDONÇA, 2013).

Em 1999, Van Dierendonck propôs a utilização de receptores GPS de única frequência para o monitoramento do fenômeno da cintilação ionosférica, visando diminuir o custo para o estudo da ionosfera. Van Dierendonck (1999) aborda os efeitos das cintilações de fase e cintilações de amplitude, parâmetros que ainda são utilizados no monitoramento da cintilação ionosférica.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo dar contribuições para o desenvolvimento, teste e validação de um protótipo de monitor de cintilação ionosférica de baixo custo (menos de US\$ 100), capaz de atender os requisitos de qualidade de medidas de cintilação em amplitude para pesquisas relacionadas ao tema. Para isso, utilizou-se o microprocessador Raspberry Pi 3 Model B, ligado a um receptor GPS de frequência única. Além disso, este trabalho aborda as soluções de banco de dados e o desenvolvimento de softwares para processamento e visualização das medidas em gráficos e dos pontos de intersecção do sinal de GPS com a

ionosfera a 350 km (IPP, do inglês *Ionospheric Pierce Point*). Espera-se que no futuro a implementação de uma rede de receptores de baixo custo torne possível disponibilizar dados de cintilação para institutos de pesquisa, universidades, centros de lançamentos de foguetes, dentre outros.

## 1.2 Justificativa

A cintilação ionosférica é um fenômeno bastante comum na região do Brasil, capaz de prejudicar aplicações tecnológicas onde o posicionamento e navegação são fatores críticos, como é o caso da navegação aérea, a agricultura de precisão e prospecção de petróleo. Em momentos de forte cintilação, os serviços GNSS podem ser inviabilizados. Essa é uma situação recorrente e que ainda não possui uma solução definida, tornando necessário o monitoramento mais amplo desse fenômeno no território brasileiro, realidade essa inviabilizada pelo alto custo dos monitores de cintilação ionosférica. No Brasil, cintilações fortes são observadas entre os meses de outubro e abril do ano seguinte, após o pôr-do-Sol (MONICO, 2008).

Na navegação aérea, durante as fases de aproximação e aterrissagem de aeronaves em aeroportos, os sistemas GNSS são bastante utilizados. Fortes cintilações ionosféricas podem afetar a navegação e vigilância do tráfego aéreo. Na agricultura de precisão, a utilização de sistemas GNSS está na dependência do RTK (do inglês, *Real Time Kinematic*), método capaz de oferecer precisão no posicionamento de máquinas agrícolas com precisão de poucos centímetros. Esse sistema utiliza dois receptores GPS: uma “estação base” com posição conhecida e um receptor na máquina agrícola. As medidas feitas na estação de base servem para efetuar correções na posição da máquina agrícola. Entretanto, fortes cintilações também podem afetar o seu funcionamento. Na prospecção de petróleo, as cintilações ionosféricas podem afetar sistemas de posicionamento guiado por GPS de plataformas petrolíferas com sistemas flutuantes de propulsão. Essas plataformas dispensam os sistemas tradicionais de ancoragem, optando pelo uso de propulsores comandados por computador que efetuam correções na posição utilizando informações do GPS.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

O conteúdo da dissertação foi organizado em sete capítulos. No capítulo 2 é apresentado o histórico do sistema GPS, as características do sinal, as observáveis e os erros sistemáticos relacionados com a transmissão e recepção do sinal. No capítulo 3 são apresentados os fundamentos físicos da ionosfera de baixas latitudes, onde é abordada sua formação e estrutura, a eletrodinâmica da ionosfera equatorial e o estudo da refração ionosférica e o impacto na propagação dos sinais de GPS. O capítulo 4 aborda a cintilação ionosférica em amplitude, o seu histórico, as teorias de cintilação ionosférica, o índice de cintilação S4 e a morfologia global das cintilações. No capítulo 5 é apresentada a descrição do monitor de cintilação profissional, os protótipos desenvolvidos anteriormente utilizando Arduino e Raspberry Pi 3, a validação do software desenvolvido na Universidade do Texas em Dallas e suas limitações. Em seguida é feita a descrição dos componentes utilizados e dos softwares desenvolvidos para captação e processamento dos dados. No capítulo 6, são mostrados os resultados dos testes feitos com o protótipo, comparando com os resultados obtidos no monitor profissional, buscando validar o monitor. Além disso, é aplicado um filtro de Kalman adaptado para buscar estimar um valor do S4 calculado pelo protótipo com menos ruído e, consequentemente, mais próximo do valor calculado pelo monitor profissional. Por fim, no último capítulo são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros, além de uma revisão de cada capítulo, destacando a importância de se modelar os efeitos da cintilação ionosférica e a aplicabilidade potencial de um monitor de baixo custo.

## 2 Sistema de navegação via satélite

Atualmente, existem cerca de dois mil satélites em órbita na Terra e com o avanço das tecnologias relacionadas ao espaço, aplicações como comunicação, sensoriamento remoto, navegação, em aplicações civis e militares, têm feito cada vez mais parte do cotidiano das pessoas. Serviços de televisão por satélite, troca de mensagens de texto e áudio por telefones celulares são alguns exemplos. Países agora vendem velhas imagens de satélites espiões para uso comercial e os sistemas de navegação por satélite, como o Sistema Global de Posicionamento ou GPS (do inglês *Global Positioning System*) ou o russo GLONASS (do russo *Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), funcionam depois muitos anos de planejamento e desenvolvimento (BEACH, 1998). Além desses sistemas, existem o europeu Galileo e o chinês BeiDou-Compass. Juntos constituem os Sistemas Globais de Navegação por Satélite ou GNSS (do inglês *Global Navigation Satellite System*).

### 2.1 Histórico de desenvolvimentos em navegação por satélite

O NAVSTAR-GPS, comumente chamado apenas GPS, tem se tornado uma tecnologia extremamente útil para as atividades humanas que necessitam de posicionamento, pois oferece rapidez na obtenção de coordenadas e disponibilidade em quaisquer condições climáticas. Foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa do Estados Unidos da América (EUA) no início da década de 1960 com o objetivo de ser o principal sistema de navegação das forças armadas. Entretanto, em 1980 o sistema foi liberado para aplicações civis, estando presente em aplicações para diversos fins, como navegação marítima, posicionamento geodésico, agricultura de precisão, geologia, controle de frotas, atividades aeroespaciais, dentre outros (MONICO, 2008).

Até maio do ano 2000, por motivos de segurança, o sinal público de GPS apresentava uma degradação intencional implementada pelo governo norte-americano, chamada de Disponibilidade Seletiva - SA (do inglês “Selective Availability”). Quando ligada, a SA era a principal fonte de erros na obtenção da posição do usuário, com precisão de cerca de 100 metros. Enquanto isso, usuários autorizados poderiam se localizar com precisão de 6 metros. Entretanto, percebeu-se que usuários civis conseguiam se localizar com precisão de 30 metros utilizando outros meios, não fazendo mais sentido manter a SA ligada. A figura 2.1 mostra

várias aquisições da latitude e longitude de um usuário civil obtidas com SA e sem SA. Pode-se observar que após o desligamento da SA usuários civis puderam obter suas localizações com muito mais precisão, abrindo caminho para várias aplicações comerciais (POZ, 2005; MATSUOKA, 2003).

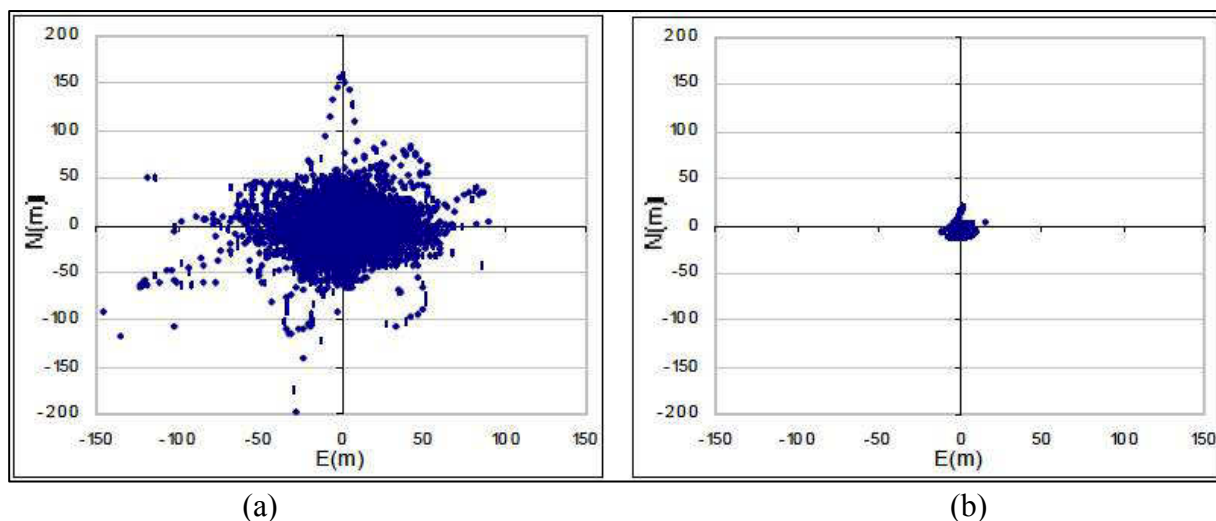


FIGURA 2.1 – Disponibilidade Seletiva (a) ligada e (b) desligada (MATSUOKA et al., 2001 apud MATSUOKA, 2003).

## 2.2 Global Positioning System (GPS)

O GPS é formado por uma constelação de 31 satélites, distribuídos em 6 planos orbitais muito precisos, em órbitas aproximadamente circulares e igualmente espaçados, a uma altitude aproximada de 20.200 km, com período orbital de aproximadamente 12 horas siderais, a velocidade de 11.265 km/h, de modo que sempre haverão pelo menos quatro satélites disponíveis em qualquer local da superfície da Terra. A figura 2.2 ilustra a configuração espacial do satélite de GPS (VANI, 2014).

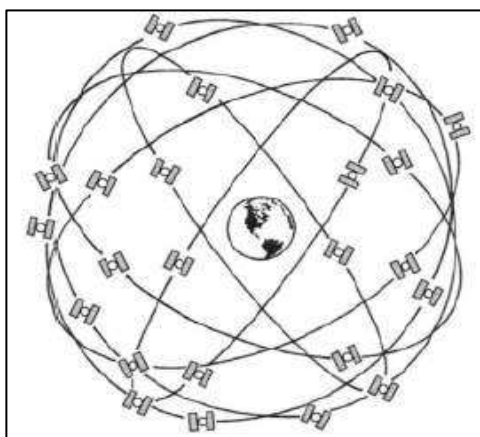


FIGURA 2.2 – Ilustração das orbitas dos satélites GPS (SEEBER, 2003 apud VANI, 2014).

Cada satélite possui a bordo um relógio atômico e envia para a Terra informações de navegação e dados de seu estado. Caso algum satélite apresente defeito, ele é automaticamente substituído por outro, pois além dos satélites ativos existem outros de stand-by justamente para essa finalidade (Ijar Milagre da Fonseca, comunicação pessoal).

O GPS permite que o usuário consiga determinar sua posição em qualquer ponto da superfície da Terra ou próximo a ela. Para isso, sistema dispõe de três segmentos: segmento espacial, segmento de controle e segmento de usuário. O sistema espacial consiste de 31 satélites que orbitam a uma altitude aproximada de 20.200 km. O segmento de controle rastreia cada satélite GPS, envia previsões de suas futuras posições e efetua correções no relógio do satélite. O segmento de usuário consiste de civis e militares que utilizam o sistema (MUELLA, 2008).

Cada satélite de GPS emite um sinal de rádio composto por três ondas portadoras, L1, L2 e L5, geradas a partir da multiplicação de 154, 120 e 115, respectivamente, por uma frequência fundamental de 10,23 MHz. Assim, L1 tem frequência de 1,57542 GHz e comprimento de onda de  $\lambda_1 = 19 \text{ cm}$ , L2 tem frequência de 1,2276 GHz e comprimento de onda de  $\lambda_2 = 24 \text{ cm}$  e L5 tem frequência de 1,17645 GHz e comprimento de onda de  $\lambda_5 = 25 \text{ cm}$ . (BEACH, 1998; PEREIRA, 2015).

Todos os satélites GPS emitem sinais nas mesmas frequências. Para que o receptor possa os diferenciar, cada satélite é identificado pelo seu código PRN (*Pseudo Random Noise*), que é transmitido e modulado sobre as portadoras, técnica que é chamada CDMA (do inglês “Code Division Multiple Access”). Esse código transmite dados sobre o relógio do satélite, sua órbita, condições operacionais e outras informações. A modulação permite realizar medidas de distância através de estimativas do tempo de propagação do sinal. Para isso, o receptor GPS produz uma réplica desse código que é comparado com o código recebido. O código PRN consiste de uma sequência de +1 e -1 que modulam o sinal das portadoras (MUELLA, 2008). Esse processo de modulação é mostrado na Figura 2.3.

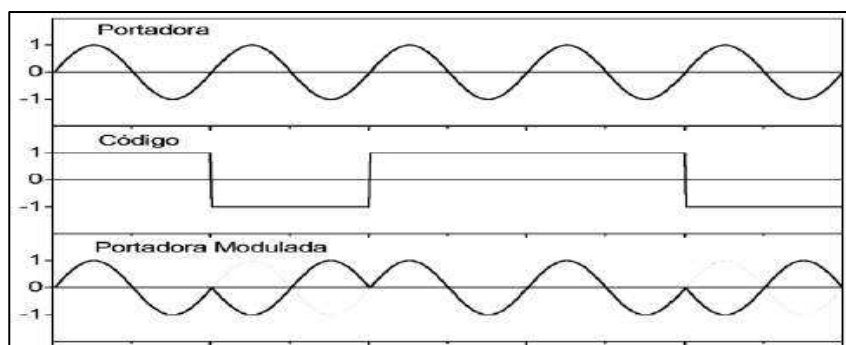


FIGURA 2.3 – Ilustração da modulação do código sobre a portadora (RODRIGUES, 2008).

A sequência PRN é formada pelo código C/A (“Coarse/Aquisition” ou “Clear/Access”), com frequência de 1,023 MHz, repetido a cada milissegundo e pelo código P (“Precision” ou “Protection”), com frequência de 10,23 MHz, repetido a cada 266,4 dias. Quando há a possibilidade do código P ter sido fraudado pela geração de uma réplica, o procedimento “Anti-Spoofing” é acionado, fazendo a criptografia do código P através do código W que o transforma no código Y, não disponível para aplicações civis. Assim, as portadoras moduladas podem ser dadas por:

$$L1 = a_1 P(t) D(t) \cos[\omega_1 t + \phi(t)] + a_1 C/A(t) D(t) \sin[\omega_1 t + \phi(t)] \quad (2.1)$$

$$L2 = a_2 P(t) D(t) \cos[\omega_2 t + \phi(t)] \quad (2.2)$$

onde  $a_i \cos[\omega_i t + \phi(t)]$  é a portadora não modulada,  $\omega_i$  é a frequência da portadora,  $\phi(t)$  é o ruído da fase,  $D(t)$  contém a mensagem de navegação,  $P(t)$  e  $C/A(t)$  representam as sequências de pulso dos códigos P e C/A, respectivamente. A fase do código C/A é deslocada 90° do código P, por esse motivo se utiliza o seno para representar sua contribuição. A frequência L5 possui taxa de transmissão dez vezes a do sinal C/A (RODRIGUES, 2008).

No GPS, as distâncias  $x_i$  entre os satélites e o usuário são estimadas através do tempo de propagação do sinal desde o satélite até o receptor. As posições dos satélites são conhecidas pelo usuário através das informações enviadas no sinal GPS. Quatro satélites e quatro distâncias são necessárias para o posicionamento. Conhecendo a posição do satélite  $S_i$  e a distância  $x_i$  do usuário até ele, as possíveis posições do usuário são definidas pela superfície da esfera de raio  $x_i$  ao redor da posição do satélite  $S_i$ . A intersecção de duas superfícies esféricas define uma circunferência. A intersecção dessa circunferência com uma terceira esfera centrada em outro satélite define dois pontos. Destes dois pontos, apenas um encontra-se próximo à superfície da Terra e define a posição do usuário. Um quarto satélite é necessário para corrigir a diferença de tempo entre os relógios dos satélites e o receptor (MUELLA, 2008).

Ao longo dos anos a constelação de satélites GPS tem se modernizado na estrutura do sinal e adição de novas frequências. Os primeiros satélites do sistema GPS são os do Bloco I. A partir de 1989, os satélites dos Blocos II e IIA foram postos em órbita, permanecendo em operação até 1997. Os satélites do Bloco IIR/IIR-M serviram para substituir os satélites dos Blocos II e IIA. Os satélites do Bloco IIR-M apresentaram novos sinais, com o código L2C na frequência L2 e o código militar M nas frequências L1 e L2. A partir de 2010, foram lançados os satélites do Bloco IIF, que têm como principal novidade a inclusão de sinais na frequência L5. Em dezembro de 2018, foi lançado o primeiro satélite do Bloco III, contendo novos sinais

e autonomia de monitoramento da integridade dos sinais. A figura 2.4 mostra os blocos de satélites desenvolvidos até o momento (VANI, 2014; JEREZ, 2017).



FIGURA 2.4 – Blocos de satélites GPS (GPS.gov apud JEREZ, 2017).

### 2.3 – As observáveis GPS

As observáveis GPS são a pseudodistância e fase da onda portadora, utilizadas para determinar a posição, velocidade e tempo no receptor. O receptor obtém essas observáveis comparando o sinal recebido com uma réplica do sinal gerada internamente. As diferenças de tempo possibilitam obter as pseudodistâncias e as diferenças de fase possibilitam obter a fase da onda portadora.

As pseudodistâncias representam uma estimativa da distância geométrica entre o satélite e o receptor, obtidas através do código C/A da portadora L1 e/ou código P das portadoras L1 e L2. Comparando o tempo de atraso entre um trecho do código com a réplica desse código no receptor, tem-se o tempo de propagação do sinal. Multiplicando esse tempo pela velocidade da luz no vácuo, resulta na pseudodistância. Entretanto, essa não corresponde a distância verdadeira, pois diversos fatores resultam em erros e atrasos na propagação do sinal. A pseudodistância pode ser obtida através das portadoras L1 e L2 por:

$$\rho_1 = R + c\Delta\delta + \Delta_{g,L_1}^{IONO} + \Delta^{TROP} + d_{\rho_1}^R + d_{\rho_1}^S + m_{\rho_1} + \varepsilon_{\rho_1} \quad (2.3)$$

$$\rho_2 = R + c\Delta\delta + \Delta_{g,L_2}^{IONO} + \Delta^{TROP} + d_{\rho_2}^R + d_{\rho_2}^S + m_{\rho_2} + \varepsilon_{\rho_2} \quad (2.4)$$

onde  $R$  é a distância geométrica entre o receptor e o satélite,  $c\Delta\delta$  é o erro devido aos desvios do relógio do satélite e o do receptor em relação ao tempo GPS,  $\Delta^{IONO}$  é o erro devido à refração ionosférica,  $\Delta^{TROP}$  é o erro devido à refração troposférica,  $d^R$  e  $d^S$  são os erros devido aos atrasos instrumentais do receptor e do satélite, respectivamente,  $m$  denota o erro devido a reflexões por múltiplos caminhos e  $\varepsilon$  é o erro devido a ruídos no receptor.

A fase da onda portadora  $\Phi$  é a diferença entre a fase do sinal do satélite recebido pelo receptor e a fase do sinal gerado no receptor no instante da recepção. As medidas de fase com relação as portadoras L1 e L2 podem ser dadas por:

$$\Phi_1 = R + c\Delta\delta + \Delta_{f,L_1}^{IONO} + \Delta^{TROP} + \lambda_1 N_1 + d_{\phi_1}^R + d_{\phi_1}^S + m_{\phi_1} + \varepsilon_{\phi_1} \quad (2.5)$$

$$\Phi_2 = R + c\Delta\delta + \Delta_{f,L_2}^{IONO} + \Delta^{TROP} + \lambda_2 N_2 + d_{\phi_2}^R + d_{\phi_2}^S + m_{\phi_2} + \varepsilon_{\phi_2} \quad (2.6)$$

onde  $\lambda$  é comprimento de onda dos sinais L1 e L2 e  $N_i$  é um número conhecido como ambiguidade e resulta do desconhecimento do número total de ciclos contidos na trajetória do sinal do satélite ao receptor (MUELLA, 2008).

O sinal de GPS é suscetível a erros que podem ser por diversos fatores, desde a transmissão pelo satélite até a sua recepção por um usuário. Na transmissão, podem ocorrer erros no relógio do satélite, erro orbital ou atraso nos instrumentos. Durante a propagação do sinal podem ocorrer refração ionosférica, refração troposférica, múltiplo caminho, perdas de ciclo, que podem provocar variações na direção de propagação, velocidade de propagação, polarização e em sua intensidade. E na recepção, podem ocorrer erros no relógio do receptor e atraso instrumental do receptor (MONICO, 2008). Tudo isso degrada a qualidade do sinal de GPS e consequentemente a acurácia do posicionamento.

### 3 Fundamentos da ionosfera de baixas latitudes

A atmosfera terrestre é composta gases em uma distribuição que depende de fatores como hora local, altitude, latitude, longitude, época do ano e atividade solar. Pode-se considerar a atmosfera como sendo composta por camadas de gases concêntricas que podem ser classificadas de acordo com a temperatura, ionização, campo magnético e propagação de ondas eletromagnéticas, como mostra a figura 3.1 (PEREIRA, 2015).

| Altura [km]       | Temperatura  | Ionização    | Campo Magnético | Propagação |
|-------------------|--------------|--------------|-----------------|------------|
| 100.000<br>10.000 | Termosfera   | Protonosfera | Magnetosfera    | Ionosfera  |
| 1.000             |              | Ionosfera    |                 |            |
| 100               | Mesosfera    | Neutrosfera  | Dinamosfera     | Troposfera |
|                   | Estratosfera |              |                 |            |
| 10                | Troposfera   |              |                 |            |

FIGURA 3.1 – Estratificação da atmosfera terrestre (Adaptada de SEEGER, 2008 apud PEREIRA, 2015).

Até cerca de 12 km de altitude, a camada atmosférica é chamada de troposfera, sendo composta principalmente por oxigênio, dióxido de carbono, nitrogênio e vapor de água, concentrando a maior porcentagem dos gases. É o vapor de água, juntamente com a temperatura e pressão atmosférica os fatores que mais afetam a propagação dos sinais de GNSS. Entretanto, o que mais afeta a propagação dos sinais de GNSS é a camada superior da atmosfera, chamada ionosfera. Assim, os sinais de GNSS são uma importante ferramenta para estudar a refração ionosférica.

### 3.1 Formação e estrutura da ionosfera

A ionosfera é uma região da atmosfera que tem como principal característica a alta densidade de íons e elétrons. Fica localizada entre aproximadamente 50 e 1000 km de altitude. A principal fonte geradora de íons e elétrons livres na ionosfera é a fotoionização de elementos atmosféricos neutros da alta atmosfera (oxigênio atômico – O, oxigênio molecular – O<sub>2</sub>, nitrogênio molecular – N<sub>2</sub>, etc.) causada pela radiação solar, predominantemente na faixa do extremo ultravioleta (EUV) e raios-X, por efeito fotoelétrico, liberando íons carregados positivamente e elétrons livres para formar o plasma ionosférico, como é ilustrado na figura 3.2 com a fotoionização de um átomo de oxigênio. Somente os elétrons livres têm o potencial para afetar a propagação das ondas de rádio, pois os íons são muito pesados para responderem às rápidas oscilações do campo elétrico das ondas de rádio.



FIGURA 3.2 – Processo de fotoionização (POZ, 2010).

Outra fonte de cargas elétrica é o choque desses elementos com partículas carregadas de origem solar ou galáctica que penetram na atmosfera. Isso ocorre principalmente na região dos pólos e na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). Os perfis verticais típicos de densidade eletrônica da ionosfera durante o dia e durante a noite são mostrados na figura 3.3 (SANTOS, 2013; RODRIGUES, 2008).

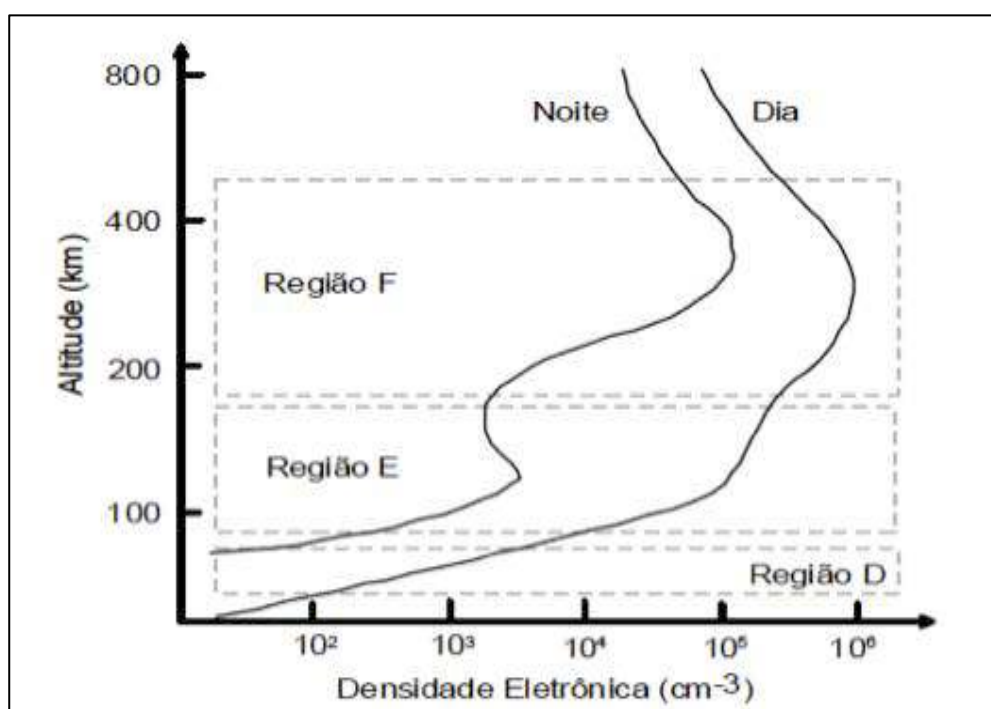


FIGURA 3.3 – Perfis verticais típicos de densidade eletrônica (RODRIGUES, 2008).

Os parâmetros dos perfis verticais de densidade eletrônica mostrados na figura 3.3, como altura do pico de máxima densidade, densidade máxima, conteúdo eletrônico total, variam com a hora local, latitude, estação do ano, ciclo solar, atividade magnética, características químicas da atmosfera local, dentre outros. Esses fatores apresentam grande variabilidade, fazendo que esses perfis não sejam sempre tão simples.

Uma explicação para a presença de picos de ionização no perfil é o resultado do produto entre uma crescente intensidade de radiação ionizante com a altura e uma decrescente quantidade de elementos ionizáveis. Isso é ilustrado na figura 3.4 (SANTOS, 2013; RODRIGUES, 2008).

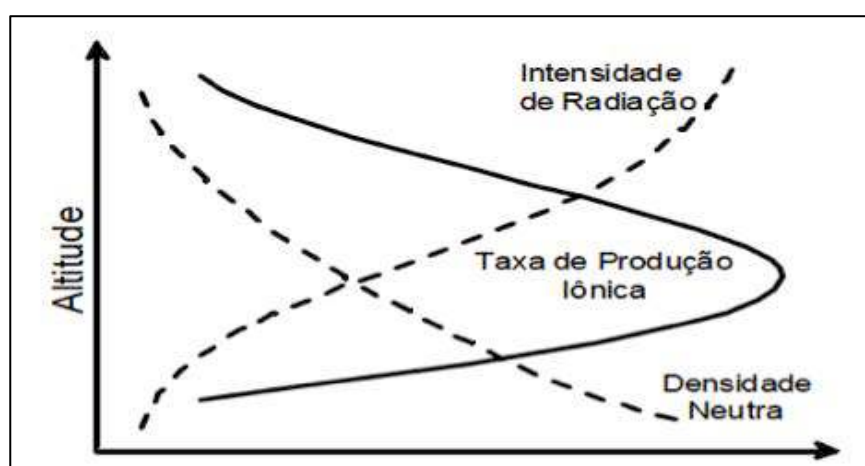


FIGURA 3.4 – Formação do pico de ionização (RODRIGUES, 2008).

Devido a diferenças de constituintes neutros, taxas de absorção em diferentes altitudes a ionosfera pode ser dividida em três regiões principais: D, E e F. A região D existe somente durante o dia e localiza-se abaixo de aproximadamente 90 km de altitude, sendo uma região fracamente ionizada. As principais fontes de ionização desta região são radiação Lyman- $\alpha$ , radiação EUV, raios-X, radiação cósmica e partículas energéticas (CUEVA, 2013).

As regiões E e F são mais ionizadas que a região D, mantém-se a noite e apresentam picos de ionização em torno de 120 km e 300 km, respectivamente. A região E é ionizada por raios-X moles (alta frequência) e radiação solar ultravioleta. A região F é a parte mais alta da ionosfera e se divide em duas sub-regiões: a região F<sub>1</sub>, localizada em torno de 200 km e a região F<sub>2</sub>, localizada em torno de 300 km e apresenta grande densidade de elétrons livres. A altitude de pico na densidade eletrônica na camada F<sub>2</sub> em torno de 350 km é utilizada para fins de modelagem da ionosfera para fins de mapeamento do conteúdo eletrônico total (TEC, do inglês *total electron content*) (CUEVA, 2013).

### 3.2 Eletrodinâmica da ionosfera equatorial

Os fenômenos na ionosfera são dirigidos pelo campo magnético da Terra. A direção do campo magnético varia com a latitude. Em altas latitudes, o campo magnético é aproximadamente vertical e os campos elétricos e correntes que governam o movimento horizontal do plasma ionosférico estão acoplados à magnetosfera e ao vento solar através do campo magnético terrestre. A precipitação de partículas energéticas da magnetosfera ocorre na ionosfera de altas latitudes dando origem ao fenômeno das auroras (SANTOS, 2013; RODRIGUES, 2008).

Na ionosfera de baixas latitudes, o campo magnético é quase horizontal e o movimento vertical do plasma dá origem a instabilidades na ionosfera equatorial. Esta região é sensível a distúrbios magnéticos em altas latitudes e mudanças nas correntes magnetosféricas. Já em médias latitudes, a ionosfera se aproxima dos modelos ionosféricos clássicos, possuindo propriedades de transição entre a ionosférica de baixas e altas latitudes (MORO, 2015).

O surgimento de campos elétricos e correntes na atmosfera ocorre sob influência do Sol e da Lua que exercem forças de marés na atmosfera, causando movimentos horizontais em gases neutros. Esse movimento através das linhas de campo geomagnético forma correntes

elétricas na região E em níveis onde a condutividade elétrica é apreciável. Devido às variações horizontais e verticais de condutividade, as correntes não podem fluir livremente em todas as direções. Desta forma, são geradas cargas de polarização que, por sua vez, modificam o fluxo de corrente. Os campos eletrostáticos associados com estas cargas são transmitidos à região F equatorial através das linhas de campo geomagnéticas que são altamente condutoras. Na região F, esses campos eletrostáticos dão origem às derivas eletromagnéticas ( $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ). Esse fenômeno é chamado de *Efeito Dínamo Atmosférico* (EDA) (MORO, 2015; SANTOS, 2013).

O EDA causa movimentos atmosféricos de deriva positiva (para cima) durante o dia e negativa (para baixo) durante a noite na região equatorial. Ocorre um pico de deriva vertical positiva logo após o pôr-do-sol, chamado de pico de pré-reversão da deriva vertical e é responsável por muitas peculiaridades da ionosfera equatorial.

As derivas verticais da camada F equatorial dão origem a Anomalia de Ionização Equatorial ou Anomalia de Appleton. Esse fenômeno consiste em uma região de alta densidade eletrônica na atmosfera entre latitudes de aproximadamente 20° norte e sul. O pico de pré-reversão da deriva vertical, que ocorre logo após o pôr-do-sol, faz que o plasma da região F se eleve até grandes altitudes. Enquanto isso, o plasma de baixas altitudes decai devido à diminuição da radiação solar (AGUIAR, 2005).

Após se elevar até grandes altitudes, o plasma inicia seu movimento de descida ao longo das linhas de campo magnético, também sob a ação da gravidade ( $\mathbf{g}$ ) e gradiente de pressão ( $\nabla p$ ). A Figura 3.5 ilustra esse processo.

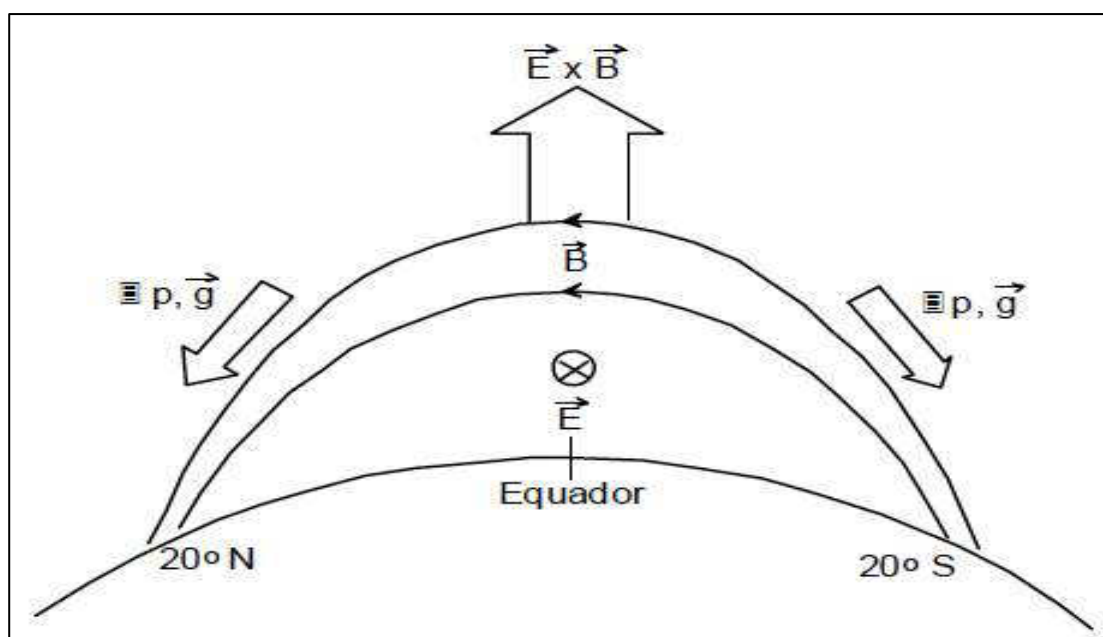


FIGURA 3.5 – O plasma é elevado até grandes altitudes na região equatorial e desce ao longo das linhas de campo magnético a latitudes de aproximadamente 20° norte e sul (RODRIGUES, 2008).

A teoria da instabilidade Rayleigh-Taylor generalizada (GRT) é atualmente o modelo que mais se aproxima ao buscar explicar as irregularidades ionosféricas. Ela inclui parâmetros ambientais, como a gravidade, campos eletromagnéticos e ação de ventos neutros, pois processos eletrodinâmicos intrínsecos da ionosfera equatorial e de médias latitudes, assim como efeitos de acoplamento ionosfera-magnetosfera em altas latitudes controlam a geração e evolução das irregularidades ionosféricas. Essas irregularidades são em geral chamadas de camada F espalhada, ou ESF (do inglês *Equatorial Spread F*). Medidas de satélites e foguetes de sondagem mostram acentuadas depleções de plasma, chamadas bolhas ionosféricas, com altos valores de campo elétrico zonal em seu interior (SANTOS, 2013; RODRIGUES, 2008).

Acredita-se que as condições necessárias para a ocorrência de ESF de larga escala são a presença de uma perturbação inicial de larga escala, um gradiente direcionado para cima do perfil de densidade eletrônica da ionosfera e um aumento do campo elétrico para leste. O grande número de efeitos potencialmente importantes faz com que os termos de variabilidade dia-a-dia constituam os problemas a serem melhor analisados no estudo do ESF.

### 3.3 Refração ionosférica

A ionosfera afeta o modo como as ondas eletromagnéticas se propagam pelo espaço, alterando, principalmente sua velocidade de propagação e direção. Isso gera erros em sistemas GNSS, que dependem da constância na velocidade da luz para oferecer boas medidas. Esse erro está diretamente relacionado ao TEC, ou seja, a quantidade de elétrons presentes na trajetória satélite-receptor. É comum expressar esse parâmetro ionosférico em unidades de TEC (TECU – TEC *Unit*), sendo que 1 TECU corresponde a  $1 \times 10^{16}$  elétrons/m<sup>2</sup>. Entretanto, o TEC varia no tempo e no espaço devido a variações da radiação solar, da localização, período do ano, hora local, do campo magnético terrestre e a anomalias e irregularidades ionosféricas, como a anomalia equatorial e bolhas ionosféricas (MONICO, 2008).

No vácuo, o índice de refração é unitário indicando que a velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas não é afetada pelo meio, além de ser independente da frequência. Entretanto, a ionosfera é dita um meio dispersivo, pois cada uma das componentes que compõem o pulso se propaga com velocidade diferente. O desvio no índice de refração causa um retardo na velocidade de fase,  $V_f$ , da portadora dada por

$$V_f = \lambda f \quad (3.1)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $f$  a frequência. Por outro lado, a velocidade de grupo,  $V_g$ , sofre um avanço, podendo ser expressa como (MONICO, 2008)

$$V_g = -\frac{df}{d\lambda} \lambda^2 \quad (3.2)$$

Derivando a equação (3.1) em relação ao comprimento de onda  $\lambda$ , obtém-se

$$\frac{dV_f}{d\lambda} = f + \lambda \frac{df}{d\lambda} \quad (3.3)$$

Assim, é possível obter a relação entre velocidade de grupo e a velocidade de fase substituindo  $\lambda \frac{df}{d\lambda}$  na equação (3.2), chamada de equação de *Rayleigh*

$$V_g = V_f - \lambda \frac{dV_f}{d\lambda} \quad (3.4)$$

Os índices de refração para as velocidades de grupo e de fase em um meio isotrópico e homogêneo são dados, respectivamente, por

$$n_f = \frac{c}{V_f} \quad (3.5)$$

$$n_g = \frac{c}{V_g} \quad (3.6)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo. Esse conceito é atribuído a Fresnel, que o teria criado na década de 1820. Substituindo (3.5) e (3.6) em (3.4) e diferenciando em relação a  $\lambda$ , obtém-se

$$\frac{1}{n_g} = \frac{1}{n_f} \left( 1 + \lambda \frac{1}{n_f} \frac{dn_f}{d\lambda} \right) \quad (3.7)$$

e invertendo essa equação, obtém-se

$$n_g = n_f \left( 1 + \lambda \frac{1}{n_f} \frac{dn_f}{d\lambda} \right)^{-1} \quad (3.8)$$

Considerando  $\lambda \frac{1}{n_f} \frac{dn_f}{d\lambda}$  um número muito pequeno, pode-se utilizar a aproximação

$$\left( 1 + \lambda \frac{1}{n_f} \frac{dn_f}{d\lambda} \right)^{-1} \cong 1 - \lambda \frac{1}{n_f} \frac{dn_f}{d\lambda} \quad (3.9)$$

para substituir na equação (3.8) e encontrar a relação entre esses dois índices de refração, chegando a equação modificada de *Rayleigh*, como dado abaixo:

$$n_g = n_f - \lambda \frac{dn_f}{d\lambda} \quad (3.10)$$

É possível obter o índice  $n_g$  com outra forma. Efetuando a diferenciação de  $c = \lambda f$  em relação a  $f$ , obtém-se

$$d\lambda = -\lambda \frac{df}{f} \quad (3.11)$$

Substituindo (3.11) em (3.10), tem-se

$$n_g = n_f + f \frac{dn_f}{df} \quad (3.12)$$

O índice de refração da fase na ionosfera pode ser aproximado pela série (SEEBER, 1993 apud MONICO, 2008)

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \quad (3.13)$$

onde os coeficientes  $c$  dependem apenas da densidade de elétrons ao longo da trajetória satélite-receptor,  $n_e$ . Considerando somente os efeitos de primeira ordem, a equação (3.13) pode ser aproximada por

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2} \quad (3.14)$$

cujas derivadas pode ser substituída na equação (3.10) para obter

$$n_g = 1 - \frac{c_2}{f^2} \quad (3.15)$$

O coeficiente  $c_2$  é dado por (CAMARGO, 1999; FREDRIZZI, 1999 apud MONICO, 2008)

$$c_2 = -40,3n_e \quad (3.16)$$

Logo, as equações (3.14) e (3.15) podem ser escritas como

$$n_f = 1 - \frac{40,3n_e}{f^2} \quad (3.17)$$

$$n_g = 1 + \frac{40,3n_e}{f^2} \quad (3.18)$$

Isso significa que as velocidades de grupo e fase apresentam valores diferentes, com a velocidade de grupo  $V_g$  menor que a velocidade de fase  $V_f$ . A velocidade de grupo é limitada pela velocidade da luz no vácuo,  $c = 299792458 \text{ m/s}$ , já que é o grupo que carrega a informação (fótons) do sinal. Já a velocidade de fase não possui limite, podendo ser até maior que a velocidade da luz. Consequentemente, distâncias medidas através dos códigos modulados sobre a portadora serão maiores que as distâncias obtidas através da fase da portadora (MONICO, 2008).

A distância medida entre o satélite (s) e o receptor (r) por qualquer um dos métodos descritos acima, ou seja, através dos códigos ou da fase, pode ser descrita através da equação abaixo:

$$S = \int_r^s n \, ds \quad (3.19)$$

onde  $n$  é o índice de refração do método utilizado. O erro sistemático que ocorre na medida da distância entre o receptor e o satélite, ou simplesmente refração ionosférica, pode ser dado pela diferença entre a distância medida com a equação (3.19) e a distância geométrica  $\rho$ . Para o caso em que a medida é feita utilizando a fase da portadora, o erro  $I_{f_r}^s$  é dado por

$$I_{f_r}^s = \int_r^s \left(1 - \frac{40,3n_e}{f^2}\right) ds - \rho \quad (3.19)$$

ou

$$I_{f_r}^s = -\frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e \, ds \quad (3.20)$$

Na equação (3.20), podemos observar que a integral da densidade de elétrons ao longo da trajetória satélite-receptor representa o TEC, dado por

$$TEC = \int_r^s n_e \, ds \quad (3.21)$$

Assim, pode-se escrever a equação (3.20) como

$$I_{f_r}^s = -\frac{40,3}{f^2} TEC \quad (3.22)$$

e executando o mesmo procedimento para a refração ionosférica do sinais modulados por código, obtém-se o erro  $I_{g_r}^s$  dado por

$$I_{g_r}^s = \frac{40,3}{f^2} TEC \quad (3.23)$$

Das equações (3.22) e (3.23), pode-se perceber que o erro devido à refração ionosférica é diretamente proporcional ao TEC e inversamente proporcional ao quadrado da frequência. Assim, sinais de alta frequência sofrem menos os efeitos da ionosfera. Entretanto, é difícil encontrar um método que estime o TEC com a precisão necessárias aos levantamentos geodésicos. Para considerar o TEC na direção vertical (VTEC), o efeito da refração pode ser calculado por

$$I_{f_r}^s = -\frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} VTEC \quad (3.24)$$

$$I_{g_r}^s = \frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} VTEC \quad (3.25)$$

onde  $z'$  é o ângulo zenital do caminho do sinal em relação a altura média da ionosfera  $h_m$  denominado ponto ionosférico (PI), como mostra a figura 3.6.

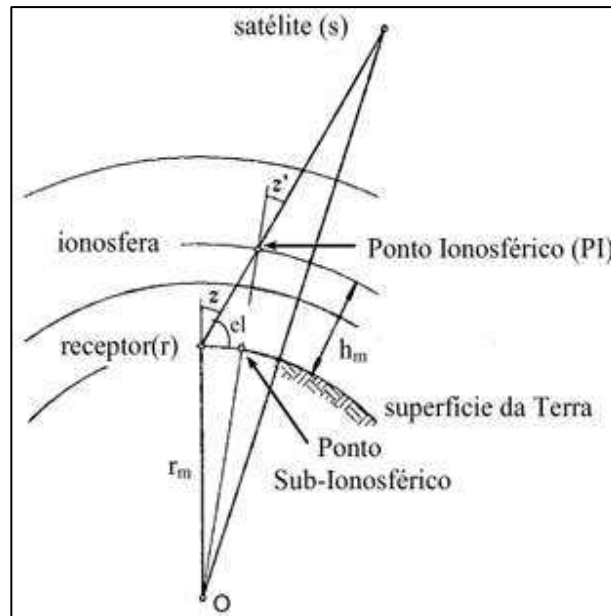


FIGURA 3.6 – Geometria da trajetória do sinal de GPS (MONICO, 2008).

O valor do ângulo zenital é dado por (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER, COLLINS, 1997 apud MONICO, 2008):

$$\sin z' = \frac{R_m}{R_m + h_m} \sin z \quad (3.26)$$

onde  $R_m$  é o raio médio da Terra – 6371 km. A localização do PI pode ser obtida através da latitude ( $\varphi_r$ ) e longitude ( $\lambda_r$ ) do receptor, do azimuth ( $Az$ ) e elevação ( $el$ ) do satélite. Assim, a latitude ( $\varphi_{PI}$ ) e longitude ( $\lambda_{PI}$ ) do PI são dadas por

$$\varphi_{PI} = \sin^{-1}[\sin \varphi_r \cos \psi + \cos \varphi_r \sin \psi \cos Az] \quad (3.27)$$

$$\lambda_{PI} = \lambda_r + \sin^{-1} \left( \frac{\sin \psi \sin Az}{\cos \varphi_{PI}} \right) \quad (3.28)$$

onde

$$\psi = \frac{\pi}{2} - el - \sin^{-1} \left( \frac{R_m}{R_m + h_m} \cos el \right) \quad (3.29)$$

Neste trabalho, adota-se  $h_m$  como sendo igual a 350 km. Através de observações GPS e das equações (3.27) e (3.28) é possível determinar os pontos ionosféricos para utilização de um modelo de camada simples da ionosfera.

## 4 Cintilação em amplitude

### 4.2 Histórico do estudo das cintilações ionosféricas

A Segunda Guerra Mundial favoreceu o desenvolvimento da tecnologia de construção de antenas e receptores de radiofrequência. Isso permitiu que fosse possível estudar as transmissões de ondas de rádio com origem em pontos discretos da galáxia. Em 1946, Hey *et al.* verificou que ondas de rádio vindas da constelação de Cygnus apresentavam variações rápidas de amplitude em frequências que variavam entre 64 MHz e 68 MHz, bem como de ondas de rádio vindas da constelação de Cassiopéia, com frequência de 38 MHz. Concluiu-se que essas variações não eram inerentes a fonte, pois receptores instalados distantes em cerca de 200 km não apresentavam correlação em suas medidas de cintilação. Entretanto, receptores instalados próximos um do outro, cerca de 4 km, mostravam boa correlação entre os dados medidos. Dessa forma, esse deveria ser um fenômeno local, produzido pela atmosfera terrestre. Essas flutuações do sinal são chamadas cintilações (MUELLA, 2008; MATSUOKA, 2007).

Passou-se a utilizar sinais provenientes de fontes extraterrestre para fins de estudo da ionosfera terrestre, pois haviam suspeitas que a causa dessas cintilações seriam irregularidades nas camadas E e F da ionosfera. Após o lançamento dos primeiros satélites a partir de 1957, foi possível estudar a ionosfera utilizando os sinais de rádio emitidos por eles, efetuando medidas de cintilação ionosférica para entender sobre os princípios físicos e dinâmicos que regem as irregularidades ionosféricas e buscar minimizar os problemas de comunicação relacionados as comunicações por satélite acarretados por esse fenômeno. Essas variações rápidas no sinal causam a degradação das medidas de fase e pseudodistâncias por receptores GNSS, afetando a estimativa das coordenadas e dificultando o rastreamento dos satélites observados (YEH e LIU, 1982; MENDONÇA, 2013).

Desde a década de 1970, têm-se utilizado monitores de cintilação ionosférica para verificar os níveis de cintilação em tempo real sobre o sinal de GPS na frequência L1. Atualmente, sabe-se que o fenômeno da cintilação nas observações ionosféricas que utilizam os sinais de GPS são uma assinatura das irregularidades eletrônicas na ionosfera e a principal causa dos erros de navegação por satélite. Essas irregularidades são fenômenos predominantemente noturnos que ocorrem na camada F a altitudes entre 200 e 600 km, mas

que em raras situações também pode ocorrer durante o dia, podendo afetar sinais em uma ampla faixa de frequência, indo de 20 MHz até cerca de 10 GHz, sendo mais comum em sinais de até 3 GHz (MUELLA, 2008; MENDONÇA, 2013).

As cintilações em amplitude são variações rápidas na potência do sinal recebido por um receptor, resultando em seu enfraquecimento, causando perda do sinal. A potência de um sinal representa a quantidade de energia que é capturada em uma determinada área por unidade de tempo, sendo medida em  $\text{W/m}^2$  (MONICO, 2008).

### 4.3 Teorias de cintilação ionosférica

Para compreender o fenômeno da cintilação ionosférica, utiliza-se um modelo da ionosfera representada por uma tela de difração com irregulares de direção e velocidade constantes, e densidade eletrônica variável no tempo, localizada a uma altura  $h$  do receptor e com espessura  $L$ , onde frentes de onda plana incidem, sendo afetadas por variações no índice de refração. A Figura 4.1, mostra a geometria do modelo.

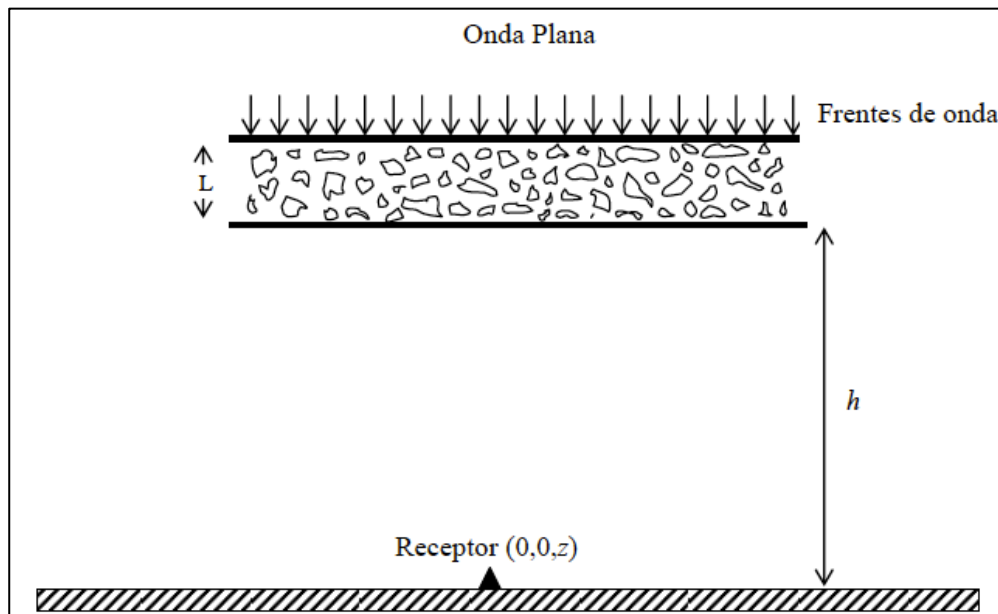


FIGURA 4.1 – Geometria do modelo de cintilação ionosférica (MUELLA, 2008).

A camada de irregularidades se estende de  $z = 0$  para  $z = L$ . O sinal entra nessa camada em  $z = 0$  e encontra o receptor no chão em  $(0,0,z)$ . Ela é caracterizada por sua permissividade dielétrica

$$\varepsilon = \langle \varepsilon \rangle [1 + \varepsilon_1(\vec{r}, t)] \quad (4.1)$$

onde  $\langle \varepsilon \rangle$  é a permissividade dielétrica média, dada por

$$\langle \varepsilon \rangle = (1 - f_{p0}^2/f^2)(\varepsilon_0) \quad (4.2)$$

e  $\varepsilon_1(\vec{r}, t)$  são flutuações aleatórias na permissividade dielétrica ocasionadas pelas irregularidades na ionosfera, dada por

$$\varepsilon_1(\vec{r}, t) = - \frac{(f_{p0}/f)^2 [\Delta N(\vec{r}, t)/N_0]}{1 - (f_{p0}/f)^2} \quad (4.3)$$

onde  $f_{p0}$  é a frequência associada ao plasma com densidade eletrônica  $N_0$  e  $f$  é a frequência da onda de rádio incidente.  $\Delta N(\vec{r}, t)/N_0$  representa a porcentagem na flutuação da densidade eletrônica no plasma ionosférico ao longo do tempo.

Antes de incidirem na região de difração, as frentes de onda apresentam fase constante ao longo de superfícies planas. Entretanto, a propagação nessa região ocasiona diferentes velocidades de propagação do sinal e as frentes de onda apresentam distorções ao emergir da região de difração, fazendo com que apresentem cintilações de fase, mas não apresentando cintilações de amplitude. Segundo Yeh e Liu (1982), a variação na fase da onda de rádio é dada por:

$$\Delta\phi(\vec{\rho}, t) = - \frac{\lambda^2}{2\pi} r_e \Delta N_T(\vec{\rho}, t) \quad (4.4)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal de rádio emitido,  $\Delta N_T(\vec{\rho}, t)$  é o desvio do conteúdo eletrônico total ao longo do percurso da onda, dado por:

$$\Delta N_T(\vec{\rho}, t) = \int \Delta N(\vec{\rho}, t, z) dz \quad (4.5)$$

onde  $\Delta N(\vec{\rho}, t, z)$  são as flutuações aleatórias ao longo do eixo vertical do conteúdo eletrônico da ionosfera,  $\vec{\rho}(x, y)$  é o ponto em que o sinal corta a camada de irregularidades e  $r_e$  é o raio do elétron, dado por:

$$r_e = - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 m_e c^2} \quad (4.6)$$

onde  $m_e$  é a massa do elétron,  $e$  é a sua carga elétrica,  $\varepsilon_0$  é a permissividade elétrica no vácuo e  $c$  a velocidade da luz no vácuo. Assim, observa-se que a variação na fase da onda de rádio depende do tamanho, intensidade e distribuição das irregularidades eletrônicas no espaço e no tempo.

Com o aumento da distância percorrida pela onda de rádio após emergir da camada de difração, surgem efeitos sobre a amplitude da onda, devido a interferências construtivas e destrutivas no sinal. A ocorrência dessas irregularidades, depende da distância abaixo da tela de difração, como também depende do tamanho e distribuição das irregularidades (Hewish,

1952). A maior contribuição para a cintilação em amplitude vem dos desvios da fase da onda devido a irregularidades de tamanhos da ordem de:

$$d_F = \sqrt{\lambda(z - L/2)} \quad (4.7)$$

que corresponde ao tamanho da primeira zona de Fresnel. Esse resultado é válido quando a cintilação na fase é fraca, resultante de irregularidades eletrônicas pouco intensas. Quando as irregularidades se tornam intensas, as cintilações em fase perdem coerência com o tamanho das irregularidades. Além disso, quando a onda emerge da região de difração ela apresenta alterações tanto na fase quando na amplitude (YEH e LIU, 1982).

#### 4.3.1 Teoria da tela de fase da camada de irregularidades

Na teoria da tela de fase a camada de irregularidades é considerada infinitesimal, localizada em  $z = 0$  e o campo elétrico em seu interior pode ser analisado levando-se em consideração a equação de onda da eletrodinâmica. Desde que as variações temporais das irregularidades são mais lentas que o período da onda e os tamanhos dessas irregularidades sejam muito maiores que o comprimento de onda do sinal, pode-se adotar a equação de onda na forma escalar (YEH; LIU, 1982).

$$\nabla^2 E + k^2[1 + \varepsilon_1(\vec{r})]E = 0 \quad (4.8)$$

onde  $E$  é a componente do campo elétrico e

$$k^2 = k_0^2 \langle \varepsilon \rangle \quad (4.9)$$

sendo  $k_0$  o número de onda no espaço livre. A solução da equação 4.8 pode ser escrita na forma

$$\vec{E} = u(\vec{r})e^{-jkz} \quad (4.10)$$

onde  $u(\vec{r})$  é uma amplitude complexa do campo da onda. Assumindo que o espalhamento da onda ocorre em um cone estreito centrado na direção de propagação, que  $z$  é muito maior que o comprimento de onda  $\lambda$  e que a variação na amplitude por atenuação pode ser desprezada, pode-se reescrever a equação 4.8, considerando a propagação abaixo da camada de irregularidades (YEH e LIU, 1982):

$$-2jk \frac{\partial u}{\partial z} + \nabla_{\perp}^2 u = 0, \quad z > L \quad (4.11)$$

Desprezando o caso de propagação retrograda, a solução da equação 4.11 fornece a flutuação da amplitude da onda de rádio da camada de irregularidades até o receptor, podendo ser escrita como

$$u(\vec{\rho}, z) = \frac{jkA_0}{2\pi z} \int \int e^{-j[\phi(\vec{\rho}') + (\frac{k}{2z})|\vec{\rho} - \vec{\rho}'|^2]} d^2\rho' \quad (4.12)$$

onde  $A_0$  é a intensidade média do sinal. Buscando obter fórmulas mais úteis das quantidades observadas, pode-se escrever a equação 4.12 na forma abaixo:

$$u(\vec{\rho}, z) = A_0 e^{[\chi(\vec{\rho}, z) - jS_1(\vec{\rho}, z)]} = A_0 e^{\psi(\vec{\rho}, z)} \quad (4.13)$$

onde  $\chi(\vec{\rho}, z)$  é a amplitude logarítmica e  $S_1(\vec{\rho}, z)$  é o desvio na fase da onda, dadas respectivamente por

$$\chi(\vec{\rho}, z) = \frac{k}{2\pi z} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(\vec{\rho}') \cos \left[ \frac{k|\vec{\rho} - \vec{\rho}'|^2}{2z} \right] d^2\rho' \quad (4.14)$$

$$S_1(\vec{\rho}, z) = \frac{k}{2\pi z} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(\vec{\rho}') \sin \left[ \frac{k|\vec{\rho} - \vec{\rho}'|^2}{2z} \right] d^2\rho' \quad (4.15)$$

Segue que as funções de correlação espacial,  $B$ , para  $\chi$  e  $S_1$  em cintilações fracas:

$$B_\chi(\vec{\rho}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_\phi(\vec{\kappa}_\perp) \sin^2(\kappa_\perp^2 z / 2k (\cos \vec{\kappa}_\perp \cdot \vec{\rho} d^2\kappa_\perp \quad (4.16)$$

$$B_{S_1}(\vec{\rho}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_\phi(\vec{\kappa}_\perp) \cos^2(\kappa_\perp^2 z / 2k (\cos \vec{\kappa}_\perp \cdot \vec{\rho} d^2\kappa_\perp \quad (4.17)$$

sendo  $\Phi_\phi(\vec{\kappa}_\perp)$  o espectro de potência da fase  $\phi(\vec{\rho})$  da onda, considerando que as irregularidades se movem com velocidade uniforme e sem sua estrutura se modificar no espaço, sendo expresso por

$$\Phi_\phi(\vec{\kappa}_\perp) = \lambda^2 r_e^2 \Phi_{\Delta N_T}(\vec{\kappa}_\perp) = 2\pi L \lambda^2 r_e^2 \Phi_{\Delta N_T}(\vec{\kappa}_\perp, 0) \quad (4.18)$$

onde  $\Phi_{\Delta N_T}(\vec{\kappa}_\perp, 0)$  representa o espectro de potência da flutuação na densidade com a componente  $k_z = 0$  (YEH; LIU, 1982).

Das equações 4.16, 4.17 e 4.18 resultam as flutuações médias-quadráticas de  $\chi$  e  $S_1$ , dadas por

$$\langle \chi^2 \rangle = 2\pi L \lambda^2 r_e^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{\Delta N_T}(\vec{\kappa}_\perp, 0) \sin^2(\kappa_\perp^2 z / 2k) d^2\kappa_\perp \quad (4.19)$$

$$\langle S_1^2 \rangle = 2\pi L \lambda^2 r_e^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{\Delta N_T}(\vec{\kappa}_\perp, 0) \cos^2(\kappa_\perp^2 z / 2k) d^2\kappa_\perp \quad (4.20)$$

e os espectros de potência da amplitude logarítmica e do desvio da fase

$$\Phi_\chi(\vec{\kappa}_\perp) = 2\pi L \lambda^2 r_e^2 \Phi_{\Delta N_T}(\vec{\kappa}_\perp, 0) \sin^2(\kappa_\perp^2 z / 2k) \quad (4.21)$$

$$\Phi_{S_1}(\vec{\kappa}_\perp) = 2\pi L \lambda^2 r_e^2 \Phi_{\Delta N_T}(\vec{\kappa}_\perp, 0) \cos^2(\kappa_\perp^2 z / 2k) \quad (4.22)$$

#### 4.3.2 Teoria da cintilação fraca

A teoria da cintilação fraca considera o caso em que ocorrem também variações na amplitude do sinal dentro da camada de irregularidades. Assim, o sinal que emerge da camada de irregularidades apresentará cintilações na fase e na amplitude (YEH; LIU, 1982). Substituindo as equações 4.10 e 4.13 na equação 4.8, obtém-se:

$$-2jk \frac{\partial \psi}{\partial z} + \nabla_\perp^2 \psi + (\nabla_\perp \psi)^2 = -k^2 \varepsilon_1(\vec{r}) \quad (4.23)$$

Considerando a hipótese da cintilação fraca, o termo  $(\nabla_\perp \psi)^2$  pode ser desprezado, obtendo-se a equação abaixo, também conhecida como solução de Rivot:

$$-2jk \frac{\partial \psi}{\partial z} + \nabla_\perp^2 \psi = -k^2 \varepsilon_1(\vec{r}) \quad (4.24)$$

cuja solução geral é dada por:

$$\begin{aligned} \psi(\vec{\rho}, z) = & \frac{jk}{2\rho z} \iint \psi_0(\vec{\rho}') e^{[-jk|\vec{\rho}-\vec{\rho}'|^2]/2z} d^2\rho' \\ & + \frac{k^2}{4\pi} \int_0^z \frac{d\zeta}{z-\zeta} \iint \varepsilon_1(\vec{\rho}, \zeta) e^{[-jk|\vec{\rho}-\vec{\rho}'|^2]/2(z-\zeta)} d^2\rho' \end{aligned} \quad (4.25)$$

onde  $\psi_0(\vec{\rho}')$  representa a onda incidente. O segundo termo da equação representa as variações na amplitude no interior da camada de irregularidades. A solução formal para o sinal capturado pelo receptor no solo é obtida considerando  $u(\vec{\rho}, L) = \exp[\psi(\vec{\rho}, L)]$  como condição inicial na equação 4.11, obtendo novamente a equação 4.13, mas usando a equação 4.25 para obter

$$\psi(\vec{\rho}, z) = \frac{jk}{2\pi(z-L)} \iint \psi(\vec{\rho}', L) e^{[-jk|\vec{\rho}-\vec{\rho}'|^2]/2(z-L)} d^2\rho' \quad (4.26)$$

O espectro de potência entre  $\chi$  e  $S_1$  e o espectro cruzado de potência para o campo da onda no solo pode ser dada por:

$$\begin{aligned} \Phi_{\chi S_1}(\vec{\kappa}_\perp) &= \frac{\pi k^2 L}{4} \left[ 1 \mp \frac{2k}{\kappa_\perp^2} \operatorname{sen} \left( \frac{\kappa_\perp^2 L}{2k} \right) \cos \frac{\kappa_\perp^2}{k} \left( z - \frac{L}{2} \right) \right] \Phi_\varepsilon(\vec{\kappa}_\perp, 0) \\ \Phi_{\chi S_1}(\vec{\kappa}_\perp) &= \frac{\pi k^3}{\kappa_\perp^2} \operatorname{sen} \frac{\kappa_\perp^2 L}{2k} \operatorname{sen} \frac{\kappa_\perp^2}{k} (z - L/2) \Phi_\varepsilon(\vec{\kappa}_\perp, 0) \end{aligned} \quad (4.27)$$

#### 4.4 Índice de cintilação S4

Com o avanço das observações de cintilação ionosférica para longos períodos, surgiu a necessidade de caracterizar a magnitude dessas cintilações através de um índice que levasse em conta características estatísticas do fenômeno (MUELLA, 2008). A amplitude da onda pode ser dividida em harmônicos e o quarto harmônico, o índice de cintilação S4, é o mais importante parâmetro para medir a intensidade das cintilações na amplitude do sinal de rádio causadas pela ionosfera (RODRIGUES, 2003). Ele é definido em termos da intensidade do sinal recebido,  $I$ , como a raiz quadrada da variância (dispersão) normalizada pela média ao longo de um minuto, como mostra a equação abaixo.

$$S4 = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}} \quad (4.28)$$

Os demais índices S podem ser obtidos de forma aproximada a partir do S4 como mostram as equações abaixo:

$$\begin{aligned} S3 &\approx 0,73 S4 \\ S2 &\approx 0,52 S4 \\ S1 &\approx 0,42 S4 \end{aligned} \quad (4.29)$$

A intensidade do sinal, dada em  $W/m^2$ , é calculada utilizando o valor da relação sinal-ruído (*signal noise ratio* - SNR), cuja unidade é o decibel (dB), através da equação abaixo:

$$I = 10^{\frac{SNR}{10}} \quad (4.30)$$

O SNR indica o desempenho do receptor em adquirir os sinais advindos dos satélites, cujo valor representa quantos decibéis o sinal está abaixo do nível do ruído (JOSEPH, 2010 apud MENDOÇA, 2013).

A figura 4.2 mostra um gráfico desse índice medido por um monitor de cintilação Septentrio PolarRxS Pro no dia 28 de março de 2018 a partir das 22:00, período em que o sinal do satélite 16 sofreu cintilação.

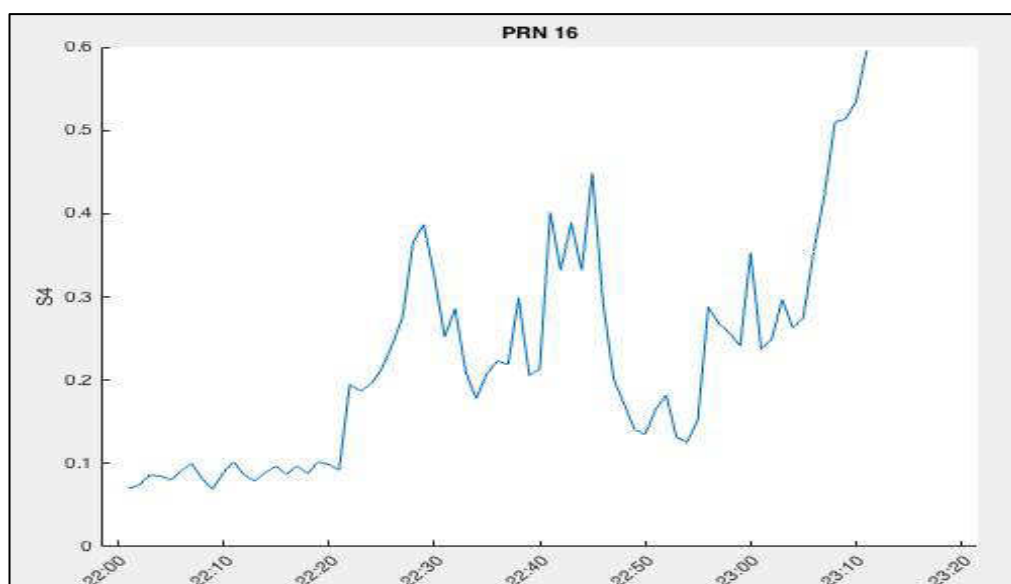


FIGURA 4.2 – Índice de cintilação S4 para o satélite 16 no dia 28 de março de 2018 a partir das 22:00.

Utilizando a teoria da cintilação fraca, Yeh e Liu (1982) mostram que

$$S_4^2 \cong 8\pi^2 r_e^2 \lambda^2 L \iint \left[ 1 - \frac{2k}{\kappa_{\perp}^2} \operatorname{sen} \left( \frac{\kappa_{\perp}^2 L}{2k} \right) \cos \frac{\kappa_{\perp}^2}{k} (z - L/2) \right] \Phi_{\Delta N_T}(\vec{\kappa}_{\perp}, 0) d^2 \kappa_{\perp} \quad (4.31)$$

indicando a contribuição das irregularidades para a cintilação em intensidade através de uma função filtro espacial entre os colchetes da integral, cujo caráter oscilatório é mais expressivo para espessuras de camada,  $L$ , menores e decai para incrementos no valor de  $\kappa$ , apresentando um máximo quando  $\kappa_F = 2\pi/d_F$ . Assim, a maior contribuição para a cintilação em amplitude é devido a irregularidades de tamanhos da ordem de  $d_F$ , como mostra a equação 4.7.

A Tabela 4.1 informa o nível de intensidade da cintilação ionosférica de acordo com o valor do S4.

TABELA 4.1 – Nível de intensidade da cintilação ionosférica ao S4 (MUELLA, 2008)

| Intensidade | S4                   |
|-------------|----------------------|
| Saturado    | $S4 > 1$             |
| Forte       | $0,6 \leq S4 \leq 1$ |
| Moderado    | $0,4 \leq S4 < 0,6$  |
| Fraco       | $0,2 \leq S4 < 0,4$  |

## 4.5 Morfologia global das cintilações

A figura 4.3 mostra a morfologia global das cintilações com a influência da atividade solar.

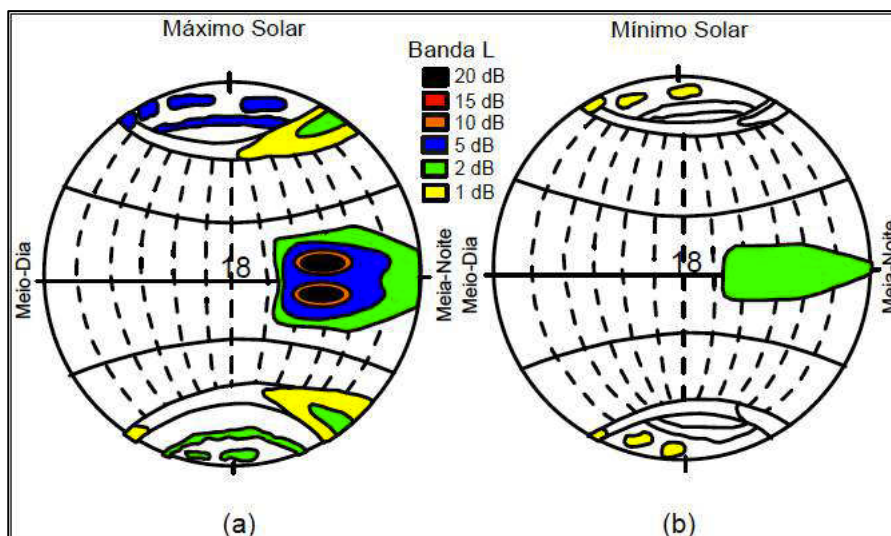


FIGURA 4.3 – Morfologia global das cintilações em sinais da Banda L durante anos de atividade solar (a) máxima e (b) mínima (adaptada de BASU et al., 1988 apud RODRIGUES, 2003).

Nas regiões de pico da anomalia equatorial, entre aproximadamente  $-20^\circ$  e  $20^\circ$  de latitude magnética, ocorrem cintilações com maior intensidade. Isso se deve a ocorrência de ESF e de um máximo secundário de ionização durante o período após o pôr-do-sol. Em altas latitudes também ocorre cintilação, entretanto, mais fraca que na região da Anomalia Equatorial. Se devem a convecção de estruturas de plasma geradas no lado diurno do vértice polar e a irregularidades no plasma causadas pela precipitação de partículas. Na parte mais interna da capa polar, podem ocorrer cintilações a qualquer hora local. Nas regiões de médias latitudes os efeitos da cintilação podem ser ignorados. Em todas as regiões, a variação da densidade eletrônica na ionosfera sofre forte influência da atividade solar (MATSUOKA, 2007).

## 5 Descrição do protótipo

O monitor de cintilação ionosférica (*Ionospheric Scintillation Monitor Receiver – ISMR*) é um instrumento fundamental para o estudo das irregularidades eletrônicas que ocorrem na ionosfera e suas consequências para as comunicações espaciais, especialmente via satélite. Quando uma onda de rádio passa pela ionosfera, ela sofre perturbações em sua fase e/ou amplitude que podem ser medidas no monitor. O monitor executa cálculos com essas medidas e pode assim determinar índices de cintilação. Por padrão, usam-se os sinais dos sistemas de posicionamento por satélite no estudo da ionosfera devido a sua ampla disponibilidade sobre qualquer ponto próximo a superfície da Terra e por não dependerem das condições meteorológicas locais para se fazer a aquisição de dados.

No Brasil, os projetos CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*) e CALIBRA (*Countering GNSS high accuracy applications limitations due to ionospheric disturbances in Brazil*) representam os principais esforços para estabelecer o monitoramento contínuo da ionosfera sobre o território brasileiro e juntas formam a rede CIGALA/CALIBRA. Operando desde 2011, a rede conta em 2018 com 14 estações ativas e equipadas com receptores Septentrio PolaRxS Pro®, sendo seis receptores do Projeto CIGALA, três do Projeto CALIBRA, quatro financiados pela FAPESP e um pertencente ao INPE.

O Septentrio PolaRxS Pro® é um receptor dedicado a aplicações de monitoramento da ionosfera e do clima espacial que opera com as constelações GPS, GLONASS e Galileo, além de possibilitar o uso de SBAS (*Satellite-based Augmentation Systems*) para a navegação aérea. Além disso, é multifrequencial, ou seja, captura dados nas frequências L1, L2, L5, E5a, E5b, incluindo GPS L2C e Galileo E5 AltBOC. Oferece captura de dados de até 100 Hz, obtendo índices de cintilação e TEC com baixo ruído de medição. A figura 5.1 mostra o Septentrio PolaRxS Pro®.



FIGURA 5.1 – Receptor Septentrio PolaRxS Pro® (NAVTECHGPS, 2018).

O Septentrio PolaRxS Pro® é construído com oscilador de cristal controlado por temperatura (*Oven-Controlled Crystal Oscillator – OCXO*) o que lhe garante uma notável precisão. Com essa tecnologia, um sistema eletrônico mantém a temperatura do oscilador constante, de modo a prevenir variações na frequência de operação devido a variações na temperatura ambiente.

Mas, se por um lado o Septentrio PolaRxS Pro® representa o estado da arte no que há em equipamentos para monitoramento da ionosfera, por outro ele é um instrumento de custo elevado, chegando a cerca de US\$ 20 mil. Por essa razão, a quantidade de instrumentos dedicados ao estudo da ionosfera no Brasil é bastante reduzida.

## 5.1 Desenvolvimentos anteriores

A solução para esse ponto seria desenvolver um monitor de cintilação ionosférica de baixo custo que atenda os requisitos de resolução para obtenção dos índices de cintilação, capaz de operar em rede e ser distribuído por todo o território brasileiro para auxiliar as pesquisas sobre a ionosfera. Bragaia (2017) desenvolveu um monitor de cintilação ionosférica chamado IONIK baseado no microcontrolador Arduino, utilizando um sensor GPS para efetuar as medidas. Entretanto, como o Arduino trabalha com uma frequência de 16 MHz, ele acaba perdendo dados. Para resolver esse problema usaram um *buffer* UART (*Universal*

*Asynchronous Receiver/Transmitter*) que armazena os dados enquanto o Arduino está ocupado. Interrupções na execução de 100 ms processam esses dados e então o *buffer* é esvaziado. Verificaram que ao adotar um sensor com frequência de amostragem de 10 Hz é possível conseguir desempenho satisfatório na aquisição dos índices de cintilação em comparação com o monitor comercial.

Além de desenvolver e validar o protótipo, Bragaia e Breder (2017) trabalharam no desenvolvimento do sistema *web* para disponibilização online dos dados em formato NMEA (do inglês, *National Marine Electronics Association*), para que pudessem ser baixados e processados. Esses dados eram salvos em arquivos de texto armazenados em um cartão SD. Verificaram que em 8 horas de gravação de dados, esses arquivos ocupavam 100 MB de espaço, fazendo-se necessário interromper o processo de captura dos dados, retirar o cartão SD do Arduino e inserir em um computador para enviar para o banco de dados e disponibilizar na internet. A figura 5.2 mostra o protótipo do monitor de cintilação ionosférica desenvolvido com Arduino.

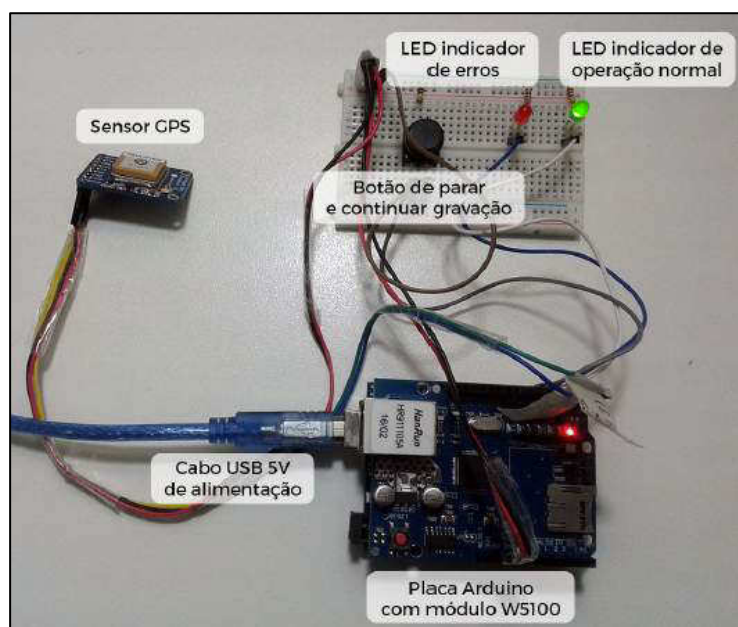


FIGURA 5.2 – Protótipo do monitor baseado no Arduino. (BRAGAIA, 2017)

Então foi proposto desenvolver um monitor de cintilação ionosférica tendo o microprocessador Raspberry Pi 3 como base, com a justificativa de ser uma plataforma com poder de processamento superior ao Arduino, não necessitar de outros módulos para se conectar a internet para ler e escrever em um banco de dados *web*, poder executar múltiplos programas ao mesmo tempo (multitarefa), poder ser programado em outras linguagens além do C, dentre outras vantagens.

Uma primeira versão do programa para captação dos dados usando o Raspberry Pi 3 foi desenvolvida no *The Upper Atmosphere Remote Sensing Lab*, que faz parte do *William B. Hanson Center for Space Sciences (CSS)*, na Universidade do Texas em Dallas, EUA, no ano de 2017. Quando em execução, o programa gera arquivos com extensão .dat na área de trabalho do Raspberry contendo tabelas com a data e hora da medida, PRN do satélite, elevação e azimute, relação sinal ruído – SNR (do inglês *signal-to-noise ratio*), latitude, longitude e altura. A tabela 5.1 mostra um exemplo de dados armazenados.

TABELA 5.1 – Exemplo de dados armazenados no protótipo

| Hora | Minuto | Segundo | Ano | Mês | Dia | PRN | Elevação | Azimute | SNR | Latitude   | Longitude   | Altura |
|------|--------|---------|-----|-----|-----|-----|----------|---------|-----|------------|-------------|--------|
| 19   | 32     | 01.60   | 18  | 03  | 28  | 014 | 020      | 0159    | 040 | -0235.6080 | -04412.7373 | 46.7   |
| 19   | 32     | 01.70   | 18  | 03  | 28  | 008 | 040      | 0302    | 049 | -0235.6080 | -04412.7373 | 46.7   |

Durante está pesquisa, a primeira versão do software de captura de dados foi testada em um protótipo instalado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, localizado em São Luís, ocasião em que foi feita a sua validação, comparando o índice de cintilação S4 calculado os dados do protótipo e o índice proveniente de um Septentrio PolaRxS Pro®. A figura 5.3(a) mostra os dois monitores de cintilação, onde ambos foram ligados em antenas choke-ring uma ao lado da outra para garantir uma melhor comparação entre as medidas feitas com o monitor profissional e o protótipo, como mostra a figura 5.3(b).

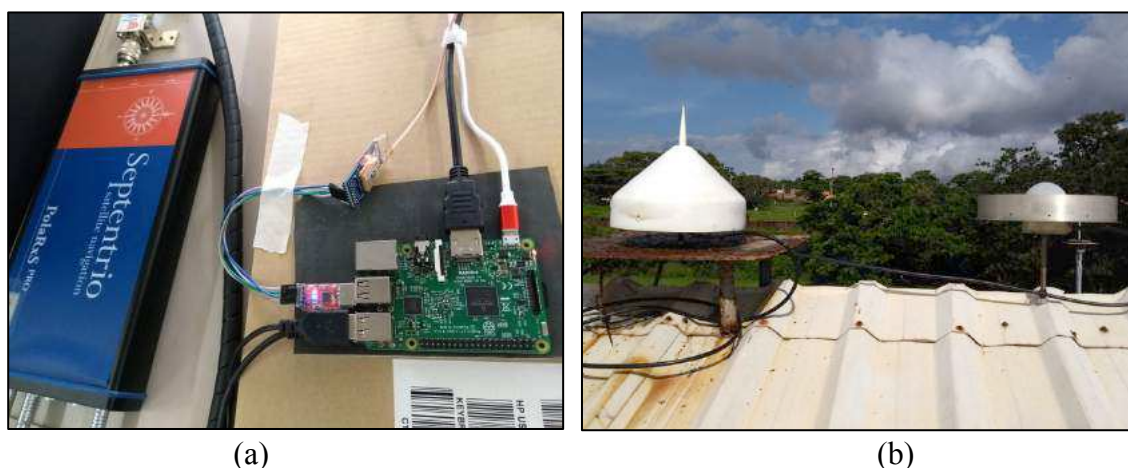


FIGURA 5.3 – a) Protótipo do monitor de cintilação ionosférica ao lado do Septentrio. b) Antenas GNSS helicoidais Choke-ring instaladas sobre o prédio do INPE. À esquerda, a antena do monitor Septentrio e à direita, a antena do protótipo.

O protótipo permaneceu ligado durante três dias de forma ininterrupta coletando dados dos satélites de GPS e armazenando-os na memória do aparelho em tabelas. Isso ocasionou no superaquecimento e queima do sensor GPS e do módulo conversor USB. Foi feita a troca dessas peças e a instalação de um *cooler* para resfriar o equipamento. Não houve mais problemas desde então. A figura 5.4 mostra a nova configuração.

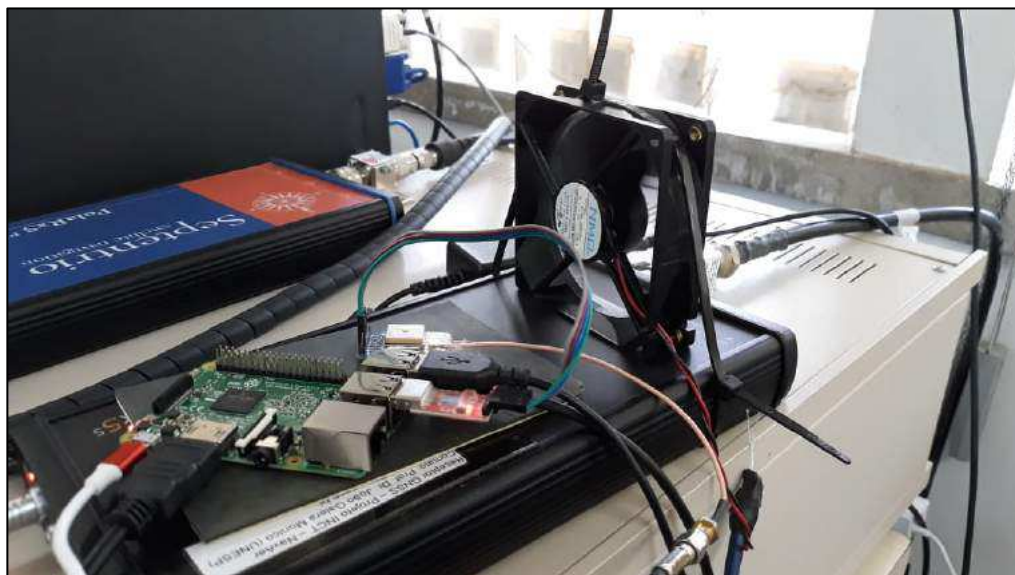


FIGURA 5.4 – Protótipo do monitor de cintilação ionosférica com cooler instalado.

O programa de cálculo do índice de cintilação S4 utilizando os dados gerados com a primeira versão foi desenvolvido em MATLAB, devido a grande facilidade que este software possui em realizar operações com matrizes. Um dia de medidas gera arquivos com tabelas com mais de 12 milhões de linhas, ocupando cerca de 750 MB na memória do aparelho, o que deve ser levado em conta no processamento dos dados, tomando cuidados para que o programa de cálculo do S4 seja o mais otimizado possível.

A figura 5.5 mostra o gráfico do S4 calculado com os dados obtidos do PRN 16 com o protótipo e o Septentrio no dia 28 de março de 2018 de 22:00 à 00:00, quando a cintilação ionosférica normalmente é mais alta.

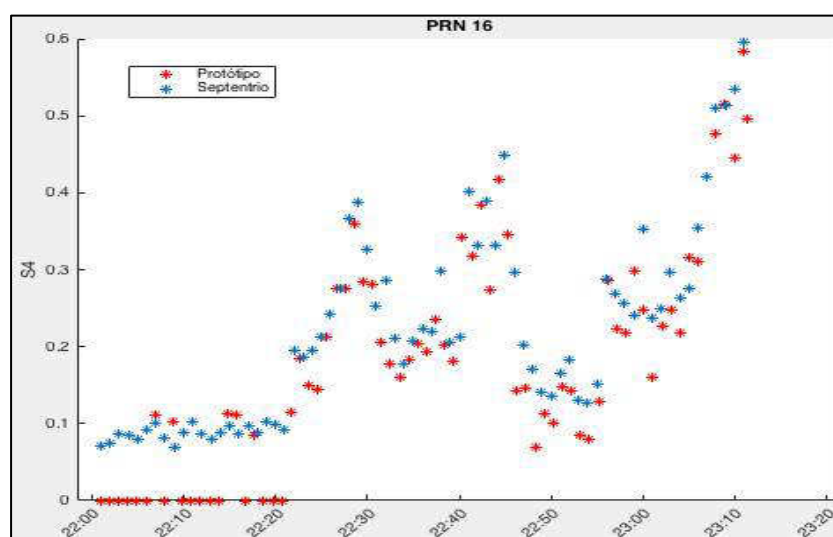


FIGURA 5.5 – S4 calculado com os dados obtidos do PRN 16 com o protótipo e o Septentrio no dia 28 de março de 2018 de 22:00 à 00:00.

Por inspeção, observa-se que o S4 calculado com o protótipo e o Septentrio são similares. Pode-se observar que de 22:00 às 22:20 o gráfico do protótipo apresentou vários resultados nulos. Isso se deve ao fato do valor do SNR passado ao software do protótipo não apresentar precisão com casas decimais, de modo que, em momentos de baixa cintilação, o cálculo do S4 vai a zero.

A figura 5.6 mostra o gráfico que coloca os valores do S4 medidos com o protótipo em função da medida com o Septentrio. É possível observar que existe uma tendência linear no gráfico, indicando novamente a proximidade das medidas feitas com os dois monitores de cintilação ionosférica.

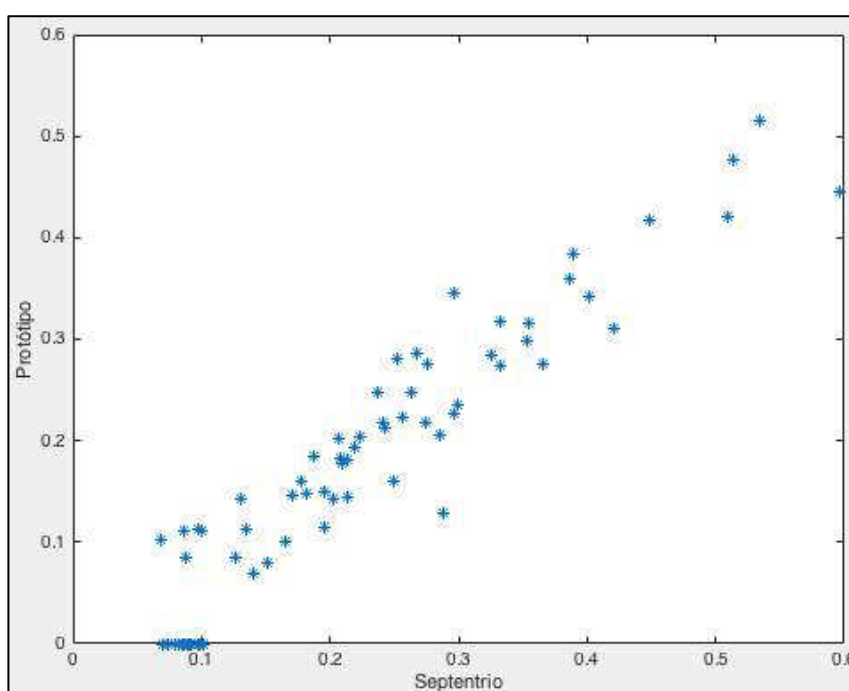


FIGURA 5.6 – S4 medidos com o protótipo em função da medida com o Septentrio.

Com isso, pôde-se considerar esses resultados suficientes para validar o software desenvolvido na Universidade do Texas em Dallas para captura de dados com o protótipo. Entretanto, o monitor ainda funcionava sem integração a um banco de dados online, de modo que a única forma de obtenção desses dados para análise seria localmente, inserindo um *pendrive* e copiando para um outro computador. Além disso, os arquivos gerados eram muito grandes, com cerca de 750 MB, tornando obrigatório que fossem deletados em intervalos de poucos dias para liberar espaço.

Nesse sentido, fez-se necessário realizar outros desenvolvimentos para tornar viável o uso do protótipo em larga escala. O baixo custo inerente a sua construção e a capacidade de operar em rede, disponibilizando *online* dados brutos e sumários, tornaria possível que usuários afastados pudessem se beneficiar em suas atividades de pesquisa sobre ionosfera.

Esse novo sistema se chamará ionik2, mas antes é necessário descrever o protótipo e suas partes.

## 5.2 A montagem do protótipo

A figura 5.7 apresenta o esquema da montagem do protótipo do monitor de cintilação.

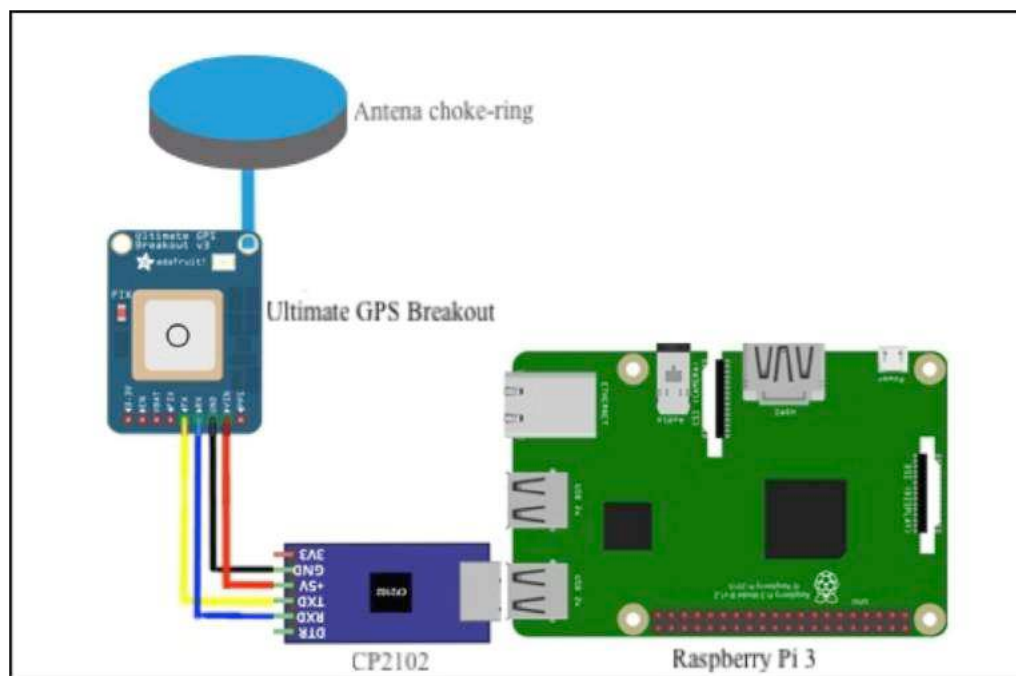


FIGURA 5.7 – Esquema do protótipo do monitor de cintilação ionosférica.

Ele é composto por um Raspberry Pi 3 model B, um módulo conversor USB para serial CP2102, um receptor Ultimate GPS Breakout da Adafruit, uma antena para GPS, uma fonte de alimentação de 5V e um cartão SD. O esquema mostra a utilização de uma antena choke-ring, como as da figura 5.3(b). Além desses componentes, usa-se um *cooler* para evitar o superaquecimento do sensor GPS, um mouse, um teclado e um monitor de computador.

### 5.2.1 Raspberry Pi Model B

O Raspberry Pi é um microprocessador desenvolvido no Reino Unido pela Fundação Raspberry Pi em 2012, mas que vem ganhando novas versões ao longo dos anos. Ele é um computador completo construído em uma placa que pode ser ligado a um teclado, um mouse e um monitor de computador ou TV. A figura 5.8 mostra um Raspberry Pi 3 model B (RASPBERRY PI, 2018).

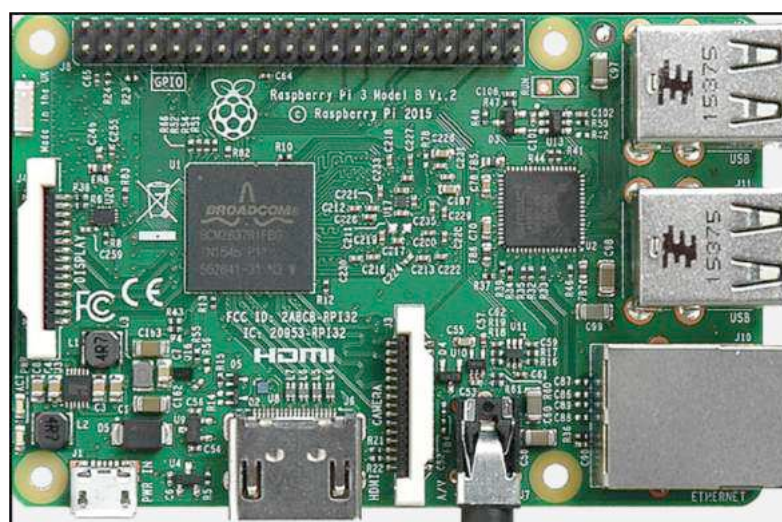


FIGURA 5.8 – Raspberry Pi 3 model B (RASPBERRY PI, 2018).

O Raspberry Pi 3 Model B foi lançado em 2016. Possui processador quad-core Broadcom BCM2837 de 1,2 GHz (Cortex-A53), 1 GB de RAM, Bluetooth 4.1, Wi-Fi 802.11n, saída de vídeo HDMI, quatro portas USB 2.0, entrada para microSD e conexão Fast Ethernet, pesando 45 gramas. O sistema operacional utilizado no protótipo é o Raspbian, pois é otimizado para o hardware do Raspberry Pi, mas poderia ser o Ubuntu, outras distribuições do Linux ou até o Windows 10 IoT. É vendido por cerca de US\$39 nos EUA. A figura 5.9 mostra a tela inicial do Raspbian.

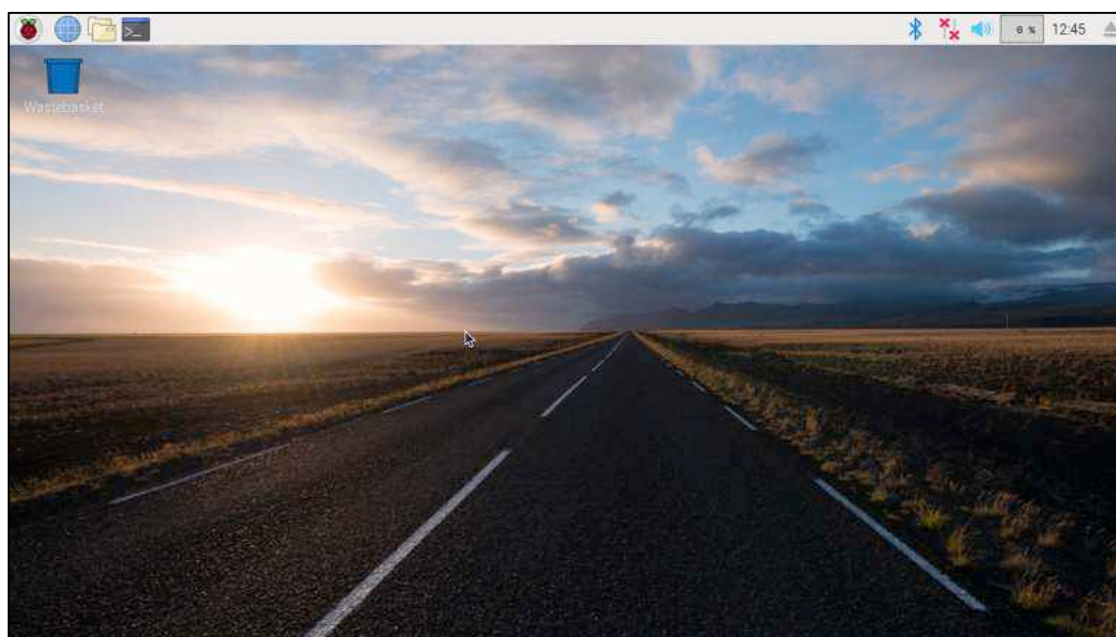


FIGURA 5.9 – Tela inicial do Raspbian.

### 5.2.2 Módulo conversor USB para serial CP2102

O módulo conversor USB para serial tem a função de facilitar a comunicação entre o Raspberry e o sensor GPS. Faz isso através do chip CP2102. O módulo é instalado em uma porta USB do Raspberry e funciona com a tensão ali disponibilizada, que varia de 4 a 5 V. Possui apenas 5 pinos: GND, TX, RX e dois pinos com tensões de saída de 3.3 V e 5 V. Possui também dois LEDs para indicar a que está ligado e o TX. O LED TX acende e apaga na mesma taxa de atualização do sensor. Seu preço é de cerca de US\$ 1 nos EUA. A figura 5.10 mostra este módulo conversor.

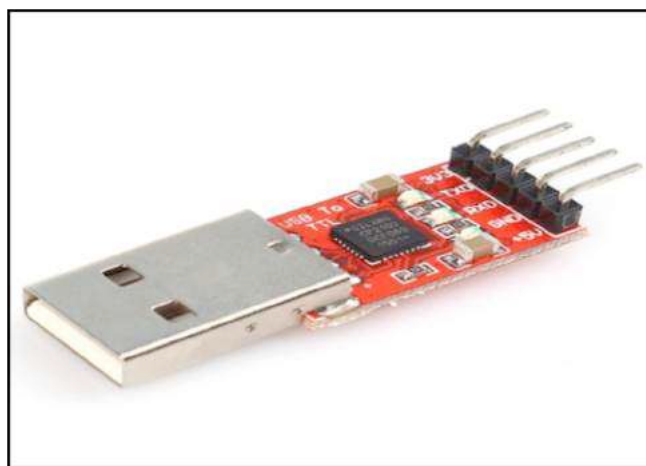


FIGURA 5.10 – Módulo conversor USB para serial CP2102.

### 5.2.3 Receptor GPS

Receptor GPS é um dispositivo capaz de detectar os sinais dos satélites do GPS e traduzi-los em um código que possa ser utilizado pelo software que faz o tratamento desses dados. Normalmente, esses dados são disponibilizados na forma de sentenças no formato NMEA.

O formato NMEA é um padrão de comunicação entre dispositivos eletrônicos de navegação. O receptor GPS executa cálculos que determinam sua posição, velocidade e tempo e os disponibiliza nesse formato. Além disso, informações de navegação dos satélites também estão presentes nas sentenças.

As sentenças NMEA para os receptores GPS sempre iniciam com '\$GP' seguido de uma sequência de três letras que definem seu conteúdo. Os dados de uma sentença são apresentados em uma única linha e são separados por vírgulas. Cada linha não terá mais do que 80 caracteres. A sentença termina com '\*' seguido de dois dígitos hexadecimais. Esses dígitos

hexadecimais são uma soma de verificação representando um *ou exclusivo* (XOR) de 8 bits de todos os caracteres, exceto o '\$'. A figura 5.11 mostra um exemplo de aquisição de dados para um receptor GPS.

```
$GPGGA,21.5616,500,0503.1513,S,04244.1661,W,1,7,1.13,151.6,M,-16.7,M,,*7D
$GPGSA,A,3,10,16,26,29,27,32,31,,,,,2.18,1.13,1.86*0A
$GPGSV,2,1,07,32,64,006,37.0,10,45,199,35.4,26,37,299,24.1,16,31,264,31.4*79
$GPGSV,2,2,07,29,28,045,23.3,27,20,210,26.7,31,13,344,35.0*50
$GPRMC,21.5616,500,A,0503.1513,S,04244.1661,W,0.19,252.86,101218,,,A*6D
$GPVTG,252.86,T,,M,0.19,N,0.34,K,A*39
```

FIGURA 5.11 – Exemplo de sentenças NMEA.

O receptor GPS utilizado neste protótipo foi o mesmo utilizado por Bragaia e Breder (2017), ou seja, um receptor Ultimate GPS Breakout da Adafruit, mostrado na Figura 5.12, pelo motivo de já ter sido verificado que é adequado a finalidade de monitoramento da ionosfera e ao seu baixo custo, certa de US\$ 40. Construído em torno do chip MTK3339, consome apenas 20 mA ligado a 5 V. Ele possui sensibilidade de -165 dBm, podendo rastrear até 22 satélites em 66 canais. Possui taxa de atualização de 10 Hz, isso significa que ele fornece dez quadros como o da figura 5.12 por segundo. Além disso, possui uma antena integrada.

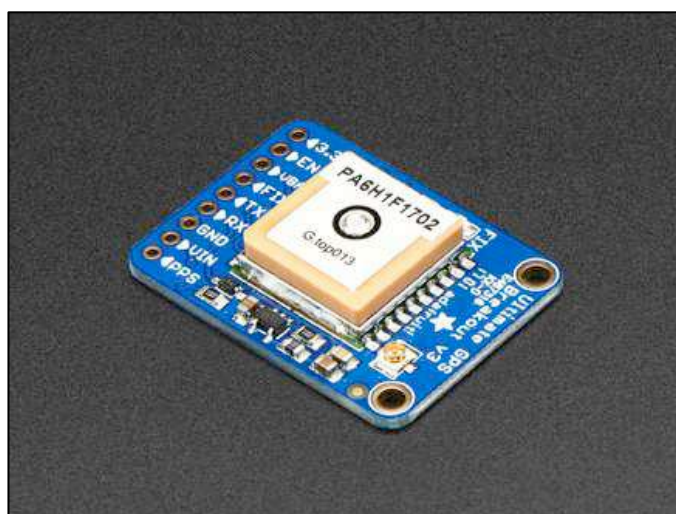


FIGURA 5.12 – Ultimate GPS Breakout.

Como dito antes, o SNR de cada satélite obtido com esse sensor não possui precisão com casa decimal, apenas fornece números inteiros para esta variável. Para resolver esse problema foi necessário instalar uma nova versão do firmware do sensor que o habilita a fornecer o SNR com uma casa decimal.

Para realizar essa tarefa, dispõe-se do software PowerFlash. Esse programa executa apenas em Windows e é preciso conectar na porta USB do computador o conversor USB para serial CP2102 ligado ao receptor GPS da Adafruit, como mostra a figura 5.13.



FIGURA 5.13 – CP2102 conectado a USB do PC.

São necessários dois arquivos: o agente de download (*Download Agent*) e o arquivo de firmware (*Firmware File*). Selecionando Option -> Séries, escolhe-se o modelo do chip 3329/3339, como mostra a figura 5.14.

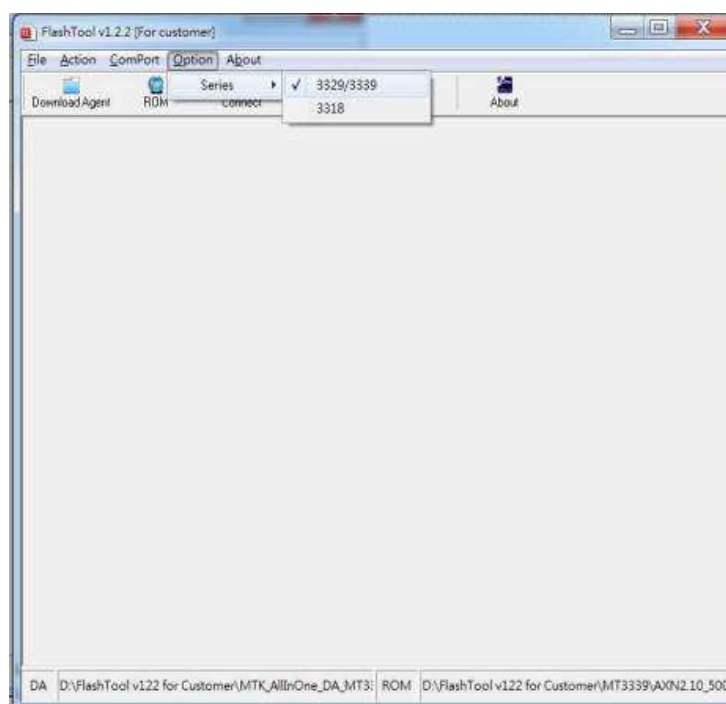


FIGURA 5.14 – Selecionando o modelo do chip.

Em seguida, selecionando ComPort -> COM, escolhe-se a porta USB onde o receptor está instalado através do conversor USB para serial, como mostra a Figura 5.15.

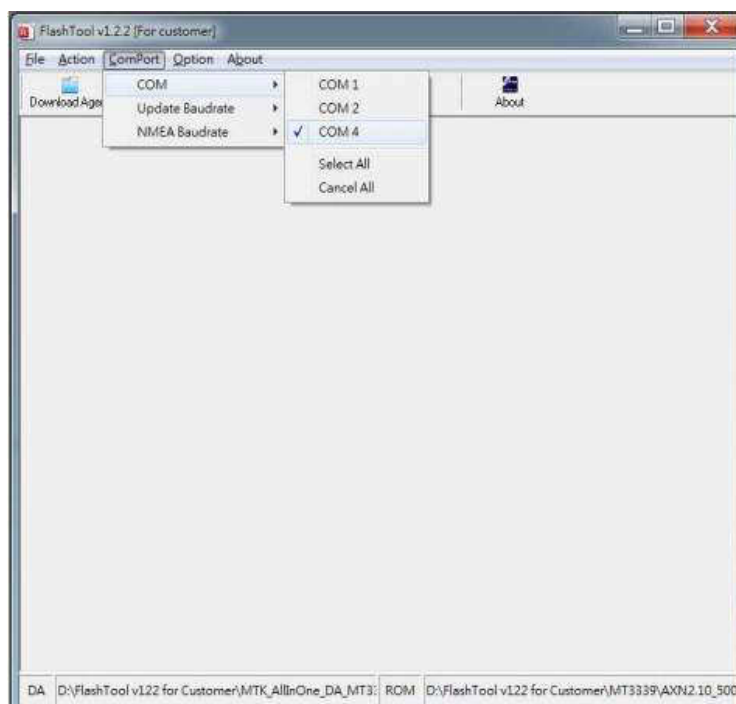


FIGURA 5.15 – Selecionando a porta USB onde o receptor está instalado.

Depois é preciso escolher a taxa de transmissão dos dados do firmware para o receptor. É recomendado selecionar a taxa de 115200 bps, como mostra a figura 5.16.

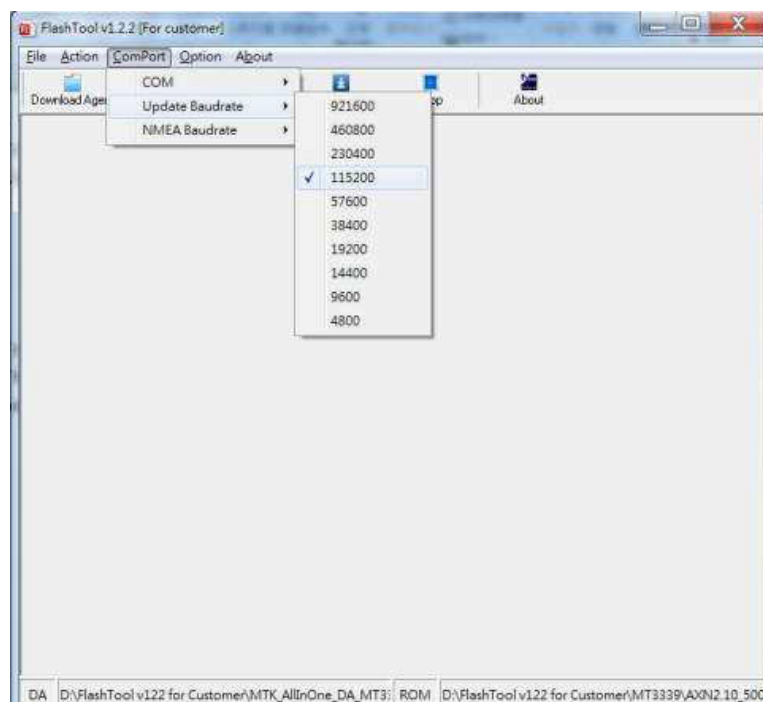


FIGURA 5.16 – Selecionando a taxa de transmissão dos dados.

Em seguida, seleciona-se o agente de download pressionando o botão *Download Agent* na tela do software e escolhendo o arquivo MTK\_AllInOne\_DA\_MT3339\_E3.bin, como mostra a figura 5.17.



FIGURA 5.17 – Selecionando o agente de download.

Em seguida, seleciona-se o arquivo de firmware pressionando o botão *ROM* na tela do software e escolhendo o arquivo AXN2.10\_5196\_3339\_1152.1111100.10.bin, como mostra a figura 5.18.



FIGURA 5.18 – Selecionando o arquivo de firmware.

Depois basta clicar no botão *Connect* e em seguida no botão *Download* para que o firmware seja gravado no receptor GPS. Então, quando o PowerFlash estiver na tela da figura 5.19, basta aguardar alguns minutos e o receptor já estará pronto para ser utilizado.

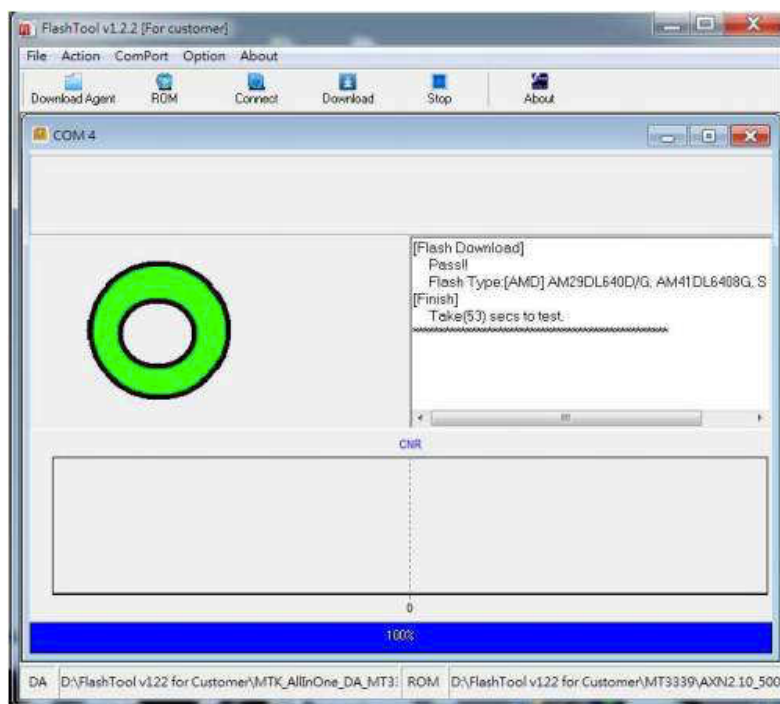


FIGURA 5.19 – Atualização do firmware concluída.

O Ultimate GPS Breakout possui uma antena integrada, mas foi utilizada uma antena Choke-ring para realização das medidas, como mostra a Figura 5.8. Entretanto, durante o desenvolvimento do software de coleta de dados uma simples antena GPS automotiva é suficiente para realizar os testes, como mostra a figura 5.20.

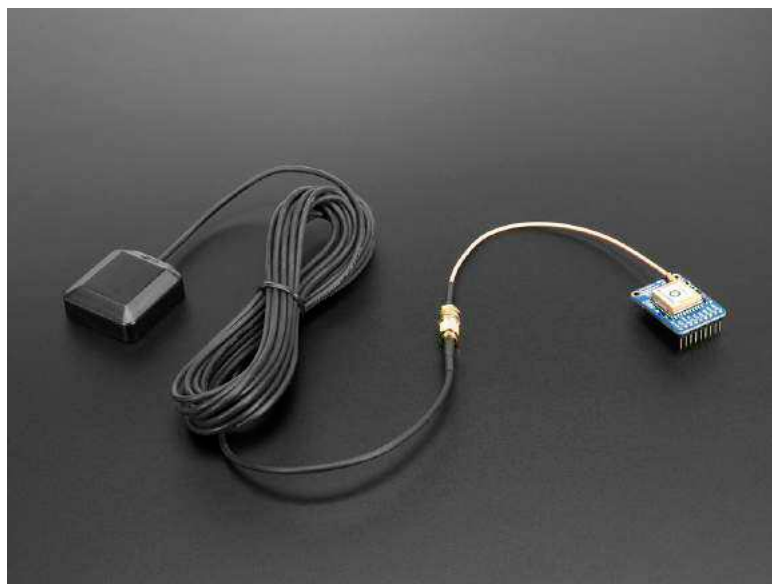


FIGURA 5.20 – Receptor ligado a uma antena GPS automotiva.

O custo total de construção deste protótipo é de cerca de US\$ 83 nos EUA, custo que é aproximadamente 240 vezes menor que o de um monitor comercial, um ponto forte a favor de sua utilização no estudo dos fenômenos que ocorrem na ionosfera terrestre.

### 5.3 Software de captura de dados

Depois de pronto para receber os dados dos satélites GPS, o monitor de cintilação ionosférica precisa de um software capaz de iniciar a aquisição e selecionar as informações úteis, salvando-as em arquivos para processamento e estudo posterior. Mas além disso, seria importante poder processar esses dados no próprio monitor sem que haja comprometimento no seu desempenho e disponibilizar esses dados *online* para que pesquisadores em todo o mundo possam se beneficiar.

Buscando cumprir com esses requisitos, deu-se o desenvolvimento de um novo software, alternativo aos que já haviam sido feitos, mas buscando ser mais completo e eficaz na entrega dos dados, sempre visando não depender de intervenção humana durante todo o processo de aquisição e distribuição da informação.

O novo software foi desenvolvido na linguagem de programação Java utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado (*Integrated Development Environment* - IDE) Netbeans instalado no próprio Raspberry Pi 3, pois algumas bibliotecas de código utilizadas nesse software são específicas para microprocessadores Raspberry.

A utilização da linguagem Java possui algumas vantagens. Por exemplo, o código Java compilado, em geral, não é executado diretamente no sistema operacional do computador. Ao invés disso, a compilação gera arquivos em uma linguagem intermediária chamada bytecode que são interpretados pela Máquina Virtual Java (*Java Virtual Machine* – JVM) e então compilados em um código entendido pelo sistema operacional. Cada sistema operacional possui sua JVM, assim um mesmo programa escrito em Java pode ser executado em diferentes sistemas operacionais, seja ele Windows, macOS ou Linux e no caso deste protótipo, o Raspbian. Como o Raspberry Pi 3 é compatível com diferentes sistemas operacionais, o software desenvolvido em Java ainda poderia ser executado em todos eles (JAVA, 2018).

Outras vantagens de se programar em Java são a grande e forte comunidade de programadores em todo o mundo, o que facilita a busca de soluções dos mais diferentes problemas; é uma linguagem gratuita e as principais IDEs também são; é uma linguagem

multi-threaded, o que significa que é possível executar tarefas paralelas no mesmo código. Essas e outras vantagens fizeram com que o uso da linguagem Java tenha se tornado tão difundida, sendo utilizado de aparelhos celulares a eletrodomésticos.

A figura 5.21 apresenta o fluxograma do algoritmo desenvolvido para captura dos dados dos satélites GPS.

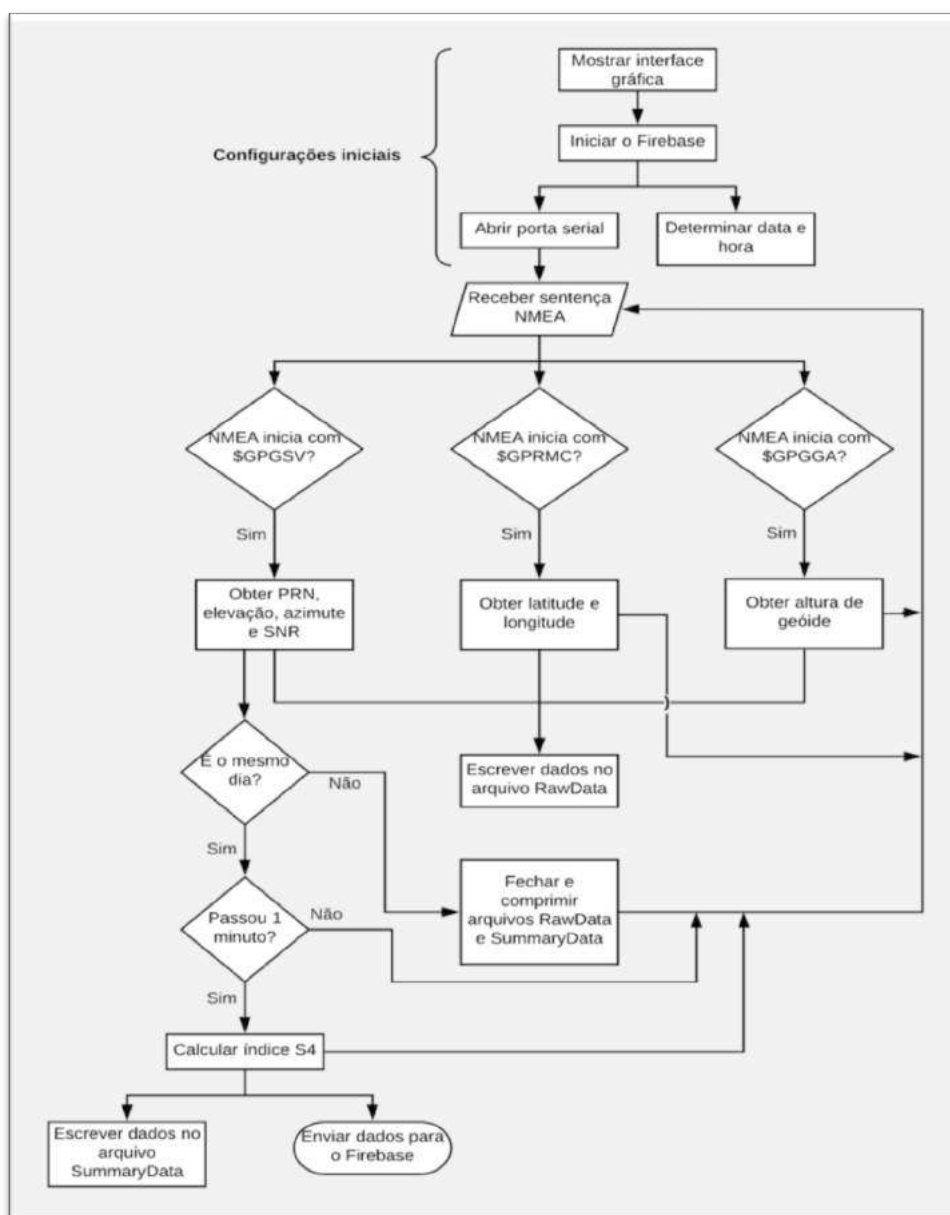


FIGURA 5.21 – Fluxograma do software de captura e envio de dados.

Ao executar o software a primeira tarefa a ser realizada é a exibição da interface gráfica. Essa interface é bastante simples e tem a finalidade de ajudar na verificação do correto funcionamento do receptor GPS com a visualização das sentenças NMEA. Mas sua função mais importante é oferecer um botão de encerrar o software. Encerrando o software

assim, garante-se que todos os arquivos de dados serão finalizados e comprimidos no formato .zip. Finalizando de outra forma, como por exemplo, através do Gerenciador de Tarefas ou retirando a fonte de alimentação do Raspberry, os arquivos de dados não são finalizados nem comprimidos, tornando-os inviáveis para estudo. A figura 5.23 mostra a interface gráfica do programa.

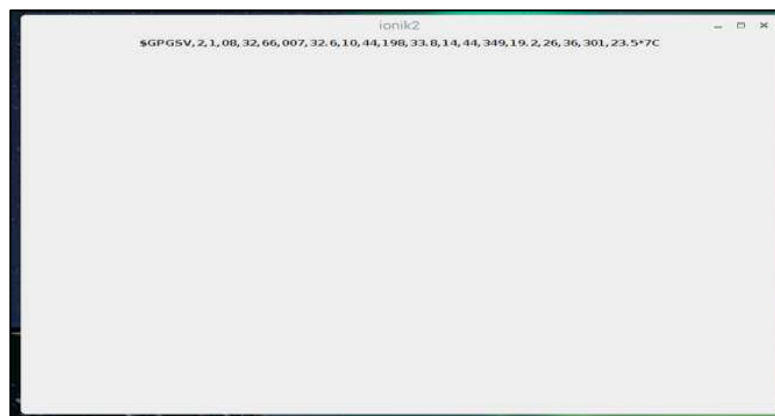


FIGURA 5.22 – Interface gráfica do software de coleta de dados do monitor de cintilação ionosférica.

Em seguida, o software inicializa o RealTime Database do Firebase. Mas antes é importante explicar o que vem a ser isso. O Firebase é uma plataforma de propriedade do Google que integra 18 produtos destinados ao desenvolvimento de aplicações para web, dispositivos móveis e jogos. Podemos citar como exemplos de serviços o Analytics, que informa estatísticas de uso do software; o Storage, que fornece uploads e downloads de arquivos; e o RealTime Database, que fornece um banco de dados em tempo real com back-end – isso elimina muito do trabalho que é necessário para desenvolver um back-end próprio. Esse serviço foi criado pela empresa Firebase, Inc. em 2012 e depois comprado pelo Google em 2014 (FIREBASE, 2018).

O Firebase oferece integração para aplicativos Android, iOS, Web, C++, Unity e para Administradores. Esse projeto se encaixa na categoria Administradores. Nesse caso, o software Administrador detém totais privilégios para acessar o banco de dados, enviar notificações, dar autorização a novos usuários e fazer upload e download de arquivos no Storage. É necessário cadastrar o software no site do Firebase com uma conta de serviço e gerar uma chave de acesso. Sempre o software for inicializado ele verificará a existência e autenticidade da chave. Confirmada a autenticidade, o acesso ao serviço que se deseja utilizar ficará liberado. Neste caso, será liberado o acesso ao RealTime Database. Esse banco de dados possui as vantagens de oferecer resposta rápida nas requisições, efetuar conexões somente quando valores são alterados em seu conteúdo e caso haja problemas na conexão

com a internet, pode armazenar os dados durante longos períodos até que volte a internet. Utiliza uma estrutura de nós hierarquicamente organizados, onde os nós mais internos são ditos filhos (*child*) dos nós mais externos. Os nós finais, ou seja, aqueles que não têm filhos, são os dados propriamente ditos que devem ser enviados sempre sem deixar faltar qualquer um deles. A figura 5.23 mostra a estrutura do banco de dados seguida pelo monitor quando envia os dados para o Firebase, visando facilitar a recuperação deles em softwares de visualização também desenvolvidos nesse trabalho.

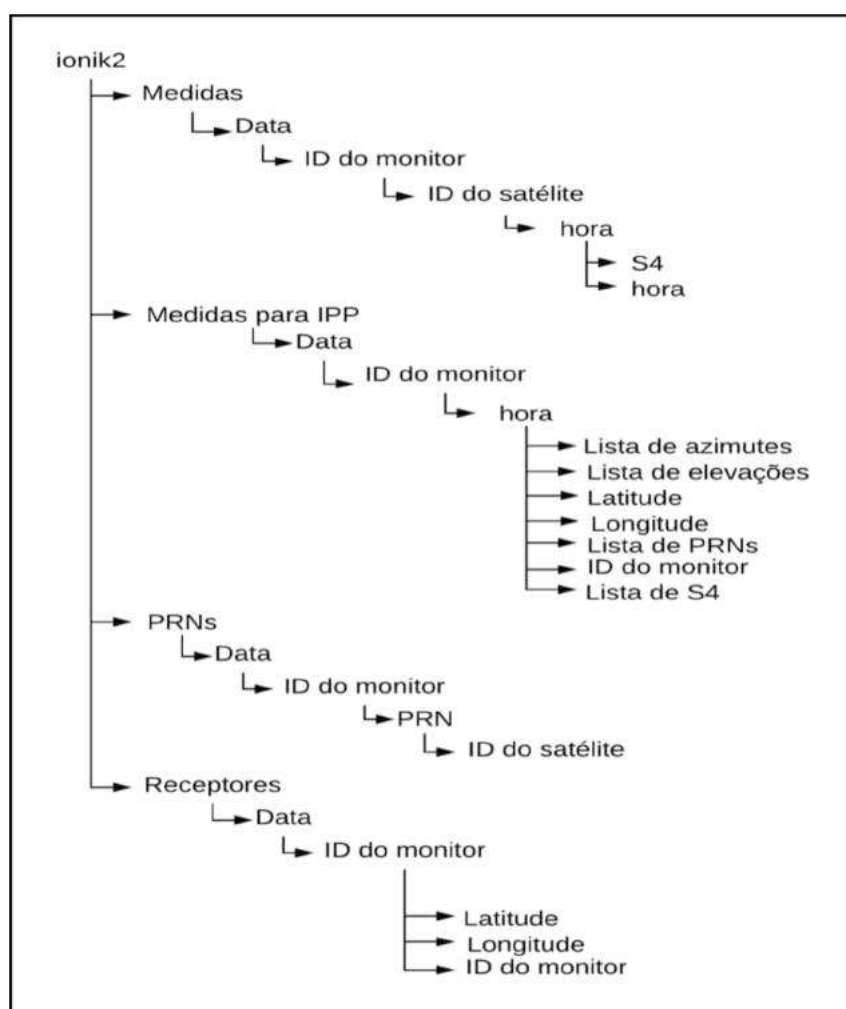


FIGURA 5.23 – Estrutura do banco de dados usando o RealTime Database do Firebase.

Depois disso, o software faz uma primeira determinação da data e hora para efetuar verificações no decorrer do código e inicia a abertura da porta serial para receber os dados. Para abrir a porta serial o software informa corretamente qual porta USB é utilizada e a taxa de transmissão do receptor GPS, que foi configurado em 115200 b/s. Após isso, o software inicia a recepção dos dados.

Esses dados são strings (variáveis do tipo texto) no formato de sentenças NMEA. Entretanto, apenas as que se iniciam com '\$GPGSV', '\$GPRMC' e '\$GPGLL' servem a finalidade deste programa. As sentenças que se iniciam com '\$GPGSV' fornecem elevação, azimute e SNR para cada PRN. Cada sentença GSV pode conter dados de até quatro satélites. As sentenças que iniciam com '\$GPRMC' fornecem informações de velocidade, localização do receptor GPS, além de data e hora. Dessa forma, é através dessas sentenças que se obtém a latitude e longitude do monitor. As sentenças que iniciam com '\$GPGLL' fornecem as coordenadas geográficas do receptor, sua altitude em relação ao nível do mar, a altura geoidal e número de satélites observados. Utilizamos essa sentença para determinar a altura geoidal. De posse da data, hora, PRN, elevação, azimute, SNR, latitude, longitude e altura geoidal, o programa armazena como uma linha para cada satélite em uma tabela de um arquivo que recebe um nome que inicia com 'R' de *raw* (bruto) seguido da data e hora de sua criação, salvo na pasta Raw. Esses arquivos são no formato .csv e em um dia de medidas acumulam cerca de 12 milhões de linhas.

As sentenças que iniciam com '\$GPGSV' são utilizadas para o cálculo do índice de cintilação S4 no próprio monitor. Depois de receber uma sentença desse tipo, o software verifica se houve uma transição de dia; caso não tenha havido, ele verifica se houve transição no minuto da medida. Como a taxa de amostragem do receptor GPS é de até 10 Hz, então são feitas muitas medidas em um minuto. Se não tiver havido transição, ele continua recebendo dados, mas caso haja transição, o software recebe esses dados e calcula o S4 com os dados de SNR acumulados durante um minuto para cada satélite cuja elevação for superior a 20° em cada amostra. De posse da data, hora, PRN, S4, elevação e azimute, latitude e longitude, o programa armazena esses dados como uma linha para cada satélite em uma tabela de um arquivo que recebe um nome que inicia com 'S' de *summary* (sumário) seguido da data e hora de sua criação, salvo na pasta Summary, também no formato .csv. Além disso, ele efetua entradas no banco de dados nos nós 'Medidas' e 'Medidas para IPP', mas caso haja algum satélite além dos já vistos durante o dia, ele efetua o seu cadastro no nó 'PRNs', fornecendo todos os dados exigidos de acordo com a estrutura mostrada na figura 5.23.

Caso haja transição na data, o programa efetua cadastra o monitor em uma nova data no nó 'Receptores' da figura 5.23 e fecha os arquivos com dados brutos e sumários e os comprime. Antes da compressão, um arquivo de dados brutos ocupa cerca de 320 MB na memória do monitor, enquanto que um arquivo de dados sumários ocupa cerca de 400 kB. Após a compressão, o arquivo de dados brutos ocupa cerca de 20 MB, enquanto que o arquivo de dados sumários continua a ocupar cerca de 400 kB.

## 5.4 Aplicativo Android

O Android foi lançado em 28 de setembro de 2008 e segundo o próprio site “é um conjunto de softwares para dispositivos móveis que inclui um sistema operacional, um middleware e aplicações-chave”. O sistema operacional é responsável pelo gerenciamento de processos, drives, memória e energia. No Android, ele é baseado no kernel do Linux. O middleware controla a interação entre os aplicativos instalados no aparelho, facilitando a comunicação entre eles. Já as aplicações-chave são programas comuns, como discador, navegador, contatos, mensagens etc. O Android é desenvolvido pelo Google e seu código-fonte é disponibilizado sob uma licença Apache, o que garante que possa ser modificado e redistribuído por outras empresas. Geralmente as empresas que fabricam smartphones têm sua própria versão do Android em seus aparelhos. Atualmente, encontra-se presente em mais de um bilhão de dispositivos ao redor do mundo, em sua maioria smartphones e tablets. Entretanto, existem versões para TVs, relógios e automóveis, que são, respectivamente, o Android TV, Android Wear e Android Auto. O principal canal de distribuição de aplicativos é Google Play Store, que em dezembro de 2018 contava com 2,6 milhões de aplicativos para download (LEAL, 2015).

Depois de o monitor de cintilação ionosférica já estar coletando e enviando seus dados para a internet foi preciso desenvolver softwares para visualizar os dados passados e em tempo real. Buscando tornar essas informações facilmente disponíveis, foi proposto planejar e desenvolver um aplicativo Android para consulta do índice de cintilação S4.

O aplicativo deve ser capaz de acessar o banco de dados, obter a localização dos receptores por data e baixar o índice S4 por satélite na mesma data da consulta, plotando os dados em um gráfico. Os aplicativos Android nativos são desenvolvidos na IDE Android Studio. A linguagem utilizada para implementar a lógica do programa é Java, entretanto a construção da interface do usuário (IU) é feita em uma linguagem chamada XML (*Extensible Markup Language*), semelhante ao HTML usado para criação de páginas web. A figura 5.24 apresenta o fluxograma do algoritmo desenvolvido para o correto funcionamento do aplicativo Android, que também recebeu o nome de ionik2.

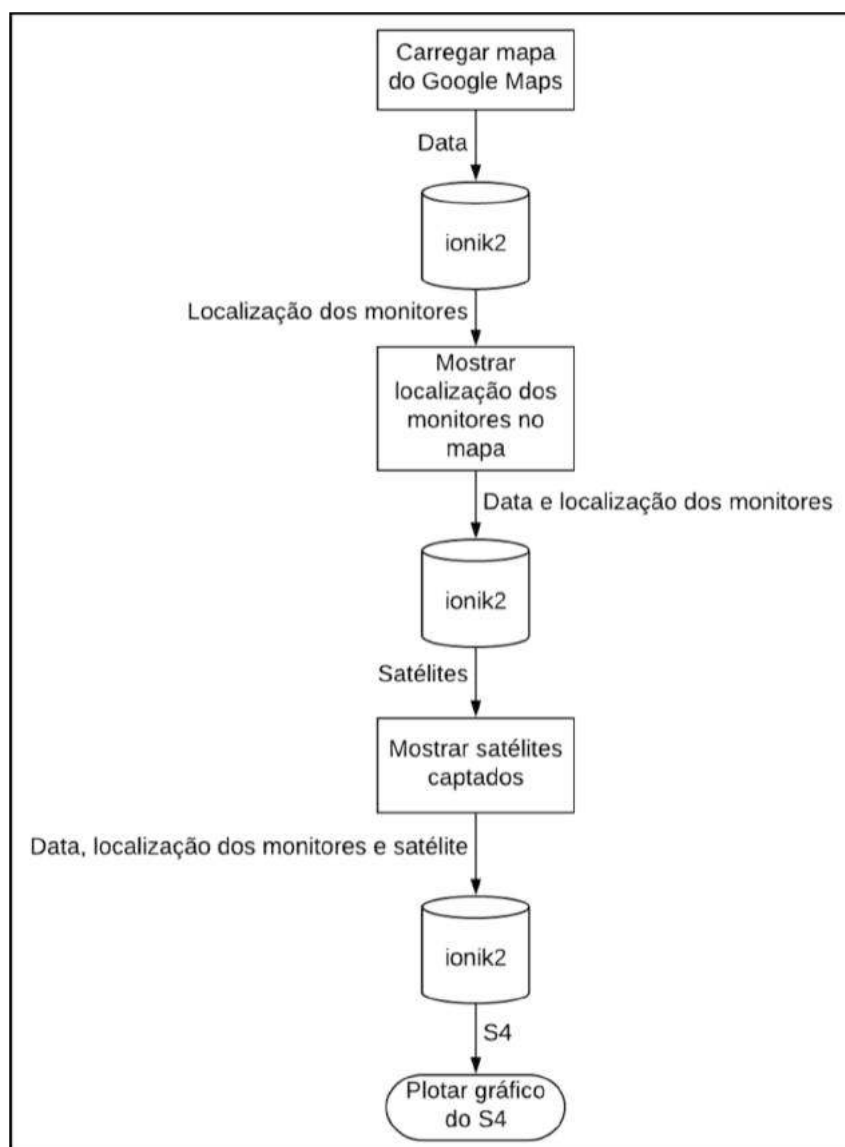


FIGURA 5.24 – Fluxograma do algoritmo do aplicativo Android.

Ao iniciar o aplicativo ele irá carregar o mapa mundial fornecido pelo Google Maps e aguardará que o usuário informe uma data para consulta do índice de cintilação S4. A figura 5.25 mostra a tela inicial do aplicativo e a ação de escolha da data através do botão calendário ou do botão HOJE que insere a data atual.

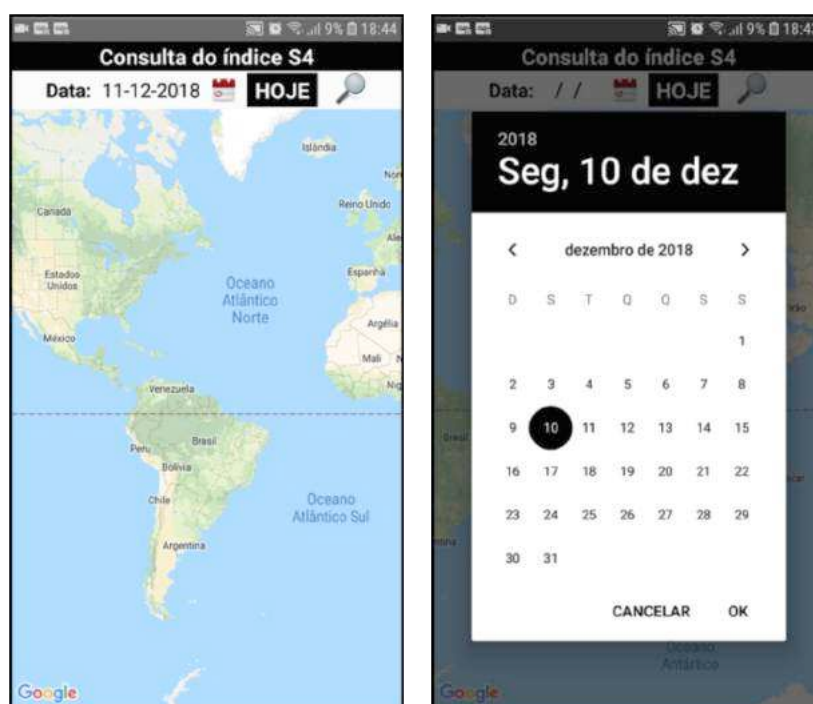


FIGURA 5.25 – Tela inicial e escolha da data de consulta.

Ao clicar na lupa o aplicativo irá fazer uma consulta no banco de dados no nó ‘Receptores’, mostrado na figura 5.23. O banco de dados irá retornar a localização dos monitores ativos na data de consulta e estes serão marcados no mapa, como mostra a figura 5.26.



FIGURA 5.26 – Localização dos monitores ativos.

Na figura 5.26 é possível ver os marcadores vermelhos na localização dos dois monitores ativos no dia 11 de dezembro de 2018. Ao clicar em um desses marcadores, o aplicativo realiza uma nova consulta no banco de dados no nó ‘PRNs’ da figura 5.23, informando uma data e localização. O banco de dados retorna uma lista dos satélites que foram detectados pelo monitor na data consultada, como mostra a figura 5.27.

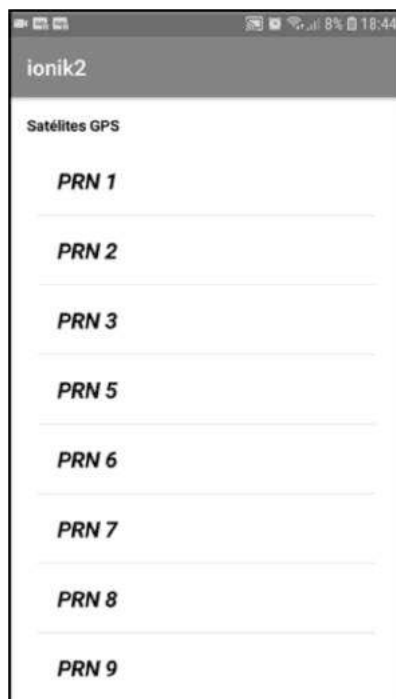


FIGURA 5.27 – Satélites detectados na data de busca.

Ao selecionar um satélite, o aplicativo efetua uma consulta ao banco de dados no nó ‘Medidas’ da Figura 5.23 informando uma data, localização e satélite. O banco de dados retorna os valores do S4 para o dado satélite, medido no receptor escolhido, na data especificada, com seus respectivos tempos de medida e plota um gráfico do S4 em função da hora universal (*Universal Time Coordinated* - UTC), como mostra a Figura 5.28. Apertando o botão BAIXAR, o programa salva um arquivo com os dados de tempo e S4 na memória do aparelho.

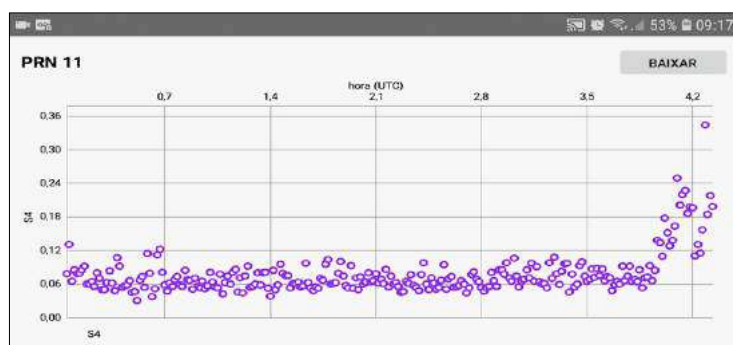


FIGURA 5.28 – Gráfico do S4 em função da hora (UTC).

## 5.5 Skyplot

Além do aplicativo Android, fez-se necessário desenvolver um software que pudesse acessar os dados gerados nos monitores também no PC. Adicionado a isso, esse software deverá mostrar em um mapa os pontos onde o sinal de GPS intercepta a ionosfera a 350 km de altitude, ou *Ionospheric Pierce Point* - IPP, nos últimos 30 minutos, com a sua escala de cor graduada de acordo com o valor do  $S_4$ . A figura 5.29 mostra um exemplo desse tipo de representação.

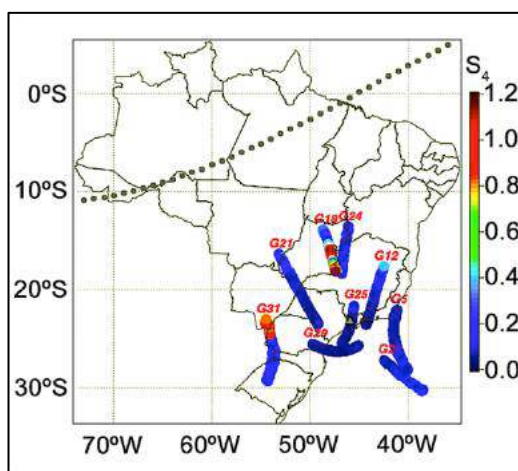


FIGURA 5.29 – Pontos ionosféricos: interceptação do sinal de GPS com a ionosfera a 350 km de altitude (MORAES, 2018).

Sendo assim, o software deve poder acessar RealTime Database e gerar uma visualização gráfica do IPP executando as equações (3.27) e (3.28). Dentre as plataformas que o Firebase possui suporte e bibliotecas de código completas, a Unity é a mais adequada para se trabalhar com visualização gráfica avançadas, pois se destina principalmente ao desenvolvimento de jogos (UNITY, 2018).

A Unity é um motor de jogos (*game engine*) desenvolvido pela empresa Unity Technologies, lançado em junho de 2005. Com ela é possível criar jogos 2D ou 3D para diversas plataformas, como macOS, Windows, Linux, Android, iOS, PlayStation 4, Xbox One dentre outras. Além disso, Unity oferece suporte para desenvolvimento de jogos utilizando realidade virtual (*Virtual Reality* – VR) e realidade aumentada (*Augmented Reality* – AR). Em 2018, metade dos jogos desenvolvidos no mundo foram feitos utilizando esta plataforma.

Além do desenvolvimento de jogos, a Unity tem sido utilizada por profissionais para fins diversos, podendo-se citar a construção de visualizações para arquitetura, simulações médicas, simulações militares, pesquisa científica, dentre outras. Para a construção dos

cenários, utiliza-se o Unity Editor. A figura 5.30 mostra o editor da Unity com o projeto do software de visualização dos dados do monitor de cintilação, que se chamará Skyplot.

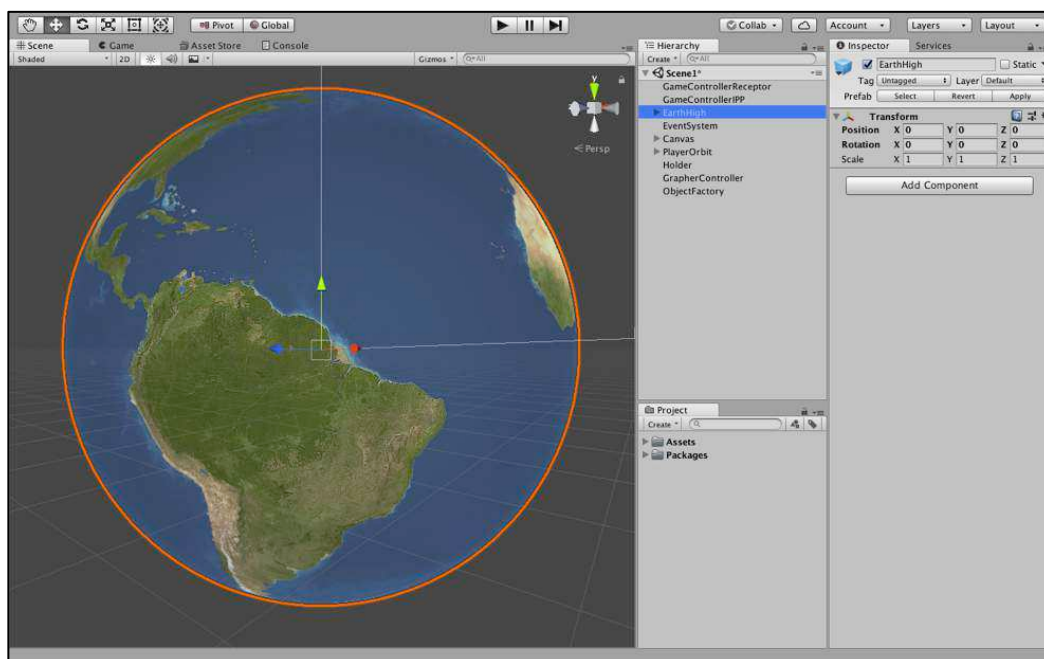


FIGURA 5.30 – Tela de construção de cenários do Unity Editor.

A linguagem de programação utilizada é C#, uma linguagem desenvolvida pela Microsoft, baseada na linguagem C++, mas que se assemelha bastante a linguagem Java, sendo, portanto, orientada a objetos. A principal IDE utilizada para desenvolver programas em C# é o Visual Studio. A figura 5.31 mostra o fluxograma do algoritmo desenvolvido para acessar o RealTime Database através do Skyplot.

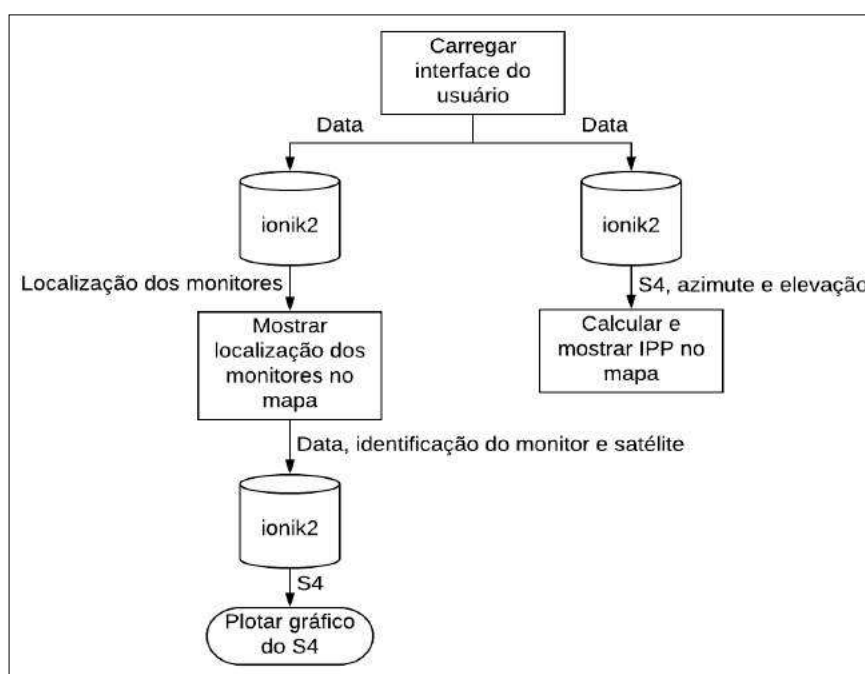


FIGURA 5.31 – Fluxograma do algoritmo do Skyplot.

Ao iniciar, o software carrega o cenário com um modelo 3D da Terra, uma barra de zoom, uma escala de cores para o S4 e a câmera, que neste caso foi necessário realizar alguns desenvolvimentos para que ela pudesse orbitar ao redor da Terra, clicando com o botão direito do mouse e arrastando o mouse sobre a tela. A figura 5.32 mostra a tela descrita.



FIGURA 5.32 – Tela inicial e escolha da data de consulta.

Em seguida, o software executa duas requisições simultâneas no RealTime Database. Em uma delas, é passada a data atual para acessar o nó ‘Receptores’ da figura 5.23. O retorno é a identificação dos monitores ligados durante o dia corrente e suas latitudes e longitudes. Com isso, o software é capaz de mostrar sobre o modelo 3D da Terra as representações dos monitores em suas localizações dos monitores. Na outra requisição, é feita uma consulta ao banco de dados onde é passada a data atual para acessar o nó ‘Medidas para IPP’ da figura 5.23. O retorno é o azimuth, elevação e S4 nos últimos trinta minutos, com a identificação e localização dos monitores de medida. Com esses dados, o software calcula rapidamente os IPPs e os mostra a uma distância equivalente a 350 km da superfície da Terra. A figura 5.33 mostra o que foi descrito acima.

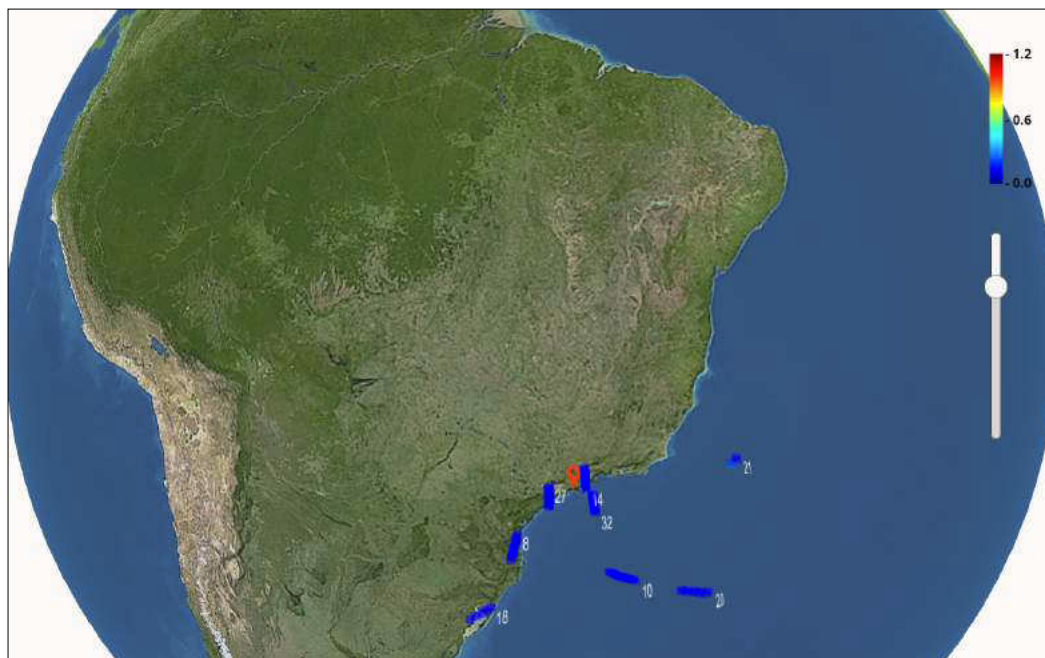


FIGURA 5.33 – Visualização do IPP.

Não limitando a busca por dados aos últimos trinta minutos somente, mas recebendo os dados gerados ao longo dia, é possível ver o IPP com o intervalo de tempo das horas maior, como mostra a figura 5.34.

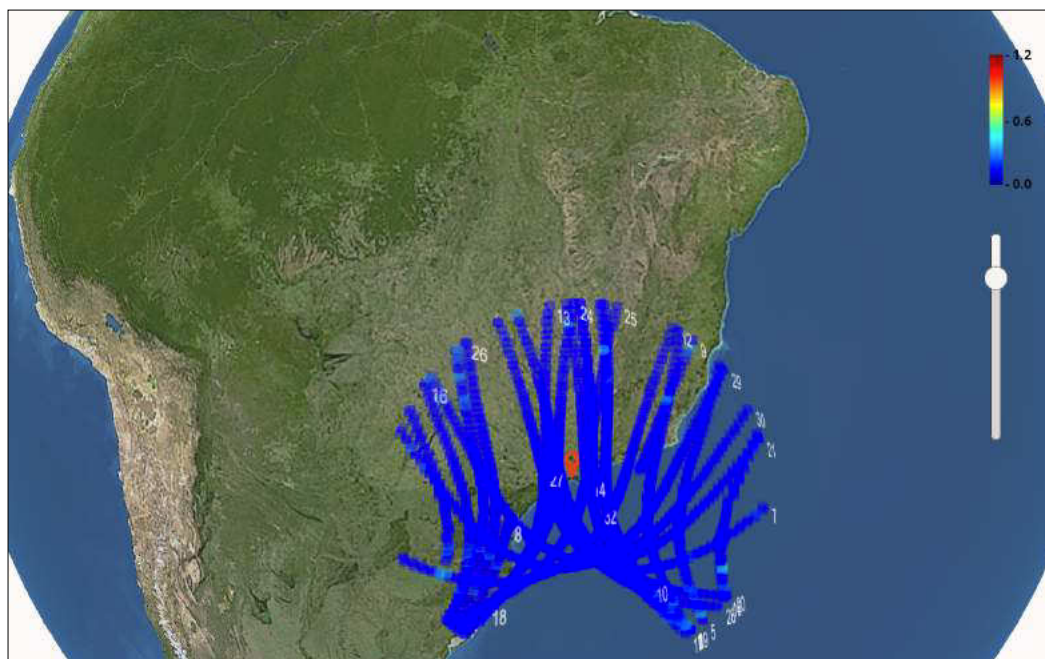


FIGURA 5.34 – Visualização do IPP para um período maior.

Ao clicar sobre o marcador de um monitor de cintilação ionosférica o software mudará para outra tela, onde é possível consultar o gráfico do índice S4. Para isso, basta selecionar uma data e um satélite que o software fará uma consulta banco de dados no nó 'Medidas' da

figura 5.23, com as informações de data, identificação do monitor e do satélite. A figura 5.35 mostra a mesma consulta mostrado na figura 5.28, feita com software Skyplot.

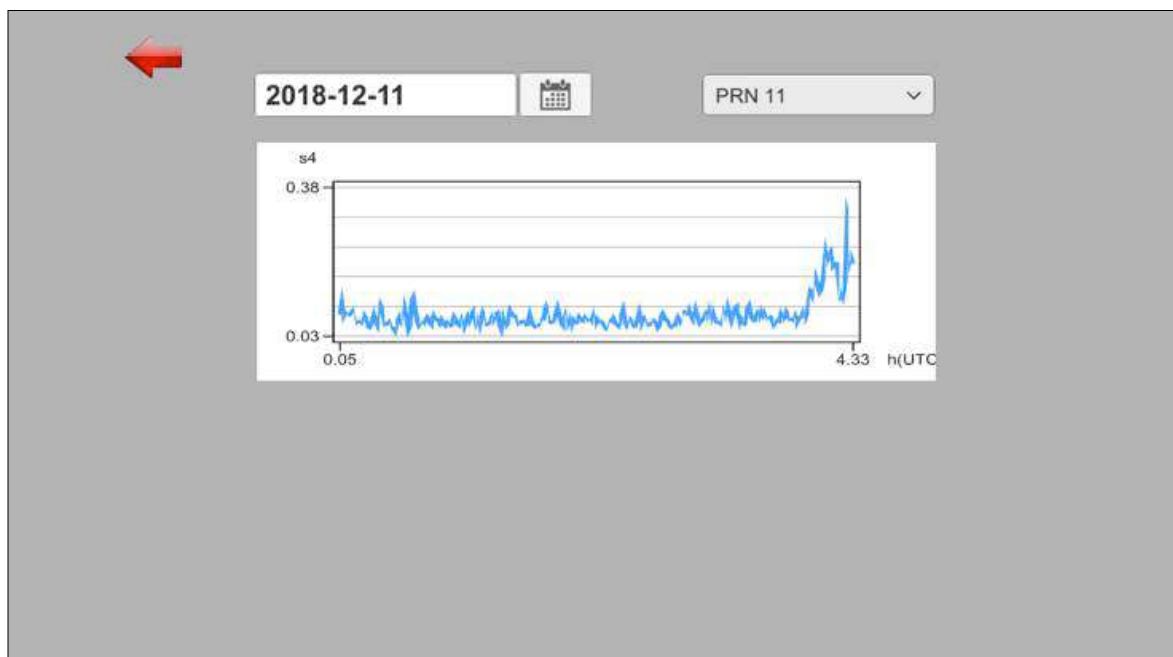


FIGURA 5.35 – Gráfico do S4 em função da hora (UTC).

Com isso, têm-se um sistema em tempo real de distribuição de medidas de cintilação ionosférica entre três diferentes softwares, capaz de funcionar sem depender de intervenção humana durante todo o processo de aquisição e distribuição da informação e de baixo custo de desenvolvimento.

## 6 Validação e testes

Com a finalidade de verificar a efetividade e avaliar o desempenho do protótipo do monitor de cintilação ionosférica utilizando a plataforma do Raspberry Pi bem como do software para a obtenção do índice de cintilação S4 desenvolvido nesse trabalho, foram feitos testes comparativos entre as medidas feitas neste equipamento e no monitor profissional Septentrio PolaRxS Pro® instalados no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em São José dos Campos – SP, componente da rede de monitores CALIBRA. A figura 6.1 mostra os dois monitores de cintilação ionosférica ligados a um divisor de sinal de uma antena profissional choke ring. Desde o dia 07 de dezembro de 2018 o protótipo se mantém ligado a uma derivação do monitor profissional efetuando cálculos do índice de cintilação S4.

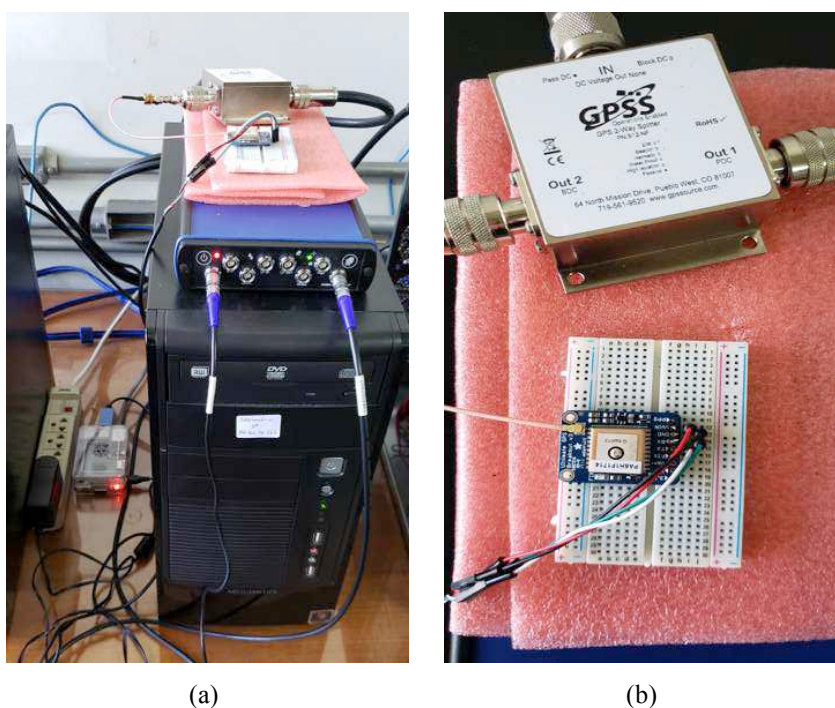


FIGURA 6.1 – a) Protótipo e Septentrio PolaRxS Pro® ligados a um mesmo divisor de sinal e b) detalhe do divisor de sinal e do receptor GPS.

### 6.1 Metodologia de validação do protótipo

A avaliação do índice de cintilação S4 é feita a partir dos arquivos sumários do protótipo e dos arquivos ISMR do monitor da Septentrio, comparando-os através de um software de validação desenvolvido utilizando a ferramenta Matlab. Tanto os arquivos

sumários do protótipo, como os arquivos ISMR do Septentrio fornecem o  $S_4$  já calculado para cada satélite observado em cada minuto do dia utilizando por padrão o tempo universal (UTC). Ambos os arquivos utilizam máscara de elevação de  $20^\circ$ . Como exemplo, a figura 6.2 mostra os gráficos do  $S_4$  obtidos pelo protótipo e pelo monitor profissional através do sinal do satélite 27 no dia 09 de dezembro de 2018 no horário entre 00:00 e 01:40 UTC.

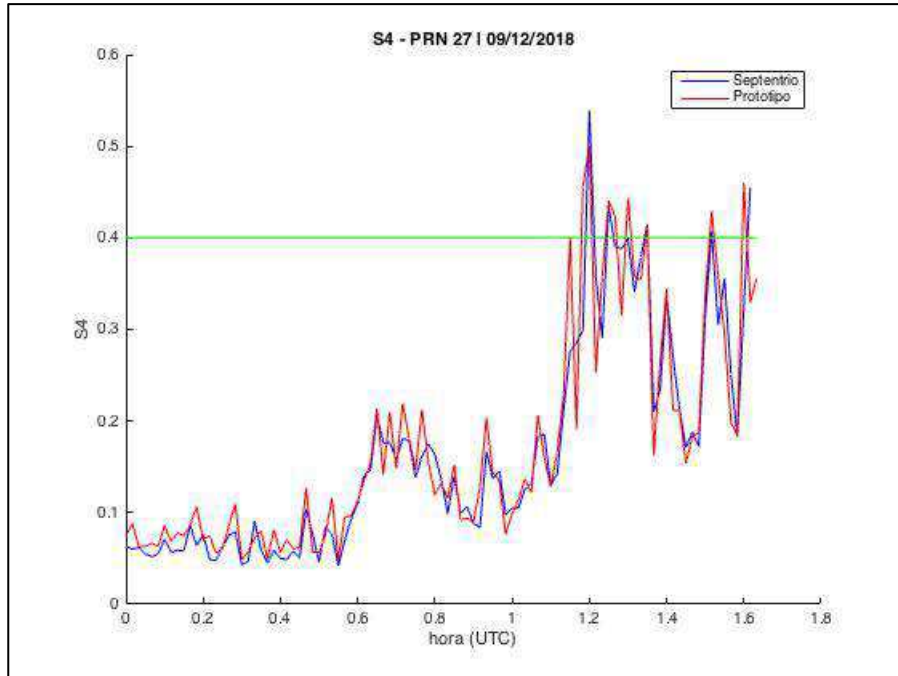


Figura 6.2 –  $S_4$  calculado com os dados obtidos do PRN 27 com o protótipo (vermelho) e o Septentrio (azul) no dia 09 de dezembro de 2018 de 00:00 à 01:40 UTC.

A linha verde na figura indica o limite da transição entre cintilações fracas e moderadas, mostrando que houve cintilação fraca na maior parte do tempo e cintilação moderada em alguns momentos. Observa-se também na figura 6.2 que o índice obtido com o protótipo,  $S_4^*$ , apresenta boa correlação com o índice obtido através do monitor profissional,  $S_4$ . É possível demonstrar isso medindo o grau de associação linear entre as duas variáveis pelo coeficiente de correlação de amostral, denotado por  $r(S_4^*, S_4)$ . Mas primeiro é importante definir a covariância amostral  $s(S_4^*, S_4)$  que indica a dependência linear entre as variáveis (BUSSAB, 2017):

$$s(S_4^*, S_4) = \frac{\sum (S_{4i}^* - \bar{S}_4^*)((S_{4i} - \bar{S}_4))}{n - 1} \quad (6.1)$$

onde  $n$  é o número de amostras que deve ser igual para as duas variáveis,  $\bar{S}_4^*$  e  $\bar{S}_4$  são as médias aritméticas,  $S_{4i}^*$  e  $S_{4i}$  são os pares dos vetores das medidas de ambos os monitores. A equação (6.1) pode ser escrita como

$$s(S_4^*, S_4) = \frac{(\sum S_{4i}^* S_{4i}) - n \bar{S}_4^* \bar{S}_4}{n - 1} \quad (6.2)$$

Assim, o coeficiente de correlação amostral  $r(S_4^*, S_4)$  é definido como

$$r(S_4^*, S_4) = \frac{s(S_4^*, S_4)}{s(S_4^*)s(S_4)} \quad (6.3)$$

onde  $s(S_4^*)$  e  $s(S_4)$  são os desvios padrões amostrais de  $S_4^*$  e  $S_4$ , respectivamente. Dessa forma, a equação (6.3) pode ser reescrita como

$$r(S_4^*, S_4) = \frac{(\sum S_{4i}^* S_{4i}) - n \bar{S}_4^* \bar{S}_4}{\sqrt{(\sum S_{4i}^{*2} - n \bar{S}_4^{*2})(\sum S_{4i}^2 - n \bar{S}_4^2)}} \quad (6.4)$$

O coeficiente de correlação  $r(S_4^*, S_4)$  varia de -1 a 1. Quanto mais próximos os pontos  $(S_{4i}^*, S_{4i})$  estiverem da bissetriz dos quadrantes ímpares, mais  $r(S_4^*, S_4)$  se aproxima de 1 ou -1, se a inclinação da reta é positiva ou negativa, respectivamente. A tabela 6.1 mostra a classificação da relação entre  $S_4^*$  e  $S_4$  em função do coeficiente de correlação amostral (BUSSAB, 2017).

TABELA 6.1 – Classificação da correlação entre as variáveis

| Valor de $r(S_4^*, S_4)$           | Classificação                 |
|------------------------------------|-------------------------------|
| $ r(S_4^*, S_4)  = 1$              | correlação <b>perfeita</b>    |
| $0,90 \leq  r(S_4^*, S_4)  < 1$    | correlação <b>muito forte</b> |
| $0,70 \leq  r(S_4^*, S_4)  < 0,90$ | correlação <b>forte</b>       |
| $0,40 \leq  r(S_4^*, S_4)  < 0,70$ | correlação <b>moderada</b>    |
| $0,20 \leq  r(S_4^*, S_4)  < 0,40$ | correlação <b>fraca</b>       |
| $0 \leq  r(S_4^*, S_4)  < 0,20$    | correlação <b>muito fraca</b> |

Utilizando a equação (6.4) para efetuar o cálculo do coeficiente de correlação amostral  $r(S_4^*, S_4)$  para os dados apresentados na figura 6.1, obtém-se como resultado  $r(S_4^*, S_4) = 0,9442$ , mostrando que a correlação entre  $S_4^*$  e  $S_4$  é muito forte. Isso é ilustrado pela figura 6.3, que mostra a relação entre  $S_4^*$  e  $S_4$  como sendo aproximadamente linear. Já figura 6.4 mostra a diferença  $(S_4^* - S_4)$ , que representa o erro na estimativa do índice  $S_4^*$  pelo protótipo em relação ao monitor profissional, cujo módulo máximo é de 0,1572.

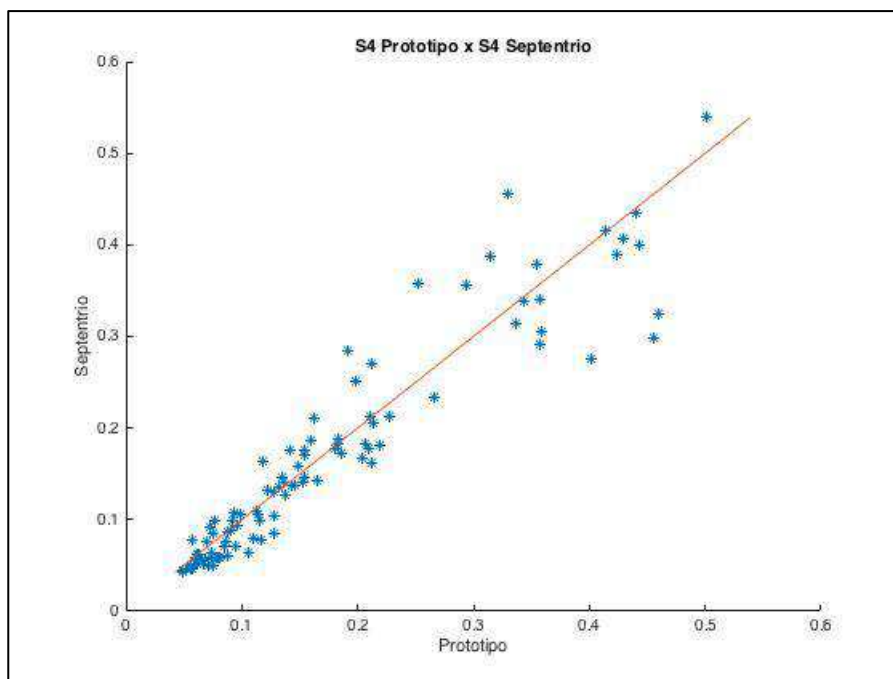


FIGURA 6.3 – Relação entre os índices S4 medidos com o protótipo e com o Septentrio.

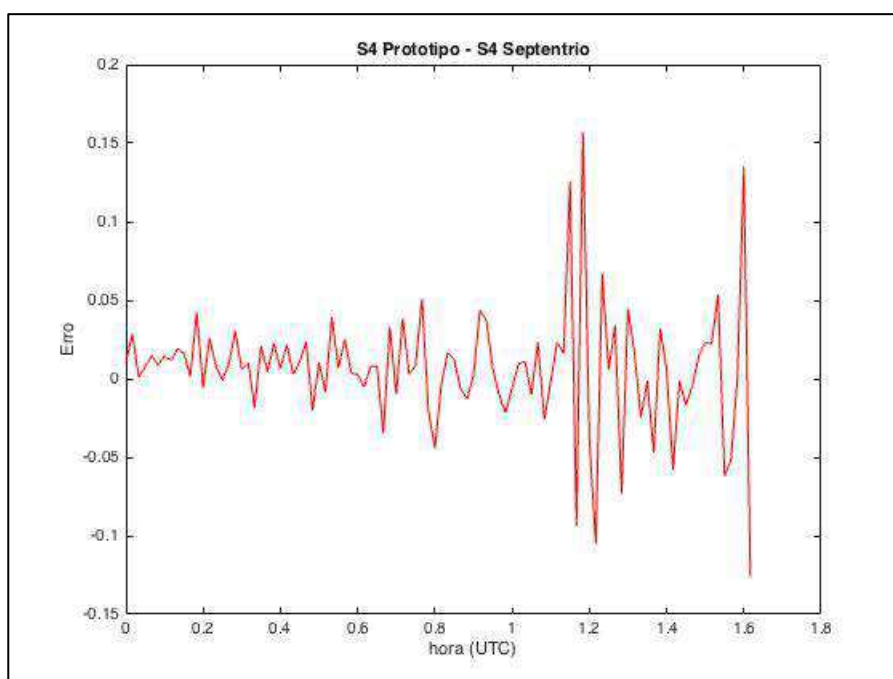


FIGURA 6.4 – Erro na estimativa do índice  $S_4^*$  pelo protótipo em relação ao monitor profissional.

## 6.2 Filtro de Kalman

O filtro de Kalman é uma técnica matemática desenvolvida por Rudolf Kalman em 1960 (KALMAN, 1960) que é utilizada para estimar o valor real de grandezas físicas cujas

medidas foram contaminadas com ruídos e outras incertezas ao longo do tempo. Este filtro apresenta diversas aplicações em áreas que precisam de estimação, como sistemas de orientação e navegação, processamento de sinais e econometria, visão computacional, destacando-se aplicações no desenvolvimento de tecnologias espaciais e militares.

O filtro de Kalman possui duas fases: predição e correção. Na predição, o filtro estima os valores futuros do estado medido  $x_k^-$  e da covariância do erro  $P_k^-$ . Na correção, o filtro computa o ganho de Kalman  $K_k$  e utilizando o valor medido  $z_k$  atualiza o valor estimado para o estado  $x_k$  e para a covariância do erro  $P_k$ . Esse procedimento ocorre a cada nova aquisição de dados e é dado pelas equações (6.5) a (6.9) abaixo:

$$x_k^- = Ax_{k-1} + Bu_k \quad (6.5)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (6.6)$$

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (6.7)$$

$$x_k = x_k^- + K_k(z_k - Hx_k^-) \quad (6.8)$$

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (6.9)$$

onde  $A$ ,  $B$ ,  $I$  e  $H$  são matrizes e  $u_k$  é um sinal de controle. Como não há sinal de controle nessa aplicação,  $u_k$  recebe o valor 0. Como o índice de cintilação S4 é um sinal unidimensional, as matrizes  $A$ ,  $B$ ,  $I$  e  $H$  assumem valores numéricos, aqui considerados constantes de valor 1. Assim, as equações (6.5) a (6.9) podem ser reescritas como

$$x_k^- = x_{k-1} \quad (6.10)$$

$$P_k^- = P_{k-1} + Q \quad (6.11)$$

$$K_k = P_k^- (P_k^- + R)^{-1} \quad (6.12)$$

$$x_k = x_k^- + K_k(z_k - x_k^-) \quad (6.13)$$

$$P_k = (I - K_k)P_k^- \quad (6.14)$$

Os valores de  $Q$  e  $R$  influenciam na rigidez do filtro. Fixando  $Q$ , se o valor de  $R$  é incrementado, as variações de  $z_k$  afetam menos o valor de  $x_k$ . Diminuindo  $R$ , as variações de  $z_k$  afetam mais o valor de  $x_k$ . Da mesma forma, fixando  $R$ , se o valor de  $Q$  é incrementado, as variações de  $z_k$  afetam mais o valor de  $x_k$ . Diminuindo  $Q$ , as variações de  $z_k$  afetam menos o valor de  $x_k$ . Assim, Pflieger (2016), propõe automatizar a escolha do valor de  $R$  pela seguinte equação:

$$R = 1 + R(K_k + R)^{-1} \quad (6.15)$$

que deve ser calculada a cada nova aquisição de dados, em seguida das equações (6.10) a (6.14). Aplicando estas equações ao exemplo de aquisição mostrado na figura 6.2, obtém-se o gráfico apresentado na figura 6.5.

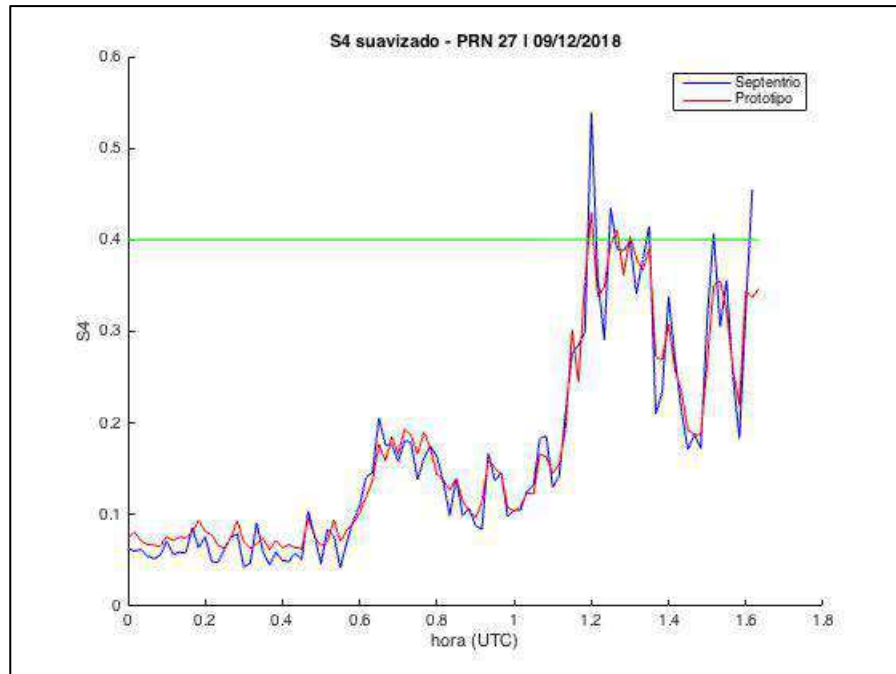


FIGURA 6.5 – Filtro de Kalman aplicado ao  $S_4$  calculado com os dados obtidos do PRN 27 com o protótipo (vermelho) e o Septentrio (azul) no dia 09 de dezembro de 2018 de 00:00 à 01:40 UTC.

Utilizando a equação (6.4) para efetuar o cálculo do coeficiente de correlação amostral  $r(S_{4FK}^*, S_4)$  para os dados apresentados na figura 6.5, obtém-se como resultado  $r(S_{4FK}^*, S_4) = 0,9740$ , mostrando neste caso um aumento de aproximadamente 3,15% deste índice em comparação ao seu valor para o sinal não filtrado. A correlação entre  $S_{4FK}^*$  e  $S_4$  classificada ainda como muito forte. Isso é ilustrado pela figura 6.6, que mostra a relação entre  $S_{4FK}^*$  e  $S_4$  se aproximando ainda mais da reta. Já figura 6.7 mostra a diferença  $(S_{4FK}^* - S_4)$ , que representa o erro na estimativa do índice  $S_{4FK}^*$  pelo protótipo em relação ao monitor profissional, cujo módulo máximo é de 0,1184.

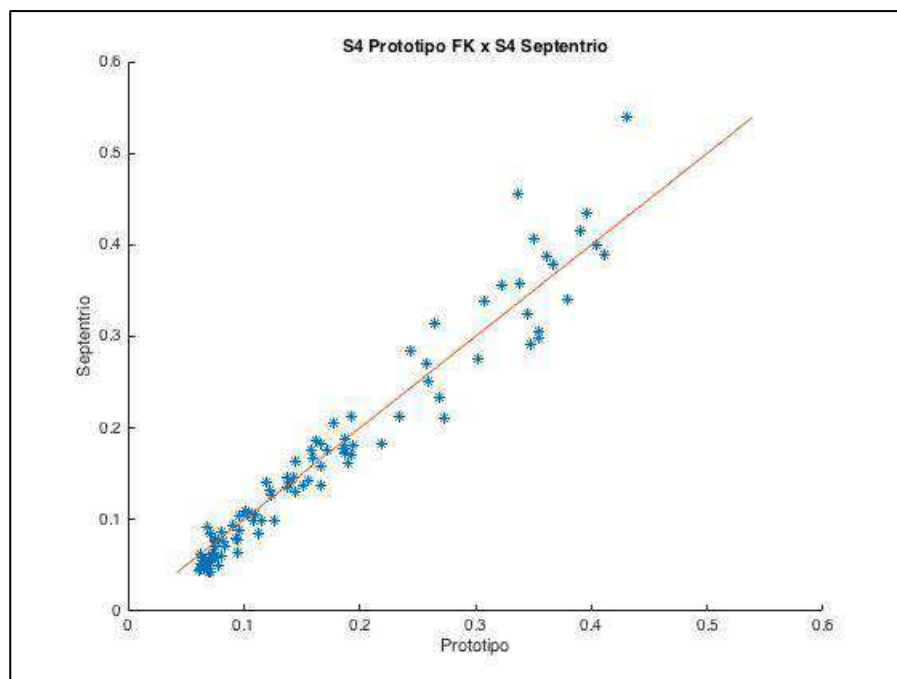


FIGURA 6.6 – Relação entre os índices S4 medidos pelo protótipo e pelo monitor profissional após uso do Filtro de Kalman.

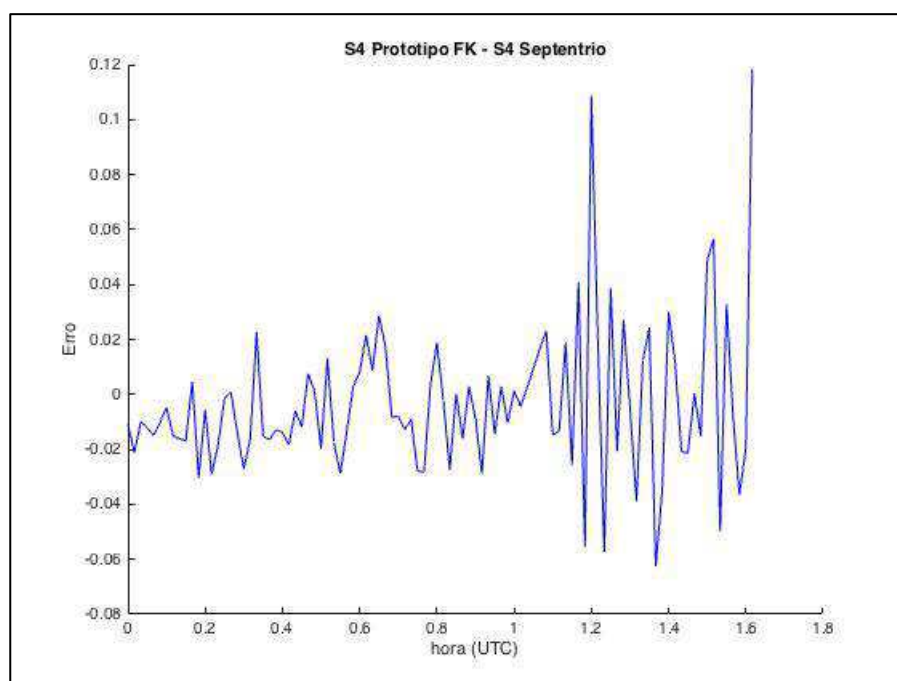


FIGURA 6.7 – Erro na estimativa do índice  $S_{4FK}^*$  pelo protótipo em relação ao monitor profissional após uso do Filtro de Kalman.

### 6.3 Validação dos dados

Para validar as medidas feitas pelo protótipo do monitor de cintilação ionosférica do índice de cintilação S4, adota-se a metodologia de compará-las com as medidas feitas com o

monitor profissional através do coeficiente de correlação amostral da equação (6.4) em dias e satélites distintos. Valores deste coeficiente próximos de 1 garantem a alta correlação entre as medidas de ambos os aparelhos levando a garantir a validade das medidas feitas com o protótipo, já que o monitor profissional gera dados confiáveis e de uso consolidado para fins científicos. A figura 6.8 mostra a comparação entre os índices S4 obtidos pelo protótipo e pelo monitor profissional para os sinais dos satélites que sofreram cintilação ionosférica entre os dias 02 e 14 de fevereiro de 2019.

Em todos os testes apresentados na figura 6.8, observa-se que o coeficiente de correlação amostral indica correlação muito forte entre as medidas do monitor profissional e do protótipo. Com estes resultados, é possível garantir a validade das medidas feitas com o protótipo.

Aplicando o filtro de Kalman apresentado nas equações (6.10) a (6.15) aos mesmos dados mostrados na figura 6.8 para estimar o valor verdadeiro do índice de cintilação S4 através da supressão de parte do ruído da medição, obtém-se os dados mostrados na figura 6.9, que também mostra o coeficiente de correlação amostral e a classificação obtida para a correlação.

Pode-se observar na figura 6.9 que a correlação entre as medidas se manteve muito forte, com um pequeno aumento do coeficiente de correlação amostral em relação a figura 6.8, exceto em um caso, onde houve uma pequena diminuição. Sendo assim, pode-se concluir que a aplicação do filtro de Kalman da forma como foi proposto não representa grande melhoria na qualidade dos dados em relação ao monitor profissional, pois a instalação e equipamentos utilizados no protótipo, como a antena e o sensor de GPS, já oferecem baixo ruído.

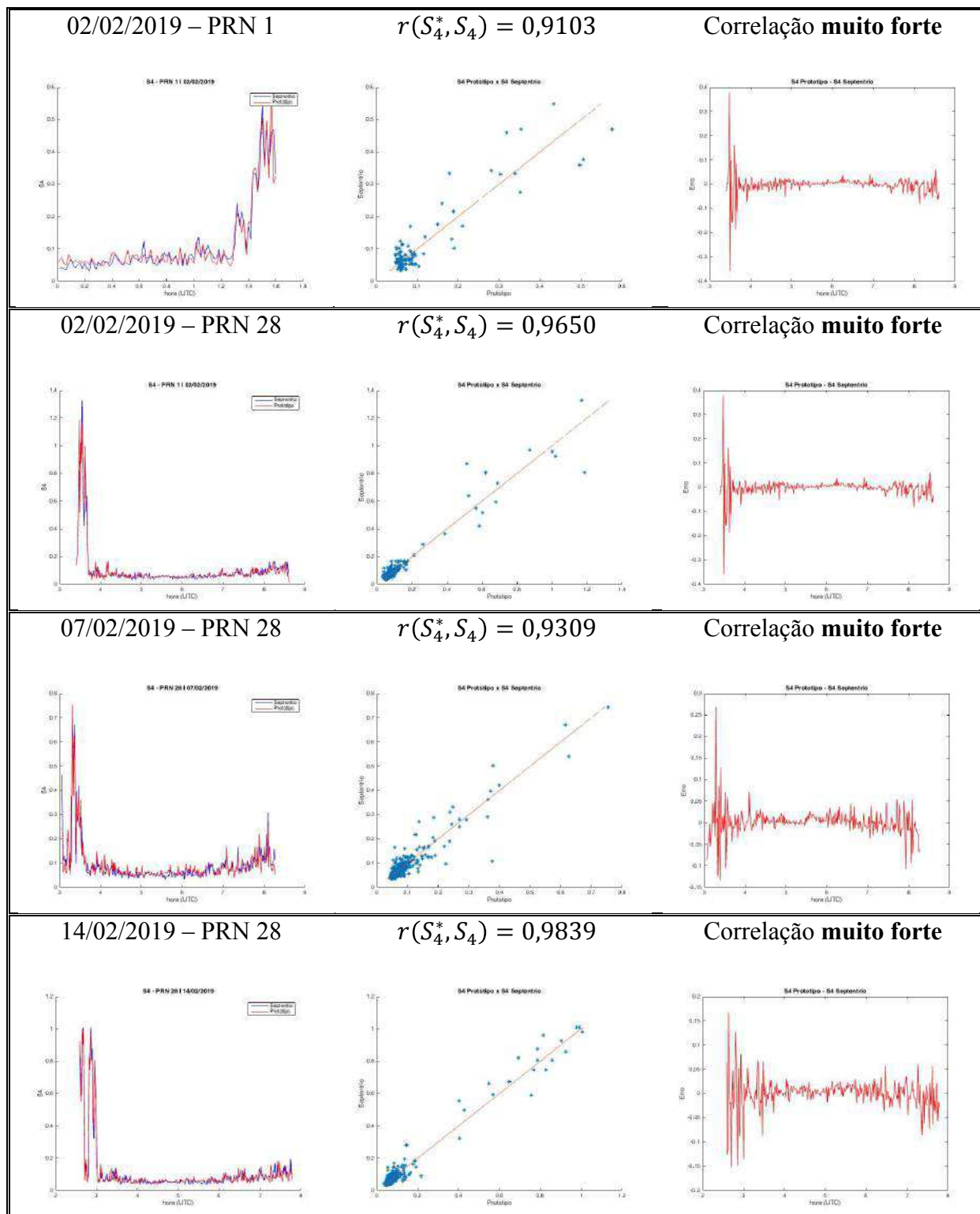


FIGURA 6.8 – Comparação entre os índices S4 obtidos pelo protótipo e pelo monitor profissional.

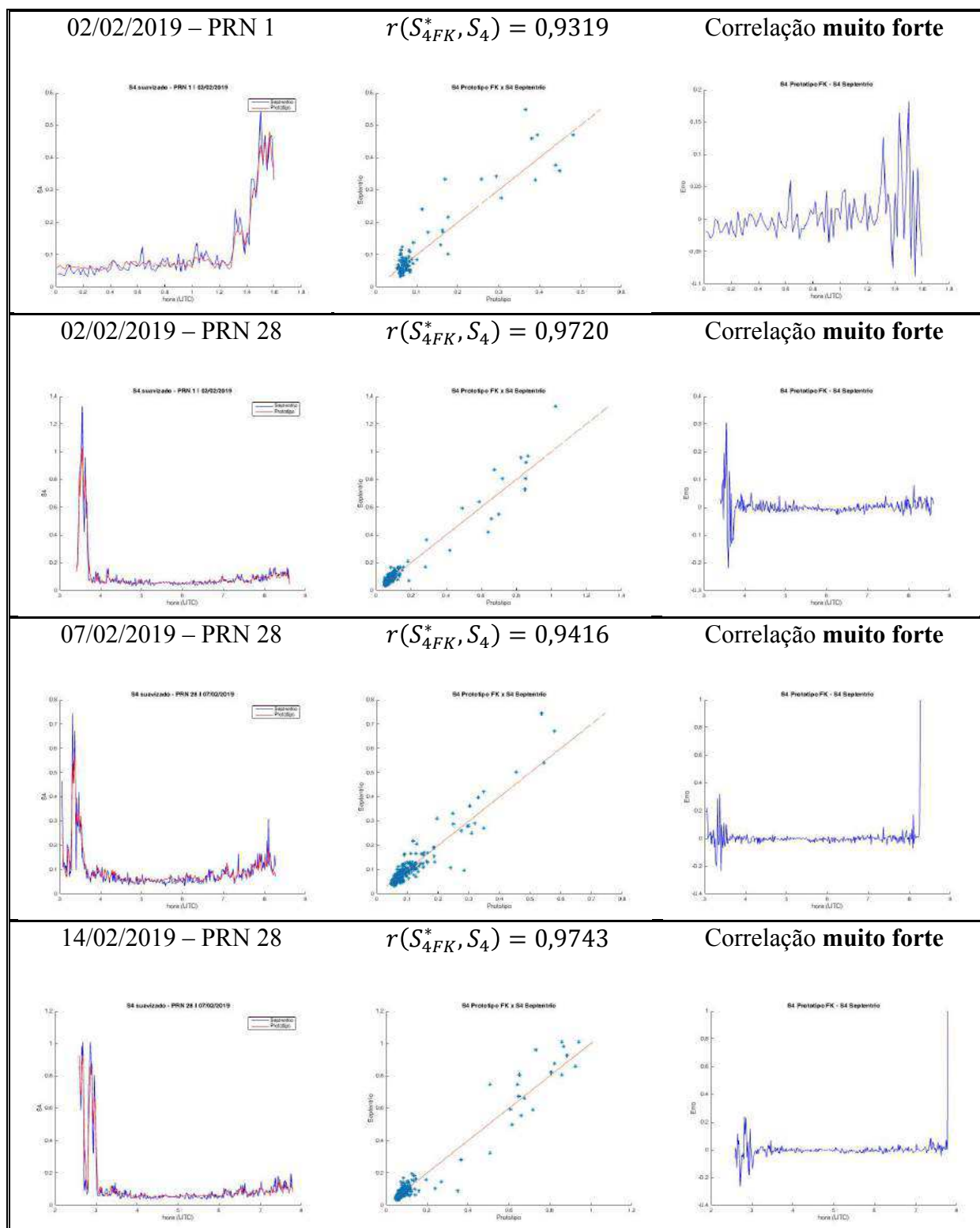


FIGURA 6.9 – Comparação entre os índices S4 obtidos pelo protótipo e pelo monitor profissional após aplicação do filtro de Kalman.

## 7 Conclusões e trabalhos futuros

### 7.1 Conclusões

Este trabalho consistiu em contribuições ao desenvolvimento de um protótipo de monitor de cintilação ionosférica de baixo custo, utilizando a plataforma do Raspberry Pi 3 Model B, cuja finalidade é realizar estimativas e monitoramento do índice de cintilação em amplitude, o S4. Foram desenvolvidos softwares de captura de dados na plataforma, além de softwares para análise e visualização dos dados através de gráficos e do IPP. Foi de grande importância para a concretização dessa pesquisa o contato com pesquisadores da Divisão de Aeronomia do INPE, na cidade de São José dos Campos, pois possibilitaram a instalação do protótipo nas suas instalações para comparação com um monitor profissional dos dados advindos das observações GPS, possibilitando a validação do protótipo.

Buscando aumentar correlação entre os dados obtidos pelo protótipo e pelo monitor profissional, foi utilizado um filtro de Kalman modificado para redução de ruído. Entretanto, o aumento percentual na correlação das medidas foi baixo, possivelmente por utilizar uma antena profissional capaz de oferecer alta performance nas observações.

O monitoramento das cintilações ionosféricas tem grande importância nas aplicações tecnológicas que utilizam comunicação via satélite, especialmente aquelas relacionadas ao posicionamento e navegação, como por exemplo, agricultura de precisão, navegação aérea e prospecção de petróleo. Nesses casos, a cintilação ionosférica pode causar degradação do sinal e perda na acurácia no posicionamento. Nesse contexto, o monitoramento da cintilação ionosférica possui a função alertar os usuários da navegação via satélite dos efeitos do clima espacial, como também pode auxiliar as pesquisas sobre a eletrodinâmica da ionosfera. A utilização de monitores de cintilação ionosférica profissionais é a forma mais apropriada para o monitoramento da ionosfera, no entanto, os altos custos para compra e manutenção, além das grandes dimensões do território brasileiro, inviabilizam a estruturação de uma ampla rede de monitoramento.

As atividades desenvolvidas no decorrer desta pesquisa contribuíram para que fosse possível o desenvolvimento de um monitor de cintilação ionosférica de baixo custo, capaz de atender os requisitos para o desenvolvimento de pesquisas científicas, além da implementação de uma solução de banco de dados online, oferecendo medidas de cintilação em tempo real

aos usuários. Essas características tornam viável a implantação de uma ampla rede de monitoramento do clima espacial na região do Brasil.

Nesta pesquisa, apresentou-se uma revisão bibliográfica sobre o sistema GPS, contemplando o histórico do sistema, as características do sinal, as observáveis e os erros sistemáticos relacionados com a transmissão e recepção do sinal. Em seguida, foram apresentados os fundamentos físicos da ionosfera de baixas latitudes, abordando sua formação e estrutura, a eletrodinâmica da ionosfera equatorial e o estudo da refração ionosférica e o impacto na propagação dos sinais de GPS. Depois, foi abordada a cintilação ionosférica em amplitude, o seu histórico, as teorias de cintilação ionosférica, o índice de cintilação S4 e a morfologia global das cintilações. Foi apresentada a descrição do monitor de cintilação profissional, trabalhos anteriores, a validação do software desenvolvido na Universidade do Texas em Dallas e suas limitações. Em seguida é feita a descrição dos componentes utilizados e dos softwares desenvolvidos para captação e processamento dos dados. E por fim, foram mostrados os resultados dos testes feitos com o protótipo, comparando com os resultados obtidos no monitor profissional, onde se pôde concluir a validação dos dados o monitor desenvolvido.

Foram desenvolvidos quatro softwares ao longo da pesquisa: um software para captura de dados no Raspberry Pi e dois para visualização dos dados em Android e PC. O software para captura de dados no Raspberry Pi gera arquivos com dados brutos e sumários e envia dados sumários para o banco de dados online. Ele tem se mostrado muito útil para o monitoramento constante da ionosfera, já que os arquivos gerados ocupam pouco espaço da memória do dispositivo e não apresenta erros em sua execução, permanecendo ligado durante muitos meses. O aplicativo Android busca os monitores ligados na data especificada e mostra em gráficos os dados coletados, possibilitando também salvar estes dados em arquivos de texto para posterior processamento em outros softwares. O software para PC mostra os dados como IPP e apresenta os gráficos dos dados coletados.

## **7.2 Trabalhos futuros**

Com a experiência adquirida durante a execução da pesquisa, têm-se as seguintes recomendações para trabalhos futuros, buscando melhorar o desempenho do sistema desenvolvido:

- Implementar o envio dos arquivos brutos e sumários para um sistema de armazenamento online, onde os usuários poderão buscar diretamente por esses arquivos nos softwares de consulta. Atualmente, esses arquivos são salvos somente na memória do Raspberry Pi.
- Efetuar testes utilizando outros tipos de antenas GPS, pois uma antena profissional pode nem sempre estar disponível nas observações.
- Implementar melhorias nas técnicas de pós-processamento do índice de cintilação S4.
- Implementar o salvamento dos arquivos brutos e sumários para o formato HDF5, por ser mais eficiente para conjuntos de dados muito grandes. Atualmente, os dados são salvos no formato CSV.
- Implementar um Alerta de Cintilação Forte nos softwares de consulta, avisando os usuários da ocorrência de cintilação para que possam efetuar as correções.
- Distribuir uma ampla rede de monitores baseados na tecnologia desenvolvida nesta pesquisa, garantindo o monitoramento da ionosfera em todo o território brasileiro.
- Publicar e distribuir os softwares desenvolvidos nessa pesquisa para usuários dos sistemas de navegação.
- Utilizar os dados gerados pela rede de monitores para estudar o clima espacial na região brasileira.

## Referências

AGUIAR, Claudinei Rodrigues de. **Modelo regional da ionosfera (Mod\_Ion): implementação em tempo real**. 2005. 160 f. Dissertação (Mestrado) – Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

BASU, S.; MACKENZIE, E.; BASU, S. Ionospheric constraints on VHF/UHF communication links during solar maximum and minimum periods. **Radio Science**, v. 23, n. 3, p. 363-378, mai.-jun. 1988.

BEACH, Theodore Lyman. **Global positioning system studies of equatorial scintillations**. 1998. 354 f. Tese (Doutorado) – Doctor of Philosophy, Universidade Cornell, Ithaca.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 9 ed. São Paulo: Saraiva, 2017, 576p.

CAMARGO, Paulo de Oliveira. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores de uma frequência**. 1999. 206 f. Tese (Doutorado) – Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CUEVA, Ricardo Yvan La Cruz. **Eletrodinâmica das irregularidades ionosféricas em baixas latitudes e caracterização das plumas em três setores de longitude**. 2013. 181 f. Tese (Doutorado) – Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Firestore. In: WIKIPÉDIA: a encyclopedia livre. Disponível em: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Firebase>> Acesso em: 9 dez 2018.

HOFMAN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS Theory and Practice**. 5 ed. Wien: Springer-Verlag, 2001, 382p.

Java (linguagem de programação). In: WIKIPÉDIA: a encyclopedia livre. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Java\\_\(linguagem\\_de\\_programa%C3%A7%C3%A3o\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Java_(linguagem_de_programa%C3%A7%C3%A3o))> Acesso em: 8 dez 2018.

JEREZ, Gabriel Oliveira. **Análise da integração GPS/GLONASS para posicionamento sob efeito de cintilação ionosférica**. 2017. 156 f. Dissertação (Mestrado) – Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

KINTNER JR, P. M.; HUMPHREYS, T.; HINKS, J. GNSS and ionospheric scintillation: how to survive the next solar maximum. **InsideGNSS**, p. 22-30, jul.-ago. 2009.

LEAL, N. G. V. **Dominando o Android: do básico ao avançado**. 2 ed. São Paulo: Novatec, 2015. 952p.

MATSUOKA, M.T.; MACHADO, W.C.; CAMARGO, P.O.; MONICO, J.F.G.. **Análise do posicionamento por ponto após a desativação da técnica SA**. In: *XX Congresso Brasileiro de Cartografia* – CD-ROM, Porto Alegre/RS, Brasil, 7 a 12 de outubro, 2001.

MATSUOKA, Marcelo Tomio. **Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS**. 2003. 164 f. Dissertação (Mestrado) – Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MATSUOKA, Marcelo Tomio. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: avaliação na região brasileira**. 2007. 264 f. Tese (Doutorado) – Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MENDOÇA, Marco Aurélio Moraes de. **Investigação da cintilação ionosférica no Brasil e seus efeitos no posicionamento por GNSS**. 2013. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Fundamentos, Definições e Aplicação**. 2 ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008, 476p.

MORAES, Alison de O.; VANI, Bruno C.; COSTA, Emanuel; ABDU, Mangalathayil A.; DE PAULA, Eurico R.; SANTOS, Jonas S.; MONICO, João F. G.; FORTE, Biagio; NEGRETE, Patrícia Mara de S.; SHIMABUKURO, Milton H. GPS availability and positioning issues when the signal paths are aligned with ionospheric plasma bubbles. **GPS SOLUTIONS**, v. 22, p. 95, 2018.

MORO, Juliano. **Variações longitudinais dos campos elétricos do eletrojato equatorial no setor americano**. 2015. 175 f. Tese (Doutorado) – Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

MUELLA, Marcio Tadeu de Assis Honorato. **Morfologia e dinâmica das irregularidades ionosféricas de pequena escala e imageamento ionosférico por GPS**. 2008. 386 f. Tese (Doutorado) – Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

PEREIRA, Vinícius Amadeu Stuaní. **Monitoramento das irregularidades ionosféricas e cintilação dos sinais GNSS: em tempo real e pós-processado**. 2015. 160 f. Dissertação (Mestrado) – Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

PFLEGER, Sergio Genilson. **Redução de ruído em vídeos em tempo real baseado na fusão do filtro de Kalman e filtro bilateral**. 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado) – Ciência da Computação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Raspberry Pi. In: WIKIPÉDIA: a enciclopedia livre. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Raspberry\\_Pi](https://pt.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi)> Acesso em: 8 dez 2018.

RODRIGUES, Fabiano da Silveira. **Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando GPS**. 2008. 180 f. Dissertação (Mestrado) – Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

SANTOS, Jonas de Sousa dos. **Estudo da geração das bolhas de plasma sob diferentes condições meteorológicas e ionosféricas: observações e simulação.** 2013. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications.** Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

Septentrio PolarRxS Packaged Receivers. In: NAVTECHGPS. Disponível em: <[https://www.navtechgps.com/septentrio\\_polarxs\\_packaged\\_receivers/?keyword=Septentrio%20PolarRxS%20Pro](https://www.navtechgps.com/septentrio_polarxs_packaged_receivers/?keyword=Septentrio%20PolarRxS%20Pro)> Acesso em: 7 dez 2018.

Unity. In: WIKIPÉDIA: a encyclopedia livre. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Unity>> Acesso em: 9 dez 2018.

VAN DIERENDONCK, A.J., HUA, Q., KLOBUCHAR, J., 1993. Ionospheric scintillation monitoring using commercial single frequency C/A code receivers. In: **Proceedings of ION GPS 93**, Salt Lake City, pp. 1333–1342, 1993.

VANI, Bruno César. **Análise da cintilação ionosférica no Brasil empregando GNSS e técnicas de mineração e visualização de dados.** 2014. 138 f. Dissertação (Mestrado) – Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

YEH, K. C.; LIU, C. Radio Wave Scintillations in the ionosphere. **Proceedings of the IEEE**, v. 70, n. 4, p. 324-360, abr. 1982.