

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA-PUC / ENGENHARIA ELÉTRICA
Trabalho Final de Curso II

Kelias de Oliveira

PROPOSTA DE MONITORAMENTO DA CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA NA REGIÃO
CENTRO-OESTE COM RECEPTORES GPS DE BAIXO CUSTO

Trabalho Final de Curso II como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica
apresentado à Pontifícia Universidade Católica de Goiás.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Me. Cleidimar Garcia Pereira – Orientador. PUC-GO.

Prof. Dr. Bruno Quirino de Oliveira. PUC-GO.

Prof. Dr. Marco Antônio de Melo Medeiros. PUC-GO.

Goiânia, 06 de Dezembro de 2021.

Proposta de Monitoramento da Cintilação Ionosférica na Região Centro-Oeste com Receptores GPS de Baixo Custo

Kelias de Oliveira¹, Cleidimar Garcia Pereira¹

¹Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC-GO, Escola de Engenharia – ENG, Goiânia - Goiás
keliaso@gmail.com, engenheirodim@hotmail.com

Resumo — Uma série de fatores ambientais pode afetar o desempenho do sistema GPS (*Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global), tais como, interferências eletromagnéticas, a propagação multicaminho, os atrasos em função da propagação pela atmosfera e as cintilações ionosféricas.

As cintilações da ionosfera são responsáveis por parte significativa da diminuição de precisão do GPS e, em casos extremos o funcionamento do receptor pode ser interrompido em função desse fenômeno.

As cintilações ionosféricas resultam em variações rápidas na fase e na amplitude do sinal de rádio que atravessa a ionosfera. Esse fenômeno é mais comum na região equatorial (baixas latitudes), onde ocorre diariamente após o pôr do sol.

Este trabalho tem por objetivo a proposta de instalação, sincronização, armazenagem de dados do sinal na frequência de L_1 , por receptores GPS de baixo custo. Posteriormente será feita a análise estatística do comportamento desse sinal na região centro-oeste do Brasil.

Palavras-chave — GPS, GNSS, Cintilação Ionosférica.

I. INTRODUÇÃO

O GPS é a sigla em inglês para Sistema de Posicionamento Global. Inicialmente desenvolvido com fins militares, o sistema é hoje largamente utilizado pela sociedade civil. De posse de um receptor GPS o usuário obtém a sua localização (latitude, longitude e altitude), velocidade e tempo em qualquer ponto do globo. Os militares o usam para identificação de alvos, bem como orientação das suas tropas em terra, mar e ar. Para a comunidade civil as aplicações são nas áreas de agricultura de precisão, aviação civil, levantamento topográfico, transporte terrestre e marítimo, uso e operação de Drones, VANTs (Veículo Aéreo Não Tripulável) em pesquisas de geoprocessamento e mais recentemente aplicação em carros elétricos autônomo.

A ionosfera é a região da alta atmosfera caracterizada por possuir uma alta densidade de íons e elétrons livres, criados, principalmente, por fotoionização solar. Uma definição relevante para as telecomunicações seria a porção da atmosfera onde elétrons e íons livres de energia térmica

existem em quantidades suficientes para afetar a propagação de ondas de rádio. A ionosfera também pode ser definida como plasma natural no qual se desenvolvem instabilidades e irregularidades ionosféricas em uma ampla gama de tamanhos de escala. Essas irregularidades causam variações temporais e espaciais significativas no índice de refração do espaço próximo à Terra (geoespaço). Isso, por sua vez, causa a refração das ondas de rádio transmitidas por satélites, incluindo sistemas de navegação global por satélite (GNSS). A refração leva ao desvanecimento do sinal observado por receptores baseados no solo e no espaço. O desvanecimento, associado às irregularidades ionosféricas, é comumente referido como cintilação ionosférica. Assim, o GNSS pode ser usado para revelar a evolução das irregularidades ionosféricas.

No campo civil, a precisão do sistema GPS gira em torno de 30 metros. São muitos os fatores que afetam a precisão do sistema, dentre os quais podem-se destacar: as interferências eletromagnéticas, a propagação multicaminhos ou multipercursos, os atrasos em função da propagação e as cintilações ionosféricas [4].

II. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A. *Os segmentos do GPS.*

O sistema GPS é dividido em três segmentos principais, como ilustra a Figura 1:

- a) O segmento espacial, constituído pelos satélites que transmitem os sinais usados no posicionamento GPS;
- b) O segmento de controle, que é responsável pela manutenção do sistema;
- c) O segmento de usuários, contendo todas as aplicações e tipos de receptores.

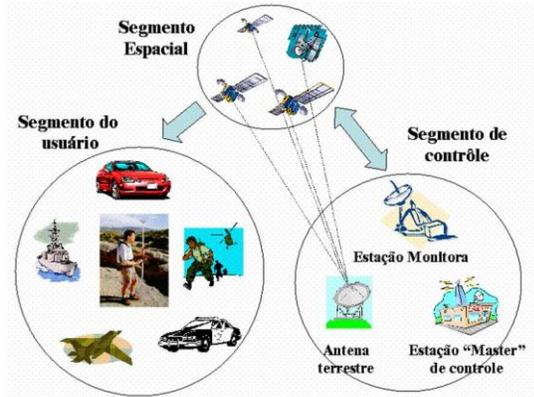


Figura 1 – Segmentos do GPS [8].

B. O Segmentos Espacial.

O sistema GPS proporciona cobertura global, com um número de satélites, simultaneamente visíveis, variando entre 4 e 8, com elevações superiores a 15°. Para o limite de 10° na elevação, o número de satélites visíveis pode chegar a 10, o que é possível para uma constelação de satélites em órbita aproximadamente circular, com altitude de 20.200km, com período de 12 horas siderais e inclinação de 55° em relação ao plano equatorial [10]. A constelação GPS foi projetada para a configuração:

- 21 satélites mais 3 reservas;
- 6 planos orbitais, com inclinação de 55° em relação ao equador;
- período de 12 horas siderais;
- altura de 20.200km;
- total cobertura terrestre.

Em condições normais, há 4 satélites em cada órbita. Os satélites reservas substituem aqueles que entram em pane, por chegarem ao fim da vida útil. A Figura 2 ilustra um exemplo.



Figura 2. Constelação de satélites [PROFESSOR.PUC.GOIAS-2021].

C. O Segmentos de Controle.

O segmento de controle constitui o Sistema de Controle Operacional (OCS - *Operational Control System*), que consiste de uma estação principal, uma rede mundial de

estações monitoradas, e de estações de controle terrestres, como mostra a Figura 3. Os principais objetivos operacionais do segmento de controle são os seguintes [10]:

- Rastrear os satélites para a determinação de órbitas e correção dos relógios e modelagem periódica;
- Sincronizar o tempo dos satélites;
- Injetar nos satélites as mensagens contendo os dados que devem ser transmitidos aos receptores.

D. O Segmentos do Usuário.

O segmento do usuário é constituído por todos aqueles que usam o sistema GPS, independentemente dos objetivos e do tipo de receptor, que podem ser utilizados para navegação, posicionamento, topografia, geodésia, agricultura ou qualquer outra atividade.

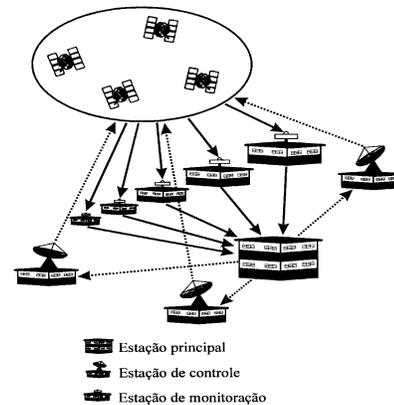


Figura 3. O segmento de controle [4].

E. Característica do sinal GPS.

Todos os satélites da constelação GPS transmitem sinais em duas frequências da banda L, denominadas L₁ e L₂, que são obtidas a partir da frequência fundamental (f₀) de 10,23 MHz multiplicada por 154 e 120 para gerar as portadoras. Portanto as frequências e os comprimentos de onda resultantes são:

$$L_1 = 10,23 \text{ MHz} * 154 = 1.575,42 \text{ MHz, com } \lambda \approx 19,04 \text{ cm}$$

$$L_2 = 10,23 \text{ MHz} * 120 = 1.227,60 \text{ MHz, com } \lambda \approx 24,44 \text{ cm}$$

Os códigos Pseudo-Aleatórios (PRN - *Pseudo Random Noise*) são modulados sobre as duas portadoras. O código C/A (*Coarse/Aquisition* - Fácil Aquisição) é modulado apenas na portadora L₁ e tem comprimento de onda por volta de 300m e frequência de 1,023 MHz.

O código P (*Precision* ou *Protected* - Preciso ou Protegido) que é reservado ao uso militar e a usuários autorizados tem comprimento de onda de aproximadamente 30m e é transmitido com uma frequência de 10,23 MHz além de ser modulado nas duas portadoras (L₁ e L₂).

A geração do sinal é ilustrado na Figura 4.

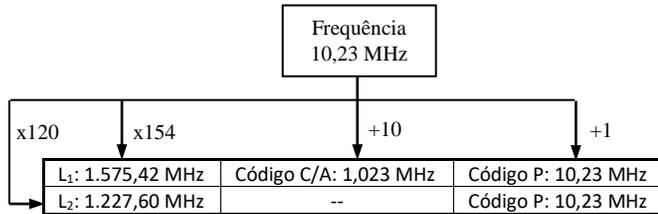


Figura 4. Geração do sinal GPS [10].

As portadoras trazem também moduladas as mensagens de navegação que contém os parâmetros orbitais, os dados para a correção da propagação ionosférica, os parâmetros para correção do erro dos relógios dos satélites, informações sobre a saúde dos satélites, etc.

Há três tipos de sinais envolvidos no GPS: a portadora, os códigos PRN e os dados (navegação, relógio, etc). Esta estrutura permite não só medir a fase da portadora e sua variação, mas também o tempo de propagação.

F. O DGPS Diferencial.

No esforço para tornar o serviço GPS disponível para usuários civis comerciais, nacionais e internacionais, mantendo a função militar original dos EUA, dois serviços de GPS são fornecidos, o PPS e o SPS. O DoD (*United States Department Of Defence* – Departamento de Defesa dos Estados Unidos), autoriza os usuários que tenham acesso ao serviço de posicionamento preciso (PPS), que fornece precisão completa do sistema através da utilização do código longo e rápido P(Y). O acesso ao PPS é restrito por meio de técnicas criptográficas, e os usuários devem ser equipados com um dispositivo de decodificação para desbloquear o código P criptografado, referido como o código Y. Esse recurso de criptografia é chamado *Anti-Spoofing* (AS). O Serviço de Posicionamento Padrão (SPS) é fornecido para civis e todos os outros usuários em todo o mundo, com uma capacidade de posicionamento menos precisa do que o PPS [1].

O GPS Diferencial (DGPS – *Differential Global Positioning System*) é uma técnica que faz uso de um sistema auxiliar para o Sistema de Posicionamento Global que oferece maior precisão na localização, a partir do GPS e dependendo das condições é possível atingir uma precisão nominal de 15m para cerca de 30cm. O desempenho do SPS padrão do usuário do GPS com frequência única (L₁) é aproximadamente de 10m na horizontal e 15m na vertical [2].

A Figura 5 mostra o cenário de aplicação do DGPS. Nesta figura a título de exemplo é usado apenas um satélite, uma estação de referência, um usuário e são caracterizados as principais fontes de erros.

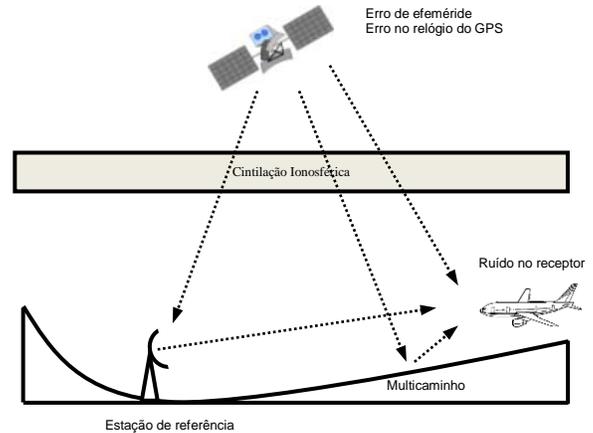


Figura 5. Visão geral da operação do DGPS Adaptado de [2].

III. REDE DE MONITORAMENTO DA IONOSFERA NA AMÉRICA DO SUL

No Brasil há duas redes de monitoramento da ionosfera, gerenciadas por duas instituições de pesquisa no Brasil: o ICEA (Instituto de Controle Aero-Espacial) e a UNESP (Universidade Estadual Paulista). A maioria dos receptores são da Novatel modelo GSV4004B, mas há outros modelos. Os receptores da UNESP são fabricados pela Septentrio, modelos PolaRx5S. Todos esses receptores ou monitores de cintilação ionosférica tem em comum o alto custo de aquisição. A figura 5 mostra as duas redes de monitoramento no Brasil.

A Figura 6 [7], ilustra também uma rede de pesquisa da cintilação ionosférica de baixa latitude. A rede LISN (*Low-Latitude Ionosphere Scintillation Network* – Rede de Cintilação Ionosférica de Baixa Latitude) que contempla a instalação de diferentes equipamentos para monitorar a ionosfera na América do sul, como monitores GNSS, magnetômetros e ionosondas. Os objetivos do projeto LISN incluem pesquisar a ionosfera equatorial e oferecer serviços como a previsão das condições em tempo real.

As estações da rede LISN são gerenciadas pela UNESP e tem sido apoiado por diferentes projetos desde 2011. O projeto CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS Latin America* - Conceito de Mitigação da Cintilação Ionosférica para sistemas GNSS profissionais da América Latina), visa analisar os efeitos da cintilação ionosférica, conhecer as suas causas e desenvolver novas tecnologias a serem implantadas em receptores GPS/GNSS de multi-frequências.



Figura 6 – Localização das estações de monitoramento da ionosfera [7].

IV. O USO DE EQUIPAMENTOS DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAR A IONOSFERA

Várias pesquisas têm sido realizadas para desenvolver equipamentos de baixo custo para monitorar as irregularidades ionosféricas. O desenvolvimento de tais equipamentos atende o propósito de estudar a recepção GPS, interface do *hardware*, programação do *firmware* e as aplicações da análise geofísica da ionosfera. Estas pesquisas têm sido feita por estudante de graduação e pós-graduação de várias instituições no Brasil, que integram os campos da Geociência, Engenharia Eletrônica e Engenharia da Computação.

Para alcançar objetivos práticos na aprendizagem e desenvolvimento de receptores de baixo custo, alguns parâmetros são necessários como mostra a Tabela 1 [7].

Tabela 1 – Requisitos para um receptor de baixo custo [PETROPOULOS, 2021].

Requisitos #	Descrição
1	Rastreamento simultâneo de no mínimo 12 canais de satélites GPS independente.
2	Taxa de amostragem mínima de 10Hz para as medidas do sinal de amplitude em cada canal.
3	Informações da identificação do satélite, azimute e elevação.
4	Estimativa do índice S_4 comparável com um monitor de cintilação profissional.
5	Custo total abaixo de \$100.00.
6	Plataformas de <i>Software</i> e <i>Hardware</i> abertas.
7	Habilidade para gravar dados recebidos em memórias não volátil.
8	Capacidade de enviar os dados gravados para uma rede de pesquisa.
9	Capacidade de operar de forma autônoma e expansível quando desejável.
10	Baixo consumo de energia e alimentado por baterias.

A Figura 7 mostra um diagrama em blocos da proposta de um monitor GPS de baixo custo usando Arduino, desenvolvido em [PETROPOULOS, 2021].

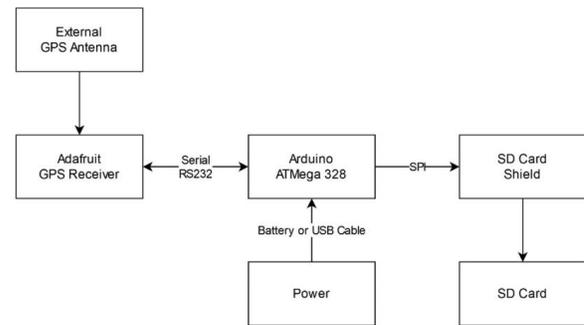


Figura 7 – Diagrama em blocos de um monitor ionosférica Arduino [7].

V. PROPOSTA DE UM RECEPTOR DE BAIXO CUSTO

O objetivo desse trabalho é então adquirir, instalar e sincronizar um receptor de baixo custo para a frequência L_1 do sinal GPS, para ser instalado em Goiânia-Go. Posteriormente fazer a recepção do sinal durante 7 dias na semana e 24 horas por dia o sinal GPS em L_1 , armazenar para posteriormente fazer um estudo estatístico e analisar o comportamento e a influência da cintilação ionosférica nesse sinal na região do Centro-Oeste Brasileiro. Um outro objetivo é integrar esse monitor para fazer parte da rede do ICEA da Figura 5, na investigação das irregularidades ionosférica na região central do Brasil, como foi feito em [5].

A. O receptor GPS Breakout.

Um dos receptores pesquisados para este fim é um módulo GPS definitivo para usar com o *Raspberry Pi*, ou com um *kit Arduino* ou outro projeto de microcontrolador. O módulo *breakout* é construído em torno do *chipset* MTK3339, um GPS de alta qualidade, que pode rastrear até 22 satélites em 66 canais, que possui uma recepção de alta sensibilidade (com rastreamento de -165 dB) e uma antena embutida.

Nesse receptor é possível fazer até 10 atualizações de localização por segundo para rastreamento de registro de alta velocidade e alta sensibilidade. O consumo é de 20mA durante a navegação. Inclui um regulador de 3,3V que pode ser alimentado de 3,3 a 5,0V_{DC} nas entradas de nível com 5V seguro, possui um pino de *ENABLE* para que possa desligar o módulo usando qualquer microcontrolador ou interruptor. Um pequeno LED vermelho brilhante. Esse LED pisca por volta de 1Hz durante a busca por satélites e pisca uma vez a cada 15 segundos quando uma correção é encontrada para economizar energia.

Ele possui também dois dos recursos que realmente se destacam que está na memória baseada em MTK3339 Versão 3, a funcionalidade da antena externa e o recurso de registro de dados integrado. O módulo possui uma antena *patch* de cerâmica padrão que oferece -165 dB de sensibilidade.

A Figura 8 ilustra o receptor GPS, com a antena *Patch* e a linha de transmissão que é um cabo coaxial de 50Ω de impedância.



Figura 8 – Kit de um receptor GPS.

A Figura 9 ilustra o diagrama em blocos do sistema de recepção GPS que será montado. Nesta figura é mostrado a antena *Choke-ring* ou antena *Patch*, o receptor *GPS Ultimate Breakout*, o módulo de interface *CP2102* e o módulo *Raspberry Pi*.

O módulo *Raspberry Pi* será responsável pela armazenagem dos dados monitorados 24 horas por e 7 dias na semana e enviar esses dados para a rede de pesquisa.

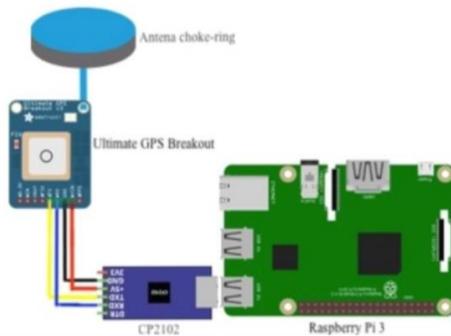


Figura 9 – Diagrama em blocos do receptor.

A Figura 10 ilustra somente o receptor *GPS Ultimate Breakout v3 adafruit*, onde pode-se ver claramente os terminais do receptor e os LEDs de monitoramento do sinal.



Figura 10 – Receptor GPS Breakout v3 adafruit.

B. O receptor RTL-SDR V3.

Um outro receptor que será adquirido e testado na recepção do sinal L_1 do GPS é definido por *Software* (SDR – *Software defined Receiver*) e possui como características na sintonia ou recepção de sinais do tipo:

- banda de radioamador: VHF, UHF, HF, CW, SSB, modos digitais (PSK, CW, RTTY, SSTV, FT8, FT4, satélites de radioamador (exemplo ISS – Estação Espacial Internacional que está em órbita da terra) e muitos outros;
- Faixa do cidadão, AM-SSB, bandas USB, LSB e FM;
- varredura de rádio em geral, sistema Trunking.
- rádio de segurança, EMS e outros;
- ADS-B (radar do tráfego aéreo), comunicação do tráfego aéreo comercial (avião x aeroporto), monitoramento de tráfego aéreo, AIS (acompanhamento da posição de barcos marítimos), decodificar ACARS, DAB;
- balões meteorológicos, APRS, satélites meteorológicos NOAA-APT, imagens satélite meteorológico GOES (em conjunto com outros hardware);
- receber sensores de temperatura sem fio, sensores sem fio de medição de energia e outros;
- GPS.

Esse receptor pode sintonizar sinais entre 500 KHz e 1,7 GHz e tem até 3,2 MHz de largura de banda instantânea. (Recepção de HF abaixo de 24 MHz funciona no modo de amostragem direta). As Figuras 11 e 12 mostram o receptor.



Figura 11. Receptor RTL-SDR.



Figura 12. Receptor RTL-SDR.

Com os dados armazenados e também enviados pela rede aos centros de pesquisa em São Paulo, será feita uma análise estatística da variabilidade do sinal na frequência L_1 , tendo como referência a região Centro-Oeste do Brasil, já que muitos trabalhos de pesquisa fizeram essa análise a partir de monitores de cintilação instalados na região Sudeste do Brasil, como mostram os trabalhos [3, 4, 5 e 6].

VI. RESULTADOS

A. O receptor GPS Breakout.

Inicialmente o receptor *GPS Breakout Adafruit* foi instalado em Goiânia, que possui os dados de latitude: -16,66547 e de longitude: -49,25517. A Figura 13 mostra o local da instalação, com a porta do laboratório aberta.

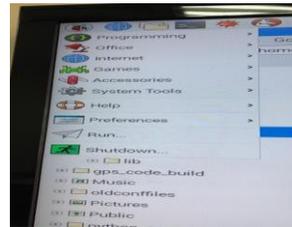


Figura 13. Local da instalação dos receptores.

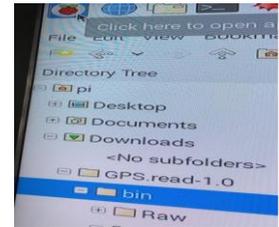
Após a instalação do *hardware* (antena, cabo de descida, conectores, alimentação, etc), foi atualiado o *software* dele e realizado a sincronização. A Figura 14 mostra o receptor instalado e a Figura 15 mostra parte da configuração e atualização do *software*. A Figura 16 e 17 mostra os resultados do processo de sincronização do receptor com os satélites.



Figura 14. Instalação do receptor.

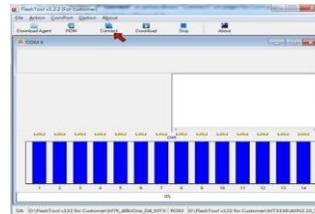


(a) Gerenciador de arquivos do módulo Raspberry PI.



(b) Pasta onde será armazenado os dados lidos pelo receptor

Figura 15. Configurando o receptor.

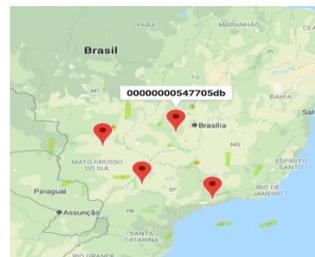


(a) Processo de varredura dos satélites (PRN).

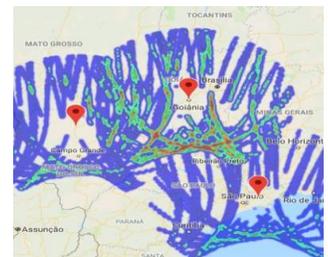


(a) Processo finalizando da leitura dos satélites.

Figura 16. Configurando do receptor.



(a) Localização do monitor operando em Goiânia



(a) Exemplo de leitura de sinais das estações monitoras de cintilação

Figura 17. Resultado da configuração do receptor.

Os dados são armazenados no módulo *Raspberry PI*, na pasta BIN como mostra a Figura 15 (b). A título de ilustração a Figura 18 mostra um arquivo aberto no bloco de notas mostrando vários parâmetros medido pelo receptor, onde está destacado o em vermelho o índice S_4 .

O sinal medido pelo receptor é convertido em uma sentença NMEA, que é um padrão de comunicação desses receptores. O índice S_4 é calculado como o desvio padrão da intensidade do sinal (amplitude) dividido pela média das amostras, em 1 minuto [4]. Isso é feito de cada satélite, que está sendo monitorado. A equação para estimar o valor de S_4 , normalizado é mostrado pela equação (1),

$$S_4 = \sqrt{\frac{E[I^2]}{[I^2]} - 1}$$

Onde $E[]$ é por definição a média e I a intensidade do sinal recebido.

```

Dados - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
%station_id; filename; wn; tow; svid; sbf_block; azim; elev; avg_cn011; s4; s4_correction; pl
8; 0335.80; 1716; 518400; 5; 628; 106; 39; 48.1; 0.212; 0.039; 0.06; 0.155; 0.221; 0.231; 0.2
8; 0335.80; 1716; 518400; 12; 628; 53; 58; 50; 0.304; 0.032; 0.035; 0.074; 0.098; 0.104; 0.10
8; 0335.80; 1716; 518400; 21; 628; 297; 37; 46; 0.408; 0.05; 0.032; 0.074; 0.109; 0.116; 0.11
8; 0335.80; 1716; 518400; 25; 628; 194; 79; 51.3; 0.036; 0.027; 0.017; 0.02; 0.024; 0.024; 0.
8; 0335.80; 1716; 518400; 29; 628; 202; 46; 48.9; 0.059; 0.036; 0.015; 0.019; 0.024; 0.024; 0.
8; 0336.90; 1716; 518460; 5; 628; 107; 39; 48.1; 0.171; 0.039; 0.048; 0.102; 0.142; 0.149; 0.
8; 0336.90; 1716; 518460; 12; 628; 52; 58; 50.1; 0.286; 0.031; 0.029; 0.056; 0.07; 0.071; 0.0
8; 0336.90; 1716; 518460; 21; 628; 297; 37; 46.4; 0.318; 0.048; 0.025; 0.051; 0.081; 0.088; 0.
8; 0336.90; 1716; 518460; 25; 628; 193; 79; 51.2; 0.06; 0.028; 0.017; 0.021; 0.022; 0.023; 0.
8; 0336.90; 1716; 518460; 29; 628; 201; 46; 49.2; 0.059; 0.035; 0.014; 0.019; 0.023; 0.023; 0.
8; 0336.90; 1716; 518520; 5; 628; 107; 39; 48.1; 0.197; 0.039; 0.059; 0.146; 0.24; 0.249; 0.2
8; 0336.90; 1716; 518520; 12; 628; 51; 58; 50.1; 0.293; 0.031; 0.028; 0.061; 0.083; 0.085; 0.
8; 0336.90; 1716; 518520; 21; 628; 296; 38; 45.6; 0.371; 0.052; 0.022; 0.034; 0.046; 0.048; 0.

```

Figura 18. Exemplo de um arquivo de dados da leitura do receptor GPS *Breakout*.

A Figura 19 mostra o resultado da leitura do índice S_4 , medido pelo receptor, como um dado bruto. Esse parâmetro serve para indicar o nível da degradação do sinal GPS com relação a sua amplitude quando este atravessa a ionosfera, é uma métrica muito usado em pesquisas do sistema GNSS [4, 5 e 6].

As Figuras 20, 21 e 22 mostram mais resultados das medidas do índice de Cintilação S_4 , medidos em dias e horários diversos.

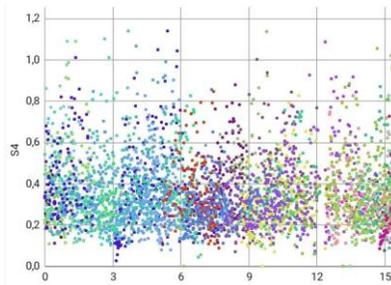


Figura 19. Resultado da medida do índice S_4 .

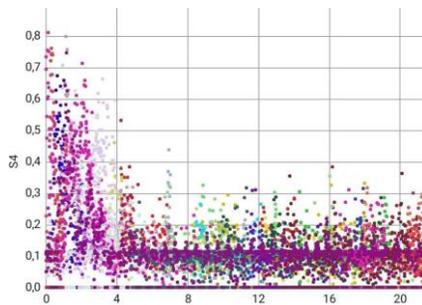


Figura 20. Resultado da medida do índice S_4 .

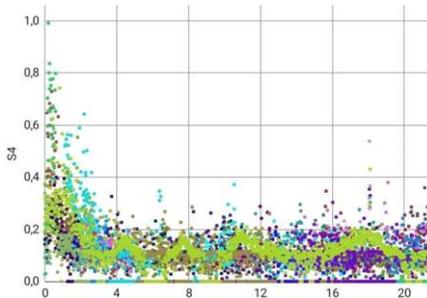


Figura 21. Resultado da medida do índice S_4 .

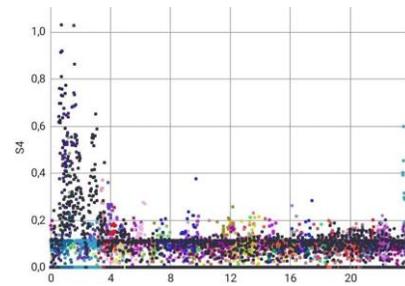


Figura 22. Resultado da medida do índice S_4 .

B. O receptor RTL-SDR V3.

A arquitetura do sistema de monitoramento e aquisição de dados baseado no SDR utilizada nesse trabalho é composta por uma antena GNSS, um *front-end* SDR e um *software* de processamento, como mostra a Figura 23 [12]. Os sinais de GNSS recebidos pela antena são amplificados, filtrados e amostrados para permitir a conversão do sinal analógico em digital e fornecer ao computador amostras IQ (*In Phase/Quadrature Phase*). O computador deverá executar o processamento necessário para o cálculo do índice de cintilação em amplitude S_4 , definido como o desvio padrão da potência do sinal recebido normalizado pela sua média.

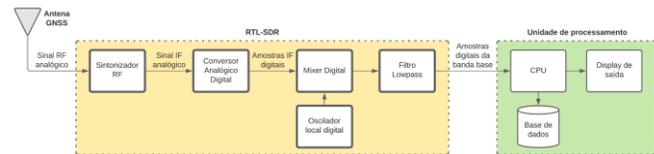


Figura 23 – Diagrama de blocos do sistema de monitoramento e aquisição de dados baseado no SDR [12].

O receptor RTL-SDR (Receptor Definido por *Software* da Realtek), nasceu do RTL usado para processar sinais de TV em DVB e reproduzir em um tela de computador. Este é somente um receptor e não pode ser usado para transmitir ou gerar um sinal. Inicialmente é preciso configurar o RTL no Simulink® para processar sinais de GPS.

A Figura 24 mostra a antena, o receptor RTL-SDR instalado em um *Notebook* e o monitoramento de um sinal via *Simulink*® do *Matlab*®.



Figura 24. A antena e o receptor RTL-SDR [12].

A Figura 25 mostra como é a interface no *Simulink*®, a Figura 26 mostra os parâmetros do RTL ao clicar duas vezes no ícone e a figura 27 mostra a configuração via console do *Matlab*®.



Figura 25. Interface do RTL no Simulink® [12].

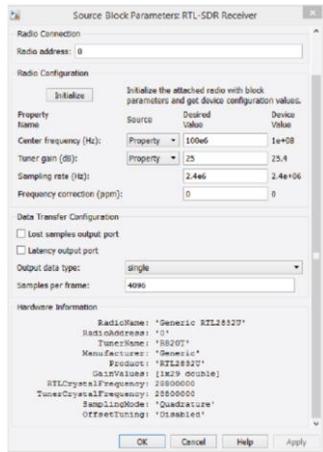


Figura 26. Janela com os parâmetros do RTL [12].

```
%% PARAMETERS
rtlsdr_id      = '0';          % RTL-SDR ID
rtlsdr_freq    = 100e6;       % RTL-SDR tuner frequency in Hz
rtlsdr_gain    = 25;          % RTL-SDR tuner gain in dB
rtlsdr_fs      = 2.4e6;       % RTL-SDR sampling rate in Hz
rtlsdr_frmLen  = 4096;       % RTL-SDR output data frame size
rtlsdr_datatype = 'single';   % RTL-SDR output data type
rtlsdr_ppm     = 0;           % RTL-SDR tuner PPM correction

%% RTL-SDR System Object
obj_rtlsdr = comm.SDRRTLReceiver(...
    rtlsdr_id,...
    'CenterFrequency', rtlsdr_freq,...
    'EnableTunerAGC', false,...
    'TunerGain', rtlsdr_gain,...
    'SampleRate', rtlsdr_fs,...
    'SamplesPerFrame', rtlsdr_frmLen,...
    'OutputDataType', rtlsdr_datatype,...
    'FrequencyCorrection', rtlsdr_ppm);
```

Figura 27. Configuração do RTL via console [12].

A Figura 28 mostra a instalação física do receptor para as primeiras configurações iniciais do receptor RTL-SDR.



Figura 28. Instalação física do RTL [Autor].

A partir da instalação mostrada na Figura 28 é realizado todo um processo, em várias etapas, para configurar o receptor RTL-SDR, para que o mesmo sintonize qualquer sinal dentro da faixa de cobertura da antena instalada. A antena usada nos primeiros testes foi uma antena para sinais digitais que opera na faixa de VHF e de UHF.

Com o receptor RTL-SDR sintonizado foi possível sintonizar um sinal na faixa de FM. A Figura 29 mostra o espectro de amplitude desse sinal. A Figura 30 mostra um exemplo do sinal GPS- L_1 discretizado na saída do receptor RTL. Esse sinal ainda não é o sinal da antena, mas sim um sinal gravado.

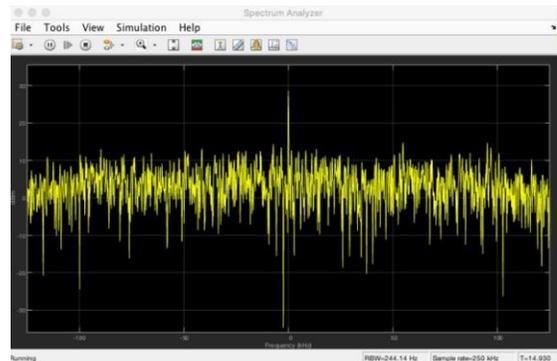


Figura 29. Sinal de sintonizado pelo receptor nos testes iniciais [Autor].

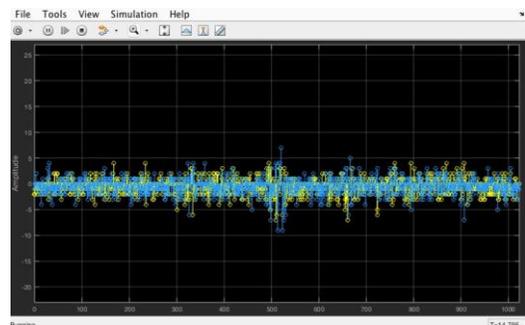


Figura 30. Sinal de sintonizado pelo receptor nos testes iniciais [Autor].

A Figura 30 mostra o resultado final de um sinal GPS- L_1 , sintonizado e reproduzido por um monitor de Cintilação via SDR [BORRE, 2007]. A expectativa de operação do receptor RTL-SDR, testado nesse trabalho será o sinal discretizado

como mostra a Figura 28, mas um sinal de dados de navegação como mostra a Figura 31.

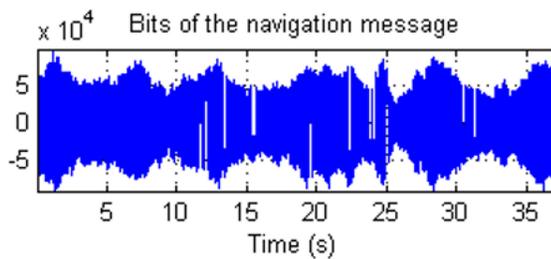


Figura 31. Exemplo de Sinal GPS que o receptor deverá mostrar [1].

VII. CONCLUSÃO

O monitoramento contínuo das cintilações ionosféricas é importante para o planejamento, operação e gerenciamento de atividades que dependem de comunicação via satélite, aplicações onde o posicionamento e navegação são fatores críticos, como é o caso da navegação aérea, agricultura de precisão e prospecção de petróleo.

As Figuras 20 e 21 mostram o comportamento do índice de cintilação medido pelo receptor *GPS Breakout*. A distribuição do índice em um gráfico de dispersão mostra um comportamento desse índice no período de 00:00 as 04:00 da manhã dos valores do índice elevado. Essa amplitude do índice S_4 pode comprometer o rastreamento do sinal GPS por parte de aeronaves, comprometendo o cálculo de sua posição e velocidade.

O monitor de cintilação ionosférica é um aparelho fundamental para esta tarefa, dedicado a aplicações de monitoramento da ionosfera e do clima espacial. O modelo Septentrio PolaRx5S representa o estado da arte no que há em equipamentos para monitoramento da ionosfera, captura dados a taxa de 100Hz, obtendo índices de cintilação e TEC com baixo ruído de medição. Entretanto, possui custo bastante elevado, chegando a US\$ 20 mil.

Foi proposto neste trabalho a aquisição, instalação, testes e sincronização do sinal do GPS por receptores de baixo custo na banda L_1 . O primeiro receptor foi instalado com sucesso e armazenados vários *Gbytes* de dados para posterior análise estatística.

A instalação, sincronização, leitura e armazenagem dos dados em modo local e enviado para centros de pesquisa via *internet*, funcionou perfeitamente. O único inconveniente do receptor *GPS Breakout Adafruit* é que o mesmo perde o sincronismo com os satélites por qualquer variação e/ou a falta de energia no local, com foi verificado várias vezes. Outro problema observado é que do ponto de vista mecânico ele é muito frágil e suscetível a apresentar problemas no seu *hardware*, motivo pelo qual ele foi instalado dentro de uma caixa de papelão, para evitar contatos físicos.

Outra proposta do trabalho é também trabalhar com Receptor Definido por *Software* (SDR – *Software Defined Radio*). Esse receptor além da grande faixa de atuação, mostrada aqui, ainda permite várias configurações em seu *Firmware* a atender qualquer estudo e pesquisa de propagação de sinais. Esse segundo receptor possui como característica principal o seu baixíssimo custo, fácil manuseio e instalação física.

No uso, operação e configurações do receptor RTL-SDR exige-se o uso do *Matlab*® e *Simulink*®, que são *softwares* proprietários. O livro citado e usado nessa pesquisa é distribuído gratuitamente, mas o *software* tem que ser adquirido, o que de certa forma dificulta o acesso a essa pesquisa, diferente do receptor *GPS Breakout* onde todos os *softwares* são de livre acesso. Porém o receptor RTL-SDR faz o processamento do sinal em tempo real, isso é uma grande vantagem desse receptor, além da sua robustez comparado com a fragilidade do receptor *GPS Breakout*.

REFERÊNCIAS

- [1] BORRE, K.; AKOS, D. M.; BERTELSEN, P.; JENSEN, S. H.; A Software-Defined GPS and Galileo Receiver. A Single-Frequency Approach. Ed. Birkhauser. 2007.
- [2] GANG, X., Optimal On-Airport Monitoring of the Integrity of GPS-Based Landing Systems. PhD. Dissertation. Stanford University. California, USA. 2004.
- [3] MARINI, L.M., OLIVEIRA, K., et all. “On the field validation of a-l fading coefficients estimator based on the autocorrelation function for ionospheric amplitude scintillation”. *Advances in Space Research*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.06.012>. Elsevier.
- [4] MORAES, A. O. “Análise do desempenho de um receptor GPS em canais de cintilação ionosférica”. Tese de Mestrado. ITA. São José dos Campos-SP. 2009.
- [5] MORAES, A. O., et all. “The variability of low-latitude ionospheric amplitude and phase scintillation detected by a triple-frequency GPS receiver”. *Research Article*. <https://doi.org/10.1002/2016RS006165>. *Radio Science*. 2017.
- [6] OLIVEIRA, K.; MORAES, A.O.; PERRELA, W. J. “Variação da Cintilação Ionosférica em Baixas Latitudes no Sistema GNSS”. Ed. Novas Edições Acadêmicas. 2017. ISBN: 978-3-330-75662-5.
- [7] PETROPOULOS, G. P.; PRASHANT, K. S. “GPS and GNSS Technology in Geoscience”. Ed Elsevier, 2021. ISBN: 978-0-12-818617-6. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04209-8>.

- [8] [PROFESSOR.PUC.GOIAS-2021].
Professor.pucgoias.edu.br. Acessado em 20/05/2021.
Slides de apresentação do professor Ernesto Camelo de Castro do curso de Cartografia e Geoprocessamento da PUC-GOIAS.
- [9] <https://www.slideplayer.com.br/> acessado em 20/05/2021.
- [10] TSUI, Y; BAO, J. “Fundamentals of global positioning system receivers – A software approach”. John-Wiley. 2000.
- [11] VANI, B. C., et all. “Monitoring ionospheric scintillation with GNSS in South America: scope, results and challenges”. Disponível em: GPS and GNSS Technology in Geosciences. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818617-6.00012-3>. 2021 Elsevier Inc. 2021, Páginas 255-280.
- [12] STEWART, B; BARLEE, K; ATKINSON, D; CROCKETT, L. “Software Defined Radio Using Matlab & Simulink and the RTL-SDR”. Strathclyde Academic Media. 1ª Ed. 2015. 674 pg.