

# **IMPLEMENTAÇÃO DAS FUNÇÕES BÁSICAS DO GEOLOCAL: UM SISTEMA DE NAVEGAÇÃO BRASILEIRO INDEPENDENTE DE GNSS**

## **Pesquisador Líder**

Sergio Vicente Denser Pamboukian (Docente PPGCAGE/UPM)

## **Pesquisadores Principais**

Cristiano Akamine (Docente PPGEEC/UPM)  
Edson Tafeli Carneiro dos Santos (Docente EE/UPM)  
Eduardo Fluhmann Filho (Graduando Engenharia elétrica UPM)  
Eduardo Perez Macho (Doutorando PPGCAGE/UPM)  
Emília Correia (Pesquisadora INPE)  
Francisco Alberto Gori Fuller (Mestrando PPGCAGE/UPM)  
Jean Pierre Raulin (Docente PPGCAGE/UPM)  
Letícia Gatti Friolani (Graduanda Engenharia Civil UPM)  
Magda Aparecida Salgueiro Duro (Docente EE/UPM)  
Pedro Levit Kaufmann (Docente ICT/UNIFESP)  
Rodolpho Vilhena de Moraes (Docente ICT/UNIFESP)

## **Pesquisadores Colaboradores**

Adriana Benetti Marques Valio (Docente PPGCAGE/UPM)  
Amauri Shossei Kudaka (Engenheiro Pleno CRAAM)  
Carlos Augusto Morales Rodriguez (Pesquisador IAG/USP)  
Carlos Guillermo Gimenez de Castro (Docente PPGCAGE/UPM)  
Guilherme Júlio Alaia (Pesquisador CRAAM)  
Joaquim Eduardo Rezende Costa (Pesquisador EMBRACE/INPE)  
Marcelo Bender Perotoni (Pesquisador UFABC)  
Marcos Stefanelli Vieira (Docente EE/UPM)

SETEMBRO, 2020

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Fundo Mackenzie de Pesquisa, em nome do presidente Dr. Milton Flávio Moura, do gerente executivo Salim Augusto Amed Ali e dos funcionários, Edivaldo Ferreira Cavalcante, Geisa Carina Silva Coelho e Milena Martins Felix, pelo apoio financeiro e administrativo prestados para a realização desta pesquisa.

À Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, em nome do seu antigo diretor Prof. Dr. Sérgio Lex e do seu atual diretor Prof. Dr. Marcos Massi, pelo acolhimento institucional desta pesquisa e respaldo científico e administrativo.

## RESUMO

O Geolocal, proposto pelo Prof. Dr. Pierre Kaufmann há mais de 20 anos, se coloca como um sistema de geoposicionamento alternativo, podendo operar tanto em conjunto quanto independentemente dos demais sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite System*), funcionando como um *backup* destes, substituindo-os na sua ausência ou quando a região não tiver sinal. Até o momento, os estudos do Geolocal foram apenas teóricos gerando 3 patentes (1997, 2003 e 2012) já reconhecidas em diversos países, 1 registro de software (2012), artigos, simulações, dissertações de mestrado, iniciações científicas e outros trabalhos de pesquisa que comprovam a viabilidade do sistema. Porém, o desenvolvimento prático do Geolocal envolve construir e operar uma estrutura de hardware e software capaz de implementar as funcionalidades propostas. O objetivo deste projeto é subsidiar as fases seguintes com informações necessárias para uma pesquisa aplicada e indicar os preparativos necessários para a realização do primeiro experimento em campo e prova de conceito. Os estudos aqui realizados envolveram: estudar a topologia do sistema (quantidade de bases e repetidoras, tipo de repetidoras, área de cobertura, espaçamento entre bases, geometria do sistema, PDOP etc.); verificar os possíveis lugares para os primeiros testes do Geolocal; analisar as especificações e premissas do Geolocal e propor nova configuração; analisar modelos que estimam os atrasos no meio de propagação; analisar os atrasos (*delays*) em hardware, software e propagação do sinal; estimar a acurácia do sistema em diversas configurações; criar protótipos das estações e realizar testes. Os resultados obtidos se mostraram importantes para orientar as próximas fases do desenvolvimento do projeto em diversas áreas como sincronismo de tempo, determinação de atrasos e medição de distâncias. Uma primeira versão do protótipo foi implementada utilizando a tecnologia SDR (*Software Defined Radio*).

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                                       | <b>9</b>  |
| 1.1 JUSTIFICATIVA.....   | 10        |
| 1.2 PESQUISADORES E INFRAESTRUTURA .....                       | 12        |
| <b>2 SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO.....</b>                            | <b>14</b> |
| 2.1 SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE .....                   | 14        |
| 2.1.1 Origem da Navegação via Satélite.....                    | 14        |
| 2.1.2 Sistemas Globais por Satélites .....                     | 16        |
| 2.1.3 Sistemas Locais por Satélites.....                       | 19        |
| 2.1.4 Sistemas Alternativos de Navegação .....                 | 21        |
| 2.2 O SISTEMA GEOLOCAL.....                                    | 23        |
| 2.2.1 Sistema, processo e algoritmo do Geolocal .....          | 27        |
| 2.2.2 Cálculo da posição da repetidora.....                    | 33        |
| 2.2.3 Primeiras simulações.....                                | 39        |
| <b>3 OBJETIVOS .....</b>                                       | <b>42</b> |
| <b>4 ESTUDO DA TOPOLOGIA DO SISTEMA GEOLOCAL.....</b>          | <b>44</b> |
| 4.1 PLATAFORMAS PARA TRANSPORTE DA REPETIDORA.....             | 44        |
| 4.2 PDOP (POSITION DILUTION OF PRECISION) .....                | 49        |
| 4.3 DISTRIBUIÇÃO DE BASES E RAIOS DE COBERTURA.....            | 52        |
| 4.3.1 Espaçamento entre bases com repetidora fixa .....        | 52        |
| 4.3.2 Espaçamento entre bases com repetidora em movimento..... | 54        |
| 4.4 ANÁLISE GRÁFICA DO PDOP.....                               | 58        |
| 4.4.1 O algoritmo .....  | 59        |
| 4.4.2 Simulação com 4 bases.....                               | 61        |
| 4.4.3 Simulação com 5 bases.....                               | 63        |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.4.4 Analisando as simulações .....                                 | 66        |
| <b>4.5 POSSÍVEIS LOCAIS DE TESTE PARA O PROTÓTIPO DO GEOLOCAL...</b> | <b>66</b> |
| 4.5.1 Campus da UPM em Higienópolis .....                            | 67        |
| 4.5.2 Campus da UPM em Alphaville .....                              | 68        |
| 4.5.3 Radio Observatório Pierre Kaufmann (ROPK) em Atibaia .....     | 71        |
| 4.5.4 Sítio Cabuçu .....   | 72        |
| 4.5.5 Colônia de férias de Campos do Jordão .....                    | 73        |
| <b>5 ACURÁCIA DO SISTEMA GEOLOCAL .....</b>                          | <b>74</b> |
| 5.1 MODELOS DE PROPAGAÇÃO .....                                      | 74        |
| 5.2 ANÁLISE DO ERRO DE POSICIONAMENTO DA REPETIDORA .....            | 79        |
| 5.2.1 Condições de simulação .....                                   | 84        |
| 5.2.2 Análise dos erros de posicionamento .....                      | 85        |
| 5.2.3 Análise do PDOP .....  | 91        |
| 5.2.4 Considerações gerais sobre as simulações .....                 | 93        |
| <b>6 AS ESPECIFICAÇÕES DO GEOLOCAL .....</b>                         | <b>95</b> |
| 6.1 RESUMO DAS PREMISSAS .....                                       | 95        |
| 6.1.1 Colocar os satélites de GNSS em solo .....                     | 95        |
| 6.1.2 Repetidoras .....  | 95        |
| 6.1.3 O alvo .....   | 96        |
| 6.1.4 O sincronismo de tempo .....                                   | 96        |
| 6.1.5 A comunicação entre bases e alvo .....                         | 96        |
| 6.1.6 Premissas em aberto .....                                      | 96        |
| 6.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS PREMISSAS .....                           | 97        |
| 6.2.1 Comunicação das bases e alvo com a base central .....          | 98        |
| 6.2.2 Sincronização de relógios .....                                | 99        |
| 6.2.3 Atrasos de sinal por hardware, software e propagação .....     | 99        |
| 6.2.4 Precisões almejadas .....                                      | 99        |

|   |            |
|---|------------|
| 6.2.5 As limitações para o suporte dos <i>transponders</i> .....  | 100        |
| <b>7 FREQUÊNCIAS, ANTENAS E RÁDIOS.....</b>   | <b>101</b> |
| 7.1 FREQUÊNCIAS UTILIZADAS .....  | 101        |
| 7.2 ANTENAS.....  | 105        |
| 7.2.1 Teoria das Antenas Independentes da Frequência.....   | 105        |
| 7.2.2 Especificações.....   | 113        |
| 7.2.3 Detalhamento das etapas de construção do protótipo para as frequências de 430 MHz e 2000 MHz..... | 114        |
| 7.2.4 Antena monopolo quarto de onda para a frequência de 430 MHz ....                                  | 124        |
| 7.3 RÁDIOS E SDR .....  | 127        |
| 7.3.1 RTL-SDR.....  | 130        |
| 7.3.2 USRP .....  | 131        |
| 7.3.3 GNURadio .....  | 133        |
| 7.3.4 Linux.....  | 133        |
| 7.3.5 Raspberry Pi.....   | 134        |
| <b>8 NOVA PROPOSTA PARA O GEOLOCAL .....</b>  | <b>136</b> |
| 8.1 COMUNICAÇÃO AUTOSSUFICIENTE .....   | 136        |
| 8.2 OPÇÕES PARA AS REPETIDORAS.....   | 137        |
| 8.2.1 Torres .....  | 137        |
| 8.2.2 Drones.....   | 138        |
| 8.2.3 Balão cativo .....  | 138        |
| 8.2.4 Balão meteorológico .....   | 138        |
| 8.2.5 Balão estratosférico .....  | 139        |
| 8.2.6 <i>Cubesats</i> .....   | 139        |
| 8.2.7 Satélites em órbita alta .....  | 139        |
| 8.3 DETERMINANDO OS ATRASOS NO SISTEMA .....  | 139        |
| 8.3.1 Algoritmos para medição do tempo total de propagação .....  | 140        |

|  |            |
|--|------------|
| 8.3.2 Análise dos atrasos .....  | 143        |
| 8.4 REFERÊNCIAS DE TEMPO E SINCRONISMO DE RELÓGIOS .....   | 145        |
| 8.4.1 Referências de tempo.....  | 145        |
| 8.4.2 Sincronismo de relógios.....   | 147        |
| 8.5 PROPOSTA PARA OS PROTÓTIPOS .....  | 148        |
| 8.5.1 Hardware .....   | 148        |
| 8.5.2 Software .....   | 150        |
| 8.6 O STARTUP DAS ESTAÇÕES.....  | 151        |
| 8.7 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO .....   | 152        |
| 8.7.1 Verba e equipamentos.....  | 152        |
| 8.7.2 Laboratório .....  | 154        |
| 8.7.3 Configuração e testes de conectividade do notebook e dos Raspberry Pi<br>.....                       | 156        |
| 8.7.4 Gabinete em CAD.....   | 157        |
| 8.7.5 Montagem final do protótipo .....  | 157        |
| <b>9 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>  | <b>162</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>166</b> |
| <b>APÊNDICE A – FASES DO PROJETO GEOLOCAL .....</b>  | <b>174</b> |
| FASE 1 – PESQUISA APLICADA.....  | 174        |
| FASE 2 – FINALIZAÇÃO DO PROTÓTIPO .....  | 174        |
| FASE 3 - EXPERIMENTOS EM CAMPO.....  | 174        |
| FASE 4 - NAVEGAÇÃO DA PLATAFORMA DA REPETIDORA.....  | 175        |
| FASE 5 - GEOLOCALIZAÇÃO DE ALVOS EM SOLO.....  | 176        |
| <b>APÊNDICE B – ALGORITMO PARA DETERMINAR ESPAÇAMENTO DE BASES<br/>COM REPETIDORA EM POSIÇÃO FIXA.....</b> | <b>177</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>APÊNDICE C – ALGORITMO PARA DETERMINAR ESPAÇAMENTO DE BASES<br/>COM REPETIDORA EM POSIÇÃO VARIÁVEL.....</b> | <b>184</b> |
| <b>APÊNDICE D – ALGORITMO PARA ANÁLISE VISUAL DO PDOP.....</b>   | <b>192</b> |
| <b>APÊNDICE E – CONFIGURAÇÃO E TESTES INICIAIS DO PROTÓTIPO .....</b>  | <b>199</b> |
| <b>APÊNDICE F – PREPARO DOS NOTEBOOKS DAS ESTAÇÕES.....</b>  | <b>210</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, diversos sistemas críticos e essenciais como defesa, finanças e telecomunicações dependem de geoposicionamento de alvos e sincronismo de relógios. Na grande maioria das vezes, tais serviços são fornecidos por sistemas globais de navegação por satélite (GNSS - *Global Navigation Satellite System*). O sistema de navegação mais conhecido é o GPS (*Global Positioning System*) desenvolvido pelos Estados Unidos da América. Outros países também possuem seus próprios sistemas de navegação: o russo GLONASS (*Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), o europeu Galileo, o chinês BeiDou, antes conhecido como Compass, o japonês QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) e o indiano NAVIC (*Navigation Indian Constellation*), entre outros.

O primeiro sistema (GPS) foi desenvolvido com objetivos militares e sua operação contínua e gratuita não é garantida. Isto motivou alguns países a desenvolverem seus próprios sistemas de navegação, para minimizar a dependência do GPS.

Esta preocupação também está presente no Brasil e, mais especificamente, na Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, cujos pesquisadores têm trabalhado desde 1997 no estudo de um sistema de navegação brasileiro independente de GNSS, composto por estações em terra e repetidoras no espaço, que permite, através do uso de radiofrequências, encontrar a posição de um dado alvo por trilateração<sup>1</sup>. Também permite a sincronização de bases de tempo entre estações, repetidoras e alvos dentro de sua área de atuação. Este sistema é o Geolocal.

Embora guarde uma similaridade com os GNSS no tocante às suas funcionalidades, este sistema é inédito em seu conceito fundamental por não necessitar exclusivamente de satélites para seu funcionamento e por manter suas estações principais em posições fixas no solo. Com isso ganha-se no custo de manutenção e na precisão do posicionamento.

---

<sup>1</sup> A trilateração permite determinar a posição de um objeto através da distância deste até 3 pontos de referência (satélites, por exemplo). Se mais de 3 pontos de referência forem utilizados, pode-se usar o termo multilateração.

A proposta inicial partiu do Prof. Dr. Pierre Kaufmann. O sistema possui 3 patentes (KAUFMANN, 1997; KAUFMANN, 2003; KAUFMANN; KAUFMANN, 2012a) já reconhecidas em diversos países e um registro de software (PAMBOUKIAN, 2012).

O principal objetivo do Geolocal é ser usado como *backup* para sistemas GNSS em aplicações críticas ou em locais onde esses sistemas não estão disponíveis. Este sistema possui diversas aplicações estratégicas e econômicas:

- navegação da plataforma que possui a repetidora embarcada;
- geoposicionamento de alvos remotos em solo ou no ar;
- sincronismo remoto de relógios para telecomunicações, processamento de dados e aplicações científicas.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Atualmente os sistemas de geoposicionamento por satélite (GNSS) são utilizados para resolver duas questões relevantes: o posicionamento geográfico-espacial (navegação, topografia, pesquisas geológicas) e o sincronismo da base de tempo universal (telecomunicações, aplicações científicas, processamento de dados).

Entretanto, estes sistemas pertencem a outras nações que podem, ao menos em tese, alterar a política de disponibilidade do sinal a qualquer tempo. Isso chega a comprometer a soberania de um país, especialmente em aplicações críticas como navegação, defesa e telecomunicações.

O Geolocal se coloca como um sistema de geoposicionamento alternativo e pode operar tanto em conjunto quanto independentemente dos demais sistemas GNSS, funcionando como um *backup* destes, substituindo-os na sua ausência ou quando a região não tiver sinal. Levando em conta sua escalabilidade, o Geolocal pode ser instalado, por exemplo, em uma grande fazenda e assim controlar implementos agrícolas e realizar sensoriamento remoto por drones.

Dependo do tipo de repetidora e de sua altitude, o sistema Geolocal pode inclusive utilizar-se da propagação sub-ionosférica e, assim, não depender dos modelos da alta atmosfera terrestre e da ionosfera que são sujeitos a desvios causados pela atividade solar, como é o caso de sistemas como o GPS que utiliza uma propagação trans-ionosférica. Desta forma, a acurácia do Geolocal poderia ser superior à dos sistemas GNSS existentes.

Muitos setores da atividade econômica devem mostrar interesse pelo Geolocal, em particular os setores que utilizam os serviços de posicionamento de precisão e GNSS, ou comunicação por satélite:

- Setor das Finanças que precisa hoje em dia registrar transações com altíssima resolução temporal de um milionésimo de segundo;
- Setor Agrícola na busca por agricultura extensiva e de precisão;
- Aplicações militares;
- Telecomunicações, que precisam de repetidoras de sinal sincronizadas;
- Setor Automotivo que em um futuro próximo utilizará transporte individual e coletivo autônomos e sem motorista;
- Exploração energética e plataformas objetivando perfurações de precisão;
- Setor Marítimo, para navegação precisa durante a entrada de uma embarcação a um porto;
- Setor Aeronáutico, na busca das melhores rotas comerciais otimizando a capacidade do espaço aéreo;
- Setor Aeroespacial no controle de órbitas de satélites;
- Distribuição de Energia, linhas de transmissão que precisam de instalações com o tempo sincronizado.

A continuidade do desenvolvimento do sistema Geolocal necessita de diversos estudos, tanto teóricos quanto práticos. O projeto não teve, até agora, a necessidade de fomento por trabalhar exclusivamente com modelagem matemática e simulações computacionais. Porém, para este trabalho, um aporte de capital se fez necessário para o custeio de diversas despesas como equipamento de laboratório para elaboração de protótipos e bolsas para alunos de graduação e pós-graduação.

Desde 2011, este assunto tem sido alvo de pesquisas do grupo “Geotecnologias”, cadastrado no diretório de pesquisa do CNPq e certificado pela Universidade Presbiteriana Mackenzie, na linha de pesquisa “Sistemas de Posicionamento Geográfico”. O acesso a este grupo pode ser feito pelo *link* <http://dgp.cnpq.br/dgp/espelhogrupo/3436700306426550>.

## 1.2 PESQUISADORES E INFRAESTRUTURA

Dadas as suas características e tecnologias envolvidas, o Geolocal é um projeto multidisciplinar que promove a integração de pesquisadores de diversas instituições de ensino e pesquisa:

- Pedro Levit Kaufmann do ICT/UNIFESP (Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de São Paulo);
- Rodolpho Vilhena de Moraes do ICT/UNIFESP (Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de São Paulo);
- Emília Correia do MCT/INPE (Ministério da Ciência e Tecnologia / Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais);
- Joaquim Eduardo Rezende Costa do EMBRACE/INPE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial / Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais);
- Marcelo Bender Perotoni da UFABC (Universidade Federal do ABC);
- Carlos Augusto Morales Rodriguez do IAG/USP (Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo);
- além de diversos setores da Universidade Presbiteriana Mackenzie: CRAAM (Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie), PPGCAGE (Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais), LABGEO (Laboratório de Geotecnologias) e TV Digital.

Além das instalações existentes no Laboratório de TV Digital e nos Laboratórios de Eletrônica da UPM, foi possível montar um pequeno laboratório experimental (Figura 1) para o desenvolvimento de protótipo com o auxílio do Fundo Mackenzie de Pesquisa (MackPesquisa).

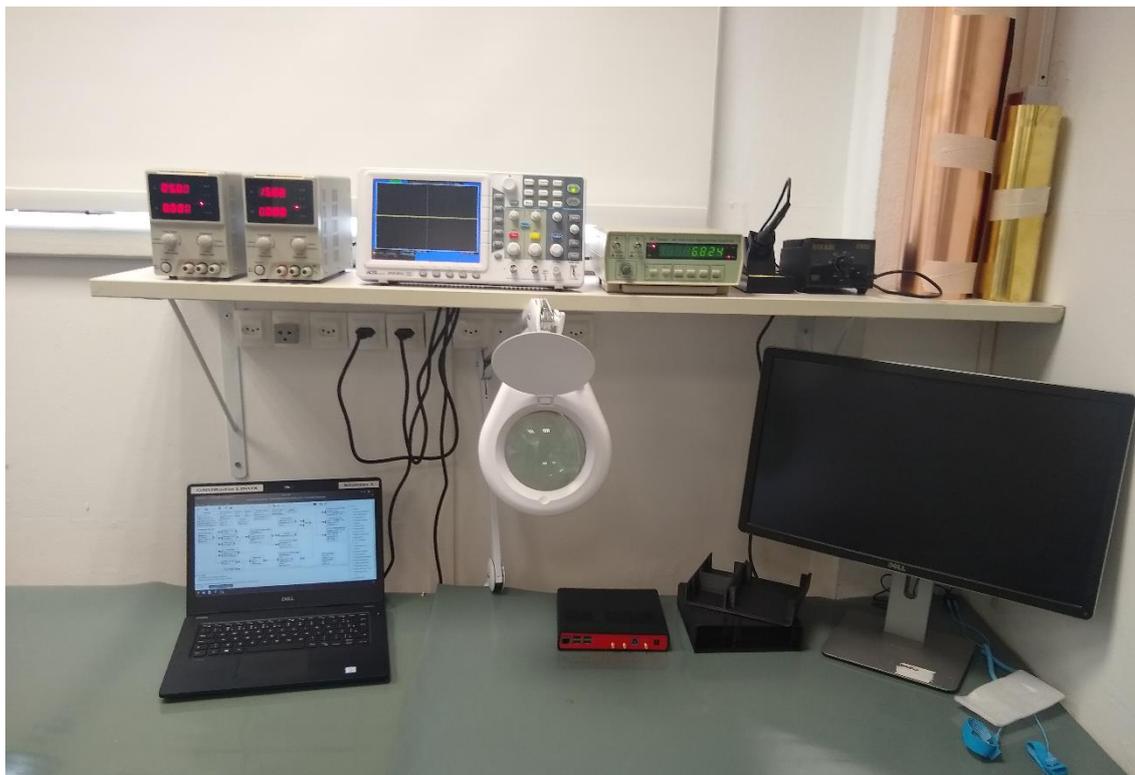


Figura 1 – Parte do laboratório experimental financiado pelo MackPesquisa (Autoria própria).

## **2 SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO**

Este capítulo descreve os principais sistemas de localização existentes, incluindo os sistemas de navegação por satélite (GNSS) e os sistemas que não usam satélites, como o Geolocal. Parte do texto a seguir foi extraída e adaptada da dissertação de mestrado de um dos pesquisadores deste projeto (MACHO, 2018).

### **2.1 SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE**

A necessidade de orientação, ou seja, de situar uma pessoa ou objeto na superfície da Terra e de determinar o sentido e a velocidade do movimento, fica cada vez mais evidente na civilização moderna - rural ou urbana – seja para localizar uma cidade, determinar a posição e a fronteira de extensas áreas agrícolas, aprimorar a agricultura de precisão (através da automação de máquinas de aragem, plantação e colheita), traçar uma rota marítima entre 2 portos, ou saber a posição atual de uma aeronave. Esta necessidade está sendo suprida com os sistemas de navegação desenvolvidos a partir do final do século passado.

#### **2.1.1 Origem da Navegação via Satélite**

Após a Segunda Guerra Mundial, 2 potências vencedoras, os Estados Unidos da América (EUA) e a extinta União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), emergiram como 2 grandes polos de interesses bastante distintos um do outro, o primeiro defendendo uma sociedade democrática e uma economia liberal e capitalista, e o segundo defendendo o socialismo como forma de organização social. Isso estimulou um conflito entre as 2 nações, que, como nunca chegou a irromper em guerra direta e aberta, ficou conhecido como Guerra Fria. Este conflito político e ideológico, também refletiu na área tecnológica, e serviu para estimular a competição entre eles, que foi acentuada após o lançamento do primeiro satélite artificial da Terra, pela URSS, no dia 4 de outubro de 1957 - Ano Internacional da Geofísica – o satélite Sputnik1. O lançamento do Sputnik1 marcou o início da corrida espacial entre as 2 potências da época, culminando com a chegada do homem à Lua em 1969.

Sinais de 20MHz, propositalmente emitidos pelo Sputnik1 durante sua órbita na Terra, como forma de propaganda do feito soviético, tinha uma largura de banda de 1KHz suficiente para incluir o desvio Doppler durante sua passagem em um determinado local da Terra: quando o satélite se aproximava de um observador com

uma antena receptora, a frequência aumentava, e quando o satélite se afastava, a frequência diminuía. Isto possibilitou aos pesquisadores do Laboratório de Física Aplicada (APL – *Applied Physics Laboratory*) Johns Hopkins que captassem e gravassem os sinais, identificando o instante exato em que o satélite aparecia no horizonte, o instante em que o satélite desaparecia no horizonte oposto, e o instante em que o desvio doppler alternava de aproximação para afastamento. Com a diferença de tempo entre horizontes e com o desvio Doppler, foi possível identificar o momento em que a distância entre o satélite e o receptor era mínima, e determinar a órbita completa do satélite. Eles concluíram que seria possível inverter a solução, ou seja, determinar a posição de uma estação receptora, assumindo que a órbita de um satélite fosse conhecida (GUIER; WEIFFENBACH, 1998, p. 15-16).

Naquela época, a Marinha Americana estava buscando soluções para determinar a posição de submarinos durante o lançamento de mísseis e patrocinou o desenvolvimento do sistema Transit pela APL (*Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory*), cujo primeiro satélite lançado com sucesso foi em 1960. Em 1963, o sistema estava completo com 6 satélites em órbita circular quase polar e altitude de 1100 km, e tinha como objetivo além de determinar a posição de submarinos, outras embarcações da Marinha Americana e aeronaves militares (HOFMANN-WELLENHOF et al, 1997, p. 3).

A quantidade de satélites do sistema Transit era insuficiente para proporcionar uma navegação com uma acurácia adequada, já que era preciso esperar 90 minutos para um satélite passar por uma determinada região, obrigando o usuário a fazer interpolações entre os trânsitos. O GPS, também concebido para uso militar, foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos EUA para substituir o Transit. Enquanto o Transit utilizava o desvio Doppler para determinar a posição de um receptor em Terra, o GPS utiliza o método de trilateração, a partir de pelo menos 4 satélites em órbita, medindo o tempo de percurso do sinal entre cada satélite e o receptor para calcular a pseudo-distância de cada satélite, e conseqüentemente, estimar a posição do receptor. O GPS também faz uso do desvio Doppler para determinar a velocidade de um objeto em movimento na Terra (WAKKER et al, 1986, p. 195).

O Transit permaneceu em funcionamento até 1996, e o GPS, em operação plena desde 1995, funciona até hoje e seu sistema é o mais utilizado no mundo –

inclusive no Brasil. O projeto orbital do GPS foi desenhado de tal maneira que sempre existam, pelo menos, 4 satélites eletronicamente visíveis pelo equipamento de um usuário em qualquer lugar da Terra. O número mínimo para a constelação de satélites para que isso seja possível, considerando uma inclinação orbital de 55 graus com o plano do equador e um período orbital de 12 horas, é de 21, desde que estejam igualmente espaçados (HOFMANN-WELLENHOF et al, 1997, p. 3-4).

O sistema GNSS russo GLONASS está totalmente operante e possui cobertura global desde 2011. O sistema europeu Galileo está em operação parcial e uma segunda geração está prevista para 2025, aumentando o sistema existente. O sistema chinês BeiDou está na sua segunda geração de satélites (BeiDou-2), com a terceira geração (BeiDou-3) já em órbita e em testes. Destes 4 sistemas, o Galileo é o único com origem não militar.

O sistema japonês QZSS e o indiano NAVIC possuem abrangência local, onde os satélites são posicionados de maneira que fiquem sempre visíveis pelos usuários desses países.

Além desses sistemas, existem projetos em andamento de sistemas que não utilizam satélites, como: sistema de Posicionamento Quântico (*Quantum Positioning*) baseado em acelerômetros quânticos, em desenvolvimento pelo Laboratório de Ciência e Tecnologia de Defesa do Reino Unido; sistema de navegação com *beacons*, que utiliza objetos sinalizadores conspícuos – objetos que se destacam entre outros em um determinado percurso – enviando sinais de alta potência para orientar a navegação; Sistema de Sinais Oportunos (SoOP – *Signals of Opportunity*) que aproveita sinais de satélites que seriam destinados a comunicação, para a navegação; sistema de Navegação Assistida por Visão (*Vision Aiding*), que utiliza a percepção de movimento de sensores de câmeras para computar a distância e a direção percorrida (FISCHER; RAQUET, 2011, p. 27-29).

### **2.1.2 Sistemas Globais por Satélites**

Os sistemas GPS e GLONASS operam tanto para uso militar como civil, permitem obter a localização e navegação dos usuários, sob quaisquer condições meteorológicas. Como auxiliam um número ilimitado de usuários, e, além disso, são usados em operações críticas de segurança, esses sistemas são unidirecionais, ou

seja, os usuários apenas recebem os sinais provenientes de satélites, sem transmitir nada a eles.

Os satélites GPS, mostrados na Figura 2, e GLONASS estão localizados na órbita terrestre média (MEO – *Medium Earth Orbit*), ou seja, em altitude acima de 2000 km e abaixo de 36000 km, sendo os satélites GPS localizados à 20200 km, e os satélites GLONASS à 19100 km da superfície da Terra. Estes satélites possuem excentricidades inferiores a 0,02, o que significa que suas órbitas são praticamente circulares, sendo que cada satélite GPS possui um período orbital de 11 horas e 58 minutos, e cada GLONASS, 11 horas e 15 minutos. Ambos os sistemas possuem 24 satélites, com a diferença de que o GPS se divide em 6 planos orbitais, com 4 satélites cada, e inclinação de 55 graus com o Equador, e o GLONASS se divide em 3 planos orbitais, com oito satélites cada, e 65 graus de inclinação. Com isso, o GPS é capaz de fornecer melhor acurácia em latitudes baixas e médias, e o GLONASS, em latitudes altas (EL-RABBANY, 2002, p. 1-6; DALY, 1996, p.159-161).

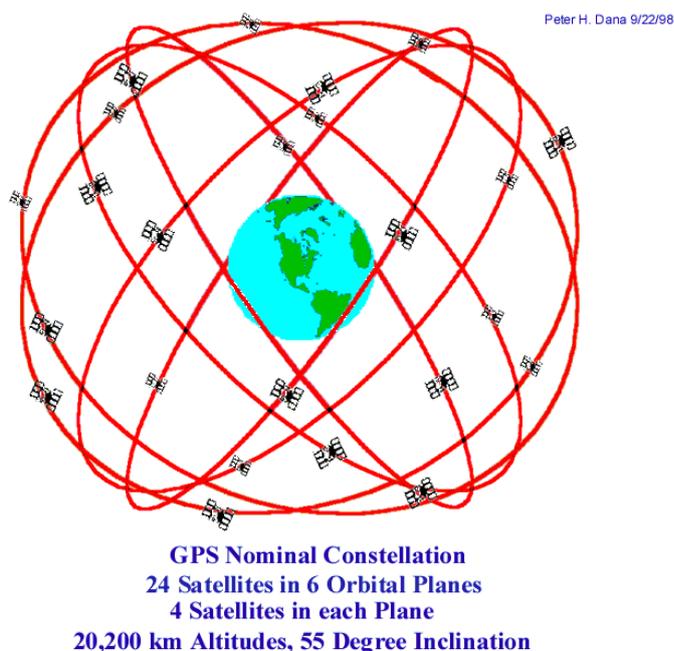


Figura 2 – Constelação GPS com 24 satélites divididos em 6 planos orbitais a 20200 km de altitude e 55° de inclinação (DANA, 1998).

Em uma operação crítica, como, por exemplo, em uma aproximação de um navio petroleiro à uma plataforma, os sistemas GPS e GLONASS podem ser combinados, resultando em um aumento do número de satélites visíveis e uma

geometria mais favorável, e, conseqüentemente, as estimativas de posição obtidas são mais precisas e exatas, e a disponibilidade é aumentada. Esta combinação não só melhora muitas aplicações, especialmente em condições de pouca visibilidade, mas também estas podem tirar partido das diferentes características de cada sistema (VALLEJO et al, 2014, p. 1).

A precisão do sistema é dimensionada por um fator de correção conhecido como Diluição de Precisão (DOP – *Dilution of Precision*), cujo valor indica a precisão das coordenadas geradas a partir da geometria dos satélites visíveis em um determinado instante. Quanto menor o valor de DOP, melhor a precisão, e valores próximos a 1,0 significam que os satélites não estão alinhados uns aos outros, mas bem espalhados, formando uma geometria favorável a fornecer um posicionamento bem preciso. A combinação de sistemas favorece a um valor de DOP menor, e a Figura 3 mostra um dos softwares utilizados em embarcações de apoio a plataformas, o Orion, da Veripos, que contém uma tela onde aparecem as posições dos satélites visíveis por uma embarcação, em um determinado instante (VERIPOS, 2018).

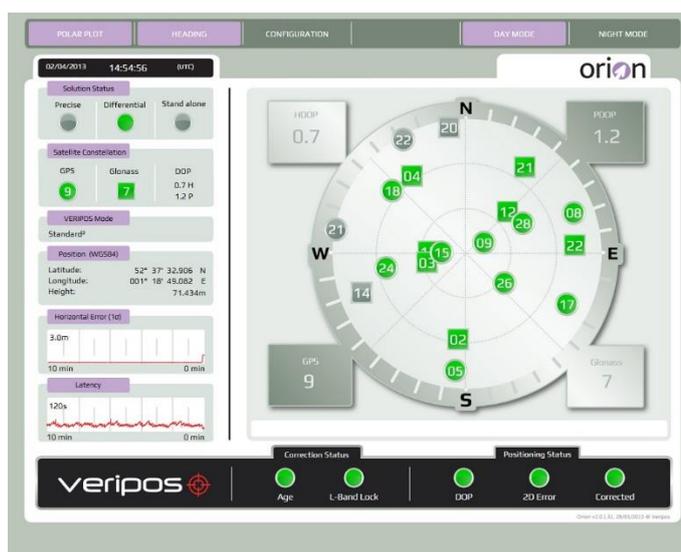


Figura 3 – Tela de um software de posicionamento dinâmico de embarcações, mostrando as posições exatas dos satélites GPS e GLONASS visíveis em um determinado instante e os valores de HDOP e PDOP (VERIPOS, 2018).

No exemplo da Figura 3, aparecem 9 satélites GPS (em forma de círculos) e 7 GLONASS (em forma de quadrados). A sigla HDOP indica a precisão horizontal (*Horizontal DOP*) e a sigla PDOP (*Position DOP*) é a combinação entre a precisão horizontal e vertical (*VDOP - Vertical DOP*). Neste caso, o valor de HDOP é 0,7 e o de PDOP é 1,2, ou seja, os satélites estão bem espalhados, como mostra a Figura 2,

gerando valores de latitude e longitude precisos (precisão horizontal), bem como de altitude (precisão vertical), que para o caso de navios, é útil para verificar as condições de marés.

Os outros dois sistemas que também adotaram o GNSS, o Galileo, fundado em uma parceria entre a União Europeia e a Estação Espacial Europeia, e o BeiDou, pela China, visam uma independência dos sistemas americano e russo. O Galileo possui 22 satélites em operação na altitude média de 23200 km, e o BeiDou-3 possui 35 satélites já lançados: MEO, geoestacionários (na linha do equador, orbitando à 36000 km, onde os satélites possuem a mesma velocidade de rotação da Terra, ficando relativamente estáticos a um observador na superfície do planeta) e geossíncronos (órbita de 36000 km, porém não paralelo à linha do equador) com inclinação de 55° (XINGXING, 2015).

### **2.1.3 Sistemas Locais por Satélites**

Os sistemas locais que utilizam satélites são o sistema japonês, QZSS, o indiano, NAVIC, e, de forma parcial, o chinês BeiDou-3.

O sistema QZSS, mostrado na Figura 4, foi constituído através de uma parceria público-privada entre a Agência espacial japonesa JAXA e a empresa Mitsubishi Electric. Este sistema utiliza 3 satélites em órbitas elípticas e geossíncronas, espaçadas a 120°, com inclinação de  $43^\circ \pm 4^\circ$  e excentricidade de  $0,075 \pm 0,015$ , cujo resultado é uma projeção no solo formando uma figura em forma de “número 8” na longitude próxima à cidade de Tóquio. Como a órbita é elíptica, a figura de número 8 projetada é assimétrica, e cada satélite permanece sobre o Japão por 8 horas, e como é geossíncrona, a elevação é alta, aumentando a efetividade em regiões de grande concentração de construções elevadas (HAMA et al, 2010, p. 3).

O NAVIC, mostrado na Figura 5, é um sistema de 7 satélites, 3 geoestacionários, e 4 geossíncronos (com 29° de inclinação), envolvendo a Índia e seus entornos até 1500 km além das fronteiras. Existem, atualmente, planos de se aumentar a área de cobertura, elevando o número de satélites para 11 (ISRO, 2018).

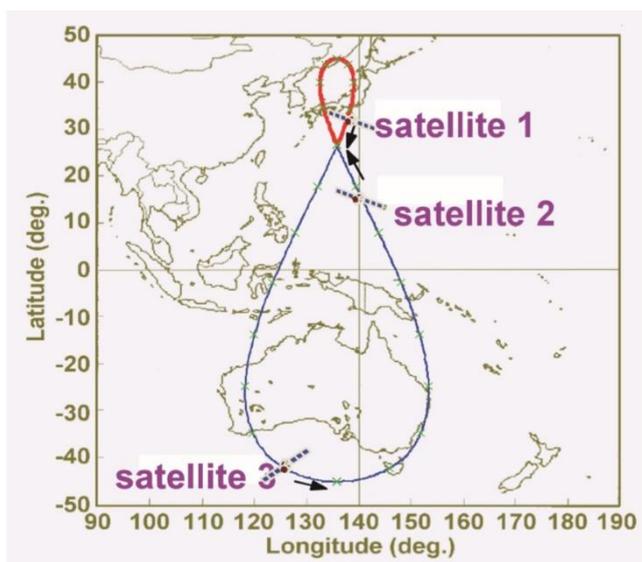


Figura 4 – Sistema japonês QZSS com os 3 satélites em órbitas geossíncronas projetando um número 8 na superfície (HAMA et al, 2010, p. 3; animação: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/ba/Qzss-01-120s2.gif>).



Figura 5 – Sistema indiano NAVIC, com as projeções dos 3 satélites geostacionários e 4 geossíncronos (ISRO, 2018).

E o sistema chinês BeiDou-3, mostrado na Figura 6, utiliza satélites geostacionários (pontos vermelhos), geossíncronos (cujas órbitas estão representadas por linhas azuis) sobre o continente asiático, priorizando a cobertura local, e MEO (cujas órbitas estão representadas por linhas verdes) (XINGXING, 2015).

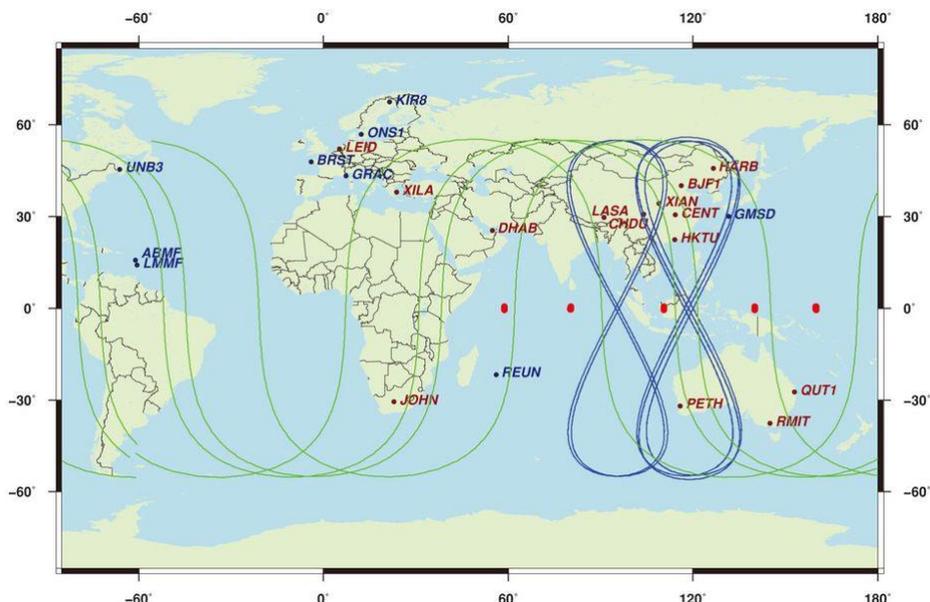


Figura 6 – Sistema chinês BeiDou3, com as projeções dos satélites geostacionários, em vermelho, geossíncronos, em azul, e dos satélites MEO, em verde (LOU et al, 2014).

Estes países aprimoraram seus sistemas próprios evitando, assim, a descontinuidade das aplicações baseadas em navegação, em caso de bloqueio proposital por parte dos atuais sistemas GNSS.

#### 2.1.4 Sistemas Alternativos de Navegação

Os sistemas que utilizam satélites de navegação são amplamente utilizados no mundo. O GPS, especialmente, oferece uma alta precisão em sistemas militares, como em mísseis lançados a um alvo de coordenadas conhecidas, capazes de destruir um alvo inimigo sem causar danos colaterais em regiões não envolvidas; em tanques de guerra; aeronaves e navios; e em aparelhos portáteis utilizados por soldados em campo aberto.

Existem duas limitações quanto à navegação via satélite. A primeira, é que o sistema precisa de uma linha de visada entre o usuário e o satélite, e, como a altitude média dos satélites de navegação é tipicamente em torno de 20000 km, seu uso fica prejudicado em áreas urbanas, com grande concentração de edifícios, pois estes provocam reflexões dos sinais transmitidos pelos satélites, gerando mais de um caminho para o sinal e confundindo os receptores. Isso pode ser crítico em situações que requerem alta precisão.

A segunda limitação é sua vulnerabilidade. Os fracos sinais emitidos por satélites de navegação podem sofrer muita interferência ou serem interceptados intencionalmente por adversários através de outros sinais de maior potência. Essa técnica, conhecida como *jamming* (bloqueio), já foi utilizada pela China em frotas de vans. Outro cenário de vulnerabilidade envolve nações utilizando tecnologia antissatélite para desabilitar ou destruir um ou mais satélites de uma constelação inimiga. Há 3 nações que já possuem essa tecnologia: EUA, Rússia e China (FISCHER; RAQUET, 2011, p. 24).

Para superar essas limitações, algumas pesquisas vêm sendo desenvolvidas em sistemas alternativos de navegação. A primeira, desenvolvida pela Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa (DARPA – *Defense Advanced Research Projects Agency*), utiliza *beacons*, que são dispositivos que geram ou amplificam sinais de navegação, para superar o efeito de interferência internacional. Esses *beacons*, que podem ser acoplados a aeronaves ou veículos terrestres, inibem os *jammers* ao trocar os sinais fracos gerados por satélites de navegação por sinais de alta potência. Para tanto, seriam necessárias, apenas, algumas modificações no software dos receptores. A empresa australiana Locata já utiliza um sistema de *beacons* terrestres para navegação local.

A segunda pesquisa, desenvolvida por pesquisadores do Centro de Autonomia e Tecnologia de Navegação (ANT Center – *Autonomy and Navigation Technology Center*), utiliza SoOP (sinais oportunos) gerados por satélites de comunicações, como de televisão, rádio e telefonia celular. Por existir uma grande abundância de satélites de comunicações, que transmitem sinais bem mais fortes que os de satélites de navegação, o sistema pode fazer uso desses sinais, detectando a potência do sinal recebido para estimar a distância entre o receptor e o satélite transmissor, e, com a técnica de triangulação é possível obter o ângulo de chegada do sinal para obter a coordenada geográfica do usuário. Como o usuário não sabe o que, exatamente, está sendo transmitido, o sistema SoOP utiliza estações bases de coordenadas conhecidas, próximas ao usuário. Esse sistema, entretanto, não elimina erros de posicionamento resultantes de reflexões em áreas urbanas.

A terceira pesquisa, sistema de Navegação Assistida por Visão (*Vision Aiding Navigation*), também em desenvolvimento pelo ANT Center, utiliza o movimento percebido por câmeras instaladas em um veículo para detectar sua velocidade e

rotação. Este sistema poderá ser utilizado em conjunto com o sistema de *beacons* ou o SoOP para garantir uma maior precisão na navegação via satélite (FISCHER; RAQUET, 2011, p. 27-30).

No Reino Unido, um grupo de cientistas do Laboratório de Ciência e Tecnologia de Defesa (DSTL – *Defence Science and Technology Laboratory*), da cidade de Porton Down, está desenvolvendo um sistema de navegação sem satélites chamado de Sistema de Posicionamento Quântico (*Quantum Positioning*), também conhecido como bússola quântica. Este sistema deverá ser utilizado, principalmente, na navegação de submarinos, já que os sinais dos sistemas GNSS não conseguem penetrar grandes quantidades de água. Os submarinos, atualmente, utilizam um sistema de giroscópios e acelerômetros inerciais, que estimam a posição baseados na última posição conhecida, podendo ocasionar erros que chegam a 1 km ao dia. Com o novo sistema, esse erro poderá diminuir para 1 m, dispensando a necessidade de retornar periodicamente à superfície para determinar a posição real. Esse sistema foi inspirado na descoberta de que lasers conseguem imobilizar e resfriar uma nuvem de átomos colocados no vácuo a quase zero graus absolutos. Uma vez resfriados, esses átomos adquirem um estado quântico capaz de ser facilmente perturbado por uma força externa, e outro feixe de lasers pode ser usado para captar a perturbação, e com isso, calcular a força externa correspondente ao movimento (IDST, 2016).

O sistema brasileiro Geolocal também é um sistema de navegação alternativo, ou seja, que difere dos sistemas padrões GNSS onde o sinal é transmitido exclusivamente por satélites de navegação, pois é possível utilizar, como plataformas, outros dispositivos, como *drones*, balões, aeronaves e satélites não destinados à navegação.

## 2.2 O SISTEMA GEOLOCAL

O Geolocal pode ser visto como um “GPS invertido” e baseia-se na determinação dos tempos de propagação e de atrasos de sinais entre um transceptor e receptores, localizados na Terra, e uma repetidora no espaço, como ilustra a Figura 7.

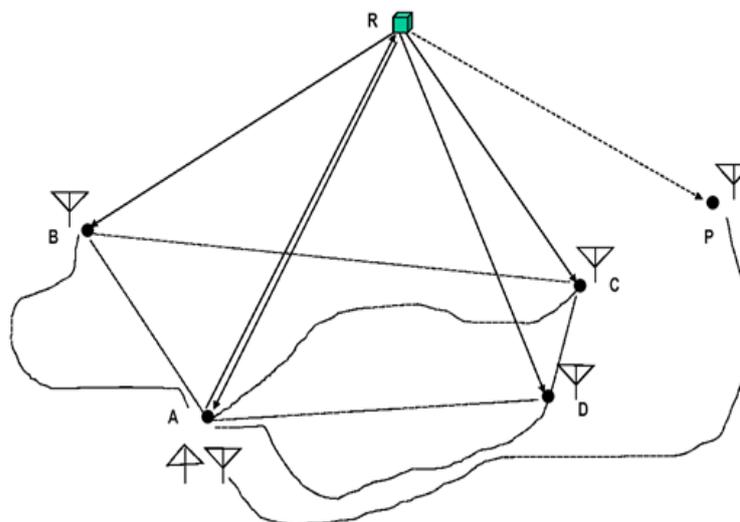


Figura 7 – Representação do sistema Geolocal com quatro bases fixas A, B, C e D, uma repetidora no espaço R e um alvo em terra P (KAUFMANN et al, 2014, p. 3).

O transceptor (A) e as bases receptoras (A, B, C e D) possuem relógios sincronizados e coordenadas geográficas extremamente bem definidas.

A repetidora também possui um relógio sincronizado, porém sua posição é desconhecida. A repetidora pode ser instalada a bordo de um satélite, balão estratosférico, avião, drone, nano satélite ou repetidora natural, como o excesso de ionização produzido durante chuvas de meteoros.

Para entender o funcionamento do Geolocal são necessários alguns conhecimentos básicos de propagação de sinais. Distâncias, por exemplo, podem ser determinadas através do eco de um sinal transmitido em um meio de propagação de velocidade conhecida, como ilustrado na Figura 8.

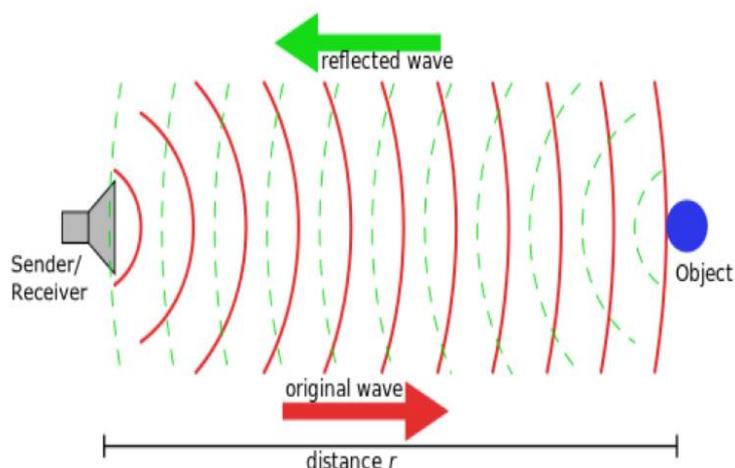


Figura 8 – Medida de distâncias através da reflexão de ondas (ALTAMIRANO, 2016).

De forma bastante simplificada, podemos dizer que a distância entre um emissor e um receptor pode ser calculada levando-se em conta o tempo que o sinal leva para se propagar ( $t = 0,0002$  s, por exemplo) e a velocidade no meio de propagação (a velocidade da luz,  $c = 299.792.458$  m/s, por exemplo). Neste caso, a distância seria  $c \times t = 59.958,49$  m. Este é um exemplo bem simples que não leva em conta possíveis atrasos na propagação do sinal.

A localização de alvos em terra pode ser feita através da trilateração de sinais recebidos de 3 ou mais emissores (satélites, por exemplo).

Como foi visto, a distância entre um alvo (receptor) e um emissor pode ser calculada através do tempo de propagação do sinal. Desta forma, o alvo deve estar localizado sobre a superfície de uma esfera imaginária que tem como centro o emissor e como raio a distância entre o emissor e o alvo. Para cada emissor teremos uma esfera sobre a qual deve estar localizado o alvo. Na Figura 9, observa-se a localização de um objeto na superfície terrestre através da trilateração das distâncias determinadas a partir de 4 satélites.

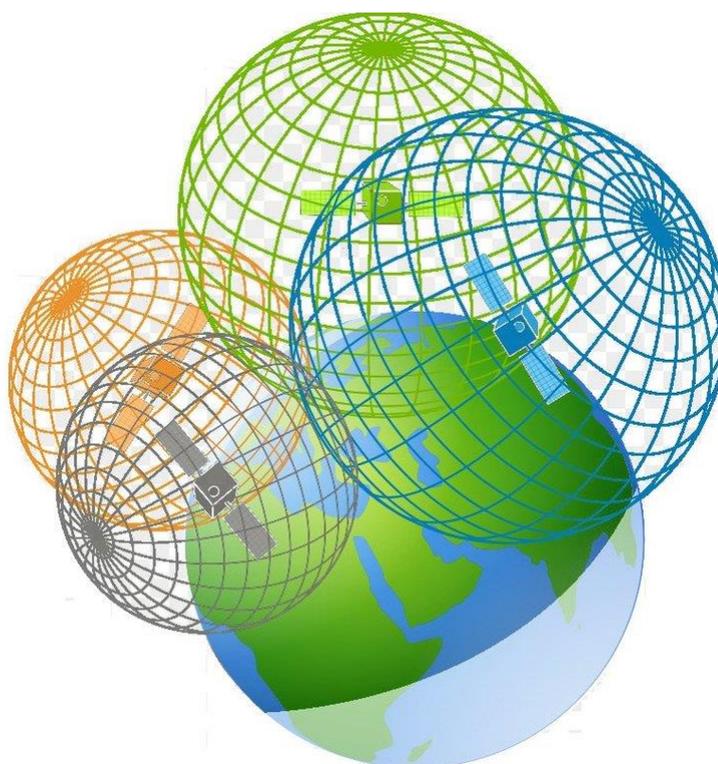


Figura 9 – Trilateração (GISGEOGRAPHY, 2019).

Utilizando a distância observada entre o primeiro satélite e o receptor, podemos dizer que o receptor se encontra em algum local sobre a superfície de uma esfera centralizada no satélite e com raio igual à distância observada (Figura 10).

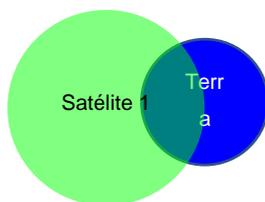


Figura 10 – Trilateração – 1 satélite (adaptado de GIS COMMONS, 2019).

Utilizando a distância observada em relação a um segundo satélite, obtém-se uma segunda esfera. Nesta condição, o receptor encontra-se em algum ponto sobre o círculo obtido pela intersecção das esferas (Figura 11).

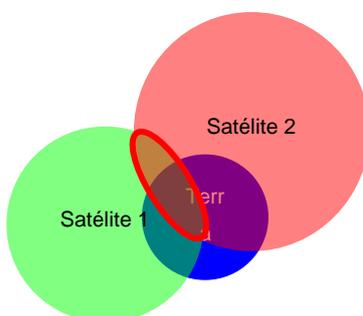


Figura 11 – Trilateração – 2 satélites (adaptado de GIS COMMONS, 2019).

A esfera gerada pelo terceiro satélite intercepta o círculo em dois pontos onde pode estar o receptor (Figura 12).

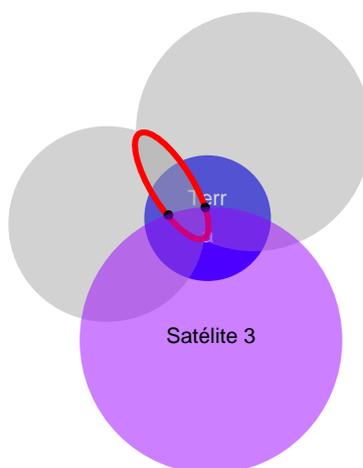


Figura 12 – Trilateração – 3 satélites (adaptado de GIS COMMONS, 2019).

Uma quarta esfera define qual desses dois pontos é a real posição do receptor (Figura 13).

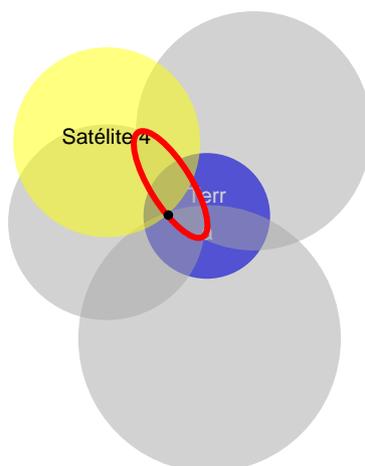


Figura 13 – Trilateração – 4 satélites (adaptado de GIS COMMONS, 2019).

O procedimento de cálculo da trilateração será detalhado mais adiante neste documento. Este é o princípio utilizado pela maioria dos atuais sistemas de navegação por satélite e também pelo Geolocal.

### 2.2.1 Sistema, processo e algoritmo do Geolocal

Utilizando os conceitos anteriores, fica claro que é possível no Geolocal localizar uma repetidora (R) a partir da trilateração em relação às quatro bases fixas em terra (A, B, C e D) como visto na Figura 7. Da mesma forma, um alvo (P) em terra (ou no espaço) pode ser localizado através da trilateração de sinais recebidos de quatro repetidoras ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ ) ou de uma mesma repetidora em quatro instantes distintos, como mostra a Figura 14.

Neste sistema, um sinal codificado é transmitido pela base A retransmitido pelas repetidoras no espaço ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ) e recebido pelas quatro bases de referência (A, B, C, D) e pelo alvo (P), produzindo cinco medidas de *ranging* para cada repetidora, que permitem calcular as distâncias AR, BR, CR, DR e PR em relação a cada repetidora. As diferenças de tempo dos relógios medidas nas bases e no alvo são enviadas, por algum meio, para um centro de processamento, que pode ser a base A (linhas tracejadas na Figura 14).

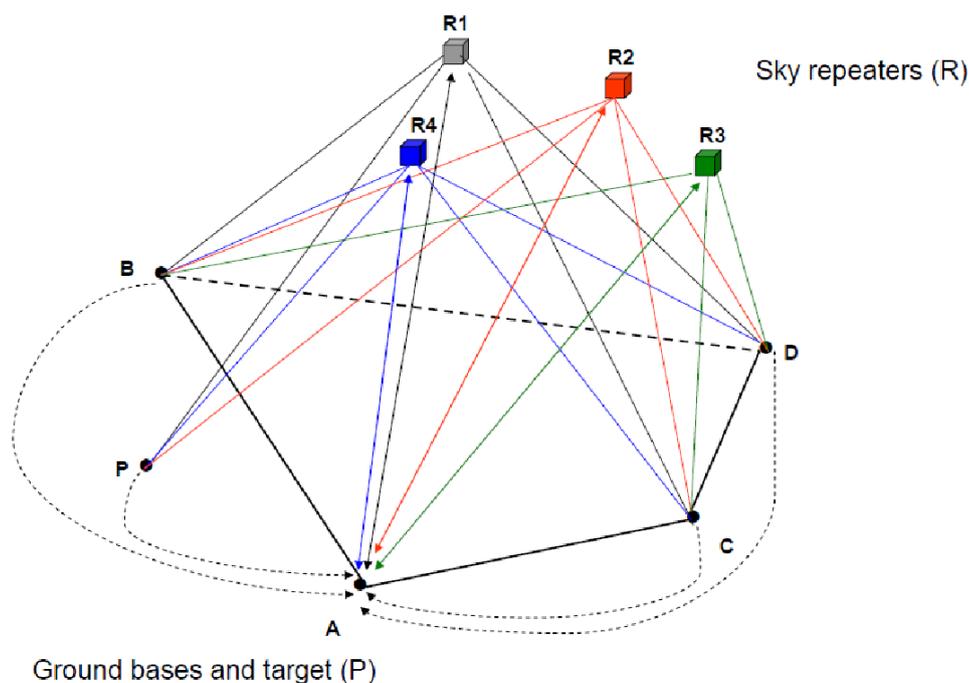


Figura 14 – Representação do sistema Geolocal com quatro bases fixas (A, B, C e D), quatro repetidoras no espaço (R1, R2, R3 e R4) e um alvo (P) em terra (PAMBOUKIAN et al., 2016).

O sinal transmitido, entretanto, não se desloca exatamente na velocidade da luz no vácuo: ele vai atravessar diferentes meios e equipamentos até chegar ao seu destino, impondo “atrasos” em sua propagação. São 3 as causas principais desses atrasos:

- tempo de trânsito nos equipamentos, antenas, cabos e conectores dos módulos de transmissão e recepção (estes atrasos podem ser medidos/calculados);
- tempo de trânsito nos equipamentos, antenas, cabos e conectores da repetidora (este atraso não tem como ser medido em alguns tipos de repetidora);
- variação da velocidade de propagação no meio (*path delay*) (este atraso pode ser estimado por modelos).

O conhecimento, medição ou estimativa desses atrasos é de fundamental importância considerando-se que 10 nano segundos correspondem a um erro de 3 metros na determinação da distância.

Os atrasos devidos à variação da velocidade nos meios de propagação (ionosfera, troposfera), em geral, são previstos de forma suficiente por modelos matemáticos. Honma *et al.* (2008) indicam que, usando um modelo de plano paralelo, por exemplo, o *delay* troposférico ( $d$ ) pode ser estimado pela Equação 1:

$$d = c \cdot \frac{\tau_{atm}}{\text{sen } Z} \quad (1)$$

onde:

- $c$  é a velocidade de propagação no meio;
- $\tau_{atm}$  é o *delay* troposférico no zênite;
- $Z$  é o ângulo de elevação da repetidora em relação à base.

Os atrasos na propagação ( $\delta_{TEC}$ ) na Ionosfera podem ser calculados, por exemplo, utilizando o Conteúdo Eletrônico Total (*Total Electron Content* - TEC) (Equação 2) (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 1997):

$$\delta_{TEC} = S \cdot 1.345 \cdot \frac{TEC}{f^2} \cdot 10^{-7} \quad (2)$$

onde:

- **TEC** é o conteúdo eletrônico total (elétrons/m<sup>2</sup>);
- **f** é a frequência de transmissão (MHz).
- **S** é o fator de inclinação para os respectivos ângulos de elevação  $E$  em que a repetidora é observada pelas bases e pelo alvo (KLOBUCHAR, 1987; OTSUKA *et al.*, 2002) como visto na Equação 3:

$$S = \frac{1}{\cos(\arcsin(\frac{R}{R+h} \cdot \cos(E)))} \quad (3)$$

onde:

- **R** é o raio da Terra;
- **h** é a altitude de referência da ionosfera.
- **S** varia de 1 a 2.5 para ângulos de elevação de 90 a 15 graus.

No sistema Geolocal representado na Figura 14, as distâncias podem ser determinadas pelas conjunto de Equações 4:

$$\begin{aligned}
AR(\delta_R, \Delta_{pdAR}) &= (\Delta t_A - \delta_{At} - \delta_{Ar} - \delta_R) (c/2) - \Delta_{pdAR} \\
BR(\delta_R, \Delta_{pdAR}, \Delta_{pdBR}) &= (\Delta t_B - \delta_{At} - \delta_{Br} - \delta_R) c - \Delta_{pdBR} - \Delta_{pdAR} - AR(\delta_R) \\
CR(\delta_R, \Delta_{pdAR}, \Delta_{pdCR}) &= (\Delta t_C - \delta_{At} - \delta_{Cr} - \delta_R) c - \Delta_{pdCR} - \Delta_{pdAR} - AR(\delta_R) \quad (4) \\
DR(\delta_R, \Delta_{pdAR}, \Delta_{pdDR}) &= (\Delta t_D - \delta_{At} - \delta_{Dr} - \delta_R) c - \Delta_{pdDR} - \Delta_{pdAR} - AR(\delta_R) \\
PR(\delta_R, \Delta_{pdAR}, \Delta_{pdPR}) &= (\Delta t_P - \delta_{At} - \delta_{Pr} - \delta_R) c - \Delta_{pdPR} - \Delta_{pdAR} - AR(\delta_R)
\end{aligned}$$

onde:

- **AR, BR, CR, DR e PR:** Distâncias das bases A, B, C, D e do alvo P à repetidora R. São expressas em função do atraso causado pelo tempo de trânsito do sinal dentro da repetidora ( $\delta_R$ ) e corrigidas pelos respectivos atrasos de propagação (*path delays*)  $\Delta_{pd}$ .
- **$\Delta t_A, \Delta t_B, \Delta t_C, \Delta t_D$  e  $\Delta t_P$ :** Diferenças de tempo medidas nas bases A, B, C, D e no alvo P em relação a seus relógios. Indicam o intervalo de tempo entre a emissão do sinal codificado pela base A, sua retransmissão pela repetidora R e a chegada às bases ou ao alvo;
- **$\delta_{At}$ :** Tempo de trânsito do sinal nos circuitos, cabos e antena da base A. Pode ser previamente medido e conhecido;
- **$\delta_{Ar}, \delta_{Br}, \delta_{Cr}, \delta_{Dr}$  e  $\delta_{Pr}$ :** Tempos de trânsito do sinal nos circuitos, cabos e antenas das bases A, B, C, D e do alvo P. Podem ser previamente medidos e conhecidos;
- **$\delta_R$ :** Tempo de trânsito do sinal na repetidora (R). Este valor precisa ser determinado e nem sempre pode ser medido;
- **c:** velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo;
- **$\Delta_{pdAR}, \Delta_{pdBR}, \Delta_{pdCR}, \Delta_{pdDR}$  e  $\Delta_{pdPR}$ :** Atrasos na propagação do sinal (*path delays*). Esses atrasos serão determinados no processo.

Note que o segmento AR deve ser descontado do percurso em cada uma das equações e que, na primeira equação, a distância é dividida por 2 pois existe o percurso de ida e volta (AR e RA).

Este é um sistema complexo de equações onde temos mais variáveis desconhecidas do que conhecidas.

Conhecidas:

- $\delta A_t$  – delay de transmissão na base A;
- $\delta A_r$ ,  $\delta B_r$ ,  $\delta C_r$ ,  $\delta D_r$  e  $\delta P_r$  – delay de recepção nas bases e no alvo;
- $\Delta t_A$ ,  $\Delta t_B$ ,  $\Delta t_C$ ,  $\Delta t_D$  e  $\Delta t_P$  – diferença de tempo nas bases e no alvo.

Desconhecidas:

- Posição da repetidora R;
- $AR$ ,  $BR$ ,  $CR$ ,  $DR$  e  $PR$  – distâncias entre as bases A, B, C, D e alvo P à repetidora R;
- $\delta R$  – delay devido ao trânsito do sinal na repetidora R;
- $\Delta pdAR$ ,  $\Delta pdBR$ ,  $\Delta pdCR$ ,  $\Delta pdDR$  – *delay* de propagação entre bases e repetidora (podem ser estimadas por modelos, mas dependem da posição da repetidora);
- $\Delta pdPR$  – delay de propagação entre alvo e repetidora (pode ser estimada por modelos, mas dependem da posição da repetidora).

Desta forma, o algoritmo para solução destas equações deve ser iterativo e trabalhar com a minimização de erros. O fluxograma completo é exibido na Figura 15 e o algoritmo pode ser resumido em:

- 1) Desconsiderar o *path delay length*, definindo seu valor como 0 (zero)
- 2) Adotar valor para  $\delta R$  dentro de um intervalo de busca previamente definido
- 3) Calcular posição da repetidora R a partir de um conjunto de 3 bases
- 4) Calcular o ângulo de elevação da repetidora
- 5) Recalcular o *path delay*
- 6) Voltar ao passo 3 até haver convergência na posição de R
- 7) Executar os passos de 3 a 6 para todos os conjuntos possíveis de 3 bases (ABC, ABD e ACD) até a convergência na posição de R
- 8) Executar este procedimento para cada uma das 4 repetidoras ou para uma única repetidora em 4 instantes distintos

O algoritmo descrito permite a localização de uma repetidora a partir de quatro bases fixas. Analogamente, podemos localizar um alvo em terra (ou no ar) utilizando quatro repetidoras no espaço. Assim são definidas as duas principais aplicações do Geolocal.

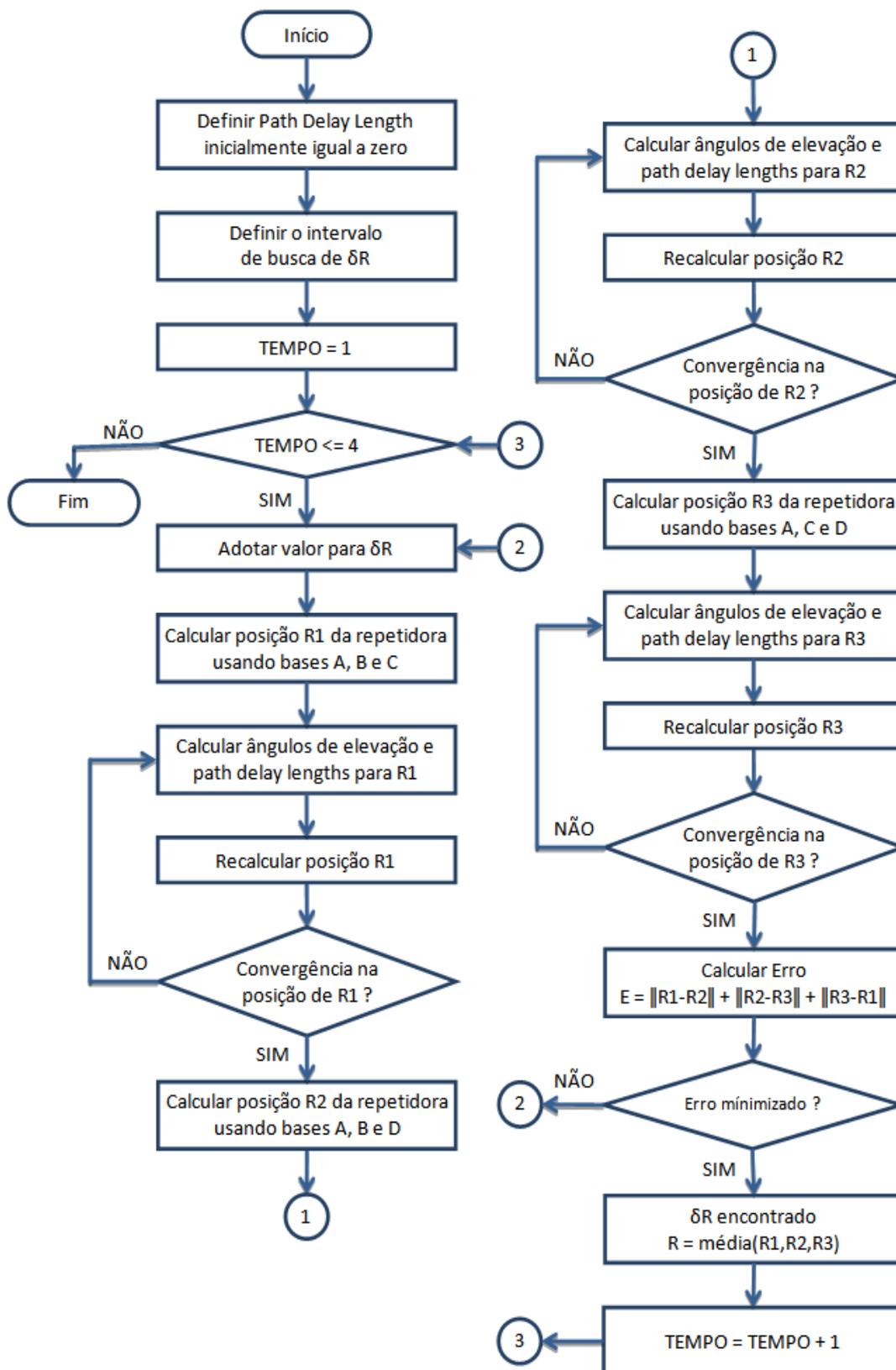


Figura 15 – Fluxograma para o cálculo do tempo de trânsito na repetidora, path delays e posição da repetidora (KAUFMANN et al., 2012b).

A terceira aplicação é o sincronismo remoto de relógios. Assumindo que o alvo P possui posição bem conhecida e uma vez determinadas as coordenadas da repetidora R, o segmento PR torna-se conhecido. O intervalo de tempo esperado para a chegada do sinal é visto na Equação 5:

$$\delta t_P = AR/c + PR/c + \delta A_t + \delta R + \delta P_r + \delta p_{dAR} + \delta p_{dPR} \quad (5)$$

Este intervalo, acrescido do horário de envio do sinal na base A, determina o horário correto do relógio no alvo P. Este recurso pode ser utilizado, por exemplo, para sincronismo de retransmissores de telecomunicações, evitando conversas cruzadas e interferências.

Vale a pena ressaltar que o sistema apresentado nesta seção é o mínimo necessário para o funcionamento do Geolocal. O sistema completo pode ter uma grande quantidade de bases e repetidoras, onde todas as bases podem transmitir e receber sinais, melhorando a acurácia do sistema através de redundância de informações.

### 2.2.2 Cálculo da posição da repetidora

Esta subseção apresenta de forma resumida o procedimento para o cálculo da posição da repetidora em um sistema de 4 base. O procedimento detalhado pode ser visto em Macho (2018).

Antes de determinar a posição da repetidora, é preciso definir o sistema de coordenada geográfica a ser utilizado. Na Figura 16 é possível verificar a presença de três sistemas de coordenadas.

O primeiro é o sistema ECEF – *Earth Centered Earth Fixed* – onde a localização de um ponto é feita através de coordenadas tridimensionais  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ , com origem (0, 0, 0) no centro de massa da Terra (*Earth Centered*), e os eixos  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  são fixos em relação à Terra, rotacionando junto ao planeta (*Earth Fixed*), onde o eixo  $\vec{k}$  aponta para o norte e o plano  $\vec{i}\vec{j}$  coincide com o plano equatorial. O geoide de referência (*datum*) utilizado neste sistema é o WGS84 – *World Geodetic System 1984* – que é um elipsoide com origem coincidente com a origem do ECEF, eixo  $\vec{k}$  apontando para o Polo Norte, e eixo  $\vec{i}$  apontando para a intersecção do Meridiano de Greenwich com a linha do Equador. A altitude é a distância perpendicular e acima da superfície do elipsoide (μ-BLOX, 1999, p. 1,2).

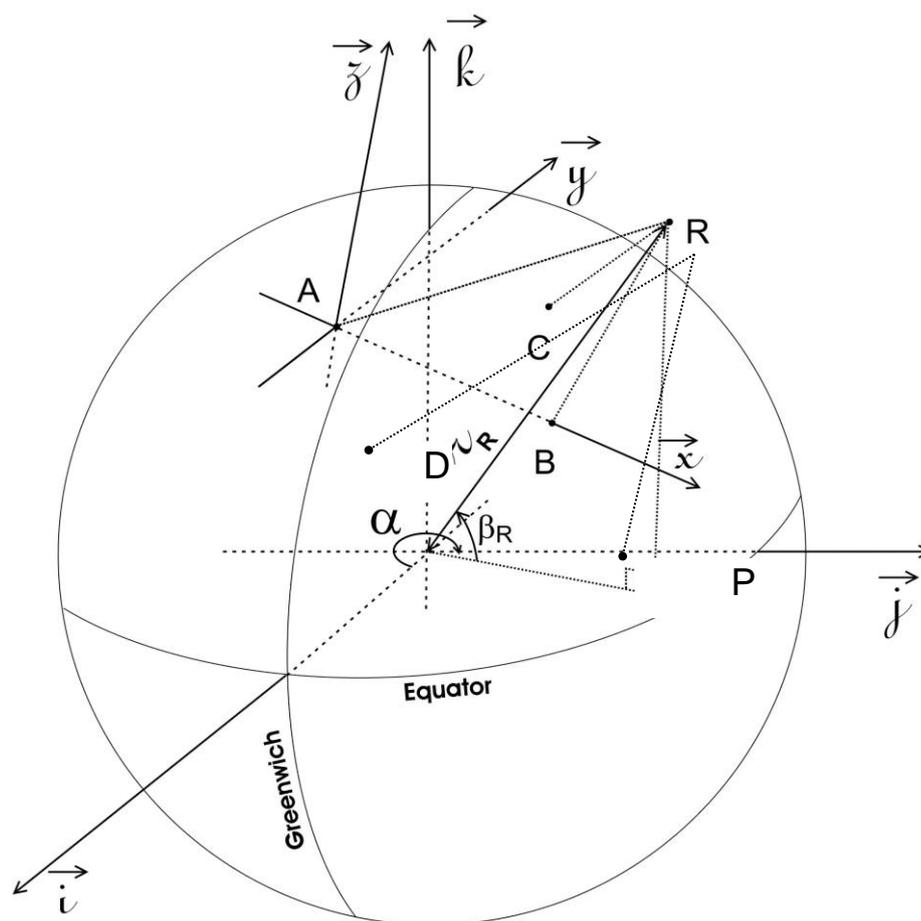


Figura 1 – Sistema de coordenadas ortogonais e esféricas do sistema Geolocal, com as 4 bases fixas no solo, A, B, C e D, a repetidora R no espaço, e um alvo P (KAUFMANN et al, 2012b, p.5).

O segundo sistema é o de coordenadas ortogonais,  $A, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$  centrada em A, onde B está contido na reta determinada por A e  $\vec{x}$ ; C e D estão contidos no plano determinado por A, B e  $\vec{y}$ ; e  $\vec{z}$  apontando para fora da Terra, perpendicular ao plano, e passando por A.

Há também um terceiro sistema de coordenadas, LLA – Latitude, Longitude, Altitude, em que a latitude varia da  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , partindo do Equador para o norte (positivo) e para o sul (negativo), a longitude varia de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , partindo do Meridiano de Greenwich para o leste (positivo) e para o oeste (negativo), e a altitude é o valor, em metros da distância vertical de um determinado ponto ao nível médio do mar.

Como as posições das bases são normalmente fornecidas no sistema de coordenadas LLA, é necessária a conversão deste sistema para o ECEF, para que seja possível o cálculo da posição das repetidoras. Para tanto, primeiro são definidos

os parâmetros WGS84 usando o conjunto de Equações 6, onde  $a$  indica o valor do semieixo maior da Terra, em metros,  $b$  indica o valor do semieixo menor da Terra, que, calculado a partir do achatamento (*flattening*) resulta em 6.356.752 metros, e  $e$  indica a primeira excentricidade, calculada sobre o semieixo maior e  $e'$  indica a segunda excentricidade, calculada sobre o semieixo menor.

$$a = 6378137 ; b = a \cdot (1 - f) ; f = \frac{1}{298,257223563} ;$$

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}} ; e' = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{b^2}} \quad (6)$$

Para a conversão do sistema LLA para o ECEF, é utilizado o conjunto de Equações 7, onde  $\varphi$  é a latitude de uma determinada localização,  $\lambda$  é a longitude,  $h$  é a altura acima do elipsoide, em metros, e  $N$  é o raio de curvatura do geoide, em metros.

$$X = (N + h) \cdot \cos\varphi \cdot \cos\lambda$$

$$Y = (N + h) \cdot \cos\varphi \cdot \sin\lambda$$

$$Z = \left(\frac{b^2}{a^2} \cdot N + h\right) \cdot \sin\varphi \quad (7)$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2\varphi}}$$

Se houver a necessidade de reverter a conversão do sistema ECEF para o LLA, basta utilizar o conjunto de Equações 8, onde  $p$  e  $\theta$  são valores auxiliares ( $\mu$ -BLOX, 1999, p. 2-4).

$$\lambda = \arctan \frac{Y}{X}$$

$$\varphi = \arctan \frac{Z + e'^2 \cdot b \cdot \sin^3\theta}{p - e^2 \cdot a \cdot \cos^3\theta}$$

$$h = \frac{p}{\cos\varphi} - N \quad (8)$$

$$p = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

$$\theta = \arctan \frac{Z \cdot a}{p \cdot b}$$

Com as posições das bases definidas no sistema ECEF, as distâncias entre as bases e a repetidora, necessárias para o cálculo da posição da repetidora, podem ser encontradas. O cálculo das coordenadas da repetidora é feito inicialmente no sistema A,  $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$ ,  $\vec{z}$ .

Para definir as coordenadas da repetidora,  $x_R$ ,  $y_R$  e  $z_R$ , são selecionados 3 conjuntos de bases dentre as 4 bases A, B, C e D. Para exemplificar, foram selecionados os conjuntos de bases A, B e C; A, B e D; e A, C e D da Figura 16. Para cada conjunto de bases é gerado um sistema de coordenadas da repetidora (x,y,z) diferente. O primeiro sistema de Equações 9 ( $x_R$ ,  $y_R$  e  $z_R$ ), é construído a partir do primeiro conjunto de bases (A, B e C).

$$x_{R(\delta_R)} = \frac{[AR(\delta_R)]^2 - [BR(\delta_R)]^2 + [AB]^2}{2 \cdot AB}$$

$$y_{R(\delta_R)} = \frac{r_{1(\delta_R)}^2 - r_{2(\delta_R)}^2}{2 \cdot y_C} + \frac{y_C}{2} \quad (9)$$

$$z_{R(\delta_R)} = \sqrt{r_{1(\delta_R)}^2 - y_{R(\delta_R)}^2}$$

onde  $r_{1(\delta_R)}^2 = AR(\delta_R)^2 - x_{R(\delta_R)}^2$  e  $r_{2(\delta_R)}^2 = CR(\delta_R)^2 - (x_C - x_{R(\delta_R)})^2$ .

Em seguida, é utilizado o segundo conjunto de bases (A, B e D) para definir o segundo sistema de coordenadas da repetidora ( $x'_R$ ,  $y'_R$  e  $z'_R$ ) utilizando o sistema de Equações 10.

$$x'_{R(\delta_R)} = \frac{[AR(\delta_R)]^2 - [BR(\delta_R)]^2 + [AB]^2}{2 \cdot AB}$$

$$y'_{R(\delta_R)} = \frac{r'_{1(\delta_R)}^2 - r'_{2(\delta_R)}^2}{2 \cdot y_D} + \frac{y_D}{2} \quad (10)$$

$$z'_{R(\delta_R)} = \sqrt{r'_{1(\delta_R)}^2 - y'_{R(\delta_R)}^2}$$

onde  $r'_{1(\delta_R)}^2 = AR(\delta_R)^2 - x'_{R(\delta_R)}^2$  e  $r'_{2(\delta_R)}^2 = DR(\delta_R)^2 - (x_D - x'_{R(\delta_R)})^2$ .

E, para o cálculo do terceiro sistema de coordenadas da repetidora ( $x''_R$ ,  $y''_R$  e  $z''_R$ ), é utilizado o terceiro conjunto de bases (A, C e D), através do sistema de Equações 11.

$$\begin{aligned}
x''_{R(\delta_R)} &= \frac{[AR(\delta_R)]^2 - [CR(\delta_R)]^2 + [AC]^2}{2 \cdot AC} \\
y''_{R(\delta_R)} &= \frac{r''_{1(\delta_R)}{}^2 - r''_{2(\delta_R)}{}^2}{2 \cdot y_D} + \frac{y_D}{2} \\
z''_{R(\delta_R)} &= \sqrt{r''_{1(\delta_R)}{}^2 - y''_{R(\delta_R)}{}^2}
\end{aligned} \tag{11}$$

onde  $r''_1(\delta_R)^2 = AR(\delta_R)^2 - x_R''(\delta_R)^2$  e  $r''_2(\delta_R)^2 = DR(\delta_R)^2 - (x_D - x_R''(\delta_R))^2$ .

Para cada par de sistema de Equações, 9-10, 9-11 e 10-11, é encontrada uma diferença na posição da repetidora, em função de  $\delta_R$ , definida, respectivamente, pelo conjunto de Equações 12.

$$\begin{aligned}
f1(\delta_R) &= \{[x_R(\delta_R), y_R(\delta_R), z_R(\delta_R)] - [x'_R(\delta_R), y'_R(\delta_R), z'_R(\delta_R)]\}^2 \\
&= [x_R(\delta_R) - x'_R(\delta_R)]^2 + [y_R(\delta_R) - y'_R(\delta_R)]^2 + [z_R(\delta_R) - z'_R(\delta_R)]^2 \\
f2(\delta_R) &= \{[x_R(\delta_R), y_R(\delta_R), z_R(\delta_R)] - [x''_R(\delta_R), y''_R(\delta_R), z''_R(\delta_R)]\}^2 \\
&= [x_R(\delta_R) - x''_R(\delta_R)]^2 + [y_R(\delta_R) - y''_R(\delta_R)]^2 + [z_R(\delta_R) - z''_R(\delta_R)]^2 \\
f3(\delta_R) &= \{[x'_R(\delta_R), y'_R(\delta_R), z'_R(\delta_R)] - [x''_R(\delta_R), y''_R(\delta_R), z''_R(\delta_R)]\}^2 \\
&= [x'_R(\delta_R) - x''_R(\delta_R)]^2 + [y'_R(\delta_R) - y''_R(\delta_R)]^2 + [z'_R(\delta_R) - z''_R(\delta_R)]^2
\end{aligned} \tag{12}$$

Este processo, como no visto no fluxograma da Figura 15, é feito diversas vezes, com outros valores de  $\delta_R$ , até que a diferença na posição da repetidora entre os sistemas de coordenadas seja próxima a zero.

Depois de determinadas, o sistema de coordenadas da repetidora precisa ser o mesmo que o sistema das bases. Para converter a posição da repetidora do sistema de coordenadas ortogonais A,  $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$ ,  $\vec{z}$  para o ECEF, primeiro são calculados os versores  $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$  e  $\vec{z}$  do sistema A,  $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$ ,  $\vec{z}$  e, em seguida, somados os valores destes versores multiplicados pelas respectivas coordenadas x, y e z da repetidora à posição A referente ao sistema ECEF.

Para encontrar o valor de cada versor do sistema A,  $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$ ,  $\vec{z}$ , ou seja, do vetor unitário em cada eixo, é necessário encontrar um segmento paralelo a este eixo,

determinar o valor do vetor deste segmento no sentido do eixo, e dividir este valor pelo tamanho deste segmento. Desta forma, o vetor paralelo ao eixo  $\vec{x}$  mais evidente na Figura 16 é o vetor  $\overrightarrow{AB}$ , que pode ser facilmente determinado subtraindo A de B. Portanto, para encontrar o versor  $\vec{x}$ , divide-se o valor deste vetor pelo comprimento do mesmo, de acordo com a Equação 13.

$$\vec{x} = \frac{\overrightarrow{AB}}{\|\overrightarrow{AB}\|} = \frac{\overrightarrow{AB}}{AB} \quad (13)$$

Para encontrar o valor do versor  $\vec{y}$ , um dos possíveis vetores paralelos ao eixo  $\vec{y}$  é a projeção do vetor  $\overrightarrow{AC}$  no eixo  $\vec{y}$ . Porém, como o valor de  $\vec{y}$  ainda não foi determinado, é necessário encontrar um outro vetor que possa utilizar o versor  $\vec{x}$  já encontrado na Equação 28, como, por exemplo, a projeção do vetor  $\overrightarrow{AC}$  no eixo  $\vec{x}$ . Como o valor de  $\overrightarrow{AC}$  pode ser determinado subtraindo A de C, e o valor da projeção do vetor  $\overrightarrow{AC}$  no eixo  $\vec{x}$  pode ser determinado pelo produto escalar do vetor  $\overrightarrow{AC}$  pelo versor  $\vec{x}$ , multiplicado pelo versor  $\vec{x}$ , um vetor paralelo ao eixo  $\vec{y}$  possível de ser encontrado na Figura 16 é o vetor  $\overrightarrow{AC}$  projetado em  $\vec{x}$ , subtraído de  $\overrightarrow{AC}$ , conforme a Equação 14.

$$\vec{y} = \frac{\overrightarrow{AC} - proj_{\vec{x}}^{\overrightarrow{AC}}}{\|\overrightarrow{AC} - proj_{\vec{x}}^{\overrightarrow{AC}}\|} \quad (14)$$

$$\text{onde } proj_{\vec{x}}^{\overrightarrow{AC}} = (\overrightarrow{AC} \cdot \vec{x}) \cdot \vec{x}$$

Como o produto vetorial de 2 vetores é um vetor perpendicular a ambos, no sentido dado pela regra da mão direita, o valor do versor  $\vec{z}$  pode ser encontrado através do produto vetorial de  $\vec{x}$  por  $\vec{y}$ , de acordo com a Equação 15.

$$\vec{z} = \vec{x} \wedge \vec{y} \quad (15)$$

Com os versores  $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$  e  $\vec{z}$  determinados, a conversão do sistema de coordenadas ortogonais A,  $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$  para o ECEF é feito através da Equação 16, onde  $x_R, y_R$  e  $z_R$  são as coordenadas x,y,z da repetidora e A é a posição ECEF da base A.

$$R \text{ (ECEF)} = A + x_R \cdot \vec{x} + y_R \cdot \vec{y} + z_R \cdot \vec{z} \quad (16)$$

A função de minimização (Macho, 2018) detalhada na Figura 15, leva em conta, além do atraso na repetidora  $\delta_R$ , o atraso de propagação  $\Delta pd$  (*path delay*).

Os atrasos de propagação são estimados ao adotar um modelo adequado de propagação, e o modelo depende da altura da repetidora, como será visto mais adiante neste trabalho.

### 2.2.3 Primeiras simulações

Com o objetivo de demonstrar o algoritmo e o desempenho do sistema Geolocal, foram desenvolvidas diversas simulações computacionais no software MATLAB.

A Figura 17 ilustra a geometria do sistema em um dos muitos cenários estudados, com quatro bases localizadas nas cidades de São Paulo, Itu, Campinas e Bragança Paulista, uma repetidora voando sobre Jundiaí em trajetória circular a uma altitude aproximada de 6km e um alvo em Atibaia. A Tabela 1 mostra as coordenadas de cada base, da repetidora e do alvo.

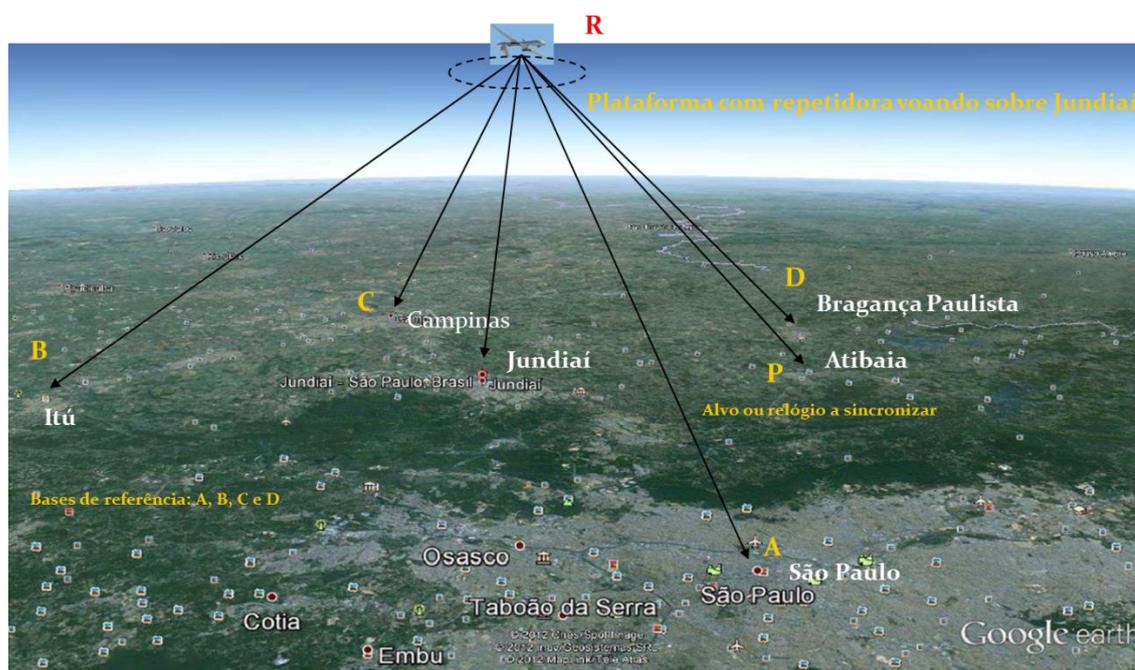


Figura 17 – Cenário da simulação (KAUFMANN et al., 2014).

A simulação, descrita em detalhes em Kaufmann et al. (2012b), comprovou a eficiência do algoritmo e mostrou resultados com precisão quase absoluta, apontando erros no posicionamento da repetidora e do alvo inferiores a 0,001 mm, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 1 – Coordenadas das bases, repetidora e alvo (KAUFMANN et al., 2012b).

| Localização das Bases e do Alvo |          |              |              |              |
|---------------------------------|----------|--------------|--------------|--------------|
| Cidade                          | Elemento | Latitude     | Longitude    | Altitude (m) |
| São Paulo                       | Base A   | -23° 32' 51" | -46° 37' 33" | 730          |
| Itú                             | Base B   | -23° 15' 51" | -47° 17' 57" | 583          |
| Campinas                        | Base C   | -22° 54' 20" | -47° 03' 39" | 855          |
| Bragança Paulista               | Base D   | -22° 57' 07" | -46° 32' 31" | 817          |
| Atibaia                         | Alvo P   | -23° 07' 01" | -46° 33' 01" | 803          |

| Localização da Repetidora |              |              |              |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Cidade – Posição          | Latitude     | Longitude    | Altitude (m) |
| Jundiaí – Posição 1       | -23° 11' 11" | -46° 53' 03" | 5761         |
| Jundiaí – Posição 2       | -23° 11' 11" | -46° 59' 03" | 6000         |
| Jundiaí – Posição 3       | -23° 17' 11" | -46° 53' 03" | 6200         |
| Jundiaí – Posição 4       | -23° 17' 11" | -46° 59' 03" | 6800         |

Tabela 2 – Coordenadas calculadas na simulação (KAUFMANN et al., 2012b).

| Localização da repetidora |                             |                             |                    |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Cidade – Posição          | Latitude                    | Longitude                   | Altitude (m)       |
| Jundiaí – Posição 1       | -23° 11' 10.9999999973079"  | -46° 53' 03.00000000022578" | 5761.0000008372590 |
| Jundiaí – Posição 2       | -23° 11' 10.9999999990985"  | -46° 59' 03.00000000035880" | 6000.0000002672896 |
| Jundiaí – Posição 3       | -23° 15' 11.00000000065677" | -46° 53' 03.00000000022578" | 6200.0000010607764 |
| Jundiaí – Posição 4       | -23° 15' 11.00000000052887" | -46° 59' 03.00000000110060" | 6800.0000007525086 |

| Localização do Alvo |                            |                             |                    |
|---------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Cidade              | Latitude                   | Longitude                   | Altitude (m)       |
| Atibaia             | -23° 07' 00.9999999971089" | -46° 33' 00.99999999755028" | 803.00000067241490 |

Na prática, podem ocorrer algumas incertezas relacionadas a erros no sincronismo de relógios ou falha na determinação dos atrasos, entre outras coisas. Desta forma, foram inseridos na simulação incertezas nos tempos de propagação com Distribuição Normal e Desvio Padrão  $\pm 0,5ns$ . As Figuras 18, 19 e 20 ilustram os resultados obtidos em 1000 simulações com atrasos gerados de forma aleatória.

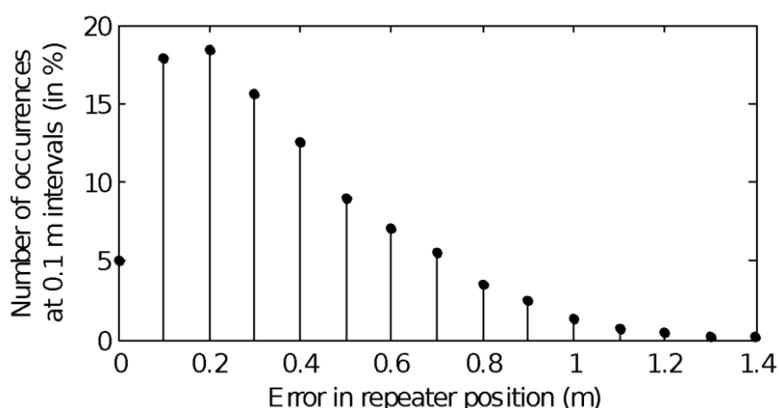


Figura 18 – Erro no posicionamento da repetidora (KAUFMANN et al., 2012b).

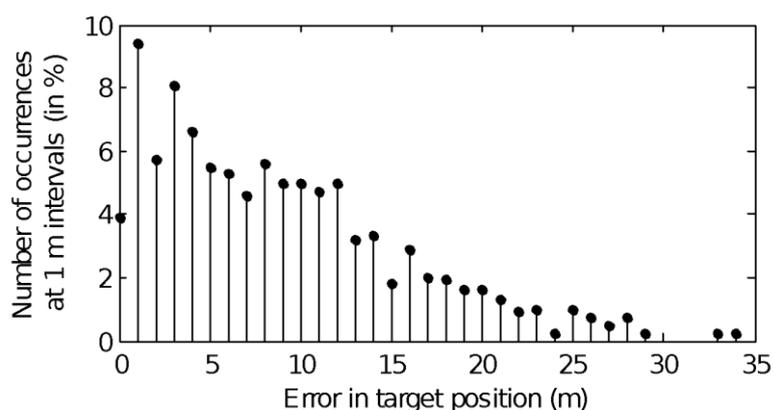


Figura 19 – Erro no posicionamento do alvo (KAUFMANN et al., 2012b).

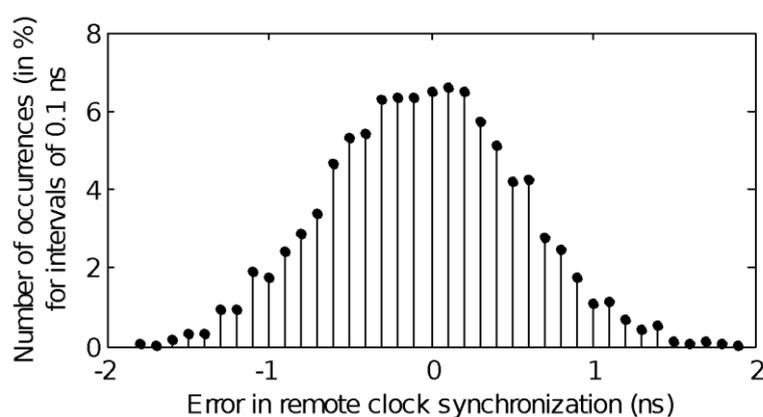


Figura 20 – Erro no sincronismo de relógio (KAUFMANN et al., 2012b).

O erro típico encontrado para a posição da repetidora foi inferior a 1m, para a posição do alvo inferior a 20m e para o sincronismo de relógio inferior a 1ns. Considerando que o erro médio dos atuais sistemas GNSS está por volta de 10 a 15m, os resultados são bastante animadores.

Outras simulações foram desenvolvidas posteriormente e podem ser encontradas em Macho e Pamboukian (2018) e Macho (2018).

### 3 OBJETIVOS

Pelo exposto até o momento, percebe-se que o Geolocal já está bastante maduro em seus estudos teóricos. Possui artigos, patentes, registro de software, dissertações de mestrado, simulações e diversas outras pesquisas que comprovam a viabilidade do sistema.

Porém, o desenvolvimento prático do Geolocal envolve construir e operar uma estrutura de hardware e software capaz de implementar suas funcionalidades propostas. Esta estrutura consiste em quatro estações em terra, fixas e georreferenciadas, uma central de controle operacional (que pode estar ligada a uma das estações fixas), quatro repetidoras aéreas (em torres, aeronaves, balões e/ou satélites) e um alvo móvel em terra.

Por ser extenso em abrangência e tempo, a implementação do Geolocal foi dividida em 5 fases (relacionadas no Apêndice A para referência), onde este projeto corresponde à Fase 1. As demais fases serão desenvolvidas em projetos futuros que poderão ser submetidos ao Mack Pesquisa ou a outras agências de fomento.

O objetivo deste projeto consiste em subsidiar a Fase 2 com informações necessárias para uma pesquisa aplicada em relação a sincronismo de tempo, determinação de atrasos e medição de distâncias e também indicar os preparativos necessários para a realização do primeiro experimento em campo e prova de conceito, objetos das Fases 2 e 3. O projeto envolve diversas atividades teóricas e práticas que correm em paralelo como o estudo dos locais de teste, a quantidade de estações necessárias, as frequências utilizadas pelos equipamentos e a construção dos protótipos. Alguns destes estudos já estavam em andamento por alunos de mestrado e doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais.

São objetivos específicos deste projeto:

- definir as características e funções dos elementos do Geolocal: bases, repetidoras e centros de controle operacional;
- estudar a topologia do sistema: quantidade de bases e repetidoras, área de cobertura, espaçamento entre bases, geometria do sistema, PDOP etc.;
- estudar as possíveis plataformas que podem ser utilizadas para carregar a repetidora,

- verificar os possíveis lugares para os primeiros testes do Geolocal e planejar testes em campo para as demais fases do projeto;
- estudar os modelos que estimam os atrasos no meio de propagação, verificando qual proporciona melhor acurácia para o sistema em função de sua configuração;
- definir as frequências de transmissão que serão utilizadas e identificar a influência das diferentes camadas da atmosfera na propagação de sinais em diferentes frequências;
- avaliar os possíveis modelos de antenas, identificando os prós e contras de cada modelo analisado;
- estimar a acurácia do sistema em diversas configurações, levando em conta a altitude da repetidora e os modelos de estimativa de atrasos (*delays*) na propagação do sinal;
- analisar as especificações e premissas do Geolocal;
- analisar os atrasos (*delays*) em hardware, software e propagação do sinal;
- propor nova configuração para o Geolocal;
- criar protótipos das estações e realizar testes.

## 4 ESTUDO DA TOPOLOGIA DO SISTEMA GEOLOCAL

Neste capítulo são analisadas as características geométricas (topologia) do sistema Geolocal, incluindo o posicionamento e distribuição das bases em terra, as plataformas utilizadas para carregar as repetidoras e os possíveis locais para os primeiros testes dos protótipos.

### 4.1 PLATAFORMAS PARA TRANSPORTE DA REPETIDORA

Uma das aplicações do Geolocal é localizar alvos em terra a partir de um conjunto de repetidoras de sinal no espaço. A escolha da plataforma que carrega essas repetidoras deve levar em conta alguns fatores que viabilizem o sistema, proporcionando, ao mesmo tempo, uma melhor acurácia e um menor custo de implementação e de operação. Macho (2018) fez um profundo levantamento das opções disponíveis e parte de seu trabalho é reproduzido nesta seção de forma adaptada.

A plataforma de menor custo de implementação é conhecida popularmente como drone (tradução de zangão em inglês, devido ao som produzido em voo) e é um tipo de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). O termo VANT foi considerado obsoleto pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) e esse tipo de aeronave foi dividido em 2 grupos principais: aeromodelo, utilizado para fins recreativos, e Aeronave Remotamente Pilotada (RPA – *Remotely Piloted Aircraft*), utilizada para qualquer outro fim que não seja o recreativo (DECEA, 2018, p. 3; HOBBS, 2016, p. 1).

Apesar do baixo custo (de centenas a alguns milhares de reais), os RPAs alcançam baixa altitude, abrangendo, portanto, uma pequena área de cobertura na superfície terrestre, e com isso, necessitando um maior número de bases fixas para garantir uma melhor acurácia no posicionamento da repetidora. Além disso, a autonomia é pequena, geralmente abaixo de uma hora. O modelo Phantom 4 Pro, por exemplo, disponível no Laboratório de Geotecnologias da UPM, pode atingir um teto de voo máximo de 6 km (acima do nível do mar), e pode voar até meia hora (DJI, 2018). A maior vantagem de uma plataforma de baixa altitude, além do baixo custo, é a de se usar um modelo de propagação que não leve em conta o atraso gerado pela ionosfera. Esses modelos serão discutidos mais adiante neste documento.

Alguns modelos de quadricópteros (drones sustentados por 4 hélices) leves que exploram o uso de energia solar estão sendo testados e já se mostraram eficientes quanto ao incremento da autonomia ao utilizar placa solar como fonte suplementar de energia, acoplado a baterias de lítio (KINGRY et al, 2018). Estes modelos de baixa altitude podem ser úteis durante a fase de testes de protótipos do Geolocal.

Existem algumas empresas que desenvolvem modelos de RPAs com o formato de um avião, e de maior autonomia, como é o caso da AeroVironment, com o modelo Puma AE RQ-20B, que ultrapassa 3 horas de voo, porém com altitude de operação típica de apenas 150 metros (AEROVIRONMENT, 2017) e a Insitu-Boeing, com o modelo ScanEagle 3, lançado através de um sistema de catapulta, que pode chegar a 18 horas de voo e atingir 6 km de altitude (INSITU-BOEING, 2016). Esses modelos, porém, possuem um custo bem mais elevado, de centenas de milhares a centenas de milhões de dólares, como é o caso do GlobalHawk, da Northrop Grumman, uma aeronave de grande porte, pilotada remotamente e utilizada pela NASA para pesquisas e pela Força Aérea e Marinha dos EUA para vigilância e segurança; esta aeronave pode atingir 20 km de altitude (GIBBS, 2014). A NASA também desenvolveu, em conjunto com a AeroVironment, um protótipo de uma aeronave de grande autonomia que utiliza células solares, cujos testes foram cancelados após uma queda no oceano. Alguns destes exemplos estão mostrados na Figura 21.



Figura 21 – Exemplos de RPAs, da esquerda para a direita: ScanEagle da Insitu-Boeing; GlobalHawk, da Northrop Grumman; e o protótipo Helios da AeroVironment (HOBBS, 2016, p. 1).

Balões cativos (ancorados ou rebocados por uma linha) também podem ser utilizados como plataforma para repetidoras. Eles podem chegar a altitudes de 1000 a 4000 metros dependendo do material utilizado. Podem ser abastecidos com gás hélio ou hidrogênio. O gás Hélio é preferível, pois não possui risco da explosão ou

incêndio, porém possui uma dificuldade de fornecimento natural. Desta forma, o hidrogênio é o mais empregado (CEFET-RJ, 2020).

Esse tipo de balão pode ser utilizado para testes do sistema Geolocal, pois são facilmente lançados e depois recolhidos para uso posterior. Também podem ser usados quando se quer cobrir uma área pequena como a de uma fazenda, por exemplo, ou em pequenas regiões da Antártica onde existem problemas com os sinais dos GNSS.

Uma outra plataforma possível para carregar a repetidora é o balão estratosférico, que atinge a camada da estratosfera terrestre, podendo ultrapassar 30 km de altitude. O balão é feito de um filme fino de polietileno que é preenchido com gás hélio.

Existem 2 tipos de balões estratosféricos: os sem pressão e os pressurizados. Os sem pressão são abertos na parte inferior e possuem dutos laterais que possibilitam que o gás escape quando este se expande com a altitude. Devido ao escape do gás, o tempo de voo deste balão é limitado a 3 dias nos modelos convencionais e a 15 dias nos modelos de longa duração. Os balões pressurizados, ou de alta pressão, são completamente selados impedindo o escape de gás e promovendo voos de longa duração, podendo atingir 100 dias de voo (ZELL, 2017).

A altitude de um balão é superior à de um RPA convencional, abrangendo uma maior área, e como permanece abaixo da ionosfera, a propagação do sinal não é afetada por ela. Porém, ambos possuem restrições quanto ao uso, principalmente em áreas urbanas e regiões específicas, como aquelas onde existem presídios e aeroportos.

Tanto o balão como o RPA podem portar uma repetidora com hardware próprio do sistema, e, portanto, contam com a vantagem de se poder controlar e medir o tempo de trânsito do sinal na repetidora,  $\delta R$ . Outra vantagem do balão e do RPA, é a velocidade de deslocamento, que é baixa e pode ser facilmente controlada.

Além da localização de alvos em terra, uma outra aplicação do Geolocal é a navegação de aeronaves, pilotadas ou não. No caso de aeronaves comerciais, que hoje são dependentes dos sistemas GPS e GLONASS, o Geolocal, tendo bases fixas espalhadas pelo território brasileiro, poderá ser capaz de promover a navegação de

aeronaves no país e, além disso, essas aeronaves podem ter a função de repetidoras para a geolocalização de um alvo na superfície terrestre, dentro do Brasil.

Os aviões comerciais mantêm altitude de cruzeiro nas regiões mais altas da troposfera, acima de 10 km, cobrindo uma área maior que os RPAs e os balões cativos, porém menor que os balões estratosféricos. A grande vantagem para a geolocalização é a grande quantidade de aeronaves já em circulação, porém, é possível que o hardware da repetidora não seja próprio do sistema Geolocal, mas de terceiros. Neste caso, o tempo de trânsito do sinal na repetidora,  $\delta R$ , se torna desconhecido e, portanto, deve ser determinado pelos próprios algoritmos do Geolocal.

Para que a quantidade de repetidoras seja menor, a plataforma precisa estar em altitudes maiores, onde o ângulo de elevação é maior. Nessas altitudes, estão os satélites de baixa órbita (LEO – *Low Earth Orbit*), em torno de 500 km, os de média órbita (MEO – *Medium Earth Orbit*), que incluem os atuais satélites de navegação, com altitude média de 20 mil km, e os geoestacionários (GEO – *Geostationary Orbit*), a aproximadamente, 36 mil km. Como o sinal, para chegar a esses satélites, precisa passar pela ionosfera, o modelo de propagação baseado em planos paralelos não é suficiente. Outros modelos precisam ser utilizados, como o de Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Content*). Esses métodos serão descritos mais adiante nesse documento.

Os satélites dos sistemas GNSS atuais (GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou) estão localizados na MEO, sendo que o sistema chinês BeiDou também utiliza satélites na GEO. Como as altitudes dessas órbitas são consideravelmente altas, pouco mais de 3 raios terrestres para a MEO e pouco menos de 6 raios terrestres para a GEO, cada satélite pode ser visto por uma grande área da superfície terrestre. Na prática, a área abrangida é menor, devido à necessidade de excluir baixos ângulos de elevação.

A velocidade de deslocamento dos satélites não é variável, como ocorre com RPAs, balões e aeronaves, e pode ser muito alta, pois a velocidade determina sua altitude orbital. Os satélites de navegação MEO possuem um período orbital de 12 horas, podendo ser visto por uma estação base na Terra 2 vezes ao dia, e os satélites GEO, por terem a velocidade orbital coincidente com a da Terra, aparentam ficar

estáticos para a estação base, aumentando, com isso, a precisão de medida devido à ausência de movimento relativo.

Apesar de abranger uma grande área da superfície, uma longa vida útil, que pode atingir 15 anos, o custo de lançamento e operação dos satélites é muito alto, porém existem modelos menos dispendiosos, bastante utilizados atualmente, o CubeSat e o TubeSat.

O CubeSat é um pequeno satélite em formato de cubo de dimensões 10 cm x 10 cm x 10 cm e que orbita a Terra a uma altitude média de 500 km. O TubeSat também é considerado um CubeSat, porém de formato cilíndrico, de 8,94 cm de diâmetro por 12,7 cm de largura. Os CubeSats possuem autonomia máxima de 1 ano, são simples de se construir, porém o lançamento costuma ser dispendioso, na faixa de 100 mil dólares. A Interorbital Systems, entretanto, já promoveu lançamentos de TubeSats, oferecendo construção e lançamento por apenas 8 mil dólares, a uma órbita de 310 km de altitude, portanto de maior arrasto atmosférico, permanecendo em órbita por, no máximo, 3 meses (DODSON, 2012). Cerca de 900 CubeSats já foram lançados até outubro de 2018 (KULU, 2018). O uso dos CubeSats no sistema Geolocal apresenta ser uma solução viável e de menor custo, comparado aos satélites de navegação atuais, e com uma altitude que permite um maior espaçamento entre bases.

Dessas plataformas mencionadas, a que seria mais adequada à fase de testes do sistema Geolocal é o RPA do tipo leve e de baixa altitude, por ser menos dispendioso; pela possibilidade de utilizar uma repetidora própria, e com isso, estimar com precisão o atraso devido à propagação do sinal na repetidora; pela desnecessidade de fazer uso de modelos mais sofisticados de propagação do sinal no meio atmosférico; e pela facilidade de controle de sobrevoo, podendo o RPA permanecer em uma posição estática durante os testes. Um RPA alimentado por placa solar pode ser ainda mais útil, já que a autonomia de voo é superior à de um RPA convencional, que é de 30 minutos, em média, aumentando assim a janela de testes do sistema Geolocal.

Durante a fase de operação, a primeira aplicação será a de navegação de uma plataforma que esteja portando uma repetidora, ou seja, a determinação de sua posição em um determinado instante. O sistema Geolocal poderá ser útil na determinação de posição de RPAs e aviões comerciais.

A navegação de RPAs normalmente é restrita a uma pequena área local para realização de atividade temporária, como mapeamento aéreo, acompanhamento de obras, exploração de áreas de mineração, busca de criminosos, vigilância e controle de fronteiras, entrega de suprimentos, pesquisa arqueológica, entre outros. Para isso, serão necessárias instalações de bases portáteis fixadas em pontos estratégicos, mas de coordenadas geográficas conhecidas. Como a atividade é normalmente temporária, para determinar a posição das bases portáteis, pode ser necessário utilizar outro sistema de navegação, ou até mesmo o Geolocal, quando este estiver disponível para a localização de alvo em terra.

Os aviões comerciais podem se beneficiar do sistema Geolocal em uma área de alcance maior, por exemplo, dentro do território brasileiro. Isso implicaria em uma distribuição de bases fixas, sincronizadas entre si e espalhadas por todo o país, em posições previamente definidas que proporcionem o menor erro possível, para a altitude desses aviões, entre 10 e 11 km, quando em cruzeiro. Próximo aos aeroportos, onde a altitude é menor durante decolagens e aterrissagens, é preciso incluir uma quantidade maior de bases fixas, para diminuir a distância entre elas, já que, quanto menor a altitude, as bases devem estar mais próximas umas das outras.

Caso os aviões comerciais venham a portar repetidoras, eles também serão úteis no georreferenciamento de alvos na superfície terrestre. Como já existe uma grande frota no território brasileiro, eles poderão fazer parte de uma rede aérea de repetidoras, onde poderão ser incluídos balões estratosféricos em áreas de menor movimento e CubeSats, que estão na órbita LEO. Essas plataformas, aviões comerciais, balões estratosféricos e CubeSats, por estarem em altitudes inferiores às dos satélites nas órbitas MEO e GEO, possuem um atraso de propagação no meio atmosférico menor, e, portanto, o erro de medida de posição diminui. Entretanto, caso o hardware das repetidoras utilizado nessas plataformas não seja próprio, é necessário acrescentar a função de minimização para estimar o atraso de propagação na repetidora.

#### 4.2 PDOP (POSITION DILUTION OF PRECISION)

Para que o sistema Geolocal possa fornecer dados de posicionamento com acurácia elevada, é indispensável o conhecimento, cálculo ou estimativa de algumas incertezas como os atrasos na transmissão e recepção dos sinais, os atrasos na

propagação do sinal no meio e o sincronismo dos relógios das bases. Além disso, algumas incertezas podem ser geradas pela distribuição inadequada das bases no solo. Essa distribuição pode ser analisada através do cálculo do valor do PDOP (*Position Dilution of Precision*).

O PDOP é um coeficiente que depende da geometria do sistema, ou seja, da distribuição de seus componentes, e é utilizado para determinar o desvio padrão do erro cometido na determinação da posição da repetidora ( $\sigma$ ). Este desvio padrão pode ser obtido multiplicando-se o valor do PDOP pelo desvio padrão do erro das medidas de distâncias entre cada base e a repetidora ( $\sigma_0$ ) conforme visto na Equação 17 (LANGLEY, 1999).

$$\sigma = PDOP \cdot \sigma_0 \quad (17)$$

O cálculo a seguir, ilustrado por Dana (1996), emprega o sistema de coordenadas ECEF (*Earth Centered, Earth Fixed*) e considera modelos com 4 bases (A, B, C e D) e 1 repetidora (R), que é o caso do Sistema Geolocal. Os dados de entrada são as coordenadas x, y e z das bases ( $A_x, A_y, A_z, B_x, B_y, B_z, C_x, C_y, C_z, D_x, D_y$  e  $D_z$ ) e as coordenadas da repetidora ( $R_x, R_y, R_z$ ). As distâncias entre as bases e a repetidora (AR, BR, CR e DR) podem ser determinadas utilizando o conjunto de Equações 18.

$$\begin{aligned} AR &= \sqrt{(A_x - R_x)^2 + (A_y - R_y)^2 + (A_z - R_z)^2} \\ BR &= \sqrt{(B_x - R_x)^2 + (B_y - R_y)^2 + (B_z - R_z)^2} \\ CR &= \sqrt{(C_x - R_x)^2 + (C_y - R_y)^2 + (C_z - R_z)^2} \\ DR &= \sqrt{(D_x - R_x)^2 + (D_y - R_y)^2 + (D_z - R_z)^2} \end{aligned} \quad (18)$$

Após a determinação das distâncias os valores são empregados na matriz A, Equação 19. Suas 3 primeiras colunas correspondem às componentes x, y e z do versor das distâncias entre cada base e a repetidora, e a última coluna é utilizada para o cálculo do fator de diluição de tempo.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{Ax - Rx}{AR} & \frac{Ay - Ry}{AR} & \frac{Az - Rz}{AR} & -1 \\ \frac{Bx - Rx}{BR} & \frac{By - Ry}{BR} & \frac{Bz - Rz}{BR} & -1 \\ \frac{Cx - Rx}{CR} & \frac{Cy - Ry}{CR} & \frac{Cz - Rz}{CR} & -1 \\ \frac{Dx - Rx}{DR} & \frac{Dy - Ry}{DR} & \frac{Dz - Rz}{DR} & -1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

A matriz P, Equação 20, é definida como a matriz inversa da matriz transposta de A multiplicada pela própria matriz A.

$$P = (A^t \cdot A)^{-1} \quad (20)$$

Para o cálculo de P, o determinante de  $A^t \cdot A$  não pode ser nulo. Se o resultado for nulo, é necessário alterar um dos elementos da matriz adicionando um número desprezível a ele para que o determinante não resulte em zero.

Finalmente, o valor do PDOP é determinado utilizando 3 elementos da matriz P, como mostra a Equação 21.

$$PDOP = \sqrt{P_{0,0} + P_{1,1} + P_{2,2}} \quad (21)$$

No caso de o modelo apresentar mais de 4 bases, são acrescentadas novas linhas à matriz A, com o mesmo padrão (MACHO, 2018).

Quanto menor o valor do PDOP maior a acurácia dos dados (CELLMER, 2004). Tem-se que um PDOP de valor igual ou inferior a 1 é o ideal, contudo para as aplicações desejadas, são aceitáveis os valores até 4.

Valor menor de PDOP implica melhor geometria, e existem algumas formas de diminuir este valor, como aumentar o número de bases e evitar que as bases fiquem alinhadas em relação à repetidora. Outra forma de diminuir o PDOP é melhorar a distribuição das bases, de forma que as esferas de distâncias centradas nas bases interceptem a repetidora onde, ao incluir uma incerteza de distância, para mais ou para menos, a região interna da intersecção seja a menor possível, como mostra a Figura 22a. A Figura 22b mostra uma geometria desfavorável, pois a região de intersecção é maior. As interseções mostradas nas Figura 22a e 22b são conhecidas como regiões de incerteza, e a precisão do sistema da Figura 22b é considerada como diluída em relação a da Figura 22a (LANGLEY, 1999, p. 52-53).

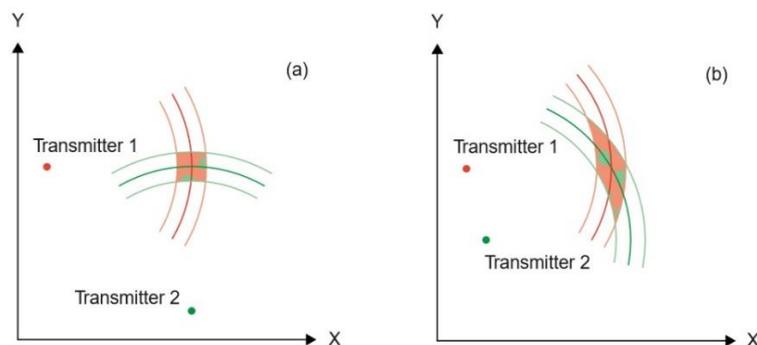


Figura 22 – Geometria de um sistema de localização de uma repetidora, onde a região de intersecção indica a incerteza de posição: em (a) a região de incerteza é menor, portanto em (b) a diluição de precisão é maior (LANGLEY, 1999, p. 52).

Simulações incluindo análise de PDOP podem ser vistas em Macho (2018).

### 4.3 DISTRIBUIÇÃO DE BASES E RAIÃO DE COBERTURA

Como visto, a posição de uma repetidora pode ser determinada através da trilateração feita a partir de um conjunto de bases em terra. O estudo a seguir tem o objetivo de determinar o espaçamento ideal entre as bases para uma repetidora posicionada em altitude fixa considerando o menor valor de PDOP e a menor quantidade de bases necessárias. Para isto, foram feitas simulações utilizando algoritmos desenvolvidos no software MATLAB. Esta parte do projeto gerou artigo publicado em congresso internacional (FRIOLANI; FULLER; PAMBOUKIAN, 2019) e um projeto de Iniciação Científica (FRIOLANI, 2020).

#### 4.3.1 Espaçamento entre bases com repetidora fixa

O primeiro algoritmo criado para esse estudo tem como objetivo determinar o espaçamento ideal entre as bases. Para tanto, supõe-se a existência de uma rede de bases em terra com espaçamento constante (uma distribuição em forma de matriz). Este algoritmo pode ser visto no Apêndice B.

A quantidade de bases que podem ser acessadas pela repetidora pode ser determinada impondo-se um raio de cobertura, considerando o ângulo de  $15^\circ$  entre a horizontal e a linha de visada entre as bases e a repetidora de acordo com a Figura 23. O ângulo de  $15^\circ$  foi escolhido para evitar interferência de árvores, construções e outros tipos de obstáculos.

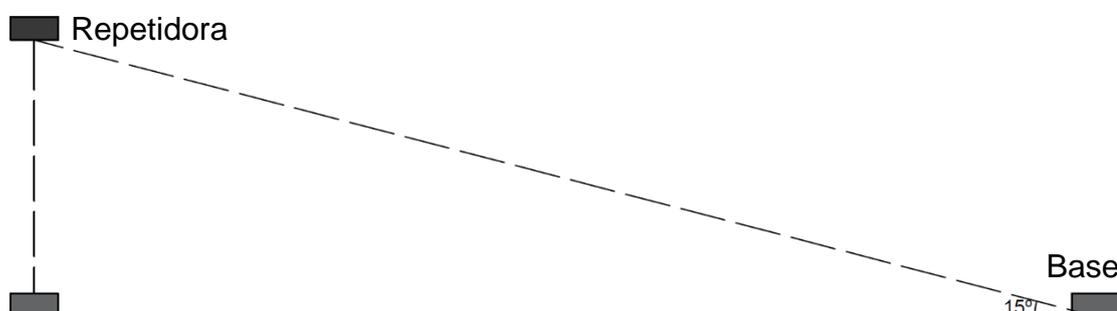


Figura 23 – Representação gráfica do raio de cobertura (Autoria própria)

Desta forma, dependendo da altitude da repetidora e do espaçamento entre as bases, uma quantidade determinada de bases poderá ser acessada pela repetidora dentro do seu raio de cobertura para que sua posição seja determinada. As demais bases serão descartadas por estarem muito longe e abaixo do ângulo de visada de  $15^\circ$ . Vale ressaltar que uma base, mesmo dentro da área de cobertura, também pode ser descartada por gerar um PDOP muito alto.

Para este estudo, a altura da repetidora foi considerada fixa e o espaçamento entre as bases foi sendo alterado para que se pudesse determinar o espaçamento ideal. Também se considerou a repetidora posicionada no zênite de uma das bases.

Após a determinação da quantidade de bases dentro da área de cobertura e suas respectivas coordenadas, foi calculado o coeficiente PDOP para todas as combinações possíveis de bases,  $C(n,p)$ . Por exemplo, se existem  $n = 21$  bases dentro da área de cobertura, é feita a combinação de  $p$  em  $p$ , ou seja, de 4 em 4 (número mínimo de bases), 5 em 5, 6 em 6, até o número total  $n$ .

Para a primeira simulação, a repetidora foi fixada na posição  $(0, 0, 120)$ . A altura de 120m corresponde à altura máxima permitida para voos com Drones, uma das possíveis plataformas para portar a repetidora, e as coordenadas  $(0,0)$  correspondem à base que fica no centro da área de cobertura. Neste caso o raio de cobertura é de 447,85m considerando elevação mínima de  $15^\circ$ . Os resultados da simulação com espaçamento variando de 150m a 400m com passo de 25m são mostrados na Tabela

3, que os relaciona com a quantidade total de bases e os valores do PDOP para configurações com 4 bases, 5 bases e com o número total de bases.

Tabela 3 – Espaçamento entre as bases para repetidora a 120m de altitude (Autoria própria)

| <b>Espaçamento (m)</b> | <b>Quantidade total de bases</b> | <b>PDOP para 4 bases</b> | <b>PDOP para 5 bases</b> | <b>PDOP para o total de bases</b> |
|------------------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 150                    | 25                               | 2.12                     | 1.85                     | 1.30                              |
| 175                    | 21                               | 2.06                     | 1.90                     | 1.39                              |
| 200                    | 21                               | 1.98                     | 1.83                     | 1.37                              |
| 225                    | 9                                | 2.37                     | 2.03                     | 1.87                              |
| 250                    | 9                                | 2.27                     | 1.96                     | 1.81                              |
| 275                    | 9                                | 2.19                     | 1.90                     | 1.75                              |
| 300                    | 9                                | 2.13                     | 1.85                     | 1.70                              |
| 325                    | 5                                | 2.40                     | 2.02                     | 2.02                              |
| 350                    | 5                                | 2.35                     | 1.96                     | 1.96                              |
| 375                    | 5                                | 2.30                     | 1.92                     | 1.92                              |
| 400                    | 5                                | 2.27                     | 1.88                     | 1.88                              |

Pode-se observar que todos os valores do coeficiente obtidos são aceitáveis, ou seja, são menores ou iguais a 4. Pode-se perceber também que o valor do PDOP diminui à medida que o número de bases cresce.

#### **4.3.2 Espaçamento entre bases com repetidora em movimento**

Considerando-se que a repetidora poderá estar em movimento durante o funcionamento do sistema, é importante considerar o pior caso de posicionamento na escolha do espaçamento ideal. Para analisar esta situação foi criado um algoritmo (Apêndice C) com o objetivo de variar a posição da repetidora, já que na simulação anterior a repetidora estava sempre na perpendicular de uma das bases, que já foi comprovado por simulações anteriores ser a melhor condição do sistema.

Neste algoritmo, a altitude se mantém constante e a variação ocorre ao longo dos eixos x e y, da posição (0,0) até a posição (espaçamento/2, espaçamento/2), que seria o pior caso encontrado para a repetidora dentro do raio de cobertura, conforme a Figura 24.

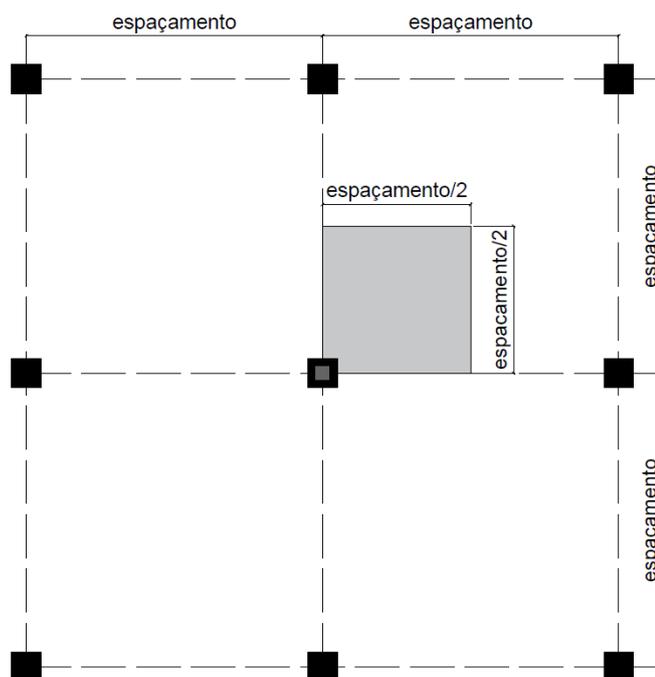


Figura 24 – Variação da posição da repetidora em uma quadrícula (Autoria própria).

Nesta figura, as bases são representadas por quadrados pretos, a repetidora é representada por um quadrado pequeno cinza e a área de variação da posição da repetidora em cinza claro. A simulação não foi feita para toda a área de cobertura devido à proporcionalidade da disposição das bases e a dualidade dos resultados. Para esse algoritmo manteve-se os passos da simulação anterior com a diferença de não haver variação do espaçamento, mas da posição da repetidora.

A Tabela 4, mostra que os piores valores de PDOP ocorreram nas posições em que a repetidora estava nas coordenadas  $(\text{espaçamento}/2, \text{espaçamento}/2)$  e os melhores valores de PDOP ocorreram na posição onde a repetidora se encontra no zênite de uma das bases.

Nesta segunda simulação, nem todos os resultados de PDOP são aceitáveis, descartando algumas opções de espaçamento, destacadas em vermelho na Tabela 4, em conjunto com o espaçamento de 225m por gerar um PDOP muito próximo do limite aceitável.

Tabela 4 – Melhores e piores valores de PDOP para cada espaçamento (Autoria própria)

| Espaçamento (m) | Quantidade de bases | Melhor PDOP na simulação |      | Pior PDOP na simulação |      |
|-----------------|---------------------|--------------------------|------|------------------------|------|
|                 |                     | Posição da repetidora    | PDOP | Posição da repetidora  | PDOP |
| 150             | 25                  | (0, 0, 120)              | 1.30 | (75, 75, 120)          | 2.50 |
| 175             | 21                  | (0, 0, 120)              | 1,39 | (87.5, 87.5, 120)      | 2.83 |
| 200             | 21                  | (0, 0, 120)              | 1.37 | (100, 100, 120)        | 2.89 |
| 225             | 9                   | (0, 0, 120)              | 1.89 | (112.5, 112.5, 120)    | 3.97 |
| 250             | 9                   | (0, 0, 120)              | 1.81 | (125, 125, 120)        | 4.10 |
| 275             | 9                   | (0, 0, 120)              | 1.75 | (137.5, 137.5, 120)    | 4.26 |
| 300             | 9                   | (0, 0, 120)              | 1.70 | (150, 150, 120)        | 4.44 |
| 325             | 5                   | (0, 0, 120)              | 2.02 | (162.5, 163.5, 120)    | 5.85 |
| 350             | 5                   | (0, 0, 120)              | 1.96 | (175, 175, 120)        | 6.04 |
| 375             | 5                   | (0, 0, 120)              | 1.92 | (187.5, 187.5, 120)    | 6.23 |
| 400             | 5                   | (0, 0, 120)              | 1.88 | (200, 200, 120)        | 6.45 |

De acordo com as tabelas 3 e 4, podemos concluir que o melhor espaçamento seria o de 200m, pois tem o menor número de bases com o valor de PDOP dentro do limite estipulado.

Considerando-se a altitude de 120m e o espaçamento de 200m é possível analisar a combinação de bases seleccionadas pelo algoritmo. Tem-se na Figura 25 a disposição ideal para 4 e 5 bases destacada em azul e a área de cobertura delimitada pelo círculo em vermelho.

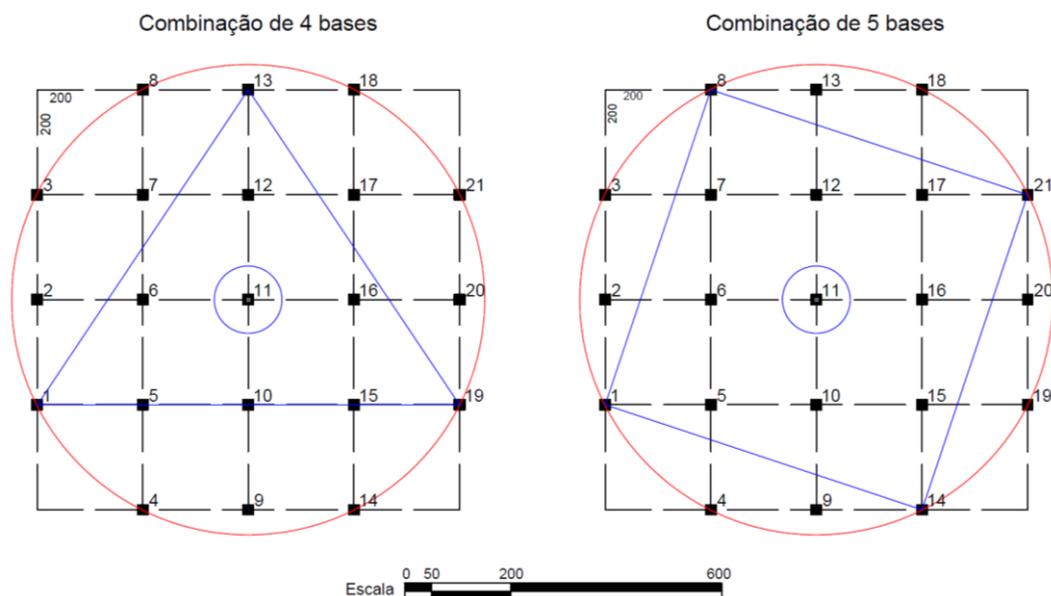


Figura 25 – Combinação de 4 e 5 bases e área de cobertura (Autoria própria).

Como em estudos anteriores, ressalta-se que para 4 bases, a melhor disposição seria feita em forma de triângulo equilátero com uma das bases no centro e a repetidora na perpendicular dessa base central. Na simulação, o algoritmo selecionou as bases 1, 11, 13 e 19. Já para 5 bases, a melhor configuração é um quadrado com uma base no centro, sendo selecionadas as bases 1, 8, 11, 14 e 21, mantendo a posição da repetidora também na perpendicular da base central.

As duas simulações realizadas anteriormente nesta seção supõem a repetidora a bordo de um drone a 120m de altura. Esta é uma boa opção para os primeiros testes do protótipo do Geolocal. Uma outra opção viável para os testes é a utilização de um balão cativo a 500m de altura.

Desta forma, as simulações foram realizadas novamente para uma repetidora posicionada a 500m de altura. Para efeito de comparação, utilizou-se espaçamentos proporcionais aos das simulações anteriores. A razão entre as alturas da repetidora nos dois casos é 0,24 (ou seja, 120/500). A mesma razão foi utilizada para o espaçamento das bases. Na Tabela 5 pode-se visualizar a simulação para 3 espaçamentos: 833.3m (correspondente a 200m nas simulações anteriores), 937.5m (correspondente a 225m nas simulações anteriores) e 1041.7m (correspondente a 250m nas simulações anteriores).

Tabela 5 – Simulações para repetidora a 500m de altura (Autoria própria)

| Espaçamento (m) | Quantidade de bases | PDOP para 4 bases | PDOP para 5 bases | PDOP para o total de bases | Pior PDOP             |      |
|-----------------|---------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|-----------------------|------|
|                 |                     |                   |                   |                            | Posição da Repetidora | PDOP |
| 833.3           | 21                  | 1.98              | 1.83              | 1.37                       | (416.6, 416.6, 120)   | 2.89 |
| 937.5           | 9                   | 2.37              | 2.03              | 1.89                       | (468.8, 468.8, 120)   | 3.97 |
| 1041.7          | 9                   | 2.27              | 1.96              | 1.81                       | (520.9, 520.9, 120)   | 4.10 |

Comparando-se os PDOPs das tabelas 3 e 5, para um mesmo espaçamento (proporcional), pode-se perceber que os valores se mantêm. Desta forma, podemos afirmar que o PDOP é invariante à escala, ou seja, se as proporções físicas foram mantidas, o resultado do PDOP será o mesmo.

Sendo assim, é possível calcular, sem necessidade de mais simulações, os espaçamentos ideais e os raios de cobertura para outras alturas possíveis para a plataforma da repetidora, considerando um terreno plano, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Espaçamento e altitude ideais para cada plataforma da repetidora (Autoria própria)

| <b>Plataforma</b>        | <b>Altitude (m)</b> | <b>Espaçamento (m)</b> | <b>Raio de cobertura (m)</b> |
|--------------------------|---------------------|------------------------|------------------------------|
| Drone ou RPA             | 120                 | 200                    | 448                          |
| Balão cativo             | 500                 | 833                    | 1.866                        |
| Aeronave Comercial       | 10.000              | 16.667                 | 37.321                       |
| Balão Estratosférico     | 25.000              | 41.667                 | 83.302                       |
| Cubesat                  | 600.000             | 1.000.000              | 2.239.230                    |
| Satélite                 | 20.000.000          | 33.333.333             | 74.641.016                   |
| Satélite Geoestacionário | 36.000.000          | 60.000.000             | 134.353.829                  |

Na verdade, os valores da Tabela 6 para drones e balões cativos, onde o raio de cobertura é pequeno, estão bem próximos da realidade, pois pode-se desconsiderar a curvatura da Terra até uma distância de mais ou menos 2km. Porém, para plataforma posicionadas em alturas bem maiores (satélites, por exemplo) é necessário levar em consideração a curvatura da Terra e outros fatores, necessitando de cálculos mais específicos com base em coordenadas esféricas. Neste caso, os valores da Tabela 6 são apenas uma estimativa grosseira.

#### 4.4 ANÁLISE GRÁFICA DO PDOP

Nesta seção, são realizadas simulações em MATLAB que permitem verificar visualmente a influência da quantidade de bases no cálculo do PDOP e a área de navegação da repetidora dentro de um sistema Geolocal.

A área escolhida para as simulações é o campus Alphaville da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM), localizado no município Barueri, São Paulo (Figura 26), que possui cerca de 750.000 m<sup>2</sup>. O espaço é potencialmente propício para alocar a fase de testes de campo dos protótipos do sistema Geolocal.



Figura 26 – Campus Alphaville da UPM (adaptado de Google Inc.)

#### 4.4.1 O algoritmo

Considerando as conclusões vistas em Cellmer (2004), adaptadas ao sistema de navegação em estudo, quanto maior a quantidade de bases, mais baixos serão os valores de PDOP possíveis de serem encontrados. As simulações desta seção foram feitas para 4 bases e 5 bases, porém o algoritmo (Apêndice D e Figura 27) pode ser modificado para a quantidade de bases necessária a qualquer simulação.

Tem-se como dados de entrada a posição das bases e os pontos que determinam os limites da área onde a repetidora pode ser posicionada (latitudes, longitudes e altitudes, máximos e mínimos). As informações são fornecidas no sistema LLA (Latitude, Longitude, Altitude) e convertidas para ECEF durante o processo, viabilizando os cálculos do PDOP e dos ângulos entre a plataforma e a repetidora.

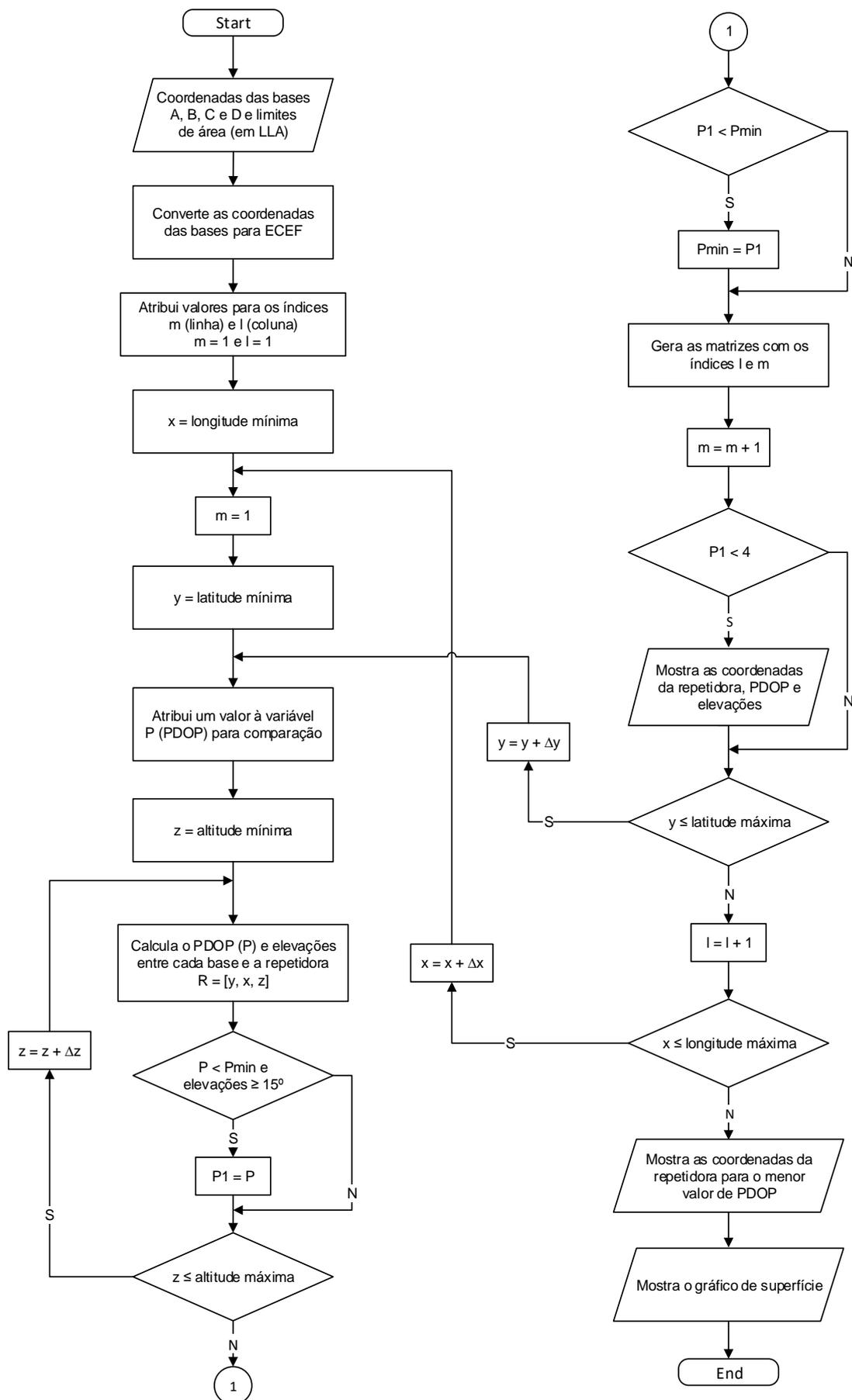


Figura 27 – Algoritmo para visualização do PDOP (Autoria própria)

Para analisar todas as posições possíveis para a repetidora R, são programados três laços de repetição que irão percorrer as coordenadas LLA da área pré-estabelecida com um determinado passo ( $\Delta x$  para longitude,  $\Delta y$  para latitude e  $\Delta z$  para altitude). Para cada uma das posições da repetidora, são calculados o valor do PDOP e ângulo de elevação, sendo testados, para cada combinação de latitude e longitude, a altitude de R que resulta no menor PDOP e ângulos de elevação maiores que  $15^\circ$ . As posições da repetidora e seus respectivos valores de PDOP são gravados em quatro matrizes: Latitude, Longitude, Altitude e PDOP.

A melhor coordenada para a repetidora, de acordo com a distribuição de bases simulada, é determinada a partir da comparação dos valores de PDOP de cada posição. O algoritmo apresenta uma lista com as coordenadas da repetidora (em LLA) que geram valores de PDOP aceitáveis, mostrando as elevações entre cada base e a repetidora (em graus), além do valor do PDOP para aquela posição.

Por último, é construído um gráfico de superfície a partir das matrizes geradas. O gráfico apresenta em seus eixos x, y e z, a Longitude, Latitude e Altitude, respectivamente, e sua superfície é colorida de acordo com o valor de PDOP naquele ponto usando uma escala de cores, possibilitando a visualização das posições da repetidora no espaço e o coeficiente gerado em relação às bases também indicadas no gráfico, possibilitando uma melhor interpretação dos resultados obtidos.

Para as simulações realizadas foram utilizadas como dados de entrada as coordenadas de quatro bases para a primeira simulação e de cinco bases para a segunda simulação, além dos limites de área, e foram analisados os valores mínimos de PDOP e o gráfico de superfície gerado em cada caso.

#### **4.4.2 Simulação com 4 bases**

A área analisada corresponde ao retângulo em branco da Figura 28, limitado pelas latitudes  $-23.48856^\circ$  e  $-23.48302^\circ$  e pelas longitudes  $-46.83752^\circ$  e  $-46.82892^\circ$ , com altitudes entre 750m e 2000m.

Nesta simulação foram utilizadas as coordenadas de quatro bases (A, B, C e D), como descrito na Tabela 7.

A simulação gerou o gráfico de superfície da Figura 29, que mostra as regiões de PDOP mais favoráveis e as respectivas altitudes.



Figura 28 – Área de estudo e distribuição das bases na simulação com 4 bases (Autoria própria)

Tabela 7 – Coordenadas das 4 Bases (Autoria própria)

| Bases | Coordenadas (LLA)           |
|-------|-----------------------------|
| A     | [-23.48482, -46.83155, 780] |
| B     | [-23.48658, -46.83680, 762] |
| C     | [-23.48740, -46.83401, 772] |
| D     | [-23.48396, -46.83431, 753] |

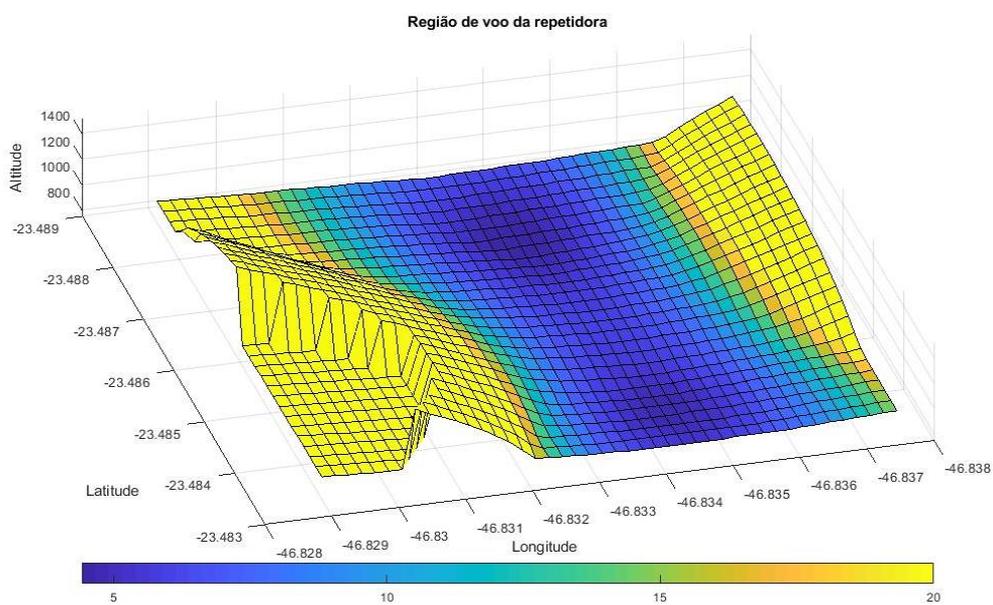


Figura 29 – Gráfico de superfície da região de voo da repetidora para 4 bases (Autoria própria)

Nesta simulação, o melhor coeficiente PDOP encontrado foi 4.40, com a repetidora na posição  $[-23.4875, -46.8339, 881.0000]$  (em LLA), indicada com um “X” na Figura 30. A localização das bases nesta figura é indicada por círculos vermelhos. Novamente pode-se notar que o maior PDOP está próximo ao zênite de uma das bases. Os ângulos de elevação entre cada base e a repetidora para o ponto de melhor PDOP estão dispostos na Tabela 8.

Tabela 8 – Ângulos de elevação entre base e repetidora para quatro bases (Autoria própria)

| Base | Ângulo de Elevação |
|------|--------------------|
| A    | 15,02°             |
| B    | 20,71°             |
| C    | 81,77°             |
| D    | 18,16°             |

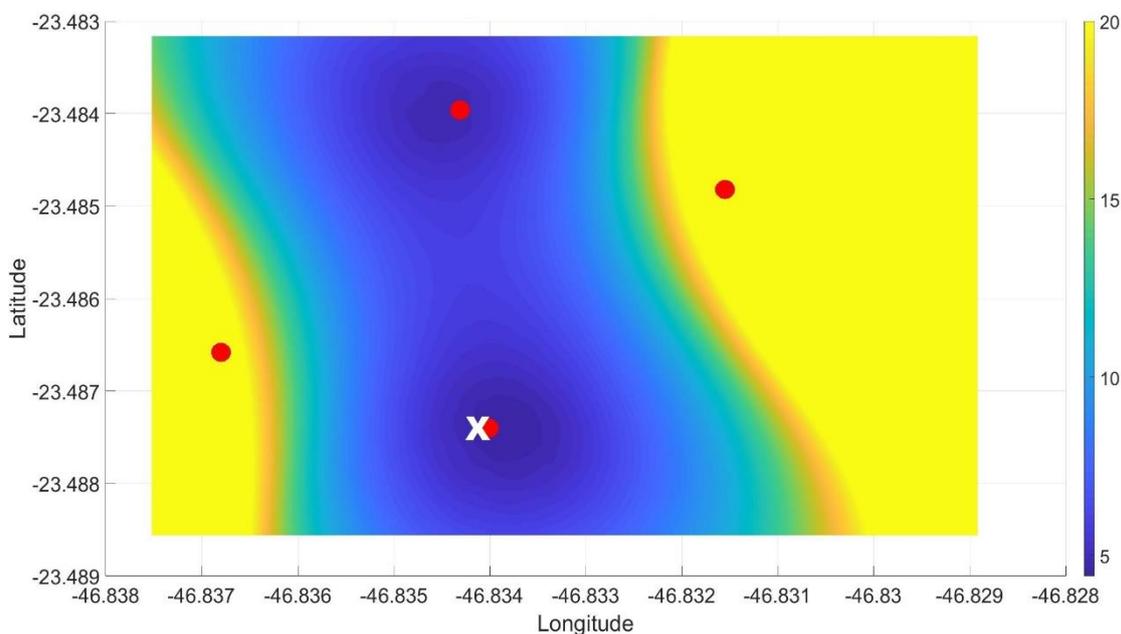


Figura 30 – Vista superior do gráfico de superfície: a posição das quatro bases e o ponto de melhor PDOP (Autoria própria)

#### 4.4.3 Simulação com 5 bases

Nesta simulação, foi acrescentada a Base E dentro da mesma área de estudo (em branco, na Figura 31).

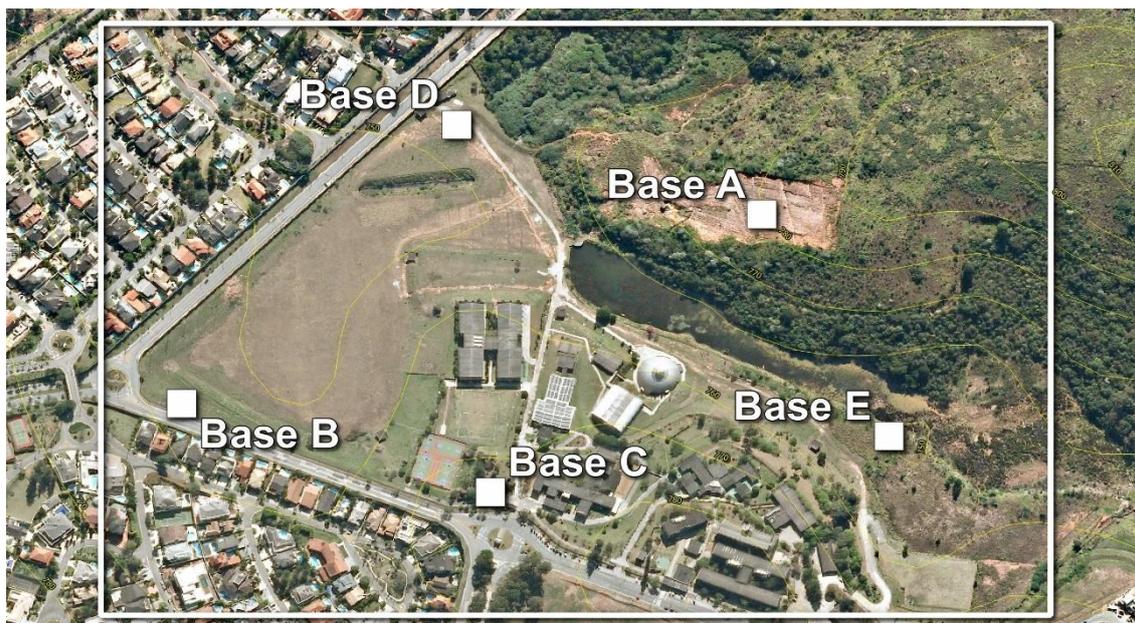


Figura 31 – Área de estudo e distribuição das bases na simulação com 5 bases (Autoria própria)

As coordenadas das bases A, B, C, D e E) são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Coordenadas das 5 Bases (Autoria própria)

| Bases | Coordenadas                 |
|-------|-----------------------------|
| A     | [-23.48482, -46.83155, 780] |
| B     | [-23.48658, -46.83680, 762] |
| C     | [-23.48740, -46.83401, 772] |
| D     | [-23.48396, -46.83431, 753] |
| E     | [-23.48689, -46.83040, 750] |

A partir desta simulação, foi gerado o gráfico de superfície das posições da repetidora e valores de PDOP vistos na Figura 32.

O melhor PDOP encontrado para essa distribuição de bases foi 2.82, para a repetidora nas coordenadas [-23.4875, -46.8339, 881.0000] (em LLA), marcado em “X” na Figura 33.

Os ângulos de elevação entre cada base e a repetidora para o ponto de melhor PDOP na simulação com 5 bases estão dispostos na Tabela 10.

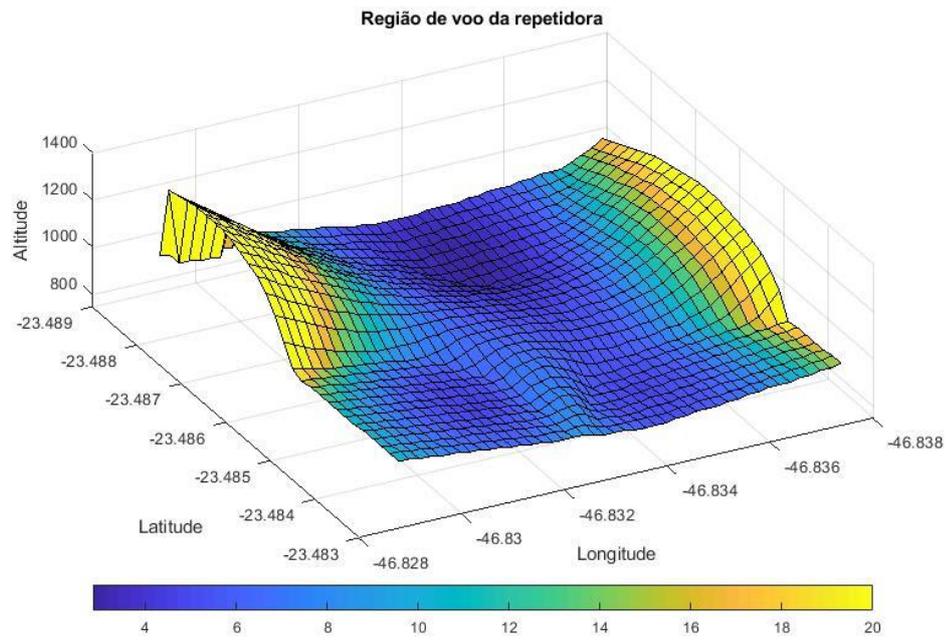


Figura 32 – Gráfico de superfície da região de voo da repetidora para 5 bases (Autoria própria)

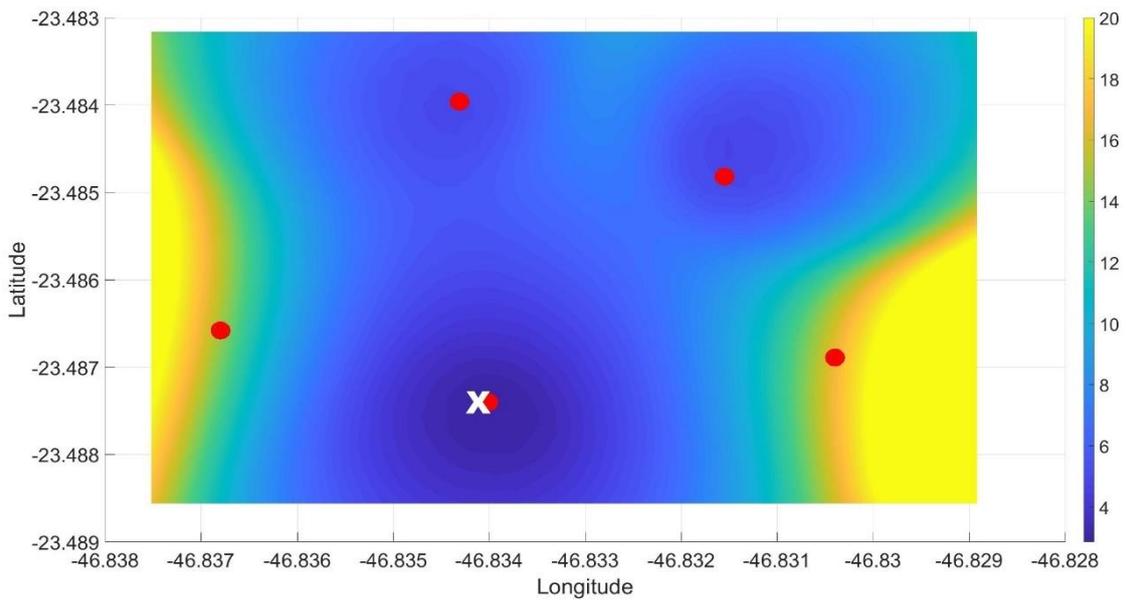


Figura 33 – Vista superior do gráfico de superfície: a posição das cinco bases e o ponto de melhor PDOP (Autoria própria)

Tabela 10 – Ângulos de elevação entre base e repetidora para cinco bases (Autoria própria)

| <b>Base</b> | <b>Ângulo de Elevação</b> |
|-------------|---------------------------|
| A           | 15,02°                    |
| B           | 20,71°                    |
| C           | 81,77°                    |
| D           | 18,16°                    |
| E           | 19,99°                    |

#### 4.4.4 Analisando as simulações

Analisando os resultados gerados nesta seção, pode-se confirmar que os menores valores de PDOP realmente são obtidos quando a repetidora está próxima ao zênite de uma das bases, evidenciado tanto na simulação com quatro bases quanto na simulação com cinco bases.

Ao comparar a primeira simulação com a segunda, em que uma base foi acrescentada à formação anterior, o menor valor de PDOP resultante passou de 4.40 para 2.82. Portanto, como esperado, uma maior quantidade de bases fez com que o coeficiente PDOP encontrado fosse menor.

Além do valor do PDOP ter sido mais baixo, a área da região de voo aproveitável, ou seja, posições onde a repetidora gera valores de PDOP baixos, na simulação com cinco bases é maior que na simulação com apenas quatro bases. Isso pode ser visto comparando-se as figuras 30 e 33.

Tendo em vista os resultados discutidos anteriormente, pode-se concluir que a melhor distribuição de bases deve considerar, além do menor valor de PDOP encontrado para uma posição de repetidora, a maior região de voo aproveitável, já que a plataforma da repetidora possivelmente estará em movimento durante o funcionamento do sistema.

#### 4.5 POSSÍVEIS LOCAIS DE TESTE PARA O PROTÓTIPO DO GEOLocal

O projeto Geolocal é composto de diversas fases (Apêndice A), onde as primeiras etapas podem ser realizadas em locais de propriedade da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM) ou do Instituto Presbiteriano Mackenzie (IPM).



O campus Higienópolis da UPM está sendo utilizado para o desenvolvimento do protótipo do Geolocal e para os primeiros testes de bancada dos equipamentos de rádio que serão a base do sistema. Acredita-se também que será possível utilizar este local para fazer testes na próxima fase onde se pretende medir a distância entre 2 bases, procedimento este que é fundamental para o funcionamento do Geolocal.

Testes de integração e comunicação, além de estudos teórico-práticos com potencial para geração de patentes (sincronização de relógios, determinação de atrasos na propagação de sinais e outros), também serão feitos no LABGEO.

Porém, para testes práticos mais elaborados, a localização do campus Higienópolis da UPM é bastante desfavorável. É uma região de muita interferência e voos de drones dificilmente são autorizados devido à existência de muitos helipontos nas proximidades.

#### 4.5.2 Campus da UPM em Alphaville

O campus Alphaville da UPM, localizado no município de Barueri/SP (Figura 35), possui 750.000 m<sup>2</sup> e é uma boa opção para testes iniciais do Geolocal.



Figura 35 – Campus Alphaville da UPM (adaptado de Google Inc.)

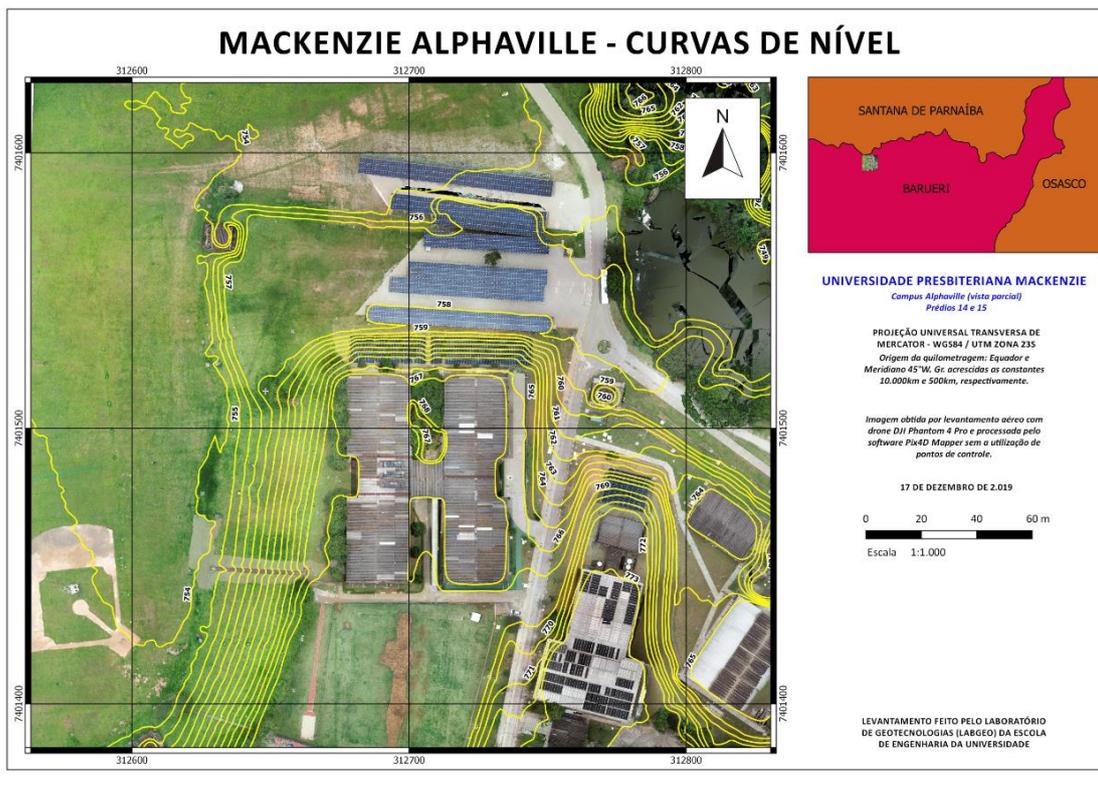


Figura 36 – Campus Alphaville da UPM – Levantamento com drone (Curvas de nível) (Autoria própria)

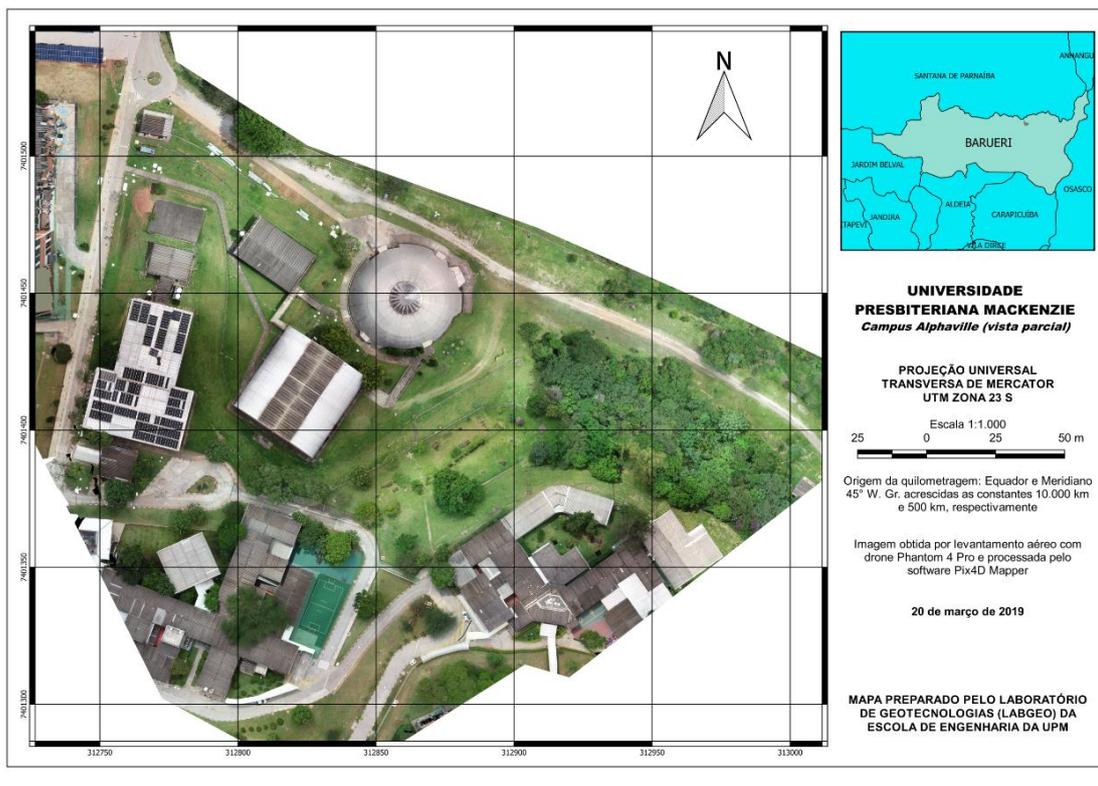


Figura 37 – Campus Alphaville da UPM – Levantamento com drone (Ortomosaico) (Autoria própria)

Diversos voos de drone já foram feitos pela equipe do LABGEO sobre este campus para mapear a área (Figuras 36 e 37). Imagens e vídeos estão disponíveis em:

<https://www.mackenzie.br/universidade/laboratorio/ee/labgeo/drones-e-gnss/>

A área do campus Alphaville, devido à sua dimensão, é excelente para testes de trilateração utilizando 4 bases e 1 repetidora baixa (drone ou balão).

O único inconveniente é a proximidade de um heliponto localizado no centro comercial de Alphaville cuja área de segurança de raio 1000m sobrepõe parte do terreno do campus (Figura 38). Normalmente a altura de voo autorizada pelo DECEA nesta área fica em torno de 30m. Para voos em altura superior, respeitando o limite permitido por norma que é de 120m, é necessária uma autorização da empresa que controla o heliponto.



Figura 38 – Campus Alphaville da UPM – Localização de Heliponto (Autoria própria)

### 4.5.3 Radio Observatório Pierre Kaufmann (ROPK) em Atibaia

O Radio Observatório Pierre Kaufmann (ROPK) localizado em Atibaia/SP também é uma ótima opção para os primeiros testes do Geolocal.

Em visita realizada em março de 2020, foram feitos dois voos circulares a 30m de altura para reconhecimento da área (Figura 39). O modelo 3D do observatório pode ser visto em vídeo em:

<https://www.mackenzie.br/universidade/laboratorio/ee/labgeo/drones-e-gnss/>

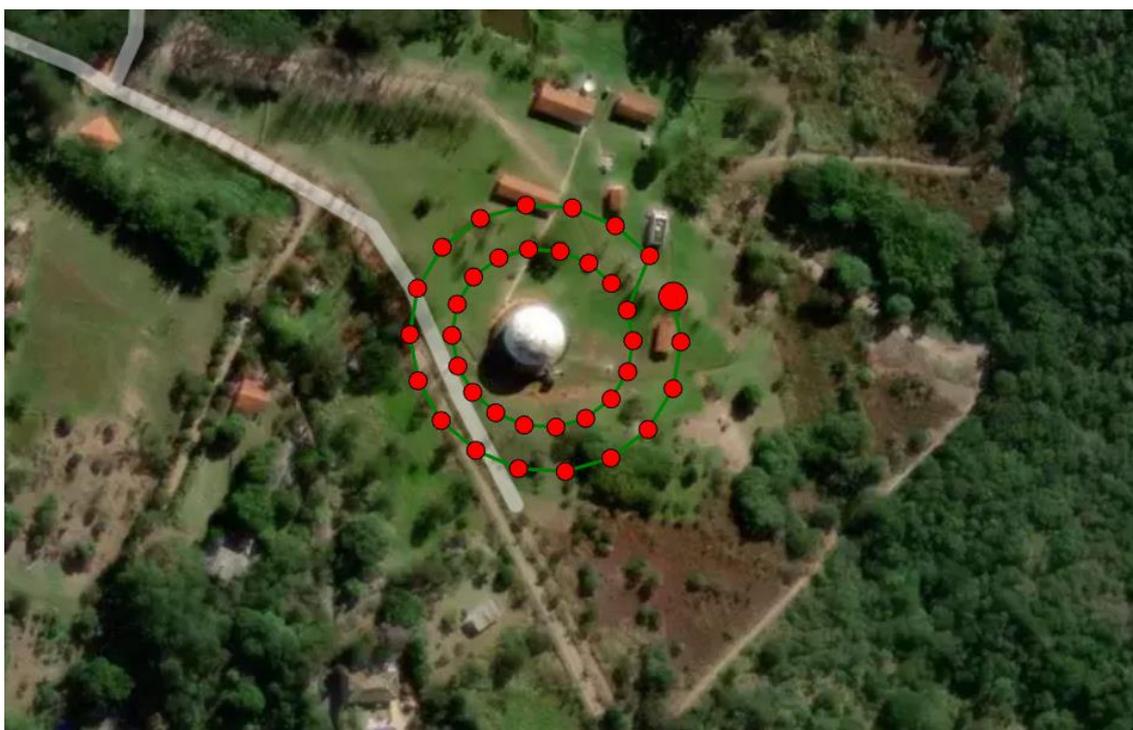


Figura 39 – Voos circulares sobre o Rádio Observatório Pierre Kaufmann em Atibaia/SP (Autoria própria)

Embora nossos voos tenham sido a 30m de altura, tínhamos autorização para voar até 60m. O heliponto SSXL é o mais próximo e está localizado a 2,78 km de distância do ROPK. Autorizações de voo parecem mais fáceis de se conseguir do que no campus Alphaville, pois os demais helipontos estão bem distantes (Figura 40).

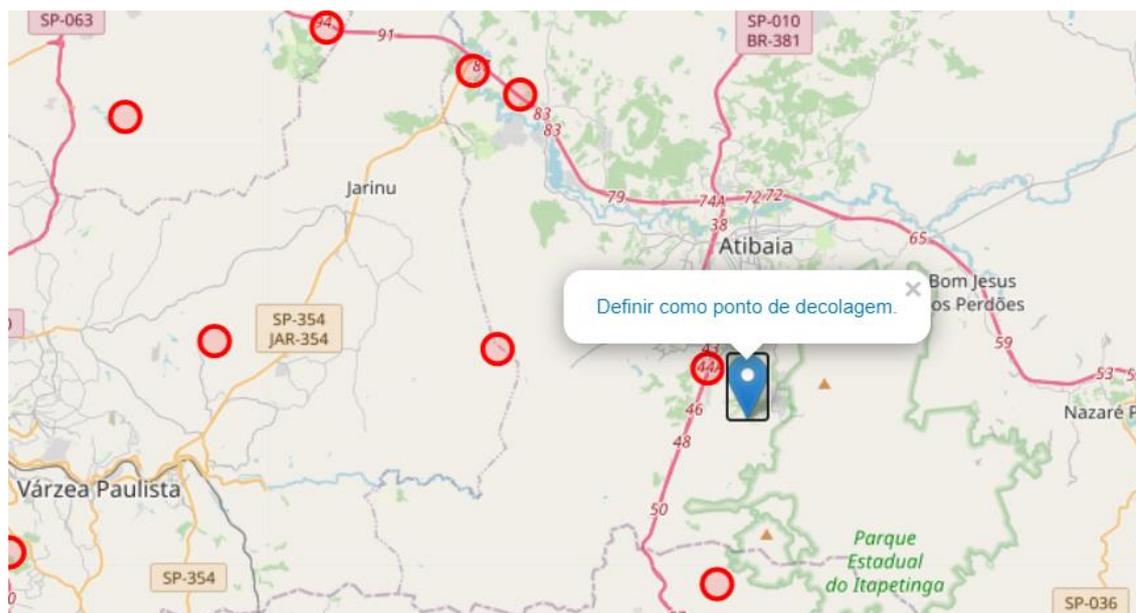


Figura 40 – Helipontos próximos ao Rádio Observatório Pierre Kaufmann (Autoria própria)

#### 4.5.4 Sítio Cabuçu

O sítio Cabuçu localizado no município de Guarulhos/SP tem área de 26.000 m<sup>2</sup> também é uma excelente opção para os primeiros testes com repetidora. A principal vantagem deste local é a proximidade do campus Higienópolis.

Em 2019 foi feito um voo de reconhecimento a 60m de altura com o drone Phantom 4 Pro do LABGEO (Figura 41).

Autorizações de voo parecem ser mais fáceis de se conseguir neste local em relação aos demais.



## 5 ACURÁCIA DO SISTEMA GEOLOCAL

Neste capítulo são realizadas simulações que mostram como a topologia do sistema e os atrasos influenciam na acurácia do sistema Geolocal. Esta parte do projeto gerou um artigo em Periódico Internacional (MACHO; PAMBOUKIAN; CORREIA, 2020).

### 5.1 MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Existem diversos modelos de propagação do sinal no meio atmosférico, e sua escolha depende da altitude da repetidora.

Para baixas altitudes, onde o sinal não é afetado pela ionosfera, um modelo de propagação que pode ser utilizado é o baseado no conceito de planos paralelos, que assume que, tanto a superfície da Terra quanto o plano horizontal onde se encontra a repetidora sejam planos e paralelos e, neste caso, a correção de atraso de propagação ( $\Delta_{pd}$ ) pode ser calculada como medida de distância pela Equação 22, onde  $c$  é a velocidade de propagação no meio,  $T_{atm}$  é o tempo de atraso atmosférico na direção perpendicular aos planos paralelos, no local onde se encontra a base, ou seja, na direção do zênite, e  $\epsilon$  é o ângulo de elevação da repetidora em relação à base.

$$\Delta_{pd} = c \cdot T_{atm} / \text{sen } \epsilon \quad (22)$$

O  $T_{atm}$  consiste em 2 partes: uma parte seca ou hidrostática, relativamente estável e que gera uma correção de atraso de 2,30 metros para uma altitude de 15 km; e uma parte úmida, causada por vapor de água, e que varia de poucos centímetros, para ar muito seco, até 40 centímetros, para ar muito úmido para esta altitude (HONMA et al, 2008, p. 951). Uma maneira de se verificar esta variação pelo sistema Geolocal, seria a de posicionar uma repetidora a 15 km de altitude (um balão, por exemplo) e fazer medições periódicas entre uma base transmitindo um sinal e outra recebendo, e com estes dados esta base poderia transmitir as informações para as demais bases do sistema. Ou então, posicionar um RPA a uma altitude inferior e deduzir o  $T_{atm}$  para a altitude desejada.

O modelo de propagação baseado em planos paralelos da Equação 22 é bastante apropriado nas situações onde a repetidora se localiza em baixa altitude, na troposfera (da superfície da Terra até 15 km de altitude) e na estratosfera (de 15 a 50

km de altitude). Para que o modelo de planos paralelos seja utilizado em altitudes mais elevadas, onde o sinal atravessa a região da ionosfera, o sinal teria que ser transmitido nas mais altas de frequências do rádio, como Frequências Super Altas (SHF – *Super High Frequency*), com ondas de 3 a 30 GHz, ou 1 a 10 centímetros, conhecidas como ondas centimétricas ou micro-ondas, e Frequências Extremamente Altas (EHF – *Extremely High Frequency*), com ondas de 30 a 300 GHz, ou 1 a 10 milímetros, conhecidas como ondas milimétricas (KAUFMANN et al, 2012a, p. 6). Nessas frequências, a contribuição ionosférica não é dominante, permanecendo apenas o efeito não dispersivo troposférico (HONMA et al, 2008, p. 951).

Os satélites dos sistemas de navegação GNSS utilizam a banda L, de frequências entre 1 e 2 GHz. O motivo de se usar frequências ultra altas de rádio (UHF – *Ultra High Frequency*), que é uma faixa de frequências entre 300 MHz e 3 GHz, é que o sinal não é afetado por qualquer condição de tempo, podendo penetrar facilmente nuvens, nevoeiros, chuvas, tempestades e até vegetações menos densas, quando comparados com frequências mais baixas de rádio. Além disso, essas frequências ultra altas possibilitam uma maior largura de banda. A banda L1 do sistema GPS, de 1575 MHz, por exemplo, possui largura de banda de 24 MHz. Por outro lado, frequências acima de 2 GHz não são utilizadas, pois seria necessário utilizar uma antena direcional para receber o sinal (OGAJA, 2011, p. 165).

Se o sistema Geolocal também utilizar frequências UHF, e a repetidora estiver em uma região onde o sinal atravesse a ionosfera, o modelo de propagação precisa levar em conta o atraso ocasionado pela refração do sinal nessa região.

A ionosfera é uma região da atmosfera que se estende desde 50 ou 60 km de altitude até mais de 500 km, podendo chegar a 1000 km. Nessa região, ocorre a ionização, que é um processo em que elétrons (que possuem carga negativa) são removidos de átomos ou moléculas formando íons positivos e elétrons livres. Esse processo ocorre, principalmente, pela absorção da radiação solar na faixa espectral do extremo ultravioleta (EUV) e do raio-X, pois fótons com energia acima de 12eV são capazes de ionizar os componentes atmosféricos da região (KIRCHHOFF, 1991, p. 75). A produção dos pares íons-elétrons é, portanto, proporcional ao número de fótons incidentes e ao número de partículas ionizáveis.

De acordo com a produção iônica e a altitude, a ionosfera se divide em camadas. A camada F2 é a região onde a produção é máxima, e está situada entre

250 e 400 km de altitude, com pico ao redor de 350 km. Nessa camada são produzidos íons de  $N_2^+$ ,  $O_2^+$  e, principalmente,  $O^+$  (KIRCHHOFF, 1991, p. 77).

As ondas eletromagnéticas de frequências entre 1 e 2 GHz são afetadas pelo plasma ionosférico, principalmente pela camada F2. Ao passar por este plasma, a onda portadora que sai do transmissor sofre um desvio de polarização, conhecido como Rotação Faraday (*Faraday Rotation*), e um desvio de rota, devido à refração do sinal, ocasionando um atraso em sua chegada. Este atraso de propagação pode ser estimado pelo TEC acumulado durante o percurso entre o transmissor e a repetidora no espaço. O valor do TEC é definido como a quantidade de elétrons no percurso de propagação, em unidades de  $10^{16}$  elétrons/m<sup>2</sup>, de acordo com a Equação 23, em que  $N_e$  é a densidade eletrônica em um metro cúbico e  $s$  é a distância do percurso, em metros (ITU-R, 2016, p. 1-3; HUNT et al, 2000, p. 56).

$$TEC = \int_{base}^{repetidora} N_e \cdot s \cdot ds \quad (23)$$

O TEC representa, portanto, a quantidade de elétrons contida em um cilindro, cuja área de base vale 1 m<sup>2</sup> e o comprimento equivale à distância entre a base e a repetidora. O valor do TEC varia em função da radiação solar, localização geográfica e do campo magnético da Terra. E esse comportamento é verificado regularmente, ao longo do dia (variações diurnas), ao longo das estações do ano (variações sazonais) e ao longo do ciclo de atividade solar (variação de 11 anos). Além disso, existem as variações abruptas, resultantes de explosão solar, ejeção de massa coronal (CME – *Coronal Mass Ejection*) e tempestade magnética, que aumentam a ionização da ionosfera, aumentando, conseqüentemente, o valor do TEC.

Sinais de diferentes frequências sofrem desvios de propagação diferentes ao encontrar elétrons livres na camada F2 da ionosfera, portanto as distâncias de percurso são diferentes para cada frequência. Os sistemas GNSS utilizam 2 frequências para calcular o valor do TEC, através da Equação 24, onde  $P1$  e  $P2$  são chamadas de pseudo-distâncias, pois são calculadas indiretamente a partir da diferença de tempo de propagação entre as 2 no percurso, e equivalem às frequências  $f1$  e  $f2$ , respectivamente (MARCOVIC, 2014, p. 5).

$$TEC = \frac{1}{40,3} \cdot \frac{f1 \cdot f2}{f1 - f2} \cdot (P2 - P1) \quad (24)$$

Normalmente, as comparações diurnas são feitas através das variações do conteúdo de elétrons no zênite, ou seja, perpendicularmente à superfície terrestre em um determinado local. Este valor é conhecido como TEC Vertical (VTEC – *Vertical TEC*), e seu valor, além de variar durante o dia, também depende da estação do ano, da latitude e da atividade solar, variando, tipicamente, entre  $10 \cdot 10^{16}$  e  $50 \cdot 10^{16}$  elétrons. Para a simulação em MATLAB, o valor de VTEC, foi definido como  $10 \cdot 10^{16}$ , ou seja,  $10^{17}$  elétrons. Ao definir um valor para o VTEC, é possível determinar o atraso de propagação vertical,  $t_z$ , através da Equação 25 (ITU-R, 2016, p. 5).

$$t_z = 1,345 \cdot \frac{VTEC}{f^2} \cdot 10^{-7} \quad (25)$$

Para um VTEC de  $10^{17}$  elétrons, e uma frequência de 2 GHz, o valor de  $t_z$  é de 3,3625 ns. Em seguida, é necessário determinar o atraso no percurso de uma base a uma repetidora, e, para isso, é feita uma correção utilizando o fator de inclinação  $S_t$ , ou *slant* (OTSUKA et al, 2002, p. 66).

Com base na Figura 42, primeiro, é utilizado o ângulo zenital  $z$ , do ponto de vista da base, e transformado em um ângulo zenital  $z'$ , do ponto de vista da região central da camada F2 da ionosfera, conhecida como Ponto Penetrante Ionosférico (IPP – *Ionospheric Piercing Point*), onde o pico de densidade eletrônica é máximo. A conversão é feita utilizando a Equação 26, onde  $R_e$  é o raio da Terra, que vale aproximadamente 6370 km e  $H$  é a altura do IPP, em torno de 350 km.

$$\text{sen}(z') = \frac{R_e}{R_e + H} \cdot \text{sen}(z) \quad (26)$$

Analisando a Figura 42, o fator  $S_t$  será o inverso do cosseno do ângulo  $z'$ , definido pela Equação 27.

$$S_t = \frac{1}{\cos(z')} = \frac{1}{\cos\left[\arcsen\left(\frac{R_e}{R_e + H} \cdot \text{sen}(z)\right)\right]} \quad (27)$$

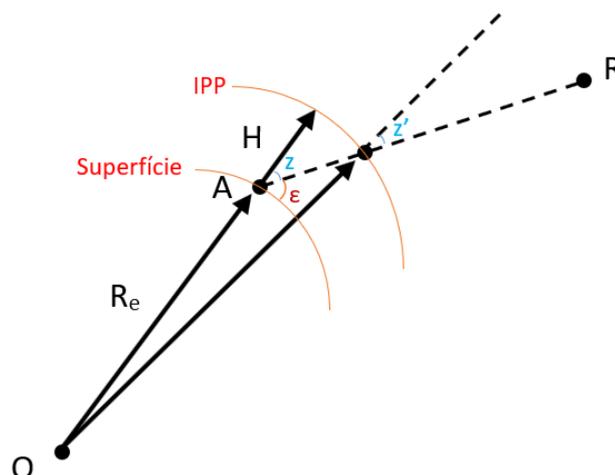


Figura 42 – Representação dos ângulos zenitais  $z$  e  $z'$ , ângulo de elevação  $\epsilon$ , raio da Terra  $R_e$ , altura da camada F2 da ionosfera  $H$ , base  $A$ , repetidora  $R$  e centro da Terra  $O$ , para ilustrar a conversão entre  $z$  e  $z'$  (MACHO, 2018).

A Equação 27 é equivalente à Equação 28, onde  $\epsilon$  é o ângulo de elevação da repetidora em relação à base.

$$S_t = \frac{1}{\cos [\arcsen(\frac{R_e}{R_e + H} \cdot \cos(\epsilon))]} \quad (28)$$

Quanto menor o ângulo de elevação  $\epsilon$ , maior o fator de correção. Por exemplo, para um  $\epsilon$  de  $60^\circ$ ,  $S_t$  vale 1,13566, e para um  $\epsilon$  de  $30^\circ$ ,  $S_t$  vale 1,75118. A correção  $S_t$  é usada na Equação 29 para calcular o  $\Delta pd$ , em unidade de distância, relativo à cada uma das bases.

$$\Delta pd = t_z \cdot S_t \cdot c \quad (29)$$

Além de sofrer atraso, o sinal pode sofrer o efeito de cintilação, que são rápidas variações de amplitude e fase do sinal de rádio que atravessa a ionosfera, degradando a relação sinal-ruído de uma transmissão. A cintilação ocorre, normalmente, após o pôr do Sol, e atinge o auge nas épocas de alta atividade solar. Ela é causada pela alteração da densidade eletrônica, quando há um aumento da taxa de ionização, ou irregularidades na camada ionosférica devido à dinâmica das correntes ionosféricas, gerando uma região de rarefação dessa densidade eletrônica no plasma. Essas irregularidades podem evoluir para estruturas maiores de rarefação, conhecidas como bolhas ionosféricas (OLIVEIRA; MOURA, 2012).

Para o sistema Geolocal, o efeito da cintilação precisa ser levado em conta durante a recepção de um sinal pelas bases, principalmente em épocas de alta atividade solar e em regiões mais próximas à anomalia equatorial, com as cristas localizadas aos 20° sul e 20° norte do equador magnético, onde as alterações de densidade eletrônica no plasma ionosférico são maiores. Para isso, é necessário utilizar bases com receptores robustos, que suportem o ruído térmico causado pela variação contínua da amplitude do sinal, evitando danos aos componentes eletrônicos.

Quando o Geolocal utilizar repetidoras que estejam em altitudes cujo sinal tenha que atravessar a camada ionosférica, precisará ter uma ou mais bases de apoio na região de atuação emitindo 2 sinais de frequências diferentes para calcular o TEC através de uma repetidora, que pode ser instalada em um CubeSat, por exemplo. Estes sinais serão retornados a receptores de dupla frequência. O resultado deverá ser enviado às demais bases do sistema, nas proximidades da base de apoio, para que o ajuste seja feito de acordo com a localização, já que existe uma variação do TEC ao longo do território. Durante a determinação do posicionamento, as bases de controle poderão emitir o sinal em uma frequência única, evitando o uso de receptores de dupla frequência além daquele que irá calcular o TEC (PROL et al, 2018).

## 5.2 ANÁLISE DO ERRO DE POSICIONAMENTO DA REPETIDORA

Durante o desenvolvimento deste projeto, foram realizadas diversas simulações comparando arranjos de diferentes quantidades de bases em diferentes distribuições com uma repetidora no espaço. Foram verificados os erros de posicionamento da repetidora em cada caso e também os valores de PDOP. As informações desta seção fazem parte de um artigo publicado por 3 pesquisadores deste projeto no Journal of Navigation (B2) com título "Geolocal - a new system for geo-referencing: analysis of bases distributions" (MACHO; PAMBOUKIAN, 2020).

Foram considerados casos onde o atraso dentro da repetidora é conhecido e casos onde ele é desconhecido. Também foram estimados atrasos causados por incertezas do sistema.

A localização das bases em terra foi escolhida de forma aleatória considerando-se diversas cidades brasileiras cobrindo uma área de 240 x 140 km. A localização destas bases pode ser vista na Figura 43.

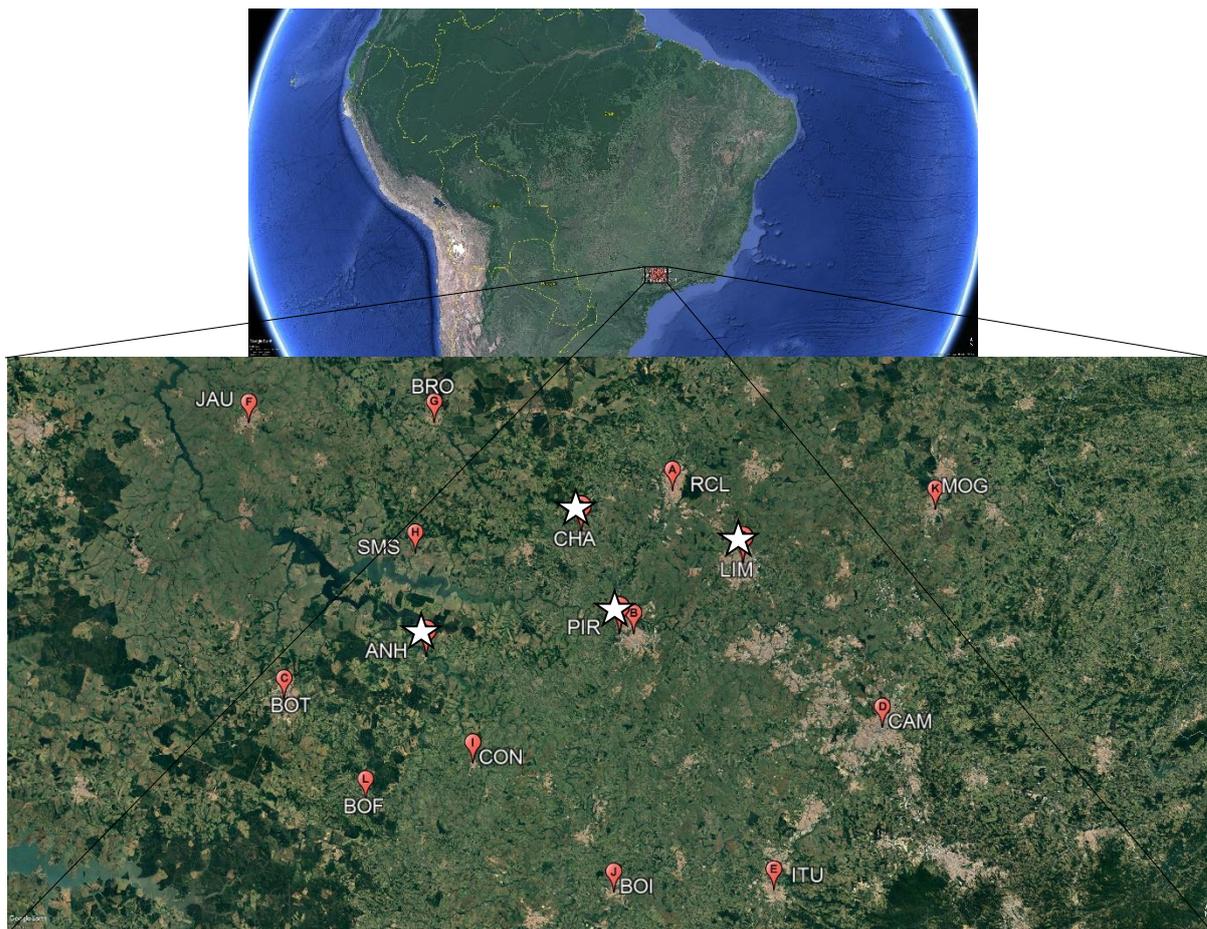


Figura 43 – Localização de 12 bases (A a L) instaladas em cidades brasileiras e 1 repetidora posicionada em 4 lugares diferentes indicados na figura por estrelas (Adaptado de Google Earth).

A distância entre as cidades é da ordem de 25 a 50km. Essas distâncias são adequadas para encontrar a posição de uma repetidora colocado a uma altitude de mesma magnitude, ou seja, na estratosfera da Terra. Um exemplo de plataforma compatível com essa altitude é o balão científico, que pode ultrapassar a altitude de 50 km e voar por mais de 40 dias (Yamagami et al., 2004). Para o presente trabalho, estamos escolhendo um balão científico como plataforma de simulação onde a repetidora deverá ser instalada, voando a uma altitude de 30 km, em 4 locais diferentes, também mostrados na Figura 43.

A Tabela 11 mostra as coordenadas geográficas (Latitude, Longitude e Altitude) das bases e da repetidora.

Tabela 11 – Coordenadas geográficas - latitude, longitude, altitude (altura geodética) – das 12 bases fixas em terra (de A a L) e da repetidora em 4 diferentes posições (Autoria própria).

| <b>Equipamento</b> | <b>Cidade - Sigla</b>     | <b>Latitude</b> | <b>Longitude</b> | <b>Altitude</b> |
|--------------------|---------------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Base A             | Rio Claro – RCL           | - 22° 24' 48"   | - 47° 34' 11"    | 592 m           |
| Base B             | Piracicaba – PIR          | - 22° 43' 30"   | - 47° 38' 51"    | 524 m           |
| Base C             | Botucatu – BOT            | - 22° 53' 25"   | - 48° 27' 19"    | 828 m           |
| Base D             | Campinas – CAM            | - 22° 54' 23"   | - 47° 03' 42"    | 677 m           |
| Base E             | Itu – ITU                 | - 23° 15' 57"   | - 47° 17' 57"    | 577 m           |
| Base F             | Jau - JAU                 | -22° 17' 47"    | -48° 33' 28"     | 522 m           |
| Base G             | Brotas – BRO              | -22° 17' 03"    | 48° 07' 36"      | 647 m           |
| Base H             | Sta. Maria da Serra - SMS | -22° 34' 02"    | -48° 09' 38"     | 495 m           |
| Base I             | Conchas – CON             | -23° 00' 55"    | -48° 00' 38"     | 503 m           |
| Base J             | Boituva – BOI             | -23° 17' 00"    | -47° 40' 20"     | 637 m           |
| Base K             | Mogi Mirim – MOG          | -22° 25' 55"    | -46° 57' 30"     | 617 m           |
| Base L             | Bofete – BOF              | -23° 06' 08"    | -48° 15' 28"     | 576 m           |
| Repetidora em R1   | Piracicaba – PIR          | - 22° 43' 30"   | - 47° 40' 51"    | 30 km           |
| Repetidora em R2   | Limeira – LIM             | -22° 33' 52"    | -47° 24' 01"     | 30 km           |
| Repetidora em R3   | Charqueada – CHA          | -22° 30' 39"    | -47° 46' 40"     | 30 km           |
| Repetidora em R4   | Anhembi - ANH             | -22° 47' 22"    | -48° 07' 38"     | 30 km           |

Em altitudes troposféricas e estratosféricas, a curva de propagação da onda causada pela curvatura da Terra é insignificante em comparação com o atraso devido à composição do gás da atmosfera neutra (Duev et al., 2011). O modelo de atraso de caminho que estamos assumindo neste trabalho é o modelo de planos paralelos, descrito pela Equação 30,

$$\Delta_{pd} = c\tau_{atm}/\sin H \quad (30)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz,  $\tau_{atm}$  o atraso atmosférico no zênite, e  $H$  o ângulo de elevação da plataforma quando visto a partir da base em terra.

Também é necessário considerar o atraso troposférico, que consiste em uma parte “seca” ou hidrostática que é relativamente estável, e uma parte “úmida” que depende do teor de vapor d'água onde as bases estão instaladas (Honma et al., 2008). As correções ao longo do caminho dos sinais podem ser derivadas do atraso do zênite usando funções de mapeamento (Niell, 1996).

Para realizar esta simulação é necessário transformar o sistema de referência de coordenadas das bases e da repetidora de LLA (Latitude, Longitude, Altitude) para ECEF (*Earth Centered, Earth Fixed*) utilizando o *datum* WGS84 como elipsoide de referência. No sistema LLA, a latitude varia entre 0° e 90° a partir da linha do Equador em direção ao Norte (positivo) ou Sul (negativa) e a longitude varia entre 0° e 180° a partir do meridiano de Greenwich para Leste (positiva) ou Oeste (negativa). No sistema ECEF, a origem é o centro de massa da Terra, os eixos x, y e z são fixos e rotacionam junto com o planeta: z aponta para o Polo Norte e x aponta para a intersecção do meridiano de Greenwich e a linha do Equador ( $\mu$ -BLOX, 1999). Para esta transformação é utilizado o conjunto de Equações 31 onde, onde  $\varphi$  é a latitude,  $\lambda$  a longitude,  $N$  o raio principal de curvatura do geóide,  $h$  a altura,  $a$  o semieixo maior, e  $b$  o semieixo menor do elipsoide terrestre.

$$\begin{aligned}x &= (N + h)\cos\varphi\cos\lambda \\y &= (N + h)\cos\varphi\sin\lambda \\z &= \left(\frac{b^2}{a^2}N + h\right)\sin\varphi\end{aligned}\tag{31}$$

A distância entre cada uma das bases e cada localização da repetidora pode ser calculada pela Equação 32, onde  $n$  representa cada base.

$$dn = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2}\tag{32}$$

Para todas as simulações, foi adotado um valor fixo para os atrasos (supostamente medidos com precisão) devido à passagem do sinal pela parte eletrônica dos equipamentos, cabos e conectores, na base de controle de transmissão, por exemplo, Base A na Figura 43 ( $\delta_{At}$ ), e bases receptoras ( $\delta_{Ar}$ ,  $\delta_{Br}$ ,  $\delta_{Cr}$ , ...,  $\delta_{nr}$ ) como 0.0001 ms. Adotando o valor  $c = 299.792.458$  m/s, a distância da base de controle até a repetidora ( $d_A$ ) pode ser calculada pela Equação 33, e a distância das demais bases até a repetidora ( $d_n$ ) é dada pela Equação 34.

$$d_A(\delta_R, \Delta_{pd(AR)}) = (\Delta t_A - \delta_{At} - \delta_{Ar} - \delta_R) \left(\frac{c}{2}\right) - \Delta_{pd(AR)}\tag{33}$$

Onde  $\delta_R$  é o atraso do sinal dentro da repetidora;  $\Delta_{pd(AR)}$  é o atraso de propagação do sinal através do meio entre a base de controle e a repetidora; e  $\Delta t_A$  é o tempo medido para a propagação do sinal da base de controle até a repetidora e de volta à base de controle.

$$d_n(\delta_R, \Delta_{pd(AR)}, \Delta_{pd(nR)}) = (\Delta t_n - \delta_{At} - \delta_{nr} - \delta_R)(c) - d_A(\delta_R) - \Delta_{pd(AR)} - \Delta_{pd(nR)} \quad (34)$$

onde  $\Delta_{pd(nR)}$  é o atraso de propagação do sinal através do meio entre cada base (exceto a base de controle) e a repetidora; e  $\Delta t_n$  é o tempo medido para a propagação do sinal de cada base até a repetidora e de volta para cada base.

Quando se tem acesso à plataforma onde a repetidora está instalada, pode-se medir facilmente o  $\delta_R$ , sendo necessário calcular apenas o  $\Delta_{pd}$  para encontrar a posição da repetidora. Quando não se tem acesso a ele, por exemplo quando a repetidora for instalada em uma plataforma de terceiros, é necessário usar o método iterativo descrito a seguir para encontrar  $\delta_R$  e  $\Delta_{pd}$ .

O método iterativo consiste em calcular a posição da repetidora utilizando todos as combinações possíveis de 3 bases, sempre incluindo a base de controle. Para o caso de 4 bases, sendo A a base de controle, os conjuntos seriam “A-B-C”, “A-B-D” e “A-C-D”. Esses conjuntos são usados para encontrar 3 posições diferentes para o repetidor (Ra, Rb e Rc). Para cada conjunto, adota-se um valor inicial para  $\Delta_{pd}$  e  $\delta_R$  e define-se uma faixa inferior e superior para a variação de  $\delta_R$ . Para esta simulação, foi adotado um valor inicial para  $\Delta_{pd}$  como zero e para  $\delta_R$  como 100 ns, variando de 0 ns a 1000 ns.

Na primeira iteração do primeiro conjunto de bases (A-B-C), os ângulos de elevação da repetidora em relação a cada base são encontrados usando os valores iniciais adotados e, usando a Equação 1,  $\Delta_{pd}$  também pode ser encontrado. O próximo passo é usar o novo valor de  $\Delta_{pd}$ , que não é mais zero, para recalcular a posição Ra da repetidora. Esse processo iterativo é feito até que haja a convergência dos valores.

O mesmo processo é repetido para os outros conjuntos para encontrar Rb e Rc. O erro na posição do repetidor é calculado por:  $\| Ra - Rb \| + \| Rb - Rc \| + \| Rc - Ra \|$ . Como  $\delta_R$  foi adotado dentro de um intervalo, o cálculo é repetido para diferentes valores de  $\delta_R$ , até que o erro seja minimizado. Os valores corretos de todos os  $\Delta_{pd}$  e  $\delta_R$  são encontrados no final do processo de minimização. Esses valores, juntamente com os atrasos de propagação nas bases de transmissão e receptor (que podem ser medidos diretamente) são subtraídos do tempo de propagação total, e o resultado, multiplicado pela velocidade da luz, dá a pseudo-distância de cada base ao repetidor.

As simulações realizadas neste trabalho partem de 4 bases terrestres (A, B, C e D), e esta quantidade é aumentada gradativamente para verificar qual é o melhor cenário de custo-benefício de acordo com o número de bases, de 4 a 12 bases, portanto, várias quantidades de bases estão disponíveis para análise.

### 5.2.1 Condições de simulação

Este trabalho simulou 4 diferentes condições para o Geolocal, representando 4 possíveis combinações de incertezas como pode ser visto na Tabela 12.

Tabela 12 – Condições (a, b, c e d) de simulação (Autoria própria).

| Condição | $\sigma$ | $\delta_R$               |
|----------|----------|--------------------------|
| a        | 3.3 ns   | Calculado pelo algoritmo |
| b        | 3.3 ns   | Conhecido (200 ns)       |
| c        | 0.5 ns   | Calculado pelo algoritmo |
| d        | 0.5 ns   | Conhecido (200 ns)       |

- A condição (a) considera um alto nível de incerteza. São considerados erros devido a medições de atraso nas bases de transmissão e recepção, no modelo de propagação escolhido e principalmente na sincronização do relógio entre as bases terrestres. Considera-se uma distribuição gaussiana de erros de medição com desvio padrão ( $\sigma$ ) de 3,3 ns. Nesta condição, o tempo de atraso na repetidora ( $\delta_R$ ) é desconhecido.
- A condição (b) também tem  $\sigma = 3.3 \text{ ns}$ , porém o atraso de tempo na repetidora é conhecido com antecedência ( $\delta_R = 200 \text{ ns}$ ), portanto não precisa ser calculado.
- A condição (c) possui  $\sigma = 0.5 \text{ ns}$ , o qual é um nível mais baixo de incerteza, e o atraso na repetidora não é conhecido.
- A condição (d) possui  $\sigma = 0.5 \text{ ns}$  e o atraso na repetidora é conhecido ( $\delta_R = 200 \text{ ns}$ ).

Esses valores de  $\sigma$  foram escolhidos para verificar se uma redução substancial do nível de incerteza seria capaz de melhorar a acurácia do posicionamento.

Para cada uma das 4 condições, 1000 simulações foram realizadas, considerando as diferentes localizações da repetidora, R1, R2, R3 e R4 (mostradas na Figura 43 como PIR, LIM, CHA e ANH, respectivamente), começando com as bases A, B, C e D (mostradas na Figura 43 como RCL, PIR, BOT e CAM). Essas 4 bases formam um triângulo no mapa com a base B no meio e a localização R1 no zênite da base B (a base B tem uma altitude de 534 metros acima do nível do mar e R1 tem altitude de 30 km). Também foram consideradas mais de 4 bases, somadas uma a uma, de E a L, e realizando-se as simulações para cada caso.

### 5.2.2 Análise dos erros de posicionamento

Os resultados obtidos na condição (a) podem ser vistos detalhadamente na Figura 44 e resumidamente no gráfico da Figura 45.

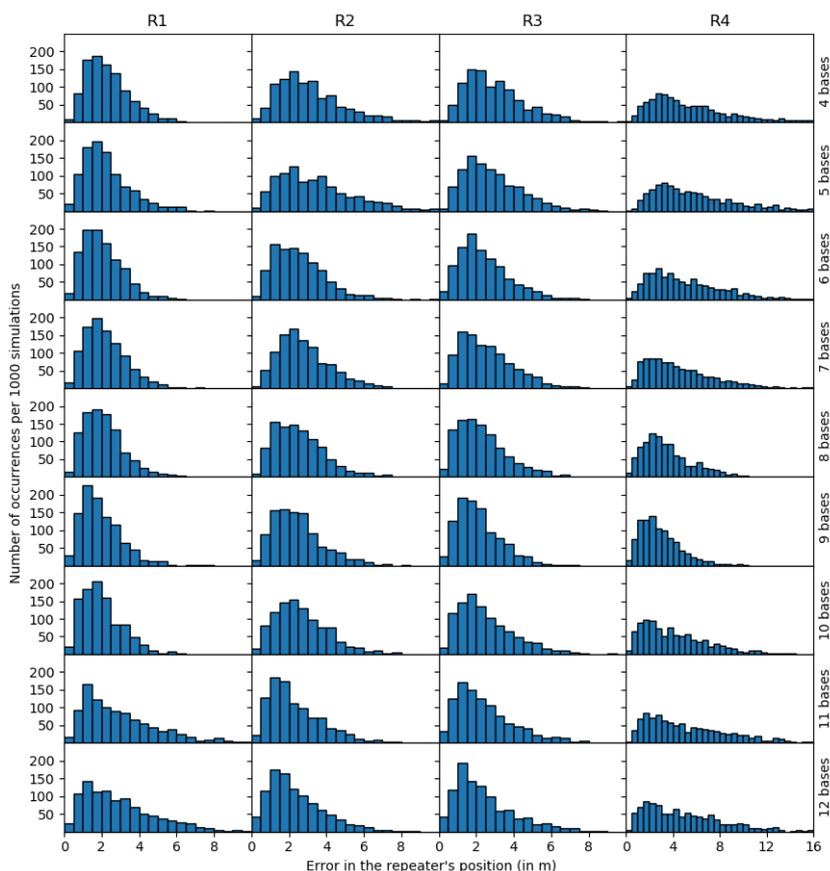


Figura 44 – Erros no posicionamento da repetidora utilizando  $\sigma = 3.3$  ns, para 1000 simulações, incluindo o cálculo do atraso na repetidora, para diferentes quantidades de bases e 4 posições da repetidora (Autoria própria).

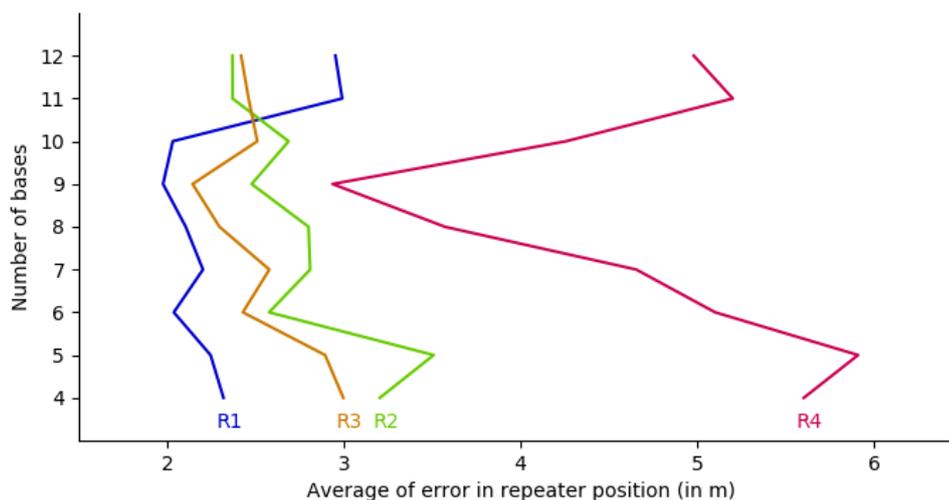


Figura 45 – Erros no posicionamento da repetidora utilizando  $\sigma = 3.3$  ns, para 1000 simulações, incluindo o cálculo do atraso na repetidora, para diferentes quantidades de bases e 4 posições da repetidora (Autoria própria).

O gráfico da Figura 45 representa a média do erro na posição da repetidora em 1000 simulações realizadas para a localização de cada repetidor, indicando como o erro evolui conforme novas bases terrestres são adicionadas ao sistema.

Se forem utilizadas 4 bases, o erro na posição da repetidora é menor quando os ângulos de elevação da repetidora, vistos pelas bases, são maiores em média. O local R1 possui a maioria das simulações com erros menores que 6 metros, com média de 2,32 metros, e seus ângulos de elevação das bases A, B, C e D são principalmente maiores que os demais locais:  $38,90^\circ$ ,  $83,36^\circ$ ,  $19,63^\circ$  e  $23,69^\circ$ , respectivamente (média:  $41,39^\circ$ ). Os locais R2 e R3 possuem a maioria das simulações com erros menores que 8 metros, com média de 3,20 e 3,00 metros, respectivamente, com elevações de  $50,52^\circ$ ,  $43,48^\circ$ ,  $14,29^\circ$  e  $29,64^\circ$  para R2 (média:  $34,48^\circ$ ) e  $50,74^\circ$ ,  $47,19^\circ$ ,  $19,69^\circ$  e  $18,86^\circ$  para R3 (média:  $34,12^\circ$ ). O local R4 possui simulações com maiores erros, até 16 metros, com média de 5,60 metros com a menor média dos ângulos de elevação e, portanto, mais influenciados pelo atraso do trajeto através da atmosfera, com elevações de R4 são  $22,49^\circ$ ,  $30,57^\circ$ ,  $39,36^\circ$  e  $14,88^\circ$  (média:  $26,82^\circ$ ).

Conforme o número de bases terrestres aumenta, os erros na posição da repetidora diminuem lentamente para os locais da repetidora R1, R2 e R3, e rapidamente para o local R4 até 9 bases (de A até I). As mudanças nos erros

dependem de se as novas bases adicionadas às simulações aumentam ou diminuem a média dos ângulos de elevação, e também de suas localizações em relação às localizações das bases anteriores. Ou seja, quando a distribuição das bases, incluindo uma base recém-adicionada, torna-se mais uniformemente espalhada, o erro na posição da repetidora tende a diminuir. Quando a base adicionada é posicionada próxima a outra base, ou alinhada a ela em relação à repetidora, o erro tende a aumentar. A localização R4 apresenta a variação mais perceptível, e seus erros atingem a média de 2,94 metros considerando 9 bases, e aumenta, quando a base J é adicionada à simulação, para a média de 4,26 metros, e, com a adição da base K, à média de 5,20 metros. Isso ocorre devido aos ângulos de elevação de R4 que são  $22,17^\circ$  e  $13,04^\circ$  das bases J e K respectivamente, muito menores que a média dos ângulos de elevação das bases de A até L, que é  $30,06^\circ$ , e também porque a base J está um pouco alinhada com base I e R4, e base K com base B e R4. Quando a base L (ângulo de elevação de R4:  $38,32^\circ$ ) é incluída na simulação, a média dos erros diminui novamente para 4,98 metros, pois melhora a distribuição das bases e o ângulo de elevação é maior que a média. Em um cenário real, os erros podem ser minimizados definindo um ângulo de corte no sistema, por exemplo, de  $15^\circ$ .

Os resultados da condição (b) podem ser vistos detalhadamente na Figura 46 e resumidamente no gráfico da Figura 47.

Pode-se notar que os erros na posição da repetidora diminuem lentamente para as localizações R1, R2 e R3 de 4 a 12 bases (até a base L), e rapidamente para a localização R4 de 4 a 9 bases (até a base I), e eles aumentam para R4 após a adição da base J e K, e diminuem após a adição da base L. Os erros na posição da repetidora de (b) são menores que (a): em (a), todos os erros são menores que 10 metros para R1, R2 e R3 e 16 metros para R4, e em (b), todos os erros são menores que 5 metros para R1, R2 e R3 e 10 metros para R4. As médias dos erros das localizações R1, R2, R3 e R4 em (b), considerando 4 bases como exemplo, são respectivamente 1,56, 1,64, 1,58 e 2,82 metros; inferior a (a): 2,32, 3,20, 3,00 e 5,60 metros. Esses resultados indicam que quando se conhece com antecedência o tempo de atraso na repetidora, os erros diminuem para quase metade.

Os resultados da condição (c) podem ser vistos detalhadamente na Figura 48 e resumidamente no gráfico da Figura 49.

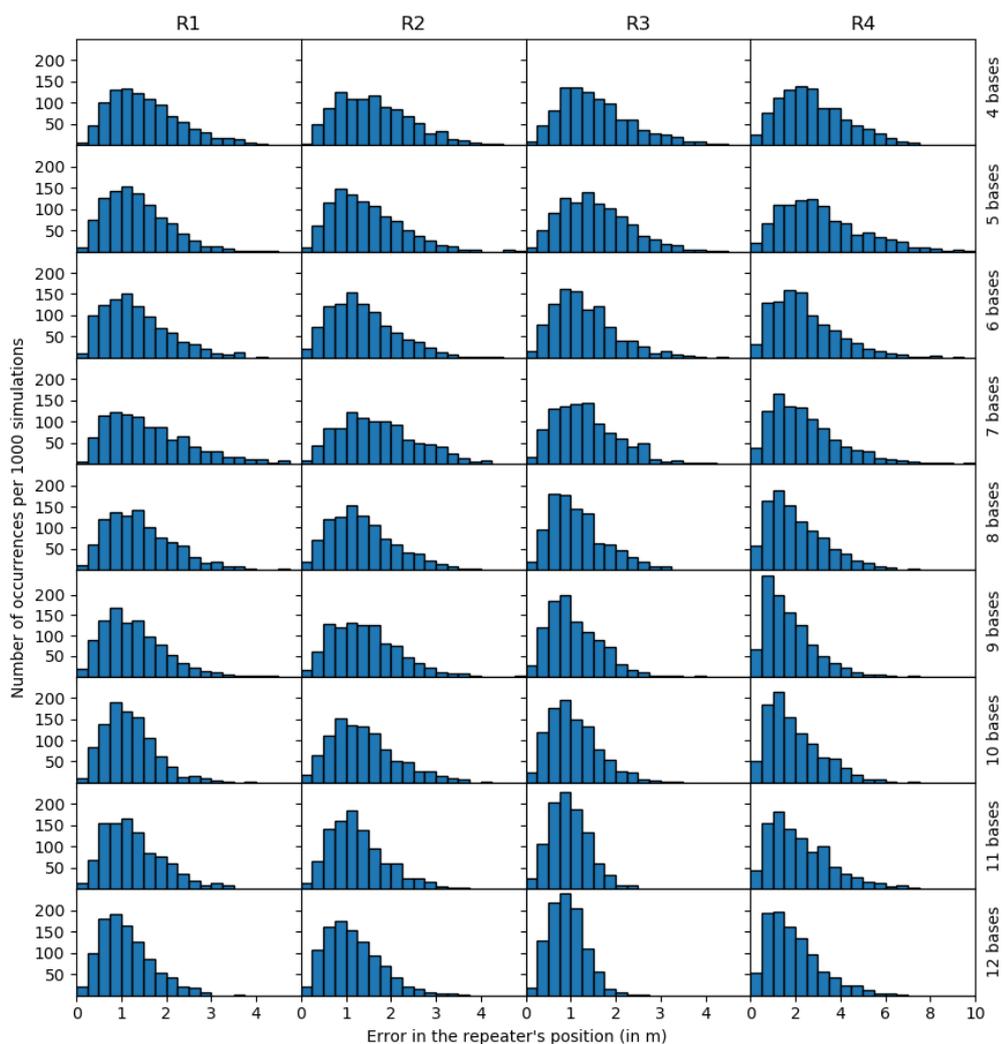


Figura 46 – Erros no posicionamento da repetidora utilizando  $\sigma = 3.3$  ns, para 1000 simulações, considerando conhecido o atraso na repetidora, para diferentes quantidades de bases e 4 posições da repetidora (Autoria própria).

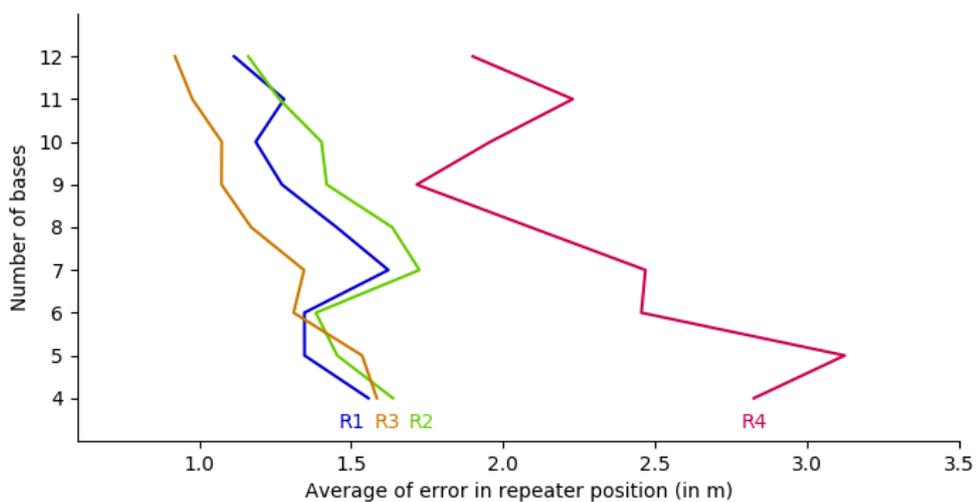


Figura 47 – Erros no posicionamento da repetidora utilizando  $\sigma = 3.3$  ns, para 1000 simulações, considerando conhecido o atraso na repetidora, para diferentes quantidades de bases e 4 posições da repetidora (Autoria própria).

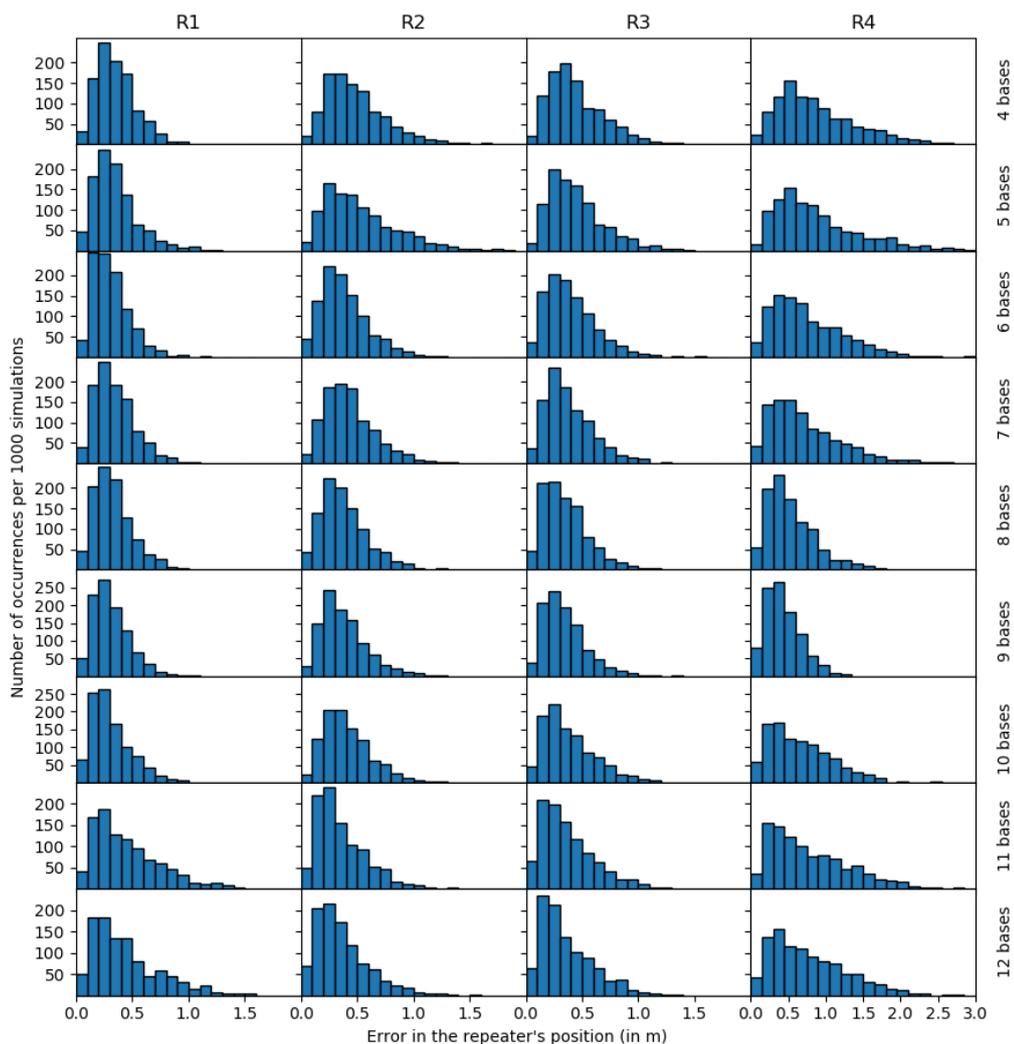


Figura 48 – Erros no posicionamento da repetidora utilizando  $\sigma = 0.5$  ns, para 1000 simulações, considerando desconhecido o atraso na repetidora, para diferentes quantidades de bases e 4 posições da repetidora (Autoria própria).

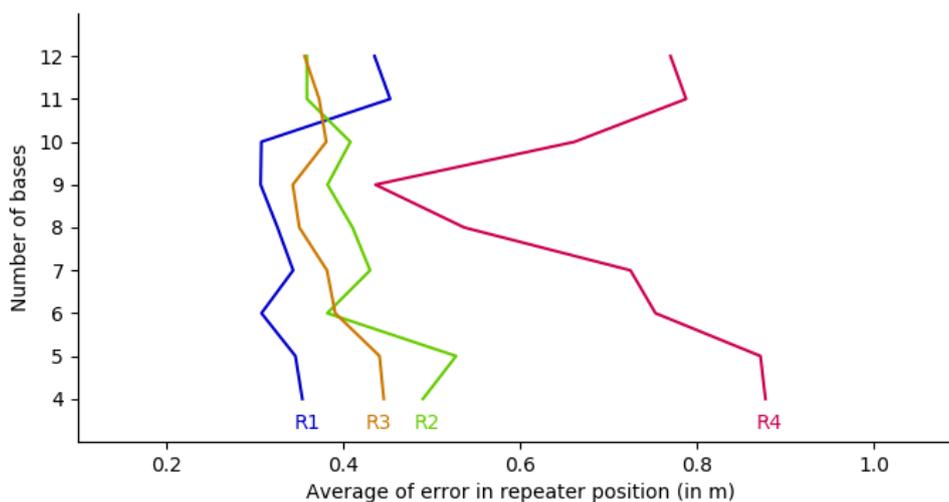


Figura 49 – Erros no posicionamento da repetidora utilizando  $\sigma = 3.3$  ns, para 1000 simulações, considerando desconhecido o atraso na repetidora, para diferentes quantidades de bases e 4 posições da repetidora (Autoria própria).

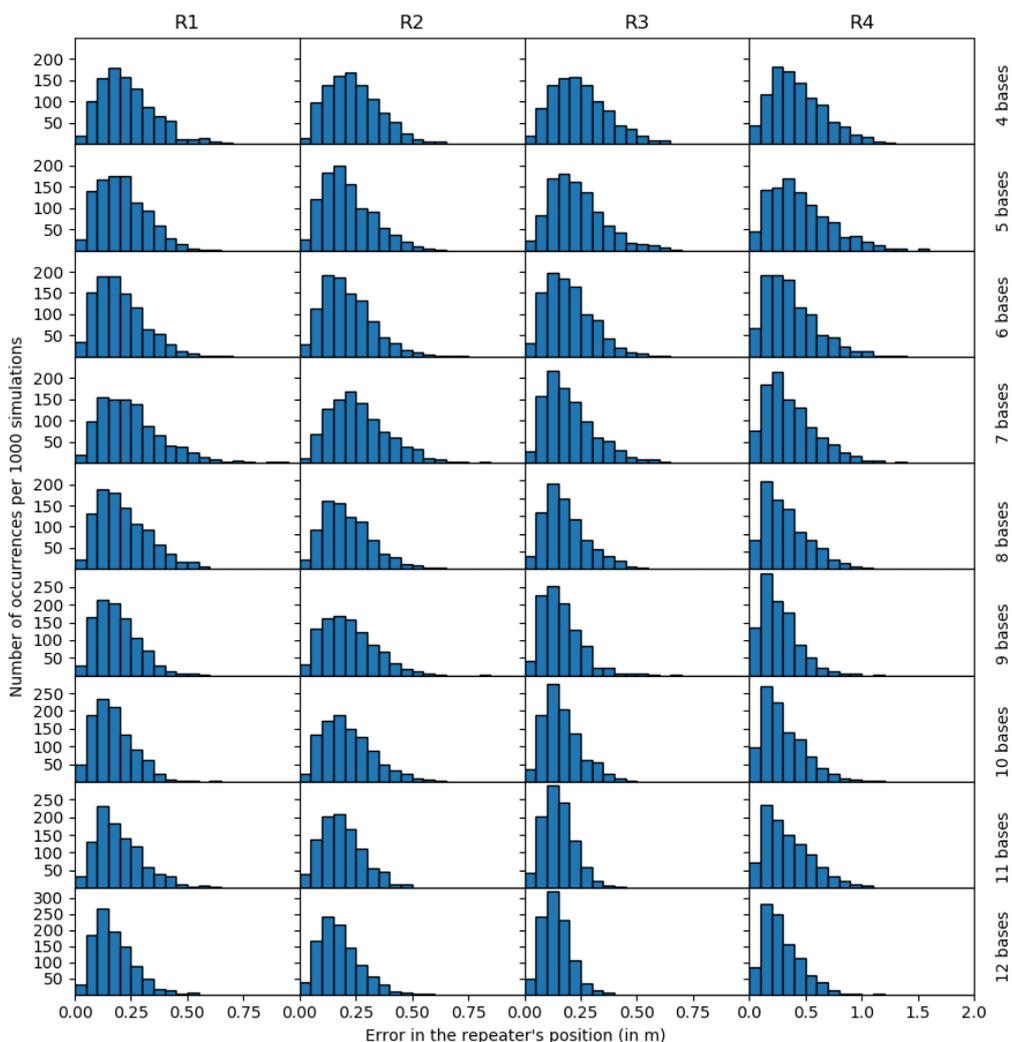


Figura 50 – Erros no posicionamento da repetidora utilizando  $\sigma = 0.5$  ns, para 1000 simulações, considerando conhecido o atraso na repetidora, para diferentes quantidades de bases e 4 posições da repetidora (Autoria própria).

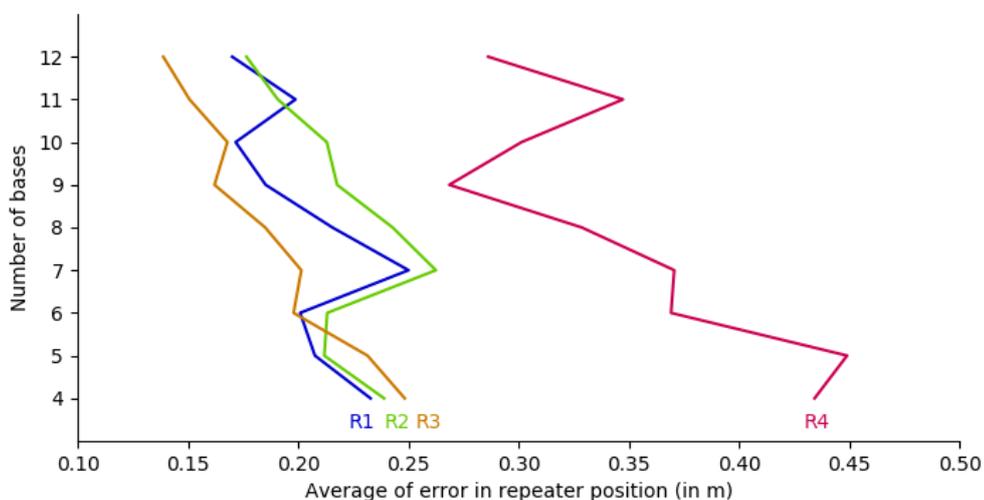


Figura 51 – Erros no posicionamento da repetidora utilizando  $\sigma = 3.3$  ns, para 1000 simulações, considerando conhecido o atraso na repetidora, para diferentes quantidades de bases e 4 posições da repetidora (Autoria própria).

O padrão de (c) é semelhante ao de (a) para R1, R2, R3 e R4, mas os erros na posição da repetidora em (c) são muito menores, com todos os erros menores que 2 metros para R1, R2 e R3 e menores que 3 metros para R4. As médias são 0,35, 0,49, 0,45 e 0,88 metros, em torno de 15% dos valores de (a). Isso significa que a redução de cerca de 85% de  $\sigma$  (de 3,3 para 0,5 ns) da distribuição de erros de medições incluídas na simulação causa uma redução de erros na posição da repetidora de mesma ordem.

Os resultados da condição (d) são mostrados nas Figuras 50 e 51. O padrão de (d) é semelhante ao de (b) para R1, R2, R3 e R4, mas os erros na posição do repetidor em (d) são muito mais baixos. Todos os erros são menores que 0,8 metros para R1, R2 e R3 e menores que 1,7 metros para R4. As médias são 0,23, 0,24, 0,25 e 0,43 metros, cerca de 15% dos valores de (b) e quase metade de (c). Esses resultados confirmam que a redução dos erros na posição do repetidor é proporcional à redução em  $\sigma$  da distribuição dos erros de medição incluídos na simulação, e também que sabendo antecipadamente o tempo de atraso na repetidora, esses erros diminuem para quase metade.

### 5.2.3 Análise do PDOP

A Tabela 13 e a Figura 52 ilustram os valores de PDOP obtidos para diferentes quantidades de bases e 4 localizações da repetidora.

Tabela 13 – Valores de PDOP para cada localização da repetidora, considerando diferentes quantidades de bases (Autoria própria).

| <b>Bases</b>                | <b>R1</b> | <b>R2</b> | <b>R3</b> | <b>R4</b> |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 4: A,B,C,D                  | 2.60      | 3.86      | 3.47      | 6.77      |
| 5: A,B,C,D,E                | 2.46      | 3.80      | 3.32      | 6.53      |
| 6: A,B,C,D,E,F              | 2.20      | 2.85      | 2.80      | 4.24      |
| 7: A,B,C,D,E,F,G            | 2.13      | 2.69      | 2.75      | 4.16      |
| 8: A,B,C,D,E,F,G,H          | 2.10      | 2.68      | 2.52      | 2.90      |
| 9: A,B,C,D,E,F,G,H,I        | 1.97      | 2.58      | 2.43      | 2.45      |
| 10: A,B,C,D,E,F,G,H,I,J     | 1.94      | 2.55      | 2.40      | 2.39      |
| 11: A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K   | 1.78      | 2.25      | 2.09      | 2.31      |
| 12: A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L | 1.76      | 2.23      | 2.07      | 2.29      |

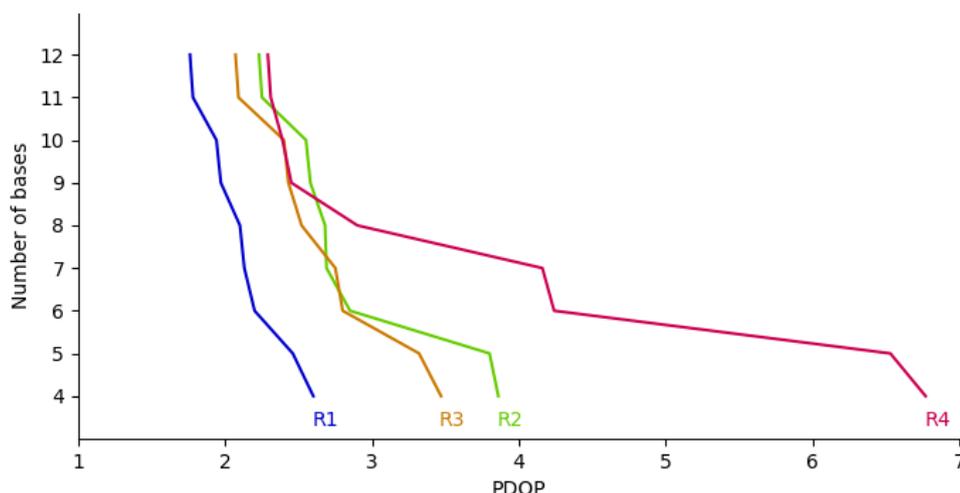


Figura 52 – valores de PDOP para diferentes quantidades de bases e 4 localizações da repetidora (Autoria própria).

Aqui, o erro na posição da repetidora é comparado com o PDOP para cada quantidade e distribuição de bases. O PDOP é uma ferramenta muito eficiente para avaliar a geometria de um sistema de navegação, e é possível usar o PDOP para quantificar a precisão da posição de uma repetidora no espaço de acordo com a distribuição de bases fixas na Terra. É um coeficiente que, quando multiplicado pelo desvio padrão do erro das medições de pseudo-distância entre uma repetidora e as bases vistas pelo repetidor, resulta no desvio padrão do erro na posição da repetidora. O valor ideal é 1, mas valores menores que 4 são aceitáveis para a maioria das aplicações.

Um sistema com a repetidora localizada em R1 possui menores valores de PDOP, refletindo em um erro menor no posicionamento da repetidora quando se usa quantidades menores de bases (Figuras 45, 47, 49 e 51). Porém, diferentemente dos erros, que aumentam quando as bases adicionadas geram ângulos de elevação menores, o PDOP sempre diminui com o aumento da quantidade de bases. A localização R1 também tem a vantagem de estar próxima ao zênite de uma base, auxiliando na redução do PDOP, principalmente quando o número de bases é baixo, no caso 4 ou 5 bases. Para uma quantidade maior de bases, colocar a repetidora próximo ao zênite de uma base não melhora substancialmente a precisão. Isso é crucial, porque é improvável que a repetidora esteja no zênite de uma base em uma situação real.

Os locais R2 e R3 possuem, para uma quantidade menor de bases, precisões menores que R1, mas maiores que R4, devido à geometria e distribuição das bases. O mesmo acontece com os erros. Para uma quantidade maior de bases, os valores PDOP convergem para valores entre 2 e 3.

O pior caso, para uma quantidade menor de bases, encontra-se no local R4, que possui os maiores valores de PDOP, pois a distribuição de bases do ponto de vista de R4 é menos favorável. Isso também gera maiores erros na posição da repetidora. O PDOP também converge para valores entre 2 e 3 ao se adicionar mais bases.

A condição aceitável de PDOP inferior a 4 é encontrada com 8 ou mais bases. Para aumentar ainda mais a precisão é recomendado usar mais bases em uma situação real, por exemplo, estabelecendo uma quantidade mínima de 10 bases, ou certificando-se de que as bases estão distribuídas uniformemente.

#### **5.2.4 Considerações gerais sobre as simulações**

Analisando as informações geradas nestas simulações, percebe-se que a precisão do Geolocal é melhorada pelo aumento do número de bases utilizadas no sistema, desde que os ângulos de elevação do repetidor visto pelas novas bases sejam maiores que a média, e também melhorada pela forma como as bases são distribuídas através da área, em relação à repetidora.

A precisão é maior quando as bases terrestres são distribuídas de forma mais homogênea ao redor da repetidora, e menor quando as bases estão concentradas em determinadas regiões. Embora o PDOP não seja influenciado pelos ângulos de elevação, uma vez que não é afetado pelo conteúdo atmosférico, é altamente influenciado pelo número de bases e, principalmente, por sua distribuição. Para uma baixa quantidade de bases, por exemplo, 4 ou 5 bases, o PDOP é menor quando a repetidora está localizada no zênite de uma base central, mas quando mais bases são incluídas, esta característica se torna menos importante.

A melhoria na precisão, no entanto, pode ser obtida de duas maneiras. A primeira maneira é medir o atraso de tempo do sinal na repetidora antes de enviar a repetidora para o espaço (condições b e d). Neste caso, os erros na posição da repetidora diminuem para quase metade. A segunda forma é reduzir as incertezas causadas por erros de medição nas bases de transmissão e recepção, ao modelo de

atraso de propagação e principalmente às incertezas de atraso de relógio (condições c e d). A redução pode ser feita usando-se relógios atômicos precisos, como césio ou rubídio. Neste caso, a diminuição dos erros na posição da repetidora é proporcional à diminuição no desvio padrão da distribuição dos erros de medição incluídos nas simulações. Com essas melhorias, o melhor cenário de custo-benefício pode ser alcançado com o uso de uma quantidade menor de bases, desde que os ângulos de elevação não sejam muito baixos, então o uso de um ângulo de corte, por exemplo, 15°, é altamente recomendado.

Uma boa explicação para os erros elevados para a posição R4 quando a quantidade de bases é pequena (4 ou 5) pode ser a geometria. A posição R4 da repetidora em Anhembi (ANH) fica em linha com BOT (Base C) e RCL (Base A). Também fica quase em linha com BOT (Base C) e PIR (Base B).

## 6 AS ESPECIFICAÇÕES DO GEOLOCAL

Este capítulo apresenta um resumo das premissas originais do Geolocal, tanto as que estão bem definidas como aquelas que ficaram em aberto. Em seguida, as premissas são discutidas sob o ponto de vista de projeto e problemas são apontados. Foi extraído e adaptado da dissertação de mestrado de um dos pesquisadores (FULLER, 2020) no Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais (PPGCAGE) da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM).

### 6.1 RESUMO DAS PREMISSAS

Os itens a seguir resumem as premissas desejadas ou estabelecidas pelos trabalhos e patentes até o momento:

- o Geolocal tem uma geometria comparável a um “GPS invertido, como se os satélites estivessem no solo”, as bases;
- o sinal das bases é retransmitido por repetidoras no espaço;
- as funcionalidades do sistema são: localizar um alvo, sincronizar relógios remotamente e navegar a repetidora;
- há uma forma de comunicação entre bases, alvos e repetidoras;
- há premissas em aberto ou não definidas nos trabalhos anteriores.

#### 6.1.1 Colocar os satélites de GNSS em solo

O processo de geolocalização dos GNSS, geometricamente falando, utiliza a multilateração, onde o alvo e os satélites formam uma pirâmide. No Geolocal essa pirâmide é truncada, dobrada, colocando-se os equipamentos dos satélites em solo. A “dobra” é realizada por repetidores ou transponders. Com os equipamentos de rádio colocados nas bases em terra, ganha-se o custo de inserção em órbita alta e todos os demais equipamentos necessários para a proteção e manutenção de órbita do satélite. A manutenção também é facilitada.

#### 6.1.2 Repetidoras

Em KAUFMANN e SILVEIRA (2004), as repetidoras estariam em satélites de baixa órbita ou satélites de telecomunicação já existentes. Sobre este último, bastaria contratar junto ao operador do satélite um canal de *transponder*. A posição do satélite sempre seria conhecida pela telemetria (efeméride) fornecida pela operadora.

A introdução de outros suportes para repetidora foi realizada posteriormente (KAUFMANN e KAUFMANN, 2012). Incluiu-se opções como drones, balões e aviões.

### **6.1.3 O alvo**

Para o alvo obter sua localização ele precisaria receber todos os sinais dos “satélites em terra” (bases) através das repetidoras devolvendo às bases para que uma delas fizesse o cálculo. Esse retorno pode ser feito por qualquer meio de comunicação existente (telefonia digital, internet e outros). Eventualmente o alvo poderia ter capacidade de processamento para ele próprio calcular sua posição.

### **6.1.4 O sincronismo de tempo**

O modelo não define metodologia e processos para o sincronismo inicial (*startup*) e periódico dos relógios das bases e do alvo. Isso é tratado como uma premissa (“supõe-se que todos estejam sincronizados”).

### **6.1.5 A comunicação entre bases e alvo**

Também é sugerida uma comunicação via telefonia celular ou internet. O problema, neste modelo, é que o Geolocal ficaria dependente de terceiros (operadoras de celular e provedores). Uma falha no suporte desses terceiros ou mesmo uma área de sombra na cobertura inviabiliza o sistema. É importante notar que o GNSS também tem áreas de sombra, mas não depende de uma operadora ter implementado ou não uma antena porque o sinal do GNSS normalmente tem abrangência mundial.

Em Kaufmann e Silveira (2004) há uma sugestão de se usar os *transponders* como canal de comunicação e assim tornar o sistema independente e autossuficiente.

### **6.1.6 Premissas em aberto**

O sistema GEOLocal, embora muito bem definido e amplamente testado em modelos de simulação, possui algumas premissas que precisam ser esclarecidas para fins de especificação:

- o sistema centraliza todas as operações em uma das bases que realiza os cálculos de posicionamento e distância. As demais bases secundárias e o próprio alvo devem enviar, por algum meio de comunicação disponível, as leituras que fizerem. Este canal de comunicação não foi suficientemente detalhado nos trabalhos anteriores, mas mencionaram-se *links* de micro-ondas, internet e telefonia móvel como possibilidades. Essas opções, ainda

que válidas, estão sujeitas a restrições de visada e distância (*link* de micro-ondas), sinal de telefonia móvel e disponibilidade de internet. Fora isso, as bases podem ser posicionadas em locais de difícil acesso;

- todas as análises matemáticas até o momento partem da premissa que todos os equipamentos estão com seus relógios sincronizados. Entretanto, o processo de sincronismo (inicial e periódico) não está definido;
- os atrasos que ocorrem no interior do equipamento ou mesmo na propagação de sinal, embora considerados nos modelos, não foram definidos ou calculados;
- as precisões desejadas ou almejadas não foram definidas;
- o número de estações necessárias para cobrir uma determinada área precisa ser estudado. Este número guarda relação com a altitude da repetidora e todo o contexto vai definir o total de equipamentos necessários, as suas distâncias e a potência de transmissão necessária;
- as frequências de trabalho estão em aberto;
- não está definida uma área de cobertura. Os trabalhos iniciais colocam o Geolocal como o sistema de navegação e posicionamento brasileiro (ou seja, a área seria todo o País), mas em Kaufmann et al. (2012) fala-se em cobertura menores, quer para efeito das simulações e provas de conceito, quer como uma aplicação possível do sistema.

## 6.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS PREMISSAS

Eletronicamente falando, o GEOLOCAL é um sistema de rádios “inteligentes” e interligados, trocando sinais digitais modulados em uma onda portadora com frequência pré-definida. “Inteligentes” porque, além de transmitir e receber, são capazes de executar operações pré-programadas com esses sinais. Logo, presume-se a existência de um computador ligado a eles.

Estes rádios, de acordo com a topologia original, são divididos em quatro tipos de acordo com suas funcionalidades (Figura 7):

- a estação transmissora-receptora da central de controle (Base A), ligada a um computador, responsável por todo o processamento e cálculos necessários para determinar a posição do alvo e das repetidoras;

- estações receptoras das bases, que junto com a estação transmissora-receptora A, recebe o sinal da repetidora (Bases A, B, C e D);
- repetidora R, um *transponder* que retransmite para o sistema todos os sinais recebidos;
- estação receptora do alvo P.

Logo, há dois tipos de rádios: os que são exclusivamente receptores (bases e alvo) e os que transmitem e recebem (base central e repetidoras). Todas as bases e o alvo, conforme mostrado na Figura 7, necessitam de um canal de comunicação para conectá-los à base central (linhas pontilhadas)

O sistema prevê o uso do conceito de TOF (*Time of Flight*, tempo de vôo), que mede o intervalo de tempo entre a transmissão do sinal e o recebimento do seu retorno, calculando a distância a partir da estimativa do tempo de propagação.

O ciclo de operação consiste na emissão, pela base central, de um sinal codificado com o instante de envio. Em um primeiro ciclo, através das repetidoras, todas as bases, incluindo a base emissora, recebem este sinal, comparam o instante de envio (no sinal recebido) com o instante de recebimento dado pelos seus relógios internos. Finalmente, devolvem para a base central, através de um canal de comunicação:

- a diferença de tempo entre transmissão e recepção;
- as coordenadas (exceto o alvo, que não as determinou ainda).

De posse dessas informações, a base central efetua os cálculos necessários e determina as coordenadas das repetidoras.

Em um segundo ciclo, sabendo-se a posição das repetidoras, novamente a base central gera um sinal que as repetidoras enviam ao alvo. Este, por sua vez, devolve à base central por um canal de comunicação, a diferença de tempo para cada repetidora.

Finalmente, a base central calcula a posição do alvo.

### 6.2.1 Comunicação das bases e alvo com a base central

Um ponto a considerar no modelo atual do Geolocal são as linhas de comunicação entre as bases, algo fundamental para sua operação. Essas linhas podem ser *links* de micro-ondas, internet, comunicação dedicada, telefonia e por elas as bases remotas informam a distância entre cada uma delas e a repetidora, cuja

posição poderá ser calculada pela base central e reenviada à repetidora para se localizar o alvo.

Cada uma dessas tecnologias depende de diversos fatores como visada direta à base central (*link* de micro-ondas), disponibilidade de cabos (ou a possibilidade de serem passados). Nos estudos de distribuição das bases pode ocorrer de precisarmos posicionar uma delas em algum local onde não há um serviço de comunicação disponível ou mesmo não ser tecnicamente possível sua implementação.

Importante também salientar a questão centralizadora, ou seja, todos os cálculos são feitos pela base central independente de quantas bases ou alvos existam, embora em alguns dos trabalhos cita-se a possibilidade de os cálculos serem feitos pelo próprio alvo e os canais de comunicação serem os mesmos *links* de rádio usados para a base central se comunicar com as demais bases.

### **6.2.2 Sincronização de relógios**

O sistema faz a propagação e o sincronismo das bases de tempo entre os atores do sistema, mas somente depois que são calculadas as distâncias. E para calcular as distâncias precisamos das bases de tempo sincronizadas. Neste ponto é necessário encontrar outra forma que não seja instalar os caríssimos relógios de césio em cada base.

Novamente cabe reforçar que metodologia e processo para este sincronismo não estão definidos nem para a partida do sistema nem para sua operação e é uma operação que, por premissa, precisa ser feita remotamente.

### **6.2.3 Atrasos de sinal por hardware, software e propagação**

As ondas eletromagnéticas só se propagam na velocidade da luz quando atravessam o vácuo. Em condições reais na atmosfera terrestre ou no interior de um circuito o meio provoca redução nessa velocidade. Há também atrasos que ocorrem pela execução de softwares nas estações. Esses atrasos estão considerados nas equações do sistema, mas não são facilmente determinados e não são constantes.

### **6.2.4 Precisoões almejadas**

As simulações realizadas por Pamboukian (2012) e Macho (2018) mostraram que o processo e algoritmo do Geolocal nos dá precisão inferior a milímetro desde

que não haja incertezas e os valores dos diversos atrasos, em todo o sistema, estejam bem definidos. Por isso a determinação destes atrasos é extremamente importante.

#### **6.2.5 As limitações para o suporte dos *transponders***

Trabalhos e discussões chegaram a propor *transponders* em todo tipo de aeronave como drones, balões, aviões. Cada aeronave tem a sua altitude de operação e tempo de permanência no ar. Daí há algumas considerações:

- a área de cobertura é um círculo cujo raio é cerca de quatro vezes a altitude da repetidora (Friolani et al., 2020). Um drone a 120 metros de altura cobre uma área de aproximadamente 480 metros de raio. Para áreas extensas seria necessário aumentar o número de equipamentos e comprometer sua viabilidade econômica, a não ser que se aumente a altitude das repetidoras;
- a permanência de uma aeronave no ar depende de fatores como autonomia e autorização do controle de tráfego aéreo;
- algumas dessas aeronaves não têm seu posicionamento controlável, podendo se deslocar de maneira totalmente imprevisível.

## 7 FREQUÊNCIAS, ANTENAS E RÁDIOS

Para o desenvolvimento do primeiro protótipo do Geolocal é necessário definir as frequências de trabalho do sistema, projetar as respectivas antenas e definir os equipamentos transmissores/receptores.

### 7.1 FREQUÊNCIAS UTILIZADAS

A escolha das frequências utilizadas para o Geolocal responde a diferentes critérios que serão examinados a seguir.

O primeiro desses critérios é a adequação às regras definidas pela UIT – União Internacional de Telecomunicações. A UIT divide o globo terrestre em três regiões para fins de administração da faixa de radiofrequências do espectro eletromagnético. A região 2, onde o Brasil está localizado, inclui as administrações dos países das Américas. Assim, no Brasil, a ANATEL – Agência Nacional de TELEcomunicações, gerencia e decreta sobre uma determinada faixa de radiofrequências enquanto a sua atribuição a um determinado serviço (primário ou secundário), e sua destinação a uma determinada aplicação. Periodicamente, a ANATEL publica o seu Plano de Atribuição e Distribuição de Frequências no Brasil (ANATEL, 2020).

Além das regras e normas definidas pela UIT e pela ANATEL no Brasil, existe uma série de outros critérios na escolha de uma faixa de radiofrequências, alguns podendo ser interligados.

A definição do tipo de plataforma utilizada para levar a repetidora é essencial, desde drone (genericamente do tipo RPA - *Remotely Piloted Aircraft*) até satélite, passando por balão estratosférico, avião comercial e CUBSAT. A plataforma utilizada para as repetidoras irá claramente inferir sobre o orçamento total do projeto. Deve também ser a sua escolha associada aos objetivos do projeto: lembramos que o Geolocal não pretende substituir os sistemas atuais (genericamente GNSS – *Global Navigation Satellite System*, como por exemplo o GPS - *Global Positioning System*), mas será complementar, permitindo atuar em “zonas de silêncio”, ou para aplicações específicas como científicas, como por exemplo tratamento de dados, sincronismo remoto de relógios.

A escolha da plataforma utilizada irá definir a faixa de altitude de sua atuação, desde centenas de metros – quilômetros (RPA) até milhares (dezenas de milhares)

no caso de um satélite. A altitude da repetidora por sua vez definirá o meio de propagação das ondas em radiofrequências entre as bases em Terra e a repetidora. Esse meio inclui a atmosfera “neutra” terrestre e suas camadas: troposfera (0-10 km), estratosfera (10-50 km), mesosfera (50-80 km), termosfera (80-500 km), e exosfera (> 500 km), sendo estas camadas definidas pelas propriedades físicas do gás (temperatura, pressão, umidade e composição). Superposto à componente neutra da atmosfera, existe um meio ionizado contendo elétrons livres e chamado de ionosfera. A ionosfera terrestre, formada pela ionização da componente neutra pela radiação solar UV, EUV e em raios X, estende-se entre ~60 km e ~1000 km de altura. Características da propagação de ondas de radiofrequências entre uma base em Terra e a repetidora, em particular a determinação do tempo de propagação, deverá levar em conta e somar os efeitos nos dois meios, a atmosfera neutra e a ionosfera. Atrasos de propagação, ou seja, desvios com respeito a uma propagação realizada com a velocidade da luz, serão responsáveis por uma diferença entre a posição estimada de um alvo pelo sistema Geolocal, e sua posição atual. Assim, esses “erros” deverão ser minimizados. A metodologia adotada para tratar a propagação nos dois meios, a atmosfera neutra e a ionosfera, é diferente já que o primeiro é um meio não dispersivo (pelo menos até na faixa de micro-ondas), enquanto a ionosfera é um meio dispersivo, onde a velocidade de propagação depende da radiofrequência.

Na atmosfera neutra, especialmente na troposfera e estratosfera, adota-se o modelo geométrico de planos paralelos e os atrasos ou “erros” são determinados a partir da refratividade  $N$ , que se expressa em função do índice de refração,  $n$ , do meio, e que representa a opacidade desse meio.  $N$  é medido em ppm, ou mm/km, ou Neper. A opacidade do meio, que é governada pela refração das ondas de radiofrequências, é dividida em duas componentes: a componente hidrostática ou “dry (seca)” e a componente “wet (úmida)”, caracterizadas pelas refratividades  $N_h$  (hidrostática) e  $N_w$  (wet). A opacidade é dominada (80% -100 %) pelo parâmetro  $N_h$  traduzindo fisicamente a refração do gás “seco” (essencialmente  $N_2$  e  $O_2$ ).  $N_h$  varia entre 50 mm/km em 15 km de altitude, e 260 mm/km na superfície da Terra, produzindo assim, um erro de ~ 3.9 m para um alvo no solo, e uma repetidora em 15 km de altitude. Por outro lado,  $N_w$  é responsável pelo restante (0% – 20%) da opacidade, essencialmente na baixa troposfera (0 – 5 km), devido a presença de vapor de água que poderá ser medida através de PWV (*Precipitable Water Vapour*, em milímetro), e que representa

a altura (mm) do conteúdo de água precipitável num cilindro ao longo da linha de visada.  $N_w$  varia entre alguns mm/km em 5 km de altitude até 100 mm/km na superfície da Terra, produzindo assim, um erro de 60 mm para um alvo no solo e uma repetidora em 1 km de altitude. Pelo exposto acima, vemos que dados meteorológicos (T, P, umidade relativa RH) e PWV permitem estimar tanto  $N_h$  como  $N_w$ . A Figura 53 mostra os parâmetros  $N_h$  e  $N_w$  entre 0 km e 15 km, que é a faixa de interesse no que se refere a opacidade de ondas de radiofrequências.

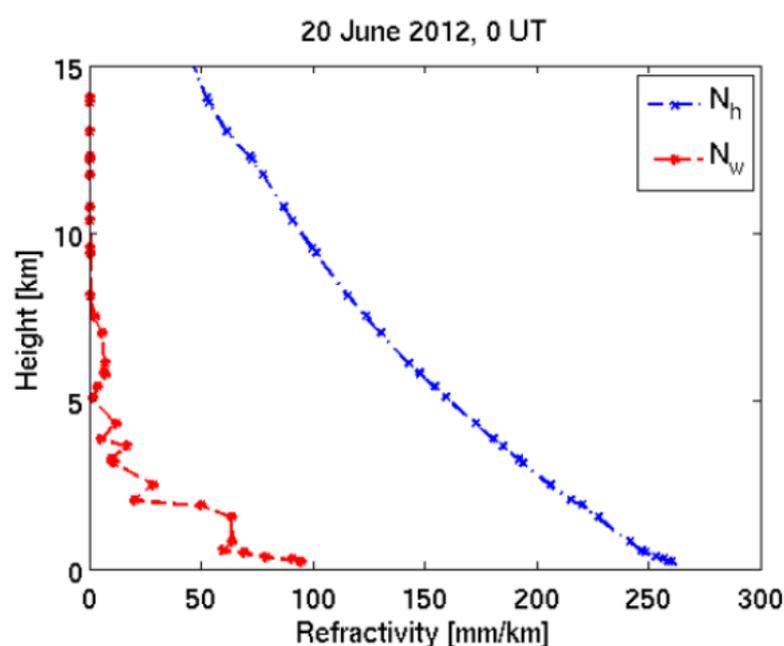


Figura 53 – Refratividades  $N_h$  (hidrostática) e  $N_w$  (wet) (Fonte: courtesy of Johannes Bohm, TU Wien, Department of Geodesy and Geoinformation, Research Division Higher Geodesy)

A parte ionizada da atmosfera terrestre, ou ionosfera, é um meio dispersivo, onde o índice de refração  $N$  depende da radiofrequência, devido a diferentes velocidades de fase e de grupo. Fisicamente, é a ação do campo elétrico da onda de radiofrequência acima dos elétrons livre do meio que irão alterar as propriedades da onda, até, no caso extremo, resultar em velocidade de grupo (ou velocidade de propagação da energia eletromagnética) nula. Nesse caso não há mais propagação. Assim, o parâmetro que governa o índice  $N$  é a densidade eletrônica local,  $N_e$ .  $N$  poderá ser estimado utilizando métodos e técnicas bem conhecidas e utilizadas em geoposicionamento, e que dependem do conteúdo eletrônico ao longo da linha de visada. Para radiofrequências na faixa de micro-ondas são esperados atrasos

temporais da ordem de milhares de ps (pico segundos, ou seja,  $10^{-12}$  s) ou alguns ns (nano segundos, ou seja,  $10^{-9}$  s)

Outro critério que deve ser considerado na escolha da radiofrequência é a concepção, desenho e desenvolvimento das antenas transmissoras e receptoras, e o nível local de EMI – *Electromagnetic Interference* ou RFI – *Radio-Frequency Interference*. Embora a tecnologia e grau de sofisticação das antenas (e de seu custo) aumentem com a frequência, hoje em dia não existem impedimentos sérios, tanto orçamentários como técnicos, até a faixa de micro-ondas. Enquanto as interferências, nas bandas HF (3 – 30 MHz) e VHF (30 – 300 MHz) estão sujeitas a altos níveis de EMI ou RFI se comparado com a faixa micro-onda, como por exemplo as bandas UHF (300 MHz – 3 GHz) e SHF (3 – 30 GHz). Outras variabilidades importantes dos parâmetros físicos dos meios onde as ondas de radiofrequências se propagam, são a variabilidade temporal da radiação solar, a variabilidade espacial devida por exemplo a anomalia magnética brasileira e a presença da anomalia equatorial de ionização, a variabilidade induzida por irregularidades de plasma na ionosfera terrestre. São todos esses fenômenos capazes de produzir uma variabilidade temporal ou espacial na propagação do sinal entre uma base em Terra e a repetidora, resultando assim numa variabilidade na determinação dos tempos de propagação.

No projeto Geolocal foi definido a utilização das radiofrequências de 410 MHz e 2.1 GHz, sendo esta última a radiofrequência principal de comunicação entre as bases e a repetidora. A frequência de 2.1 GHz permite também utilizar conceitos e técnicas conhecidas e bem testadas do sistema GPS. Ao utilizar a frequência de 2.1 GHz, o sistema GEOLocal não irá depender da plataforma da repetidora, podendo, portanto, ser desde um drone, até um satélite, com altitudes máximas entre algumas centenas de metros até milhares de quilômetros. A radiofrequência auxiliar de 410 MHz poderá ser utilizada para estimar os efeitos e atrasos na ionosfera se for comparada com a propagação da onda principal em 2,1 GHz, para uma repetidora localizada em altitudes além da ionosfera. Esta mesma frequência poderá ser utilizada para distribuição dos dados meteorológicos para as bases do sistema Geolocal, diretamente ou via a repetidora.

## 7.2 ANTENAS

A história da antena teve início provável em 1842 com o inventor da telegrafia por fio, Joseph Henry, quando ele aplicou um sinal em um circuito em uma sala da Universidade de Princeton e observou que as agulhas em um circuito localizadas na adega foram magnetizadas pela corrente. O experimento foi repetido algumas vezes até atingir uma distância de um quilômetro entre os dois circuitos (STUTZMAN; THIELE, 1998).

Porém foi Hertz quem realizou o primeiro experimento aceitável de antena em 1887, aplicando as Equações de Eletromagnetismo de Maxwell, as quais consistiam em um sistema para produzir e detectar ondas de rádio eletromagnético. Foram usados dois tipos de antenas, dipolo e o *loop*, onde a informação em binário foi transmitida de transmissor ao receptor sem utilizar fios condutores. Desta forma pode ser considerado o primeiro sistema sem fio digital (HUANG; BOYLE, 2008).

A partir 1948, houve um aumento das aplicações e o uso de antenas com a difusão de televisão, comunicações por satélite e uso de métodos computacionais para problemas eletromagnéticos na década de 1960 passando para comunicação de telefonia móvel em 1980. Assim, com o avanço tecnológico, as antenas passam a ser usadas não somente em comunicações analógicas, mas também em comunicações digitais, as quais são a base das comunicações de celulares, comunicação via satélite, emissoras de televisão, entre outras. O último exemplo citado é base deste trabalho.

### 7.2.1 Teoria das Antenas Independentes da Frequência

Antenas Independentes da Frequência são antenas capazes de trabalhar em diversas frequências, antenas de banda larga. Para o projeto, essa é uma das principais características que uma antena deve possuir para trabalhar na faixa de frequência UHF, usada em TV digital. O termo Antenas Independentes da Frequência surgiu após a década de 1950 (BALANIS, 2005)<sup>0</sup>, quando houve a necessidade de estender as larguras de banda para valores mais elevados.

No conceito de antenas independentes da frequência as características fundamentais podem ficar inalteradas se seu tamanho físico e a frequência operação, ou comprimento de onda, forem modificados. Ou seja,

“Se todas as dimensões físicas forem reduzidas por um fator de dois, o desempenho da antena permanecerá

inalterado se a frequência operação for aumentada por um fator de dois” (BALANIS, 2005).

Desta forma, é aplicado uma modelagem em escala para que o desempenho seja invariante, mantendo-se as dimensões elétricas.

Para que uma antena tenha características independentes da frequência, sua superfície deve ser descrita pelas Equações 35 e 36:

$$r = F(\theta, \varphi) = e^{a\varphi f(\theta)} \quad (35)$$

Onde:

$$a = \frac{1}{K} \frac{dK}{dC} \quad (36)$$

$r$  = distância ao longo da superfície;

$C$  = ângulo azimutal;

$K$  = constante de proporção.

#### 7.2.1.1. Antena Log-Periódica – Conjunto de Dipolo

A log-periódica não faz parte, verdadeiramente, das antenas independentes da frequência por não possuir uma forma especificada somente por ângulos, mas suas características aproximam-se delas. Sua configuração se assemelha muito a antena Yagi-Uda, que também é formada por um conjunto de dipolos, porém, todos os elementos são energizados. Ou seja, todos os elementos são ativos, e não passivos como na Yagi-Uda. Stutzman e Thiele (1998) apontam também que a antena Log-periódica possui uma largura de banda ativa muito maior do que a Yagi-Uda, a qual é fundamental para alguns tipos de aplicação. Uma antena log-periódica de conjunto de dipolos tem sua estrutura parecida com uma antena Yagi-Uda. Porém elas possuem características físicas distintas e fundamentais para a sua construção.

Stutzman e Thiele (1998) explicam a estrutura da antena Yagi-Uda a qual possui apenas um elemento energizado e os outros são chamados de parasitas deste elemento. O elemento energizado é chamado de ressoante (L) e os parasitas podem ser chamados de refletores ( $L_R$ ) ou direcionais ( $L_D$ ). Os espaçamentos desses

elementos também são divididos em espaçamento do refletor ( $S_R$ ) e espaçamento do direcional ( $S_D$ ), como mostra a Figura 54.

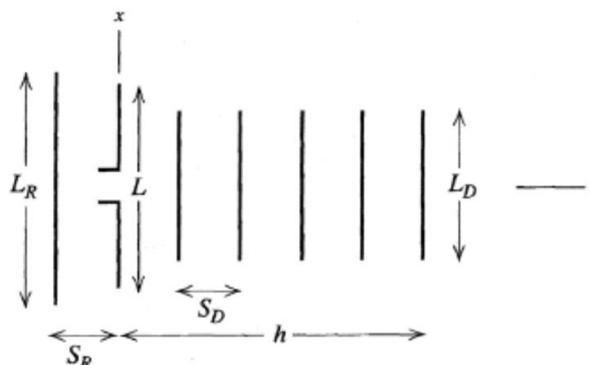


Figura 54 – Representação de uma antena Yagi-Uda (Stutzman e Thiele, 1998).

Já a log-periódica, seus elementos são todos alimentados. Geralmente essa alimentação na ocorre na sua extremidade, onde o comprimento do dipolo é menor. Segundo Stutzman e Thiele (1998), antena Log-periódica é definida como uma antena com uma geometria estrutural onde suas características de impedância e irradiação são repetidas periodicamente com o logaritmo da frequência. Sua geometria consiste em múltiplos dipolos com diferentes comprimentos e esses elementos podem fazer parte da região ativa e não ativa da antena.

Carrel (1961) explica que a função de um elemento está ligada à frequência operação, sendo assim, se o comprimento  $L$  desse elemento for metade do comprimento de onda  $\lambda$ , então este pertence à região ativa. Caso contrário pertencerá a região não-ativa, podendo se assemelhar a um refletor. A frequência atuação de uma antena Log-periódica é determinada, basicamente pelo seu elemento de maior comprimento, indicando a frequência menor, e pelo seu elemento de menor comprimento, indicando a frequência maior.

#### 7.2.1.2. Equações de Projeto

Para a construção de uma antena Log-periódica é preciso atentar-se aos detalhes e relações existentes. Como o nome indica, ela possui uma relação logarítmica da frequência e sua periodicidade.

Dessa forma, serão apresentadas as relações existentes neste tipo de antena e a seguir os passos necessários para o projeto e construção de uma antena Log-periódica.

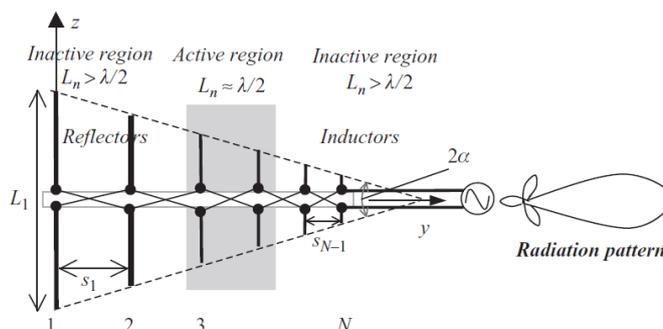


Figura 55 – Representação da geometria da antena log-periódica (Huang e Boyle, 2008).

Huang e Boyle (2008) apresentam a geometria e o padrão de irradiação da antena log-periódica na Figura 55, e, a relação de escala de escala e o fator de espaçamento como:

$$\tau = \frac{L_2}{L_1} = \frac{L_{n+1}}{L_n} = \frac{s_{n+1}}{s_n} = \frac{d_{n+1}}{d_n} = \frac{g_{n+2}}{g_n} < 1 \quad (37)$$

$$\sigma = \frac{s_1}{2L_1} = \frac{s_n}{2L_n} \quad (38)$$

Onde,

- $L_n$  = comprimento do enésimo elemento;
- $n$  = 1, 2, ..., N;
- $s_n$  = espaçamento entre os elementos n e (n+1);
- $d_n$  = diâmetro dos elementos;
- $\tau$  = relação de fator de escala;
- $\sigma$  = fator de espaçamento.
- $g$  = espaçamento entre os elementos

Após definidos todos os parâmetros necessários para o cálculo da estrutura física da antena log-periódica, Balanis (2005) apresenta uma rotina de projeto para servir como base ao projetar uma antena.

Desta forma, alguns valores são pré-determinados tais como, diretividade (em dB), impedância de entrada ( $R_{in}$ ), diâmetro dos elementos da linha de alimentação ( $d$ ) e frequências superior e inferior de banda passante ( $B$ ). Os valores definidos são mostrados através da Tabela 14 como exemplo de cálculo.

Tabela 14 – Tabela dos valores Pré-estabelecidos do Projeto (Autoria própria)

| Parâmetros   | Valor   |
|--|---------|
| Diretividade (dB)                                  | 10 dB   |
| Impedância de Entrada (Rin)                        | 75 Ohm  |
| Diâmetro dos elementos da linha de alimentação (d) | 4 mm    |
| Frequência Superior (fmáx)                         | 758 MHz |
| Frequência Inferior (fmín)                         | 470 MHz |

Estabelecido o valor de 10dB de diretividade, é possível encontra os valores de  $\tau$  e  $\sigma$  que são 0,94 e 0,177 respectivamente pela Figura 56.

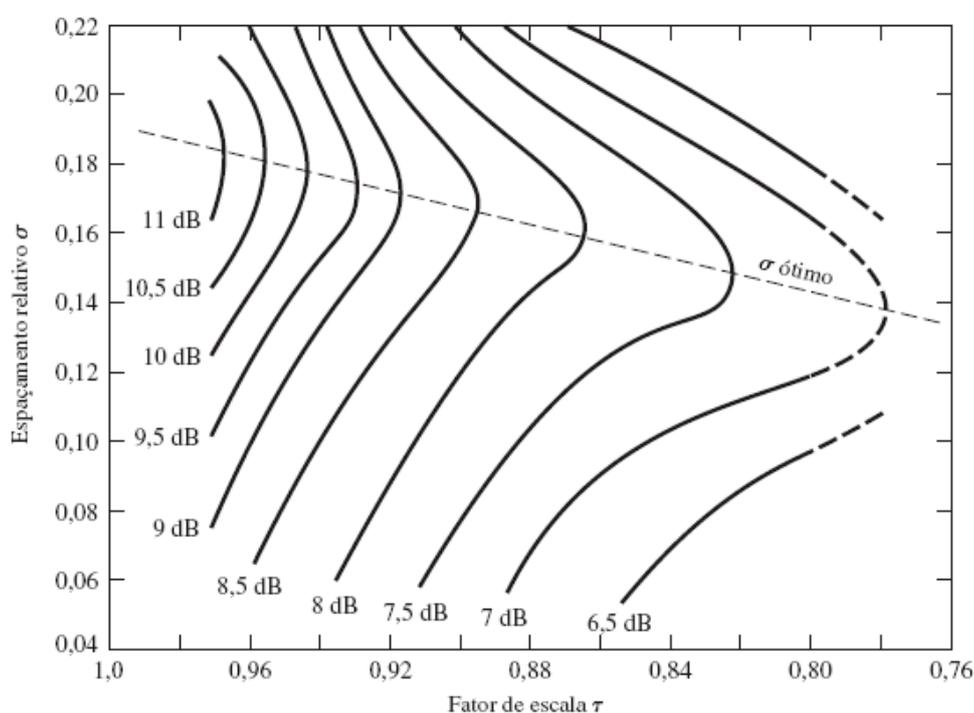


Figura 56 – Relação de tau e sigma (Balanis, 2005).

Encontrado os valores de  $\tau$  e  $\sigma$  pelo gráfico anterior, pode-se encontrar o ângulo vértice, ângulo formado ao traçar uma linha imaginária nas extremidades dos dipolos e prolongando-a até que se encontrem (STUTZMAN; THIELE, 1998).

$$\alpha = \arctg\left(\frac{L_n - L_{n+1}}{2s_n}\right) = \arctg\left(\frac{L_n(1 - \tau)}{2s_n}\right) = \arctg\left(\frac{1 - \tau}{4\sigma}\right) \quad (39)$$

$$\alpha = \arctg \left( \frac{1 - 0,94}{4 * 0,177} \right) = 4,84^\circ \quad (40)$$

Utilizando-se os valores de frequência máxima e mínima, calcula-se a banda ativa ( $B_{ar}$ ) e a de projeto ( $B_s$ ) apresentada por 0 como:

$$\begin{aligned} B_{ar} &= [1,1 + 7,7(1 - \tau)^2 \cot(\alpha)] \\ &= [1,1 + 7,7(1 - 0,94)^2 \cot(4,84^\circ)] = 1,428 \end{aligned} \quad (41)$$

$$B = \frac{f_{m\acute{a}x}}{f_{m\acute{i}n}} = \frac{758}{470} = 1,613 \quad (42)$$

$$\begin{aligned} B_s &= B B_{ar} = B [1,1 + 7,7(1 - \tau)^2 \cot(\alpha)] = 1,428 * 1,613 \\ &= 2,303 \end{aligned} \quad (43)$$

A determinação do comprimento total dos elementos ( $L$ ) e o número de elementos ( $N$ ) pode ser calculada, adotando-se a velocidade da luz como  $3 \cdot 10^8 m/s$ .

$$\lambda_{m\acute{a}x} = 2l_{m\acute{a}x} = \frac{v}{f_{m\acute{i}n}} = \frac{3 * 10^8}{470 * 10^6} = 0,638m \quad (44)$$

$$N = 1 + \frac{\ln(B_s)}{\ln(1/\tau)} = 1 + \frac{\ln(2,303)}{\ln(1/0,94)} = 14 \text{ elementos} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} L_T &= \frac{\lambda_{m\acute{a}x}}{4} \left( 1 - \frac{1}{B_s} \right) \cotg(\alpha) = \frac{0,638}{4} \left( 1 - \frac{1}{3,65} \right) \cotg(16,7) \\ &= 0,305m \end{aligned} \quad (46)$$

Para calcular o elemento maior que é considerado a metade do comprimento de onda ( $\lambda/2$ ).

$$L_1 = \frac{0,638}{2} = 0,319 m \quad (47)$$

Os elementos são divididos em duas partes, uma vez que uma metade é colocado uma lança e a outra é colocado na outra. Assim, para calcular os demais comprimentos e as demais distâncias entre eles utiliza-se a relação da razão geométrica ( $\tau$ ).

Para o cálculo das distâncias entre os elementos, foi considerado 3 cm em uma extremidade para o encaixe do conector e 8 cm na outra extremidade para a base onde a antena será instalada. Dessa forma, os cálculos foram parametrizados para qual posição da lança o próximo elemento deverá ser colocado. Os resultados são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Relação dos pares de elementos e suas distâncias relativas (Autoria própria).

| ELEMENTO | Afastamento do elemento na Lança (mm) | Tamanho da haste (mm) |
|----------|---------------------------------------|-----------------------|
| 1        | 1072                                  | 160                   |
| 2        | 959                                   | 150                   |
| 3        | 853                                   | 141                   |
| 4        | 753                                   | 132                   |
| 5        | 659                                   | 124                   |
| 6        | 570                                   | 117                   |
| 7        | 487                                   | 110                   |
| 8        | 409                                   | 103                   |
| 9        | 336                                   | 97                    |
| 10       | 267                                   | 91                    |
| 11       | 202                                   | 86                    |
| 12       | 141                                   | 81                    |
| 13       | 84                                    | 76                    |
| 14       | 30                                    | 71                    |

A determinação da impedância característica média dos elementos foi obtida pelo uso da Equação 49 e o espaço relativo médio a Equação 50.

$$Z_a = 120 \left[ \ln \left( \frac{l_n}{d_n} \right) - 2,25 \right] = 120 \left[ \ln \left( \frac{0,320}{0,004} \right) - 2,25 \right] \quad (48)$$

$$= 244,84 \text{ ohms}$$

$$\frac{Z_a}{R_{in}} = \frac{244,84}{75} = 3,411 \quad (49)$$

$$\sigma' = \frac{\sigma}{\sqrt{\tau}} = \frac{0,177}{\sqrt{0,94}} = 0,188 = 0,19 \quad (50)$$

Calculada a impedância característica relativa dos dipolos, o espaço relativo médio ( $\sigma'$ ) e utilizando-se o gráfico da Figura 57 que os relacionam com a impedância característica relativa de uma linha de alimentação.

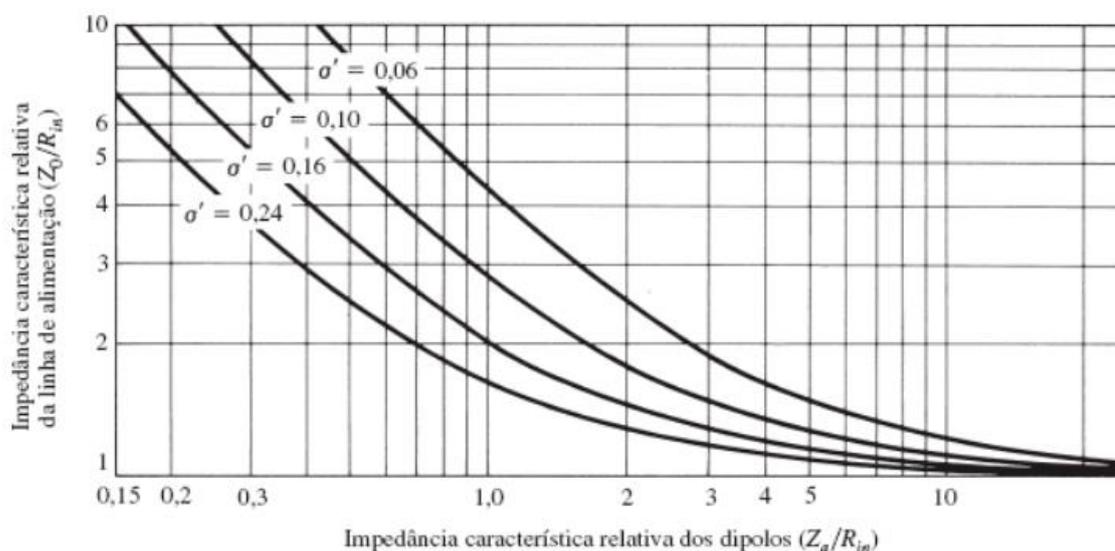


Figura 57 – Relação de Impedância (Stutzman e Thiele, 1998).

Desta forma, encontra-se o valor de 1,3 para a impedância característica relativa de uma linha de alimentação. Portanto  $Z_0$  pode ser encontrado por:

$$Z_0 = 1,3 R_{in} = 1,5 * 75 = 97,5 \text{ ohm} \quad (51)$$

E por fim, calcula-se a distância entre os dois condutores centro a centro, apresentado por Carrel (1961):

$$s = d \cosh\left(\frac{Z_0}{120}\right) = 0,001 \cosh\left(\frac{97,5}{120}\right) = 0,0013 \text{ m} \quad (52)$$

### 7.2.1.3. Relação Frente Costas (RFC)

Um parâmetro que também serve para caracterizar a antena, é a relação frente costas. Essa medida é a relação do ganho entre o máximo valor do lóbulo principal e

o máximo valor do lóbulo posterior. Uma quantidade de energia geralmente é perdida para trás (mesmo que se utilize refletores como no caso de antenas Yagi), a equação 53 ilustra a medida:

$$RFC = 10 \log \left( \frac{P_{frente}}{P_{trás}} \right) \text{ dB} \quad (53)$$

Onde:

RFC – Relação frente costas.

$P_{frente}$  – potência irradiada para frente da antena.

$P_{trás}$  – potência irradiada para as costas da antena.

### 7.2.2 Especificações

Foi definido o uso no projeto de duas antenas log-periódicas para as frequências até 2 GHz e 430 MHz. Para especificar suas características, foram aplicadas as equações teóricas para cada uma das frequências. As especificações da antena de 430 MHz são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Especificações elétricas do projeto para 430 MHz (Autoria própria).

| Faixa de frequência               | UHF  | 415 – 445 MHz                      |
|-----------------------------------|--|------------------------------------|
| <b>Faixa de canais</b>            |  |                                    |
| <b>TV</b>                         | $S_{11} \leq -10,0 \text{ dB}$<br>@ 415 – 445 MHz                  | VSWR $\leq 2,0$<br>@ 415 – 445 MHz |
| <b>Impedância</b>                 | 50 $\Omega$  |                                    |
| <b>Ganho</b>                      | $> \approx 9 \text{ dBi}$  |                                    |
| <b>Relação Frente Costas</b>      | $> \approx 10 \text{ dB}$  |                                    |
| <b>Frequência Central</b>         | 430 MHz  |                                    |
| <b>Comprimento da lança</b>       | Variável, onde $L \leq 700 \text{ mm}$ (dependente da geometria) * |                                    |
| <b>Número de elementos máximo</b> | $\leq 16$ (32 pares) * *   |                                    |

\* A especificação não impõe esse parâmetro.

\*\* A especificação não impõe esse parâmetro, mas influencia fortemente o ganho e relação frente costas.

A Tabela apresenta os valores de especificação para a frequência de 2 GHz.

Tabela 17 – Especificações elétricas do projeto para 2 GHz (Autoria própria).

| <b>Faixa de frequência</b>        | <b>UHF</b>  | <b>1950 MHz – 2100 MHz</b>                  |
|-----------------------------------|---|---|
| <b>Faixa de canais</b>            |   |   |
| <b>TV</b>                         | <b>S11 &lt;= -10,0 dB @ 1950 MHz – 2100 MHz</b>                 | <b>VSWR &lt;= 2,0 @ 1950 MHz – 2100 MHz</b> |
| <b>Impedância</b>                 | <b>50 Ω</b>   |   |
| <b>Ganho</b>                      | <b>&gt; ≈ 9 dBi</b>   |   |
| <b>Relação Frente Costas</b>      | <b>&gt; ≈ 10 dB</b>   |   |
| <b>Frequência Central</b>         | <b>2000 MHz</b>   |   |
| <b>Comprimento da lança</b>       | <b>Variável, onde L &lt;= 70 mm (dependente da geometria) *</b> |   |
| <b>Número de elementos máximo</b> | <b>&lt;= 16 (32 pares) **</b>                                   |   |

\* A especificação não impõe esse parâmetro.

\*\* A especificação não impõe esse parâmetro, mas influencia fortemente o ganho e relação frente costas.

Também foi definida uma antena omnidirecional na faixa dos 430 MHz.

### 7.2.3 Detalhamento das etapas de construção do protótipo para as frequências de 430 MHz e 2000 MHz.

Nesta seção, é apresentada todas as versões que foram dimensionadas, simuladas, projetadas e medidas pelo LTVD. O ponto de partida do projeto foi otimizar a perda de retorno e o ganho de uma antena log-periódica estabelecida da especificação. O projeto da antena foi dividido em duas etapas: a antena de 430 MHz e a antena de 2000 MHz.

#### 7.2.3.1. Primeira Etapa - Projeto e otimização de uma antena Log-Periódica para 430 MHz.

Neste projeto foram calculados o tamanho da lança que apoia os elementos irradiadores, o tamanho dos elementos irradiadores. A partir destes dados levados a um simulador comercial (MWS-CST @2016) licenciado para pesquisa e fins educacionais para a Universidade Presbiteriana Mackenzie, com o objetivo destas simulações a redução do seu tamanho físico respeitando os limites geométricos as

dimensões principais da antena, sem perder as características desejadas, tais como perda de retorno e ganhos. Nesta etapa da pesquisa, foi investigado a possibilidade de que uma outra antena com menos números de elementos e, portanto, menor tamanho físico fosse possível de ser obtida.

#### 7.2.3.1.1. Estudo de antena construída em substrato FR 4 para 430 MHz.

Nesta fase, antena projetada foi estudada pelo LTVD Com base em sua estrutura geométrica em um simulador eletromagnético de onda completa, suas características elétricas foram entendidas e mensuradas, por meio de simulação os parâmetros exigidos pela nova especificação foram avaliados e ajustados. Essa simulação com base na geometria inicial não apresentou diferenças em relação a seus valores originais e não se aproximavam do desempenho da antena objeto de 14 elementos. A antena original conseguiu apresentar para a perda de retorno uma resposta continua na faixa de 415 a 445 MHz onde se exigiu  $S_{11} < -7,5$  dB (valores estes para os quais foi projetada), os resultados apontavam para um corte na perda de retorno para além de 440 MHz. Esse valor se justifica pela forma do casamento de impedância da antena com o alimentador de 50 ohms, para aquelas dimensões e geometria.

Também foi observado que o ganho e relação frente costas não se estabilizava ao longo da faixa de 415 a 445 MHz. Esses parâmetros exigiram uma nova construção geométrica para limitar a perda de retorno para uma nova especificação ( $S_{11} \leq -10$  dB) além de otimizar o ganho e relação frente costas e ter a resposta na faixa desejada ao longo de 415 a 445 MHz

#### 7.2.3.1.2. Resultados obtidos por simulação

Esta seção apresenta os resultados obtidos pelo simulador para a antena de 11 pares de elementos. A antena apresentada originalmente possuía uma lança teórica de 1100 mm de comprimento. Esse valor é obtido projetando-a para as especificações originais, entretanto, um ajuste realizado nesse parâmetro permitiu um fator de compactação da geometria, reduzindo, portanto, o custo fabril da mesma, dessa maneira, o tamanho da lança apresentado era de 550mm. Esse parâmetro foi ajustado em uma escala de redução, todavia esta geometria não atendia a nova especificação. Visando estudar o impacto nesses parâmetros, em ambiente de simulação, o fator de compactação respectivamente de 2; 1,5; 1 e 0,5.

### 7.2.3.1.3. Parâmetros obtidos por simulação para a antena de 430 MHz.

Foi elaborada uma antena utilizando-se como substrato o material FR 4, cujas propriedades de elétricas são conhecidas na literatura. Essa antena foi construída qual objetivo de tornar a estrutura o mais fina possível é leve para manuseio e transporte e sua operação em campo.

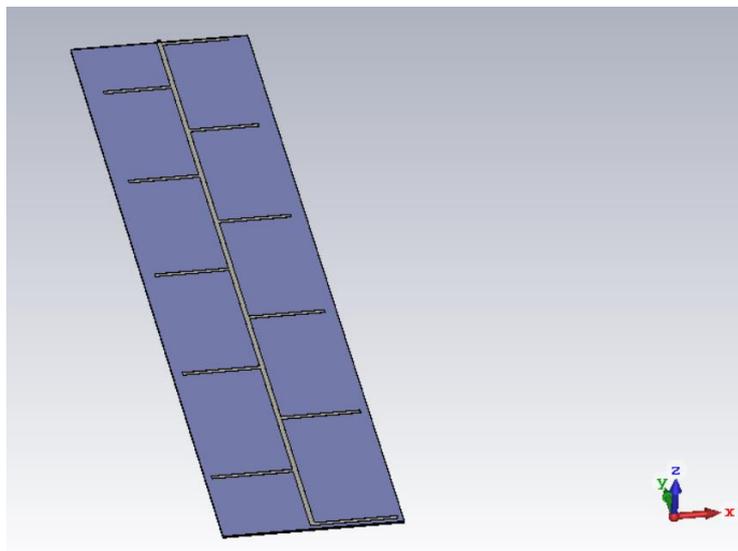


Figura 58 – Perfil da antena log periódica construída com substrato FR 4 (Autoria própria).

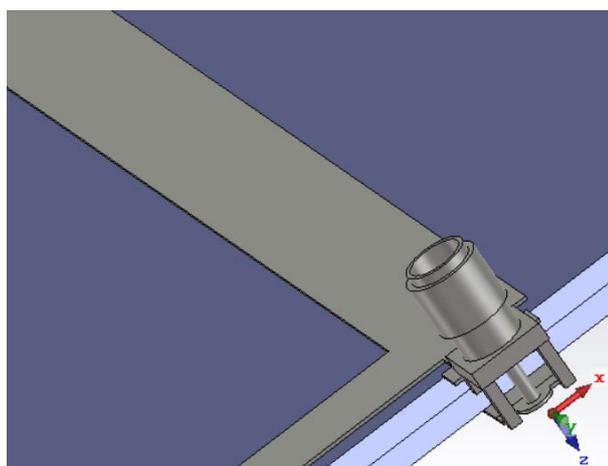


Figura 59 – Detalhes do perfil do conector SMA de alimentação da antena (Autoria própria).

A estrutura foi baseada na estrutura espessura para conexão de um conector SMA, cujo padrão de impedância é de  $50 \Omega$ , isso se faz necessário pois a estrutura de rádio frequência o que é utilizado tem esse padrão de alimentação.

A estrutura da antena permite que antena tem uma frequência de ressonância na faixa de especificação de projeto. Esse parâmetro é medido pela perda de retorno S11. O valor ideal de perda de retorno de uma antena deve ser menor do que -10dB na faixa de operação. A Figura 60 apresenta a perda de retorno dentro da especificação indicando ressonância em 430 MHz.

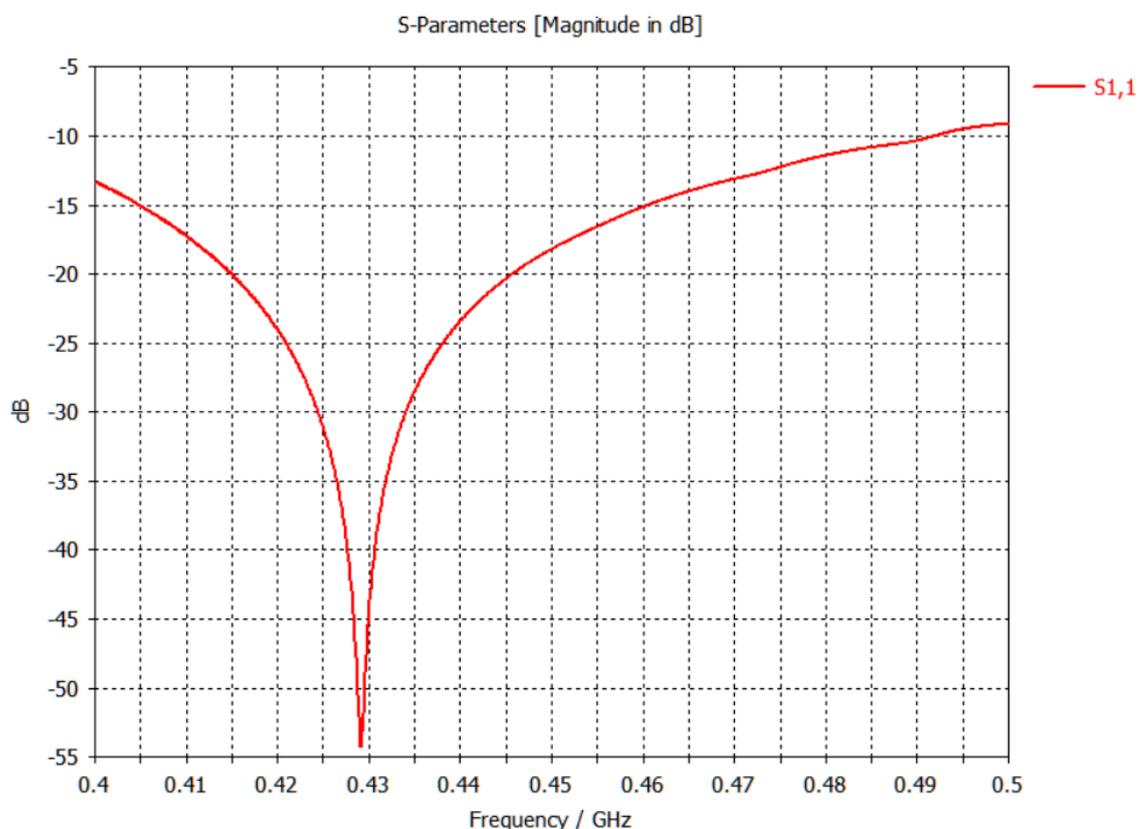


Figura 60 – Perda de retorno da antena projetada para 430 MHz em FR 4 (Autoria própria).

Outro parâmetro importante é ganho que uma antena possui, no caso da antena log periódica a característica fundamental é o alto ganho em uma direção preferencial, tornando-a altamente focalizada em uma dada direção espacial. A Figura 61 apresenta o ganho da antena.

Outro parâmetro igualmente importante é a relação frente costas RFC, que mede a capacidade de rejeição de um sinal vindo pelas costas da antena o valor aceito para um bom projeto é acima de 10 decibéis. O Presente projeto na frequência de trabalho apresenta uma relação RFC de 18,26 decibéis, indicando a excelente capacidade de receber sinal apenas na direção preferencial. A Figura 62 apresenta a RFC na frequência central de especificação.

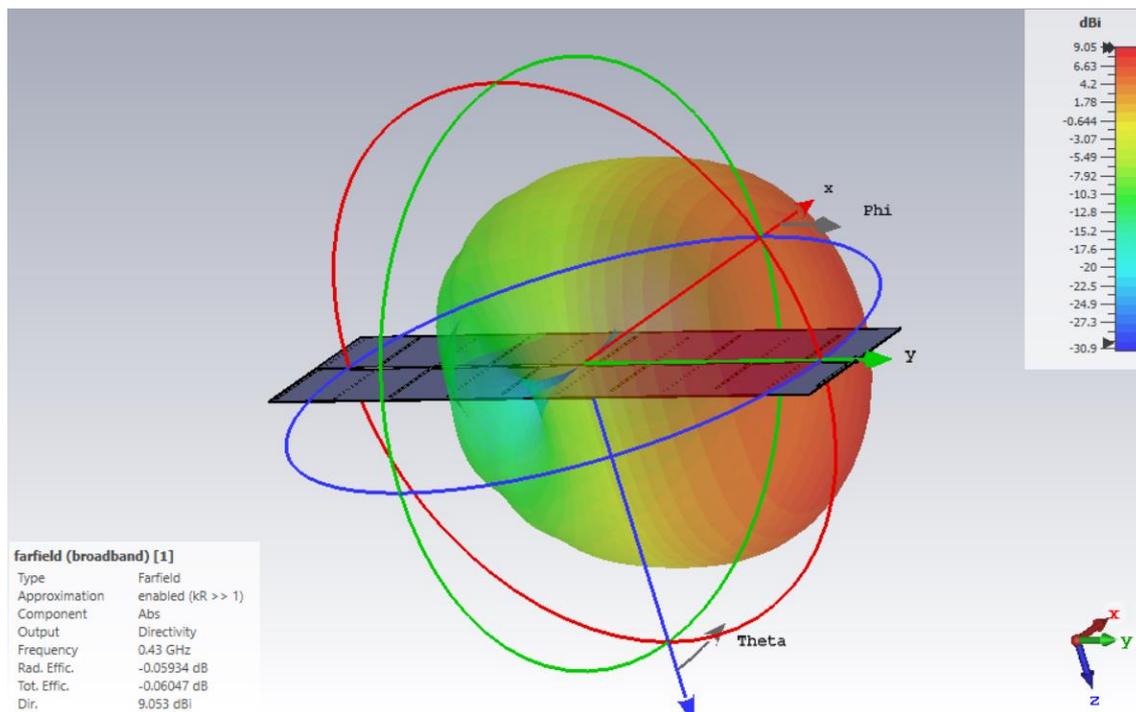


Figura 61 – Ganho na frequência de ressonância da antena log periódica em 430 MHz construída com material FR 4 (Autoria própria).

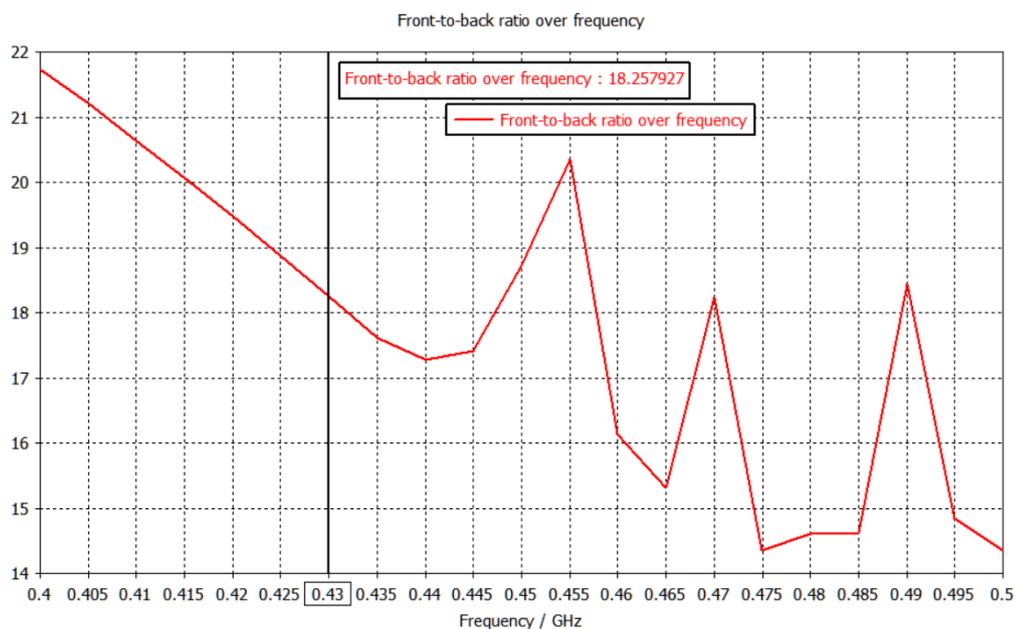


Figura 62 – Relação frente costas na frequência da especificação 430 MHz (Autoria própria).

O ganho ou diretividade estão relacionados diretamente, sendo a diretividade o parâmetro que mede a capacidade da antena de focalizar uma fonte transmissora.

A Figura 63 apresenta a diretividade sobre a faixa especificada de frequências de operação é em destaque a frequência de 430 MHz que possui diretividade de 9 decibéis.

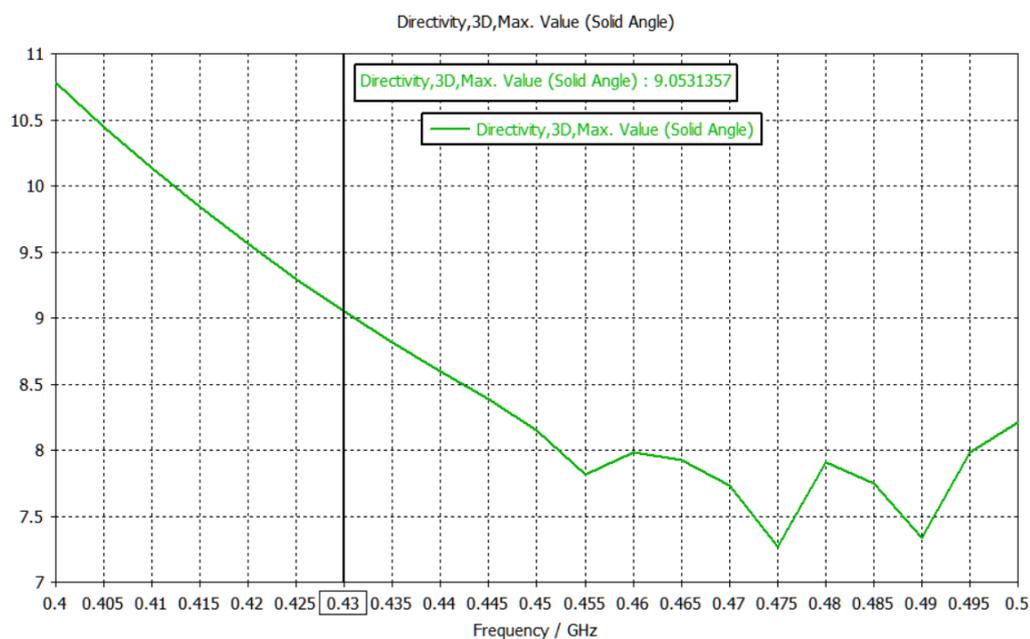


Figura 63 – Diretividade da antena na frequência central de operação de especificação 430 MHz (Autoria própria).

Tabela 18 – Dimensões construtivas das hastes e afastamento entre as hastes da antena simulado em FR 4 (Autoria própria).

| Elemento | Haste (mm) | Afastamento (mm) |
|----------|------------|------------------|
| 1        | 187        | 0                |
| 2        | 184        | 140              |
| 3        | 180        | 278              |
| 4        | 176        | 412              |
| 5        | 173        | 544              |
| 6        | 169        | 674              |
| 7        | 166        | 801              |
| 8        | 163        | 925              |
| 9        | 159        | 1047             |
| 10       | 156        | 1166             |
| 11       | 153        | 1283             |

### 7.2.3.2. Segunda Etapa - Projeto e otimização de uma antena Log-Periódica para 2000 MHz.

Neste projeto foram calculados o tamanho da lança que apoia os elementos irradiadores, e o tamanho dos elementos irradiadores. A partir destes dados levados a um simulador comercial (MWS-CST @2016) licenciado para pesquisa e fins educacionais para a Universidade Presbiteriana Mackenzie, com o objetivo destas simulações a redução do seu tamanho físico respeitando os limites geométricos as dimensões principais da antena, sem perder as características desejadas, tais como perda de retorno e ganhos.

#### 7.2.3.2.1. Estudo de antena construída em substrato FR 4 para 2000 MHz.

Nesta fase, a antena projetada foi estudada pelo LTVD Com base em sua estrutura geométrica em um simulador eletromagnético de onda completa, suas características elétricas foram entendidas e mensuradas, por meio de simulação os parâmetros exigidos pela nova especificação foram avaliados e ajustados. A antena calculada tem 9 elementos. A antena original conseguiu apresentar para a perda de retorno uma resposta continua na faixa de 1950 a 2100 MHz onde se exigiu  $S_{11} < -7,5$  dB (valores estes para os quais foi projetada), os resultados apontavam para um corte na perda de retorno para além de 2100 MHz. Esse valor se justifica pela forma do casamento de impedância da antena com o alimentador de 50 ohms, para aquelas dimensões e geometria.

Também foi observado que o ganho e relação frente costas não se estabilizava ao longo da faixa de 1950 a 2100 MHz. Esses parâmetros exigiram uma nova construção geométrica para limitar a perda de retorno para uma nova especificação ( $S_{11} \leq -10$  dB) além de otimizar o ganho e relação frente costas e ter a resposta na faixa desejada ao longo de 1950 a 2100 MHz.

#### 7.2.3.2.2. Resultados obtidos por simulação

Esta seção apresenta os resultados obtidos pelo simulador para a antena de 9 pares de elementos. A antena apresentada originalmente possuía uma lança teórica de 190 mm de comprimento. Esse valor é obtido projetando-a para as especificações originais.

Foi elaborada uma antena utilizando-se como substrato o material FR4, cujas propriedades de elétricas são conhecidas na literatura. Essa antena foi construída

qual objetivo de tornar a estrutura o mais fina possível é leve para manuseio e transporte e sua operação em campo.

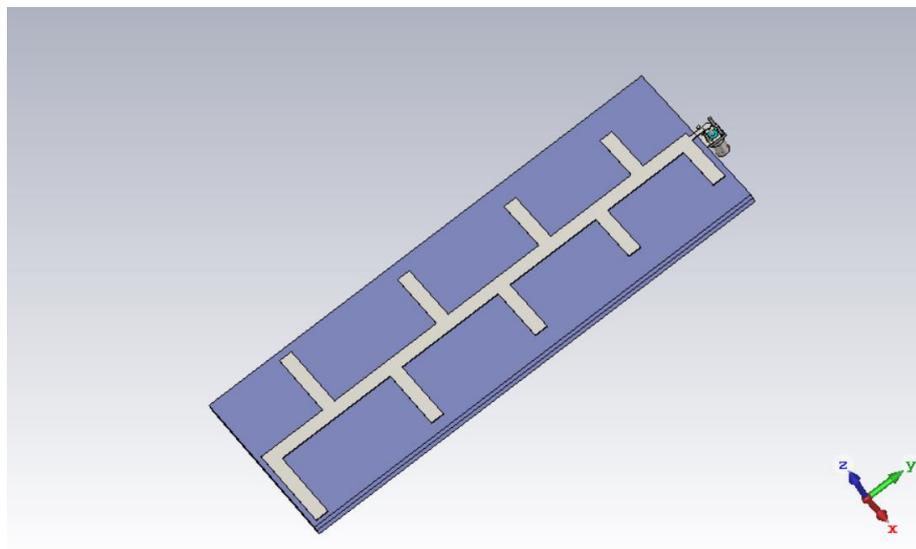


Figura 64 – Perfil da antena log periódica construída com substrato FR4 em 2000 MHz (Autoria própria).

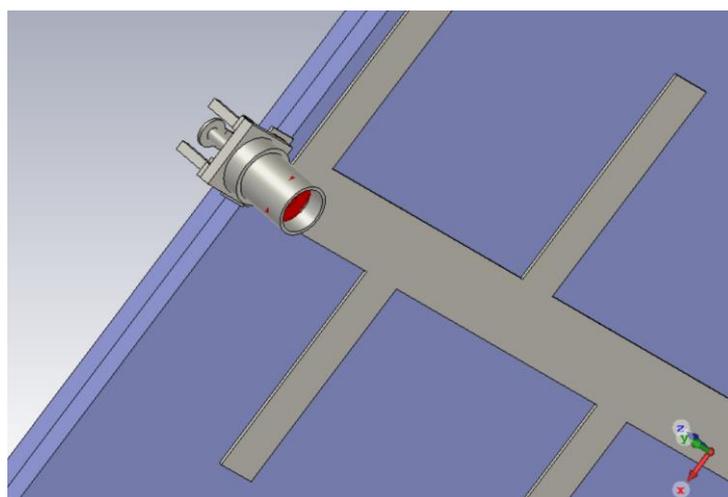


Figura 65 – Detalhes do perfil do conector SMA de alimentação da antena (Autoria própria).

A estrutura foi baseada na estrutura espessura para conexão de um conector SMA, cujo padrão de impedância é de  $50 \Omega$ , isso se faz necessário pois a estrutura de rádio frequência o que é utilizado tem esse padrão de alimentação.

A estrutura da antena permite que antena tem uma frequência de ressonância na faixa de especificação de projeto. Esse parâmetro é medido pela perda de retorno

S11. o valor ideal de perda de retorno de uma antena deve ser menor do que -10dB na faixa de operação. A Figura 66 apresenta a perda de retorno dentro da especificação indicando ressonância em 2000 MHz.

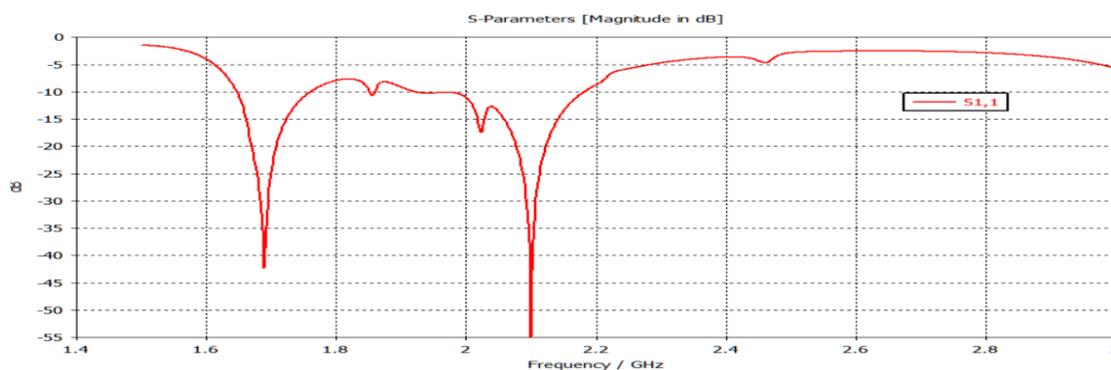


Figura 66 – Perda de retorno da antena projetada para 2000 MHz em FR 4 (Autoria própria).

Outro parâmetro importante é ganho que uma antena possui, no caso da antena log periódica a característica fundamental é o alto ganho em uma direção preferencial, tornando-a altamente focalizada em uma dada direção espacial. A Figura 67 apresenta o ganho da antena.

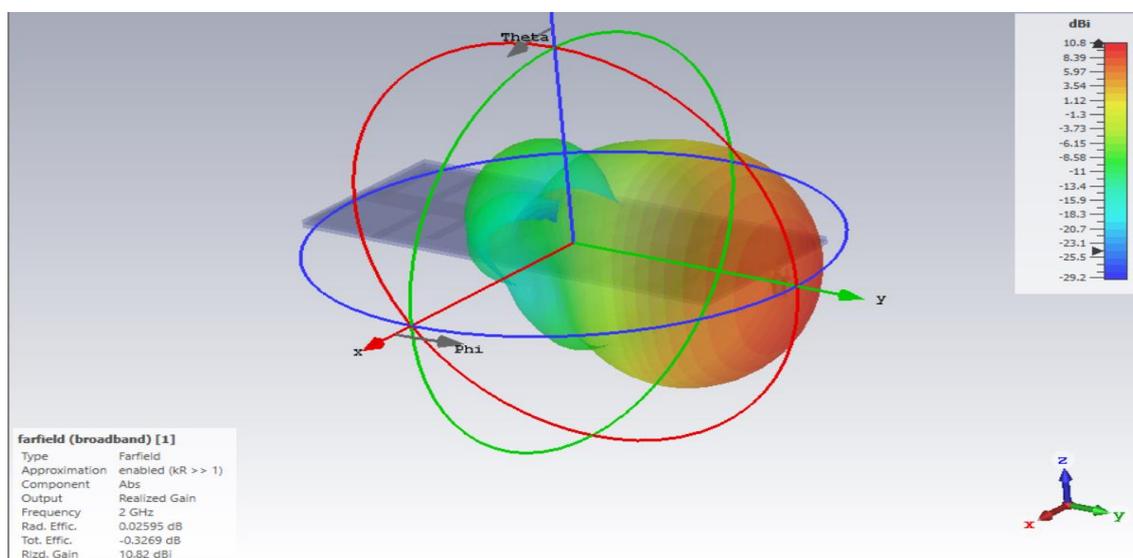


Figura 67 – Ganho na frequência de ressonância da antena log periódica em 2000 MHz construída com material FR 4 (Autoria própria).

Outro parâmetro igualmente importante é a relação frente costas RFC, que mede a capacidade de rejeição de um sinal vindo pelas costas da antena o valor aceito para um bom projeto é acima de 10 decibéis. O Presente projeto na frequência de trabalho apresenta uma relação RFC de 22,47 decibéis, indicando a excelente capacidade de receber sinal apenas na direção preferencial. A Figura 68 apresenta a RFC na frequência central de especificação.

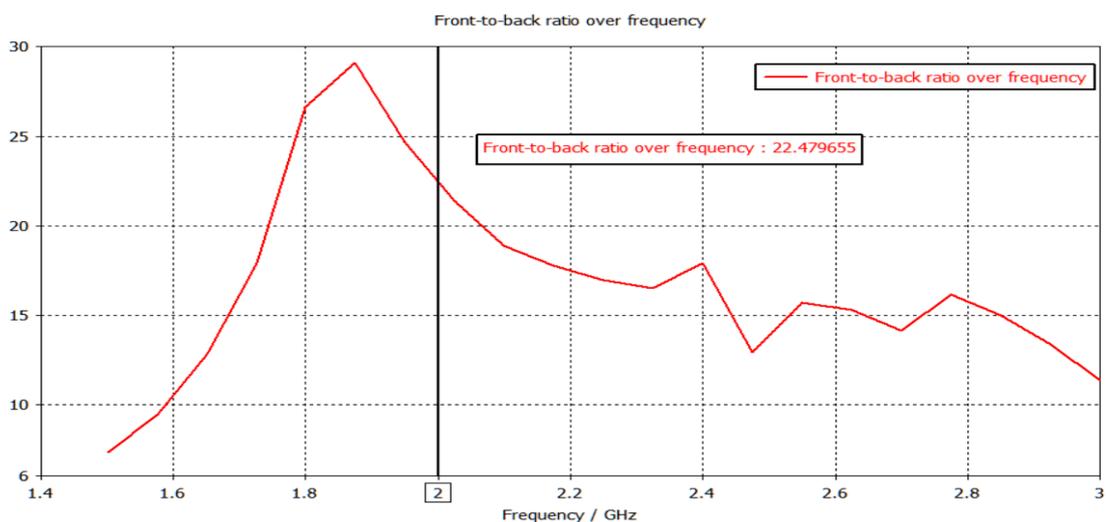


Figura 68 – Relação frente costas na frequência da especificação 2000 MHz (Autoria própria).

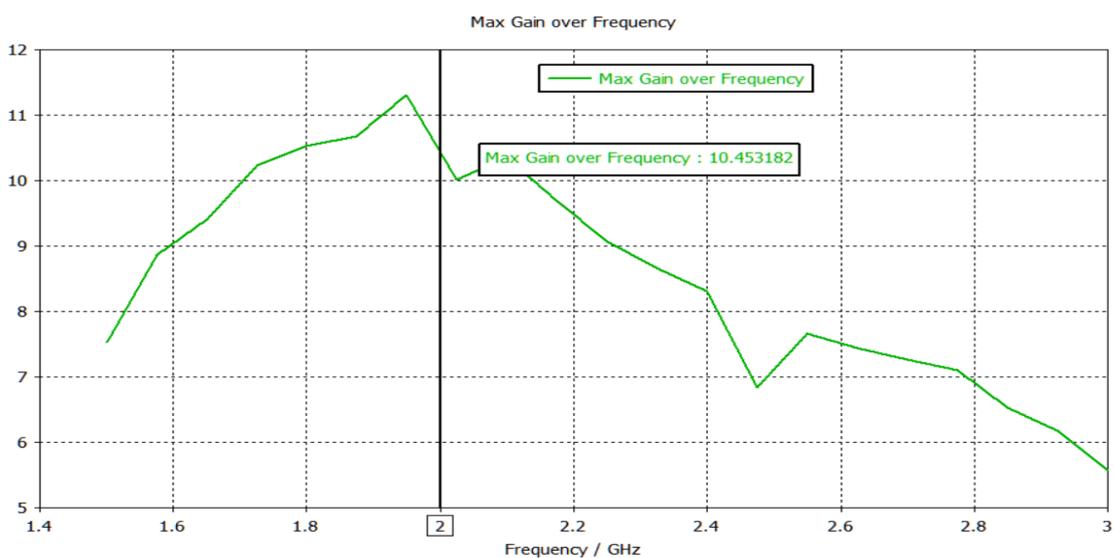


Figura 69– Diretividade da antena na frequência central de operação de especificação 2000 MHz (Autoria própria).

O ganho ou diretividade estão relacionados diretamente, sendo a diretividade o parâmetro que mede a capacidade da antena de focalizar uma fonte transmissora. A Figura 69 apresenta a diretividade sobre a faixa especificada de frequências de operação é em destaque a frequência de 2000 MHz que possui diretividade de 10,45 decibéis.

Tabela 19 – Dimensões construtivas das hastes e afastamento entre as hastes da antena simulado em FR 4 (Autoria própria).

| Elemento | Haste (mm) | Afastamento (mm) |
|----------|------------|------------------|
| 1        | 37,5       | 0,0              |
| 2        | 35,6       | 27,0             |
| 3        | 33,8       | 52,6             |
| 4        | 32,1       | 76,9             |
| 5        | 30,5       | 100,0            |
| 6        | 29,0       | 122,0            |
| 7        | 27,5       | 142,8            |
| 8        | 26,2       | 162,6            |
| 9        | 24,9       | 181,5            |

#### 7.2.4 Antena monopolo quarto de onda para a frequência de 430 MHz

Antena monopolo também conhecida como antena Marconi uma antena que opera na frequência um quarto de Lambda. Esta antena tem como característica principal a sua omnidirecionalidade, ou seja, ela pode receber sinal em qualquer direção em azimute.

$$L = \frac{75}{f} \text{ (mm)} \quad (54)$$

A equação 54 apresenta a dimensão do monopolo em milímetros para a frequência em MHz, então para esse projeto com  $f = 430$ , obtemos  $L = 175$  mm aproximadamente. Esse parâmetro é inserido na ferramenta de simulação.

Após simulações foram obtidos os resultados de perda de retorno (S11), ganho, ganho sobre a frequência e ângulo de meia potência.

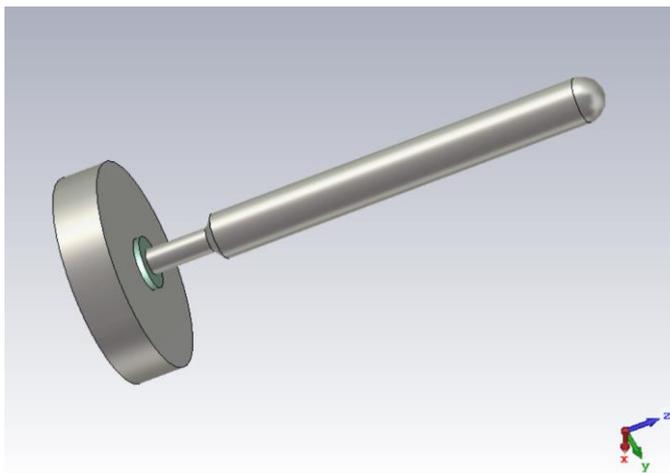


Figura 70 – Antena em perfil (Autoria própria).

A perda de retorno é um parâmetro importante, pois mostra a capacidade da antena sintonizar ou ressoar na frequência especificada de projeto. A Figura 71 apresenta a perda de retorno centrada em 430 MHz.

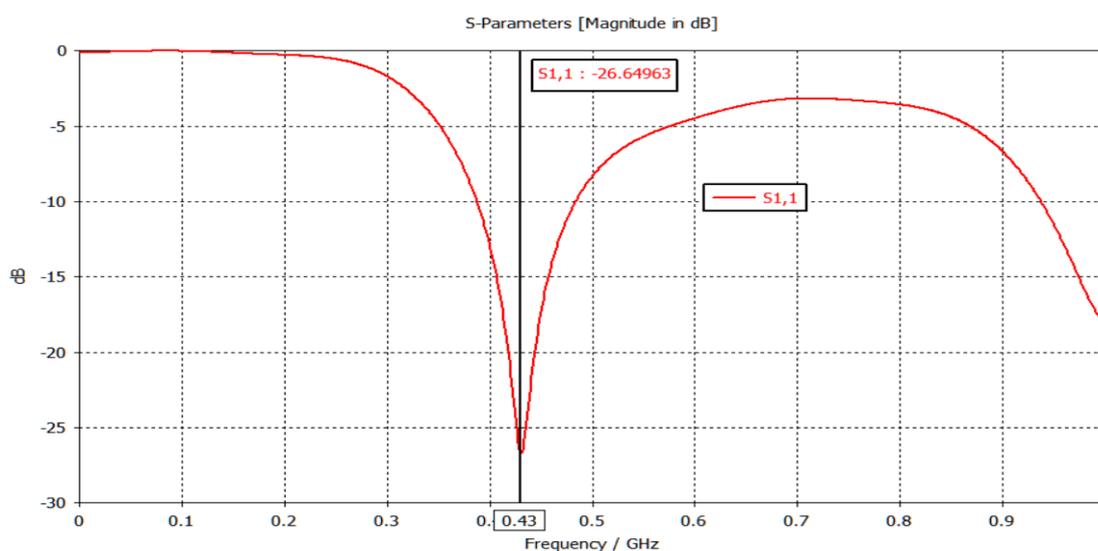


Figura 71 – Perda de retorno antena monopolo para a frequência de 430 MHz (Autoria própria).

A Figura 72 apresenta na frequência de 430 MHz o ganho de 2,06 dB, que corresponde a 0,13 dBi uma vez que a antena isotrópica tem ganho 2,15 dB; dessa maneira é possível verificar a omnidirecionalidade da antena que teoricamente deveria ser de 0dBi.

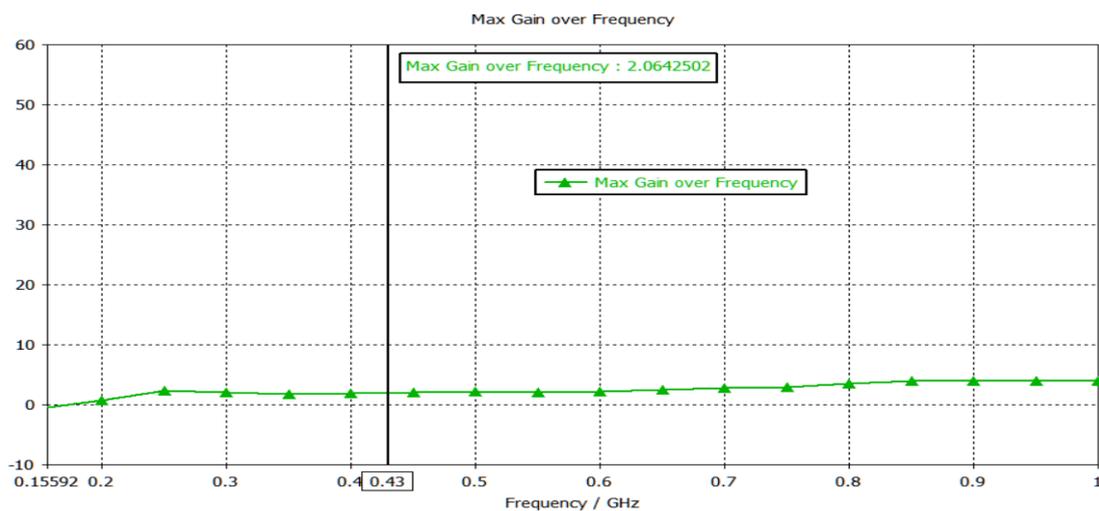


Figura 72 – Máximo ganho sobre a frequência e o valor em 430 MHz (Autoria própria).

Outra forma de poder verificar isso é na Figuras 73 e 74, que apresentam o diagrama polar. Nesse diagrama é possível observar a omnidirecionalidade da antenna projetada.

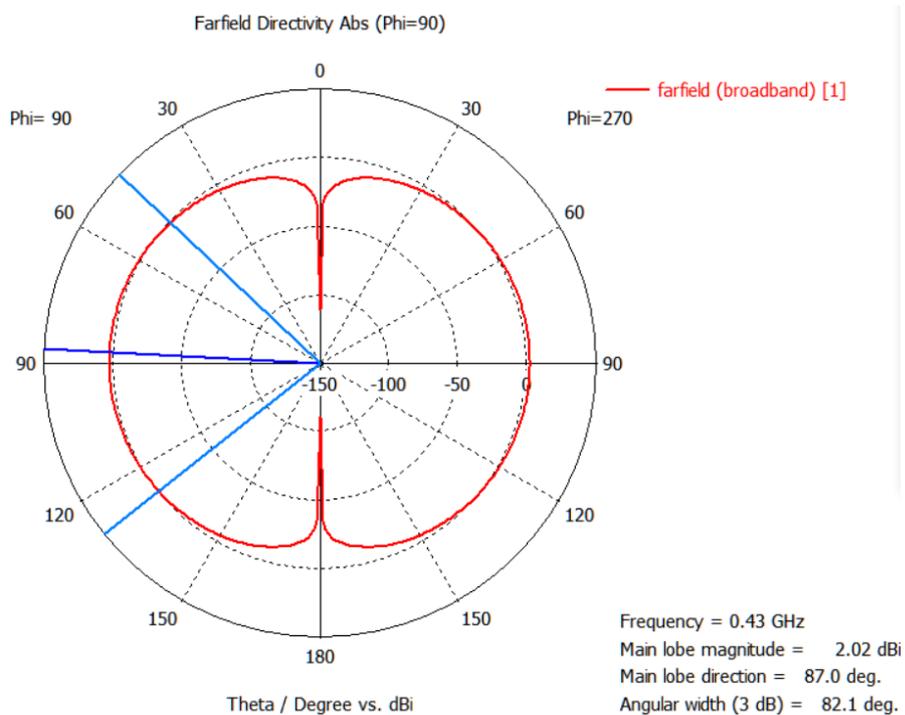


Figura 73 – Diagrama de irradiação polar na frequência de ressonância 430 MHz (Autoria própria).

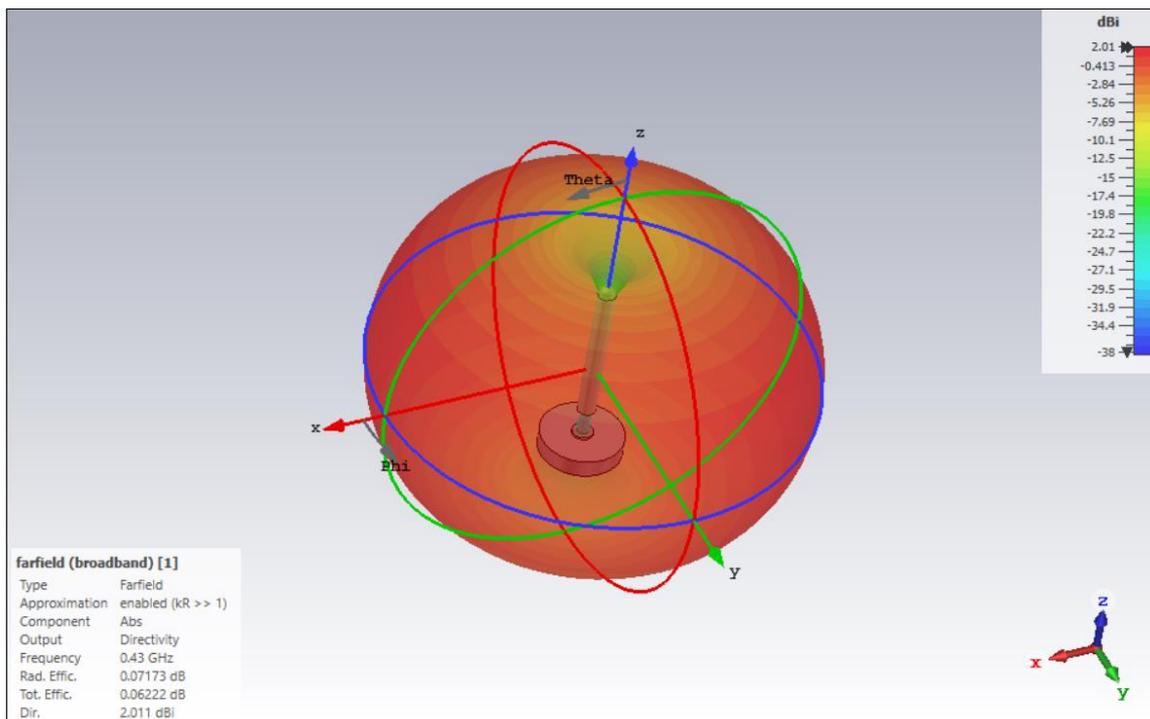


Figura 74 – Diagrama de irradiação tridimensional na frequência de 430 MHz (Autoria própria)

Quanto às dimensões podemos observar na Figura 75 as respectivas dimensões da estrutura.

| Parameter List    |            |       |          |  |
|-------------------|------------|-------|----------|--|
| Name              | Expression | Value | Descript |  |
| Fundocoax         | = 25       | 25    |          |  |
| FundoConeTerra    | = 5        | 5     |          |  |
| HCilindroMenor    | = 30       | 30    |          |  |
| HconeFundo1       | = 4.5      | 4.5   |          |  |
| Hmonopolo1        | 180        | 180   |          |  |
| RaioCilindroMenor | = 6        | 6     |          |  |
| RaioMonopolo1     | = 11       | 11    |          |  |
| Rterra            | = 50       | 50    |          |  |
| <new parameter>   |            |       |          |  |

Figura 75 – Dimensões da antena em milímetros (Autoria própria).

### 7.3 RÁDIOS E SDR

O GEOLOCAL propõe, como em outros sistemas, medir o tempo de propagação de ondas de rádio entre seus elementos e assim determinar as distâncias (KAUFMANN et al., 2004). Cabe aqui um rápido estudo sobre os equipamentos necessários.

Segundo FEYNEMAN (1963), ondas de rádio são radiações eletromagnéticas com frequências inferiores ao infravermelho, conforme o espectro eletromagnético.

Rádio, por outro lado, é a tecnologia que permite sinalização e comunicação utilizando essas ondas de rádio. Os dispositivos eletrônicos que emitem essas ondas são chamados *transmissores* e os que as recebem, *receptores*. Genericamente pode-se referir a transmissores e receptores como “rádios” e a interface entre o circuito elétrico do rádio e o meio de propagação das ondas (vácuo, ar ou outro meio físico) é chamado de *antena* (ELLINGSON, 2016).

A utilização prática das ondas de rádio para comunicação foi realizada por Marconi em 1895, transmitindo sinais telegráficos (BRADFORD, 1996). Essencialmente era um equipamento que emitia pulsos de ondas de rádio a partir dos movimentos feitos em uma chave telegráfica. Esta e outras conquistas renderam a Marconi o Prêmio Nobel de Física em 1910.

Posteriormente em 1905, os trabalhos de Reginald Fessenden, que trabalhava à época com Thomas Edison, permitiram as primeiras comunicações de voz usando ondas de rádio modulando a amplitude das ondas pela amplitude do sinal sonoro convertido em eletricidade por um transdutor (FESSENDEN, 1908).

Em sua essência, um rádio é um dispositivo que gera uma onda eletromagnética (também chamada de *portadora*) e a condiciona combinando com um sinal que desejamos transmitir. Este conjunto (portadora mais sinal), ao ser captado pelo receptor, tem a portadora separada e o sinal é recuperado. Ao processo de combinar sinal e portadora dá-se o nome de *modulação* e à recuperação deste sinal, *demodulação*.

A modulação se dá alterando uma ou mais propriedades da onda eletromagnética: sua amplitude (AM, *Amplitude Modulation* ou Modulação em Amplitude), sua frequência fundamental (FM, *Frequency Modulation* ou Modulação em Frequência) ou sua fase (PM, *Phase Modulation* ou Modulação de Fase).

Todo este processo, dentro de um rádio, é realizado por componentes discretos (capacitores, resistores, válvulas a vácuo, indutores e transistores, entre outros). A Figura 76 mostra o diagrama em blocos dos principais processos.

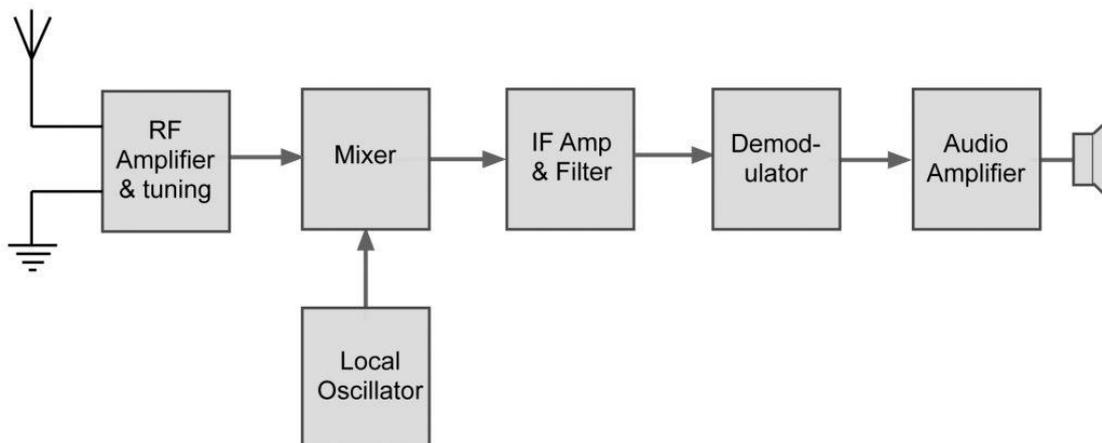


Figura 76 - Diagrama em blocos de um receptor de rádio (ELECTRONICS NOTES, 2020).

Com o desenvolvimento da eletrônica digital, uma parte deste processo deixou de ser feita por componentes discretos. Uma vez que a portadora modulada é recebida e amplificada, ela é convertida para um sinal digital que é tratado por algoritmos computacionais através dos quais o sinal de comunicação é extraído. O mesmo ocorre nos transmissores.

O circuito físico, então, simplifica-se para um amplificador de RF (Radiofrequência) com conversor AD (Analógico-Digital) na entrada e um DA (Digital-Analógico) na saída (Figura 77). A este aparelho dá-se o nome de SDR (*Software Defined Radio*, ou Rádio Definido por Software).

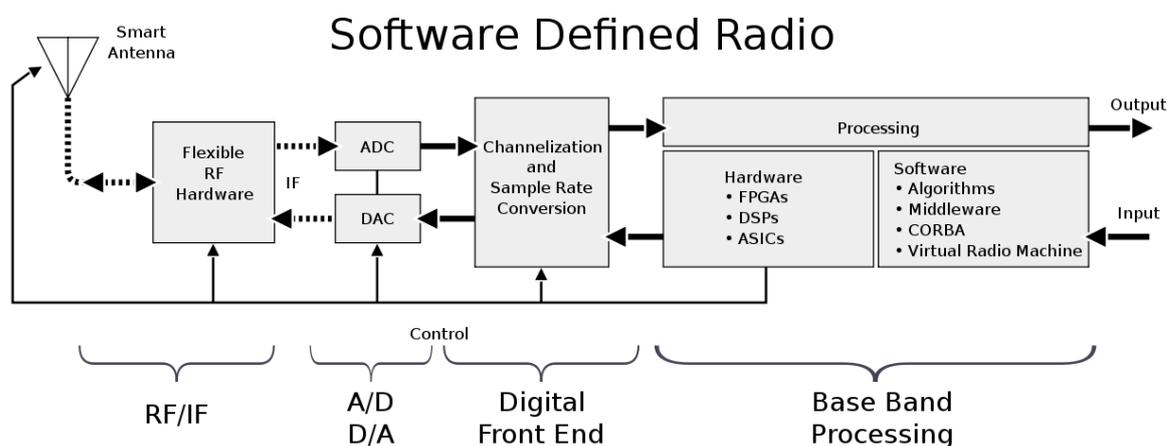


Figura 77 - diagrama de um SDR (ELECTRONICS NOTES, 2020).

Em resumo, o SDR é um dispositivo eletrônico que, após receber as ondas eletromagnéticas de rádio em sua antena, amplifica e converte esse sinal analógico para digital. A partir deste momento, todo o tratamento que no passado era feito analogicamente por componentes discretos é feito por algoritmos de software através de técnicas de processamento digital de sinais.

É um dispositivo reconfigurável e parametrizável, trazendo grande agilidade durante a fase de desenvolvimento de projeto sem a necessidade de se desenhar e construir novos circuitos a cada mudança (tudo é resolvido por software). Ou seja, para um mesmo hardware pode-se implementar os mais diversos tipos de rádios e modulações apenas trocando os algoritmos.

O mercado dispõe de SDRs em diversas configurações, indo desde simples receptores até placas mais elaboradas com dois canais de recepção e transmissão simultâneos. Pode-se escolher a configuração que melhor atende ao GEOLOCAL.

### **7.3.1 RTL-SDR**

A configuração de SDR mais simples é o RTL-SDR, um dispositivo com dimensões de um *pen drive* que utiliza o chip RTL2832U da Realtek. Originalmente este chip era utilizado em dispositivos comercializados para implementar receptores de TV em notebooks, porém os esforços de Antti Palosaari, Eric Fry e Steve Markgrafa da Osmocon (RTL-SDR, 2020) identificaram a possibilidade destes dispositivos serem programados usando-se plataformas como a GNURadio (GNURADIO, 2020).

Este dispositivo tem um custo reduzido, cerca de USD 50. Embora seja apenas receptor (não tem a eletrônica para transmitir), pode ser utilizado em muitas aplicações onde sua faixa de frequência de 500 kHz a 1.75 GHz é adequada (Figura 78).

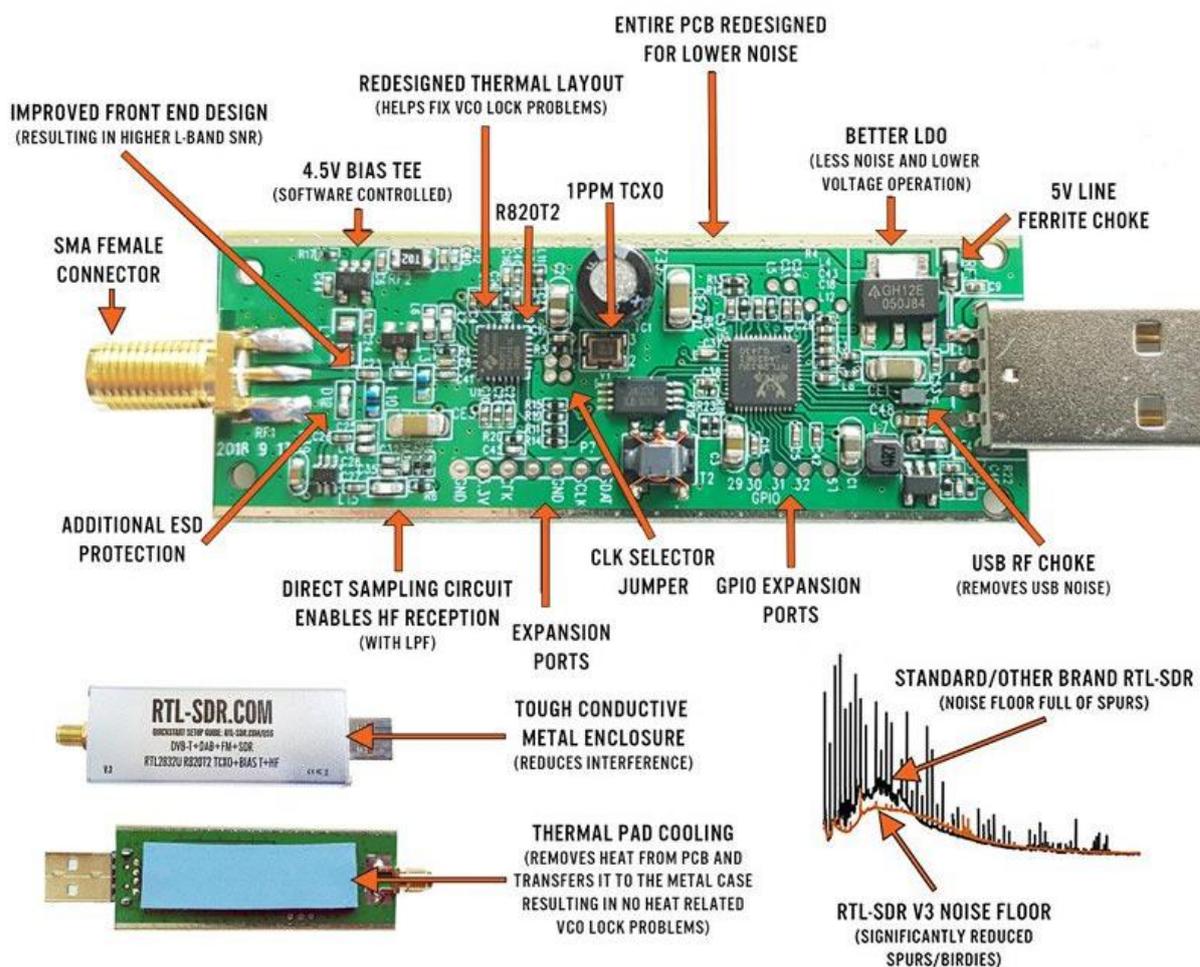


Figura 78 - RTL-SDR e seus componentes internos (RTL-SDR, 2020).

### 7.3.2 USRP

Para aplicações que demandam transmissão e recepção, com maior banda de frequência e FPGA para implementação de parte do software conferindo maior velocidade de processamento, há os USRP (*Universal Software Radio Peripheral*). Dentre eles, destaca-se a linha completa de dispositivos da Ettus Research / National Instruments (ETTUS, 2020), em especial os USRP B200 e B210.

A opção B200 possui um canal full duplex com transmissão e recepção simultâneas e uma faixa de frequência indo dos 70 MHz aos 6 GHz com banda de 56 MHz e quadratura de 64 MS/s. Sua potência de transmissão é de 10 dBi e a figura de ruído de recepção é -80 dBi (Figura 79).



Figura 79 - USRP B200 da Ettus Research (ETTUS, 2020)

Há também a versão B210, que possui dois canais full duplex. Ambos os produtos foram desenvolvidos pensando em instrumentação de bancada para desenvolvimento de produtos e possuem conectores para referência de tempo em 1 pps e 10 MHz, bem como um conector tipo molex padrão para incorporar bases de tempo como o OCXO (*oven-controlled oscillator*) e o GPSDO (*GPS Disciplined Oscillator*, Figura 80). Aceita também um oscilador on-board de Césio.



Figura 80 - GPSDO para o USRP B200 da Ettus Research (ETTUS, 2020).

### 7.3.3 GNURadio

Há três principais plataformas de desenvolvimento de software para os SDR: MATLAB, LabVIEW (National Instruments) e GNURadio.

O GNURadio é um software livre e oferece uma plataforma com uma interface gráfica (Figura 81) que permite a construção de algoritmos através da combinação de blocos configuráveis (módulos). Cada bloco corresponde, internamente à plataforma, a uma classe desenvolvida em C++, associada a uma interface gráfica parametrizada por um pequeno programa em Python (GNURADIO, 2020)

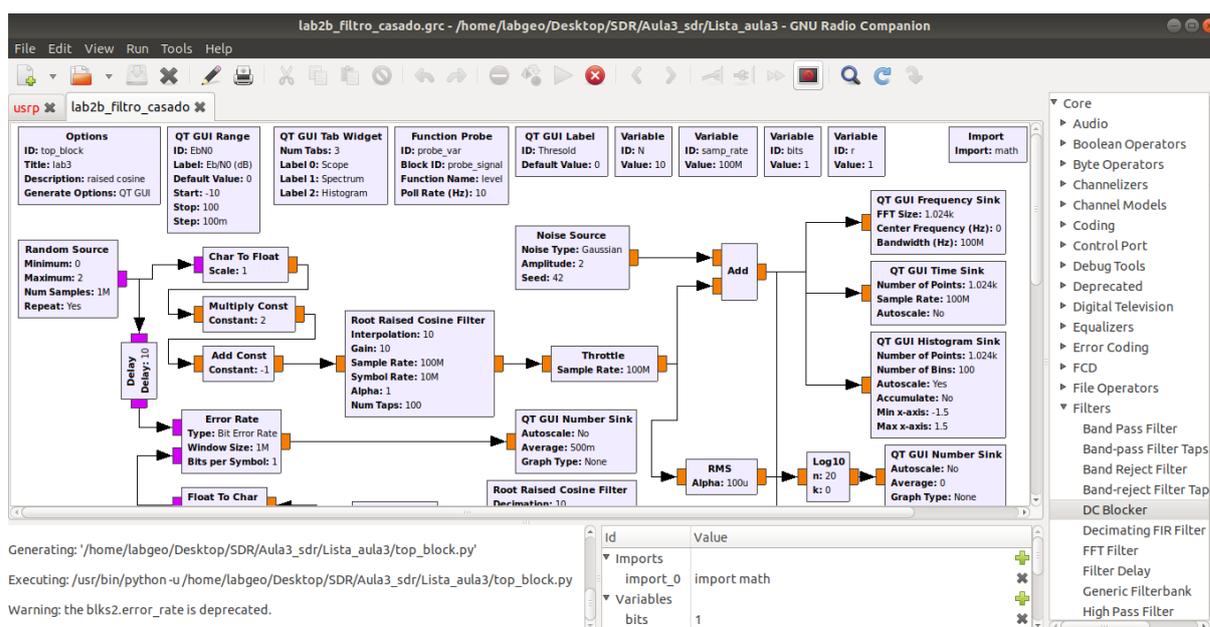


Figura 81 - Interface gráfica do GNURadio (Autoria própria)

Além de agilizar o desenvolvimento, o produto final pode ser compactado em um único produto e instalado em algum suporte computacional embarcado como um equipamento de rádio portátil. Há ampla literatura sobre esta plataforma e uma comunidade bastante ativa no desenvolvimento de melhorias e suporte.

Um dos subprodutos do GNURadio é o GNSS-SDR (2020), um conjunto de bibliotecas de software que permite a utilização de um rádio SDR para navegação por GNSS.

### 7.3.4 Linux

Linux é um sistema operacional para computadores pessoais lançado em 1991 por Linus Torvalds. É considerado software livre e há várias distribuições diferentes disponíveis (Ubuntu, RedHat, Debian entre outras), conforme suas funcionalidades e

o grupo que cuida de seu desenvolvimento (ECKERT, 2012). É um sistema amplamente utilizado em aplicações ligadas a internet e servidores e em eletrônica embarcada, em especial por ter como característica a possibilidade de funcionar sem sua interface gráfica, liberando capacidade de processamento do computador.

GNURadio (2020) recomenda que seja instalado em um computador com a distribuição UBUNTU, na versão mais recente.

### 7.3.5 Raspberry Pi

Computador de uma única placa (SBC – *Single-Board Computer*) um computador completo em uma única placa de circuito impresso que contém o processador, memória e dispositivos de entrada e saída. Dentre os vários modelos e fabricantes existentes no mercado destaca-se o Raspberry Pi (Figura 82), desenvolvido na Inglaterra pela Raspberry Pi Foundation (2020).

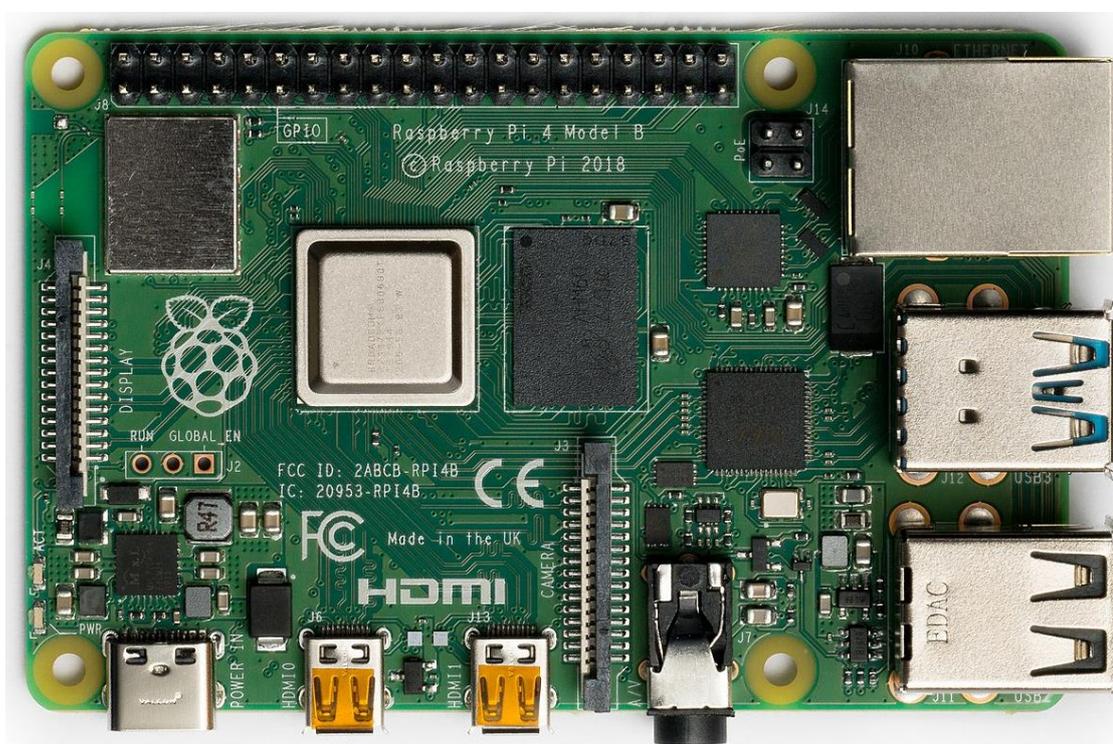


Figura 82 - Raspberry Pi 4 (RASPBERRY PI FOUNDATION, 2020)

Na sua versão mais recente, o Raspberry Pi4 vem com um processador ARM Cortex A7s quad-core de 1.5 GHz e permite o uso de diversos sistemas operacionais, entre eles: Linux, FreeBSD e Windows 10 (em uma versão dedicada). Possui interfaces ethernet, USB3, HDMI e áudio, entrada para webcam e um barramento para expansão (GPIO, *General Purpose Input/Output*). Há três opções de memória interna

(2, 4 e 8 GB) e usa um cartão MicroSD para armazenamento e instalação do Sistema Operacional (Figura 83).

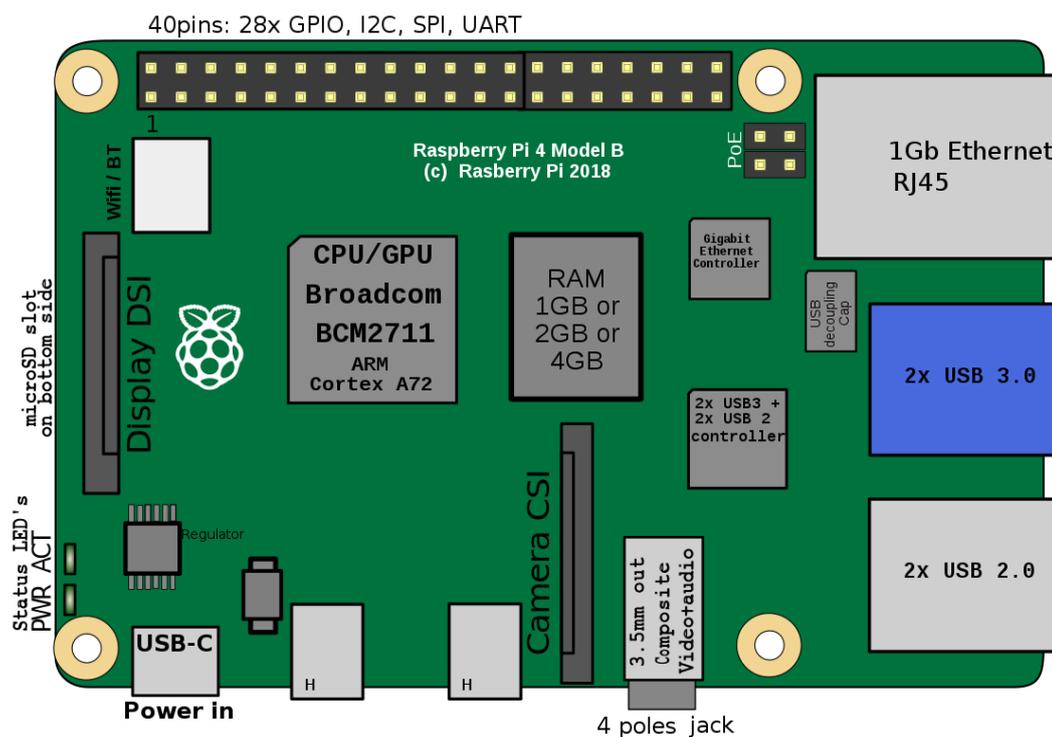


Figura 83 - disposição de componentes e conectores do Raspberry Pi (RASPBERRY PI FOUNDATION, 2020).

Por ter dimensões bastante reduzidas se comparadas a um computador ou notebook (aproximadamente 86 x 57 centímetros) e um consumo de energia aproximado de apenas 3.4W em repouso, o Raspberry é uma excelente opção para produtos ou protótipos onde é necessário embarcar um suporte computacional. A fonte de alimentação recomendada pelo fabricante é na ordem de 15W (5V a 3 A), permitindo o uso de baterias de LiMH como opção para aplicações autônomas.

## 8 NOVA PROPOSTA PARA O GEOLOCAL

Até o momento foram definidas a tecnologia a ser adotada como base para os equipamentos de rádio (SDR), as frequências de trabalho e as antenas necessárias. Estas conclusões serviram para a construção de um primeiro protótipo. O Apêndice E detalha a configuração e testes iniciais do protótipo e o Apêndice F mostra o preparo dos notebooks das estações.

Também foram identificadas melhorias nos conceitos iniciais, fundamentadas no desenvolvimento tecnológico atual e nas boas práticas de projeto. Nesta seção, essas melhorias são descritas e propostas como trabalhos futuros.

O texto desta seção foi extraído e adaptado da dissertação de mestrado de um dos pesquisadores (FULLER, 2020) no Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais (PPGCAGE) da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM).

### 8.1 COMUNICAÇÃO AUTOSSUFICIENTE

Levando em conta que estamos com sistemas de rádio tanto nas bases quando nas repetidoras e supondo que todos sejam *full duplex*<sup>2</sup>, pode-se resolver o problema da linha pontilhada da Figura 14. Esta possibilidade é citada por Kaufmann e Silveira (2004) como uma opção para o sistema se tornar independente de outros meios de comunicação. Desta forma, o sistema assumiria o diagrama da Figura 84.

Outro ponto importante a ser considerado neste modelo: atualmente a miniaturização e o poder de processamento permitem que o alvo calcule sua própria posição sem depender de se comunicar com a base principal, da mesma forma que é feito com os GNSS.

---

<sup>2</sup> **Full duplex** é quando um equipamento consegue transmitir e receber informações simultaneamente, ao contrário do **half duplex**, onde o equipamento se reveza entre transmitir ou receber.

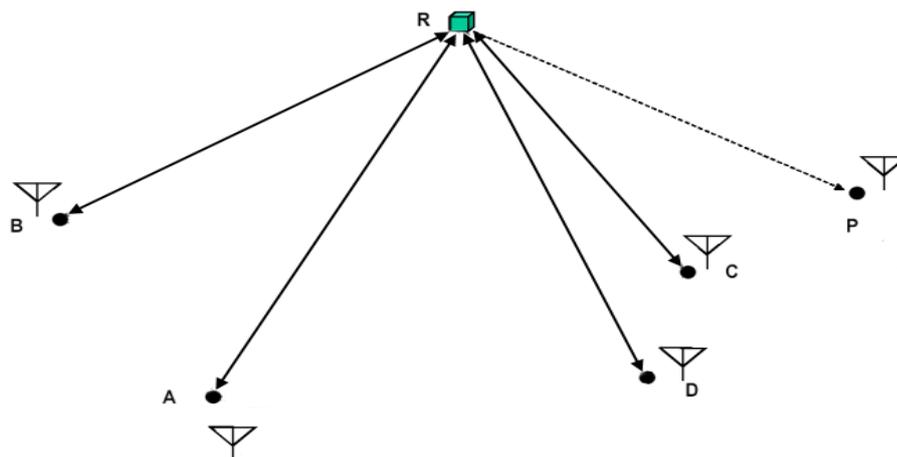


Figura 84 – Topologia proposta para o GEOLocal (Autoria própria)

Desta forma pode-se propor uma variante do ciclo de trabalho onde:

- o sistema sincroniza seus relógios;
- as repetidoras recebem um sinal de tempo das bases e, com isso calculam sua posição;
- as bases enviam ao alvo, através das repetidoras, um sinal contendo a posição das bases, posição das repetidoras e sinal de tempo;
- o alvo calcula sua posição como se fosse um receptor de GNSS.

## 8.2 OPÇÕES PARA AS REPETIDORAS

Sendo as bases fixas e em posição conhecida, neste item serão feitas considerações sobre as diversas opções de suporte para as repetidoras, levando em conta especialmente:

- área de cobertura versus quantidade de repetidoras;
- controle de posicionamento e navegabilidade;
- tempo de permanência na área de interesse.

### 8.2.1 Torres

Torres são uma opção interessante, pois uma vez que a repetidora esteja acoplada, estará sempre disponível e com posição conhecida. Por outro lado, o raio de cobertura é o mais limitado pois depende da altura da torre<sup>3</sup> e dificilmente se acham

---

<sup>3</sup> O raio de cobertura de cada repetidora é aproximadamente quatro vezes sua altura, considerando o PDOP próximo do ideal (FRIOLANI, 2020).

torres com altura maior que duas centenas de metros. Também são necessárias pelo menos quatro torres próximas o suficiente para que as áreas de cobertura se sobreponham. Pode ser interessante para as provas de conceito e testes iniciais, mas não teria uma aplicação comercial em uma área de poucos hectares. As bases estariam dentro dessa área, que teria alguns hectares, com suas posições já conhecidas. Para distâncias da ordem de centenas de metros os métodos convencionais de topografia com trenas, estações totais e triangulação seriam suficientes.

### **8.2.2 Drones**

Com seu teto de voo em 120 metros (urbano) ou 60 metros (rural), tem um raio de atuação relativamente pequeno e comparável às torres. Por ser móvel, ele faz o papel da repetidora em várias posições, mas tem um limite de tempo de voo, atualmente na ordem de 30 minutos. Da mesma forma que as torres, aplica-se bem em experimentos e provas de conceito, mas como no caso das torres a área de atuação é pequena demais para justificar o sistema.

### **8.2.3 Balão cativo**

É um balão de látex enchido com gás hélio e preso a um guincho de controle em solo. Sua altura é limitada a pouco mais que o drone e, embora não haja limite teórico de autonomia (o balão pode permanecer cheio por muito tempo) há a necessidade de permissão de controle de tráfego aéreo que, normalmente, tem um período bem determinado de janela de tempo. É útil também para provas de conceito.

### **8.2.4 Balão meteorológico**

Mesmo material que o balão cativo, pode levar a repetidora a altitudes acima de 20 mil metros. Conforme sobe, seu envelope de látex dilata até romper e a carga (em nosso caso, a repetidora) retorna ao solo por meio de um paraquedas.

Neste caso há a questão de permissão de tráfego aéreo na região de lançamento, a dificuldade em manter o balão com a repetidora dentro da área de interesse (ele vai se deslocar ao sabor das condições meteorológicas), o tempo de voo (entre horas e alguns dias) e a necessidade de se recuperar o equipamento após a ruptura do envelope. Neste último caso, há a possibilidade deste equipamento ser perdido por aterrissar em áreas sem acesso. Novamente a aplicação é limitada a testes.

### 8.2.5 Balão estratosférico

Permanece no ar por 100 dias e chega a grandes alturas, acima dos 40 mil metros. Move-se segundo as correntes de ar da estratosfera e podem chegar a grandes distâncias. É uma operação de custo bem mais elevado que as anteriores e com os mesmos problemas dos balões meteorológicos com relação a sua disponibilidade na área de interesse.

### 8.2.6 Cubesats

Satélites em órbita baixa, nano satélites e *cubesats* são satélites de pequeno porte para órbitas baixas na ordem de 400 km. Seu custo de construção e lançamento custa em média USD 30.000. Com um número suficiente de satélites dispostos em órbitas adequadas seria possível cobrir o planeta inteiro.

### 8.2.7 Satélites em órbita alta

Satélites cobrem o planeta inteiro. Podem ser nas órbitas de 20.000 km ou acima, até geoestacionários. Seu custo de construção e lançamento pode chegar à casa de milhões de dólares, demandam um projeto muito mais elaborado entre outros motivos pela maior potência de transmissão e recepção e as influências do clima espacial. Por outro lado, sua durabilidade em órbita é muito maior e necessita de menos satélites.

Neste caso, levando em consideração as características do Geolocal, pode-se inclusive considerar satélites de comunicação convencionais através da locação de alguns de seus canais de comunicação.

É importante lembrar que quaisquer que sejam os satélites (inclui os *cubesats*), há de se levar em conta os efeitos da ionosfera na propagação das ondas de rádio.

## 8.3 DETERMINANDO OS ATRASOS NO SISTEMA

O sistema Geolocal tem como princípio de funcionamento o que se convencionou chamar de TOF (*Time Of Flight*), onde o tempo de deslocamento  $\Delta t_{AB}$  de um sinal de rádio entre dois pontos A e B pode definir a distância AB, levando em conta que este sinal se propaga em uma velocidade  $c_{meio}$ , que é a velocidade da luz no meio onde se propaga (uma fração de  $c$ ) (Equação 55).

$$AB = \frac{c_{meio}}{\Delta t_{AB}} \quad (55)$$

Esta proposição seria verdadeira em uma situação ideal. No mundo real, entretanto, para se medir esse tempo  $\Delta t_{AB}$ , o próprio equipamento utilizado acrescenta valores a essa medida: atrasos instrumentais em antenas, cabos, circuitos e componentes eletrônicos e o processamento do sinal (MACHO, 2018).

Pensando-se em estações fundamentadas na tecnologia SDR (*Software Defined Radio* – Rádio Definido por Software), o sinal digital, então, é enviado via interface (USB, por exemplo) para um computador que fará o tratamento digital do sinal e das informações nele contidas através da execução de algoritmos de um software.

Os diversos tempos existentes, com os quais trabalha a estação, são:

|                 |   |
|-----------------|---|
| $\Delta t$      | Tempo total medido pelo sistema;  |
| $\Delta t_{AB}$ | Tempo de propagação da onda de rádio entre os centros de fase das antenas das estações A e B; |
| $\delta_{cabo}$ | Atraso de propagação do sinal no cabo coaxial entre o centro de fase da antena e o rádio;     |
| $\delta_{ampl}$ | Atraso na etapa de amplificação;  |
| $\delta_{DAC}$  | Processamento nos conversores analógico-digitais e digital-analógicos;                        |
| $\delta_{USB}$  | Atraso do cabo USB e das interfaces;  |
| $\delta_{comp}$ | Atraso na eletrônica do computador;   |
| $\delta_{soft}$ | Tempo de execução do software.  |

Essas variáveis são combinadas durante o processo de medição e nos fornecem um resultado maior que a informação desejada ( $\Delta t_{AB}$ ).

### 8.3.1 Algoritmos para medição do tempo total de propagação

Neste tópico vamos considerar dois processos ou algoritmos de medição. Um deles é por repetidora, ou *transponder*, e o outro usa Correlação Cruzada de Sinais.

### 8.3.1.1. Repetidora

Para esta análise, a estação A será o transmissor e a estação B uma repetidora, retransmitindo o sinal de volta para a estação A assim que for recebido. Esta, por sua vez, mede o tempo entre o instante de transmissão e o de recepção do sinal.

Levando em conta o percurso todo do processo desde seu início, temos o conjunto de equações 56:

$$\begin{aligned}
 TX_A &= \delta_{comp}^A + \delta_{USB}^A + \delta_{DAC}^A + \delta_{ampl}^A + \delta_{cabo}^A + \Delta t_{AB} \\
 RX_B &= \delta_{cabo}^B + \delta_{ampl}^B + \delta_{ADC}^B + \delta_{USB}^B + \delta_{comp}^B \\
 TX_B &= \delta_{soft}^B + \delta_{comp}^B + \delta_{USB}^B + \delta_{DAC}^B + \delta_{ampl}^B + \delta_{cabo}^B + \Delta t_{AB} \\
 RX_A &= \delta_{cabo}^A + \delta_{ampl}^A + \delta_{ADC}^A + \delta_{USB}^A + \delta_{comp}^A
 \end{aligned} \tag{56}$$

E, finalmente,

$$\Delta T = TX_A + RX_B + TX_B + RX_A \tag{57}$$

Por hora vamos supor que ambos os equipamentos sejam idênticos e, conseqüentemente, tenham latências idênticas<sup>4</sup>. Desta forma, podemos reescrever a equação 57 substituindo seus termos pelo conjunto de equações 56 e simplificando:

$$\Delta T = 4(\delta_{comp} + \delta_{USB} + \delta_{DAC} + \delta_{ampl} + \delta_{cabo}) + 2\Delta t_{AB} + \delta_{soft}^B \tag{58}$$

O valor que nos interessa é  $\Delta t_{AB}$ . Isolando-o na equação 58, temos:

$$\Delta t_{AB} = \frac{\Delta T - \delta_{soft}^B}{2} - 2(\delta_{comp} + \delta_{USB} + \delta_{DAC} + \delta_{ampl} + \delta_{cabo}) \tag{59}$$

---

<sup>4</sup> Esta suposição foi feita para uma análise mais simplificada das equações. Verificações a partir de experimentos em bancada são necessários para avaliar o quanto as latências podem ser diferentes.

### 8.3.1.2. Correlação Cruzada de Sinais

Este processo é semelhante ao que é aplicado aos sistemas de GNSS atuais (MONICO, 2008) e consiste em comparar dois sinais distintos e determinar o quanto, em tempo, eles estão defasados. Como premissa, as estações estão todas com seus relógios perfeitamente sincronizados. Aqui, a estação B, num determinado horário pré-estabelecido (digamos, a cada minuto), envia um sinal contendo uma informação codificada.

A estação A, por sua vez, no mesmo horário, gera internamente o mesmo sinal.

O sinal de B vai ser recebido por A e decodificado.

Finalmente, A vai comparar os dois sinais (o recebido de B e o gerado internamente) usando um processo de correlação cruzada. O sinal de B vai chegar em A com atraso correspondente ao tempo de trânsito que corresponde aos processos de transmissão em B e de recepção em A, ou seja:

$$TX_B = \delta_{comp}^B + \delta_{USB}^B + \delta_{DAC}^B + \delta_{ampl}^B + \delta_{cabo}^B + \Delta t_{AB} \quad (60)$$

$$RX_A = \delta_{cabo}^A + \delta_{ampl}^A + \delta_{ADC}^A + \delta_{USB}^A + \delta_{comp}^A + \delta_{soft}^A \quad (61)$$

Logo, o tempo medido através da correlação cruzada será:

$$\Delta T = TX_B + RX_A \quad (62)$$

E, novamente, considerando equipamentos de eletrônica idêntica, substituímos na equação 62 as equações 60 e 61 e simplificamos:

$$\Delta T = 2(\delta_{comp} + \delta_{USB} + \delta_{DAC} + \delta_{ampl} + \delta_{cabo}) + \Delta t_{AB} + \delta_{soft}^A \quad (63)$$

Finalmente, podemos isolar  $\Delta t_{AB}$ :

$$\Delta t_{AB} = \Delta T - \delta_{soft}^A - 2(\delta_{comp} + \delta_{USB} + \delta_{DAC} + \delta_{ampl} + \delta_{cabo}) \quad (64)$$

Este processo é mais simples, vale-se de comunicação em uma única direção (rádios de menor custo), mas exigem que as estações estejam com seus relógios perfeitamente sincronizados ou com uma margem de erro conhecida. O sincronismo é tal que uma defasagem de 1ns entre A e B resultaria em 30 centímetros (distância

aproximada percorrida por uma onda eletromagnética no vácuo, num intervalo de 1ns).

### 8.3.2 Análise dos atrasos

Para se conseguir a precisão desejada nas medições é necessário eliminar esses atrasos ou, pelo menos, conhecê-los e medi-los de modo a poderem ser descontados no computo final.

Os trabalhos anteriores (KAUFMAN et al., 2004, e outros) dão grande importância à determinação do que se convencionou chamar de “atrasos”. Essencialmente, eles podem ser divididos em três grupos: a “latência”, que ocorre nos circuitos eletrônicos, fios e cabos; o “atraso na propagação”, relacionado com a velocidade de propagação da onda eletromagnética em um meio diferente do vácuo; e, finalmente, o tempo de execução do software.

A análise a seguir sugere formas de se tratar ou medir esses atrasos. É proposto como trabalhos futuros, onde os atrasos medidos ou calculados serão colocados nas equações 56.

#### 8.3.2.1. Atraso nos cabos e antenas (latência)

Os índices  $\delta_{cabo}$  e  $\delta_{USB}$  que são, respectivamente, o cabo coaxial ligando a antena ao rádio e o cabo USB ligando o rádio ao computador. Usa-se para isso o Fator de Velocidade (VF, *Velocity Factor*) dos cabos, que é dependente de sua geometria e materiais utilizados (dielétricos) (BALANIS, 2005). Este índice diz qual é a razão entre a velocidade de propagação da onda no cabo e a velocidade da onda no vácuo ( $c$ ) e é especificado pelo fabricante.

Para um dado valor de VF, o atraso no cabo pode ser calculado em função do comprimento do cabo  $l_{cabo}$ :

$$\delta_{cabo} = \frac{l_{cabo}}{VF \times c} \quad (65)$$

No caso da conexão com a antena e a depender da instalação do equipamento, cabos coaxiais podem ter uma extensão considerável. Isso não é um problema, visto que os fabricantes informam o valor de VF nas especificações e este componente do atraso pode ser calculado.

A latência é ligada ao equipamento em si e é formada por vários elementos entre componentes eletrônicos, cabos e outros elementos eletrônicos.

Alguns desses elementos permitem medições de bancada e terão valores razoavelmente determinados (condutores, por exemplo, embora variem os valores conforme a temperatura).

Uma sugestão para se medir a latência é por uma técnica bastante comum em circuitos de comunicação, o *loopback*: conecta-se por um cabo curto os conectores de transmissão e recepção e programa-se o SDR para medir o tempo entre a emissão de sinal e sua detecção. O valor obtido é a própria latência do circuito. Isso pode ser demonstrado a partir da equação 66 no desenvolvimento abaixo:

$$\Delta t_{AB} = \Delta T - \delta_{soft}^A - 2(\delta_{comp} + \delta_{USB} + \delta_{DAC} + \delta_{ampl} + \delta_{cabo}) \quad (66)$$

Considerando que o cabo entre Tx e Rx é muito curto, na ordem de centímetros, que não há processamento do sinal (apenas os comandos de transmissão e recepção) e que a propagação ocorre apenas neste cabo e não na atmosfera, podemos considerar  $\delta_{soft}^A$ ,  $\delta_{cabo}$  e  $\Delta t_{AB}$  praticamente iguais a zero. Desta forma,

$$0 = \Delta T - 0 - 2(\delta_{comp} + \delta_{USB} + \delta_{DAC} + \delta_{ampl} + 0)$$

$$\Delta T = 2(\delta_{comp} + \delta_{USB} + \delta_{DAC} + \delta_{ampl}) \quad (67)$$

Ou seja, o atraso total na eletrônica do equipamento é metade do tempo medido pelo *loopback*. Esta suposição precisa ser averiguada através de experimentos práticos de bancada utilizando-se os protótipos.

#### 8.3.2.2. Atraso na propagação

Como dito anteriormente, a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no ar pode ser calculada através de modelos. No caso de se atravessar a ionosfera, há modelos para isso também (MACHO, 2018). O atraso aqui é dado relacionando a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio.

Pode ser medida, pode ser calculada. Os GPS utilizam duas frequências diferentes e comparam a diferença na chegada dos dois sinais para determinar essa velocidade através de modelos matemáticos.

### 8.3.2.3. Atrasos em software

Cabe aqui algumas considerações sobre o software do sistema, apontando algumas questões.

O software vai ser o principal fator de divergência das medições de latência. O programa de computador que controla o SDR não muda, mas por ser executado em uma camada de software sobre o sistema operacional, está sujeito a fatores imponderáveis e difíceis de prever como, por exemplo, interrupções de sistema ou hardware.

Minimizar essa interferência é reduzir o tamanho do sistema operacional para o mínimo necessário.

A primeira opção é usar um ambiente como o Linux, sem interface gráfica e com o mínimo possível de funcionalidades (uma versão especificamente preparada para o Geolocal).

Uma segunda opção é não usar um sistema operacional, trabalhando apenas em linguagem de máquina. Embora possível, demandaria mão de obra bastante especializada e maior custo.

Uma terceira opção, talvez a mais adequada, é retirar do software funcionalidades de recepção e medição de tempo de trânsito e implementar diretamente em um FPGA (circuito eletrônico reconfigurável), deixando para o sistema operacional apenas a parte de cálculo e interfaces, que não afetam as medições.

## 8.4 REFERÊNCIAS DE TEMPO E SINCRONISMO DE RELÓGIOS

### 8.4.1 Referências de tempo

Referência de tempo, em eletrônica, é um dispositivo (componente ou circuito) que determina um ritmo ao circuito através do fornecimento de um sinal em frequência constante. Este sinal pode ser utilizado para contagem de tempo.

São opções para se implementar a referência de tempo:

- Servidores NTP (internet) – Servidores NTP são computadores que propagam uma referência de tempo dentro da rede de dados na qual eles pertencem. É fundamental entender as características deste tipo de

base de tempo e suas limitações, inclusive para comparar com os sistemas GNSS e Geolocal;

- Osciladores a cristal – Existem vários tipos de osciladores a cristal, com ou sem controle de temperatura;
- Relógios atômicos – De Césio ou Rubídio, por exemplo;
- GPSDO (*GPS Disciplined Oscillator*) – É um oscilador a cristal estabilizado termicamente (OCXO ou TCXO) que periodicamente é aferido pelo sinal de tempo GPS enviado pelos satélites.

Na literatura pesquisada fala-se de *drift*, *aging* e *accuracy* das bases de tempo. Esses dados são de grande importância, aliados ao custo, para se escolher a melhor opção para o projeto:

- **accuracy** (acurácia) mostra o quanto a base de tempo é precisa, dada pelo erro acumulado, em segundos, dentro de um ano. É o erro com relação a um relógio de césio;
- **drifting** é o acúmulo de erro de acurácia ao longo do tempo;
- **aging** bases de tempo, durante sua vida útil, sofrem uma degradação (envelhecimento) de seus componentes e a consequente perda de acurácia. Após um determinado tempo o erro é tal que se desvia das especificações de projeto e seus componentes precisam ser substituídos.

A Tabela 20 mostra uma comparação entre as bases de tempo.

Tabela 20 – Acurácia e *aging* dos principais tipos de bases de tempo.

| Oscilador | Acurácia    |              | Aging       |              |               |                 |
|-----------|-------------|--------------|-------------|--------------|---------------|-----------------|
|           | por ano (s) | por dia (cm) | por ano (s) | por dia (cm) | por hora (cm) | por minuto (cm) |
| TCXO      | 2E-06       | 1643,84      | 5E-07       | 410,96       | 6,849         | 0,11416         |
| MCXO      | 5E-08       | 41,10        | 2E-08       | 16,44        | 0,274         | 0,00457         |
| OCXO      | 1E-08       | 8,22         | 6E-09       | 4,93         | 0,082         | 0,00137         |
| GPSDO     | 1E-13       | 0,04         | 0E+00       | 0,00         | 0,000         | 0,00000         |
| Rubidium  | 5E-10       | 0,41         | 2E-10       | 0,16         | 0,003         | 0,00005         |
| RbCO      | 7E-10       | 0,58         | 2E-10       | 0,16         | 0,003         | 0,00005         |
| Cesium    | 2E-11       | 0,02         | 0E+00       | 0,00         | 0,000         | 0,00000         |

### 8.4.2 Sincronismo de relógios

Para uma situação onde a repetidora se encontra em órbita geoestacionária, a cerca de 30.000 km das bases, o tempo de propagação é de aproximadamente 1/10 de segundo e o erro de medição, no pior cenário (oscilador TCXO) é de 2 décimos de milímetro, uma precisão suficiente para a maioria das medições.

Por ser um valor médio, ou seja, pode ocorrer em ritmo diferente entre as estações. Se as estações usarem, por exemplo, osciladores TCXO, cada uma delas acumulará um erro médio aproximado de 0,11 cm por minuto. Mas por se tratar de uma média isso provoca uma perda de sincronismo.

O problema se agrava no caso de equipamentos com diferentes tipos de osciladores.

Fica claro que as bases precisam ser sincronizadas periodicamente. A frequência depende do erro aceitável. Por exemplo, se o oscilador for um TCXO (o mais barato e comum) e a exigência for de erros inferiores a 5 cm, deve-se sincronizar o sistema em períodos inferiores a uma hora. Um processo simples de sincronização seria utilizar em bancada ou em campo um relógio de césio. Entretanto, as bases podem estar em locais de difícil acesso e/ou distantes, tornando impraticável implementar um processo de sincronização manual. Instalar-se um relógio de césio em cada base também se coloca inviável em virtude do elevado preço.

Faz-se necessário propor um processo de sincronização remota de tempo entre as bases.

Vamos lembrar a equação que permite calcular a distância entre dois rádios a partir do tempo de propagação de sinal entre eles:

$$AB = \frac{c}{\Delta t_{AB}} \quad (68)$$

Ora, se sabemos a distância AB, é possível calcular-se o tempo de propagação. Supondo que a base A seja a referência, manda-se para a base B o valor da distância AB e o horário de A. A estação B calcula  $\Delta t_{AB}$  e soma com o valor da hora de emissão, acertando seu relógio adequadamente.

Entretanto, a distância AB não é conhecida, visto que entre AB existe uma repetidora R que pode estar em movimento ou sua coordenada não foi estabelecida.

E o sistema não tem como calcular visto que não há garantia que os relógios estejam sincronizados.

Algumas opções a se considerar:

- adotar em todas as bases e alvo um relógio de alta precisão de césio ou rubídio que não precisam ser sincronizados periodicamente, mas apenas no momento da instalação. Fora o custo proibitivo de um relógio de césio;
- sincronizar pela internet através de servidores NTP. Esta opção também não é viável visto que o erro inerente a este processo é estabelecido em 1 ms. Isso daria um erro nas medições na ordem de  $3 \times 10^8 \times 10^{-3}$  metros, ou 30 quilômetros, que pode ser considerado inaceitável em função da precisão de outros métodos incluindo sextantes;
- utilizar como base de tempo um GPSDO, que é um cristal sincronizado pelo relógio GPS. Embora não seja uma opção de baixo custo (USD 750), este dispositivo tem uma precisão de  $10^{-13}$  segundos por ano de erro. Mesmo com a falha do sinal do GPS, ele continua a oscilar por dias antes de causar um erro significativo e até lá provavelmente o sinal retornou. Vai em sentido contrário à proposta original do Geolocal ser independente de outros sistemas, mas é viável para a fase de testes e no caso do Geolocal trabalhar em conjunto com outros sistemas.

## 8.5 PROPOSTA PARA OS PROTÓTIPOS

Neste tópico será apresentada a proposta de *hardware e software* das estações:

- descrever o hardware escolhido e as justificativas (mostrar as opções e justificar a escolha);
- descrever as características do software;
- apresentar o laboratório, equipamentos e materiais fornecidos pelo MackPesquisa, procedimentos de instalação e configuração, testes iniciais e resultados.

### 8.5.1 Hardware

Por se tratar de equipamento de rádio, toda a sua eletrônica poderia ser projetada usando-se as técnicas convencionais como desenho de seu circuito,

elaboração de placas de circuito impresso, montagem e testes. Este ciclo se repete a cada melhoria ou alteração.

Existe, porém, uma opção de converter o sinal de rádio para uma informação digital e tratar essa informação através de códigos de programa que virtualizam os circuitos do rádio e confere agilidade ao desenvolvimento.

É justamente por isso que se propõe a tecnologia SDR (*Software Defined Radio* – Rádio Definido por Software) para todas as estações, repetidoras e alvo. Levando em conta as premissas do sistema, o modelo de SDR escolhido deve atender às seguintes especificações:

- *full duplex* (transmitir e receber ao mesmo tempo): no caso da comunicação com a central ou na repetidora, que recebe e também transmite o sinal de localização;
- operar em frequências até a ordem dos GHz: a frequência não foi definida, então é interessante que o equipamento tenha uma banda de frequência bem flexível;
- permitir a utilização de um cristal de *clock* bem estável e disciplinado externamente como, por exemplo, um relógio atômico ou um GPSDO. O GPSDO tem uma precisão comparável aos relógios atômicos, embora dependente de sinal estável de GPS, mas custa uma fração e para efeito de projeto e prova de conceito coloca-se adequado.

Um exemplo de SDR dentro destas especificações são os USRP da série B200 da Ettus/National Instruments. É um equipamento *full duplex, single channel*, com faixa de frequência indo de 70 MHz a 6 GHz (ETTUS, 2020).

Consideram-se para os experimentos antenas omnidirecionais visto que, à exceção das bases, os demais componentes estarão em movimento. Também se considera que, a depender das distâncias previstas nos experimentos, pode ser necessária a inclusão de amplificadores de radiofrequência no projeto, tanto na recepção quanto na transmissão.

O SDR necessita, para controlar seu funcionamento, uma plataforma computacional. E por se tratar de um protótipo que vai ser operado em testes de campo, essa plataforma precisa ser leve e funcionar em baterias. Inicialmente considera-se um notebook. Há uma segunda opção, o Raspberry Pi 4. Este dispositivo

trata-se de um computador que, embora com dimensões comparáveis a um cartão de crédito, permite a instalação e funcionamento dos softwares necessários. É utilizado largamente em aplicações que demandam eletrônica embarcada e portabilidade, aplicando-se ao caso dos protótipos de repetidoras e alvos.

A arquitetura das estações é proposta na Figura 85.

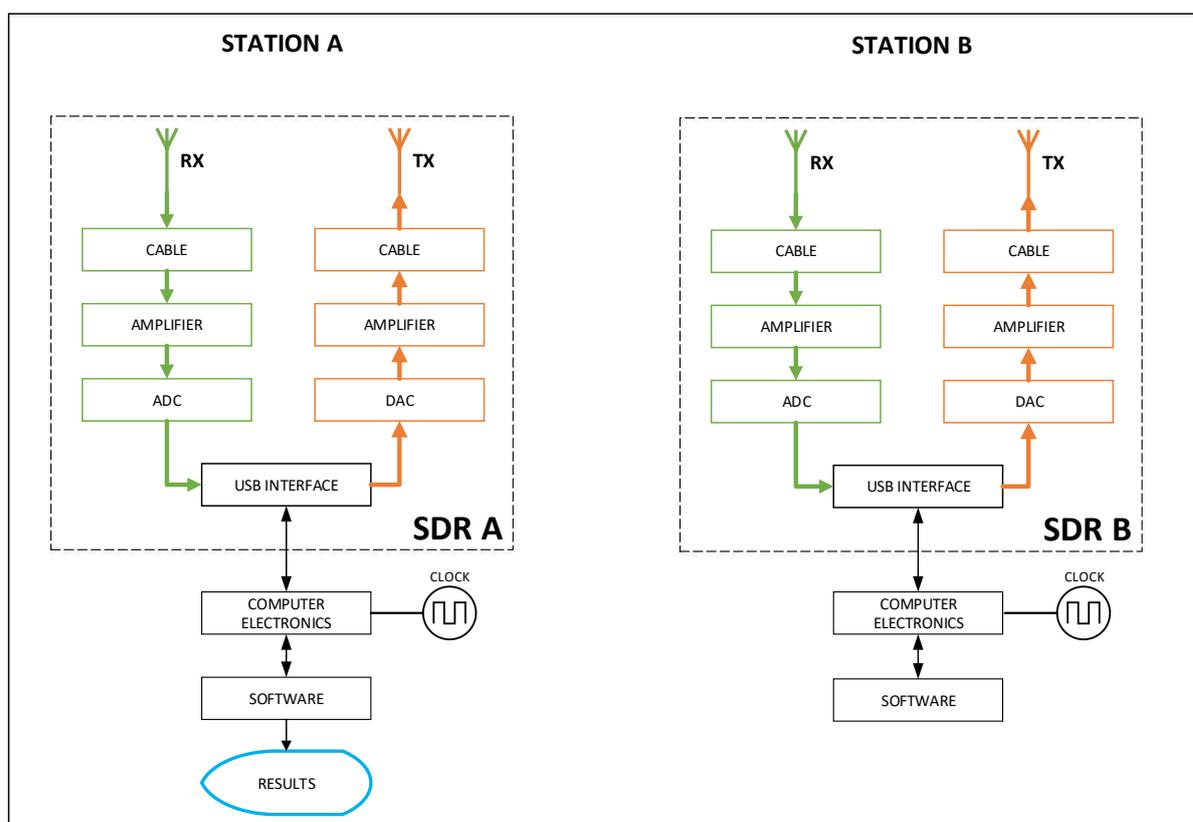


Figura 85 – Diagrama das estações.

### 8.5.2 Software

Para controlar o SDR e implementar suas funcionalidades, levando em conta que se está projetando equipamento de testes, a ferramenta de desenvolvimento preferencial seria o GNURadio<sup>5</sup> em um computador com ambiente operacional Linux Ubuntu 18.04.3. Linux é um sistema operacional bastante conveniente em aplicações de alta demanda, visto que podem funcionar opcionalmente sem o peso de uma

<sup>5</sup> As outras opções seriam LabVIEW e MatLAB, segundo o fabricante do SDR. GNURadio é uma opção gratuita.

interface gráfica. Além disso, é um sistema operacional que possui como linguagens nativas Python e C++.

Preferencialmente sugere-se o uso de linguagem C++ no desenvolvimento do software das estações para tempos de execução (e atrasos) menores.

## 8.6 O STARTUP DAS ESTAÇÕES

Como já mencionado anteriormente, entre os trabalhos publicados até o momento há uma premissa de que as estações e repetidoras estejam inicialmente com seus relógios perfeitamente sincronizados. Embora a manutenção deste sincronismo já tenha sido definida em trabalhos anteriores, faltou definir o procedimento para  $t=0$ , ou seja, quando o sistema é ligado pela primeira vez. É de se presumir que, neste momento inicial, além da falta de sincronismo, também se desconhecem os tempos de propagação de sinal e a latência dos circuitos.

É proposto um algoritmo de sincronização de tempo inicial, que pode servir também para os sincronismos periódicos do sistema para efeito de compensar o *drifting* das referências de tempo do circuito:

- a) por premissa, uma das estações (a estação central) será considerada como referência e estará com seu relógio correto;
- b) a estação central envia a todo o sistema o horário atual;
- c) bases e repetidoras retransmitem este sinal, que é recebido pela estação central;
- d) a estação central avalia, para cada elemento do sistema, qual foi o tempo total entre o instante de emissão e de recepção;
- e) a estação reenvia, então, o horário atual junto com a informação de tempo de trânsito de cada elemento;
- f) bases e repetidoras, de posse de seus respectivos tempos de trânsito, acertam seus relógios fazendo a correção de tempo, que será o horário da estação central somado com metade do tempo de trânsito.

Este algoritmo supõe inicialmente que o sinal sofra o mesmo atraso tanto na ida quanto na volta. Experimentos em trabalhos futuros podem determinar se este algoritmo é viável e aperfeiçoá-lo.

Este processo elimina a necessidade de se conhecer cada um dos atrasos individuais do sistema descritos anteriormente. Quando a estação central mede o

tempo total de trânsito de emissão e recepção entre ela e um dos elementos do sistema, ela está na realidade medindo a somatória de todos os atrasos, em dobro (ida e volta). Pode-se supor que tanto o tempo de envio quanto o de retorno são idênticos, ou muito parecidos, visto que seguem a mesma rota, fazendo com que o tempo entre estação e um dos elementos seja metade do tempo de trânsito total.

Finalizado o ciclo de sincronismo, a próxima etapa do *startup* é georreferenciar as repetidoras. Isso pode ser feito através dos processos já definidos pelo Geolocal calculando-se o tempo de trânsito do sinal.

Quanto à latência em cada um dos elementos do sistema, o circuito pode ser equipado com um *loop* que conecte diretamente entrada e saída do rádio enquanto o equipamento executa um ciclo de medição de tempo de trânsito. O valor medido será justamente a latência. Desta forma, cada equipamento teria como informar ao sistema as suas latências individuais.

Já o tempo real de propagação entre as antenas, isso é dado através de modelos de propagação atmosférica e ionosférica como analisado em Macho (2018).

## 8.7 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Esta etapa contou com a colaboração de docentes especialistas em áreas variadas da engenharia e astrofísica, bem como a participação voluntária de discentes de graduação e pós-graduação.

### 8.7.1 Verba e equipamentos

Foi disponibilizada pelo MackPesquisa uma verba de R\$ 60.000 para este projeto, o que permitiu a aquisição dos instrumentos de bancada e equipamentos necessários conforme a Tabela 21.

Tabela 21 – Equipamentos Mackpesquisa (Autoria própria)

| <b>Especificações</b>   | <b>Quantidade</b> |
|---|-------------------|
| Kit USRP Ettus B200 Single Channel Transceiver (70 MHz - 6GHz) SDR  | 6                 |
| Kit Ettus GPSDO (GPS-DISCIPLINED TCXO) para placa USRP B200   | 1                 |
| Antena Ettus ativa para GPSDO   | 1                 |
| Computador Dell XPS8930 Intel® Core™ i7-8700, 8GB, DDR4, 2400MHz, HD de 1TB (7200 RPM), NVIDIA® GTX 1030 de 2GB             | 1                 |
| Notebook Dell Inspiron 15 7000 Ultrafino, 15.6", Nvidea Geforce 4GB, 16 GB RAM, HD 2 TB, SSD 128 GB, mochila, teclado/mouse | 1                 |
| Osciloscópio Digital Minipa MVB-DSO 100 MHz dois canais   | 1                 |
| Frequencímetro Digital Minipa MF-7240, cristal de quartzo (TCXO), 2,4 GHz. funções de frequência, período e contagem.       | 1                 |
| Fonte de alimentação de bancada Hikari HF3205S, variável 32V/5A com dois displays de 4 dígitos (tensão e corrente)          | 2                 |
| Display Raspberry Pi Touchscreen 7"   | 2                 |
| Raspberry Pi 4 Model B 4GB  | 3                 |
| Material de consumo (cabos, conectores, ferramentas e suprimentos)  | 1                 |

A Tabela 22 apresenta as justificativas dos equipamentos e insumos adquiridos com a verba.

Tabela 22 – Justificativas para a compra dos equipamentos (Autoria própria)

| Equipamento  | Justificativa  |
|--|--|
| Kit ETTUS Research USRP. Acompanha: placa USRP B210 SDR 2x2 motherboard de 50 MHz – 6GHz (PN156278A-01L), cabos, fonte de alimentação, antena ativa de GPS (5V), Kit de GPSDO (PN 158874A-01) com placa PCB montada tipo GPS-disciplined TCXO, cabos e conectores.               | Este kit é utilizado para captura/digitalização do RF no estágio de desenvolvimento dos algoritmos de transmissão/recepção do GPS/Geolocal. Também é utilizado para realizar a transmissão/recepção do Geolocal nos testes de laboratório e campo. Corresponde à parte principal do funcionamento das estações   |
| Desktop Dell XPS 8930, 8ª geração do Processador Intel® Core™ i7-8700, 16GB, DDR4, 2400MHz, Disco rígido de 2TB (7200 RPM), Placa de vídeo NVIDIA® GTX 1050Ti de 4GB   | Acoplados às placas SDR e utilizados como estações de trabalho. Nesses computadores está o ambiente de software para desenvolvimento dos algoritmos de transmissão e recepção do GPS/Geolocal no GRC, os processamentos (PDOP, modelos de propagação, cálculos de processamento), visualização de sinais captados e resultados e para os testes em laboratório |
| Multímetro digital portátil com escalas de tensão DC (1000V), tensão AC (750V), corrente DC e AC (10A), resistência até 40 MΩ (precisão 1,5%), temperatura, teste HFE e continuidade   | Instrumento de medição para bancada de eletrônica, para medição de grandezas fundamentais nos protótipos (tensão, corrente e resistência elétrica)   |
| Frequencímetro digital com base de tempo a cristal de quartzo com temperatura compensada (TCXO) e frequência de trabalho de 2,4 GHz (pelo menos) e funções de frequência, período e contagem.  | Utilizado para a medição das frequências de trabalho, aferição das bases de tempo e contagem de pulsos   |
| Osciloscópio digital 100 MHz dois canais   | Para a visualização, sob forma gráfica, dos diversos sinais envolvidos   |
| Estação de Solda para bancada eletrônica, com temperatura controlada entre 150 e 450 graus, 48W, 127 Volts   | Ferramental básico para bancada de eletrônica, utilizado para trabalhar com os kits SDR, antenas   |
| Estação de Retrabalho para SMD 280W com temperatura controlada entre 100 a 480 graus, vazão de ar 24 L/min e conjunto de bicos e bocais  | Ferramental básico para bancada de eletrônica, utilizado para trabalhar com os kits SDR, antenas   |
| Fonte de alimentação de bancada 32V/5A com dois displays de 4 dígitos (tensão e corrente), capaz de fornecer uma saída variável com tensão de 0 a 32V DC e corrente de 0 a 5A DC, ajustado via potenciômetro. Com proteção de sobrecarga, curto-circuito, inversão de polaridade | Ferramental básico para bancada de eletrônica, utilizado para trabalhar com os kits SDR, antenas   |

### 8.7.2 Laboratório

Com o investimento obtido, o projeto agora conta com um pequeno mas bem equipado laboratório de eletrônica para o desenvolvimento das atividades práticas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**8). Esta bancada foi instalada no L

laboratório de Geotecnologias da Escola de Engenharia da UPM que, além de ceder o espaço, colocou à nossa disposição estações de trabalho de alto desempenho, material de consumo e duas impressoras 3D para a fabricação das partes do gabinete do protótipo.

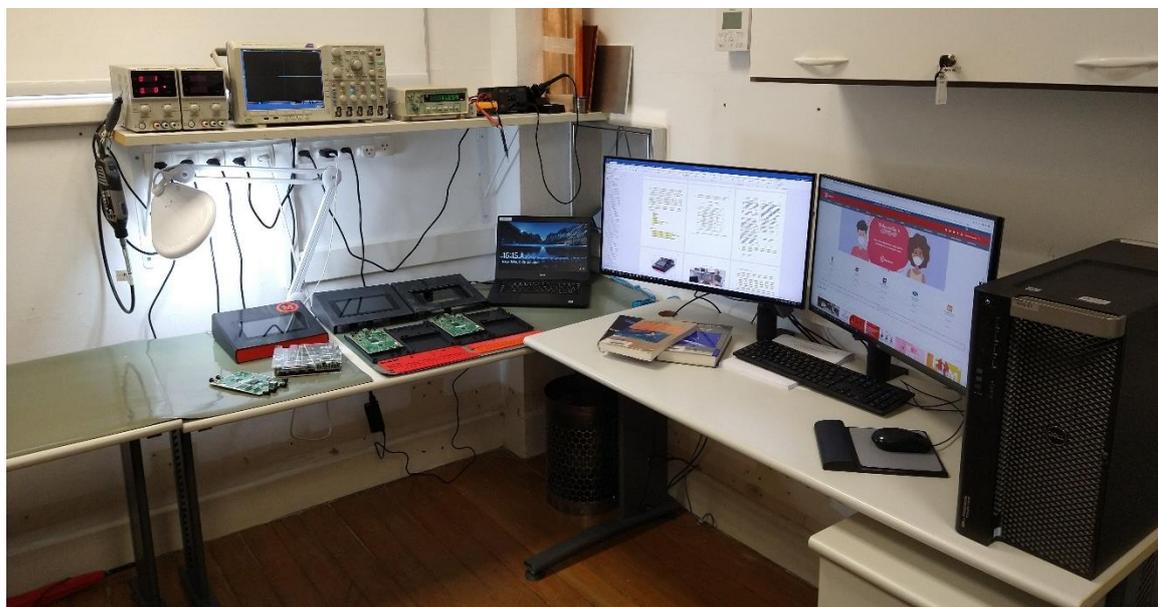


Figura 86 – Laboratório GEOLOCAL (Autoria própria).



Figura 87 – Uma das estações de trabalho do Laboratório de Geotecnologias (Autoria própria).



Figura 88 – Detalhe da instrumentação (Autoria própria).

### 8.7.3 Configuração e testes de conectividade do notebook e dos Raspberry Pi

Tanto os notebooks como os Raspberry Pi foram configurados com sistema operacional Linux e os aplicativos necessários para controlar a USRP (Figura 89):

- Linux UBUNTU 18
- USD Driver para a USRP
- GNURadio
- GNSS-SDR



Figura 89 – Uma das placas USRP B200 SDR da Ettus Research (Autoria própria).

O notebook em particular foi formatado previamente para retirar qualquer vestígio do Windows 10 que acompanha o equipamento e garantir que não haverá interferência de execução.

Nos Raspberry foi instalada via cartão SD (padrão, 32 GB) a versão UBUNTU sem interface gráfica, visto que não há a necessidade disso nas estações remotas.

O processo de instalação do ambiente, bem como os testes com a USRP, estão detalhados no APÊNDICE F.

O APÊNDICE E mostra os testes do conjunto usando-se o GNSS-SDR para efetuar uma geolocalização.

#### 8.7.4 Gabinete em CAD

Foram desenhados em ferramenta CAD (SolidWorks), os elementos utilizados nos protótipos, a saber:

- USRP Ettus Research B200;
- fonte de alimentação chaveada 5V @ 3ª, 110 V;
- Raspberry Pi 4B+
- display 7" LCD *touchscreen*;
- *cooler* 40 mm;
- ferragens e conectores.

Uma vez tendo os elementos disponíveis, foram elaboradas várias propostas da caixa/gabinete até chegarmos em uma versão adequada às necessidades do projeto, compacta, leve e portátil (Figura 90). Este modelo foi, então, confeccionado usando-se uma impressora 3D GTMax GT2 de grande tamanho.

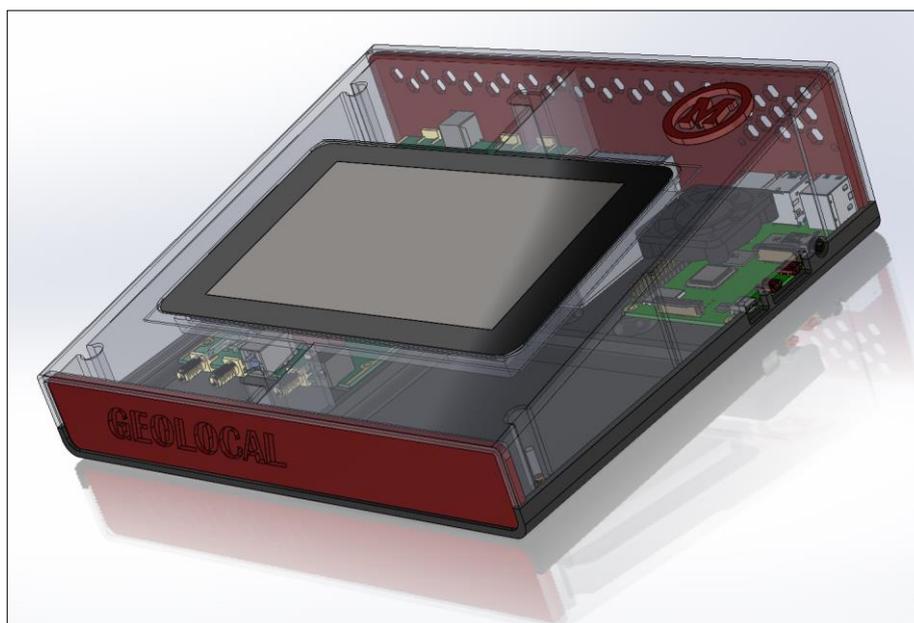


Figura 90 – Projeto em CAD 3D (Autoria própria).

#### 8.7.5 Montagem final do protótipo

Foram construídos três protótipos, sendo dois com display LCD para monitoramento de processos e um terceiro sem, para funcionar como base central

ligado diretamente ao notebook. A figura 91 mostra o primeiro protótipo finalizado e as figuras 92 a 97 mostram as diversas etapas da montagem e detalhes da construção.



Figura 91 – Protótipos em montagem (Autoria própria).

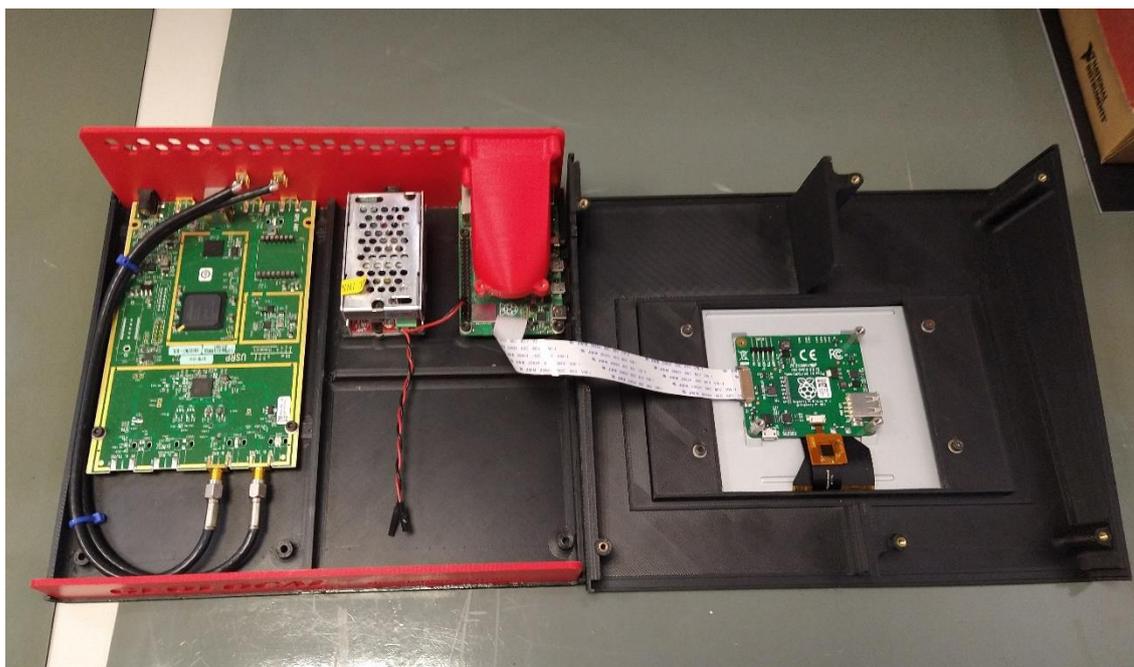


Figura 92 – Disposição interna dos elementos (Autoria própria).

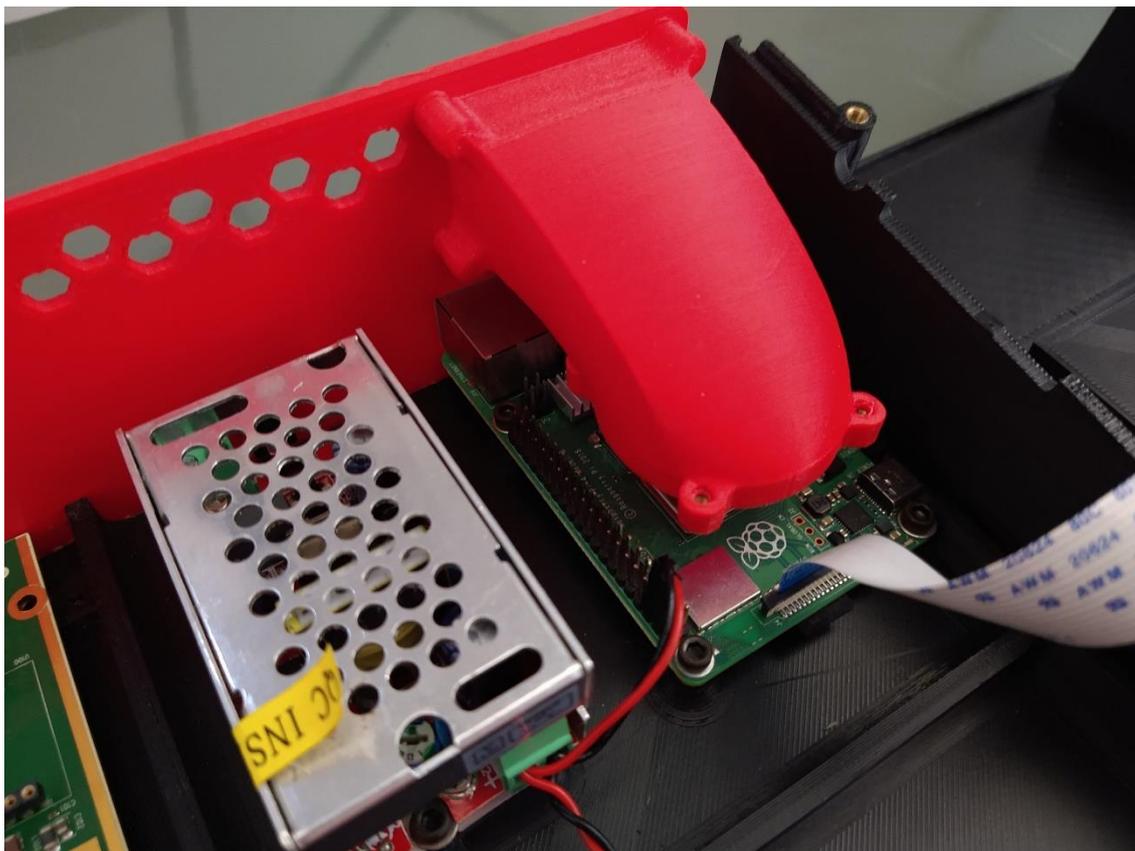


Figura 93 – Fonte de alimentação, cooler e Raspberry (Autoria própria).

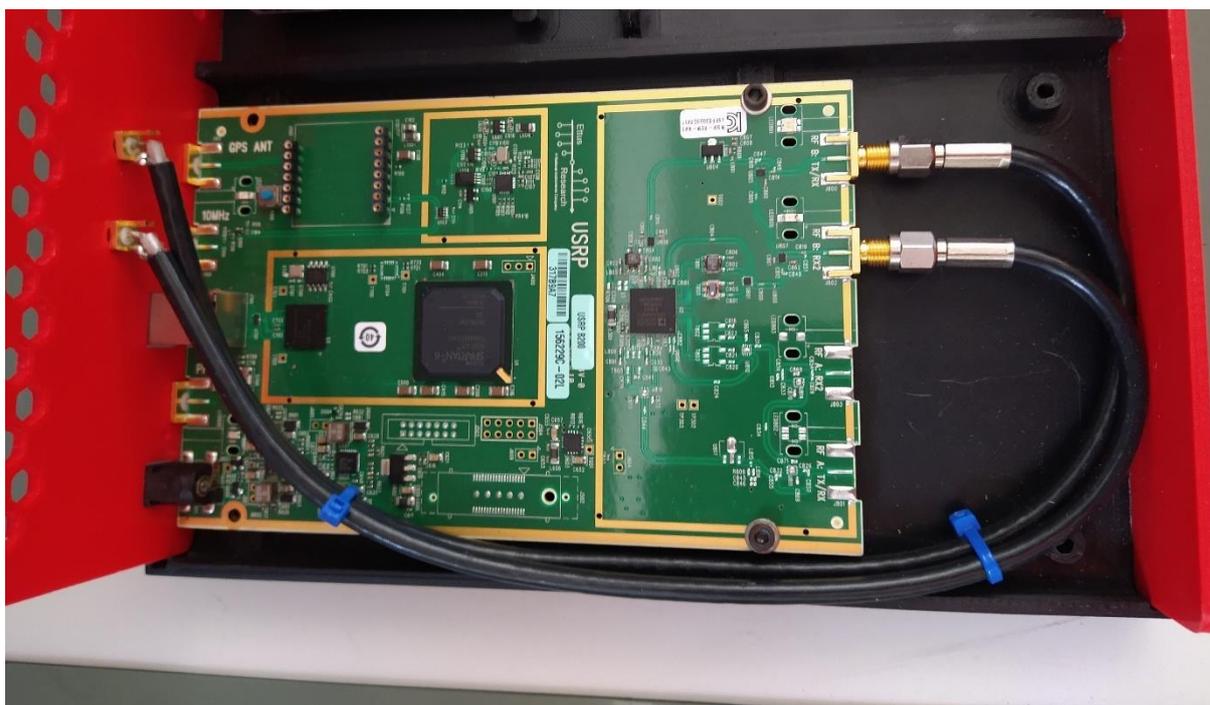


Figura 94 – Placa USRP (Autoria própria).



Figura 95 – Conexão com o display LCD (Autoria própria).



Figura 96 – Detalhe das conexões traseiras para antena, USB, ethernet e outras (Autoria própria).



Figura 97 – Primeiro protótipo finalizado (Autoria própria).

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos mostram a importância de o Brasil ter seu próprio sistema de navegação, sendo capaz de operar em conjunto ou independente dos demais sistemas GNSS existentes.

A possibilidade de o Geolocal trabalhar com diversas configurações diferentes, dependendo do tipo de plataforma utilizada para carregar a repetidora e conseqüentemente sua altitude, torna o sistema bastante flexível podendo, por exemplo, trabalhar com a repetidora em órbitas baixas evitando os efeitos indesejados da ionosfera e melhorando a acurácia do sistema.

Em aplicações que envolvam a soberania do País, é possível que o Geolocal trabalhe com protocolos de comunicação específicos, evitando ataques que são comuns aos sistemas GNSS atuais.

As primeiras simulações comprovaram a eficiência dos algoritmos do sistema que, se desprezados os atrasos e incertezas, mostram que é possível chegar à precisão de posicionamento inferior ao milímetro. As simulações realizadas neste projeto permitiram definir outras variáveis do sistema como espaçamento das bases em terra e área de cobertura.

Os estudos deixaram clara a possibilidade de utilizar drones e balões cativos como plataformas para a repetidora nos primeiros testes práticos do Geolocal. Também permitiram conhecer as normas e autorizações necessárias para o voo destes equipamentos.

Para a implementação do sistema final que entrará em uso, os estudos apontam para a utilização de satélites, de preferência de órbita média e geoestacionários.

Os estudos mostraram o PDOP como uma importante ferramenta para definir a distribuição das bases em terra, seu espaçamento e raio de cobertura de uma repetidora.

Ficou clara que a distribuição de bases deve ser feita de tal forma que a topologia do sistema forneça um valor de PDOP baixo, o que permite uma melhor acurácia do sistema.

O raio de cobertura de uma repetidora pode ser calculado de forma simplificada como sendo igual a 3 vezes a altura da repetidora, mantendo um ângulo de visada superior a  $15^\circ$  para evitar interferências do relevo ou de construções existentes.

O espaçamento entre bases, também de forma simplificada, pode ser estimado como sendo 1,7 vezes a altura da repetidora.

Também foi possível determinar os possíveis locais de testes para as próximas fases, destacando-se o Sítio Cabuçu e o Rádio-Observatório Pierre Kaufmann (ROPK) em Atibaia, devido à proximidade do campus Higienópolis da UPM e a localização afastada de áreas com restrição de voo como aeródromos.

Foi possível, através de algoritmos desenvolvidos em MATLAB, simular uma configuração do Geolocal sobre uma parte do campus Alphaville utilizando 4 ou 5 bases em terra e verificar a viabilidade deste teste ser feito na prática. Foi constatada a melhoria do PDOP com o aumento da quantidade de bases. Utilizando-se 4 bases o menor PDOP foi 4.4 e utilizando 5 bases chegou-se a um PDOP de 2,82 e uma grande área de voo com PDOPs inferiores a 4. O ideal para o PDOP é ser próximo de 1, mas valores até 4 são considerados aceitáveis.

Quanto aos modelos de propagação, para os testes iniciais à baixa altitude, onde o sinal não é afetado pela ionosfera, um modelo de propagação que pode ser utilizado é o baseado no conceito de planos paralelos, que assume que, tanto a superfície da Terra quanto o plano horizontal onde se encontra a repetidora sejam planos e paralelos e, neste caso, a correção de atraso de propagação pode ser calculada em função da distância e do ângulo de elevação da repetidora em relação à base.

Para repetidoras em altitudes cujo sinal precisa necessariamente passar pela ionosfera, é necessário utilizar um modelo que leve em consideração o TEC (conteúdo eletrônico total). Neste caso, as frequências de transmissão também devem ser maiores para minimizar a interferência da ionosfera.

Foi definida a utilização das radiofrequências de 410 MHz e 2.1 GHz, sendo esta última a radiofrequência principal de comunicação entre as bases e a repetidora, pois independe da altura da repetidora. A radiofrequência auxiliar de 410 MHz poderá ser utilizada para estimar os efeitos e atrasos na ionosfera se for comparada com a

propagação da onda principal em 2,1 GHz, para uma repetidora localizada em altitudes além da ionosfera.

Na análise da acurácia do sistema foram feitas simulações MATLAB com até 12 bases em terra. Considerou-se incertezas entre 0,5 e 3,3 nanossegundos devido à erros de medição nos atrasos, erros nas estimativas feitas pelos modelos de propagação, erros no sincronismo de relógios, erros na determinação do tempo de trânsito da repetidora e outros fatores.

Nessas simulações foi possível confirmar a melhoria na acurácia com o aumento da quantidade de bases e também com a diminuição do PDOP. Percebeu-se também que o conhecimento prévio do tempo de trânsito na repetidora é um fator extremamente importante para a melhoria na acurácia. A correta estimativa e medição dos atrasos também influi bastante na qualidade dos resultados.

O protótipo do sistema foi implementado utilizando-se um SDR (Software Defined Radio) e um Raspberry PI. O gabinete foi projetado e impresso em 3D no Laboratório de Geotecnologias.

Também foram feitos estudos relacionados às referências de tempo, antenas, atrasos do sistema e especificações do Geolocal.

A seguir estão relacionados alguns trabalhos e eventos que mostram a participação dos pesquisadores em temas que envolvem o Geolocal:

1. Participação de Eduardo Perez Macho e Sergio Vicente Denser Pamboukian em congresso internacional. COSPAR (*The Committee on Space Research*) em Julho de 2018 em Pasadena/USA, apresentação oral do trabalho "PDOP SIMULATIONS OF GEOLocal: A GEO-REFERENCING SYSTEM INDEPENDENT FROM GNSS SYSTEMS".

2. Participação de Leticia Gatti Friolani, Francisco Alberto Gori Fuller e Sergio Vicente Denser Pamboukian em congresso internacional. BTSym19 (*Brazilian Technology Symposium*) em 2019 em Campinas/SP, artigo e apresentação oral do trabalho "Análise gráfica do PDOP no sistema Geolocal".

3. Artigo de Eduardo Perez Macho, Sergio Vicente Denser Pamboukian e Emilia Correia no periódico internacional "Journal of Navigation" em 2020, "Geolocal - a new system for geo-referencing: analysis of bases distributions".

4. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais (PPGCAGE) da Universidade Presbiteriana Mackenzie apresentada em 2019 por Eduardo Perez Macho orientado por Sergio Vicente Denser Pamboukian, “Implantação de um Sistema Brasileiro de Georreferenciamento independente de outros sistemas de navegação por satélite: o Geolocal”.

5. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais (PPGCAGE) da Universidade Presbiteriana Mackenzie em andamento com qualificação em outubro de 2020 e previsão de defesa para 2021 apresentada por Francisco Alberto Gori Fuller e orientada por Sergio Vicente Denser Pamboukian, “Estudo da instrumentação para realizar prova de conceito do sistema Geolocal”.

6. Provável Tese de Doutorado a ser iniciada em 2021 por Francisco Alberto Gori Fuller como continuidade de sua dissertação de mestrado sobre o Geolocal.

7. Protótipo da instrumentação a ser utilizada pelas bases e repetidoras do sistema Geolocal. Produto inovador com potencial para geração de patentes na continuidade da pesquisa.

8. Preparação de projeto PIPE a ser submetido à FAPESP com a finalidade de acelerar o desenvolvimento das próximas fases do Geolocal.

Vale lembrar que este trabalho representa apenas a primeira fase do projeto Geolocal. As demais fases estão descritas no Apêndice A. De qualquer forma, gostaríamos de deixar registradas aqui algumas propostas para trabalhos futuros:

- criar mecanismos que possam determinar os tempos de propagação e atrasos do sistema com a acurácia desejada (inferiores a  $10^{-9}$ s);
- definir os dados que serão codificados no sinal propagado e o protocolo de transmissão;
- definir como implementar fisicamente os modelos que estimam os atrasos no meio de propagação;
- definir o funcionamento de uma ou mais centrais de controle que irão gerenciar todo o sistema;
- finalizar protótipos das estações e realizar testes realísticos.
- estudar órbitas adequadas para o Geolocal trabalhar com satélites em órbita baixa, nano satélites e cubesats.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). **Plano de atribuição, destinação e distribuição de frequências no Brasil**. Disponível em:

<<https://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?numeroPublicacao=347196>>. Acesso em: 28 set. 2020.

AEROVIRONMENT. **Puma All Environment RQ-20B**. EUA, 2017. Disponível em <[http://www.avinc.com/images/uploads/product\\_docs/PumaAE\\_Datasheet\\_2017\\_Web\\_v1.1.pdf](http://www.avinc.com/images/uploads/product_docs/PumaAE_Datasheet_2017_Web_v1.1.pdf)>. Acesso em 02 dez. 2018.

ALTAMIRANO, M. **Measure Distance with a Sonar Sensor on an Arduino**. 2016. Disponível em: <https://www.allaboutcircuits.com/projects/measure-distance-with-a-sonar-sensor-on-an-arduino/>. Acesso em: 22 maio 2018.

BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and Design -3rd Edition**, 2005. John Wiley & Sons, Ltd.

BOGOVIC, A. **Use of Global Positioning System as Time Reference in Astrophysics Experiments and its Accuracy**. Diploma Thesis. University of Nova Gorica, School of Applied Sciences. 2013.

BRADFORD, Henry M., **Marconi's Three Transatlantic Radio Stations In Cape Breton**. Royal Nova Scotia Historical Society. 1996.

CARREL, Robert Louis. **Analysis and design of log-periodic dipole antenna**. Publicado por: Urbana: Electrical Engineering Research Laboratory, Engineering Experiment Station, University of Illinois. 1961;

CEFET-RJ. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – Rio de Janeiro. **Meteorologia observacional I - Balões meteorológicos**.

Disponível em: [http://meteo.cefet-rj.br/almir/observacional/observacional\\_baloes%20meteorologicos\\_1\\_12.pdf](http://meteo.cefet-rj.br/almir/observacional/observacional_baloes%20meteorologicos_1_12.pdf). Acesso em: 28 jul. 2020.

CELLMER, S., **Theoretical Minimum Value of PDOP Determination**, TECHNICAL SCIENCES Abbrev.: Techn. Sc., No 7, Y. 2004.

DANA P. **Global Positioning System Overview: GDOP computation example**. 1996. Disponível em:

<<https://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gif/gdop.gif>>. Acesso em: 11 jun. 2018.

DANA P. **Global Positioning System Overview: GPS Nominal Constellation**, 1998. Disponível em <[https://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps\\_f.html](https://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html)>. Acesso em 09 jul. 2018.

DECEA. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Circular de Informações Aeronáuticas AIC-N-17: Aeronaves remotamente pilotadas para uso recreativo**, 2018. Disponível em <<https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4696>>. Acesso em 16 mai. 2018.

DJI. Dà-Jiāng Innovations. **Phantom 4 Pro**. China, 2018. Disponível em <<https://www.dji.com/company?site=brandsite&from=footer>>. Acesso em 02 dez. 2018.

DODSON, B. **Launch your own satellite for US\$8000**. New Atlas, 2012. Disponível em <<https://newatlas.com/tubesat-personal-satellite/22211/>>. Acesso em 02 dez. 2018.

DUEV, D.A.; POGREBENKO, S.V.; CALVÉS, G.M. (2011). **A Tropospheric Signal Delay Model for Radio Astronomical Observations**. Astronomy Reports, 55, n.11, 1008–1015.

ECKERT, Jason W. **Linux+ Guide to Linux Certification**. Boston, Massachusetts: Cengage Learning. p. 33. 2012.

ELECTRONICS NOTES. Disponível em: <[www.electronics-notes.com](http://www.electronics-notes.com)>. Acesso em: ago. 2020.

ELLINGSON, Steven W. **Radio Systems Engineering**. Cambridge University Press. 2016.

ETTUS. Disponível em: <[www.ettus.com](http://www.ettus.com)>. Acesso em: ago. 2020.

FESSENDEN, Reginald. **Wireless Telephony**. American Institute of Electrical Engineers (volume 27, part 1). 1908

FEYNMAN, Richard; LEIGHTON, Robert; SANDS, Matthew. **The Feynman Lectures on Physics**, Vol.1. USA: Addison-Wesley. 1963.

FISCHER, M. K. A.; RAQUET, J. F. **Precision Position, Navigation, and Timing without the Global Positioning System**. Air and Space Power Journal, EUA, v. 25, n. 2, 2011.

FRIOLANI, L.G.; FULLER, F.A.G.; PAMBOUKIAN; S.V.D. **Análise gráfica do PDOP no sistema Geolocal**. BTSym19 - Brazilian Technology Symposium. Campinas, 2019.

FRIOLANI, L.G. **Estudo da topologia do sistema Geolocal: um sistema de navegação brasileiro independente de GNSS**. Artigo de Iniciação Científica - Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2020.

FULLER, F.A.G. **Estudo da instrumentação para realizar prova de conceito do sistema Geolocal**. Dissertação de mestrado em andamento no Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais (PPGCAGE) da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM), 2020.

GIBBS, Y. **Global Hawk Performance and Specifications**. NASA, 2014. Disponível em <  
<https://www.nasa.gov/centers/armstrong/aircraft/GlobalHawk/performance.html>>. Acesso em 02 dez. 2018.

GIS COMMONS. **An Introductory Textbook on Geographic Information Systems**. Disponível em: <https://giscommons.org/>. Acesso em: 08 jul. 2019.

GISGEOGRAPHY. **Trilateration vs Triangulation – How GPS Receivers Work**. Disponível em: <https://gisgeography.com/trilateration-triangulation-gps/>. Acesso em: 08 jul. 2019.

GNSS-SDR. Disponível em: <[www.gnss-sdr.com](http://www.gnss-sdr.com)>. Acesso em: ago. 2020.

GNURADIO. Disponível em: <[www.gnuradio.com](http://www.gnuradio.com)>. Acesso em: ago. 2020.

GUIER, W. H; WEIFFENBACH, GC. **Genesis of Satellite Navigation**. Johns Hopkins APL Technical Digest, v. 19, n. 1, 1998. Disponível em <<http://techdigest.jhuapl.edu/TD/td1901/guier.pdf>>. Acesso em 04 set. 2018.

HAMA, S; TAKAHASHI, Y, KIMURA, K; ITO, H; AMAGAI, J. **Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) Project**. Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, Japão, v. 57, n. 3/4, 2010.

HOBBS, A. **Remotely Piloted Aircraft Systems**. San Jose State University Foundation, EUA, 2016. Disponível em <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160014467.pdf>>. Acesso em 02 dez. 2018.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H; COLLINS, J. **Global Positioning System: theory and practice**. Austria: Springer-Verlag Wien, 1997.

HONMA, M.; TAMURA, Y.; REID, M.J. **Tropospheric Delay Calibrations for VERA**. Publications of the Astronomical Society of Japan, 60, 2008, 951-960. <http://dx.doi.org/10.1093/pasj/60.5.951>

HUANG, Yi; BOYLE, Kevin. **Antennas: From Theory to Practice**. 2008 John Wiley & Sons, Ltd.

HUNT, S. M.; CLOSE, S; COSTER, A. J.; STEVENS, S; SCHUETT, L. M; VARDARO, A. Equatorial atmospheric and ionospheric modeling at Kwajalein missile range. **Lincoln Laboratory Journal**, EUA, v. 12, n. 1, 2000.

IDST. International Defence Security and Technology. **Quantum Positioning for Future Accurate Navigation of Submarines and Missiles**, 2016. Disponível em <<http://idstch.com/home5/international-defence-security-and-technology/technology/quantum/quantum-positioning-can-be-future-of-submarine-navigation/>>. Acesso em 04 jun 2018.

INSITU-BOEING. **ScanEagle 3**. EUA, 2016. Disponível em <[https://www.insitu.com/images/uploads/pdfs/2018\\_ScanEagle3\\_Subfolder\\_051618\\_lowres.pdf](https://www.insitu.com/images/uploads/pdfs/2018_ScanEagle3_Subfolder_051618_lowres.pdf)>. Acesso em 02 dez. 2018.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems**. Recommendation ITU-R P.531.4., 1-15, 1997.

ITU-R. International Telecommunication Union - Radiocommunication. **Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems**. Recommendation ITU-R P.531-13. International Telecommunication Union. Suíça, 2016. Disponível em <[https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.531-13-201609-!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.531-13-201609-!!PDF-E.pdf)>. Acesso em 02 dez. 2018.

- KAUFMANN, P. **Sistema e processo de posicionamento geográfico e navegação**. Brasil, Patente de Invenção PI-9101270-8, 1997.
- KAUFMANN, P. **Sistema e processo de posicionamento geográfico e espacial**. Patente de Invenção PI 03003968-4, depositada 08 out. 2003. Correspondente à Geographic and space positioning system and process. International Patent Cooperation Treaty PCT/BR2004/000190, depositada 04 out. 2004.
- KAUFMANN, P.; KAUFMANN, P.L. **Process and System to Determine Temporal Changes in Retransmission and Propagation of Signals Used to Measure Distances, Synchronize Actuators and Georeference Applications**. 2012a. Patent of Invention PI03003968-4, Filed in Brazil on 19 March 2012, International PCT, Application Filed on 17 April 2012.
- KAUFMANN, P., KAUFMANN, P.L., PAMBOUKIAN, S.V.D.; VILHENA DE MORAES, R. **Signal Transceiver Transit Times and Propagation Delay Corrections for Ranging and Geo-Referencing Applications**. Mathematical Problems in Engineering, 2012b, 1-15. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/595823>.
- KAUFMANN, P.; KAUFMANN, P.L.; PAMBOUKIAN, S.V.D.; VILHENA DE MORAES, R. **A New Independent GPS-Free System for Geo-Referencing from Space**. Positioning, 5, 37-45, 2014.
- KINGRY N.; TOWERS, L; LIU, Y. C.; ZU, Y.; WANG, Y.; STAHELI, B.; KATAGIRI, Y.; COOK, S.; DAI, R. **Design, Modeling and Control of a Solar-Powered Quadcopter**. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2018. Disponível em <[https:// aol.osu.edu/sites/aol.osu.edu/files/uploads/icra2018.pdf](https://aol.osu.edu/sites/aol.osu.edu/files/uploads/icra2018.pdf)>. Acesso em 02 dez. 2018.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à Geofísica Espacial**. São Paulo: Nova Stella, Editora da Universidade de São Paulo: FAPESP, 1991.
- KLOBUCHAR, J.A. **Ionospheric time delay algorithm for single frequency GPS users**. IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems, AES-23, 325-331, 1987.
- KULU, E. **Nanosatellite and Cubesat Database**, 2018. Disponível em <<http://www.nanosats.eu/>>. Acesso em 02 dez. 2018.
- LANGLEY, R. D. **Dilution of Precision**. GPS WORLD. 1999

MACHO, E.P.; PAMBOUKIAN, S.V.D.; CORREIA, E. **Geolocal - a new system for geo-referencing: analysis of bases distributions**. Journal of Navigation, 2020. Disponível em <<https://doi.org/10.1017/S0373463320000466>>. Acesso em: 03 set. 2020.

MACHO, E. P. **Implantação de um Sistema Brasileiro de Georreferenciamento Independente de Outros Sistemas de Navegação por Satélite: O Geolocal**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais da Universidade Presbiteriana Mackenzie. 2018. Disponível em: <[https://www.mackenzie.br/fileadmin/OLD/62/ARQUIVOS/PUBLIC/user\\_upload/\\_imported/fileadmin/LABGEO/Trabalhos/2017/D\\_-\\_IMPLANTACAO\\_DE\\_UM\\_SISTEMA\\_BRASILEIRO\\_DE\\_GEORREFERENCIAMENTO\\_INDEPENDENTE\\_DE\\_OUTROS\\_SISTEMAS\\_DE\\_NAVEGACAO\\_POR\\_SATELITE\\_-\\_O\\_GEOLOCAL.pdf](https://www.mackenzie.br/fileadmin/OLD/62/ARQUIVOS/PUBLIC/user_upload/_imported/fileadmin/LABGEO/Trabalhos/2017/D_-_IMPLANTACAO_DE_UM_SISTEMA_BRASILEIRO_DE_GEORREFERENCIAMENTO_INDEPENDENTE_DE_OUTROS_SISTEMAS_DE_NAVEGACAO_POR_SATELITE_-_O_GEOLOCAL.pdf)>. Acesso em: 12 mar. 2019.

MACHO, E.P.; PAMBOUKIAN, S.V.D. **PDOP simulations of Geolocal: a geo-referencing system independent from GNSS systems**. COSPAR, Pasadena, EUA, 2018.

MARCOVIC, M. **Determination of Total Electron Content in the ionosphere using GPS technology**. Geonauka, Sérvia, v. 2, n. 2, 2014.

NIELL, A.E. (1996). **Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths**. Journal of Geophysical Research, 101(B2), 3227-3246.

OGAJA, C. **Applied GPS for Engineers and Project Managers**. 1 ed. EUA: American Society of Civil Engineers, 2011.

OLIVEIRA, K; MOURA, L. C. M. **Os Efeitos da Cintilação Ionosférica na Propagação de Ondas Eletromagnéticas Aplicados nos Sistemas GPS**. ResearchGate, 2012. Disponível em <[https://www.researchgate.net/publication/262297871\\_Os\\_efeitos\\_da\\_cintilacao\\_ionosferica\\_na\\_propagacao\\_de\\_ondas\\_eletromagneticas\\_aplicados\\_nos\\_sistemas\\_GPS](https://www.researchgate.net/publication/262297871_Os_efeitos_da_cintilacao_ionosferica_na_propagacao_de_ondas_eletromagneticas_aplicados_nos_sistemas_GPS)>. Acesso em 02 dez. 2018.

OTSUKA, Y.; OGAWA; T., SAITO; A. TSUGAWA, T.; FUKAO, S.; MIYASAKI, **A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan**, Earth Planets Space, 54, 63-70, 2002.

PAMBOUKIAN, S.V.D. **Novo processo de georreferenciamento: determinação de posição de transponder remoto e aplicações no posicionamento de alvos e disseminação de tempos**. Software registrado no Brasil, INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial, BR5120130006163, registro em 07/03/2012.

PAMBOUKIAN, S.V.D.; KAUFMANN, P.; VILHENA DE MORAES, R; KAUFMANN, P.L. **GNSS-Free Geo-Referencing System Using Multiple LEO CubeSat Formation**. 2<sup>nd</sup> IAA Latin American CubeSat Workshop (LACW2016). Florianopolis, 2016.

PROL, F. S.; CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G; MUELA, M. T. A. H. Assessment of a TEC calibration procedure by single frequency PPP. **GPS Solutions**, 2018.

RASPBERRY PI FOUNDATION. Disponível em: <[www.raspberrypi.org](http://www.raspberrypi.org)>. Acesso em: ago. 2020.

RTL-SDR. Disponível em: <<https://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr>>. Acesso em ago. 2020.

STUTZMAN, W. L; THIELE, G. A. **Antenna Theory and Design. Second Edition** - 1998, John Wiley & Sons, Inc. New York.

μ-BLOX. (1999). **Datum Transformations of GPS Positions**.

<https://microem.ru/files/2012/08/GPS.G1-X-00006.pdf>. Accessed 27 February 2020.

VALLEJO, R.; SANGUINO, J.; RODRIGUES, A. **Posicionamento com GNSS em cenários de multi-constelação**. Universidade de Lisboa. Portugal, 2014. Disponível em

<[https://www.anacom.pt/streaming/RitaVallejo\\_8congURSI.pdf?contentId=1342425&field=ATTACHED\\_FILE](https://www.anacom.pt/streaming/RitaVallejo_8congURSI.pdf?contentId=1342425&field=ATTACHED_FILE)> Acesso em 02 dez. 2018.

VERIPOS. **Precise Satellite Positioning Services: Orion**. 2018. Disponível em <<https://www.veripos.com/assets/Documents/Data-Sheets/VERIPOS-ORION-Datasheet.pdf>>. Acesso em 22 jan. 2018.

WAKKER, K. F.; AMBROSIUS, A. C.; LEENMAN, H; NOOMEN, R. **Navigation and Orbit Computation Aspects of the ESA NAVSAT System Concept**. Acta Astronautica, v. 15, n. 4. 1987.

XINGXING, L.; ZHANG, X; REN, X.; FRITSCHÉ, M. WICKERT, J.; SCHUH, H. **Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite**

**Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou.** Nature Scientific Reports, n.5/8328, 2015. Disponível em <<http://www.nature.com/articles/srep08328>>. Acesso em 02 dez. 2018.

YAMAGAMI, T.; SAITO, Y.; MATSUZAKA, Y.; NAMIKI, M.; TORIUMI, M.; YOKOTA, R.; HIROSAWA, H.; MATSUSHIMA, K. (2004). **Development of the highest altitude balloon.** Advances in Space Research, 33, 1653–1659.

ZELL, H. **Types of Ballons.** NASA, 2017. Disponível em <<https://www.nasa.gov/scientific-balloons/types-of-balloons>>. Acesso em 02 dez. 2018.

## APÊNDICE A – FASES DO PROJETO GEOLOCAL

Por ser extenso em abrangência e tempo, a implementação do sistema Geolocal foi dividida em 5 fases, onde o projeto atual corresponde à Fase 1. As fases planejadas são detalhadas neste apêndice.

### FASE 1 – PESQUISA APLICADA

Consiste nos preparativos necessários para a realização do primeiro experimento em campo e prova de conceito, realizados nas Fases 2 e 3. Envolve diversas atividades que correrão em paralelo como o estudo dos locais de teste, a quantidade de estações necessárias, as frequências utilizadas pelos equipamentos e a construção dos protótipos. São 6 atividades:

- estudo da topologia do sistema;
- planejamento dos testes de campo;
- definição das frequências utilizadas pelo sistema;
- desenvolvimento dos algoritmos de processamento;
- estudo das referências de tempo;
- desenvolvimento dos protótipos das estações.

### FASE 2 – FINALIZAÇÃO DO PROTÓTIPO

Nesta fase, serão desenvolvidos os principais algoritmos e protocolos necessários para o funcionamento básico do sistema Geolocal:

- sincronismo de relógio;
- determinação de atrasos;
- algoritmos e protocolos;
- finalização da instrumentação;
- estabelecer comunicação entre as estações;
- medida de distância entre 2 rádios.

### FASE 3 - EXPERIMENTOS EM CAMPO

Usando a instrumentação desenvolvida na Fase 2, planeja-se diversos experimentos fundamentais para a prova de conceito do projeto:

- realizar de forma remota o sincronismo de relógios entre as bases de forma automática e coordenado pela central de controle;
- sincronizar as bases de tempo das estações em função da base referenciada da central de operações;
- usando duas bases fixas, definir a posição geográfica (no plano) de uma terceira (estação-alvo);
- comparar as medições obtidas com medições realizadas por GNSS ou Estação Total;
- identificar interferências de sinal (obstáculos e reflexões).

Nesta fase também serão feitas as melhorias necessárias nos algoritmos do sistema a partir dos resultados obtidos nos experimentos.

#### FASE 4 - NAVEGAÇÃO DA PLATAFORMA DA REPETIDORA.

Nesta fase, quatro estações serão dispostas em pontos distantes e um receptor será acoplado em diferentes dispositivos aéreos (drone, balões meteorológicos e estratosféricos, aviões e eventualmente satélites) com o objetivo de calcular sua posição, velocidade e direção em situações variadas:

- em um ponto elevado;
- embarcado em drone;
- embarcado em balão meteorológico contido por cabo;
- embarcado em balão meteorológico livre (com recuperação do *payload*).

Outro objetivo importante nesta fase é validar os algoritmos de PDOP e os modelos de atraso de propagação nos meios.

Os dados serão transmitidos para a central de operações em terra e comparados com dados semelhantes obtidos através de GNSS.

Cinco equipamentos serão necessários na configuração:

- 1 base fixa + central de operações;
- 3 bases remotas fixas;
- 1 estação alvo, móvel.

## FASE 5 - GEOLOCALIZAÇÃO DE ALVOS EM SOLO

Serão três bases remotas, uma base + central de operações, quatro estações aéreas ou repetidoras e uma estação alvo, totalizando nove equipamentos. Nesta fase o objetivo é realizar a prova de conceito do sistema completo através de experimentos:

- geoposicionamento das 4 repetidoras (aéreas);
- geoposicionamento do alvo a partir das repetidoras.

## APÊNDICE B – ALGORITMO PARA DETERMINAR ESPAÇAMENTO DE BASES COM REPETIDORA EM POSIÇÃO FIXA

```
% Descrição:
% Seleciona quais bases serão utilizadas no cálculo do PDOP
% considerando a repetidora fixa e ângulos de elevação entre cada base
% e a repetidora de 15° para as altitudes e plataformas: 120m drone,
% 5000m balão cativo, 12000m avião, 36000m balão estratosférico e
% 600000m satélite
%
% Informações conhecidas:
% Altitude e posição da repetidora (em metros) e ângulo de elevação
% mínimo entre as bases e a repetidora
%
% Informações calculadas:
% - Espaçamento entre as bases (em metros)
% - Quantidade de bases para cada espaçamento
% - Melhor valor de PDOP para o número de bases selecionado na
%   simulação
% - Posição das bases que geram os melhores valores de PDOP
%
% Dicionário de dados (ordem em que são apresentadas no código):
% altitude = altitude fixa da repetidora (em metros)
% espaçamento = espaçamento entre as bases (em metros)
% R = posição fixa da repetidora (em metros)
% n = número de bases
% Bases = matriz com a posição de todas as bases
% angulo = ângulo entre a horizontal e a linha de visada entre cada
%         base e a repetidora (em graus)
% v = vetor com o número de identificação de todas as bases
% i = índice que representa a quantidade de bases a serem tomadas na
```



```

function combinacao_de_bases_variando_e_1

% limpa a tela

clear

clc

% Altitude fixa da repetidora

altitude=500;

% Determinação do espaçamento entre as bases

for espacamento=150:25:400

    % Posição fixa da repetidora

    R=[0 0 altitude]

    % Calcula a quantidade de bases e determina as posições de

    % cada base

    [n,Bases] = CalculaBases(altitude,espacamento,R)

    % Calcula o ângulo entre a horizontal e a linha de visada

    % entre cada base e a repetidora

    angulo=atand(R(3)/espacamento)

    % vetor com o numero (identificação) de todas as bases

    v=1:n;

    fprintf('      ESPACAMENTO');

    fprintf('%10.2f',espacamento);

    fprintf('\n');

    fprintf('      QBASES      PDOP      BASES\n');

    % Combinação de todas as bases a partir de um grupo de 4 bases

    % Cada linha da matriz "c" corresponde a uma simulação,

    % enquanto que cada elemento corresponde a uma base, ou seja,

    % uma linha da matriz "Bases"

```

```

for i=4:n
    c= combnk(v,i);

    % Calcula o PDOP de cada simulação para "i" bases
    % retornando o menor PDOP e a combinação correspondente
    [vidbases1,p1] = CalculaPDOP(n,i,c,R,Bases);

    % Exibe combinações selecionadas
    ExibeBases(i,p1,vidbases1);

end

end

end

function [n,Bases] = CalculaBases(altitude,espacamento,R)

    % Determina a quantidade de bases e cria a matriz "Bases" que
    % contém a posição de cada base

    % Índice da matriz
    n=0;

    % Raio de cobertura da repetidora considerando um ângulo de 15°
    raio=altitude/tan(15*pi/180)

    % Calcula a quantidade de bases em um comprimento de raio
    qnt=raio/espacamento;

    % Determina a posição inicial para a disposição das bases
    zero=espacamento*round(qnt);

    % Determinação das posições das bases dentro do raio encontrado
    for x= -zero : espacamento : zero
        for y= -zero : espacamento : zero
            if sqrt((R(1)-x)^2+(R(2)-y)^2)<=raio
                n=n+1;

                % "Bases" é a matriz q contém as coordenadas de todas

```

```

        % as bases

        Bases(n,1)=x;

        Bases(n,2)=y;

        Bases(n,3)=0;

    end

end

end

end

function [vidbases1,p1] = CalculaPDOP(n,i,c,R,Bases)

% Calcula o PDOP de cada simulação para "i" bases retornando o
% menor PDOP e a combinação correspondente

% Calcula o número de combinações (linhas da matriz "c")
t=factorial(n)/(factorial(i)*factorial(n-i));

% Atribui um valor de comparação para "p1"
p1=100000000000;

% Cria o vetor com a identificação de cada base da simulação
% selecionada
vidbases1=[];

for j=1:t

    % Cria a matriz "A" do PDOP

    A=[];

    % Cria um vetor que conterà a identificação das bases da
    % simulação
    vidbases=[];

    for k=1:i

```

```

% Cria "idbase" ou c(j,k), identificação da base, que é
% correspondente ao numero da linha da matriz "Bases" que
% contém as coordenadas dessa base
idbase=c(j,k);

% Cria uma linha da matriz do PDOP
B= [ ((Bases(idbase,1)-R(1))/(sqrt((Bases(idbase,1)-R(1))^2 +
    (Bases(idbase,2)-R(2))^2 + R(3)^2))) ((Bases(idbase,2)-
    R(2))/(sqrt((Bases(idbase,1)-R(1))^2 + (Bases(idbase,2)-
    R(2))^2 + R(3)^2))) ((Bases(idbase,3)-
    R(3))/(sqrt((Bases(idbase,1)-R(1))^2 + (Bases(idbase,2)-
    R(2))^2 + R(3)^2))) -1];

% Preenche a matriz do PDOP
A = [ A; B ];

% Atribui a identificação da base ao vetor "vidbases"
vidbases=[vidbases,idbase];

% Calcula o PDOP se a matriz estiver finalizada
if k==i
    % Matriz "Q" do PDOP
    warning('off');
    Q = inv(A'*A);
    warning('on');

    % Cálculo do PDOP
    p = sqrt(Q(1,1)+Q(2,2)+Q(3,3));

    % Seleciona a combinação de menor PDOP para aquele
    % número de bases
    if p<p1 && p>=1
        p1=p;
        j1=j;
        vidbases1=vidbases;
    end
end

```

```
        end
    end
end
end

function ExibeBases(i,p1,vidbases1)
    % Exibe as combinações selecionadas
    fprintf('%10.0f%10.2f',i,p1);
    for b=1:length(vidbases1)
        fprintf('%10.0f',vidbases1(b));
    end
    fprintf('\n');
end
```

## APÊNDICE C – ALGORITMO PARA DETERMINAR ESPAÇAMENTO DE BASES COM REPETIDORA EM POSIÇÃO VARIÁVEL

```

% Descrição:
% Seleciona quais bases serão utilizadas no cálculo do PDOP com um
% espaçamento entre as bases e altura da repetidora pré determinados e
% com a posição da repetidora variando no plano (x,y) em um intervalo
% correspondente à metade do espaçamento total em ambos os planos e
% ângulos de elevação de 15° entre cada base e a repetidora
% Simulação feita para as altitudes e plataformas: 120m drone, 5000m
% balão cativo, 12000m avião, 36000m balão estratosférico e 600000m
% satélite
%
% Informações conhecidas:
% Altitude da repetidora e sua posição inicial no plano (x,y) (em
% metros), ângulo de elevação mínimo entre as bases e a repetidora e o
% espaçamento entre as bases
%
% Informações calculadas:
% - Posição da repetidora
% - Quantidade de bases para cada espaçamento
% - Melhor valor de PDOP para o número de bases selecionado na
% simulação
% - Posição das bases que geram os melhores valores de PDOP
%
% Dicionário de dados (ordem em que são apresentadas no código):
% altitude = altitude fixa da repetidora (em metros)
% espacamento = espaçamento fixo entre as bases (em metros)
% R = posição inicial da repetidora (em metros)
% n = número de bases
% Bases = matriz com a posição de todas as bases

```

```
% angulo = ângulo entre a horizontal e a linha de visada entre cada
%
%     base e a repetidora (em graus)
%
% v = vetor com o número de identificação de todas as bases
%
% Rmx = posição da repetidora no eixo x
%
% Rmy = posição da repetidora no eixo y
%
% Rm = posição da repetidora - vetor linha de 3 elementos
%
% d = índice para o laço de repetição para exibir as coordenadas da
%
%     posição da repetidora
%
% i = índice que representa a quantidade de bases a serem tomadas na
%
%     simulação
%
% c = matriz que contém todas as combinações possíveis de "n" bases
%
%     tomadas "i" a "i"
%
% vidbases1 = vetor que contém a identificação das bases utilizadas na
%
%     simulação de menor PDOP para a quantidade "i" de bases
%
% p1 = melhor valor de PDOP para "i" bases
%
% raio = raio de cobertura da repetidora, em metros, considerando um
%
%     ângulo de 15°
%
% qnt = quantidade de bases em um comprimento de raio
%
% zero = posição inicial, em metros, para a disposição das bases tanto
%
%     no eixo x, quanto no eixo y
%
% t = número de combinações possíveis para "n" bases tomadas "i" a "i"
%
% j = índice que representa o número da combinação ou a linha da
%
%     matriz "c"
%
% A = matriz "A" do PDOP
%
% k = índice que representa o número de bases da simulação ou colunas
%
%     da matriz "c"
%
% B = uma linha da matriz "A" do PDOP - vetor linha de 4 elementos
%
% idbase = identificação da base utilizada na simulação, esse valor é
%
%     correspondente ao número da linha da matriz Bases que
%
%     contém sua posição
```

```

% vidbases = vetor que contém a identificação das bases utilizadas na
%
%       simulação
% Q = matriz "Q" do PDOP
% p = valor de PDOP calculado para a simulação
% j1 = número da simulação de menor PDOP
% b = índice que representa o número de bases da simulação
%

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

function combinacao_de_bases_variando_R_1

```

```

% Limpa a tela

```

```

clear

```

```

clc

```

```

% Altitude fixa da repetidora

```

```

altitude=500;

```

```

% Determinação do espaçamento entre as bases

```

```

espacamento=833.3;

```

```

% Posição inicial da repetidora

```

```

R=[0 0 altitude]

```

```

% Calcula a quantidade de bases e determina as posições de cada

```

```

% base

```

```

[n,Bases] = CalculaBases(altitude,espacamento,R)

```

```

% Vetor com o numero (identificação) de todas as bases

```

```

v=1:n;

```

```

% Variação da posição da repetidora

```

```

for Rmx=0:espacamento/10:espacamento/2

```

```

    for Rmy=0:espacamento/10:espacamento/2

```

```

Rm=[espacamento/2,espacamento/2,altitude];

fprintf('      REPETIDORA');

for d=1:3

    fprintf('%7.1f',Rm(d));

end

fprintf('\n');

fprintf('      QBASES      PDOP      BASES\n');

% Combinação de todos as bases a partir de 4 bases
% Cada linha da matriz "c" corresponde a uma simulação,
% enquanto que cada elemento corresponde a uma base, ou
% seja, uma linha da matriz "Bases"
for i=4:n

    c= combnk(v,i);

    % Calcula o PDOP de cada simulação para "i" bases
    % retornando o menor PDOP e a combinação
    % correspondente

    [vidbases1,p1] = CalculaPDOP(n,i,c,Rm,Bases);

    % Exibe combinações selecionadas

    ExibeBases(i,p1,vidbases1);

end

    fprintf('\n');

end

end

end

function [n,Bases] = CalculaBases(altitude,espacamento,R)

% Determina a quantidade de bases e cria a matriz "Bases" que
% contém a posição de cada base

```

```

%Índice da matriz
n=0;

%Raio de cobertura da repetidora considerando um ângulo de 15°
raio=altitude/tan(15*pi/180)

% Calcula a quantidade de bases em um comprimento de raio
qnt=raio/espacamento;

% Determina a posição inicial para a disposição das bases
zero=espacamento*round(qnt);

%Determinação das posições das bases dentro do raio encontrado
for x= -zero : espacamento : zero
    for y= -zero : espacamento : zero
        if sqrt((R(1)-x)^2+(R(2)-y)^2)<=raio
            n=n+1;

            % "Bases" é a matriz que contém as coordenadas de
            % todas as bases
            Bases(n,1)=x;
            Bases(n,2)=y;
            Bases(n,3)=0;
        end
    end
end

end

function [vidbases1,p1] = CalculaPDOP(n,i,c,R,Bases)

% Calcula o PDOP de cada simulação para "i" bases retornando o
% menor PDOP e a combinação correspondente

% Calcula o número de combinações (linhas da matriz "c")

```

```

% t é o nº de combinações (linhas da matriz c)
t=factorial(n)/(factorial(i)*factorial(n-i));

% Atribui um valor de comparação para "p1"
p1=10000000000;

% Cria o vetor com a identificação de cada base da simulação
% selecionada
vidbases1=[];

for j=1:t %linha
    % Cria a matriz "A" do PDOP
    A=[];
    % Cria um vetor que conterà a identificação das bases da
    % simulação
    vidbases=[];
    for k=1:i %coluna

        % Cria "idbase" ou c(j,k), identificação da base, que é
        % correspondente ao numero da linha da matriz "Bases" que
        % contém as coordenadas dessa base
        idbase=c(j,k);
        % Cria uma linha da matriz do PDOP
        B= [ ((Bases(idbase,1)-R(1))/(sqrt((Bases(idbase,1)-R(1))^2 +
            (Bases(idbase,2)-R(2))^2 + R(3)^2))) ((Bases(idbase,2)-
            R(2))/(sqrt((Bases(idbase,1)-R(1))^2 + (Bases(idbase,2)-
            R(2))^2 + R(3)^2))) ((Bases(idbase,3)-
            R(3))/(sqrt((Bases(idbase,1)-R(1))^2 + (Bases(idbase,2)-
            R(2))^2 + R(3)^2))) -1];
        % Preenche a matriz do PDOP
        A = [ A; B ];
        % Atribui a identificação da base ao vetor "vidbases"
        vidbases=[vidbases,idbase];
    end
end

```

```

% Calcula o PDOP se a matriz estiver finalizada
if k==i
    %Matriz Q do PDOP
    warning('off');
    Q = inv(A'*A);
    warning('on');

    %Cálculo do PDOP
    p = sqrt(Q(1,1)+Q(2,2)+Q(3,3));

    % Seleciona a combinação de menor PDOP para aquele
    % número de bases
    if p<p1 && p>=1
        p1=p;
        j1=j;
        vidbases1=vidbases;
    end
end
end
end
end
end

function ExibeBases(i,p1,vidbases1)
    % Exibe as combinações selecionadas
    fprintf('%10.0f%10.2f',i,p1);
    for b=1:length(vidbases1)
        fprintf('%10.0f',vidbases1(b));
    end
    fprintf('\n');
end
end

```



## APÊNDICE D – ALGORITMO PARA ANÁLISE VISUAL DO PDOP

```

% Descrição:
% Determina e cria um gráfico com as melhores posições da Repetidora
% considerando os menores valores de PDOP e elevações iguais ou acima
% de 15°
%
% Informações conhecidas:
% Posição das bases A, B C, D e E (em LLA)
%
% Informações calculadas:
% - Altura da repetidora para cada par (x,y) que resulta no menor
% PDOP, bem como sua elevação (em graus) em relação à cada base
% - Melhor posição da repetidora (em LLA) para a configuração de bases
% testada e sua elevação (em graus) em relação à cada base
% - Gráfico tridimensional com as posições da repetidora para os
% melhores valores de PDOP em cada coordenada (X,Y)
% - PDOP mostrado no gráfico através de escala de cores, mais posições
% das bases
%
% Dicionário de Dados (ordem em que são apresentadas no código):
% A = posição da base A (em LLA) - vetor linha de 3 elementos
% B = posição da base B (em LLA) - vetor linha de 3 elementos
% C = posição da base C (em LLA) - vetor linha de 3 elementos
% D = posição da base D (em LLA) - vetor linha de 3 elementos
% E = posição da base D (em LLA) - vetor linha de 3 elementos
% l = índice que representa linha nas matrizes X, Y, X e Pm
% m = índice que representa coluna nas matrizes X, Y, X e Pm
% PMIN = valor do menor PDOP para a configuração de bases testada
% x = coordenada x do gráfico
% y = coordenada y do gráfico
% Pl = valor do menor PDOP para cada coordenada (x,y)
% z = coordenada z do gráfico
% R = posição da repetidora R (em LLA) - vetor linha de 3 elementos
% P = valor do PDOP para R

```

```
% ERA = elevação da repetidora R em relação à base A (em graus)
% ERB = elevação da repetidora R em relação à base B (em graus)
% ERC = elevação da repetidora R em relação à base C (em graus)
% ERD = elevação da repetidora R em relação à base D (em graus)
% ERE = elevação da repetidora R em relação à base D (em graus)
% z1 = altura da repetidora R para cada par (x,y) que resulta no
%     menor PDOP
% ERA1 = elevação da repetidora R1 em relação à base A (em graus)
% ERB1 = elevação da repetidora R1 em relação à base B (em graus)
% ERC1 = elevação da repetidora R1 em relação à base C (em graus)
% ERD1 = elevação da repetidora R1 em relação à base D (em graus)
% ERE1 = elevação da repetidora R1 em relação à base D (em graus)
% R2 = melhor posição da repetidora (em metros) para a configuração
%     de bases testada - vetor linha de 3 elementos
% ERA2 = elevação da repetidora R2 em relação à base A (em graus)
% ERB2 = elevação da repetidora R2 em relação à base B (em graus)
% ERC2 = elevação da repetidora R2 em relação à base C (em graus)
% ERD2 = elevação da repetidora R2 em relação à base D (em graus)
% ERE2 = elevação da repetidora R2 em relação à base D (em graus)
% X = matriz com cada coordenada x de R1 para a construção do
%     gráfico - matriz (l,m)
% Y = matriz com cada coordenada y de R1 para a construção do
%     gráfico - matriz (l,m)
% Z = matriz com cada coordenada z1 de R1 para a construção do
%     gráfico - matriz (l,m)
% Pm = matriz com o valor do PDOP de cada R1 - matriz (l,m)
% R1 = melhor posição da repetidora (em LLA) em cada par (x,y) -
%     vetor linha de 3 elementos
% cx = variável para a criação das esferas que representam as bases
%     no gráfico
% cy = variável para a criação das esferas que representam as bases
%     no gráfico
% cz = variável para a criação das esferas que representam as bases
%     no gráfico
```

```

% cxs = variável para a criação das esferas que representam as bases
%       no gráfico (cx*raio)
% cys = variável para a criação das esferas que representam as bases
%       no gráfico (cy*raio)
% czs = variável para a criação das esferas que representam as bases
%       no gráfico (cz*raio)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Limpa a tela
clear
clc

% Coordenadas das bases em LLA
BaseA = [-23.48132 -46.83129 800];
BaseB = [-23.48295 -46.82380 800];
BaseC = [-23.48658 -46.83680 800];
BaseD = [-23.48818 -46.82933 800];
BaseE = [-23.48475 -46.83031 800];

% Coordenadas dos limites em LLA para a posição da repetidora
Lim_A = [-23.47946 -46.83791 763];
Lim_B = [-23.48980 -46.82322 2000];

% Posição das bases - (ECEF)
A = lla2ecef(BaseA,'WGS84');
B = lla2ecef(BaseB,'WGS84');
C = lla2ecef(BaseC,'WGS84');
D = lla2ecef(BaseD,'WGS84');
E = lla2ecef(BaseE,'WGS84');

% Atribuição de um valor para P2 - o melhor PDOP do sistema
PMIN=10000000;
PMAX = 0;

% Atribuição de valores para l (linha - y) e m (coluna - x), que serão

```

```

% os índices para a criação das matrizes X, Y, Z e Pm de acordo com os
% pontos calculados
% As matrizes X, Y, Z e Pm serão utilizadas para a construção do
% gráfico
l=1;
m=1;

% Cálculo do PDOP para todas as coordenadas dentro do intervalo e
% passo determinado
for x=Lim_B(1):0.0002:Lim_A(1)
    % Os limites são definidos através do mapa no QGIS
    m=1;
    for y=Lim_A(2):0.0002:Lim_B(2)
        % Os limites são definidos através %do mapa no QGIS
        % Atribuição de um valor de P1 (PDOP) para comparação com P
        P1=10000000;
        for z=Lim_A(3):10:Lim_B(3)
            Re=[x,y,z]; %LLA
            R=lla2ecef(Re,'WGS84'); %ECEF
            P= PDOP_5(R,A,B,C,D,E);
            % Ângulos de elevação (dados em LLA)
            ERA = asin( abs((Re(3)-BaseA(3))) / norm(A-R) ) * (180 / pi);
            ERB = asin( abs((Re(3)-BaseB(3))) / norm(B-R) ) * (180 / pi);
            ERC = asin( abs((Re(3)-BaseC(3))) / norm(C-R) ) * (180 / pi);
            ERD = asin( abs((Re(3)-BaseD(3))) / norm(D-R) ) * (180 / pi);
            ERE = asin( abs((Re(3)-BaseE(3))) / norm(E-R) ) * (180 / pi);

            % Determinação da altitude de R que resulta no menor valor de
            % PDOP com elevações iguais ou acima de 15° para cada par
            % (x,y)
            if P<P1 && ERA>=15 && ERB>=15 && ERC>=15 && ERD>=15 && ERE>=15
                P1=P;
                z1=z;
                ERA1=ERA;

```

```

        ERB1=ERB;
        ERC1=ERC;
        ERD1=ERD;
        ERE1=ERE;
    end
end

% Teste para achar o menor PDOP do sistema
if P1<PMIN
    PMIN=P1;
    R2=[x y z1];
    ERA2=ERA1;
    ERB2=ERB1;
    ERC2=ERC1;
    ERD2=ERD1;
    ERE2=ERE1;
end

% Teste para achar o maior PDOP do sistema
if P1>PMAX
    PMAX=P1;
end

% Atribuição dos valores dos pontos às matrizes X, Y e Z para
% a construção do gráfico
X(1,m)=Re(1);
Y(1,m)=Re(2);
Z(1,m)=z1;
Pm(1,m)=P1;
m=m+1;

if P1<4
    % Posições da repetidora para PDOP abaixo de 4
    R1 = [x, y, z1] %LLA

```

```

fprintf('Ângulo de elevação de R em relação à Base A = %.2f\n',
        ERA1);

fprintf('Ângulo de elevação de R em relação à Base B = %.2f\n',
        ERB1);

fprintf('Ângulo de elevação de R em relação à Base C = %.2f\n',
        ERC1);

fprintf('Ângulo de elevação de R em relação à Base D = %.2f\n',
        ERD1);

fprintf('Ângulo de elevação de R em relação à Base E = %.2f\n',
        ERE1);

fprintf('PDOP = %.2f\n\n', P1);

    end

end

l=l+1;

end

% Resultados da melhor posição para repetidora para essa configuração
% de bases (menor PDOP do sistema)

fprintf('Melhor posição para a repetidora \n');

fprintf('Posição da Repetidora = /n';R2);

fprintf('Ângulo de elevação de R em relação à Base A = %.2f\n', ERA2);
fprintf('Ângulo de elevação de R em relação à Base B = %.2f\n', ERB2);
fprintf('Ângulo de elevação de R em relação à Base C = %.2f\n', ERC2);
fprintf('Ângulo de elevação de R em relação à Base D = %.2f\n', ERD2);
fprintf('Ângulo de elevação de R em relação à Base E = %.2f\n', ERE2);

fprintf('PDOP = %.2f\n\n', PMIN);

%fprintf('PDOP = %.2f\n\n', PMAX);

% Gráfico 3D com as posições que resultam nos menores valores de PDOP
% a partir das matrizes X, Y e Z

surf(Y,X,Z,Pm);

colorbar;

title('Região de voo da repetidora');

xlabel('Longitude');

ylabel('Latitude');

zlabel('Altitude');

```

```
grid on;
hold on;

% Desenha as bases A, B, C e D no gráfico
[cx,cy,cz] = sphere(60);

cxs = cx * 0.0001; % raio da esfera
cys = cy * 0.0001; % raio da esfera
czs = cz * 0.0001; % raio da esfera

% Base A surf(cxs+BaseA(2),cys+BaseA(1),czs+BaseA(3),'FaceColor','Cyan',
'EdgeColor',[0 0.8 0.8],'FaceAlpha',0.3);

hold on;

% Base B
surf(cxs+BaseB(2),cys+BaseB(1),czs+BaseB(3),'FaceColor','Cyan',
'EdgeColor',[0 0.8 0.8],'FaceAlpha',0.3);

hold on;

% Base C
surf(cxs+BaseC(2),cys+BaseC(1),czs+BaseC(3),'FaceColor','Cyan',
'EdgeColor',[0 0.8 0.8],'FaceAlpha',0.3);

hold on;

% Base D
surf(cxs+BaseD(2),cys+BaseD(1),czs+BaseD(3),'FaceColor','Cyan',
'EdgeColor',[0 0.8 0.8],'FaceAlpha',0.3);

hold on;

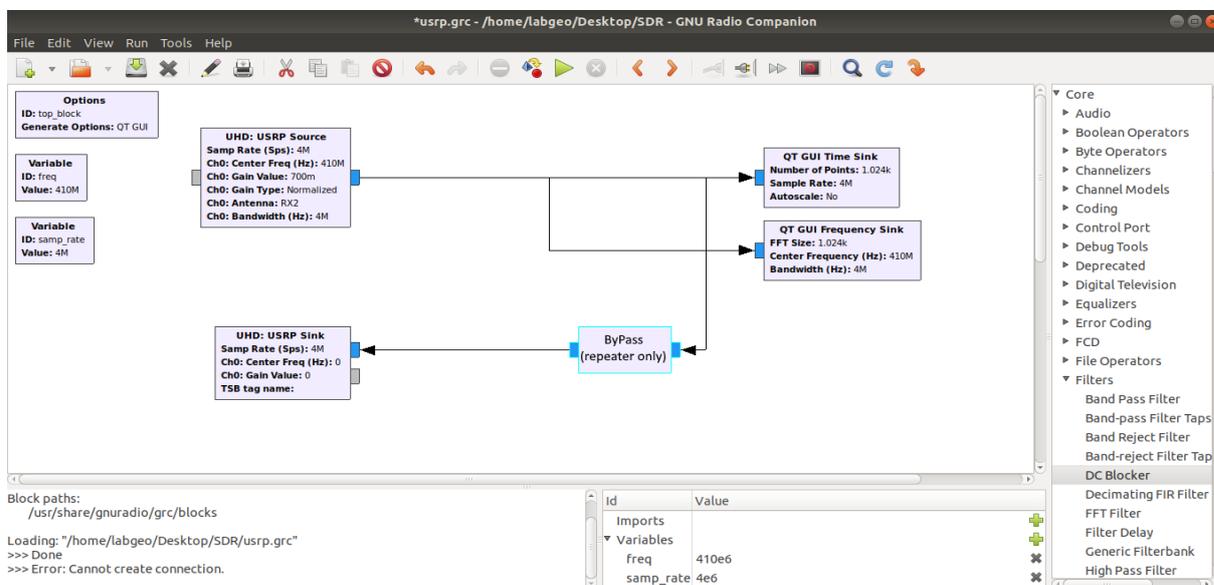
% Base E
surf(cxs+BaseE(2),cys+BaseE(1),czs+BaseE(3),'FaceColor','Cyan',
'EdgeColor',[0 0.8 0.8],'FaceAlpha',0.3);

hold on;

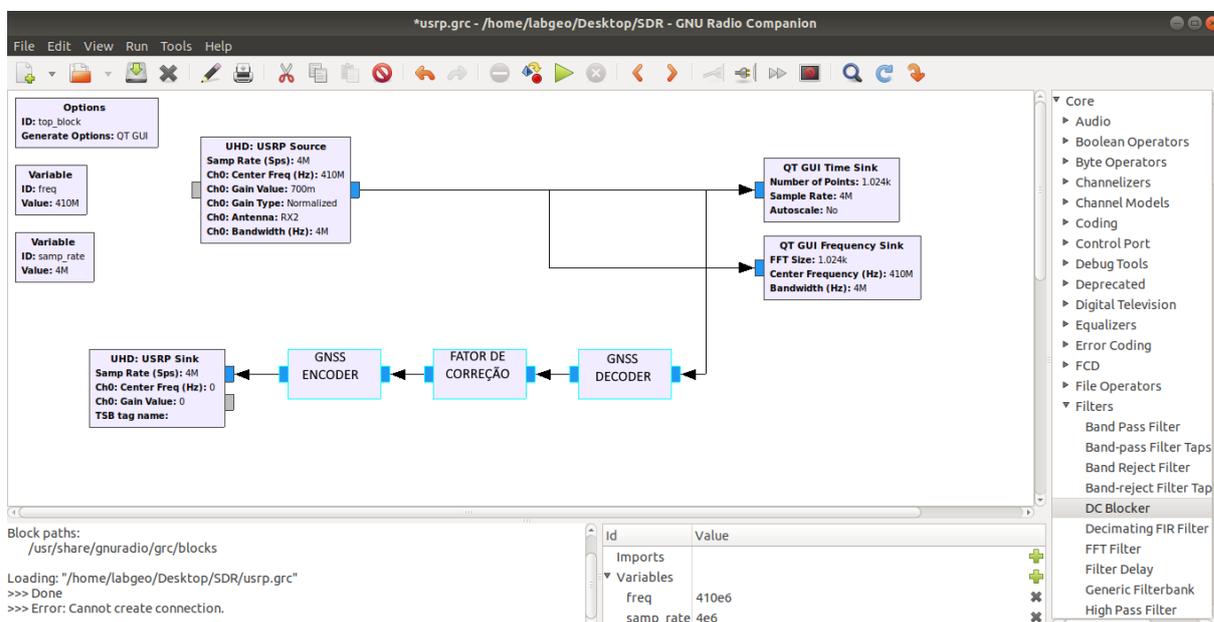
end
```

## APÊNDICE E – CONFIGURAÇÃO E TESTES INICIAIS DO PROTÓTIPO

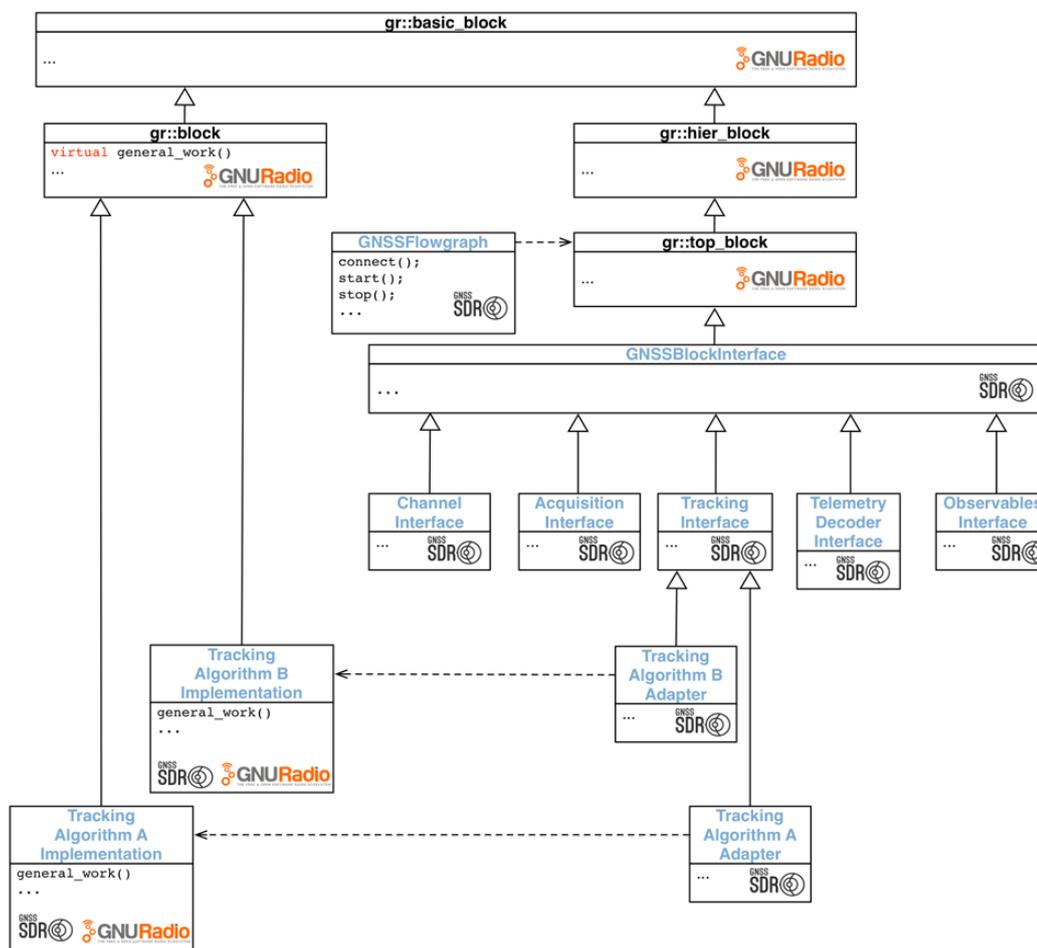
O GNURadio pode ser facilmente implementado para funcionar como um repetidor simples. Esta implementação pode ser feita pelo *flowchart* a seguir.



Neste *flowchart* o sinal recebido pelo bloco USRP Source é repassado sem alterações para o USRP Sink. Devidamente configurados na frequência L1 do GPS, implementa a repetidora. Já um modelo de *flowchart* que realize o processo de correção precisa ter pelo menos 3 blocos: um decodificador de GNSS, o bloco que altera os dados inserindo o fator de correção e o bloco de codificação.



Para facilitar o desenvolvimento, há uma solução chamada GNSS-SDR ([www.gnss-sdr.org](http://www.gnss-sdr.org)). Ele usa o core do GNURadio para as implementações. O processamento é feito em rotinas próprias compondo uma solução completa e modular que permite, desde a recepção do sinal, até a geração dos arquivos RINEX. Pode ser integrado com mapas do Google ou outros aplicativos desde que com uma interface adequada.

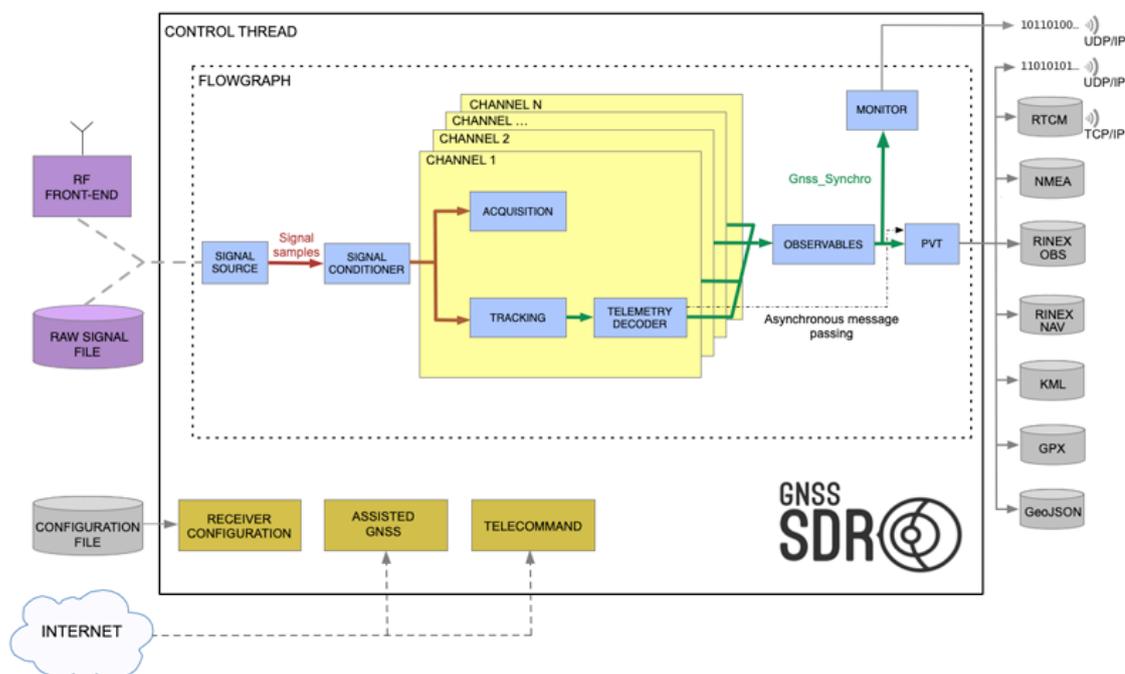


A primeira dificuldade com este framework é que ele está inteiramente escrito em C++. Suas classes não tem os módulos em Python para aparecerem como blocos do GNURadio-companion. Num dos fóruns do GNSS-SDR encontra-se uma referência a isso (<https://sourceforge.net/p/gnss-sdr/mailman/message/34726497/>).

Também há de se supor que esse interfaceamento e sua compilação pelo GNURadio deve gerar um código mais lento que o próprio framework.

Embora sem interface gráfica, sua operação é extremamente simples e a configuração dos blocos usa um arquivo texto com extensão `.conf`, com farta

documentação que não precisa ser reproduzida neste trabalho (<https://gnss-sdr.org/docs/overview/>)



## Testes Preliminares

Estes testes foram realizados no notebook onde instalou-se o GNURadio a partir dos programas-fonte (GIT). A finalidade destes testes é validar a construção do hardware e sua configuração.

Também foram realizados estudos do GNSS-SDR e executados os experimentos sugeridos no tutorial do site, para familiarização, usando como entrada um arquivo de dados simulando o sinal do GPS visto que ainda não foi possível a captura de um sinal real. No momento implementa-se a classe MONITOR em alguns dos pontos do flowchart para examinar as informações.

## Conexão Com a USRP

A placa USRP conecta sem problemas. Foi criado um flowchart com o bloco do USRP, mas na hora da execução está apresentando um erro de incompatibilidade de versão do firmware do FPGA:

*Error: RuntimeError: Expected FPGA compatibility number 14, but got 17: The FPGA image on your device is not compatible with this host code build.*

*Download the appropriate FPGA images for this version of UHD. Please run:*

*"/usr/local/lib/uhd/Utils/uhd\_images\_downloader.py"*

Then burn a new image to the on-board flash storage of your USRP B2XX device using the image loader utility. Use this command:

```
"/usr/local/sbin/uhd/uhd_image_loader" -args="type=b200, addr=MyUSB"
```

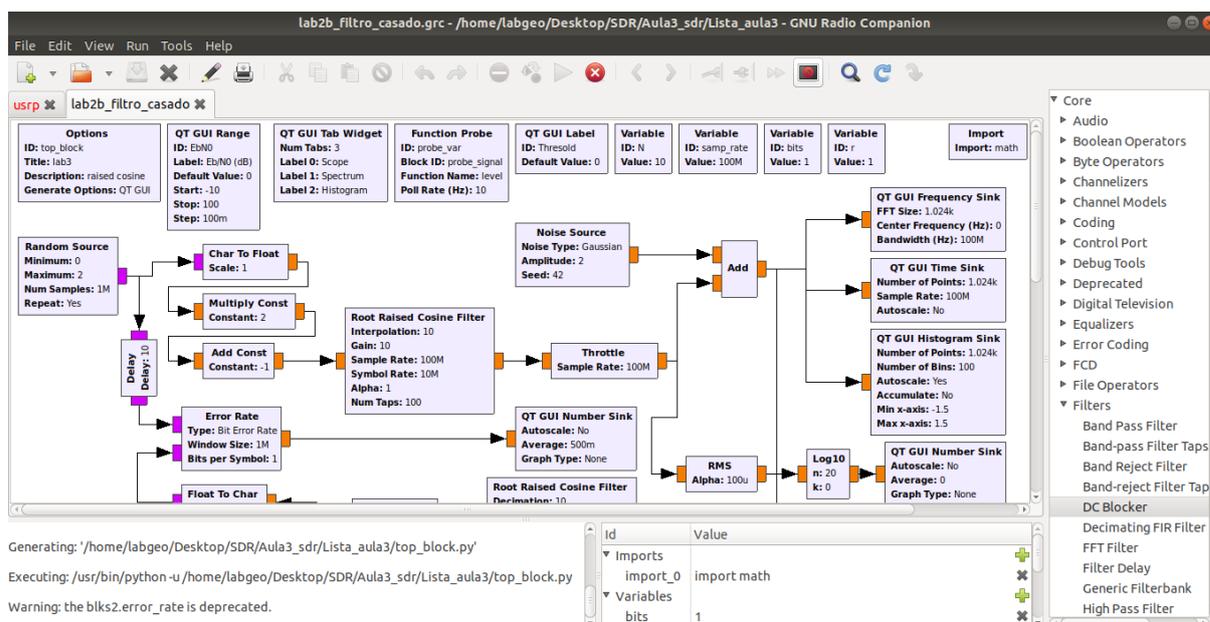
Os procedimentos sugeridos pela mensagem foram executados mas o problema permanece. Há muita referência a este problema nos fóruns, nada conclusivo. A sugestão mais recente é instalar o UHD antes do GNURadio.

## Validação do GPSDO

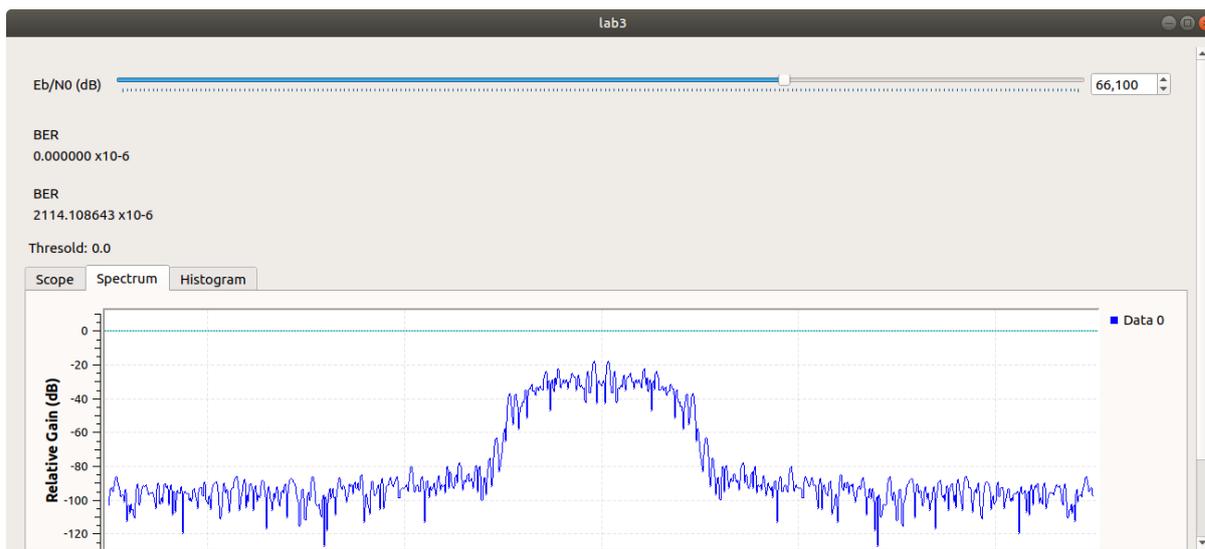
Executar as validações do site da ETTUS para este acessório,

## Teste do GNUradio Companion

Para o teste utilizou-se um flowchart d GNURadio para implementação de filtro casado:



Resultado:



## Teste do GNSS-SDR

A seguir mostra-se a validação da instalação do ambiente GNSS-SDR. Neste teste foram seguidos os procedimentos do próprio site, em <https://gnss-sdr.org/my-first-fix/>.

Verificar se o GNSS-SDR está instalado e qual a versão:

```
$ gnss-sdr --version
```

The screenshot shows a terminal window titled 'labgeo@station2: ~'. The terminal output is as follows:

```
labgeo@station2:~$ gnss-sdr --version
linux; GNU C++ version 7.3.0; Boost_106501; UHD_003.010.003.000-0-unknown

gnss-sdr version 0.0.11
labgeo@station2:~$
```

Em seguida executamos o profiler tool do VOLK e do VOLK\_GNSSSDR pelos comandos:

```
$ volk_profile
```

```

labgeo@station2: ~
File Edit View Search Terminal Help
labgeo@station2:~$ volk_profile
RUN_VOLK_TESTS: volk_64u_popcntpuppet_64u(131071,1987)
generic completed in 168.714ms
a_sse4_2 completed in 165.227ms
Best aligned arch: a_sse4_2
Best unaligned arch: generic
RUN_VOLK_TESTS: volk_16u_byteswappuppet_16u(131071,1987)
generic completed in 129.34ms
u_sse2 completed in 36.771ms
a_sse2 completed in 36.263ms
u_avx2 completed in 29.298ms
a_avx2 completed in 25.891ms
Best aligned arch: a_avx2
Best unaligned arch: u_avx2
RUN_VOLK_TESTS: volk_32u_byteswappuppet_32u(131071,1987)

```

```
$ volk_gnssdr_profile
```

```

labgeo@station2: ~
File Edit View Search Terminal Help
labgeo@station2:~$ volk_gnssdr_profile
RUN_VOLK_GNSSDR_TESTS: volk_gnssdr_8i_accumulator_s8i(8111,100000)
u_sse3 completed in 124.641 ms
generic completed in 303.816 ms
a_sse3 completed in 96.9496 ms
a_avx2 completed in 13.362 ms
u_avx2 completed in 17.5628 ms
Best aligned arch: a_avx2
Best unaligned arch: u_avx2
RUN_VOLK_GNSSDR_TESTS: volk_gnssdr_8i_index_max_16u(8111,100000)
u_avx2 completed in 74.2902 ms
u_avx completed in 142.186 ms
u_sse4_1 completed in 59.0035 ms
u_sse2 completed in 84.5948 ms
generic completed in 475.667 ms

```

Estes comandos demoram vários minutos para concluírem a execução.

Uma vez que a placa USRP não está devidamente operacional, o teste foi feito a partir de arquivos com amostras de sinal de GPS em bruto.

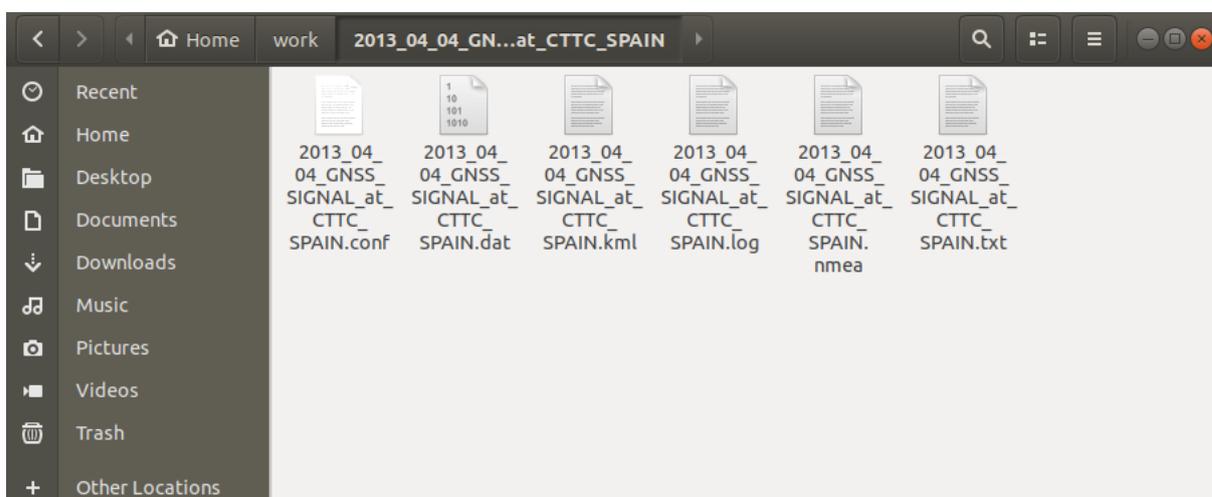
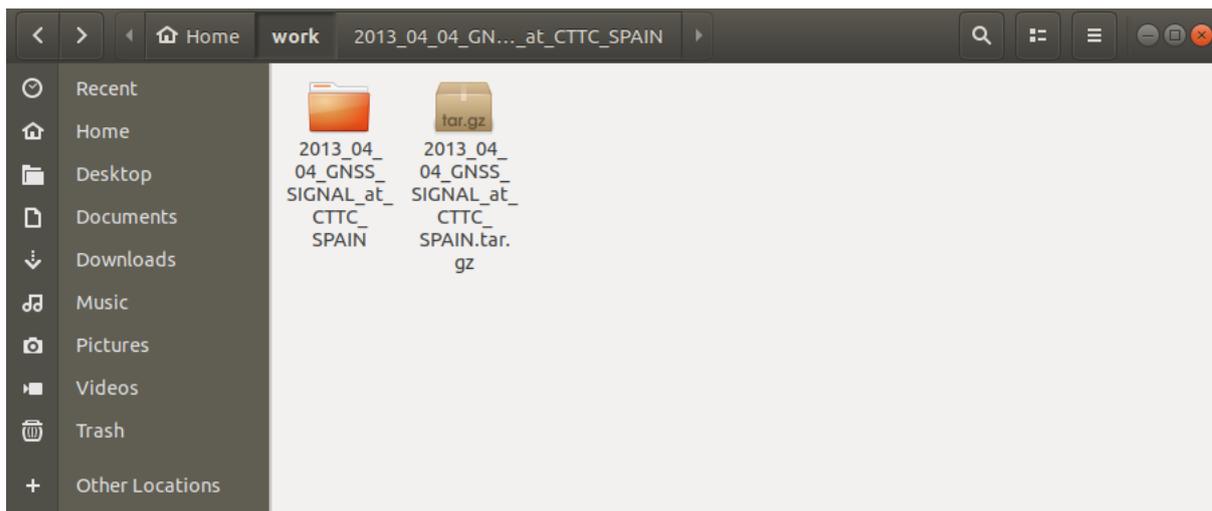
Criado o diretório **work** e baixados os arquivos:

```
$ mkdir work
```

```
$ cd work
```

```
$ wget https://sourceforge.net/projects/gnss-
sdr/files/data/2013_04_04_GNSS_SIGNAL_at_CTTC_SPAIN.tar.gz
```

```
$ tar -zxvf 2013_04_04_GNSS_SIGNAL_at_CTTC_SPAIN.tar.gz
```



Agora temos o arquivo 2013\_04\_04\_GNSS\_SIGNAL\_at\_CTTC\_SPAIN.dat, (entre outros arquivos) que contém 100 segundos de sinal bruto de GNSS coletado por um equipamento em 1575.42.MHz com banda de 4 Ms/s em 16-bits interleaved.

Para facilitar, todos os arquivos e o diretório foram renomeados para “GNSSsample.nnn”.

No mesmo diretório foi criado o arquivo teste.conf contendo o seguinte:

```
[GNSS-SDR]
;##### GLOBAL OPTIONS #####
GNSS-SDR.internal_fs_sps=2000000
;##### SIGNAL_SOURCE CONFIG #####
SignalSource.implementation=File_Signal_Source
```

```
SignalSource.filename=/home/labgeo/work/GNSSsample/GNSSsample.dat
SignalSource.item_type=ishort
SignalSource.sampling_frequency=4000000
SignalSource.freq=1575420000
SignalSource.samples=0
;##### SIGNAL_CONDITIONER CONFIG #####
SignalConditioner.implementation=Signal_Conditioner
DataTypeAdapter.implementation=Ishort_To_Complex
InputFilter.implementation=Pass_Through
InputFilter.item_type=gr_complex
Resampler.implementation=Direct_Resampler
Resampler.sample_freq_in=4000000
Resampler.sample_freq_out=2000000
Resampler.item_type=gr_complex
;##### CHANNELS GLOBAL CONFIG #####
Channels_1C.count=8
Channels.in_acquisition=1
Channel.signal=1C
;##### ACQUISITION GLOBAL CONFIG #####
Acquisition_1C.implementation=GPS_L1_CA_PCPS_Acquisition
Acquisition_1C.item_type=gr_complex
Acquisition_1C.threshold=0.008
Acquisition_1C.doppler_max=10000
Acquisition_1C.doppler_step=250
;##### TRACKING GLOBAL CONFIG #####
Tracking_1C.implementation=GPS_L1_CA_DLL_PLL_Tracking
Tracking_1C.item_type=gr_complex
Tracking_1C.pll_bw_hz=40.0;
Tracking_1C.dll_bw_hz=4.0;
;##### TELEMETRY DECODER GPS CONFIG #####
```

```
TelemetryDecoder_1C.implementation=GPS_L1_CA_Telemetry_Decoder
;##### OBSERVABLES CONFIG #####
Observables.implementation=Hybrid_Observables
;##### PVT CONFIG #####
PVT.implementation=RTKLIB_PVT
PVT.positioning_mode=Single
PVT.output_rate_ms=100
PVT.display_rate_ms=500
PVT.iono_model=Broadcast
PVT.trop_model=Saastamoinen
PVT.flag_rtcn_server=true
PVT.flag_rtcn_tty_port=false
PVT.rtcn_dump_devname=/dev/pts/1
PVT.rtcn_tcp_port=2101
PVT.rtcn_MT1019_rate_ms=5000
PVT.rtcn_MT1077_rate_ms=1000
PVT.rinex_version=2
```

Este arquivo contém toda a parametrização de cada um dos blocos do GNSS-SDR, configurando a fonte de sinal (o arquivo .DAT) e outros parâmetros que podem ser ajustados conforme a necessidade. O exemplo acima serviu para a execução do processamento de sinal:

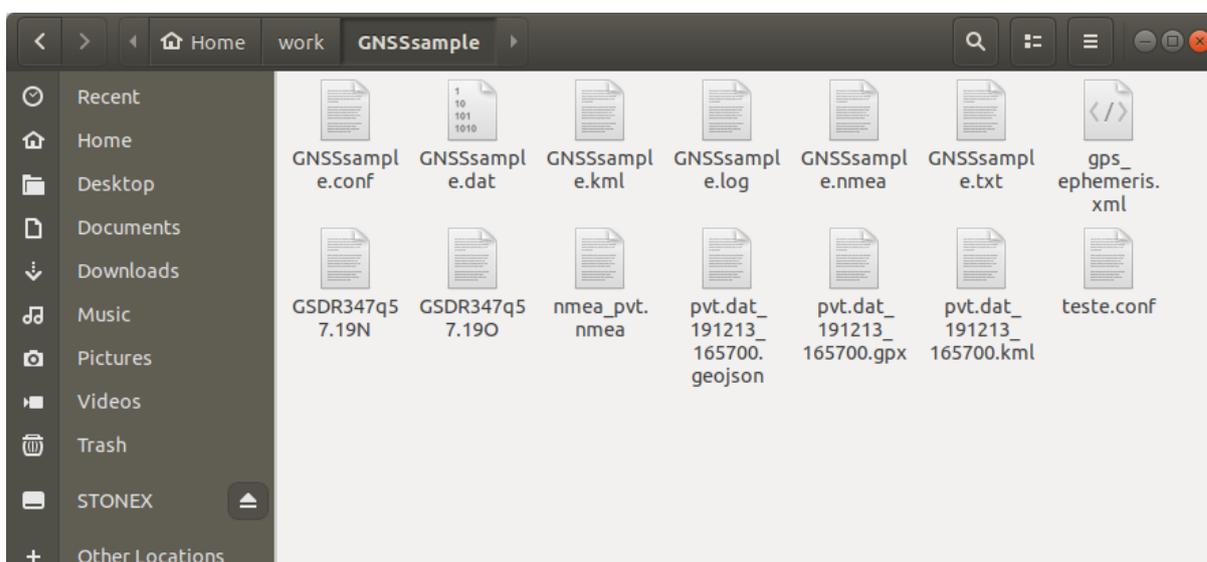
```
$ gnss-sdr --config_file=./teste.conf
```

```

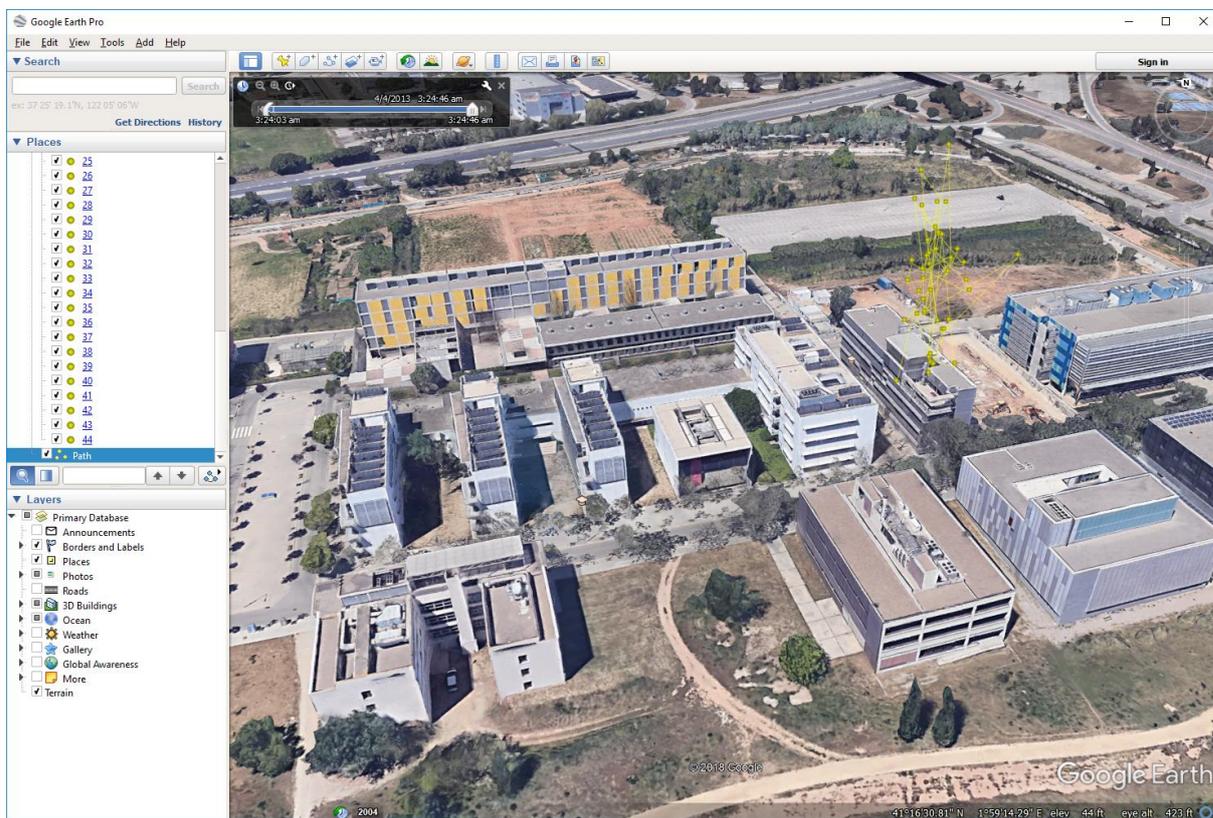
labgeo@station2: ~/work/GNSSsample
File Edit View Search Terminal Help
Position at 2013-Apr-04 06:24:43.000000 UTC using 5 observations is Lat = 41.27
4857734 [deg], Long = 1.987743901 [deg], Height = 76.297 [m]
Position at 2013-Apr-04 06:24:43.500000 UTC using 5 observations is Lat = 41.27
4778546 [deg], Long = 1.987659576 [deg], Height = 72.377 [m]
Current receiver time: 1 min 38 s
New GPS NAV message received in channel 6: subframe 5 from satellite GPS PRN 20
(Block IIR)
New GPS NAV message received in channel 0: subframe 5 from satellite GPS PRN 01
(Block IIF)
New GPS NAV message received in channel 1: subframe 5 from satellite GPS PRN 32
(Block IIF)
New GPS NAV message received in channel 5: subframe 5 from satellite GPS PRN 17
(Block IIR-M)
New GPS NAV message received in channel 3: subframe 5 from satellite GPS PRN 11
(Block IIR)
Position at 2013-Apr-04 06:24:44.000000 UTC using 5 observations is Lat = 41.27
4884930 [deg], Long = 1.987682202 [deg], Height = 76.151 [m]
Position at 2013-Apr-04 06:24:44.500000 UTC using 5 observations is Lat = 41.27
4815865 [deg], Long = 1.987669671 [deg], Height = 90.935 [m]
Current receiver time: 1 min 39 s
Position at 2013-Apr-04 06:24:45.000000 UTC using 5 observations is Lat = 41.27
4874625 [deg], Long = 1.987672968 [deg], Height = 70.639 [m]
Position at 2013-Apr-04 06:24:45.500000 UTC using 5 observations is Lat = 41.27
4849383 [deg], Long = 1.987682013 [deg], Height = 79.762 [m]
Current receiver time: 1 min 40 s
Position at 2013-Apr-04 06:24:46.000000 UTC using 5 observations is Lat = 41.27
4846803 [deg], Long = 1.987644045 [deg], Height = 55.565 [m]
Position at 2013-Apr-04 06:24:46.500000 UTC using 5 observations is Lat = 41.27
4859482 [deg], Long = 1.987637190 [deg], Height = 66.811 [m]
Stopping GNSS-SDR, please wait!
Stopping TCP/IP server on port 2101
Total GNSS-SDR run time: 10.831221 [seconds]
GNSS-SDR program ended.
labgeo@station2:~/work/GNSSsample$

```

Ao final, o diretório mostrou os resultados em alguns arquivos:



Como teste final o arquivo pvt\_dat\_191213\_165700.klm foi aberto no software Google Maps, que nos leva ao Baix Llobregat Campus, um dos Campus da Universidade de Tecnologia da Catalonia (Espanha).



É possível notar linhas em amarelo mostrando o caminho feito pelo equipamento de leitura. Esses dados ainda precisariam passar por processos de correção e geolocalização.

## APÊNDICE F – PREPARO DOS NOTEBOOKS DAS ESTAÇÕES

Este apêndice descreve os passos para se preparar o ambiente operacional ideal para as provas de conceito. Nesses preparativos o hard disk é formatado para se eliminar sistemas operacionais anteriores

- Linux Ubuntu Versão 18
- GNU Radio Versão 3.7. Testamos a instalação pelo comando APT e via GIT (compilando)
- UHD compilado e instalado em sua versão mais recente, incluindo dependências, conforme instruções do site da Ettus/NI

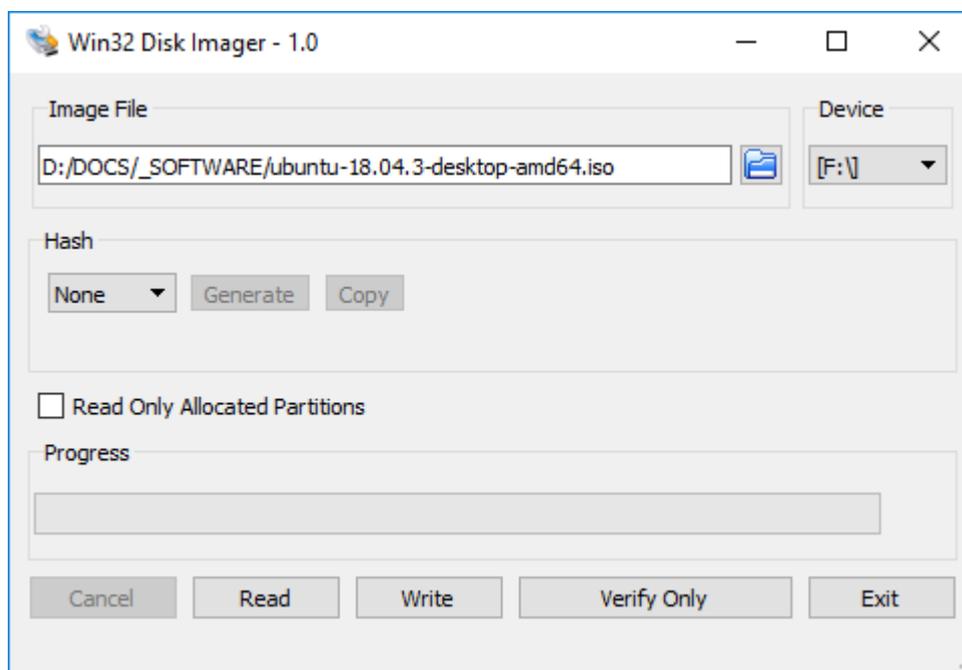
### Preparando o *pen drive* de instalação – *disk image*

Baixar a imagem .ISO do UBUNTU versão 18.04.3 LTS em: <https://ubuntu.com/download/desktop/thank-you?version=18.04.3&architecture=amd64>

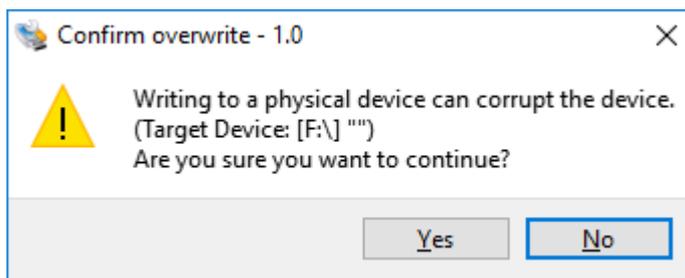
Em um PC com Windows 10 instalado, baixar o programa Win32 Disk Imager em <https://sourceforge.net/projects/win32diskimager/files/latest/download> e instalar.

Insira um *pen drive* com pelo menos 8 GB de espaço.

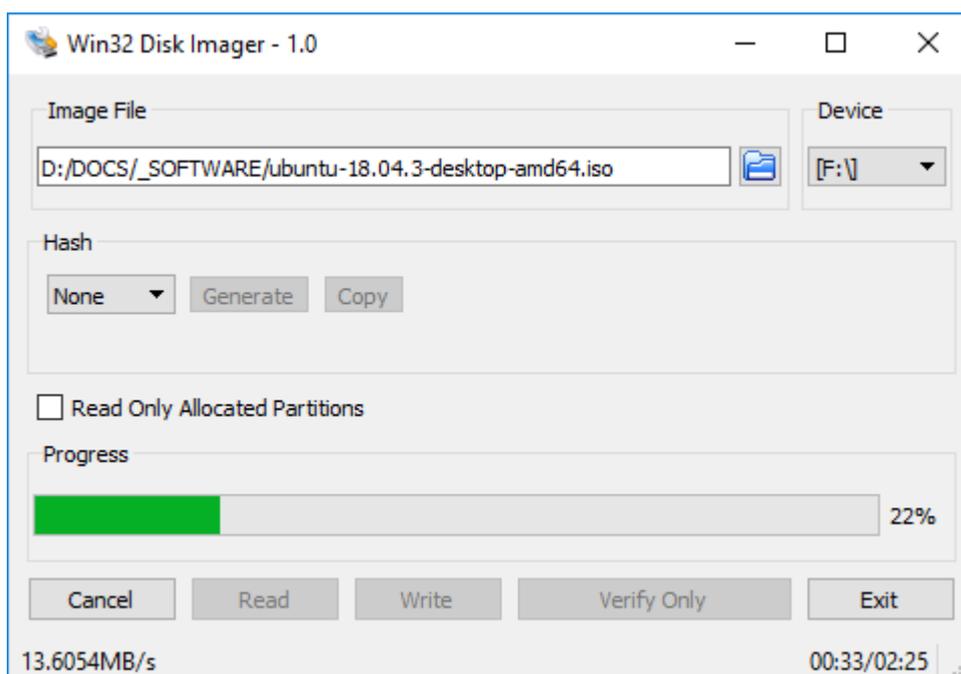
Selecionar na primeira tela o arquivo .ISO baixado (*Image File*) e o seu *pen drive* como dispositivo de destino (*Device*).



Clique no botão Write para abrir a tela de confirmação.



Clique em Yes para iniciar a gravação. Acompanhe na barra verde (Progress)



## Instalação do Ubuntu

Ligue o computador (se for notebook, conecte o carregador de bateria). Configure a BIOS do computador da estação<sup>6</sup> para permitir BOOT por USB e coloque o dispositivo USB como boot primário. Insira o pen drive e reinicie

Siga a instalação do UBUNTU usando as seguintes opções:

a. **Language:**

---

<sup>6</sup> Embora as funcionalidades sejam similares, a forma de acesso à BIOS e seus respectivos menus variam bastante entre computadores e fabricantes. Consulte previamente o manual do seu computador.

English

b. **Keyboard Layout:**

Portuguese (Brazil) -> responde para os teclados ABNT2

c. **Wireless:**

Se o acesso só necessitar a senha do roteador wireless, configure aqui. Mas se for necessária a autenticação (normalmente via página web), mantenha selecionada a opção *default (I don't want to connect to a wi-fi network right now)* e clique em **Continue** (essa configuração será feita após o término da instalação)

d. **Updates and other software:**

a. Mantenha a opção default (**Normal Installation**) e clique em **Continue**

e. **Installation Type:**

Vamos fazer uma instalação limpa, sem vestígios de outras instalações ou dados. Confira mais uma vez se é necessário fazer um backup do computador e escolha a opção *Erase disk and install Ubuntu*. Clique em **Install Now** para abrir a tela de confirmação e clique em **Continue**.

f. **Where are you?:**

Selecione o fuso horário escrevendo "sao paulo" (sem maiúsculas e acentos) na área de texto. O programa instalador vai completar automaticamente o nome da cidade e ajustar o fuso selecionado no mapa. Clique em **Continue**.

g. **Who are you?:**

- *Your name:* labgeo
- *Computer's name:* stationX, onde X é o número da estação.
- *Chose a password:* o padrão no laboratório é "labgeo". Repita no campo seguinte.
- Selecione **Login automatically** e clique em **Continue**

A instalação vai levar alguns minutos. Ao terminar, remova o *pen drive* e clique em **Restart Now**.

Uma vez completado o *boot*, verifique a conexão com a rede para atualizar os pacotes do sistema. Abra uma janela de terminal e digite os seguintes comandos do Linux:

```
sudo dpkg --configure -a
```

(repara pacotes com erro ou com configuração incompleta)

```
sudo apt update
```

(atualiza a lista de pacotes disponíveis)

```
sudo apt full-upgrade
```

(atualiza o sistema e a distribuição)

```
sudo apt autoremove
```

(remove pacotes não utilizados)

```
sudo apt-get autoclean
```

(apaga arquivos antigos baixados)

**Na janela de terminal, digite:**

```
sudo apt install -y --no-install-recommends gnome-panel
```

(instala o gnome-panel)

```
sudo apt install python-pip
```

(instala o pip, para gerenciamento de pacotes do Python)

```
pip install scipy
```

(instala as bibliotecas *scipy* e *numpy* do Python)

```
sudo apt install gnuradio
```

(instala o gnuradio)

## **GNUradio a partir de build**

Para instalar as dependências do GNURadio, digite no terminal:

```
sudo apt install git cmake g++ libboost-all-dev libgmp-dev swig python3-numpy
python3-mako python3-sphinx python3-lxml doxygen libfftw3-dev libcomedi-dev
libsdl1.2-dev libgsl-dev libqwt-qt5-dev libqt5opengl5-dev python3-pyqt5
liblog4cpp5-dev libzmq3-dev python3-yaml python3-click python3-click-plugins
python3-zmq libusb-1.0-0-dev doxygen python3-docutils python3-setuptools
build-essential liborc-0.4-dev
```

## GNUradio a partir do fonte (GIT)

**IMPORTANTE:** Escolha um diretório como ponto de partida. GNURadio será um subdiretório deste diretório.

Segundo as instruções do site GNUradio:

```
git clone --recursive https://github.com/gnuradio/gnuradio.git
cd gnuradio
git checkout maint-3.7 # change `maint-3.7` mkdir build
cd build
cmake -DCMAKE_BUILD_TYPE=Release -DPYTHON_EXECUTABLE=/usr/bin/python3 ../
make
make test
sudo make install
sudo ldconfig
```

## Instalação do UHD

```
git clone --recursive http://github.com/EttusResearch/uhd.git
```

Este comando vai criar um diretório /uhd sob o diretório /home/<user>. Acesse a pasta /host deste diretório:

```
cd /uhd/host
```

Digite:

```
sudo mkdir build
cd build
sudo cmake ../
sudo make
sudo make test
sudo make install
sudo ldconfig
```

Verifique, a cada comando, se não ocorreram erros por falta de algum módulo.

## Instalação do GNSS-SDR

A forma mais simples de se instalar o GNSS-SDR é digitar:

```
sudo apt-get install gnss-sdr
```

Optamos por instalar através do fonte para termos o pacote completo e a mais recente versão.

Primeiro passo, instalar as dependências:

```
sudo apt-get install build-essential cmake git pkg-config libboost-dev  
libboost-date-time-dev libboost-system-dev libboost-filesystem-dev  
libboost-thread-dev libboost-chrono-dev libboost-serialization-dev  
libboost-program-options-dev libboost-test-dev liblog4cpp5-dev libuhd-dev  
gnuradio-dev gr-osmosdr libblas-dev liblapack-dev libarmadillo-dev  
libgflags-dev libgoogle-glog-dev libhdf5-dev libgnutls-openssl-dev  
libmatio-dev libpugixml-dev libpcap-dev libprotobuf-dev protobuf-compiler  
libgtest-dev googletest python3-mako python3-six
```

Uma vez instaladas as dependências, é necessário clonar o diretório do GIT, compilar (*build*) e instalar:

```
git clone https://github.com/gnss-sdr/gnss-sdr  
  
cd gnss-sdr/build  
  
git checkout next  
  
cmake ..  
  
make  
  
sudo make install
```