

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE

CENTRO DE RÁDIO ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA MACKENZIE - CRAAM

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS E APLICAÇÕES GEOESPACIAIS (PPGCAGE)**

FRANCISCO ALBERTO GORI FULLER

**DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA REALIZAR
PROVAS DE CONCEITO DO SISTEMA GEOLOCAL**

**SÃO PAULO
2021**

Francisco Alberto Gori Fuller

**DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA
REALIZAR PROVAS DE CONCEITO DO SISTEMA GEOLOCAL**

2021

FRANCISCO ALBERTO GORI FULLER

**DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA REALIZAR
PROVAS DE CONCEITO DO SISTEMA GEOLOCAL**

Dissertação apresentada à Universidade
Presbiteriana Mackenzie como requisito
parcial para obtenção do título de Mestre
em Ciências e Aplicações Geoespaciais

ORIENTADOR: Prof. Dr. Sergio Vicente Denser Pamboukian

**SÃO PAULO
2021**

F965d Fuller, Francisco Alberto Gori
Desenvolvimento de instrumentação para realizar provas de
conceito do sistema GEOLocal / Francisco Alberto Gori
Fuller.
132 f. : il. color. ; 30 cm
Bibliografia: p. 126-132

Dissertação (Programa de Pós Graduação em Ciências e
Aplicações Geoespaciais) - Universidade Presbiteriana
Mackenzie , São Paulo , 2021.
Orientador: Prof. Dr. Sergio Vicente Denser Pamboukian

1. Geolocal 2. GNSS 3. CRAAM 4. SDR 5. Sistemas de
navegação 6. Georeferenciamento I. Pamboukian, Sergio
Vicente Denser Orientador. II. Título.

CDD 526.6

FRANCISCO ALBERTO GORI FULLER

**DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA REALIZAR
PROVAS DE CONCEITO DO SISTEMA GEOLOCAL**

Dissertação apresentada à Universidade
Presbiteriana Mackenzie como requisito
parcial para obtenção do título de Mestre
em Ciências e Aplicações Geoespaciais

Aprovado em 09 de abril de 2021

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Sergio Vicente Denser Pamboukian
Universidade Presbiteriana Mackenzie



Prof. Dr. Jean-Pierre Raulin
Universidade Presbiteriana Mackenzie



Prof. Dr. Pedro Levit Kaufmann
Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP)

Folha de Identificação da Agência de Financiamento

Autor: Francisco Alberto Gori Fuller

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências e Aplicações Geoespaciais

Título do Trabalho: Desenvolvimento de Instrumentação para Realizar Provas de Conceito do Sistema GEOLocal

O presente trabalho foi realizado com o apoio de:

- CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
- CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
- FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
- Instituto Presbiteriano Mackenzie/Isenção integral Mensalidades e Taxas
- MACKPESQUISA - Fundo Mackenzie de Pesquisa
- Empresa/Indústria:
- Outro:

À minha amiga
Marilena Pamboukian
(*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, fonte de toda sabedoria, sempre ao nosso lado durante nossa existência, pela força e pela coragem concedida.

À minha família, eterna motivação de todas as minhas empreitadas. Sem vocês eu não teria chegado aqui.

A Ana, pelo inestimável apoio em toda esta jornada.

Ao meu orientador, Sergio Pamboukian, que me apresentou o GEOLocal e propôs darmos continuidade às pesquisas. Durante incontáveis horas ouviu minhas divagações e pacientemente me manteve dentro dos objetivos deste trabalho.

Aos meus queridos mestres Adriana, Emília, Botti, Jean-Pierre e Cristiano.

E, finalmente, ao Fundo Mackenzie de Pesquisa (MackPesquisa), cujo investimento permitiu a aquisição de material para montagem de um laboratório e a construção dos protótipos. Sem esse apoio, a parte prática deste trabalho não seria possível.

“Around here, however, we don't look backwards for very long. We keep moving forward, opening up new doors and doing new things, because we're curious... and curiosity keeps leading us down new paths.”

Walt Disney

RESUMO

Conhecer o posicionamento geográfico faz parte de nosso cotidiano através de celulares e outros dispositivos. Atualmente alguns países (ou continentes) desenvolveram seus próprios sistemas baseados em satélites (GNSS – *Global Network Satellite System*) como o GPS americano, GLONASS russo, BAIDOU chinês, GALILEO europeu. O GEOLOCAL, proposto em 1996 pelo Prof. Dr. Pierre Kaufmann, propõe uma forma alternativa de geolocalização, versátil e independente de satélites, podendo trabalhar de forma independente ou em conjunto com sistemas já existentes. É fundamentada em estações em terra e *transponders* (repetidoras) em pontos elevados (torres, balões, drones, aviões, satélites). O atual desenvolvimento desta pesquisa já demonstrou, através de diversos artigos, patentes e simulações, sua viabilidade teórica, chegando o momento de se desenvolver a instrumentação para uma prova de conceito prático. O objetivo deste trabalho é analisar e determinar as premissas e requisitos do GEOLOCAL e propor as adequações necessárias para se projetar e construir o hardware e o software que serão utilizados nos experimentos de campo e provas de conceito. Foram realizados estudos sobre as propostas originais do GEOLOCAL, os sistemas de navegação existentes e as tecnologias envolvidas. Questões em aberto como frequências, atrasos e sincronismo foram analisadas sob o ponto de vista de engenharia. Dentre os principais resultados há propostas para determinar ou contornar a questão de latência e atrasos de propagação, bem como um algoritmo para sincronismo inicial dos equipamentos. Ao final um protótipo de estação utilizando tecnologia SDR (*Software Defined Radio*) é apresentado.

Palavras chave: GEOLOCAL, GNSS, CRAAM, SDR, SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO, GEOREFERENCIAMENTO

ABSTRACT

Knowing geographic positioning is part of our daily lives through mobile phones and other devices. Currently, some countries (or continents) have developed their own satellite-based systems (GNSS – Global Network Satellite System) such as American GPS, Russian GLONASS, Chinese BAIDOU, European GALILEO. GEOLOCAL, proposed in 1996 by Prof. Dr. Pierre Kaufmann, proposes an alternative form of geolocation, versatile and independent of satellites, being able to work on its own or in conjunction with existing systems. It is based on ground stations and transponders (repeaters) at high points (towers, balloons, drones, airplanes, satellites). The current development of this research has already demonstrated, through several articles, patents and simulations, its theoretical feasibility, the time has come to develop instrumentation for a practical proof of concept. The objective of this work is to analyze and determine the premises and requirements of GEOLOCAL and propose the necessary adjustments to design and build the hardware and software that will be used in field experiments and proofs of concept. Studies were conducted on the original GEOLOCAL proposals, existing navigation systems and the technologies involved. Open questions such as frequencies, delays and time were analyzed from the engineering point of view. Key results include proposals to determine or circumvent the issue of latency and propagation delays, as well as an algorithm for the initial time of the equipment. Finally, a station prototype using Software Defined Radio (SDR) technology is presented.

Keywords: GEOLOCAL, GNSS, CRAAM, SDR, NAVIGATIONAL SYSTEMS, GEOREFERENCING

ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Sextante “Bell” Pattern Mark III, de 1920 | 24 |
| Figura 2 - Bússola topográfica Keuffel & Esser CO..... | 25 |
| Figura 3 - Cobertura orbital do sistema BDS-3 chinês e o posicionamento de seus satélites. | 31 |
| Figura 4 - Diagrama do sistema DORIS..... | 32 |
| Figura 5 - Distribuição das estações do sistema DORIS em 2011..... | 33 |
| Figura 6 - Antena DORIS em Cachoeira Paulista, Brasil | 34 |
| Figura 7 - Movimento aparente dos satélites QZSS..... | 35 |
| Figura 8 - Órbitas dos satélites do QZSS e sua projeção sobre a Terra | 35 |
| Figura 9 - Projeção dos sete satélites do sistema indiano NavIC..... | 36 |
| Figura 10 - Representação inicial do sistema GEOLocal com três estações fixas A, B e C, um <i>transponder</i> no espaço R e um alvo em terra P | 39 |
| Figura 11 - Medida de distâncias através da reflexão de ondas. | 44 |
| Figura 12 - O espectro eletromagnético | 46 |
| Figura 13 - Defasagem do sinal entre transmissor e receptor num sistema GNSS .. | 48 |
| Figura 14 - Recepção da fase da Portadora..... | 49 |
| Figura 15 - Exemplos de triangulação (à direita) e trilateração (à esquerda). | 50 |
| Figura 16 – Trilateração com três referências | 51 |
| Figura 17 - Multilateração no espaço | 52 |
| Figura 18 - Geometria de um sistema de localização 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. | 55 |
| Figura 19 - Elipsoide de revolução | 58 |
| Figura 20 - As superfícies associadas à altitude | 59 |
| Figura 21 - Referencial geodésico regional | 60 |
| Figura 22 - Referencial geodésico global | 60 |
| Figura 23 - Acidente em função do uso de referenciais geodésicos distintos em 2001 quando a máquina de perfuração da empreiteira atingiu um gasoduto da Petrobrás, justamente pelos mapas e plantas utilizarem sistemas de referência diferentes..... | 61 |
| Figura 24 - Modulação AM | 63 |
| Figura 25 - Modulação FM | 64 |

| | |
|--|-----|
| Figura 26 - Modulação por fase..... | 64 |
| Figura 27 - Diagrama em blocos de um receptor de rádio. | 65 |
| Figura 28 - Diagrama de um SDR. | 66 |
| Figura 29 - RTL-SDR e seus componentes internos..... | 67 |
| Figura 30 - USRP B200 da Ettus Research. | 68 |
| Figura 31 - GPSDO para o USRP B200 da Ettus Research. | 69 |
| Figura 32 - Raspberry Pi 4. | 69 |
| Figura 33 - Disposição de componentes e conectores do Raspberry Pi. | 70 |
| Figura 34 - Interface gráfica do GNURadio. | 71 |
| Figura 35 - Representação de uma antena YAGI-UDA..... | 74 |
| Figura 36 - Representação da geometria da antena log-periódica..... | 75 |
| Figura 37 – A partir dos gráficos feitos por uma ionossonda, pode-se desenhar a representação das camadas da ionosfera e suas altitudes em condições diurnas e noturnas, versus o EDP (<i>electron density profile</i> , perfil de densidade de elétrons)..... | 77 |
| Figura 38 - Vista interna de um moderno oscilador a cristal. | 79 |
| Figura 39 - O relógio de césio miniaturizado de um CSAC (esquerda) e seu encapsulamento comercial (direita)..... | 80 |
| Figura 40 - Representação do sistema GEOLOCAL com quatro estações (A, B, C e D), quatro <i>transponders</i> (R1, R2, R3 e R4) e um alvo P. | 83 |
| Figura 41 - Fluxograma para o cálculo do tempo de trânsito no <i>transponder</i> , <i>path</i> <i>delays</i> e posição do <i>transponder</i> | 86 |
| Figura 42 - Topologia proposta para o GEOLOCAL..... | 92 |
| Figura 43 - Diagrama em blocos do protótipo proposto | 108 |
| Figura 44 - Detalhe da instrumentação de bancada. Da esquerda para a direita: duas fontes de alimentação 30V/5A, osciloscópio 350 MHz Tektronix, frequencímetro digital e multímetro | 111 |
| Figura 45 - Placa USRP B200 SDR da Ettus Research..... | 111 |
| Figura 46 – O laboratório GEOLOCAL..... | 112 |
| Figura 47 - Uma das estações de trabalho do Laboratório de Geotecnologias usada nas pesquisas | 112 |
| Figura 48 - Projeto em CAD 3D..... | 113 |
| Figura 49 - Protótipos em diversas etapas de montagem | 114 |

| | |
|---|-----|
| Figura 50 - Disposição interna dos elementos. Da esquerda para a direita, a placa USRP, fonte de alimentação chaveada, Raspberry Pi 4 (sob o cooler) e o display com sua placa controladora. | 114 |
| Figura 51 - Flowchart do GNURadio para filtro casado. | 116 |
| Figura 52 - Análise de espectro para o filtro casado da Figura 45. | 117 |
| Figura 53 - As mensagens de processamento de sinal na tela do Linux. | 118 |
| Figura 54 - Arquivos resultantes..... | 119 |
| Figura 55 - Representação gráfica do resultado do processamento das coordenadas processadas pelo software do protótipo | 119 |
| Figura 56 - <i>Flowchart</i> de <i>transponder</i> | 120 |
| Figura 57 - <i>Flowchart</i> de repetidor com fator de correção..... | 121 |

TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Satélites atualmente ativos com o conjunto DORIS | 34 |
| Tabela 2 - Frequências de trabalho dos principais sistemas GNSS..... | 49 |
| Tabela 3 - Espaçamento e altitude ideais para cada plataforma do <i>transponder</i> | 56 |
| Tabela 4 - Acurácia e <i>aging</i> dos principais tipos de bases de tempo..... | 82 |
| Tabela 5 - Equipamentos utilizados e suas justificativas de compra..... | 110 |

ABREVIATURAS

| | |
|---------|--|
| AD | Analógico-Digital |
| AM | <i>Amplitude Modulation</i> , Modulação por Amplitude |
| ANATEL | Agência Nacional de Telecomunicações |
| BER | <i>Bit Error Rate</i> , Taxa de Bits com Erro |
| BIPM | Bureau International des Poids et Mesures, Instituto Internacional de Pesos e Medidas |
| CDMA | <i>Code-Division Multiple Access</i> , Acesso Múltiplo por Divisão de Código |
| CNES | <i>Centre National D'Études Spatiales</i> , Centro Nacional de Estudos Espaciais |
| CRT | <i>Cathodic Ray Tube</i> , Tubo de Raios Catódicos |
| CSAC | <i>Chip Scale Atomic Clock</i> , Relógios Atômicos em Tamanho de Chip |
| DA | Digital-Analógico |
| DARPA | <i>Defense Advanced Research Projects Agency</i> , Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa |
| DORIS | <i>Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite</i> , Orbitografia e Radioposicionamento Doppler Integrado por Satélite |
| ECEF | <i>Earth Centered, Earth Fixed</i> , Origem Fixa no Centro da Terra |
| ESA | <i>European Space Agency</i> , Agência Espacial Europeia |
| EUA | Estados Unidos da América |
| FM | <i>Frequency Modulation</i> , Modulação por Frequência |
| FPGA | Field Programmable Gate Array, Arranjo de Portas Programáveis em Campo |
| GLONASS | <i>Globanaya Navigacionaya Sputnikova</i> , Sistema de Navegação Global por Satélite) |
| GNSS | <i>Global Navigation Satellite System</i> , Sistema de Navegação Global por Satélite |
| GPIO | <i>General Purpose Input/Output</i> , Entrada/Saída de Uso Geral |
| GPS | <i>Global Positioning System</i> , Sistema de Posicionamento Global |
| GPSDO | <i>GPS Disciplined Oscillator</i> , Oscilador Disciplinado ou Sincronizado por sinal de GPS |
| GRGS | <i>Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale</i> , Grupo de Pesquisa de Geodésia Espacial |

| | |
|-----------|--|
| GSA | <i>European GNSS Agency, Agência Europeia de GNSS</i> |
| IDS | <i>International DORIS Service, Serviço Internacional DORIS</i> |
| IGN | <i>Institut Géographique National, Instituto Geográfico Nacional</i> |
| ITRS/ITRF | <i>International Terrestrial Reference System/Frame</i> |
| ITU | <i>International Telecommunications Union, União Internacional de Telecomunicações.</i> |
| LiMH | <i>Lithium-Metal Hydride, Hidreto Metálico de Lítio</i> |
| LORAN | <i>Long-Range Navigation, Navegação de Longo Alcance</i> |
| MEO | <i>Medium Earth Orbit, Órbita Média Terrestre</i> |
| OCCO | <i>Oven Compensated Crystal Oscillator, Oscilador a Cristal Compensado por Forno</i> |
| PDOP | <i>Position Dilution of Precision, Diluição de Precisão por Posicionamento</i> |
| PM | <i>Phase Modulation Modulação por Fase</i> |
| PWM | <i>Pulse Width Modulation, Modulação por Largura de Pulso</i> |
| RADAR | <i>Radio Detection and Ranging, Detecção e medição por rádio</i> |
| RF | Radiofrequência |
| RPA | <i>Remotely-Piloted Aircraft, Aeronave Remotamente Pilotada</i> |
| SBC | <i>Single-Board Computer, Computador de uma única placa</i> |
| SDR | <i>Software-Defined Radio, Rádio Definido por Software</i> |
| TCXO | <i>Temperature-compensated crystal oscillator, Oscilador a Cristal com Compensação por Temperatura</i> |
| TEC | <i>Total Electronic Content , Conteúdo eletrônico Total</i> |
| TOF | <i>Time Of Flight, Tempo De Vôo ou Tempo de Propagação</i> |
| URSS | União das Repúblicas Socialistas Soviéticas |
| USB | <i>Universal Serial Bus, Barramento Serial Universal</i> |
| USRP | <i>Universal Software Radio Peripheral, Periférico de Software Radio Universal</i> |
| VF | <i>Velocity Factor, Fator de Velocidade</i> |
| WGS | <i>World Geodesic System, Sistema Geodésico Mundial</i> |
| WMM | <i>World Magnetic Model, Modelo Magnético Mundial</i> |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 OBJETIVOS | 19 |
| 1.1.1 Objetivo geral | 19 |
| 1.1.2 Objetivos específicos..... | 19 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA | 19 |
| 1.3 METODOLOGIA..... | 20 |
| 1.4 ESTRUTURA..... | 21 |
| 2 NAVEGAÇÃO E POSICIONAMENTO | 22 |
| 2.1 HISTÓRIA | 22 |
| 2.2 INSTRUMENTOS: BÚSSOLA, SEXTANTE E CRONÔMETRO..... | 22 |
| 2.2.1 Instrumentação e métodos primitivos – os polinésios | 22 |
| 2.2.2 O sextante | 23 |
| 2.2.3 A bússola..... | 24 |
| 2.2.4 RADAR | 25 |
| 2.2.5 LORAN | 26 |
| 2.2.6 A era dos satélites | 26 |
| 2.3 SISTEMAS GLOBAIS POR SATÉLITES – OS GNSS | 28 |
| 2.3.1 GPS | 28 |
| 2.3.2 GLONASS | 29 |
| 2.3.3 GALILEO | 29 |
| 2.3.4 BEIDOU | 30 |
| 2.3.5 DORIS | 31 |
| 2.4 SISTEMAS LOCAIS POR SATÉLITES | 34 |
| 2.4.1 QZSS..... | 35 |
| 2.4.2 NAVIC..... | 36 |
| 2.5 SISTEMAS ALTERNATIVOS DE NAVEGAÇÃO..... | 36 |
| 2.6 GEOLOCAL..... | 38 |
| 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 43 |
| 3.1 PRINCÍPIOS DE MEDIÇÃO DE DISTÂNCIAS USANDO ONDAS..... | 43 |
| 3.1.1 Fenômenos ondulatórios | 43 |
| 3.1.2 Ondas eletromagnéticas..... | 45 |
| 3.1.3 Reflexão passiva de ondas de rádio..... | 46 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1.4 Pseudodistância e fase de onda..... | 48 |
| 3.2 MULTILATERAÇÃO, TRILATERAÇÃO E TRIANGULAÇÃO | 50 |
| 3.3 PDOP (POSITION DILUTION OF PRECISION)..... | 53 |
| 3.4 PRINCÍPIOS DA GEODÉSIA | 56 |
| 3.5 RÁDIOS E SDR..... | 62 |
| 3.5.1 RTL-SDR | 66 |
| 3.5.2 USRP..... | 67 |
| 3.5.3 Raspberry Pi..... | 69 |
| 3.5.4 GNURadio | 70 |
| 3.6 ANTENAS | 72 |
| 3.6.1 Antenas Independentes da Frequência..... | 73 |
| 3.6.2 Antena Log-Periódica – Conjunto de Dipolos..... | 73 |
| 3.6.3 Antena omnidirecional | 76 |
| 3.7 FREQUÊNCIAS E PROPAGAÇÃO..... | 76 |
| 3.8 BASES DE TEMPO..... | 78 |
| 3.8.1 Osciladores..... | 79 |
| 3.8.2 Usando o próprio GPS: o GPSDO..... | 81 |
| 3.8.3 Aging, drift e accuracy das bases de tempo | 81 |
| 3.9 O QUE É O GNSS..... | 82 |
| 3.10 FUNDAMENTOS DO GEOLOCAL..... | 83 |
| 3.10.1 Algoritmo de cálculo | 84 |
| 4 ANÁLISE, RESULTADOS E DISCUSSÃO | 88 |
| 4.1 AS PREMISSAS DO GEOLOCAL..... | 88 |
| 4.1.1 GPS invertido | 88 |
| 4.1.2 Os <i>transponders</i> | 88 |
| 4.1.3 O alvo | 89 |
| 4.1.4 O sincronismo de tempo..... | 89 |
| 4.1.5 A comunicação entre as estações..... | 89 |
| 4.1.6 Precisão almejada | 90 |
| 4.1.7 Premissas em aberto..... | 90 |
| 4.2 UMA NOVA IMPLEMENTAÇÃO PARA O GEOLOCAL | 91 |
| 4.2.1 A comunicação entre estações e <i>transponders</i> | 92 |
| 4.2.2 A proposta para os alvos | 93 |
| 4.2.3 Ciclo de trabalho proposto..... | 94 |
| 4.3 A ESCOLHA DAS FREQUÊNCIAS..... | 94 |

| | |
|--|------------|
| 4.4 AS PLATAFORMAS PARA OS <i>TRANSPONDERS</i> | 95 |
| 4.4.1 Torres | 95 |
| 4.4.2 Drones e RPAs..... | 96 |
| 4.4.3 Balão cativo | 97 |
| 4.4.4 Balão meteorológico | 97 |
| 4.4.5 Balão estratosférico | 97 |
| 4.4.6 <i>Cubesats</i> | 97 |
| 4.4.7 Satélites de órbita alta | 98 |
| 4.4.8 Considerações sobre as plataformas | 98 |
| 4.5 ANÁLISE DOS ATRASOS NO SISTEMA | 99 |
| 4.5.1 Atraso de propagação | 100 |
| 4.5.2 Atraso nos cabos e antenas | 101 |
| 4.5.3 Atraso de <i>software</i> | 101 |
| 4.5.4 Atraso de circuito..... | 102 |
| 4.6 A PROPOSTA DE SINCRONISMO DAS ESTAÇÕES..... | 103 |
| 4.6.1 Periodicidade do sincronismo de relógios | 105 |
| 4.7 PROTÓTIPOS | 106 |
| 4.7.1 Hardware | 106 |
| 4.7.2 Software | 109 |
| 4.7.3 Equipamentos..... | 110 |
| 4.7.4 Laboratório | 111 |
| 4.7.5 Gabinete em CAD | 112 |
| 4.7.6 Montagem final do protótipo | 113 |
| 4.8 CONFIGURAÇÃO E TESTES INICIAIS | 114 |
| 4.8.1 Teste do GNURADIO | 115 |
| 4.8.2 Teste de funcionamento da placa USRP | 117 |
| 4.8.3 Uma sugestão de <i>flowchart</i> para teste de transmissão | 120 |
| 5 CONCLUSÕES E PESQUISAS FUTURAS..... | 122 |
| 5.1 PESQUISAS FUTURAS..... | 124 |
| REFERÊNCIAS..... | 126 |

1 INTRODUÇÃO

A civilização se desloca pelo globo terrestre desde seus primórdios, pelas mais variáveis razões: comércio, conhecimento, guerras entre outras. Para deslocar-se corretamente e conseguir chegar a um determinado destino, entretanto, é necessário saber o ponto de origem, ou onde estamos. Houve a confecção de mapas com pontos de referência, a orientação visual por corpos celestes e finalmente os instrumentos como bússola, astrolábio, cronômetro e sextante.

O sistema de coordenadas geográficas de latitude e longitude é creditado a Eratóstenes de Cirene, introduzido no século III AC (ROLLER, 2010). Com ele, foi possível que o desenvolvimento posterior de instrumentos como o astrolábio, o sextante e o oitante que permitiam, através da medição de ângulos entre astros e o horizonte, indicar a latitude. Um bom cronômetro e a posição do Sol nos dá a longitude.

Estes sistemas e instrumentos estiveram em uso até tempos bem recentes, quando, há cerca de 30 anos, gradualmente começou-se a utilizar satélites como referenciamento de posição: os Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS - *Global Navigation Satellite System*). Hoje temos o GPS/NAVSTAR americano, GLONASS russo, GALILEO europeu, BEIDOU chinês, NAVIC hindu e QZSS japonês (MONICO, 2016). Estes sistemas proporcionam, principalmente:

- navegação e geolocalização;
- controle do espaço aéreo e da ocupação do solo;
- topografia e agrimensura;
- aplicações militares e de Segurança Nacional.

Nos anos 90, o Prof. Pierre Kaufmann concebeu o sistema RPS – *Remote Positioning System*, posteriormente rebatizado de GEOLOCAL, com a intenção ambiciosa de se tornar o sistema de navegação brasileiro (KAUFMANN, 1997). Este sistema propõe uma forma alternativa de geolocalização, versátil e independente de satélites, podendo trabalhar de forma independente ou em conjunto com sistemas já existentes. É fundamentada em estações em terra e *transponders* (repetidoras) em pontos elevados (torres, balões, aviões, satélites). O atual estágio desta pesquisa já demonstrou, através de diversos artigos, simulações e estudos, sua viabilidade teórica. Chegou-se ao ponto de desenvolver a instrumentação para uma prova de conceito.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar o GEOLOCAL sob o ponto de vista de engenharia, definir as especificações de equipamentos e fatores de ambiente que serão necessários para os experimentos iniciais e provas de conceito do sistema e desenvolver protótipos.

1.1.2 Objetivos específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- revisar as premissas do GEOLOCAL, estabelecidas nos documentos e patentes;
- analisar a proposta do GEOLOCAL e verificar como ele pode ser implementado na prática;
- definir as especificações técnicas e de projeto para os protótipos;
- analisar as possíveis plataformas aéreas para os *transponders* e suas áreas de cobertura, conforme sua altitude;
- propor soluções para questões em aberto na proposta original, como a comunicação entre estações e alvos com a estação central, os atrasos de hardware e o sincronismo dos relógios;
- elaborar um protótipo para os testes iniciais;
- propor melhorias e pesquisas futuras.

Importante salientar que este trabalho abrange equipamentos e instrumentações para serem usados do solo até a estratosfera. Instrumentação embarcada em satélites será objetivo de pesquisas futuras.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os EUA têm dominado o sistema de navegação no mundo todo desde que o sistema GPS foi implantado, inicialmente para fins militares e, em seguida, também para o uso civil (MACHO, 2018).

Embora originalmente um projeto militar, o GPS é considerado uma tecnologia de uso duplo, o que significa que também tem aplicações civis significativas. Dentre estas aplicações temos navegação terrestre aérea e marítima, controle de máquinas agrícolas, construção, mineração, agrimensura, aerofotografia, mapeamento, automação de portos, sistemas militares e de defesa e aplicações que envolvam precisão de tempo (MACHO, 2018).

O GPS tornou-se uma ferramenta amplamente implantada e útil para comércio, usos científicos, rastreamento e vigilância. O tempo preciso do GPS facilita atividades cotidianas, como operações bancárias, de telefonia móvel e até mesmo o controle de redes de energia, permitindo comutações sincronizadas. Muitas aplicações civis usam um ou mais dos três fundamentos do GPS: localização absoluta, movimento relativo e sincronismo de tempo (US GOVERNMENT, 2019).

Muitas dessas aplicações são importantes e essenciais para a sociedade, envolvendo inclusive soberania nacional. Não é por acaso que países e continentes de grande extensão territorial estão desenvolvendo seus próprios sistemas. O Brasil, apesar de ser a quinta maior extensão territorial, ainda não tem um sistema próprio e somos totalmente dependentes de GPS e GLONASS. O sistema GEOLOCAL se apresenta com uma alternativa para preservar independência e funcionamento de sistemas essenciais do País em situações de indisponibilidade dos serviços dos sistemas russo e americano.

Há extensa pesquisa teórica sobre o GEOLOCAL. Simulações por computador foram realizadas por pesquisadores diferentes demonstrando sua viabilidade. Vários artigos foram publicados, há patentes internacionais e registro de software. A maturidade dos estudos já permite experimentos práticos e provas de conceito, fazendo-se necessário desenvolver a instrumentação adequada.

1.3 METODOLOGIA

Inicialmente propõe-se um estudo teórico do sistema e das tecnologias relacionadas para colocar o GEOLOCAL dentro de um contexto de projeto:

- levantar as características técnicas do sistema GEOLOCAL, sua topologia e área de atuação;
- estudar a tecnologia utilizada em soluções similares, especialmente os GNSS existentes;
- pesquisar sistemas de rádio, frequências disponíveis, propagação, antenas, bases de tempo.

Tendo o suporte teórico, o GEOLOCAL será revisto e adequado ao que há de mais atual em tecnologia. Adaptações no conceito original poderão ser necessárias e serão descritas nesta parte do trabalho.

Por fim, é sugerida uma proposta para o equipamento capaz de realizar as primeiras provas de conceito e dar o suporte inicial às próximas etapas de desenvolvimento do sistema. Um protótipo funcional é apresentado.

1.4 ESTRUTURA

Este trabalho está dividido em cinco capítulos.

O Capítulo 1 introduz o leitor ao tema proposto e suas premissas, justificativa e metodologia utilizada.

O Capítulo 2 disserta sobre os métodos e processos de navegação e posicionamento desde os primórdios da navegação até a era espacial, incluindo a proposta do sistema GEOLOCAL.

O Capítulo 3 descreve os fundamentos e conceitos teóricos necessários para o entendimento deste trabalho, como os fundamentos do rádio e da comunicação digital, a multilateração, métodos de determinação de distâncias por radiocomunicação, descrição das tecnologias e elementos eletrônicos.

O Capítulo 4 revisita o funcionamento proposto para GEOLOCAL, analisando-o sob o ponto de vista de projeto de engenharia. Tipifica problemas encontrados e dificuldades técnicas, sugere soluções e apresenta os resultados, incluindo o protótipo funcional.

E finalmente o Capítulo 5 apresenta as conclusões finais do trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

2 NAVEGAÇÃO E POSICIONAMENTO

A navegação, em seu sentido mais amplo, refere-se a qualquer habilidade, tarefa ou estudo que envolva a determinação de posição e direção. É um campo de estudo que se concentra no processo de monitoramento e controle da movimentação de uma embarcação, veículo ou pessoas de um lugar para outro. Pode ser dividida em quatro categorias gerais: navegação terrestre, navegação marítima, navegação aeronáutica e navegação espacial. Todas as técnicas de navegação envolvem localizar a posição do navegador em relação a locais ou padrões conhecidos (WELLENHOF et al, 2007).

2.1 HISTÓRIA

A navegação tradicional da Polinésia foi usada por milhares de anos para fazer longas viagens por milhares de quilômetros do Oceano Pacífico aberto. Navegadores viajaram para pequenas ilhas habitadas usando técnicas de *wayfinding* (a partir de referências naturais) e este conhecimento era passado pela tradição oral de mestre para aprendiz, muitas vezes na forma de canções. Geralmente, cada ilha mantinha uma guilda de navegadores que tinham *status* muito alto. A partir de 2014, esses métodos tradicionais de navegação ainda são ensinados no anexo polinésio de Taumako, nas ilhas Salomão (GATTI, 1958).

2.2 INSTRUMENTOS: BÚSSOLA, SEXTANTE E CRONÔMETRO

Ao longo da história desenvolveram-se vários métodos e instrumentos para auxiliar na localização e navegação, indo desde as tradições contadas e cantadas para memorização até os modernos sistemas de satélite.

2.2.1 Instrumentação e métodos primitivos – os polinésios

A navegação polinésia utilizou alguns instrumentos de navegação, que antecedem e são distintos das ferramentas metálicas usinadas usadas pelos navegadores europeus (como o sextante, produzido pela primeira vez em 1730; o astrolábio marinho, por volta do final do século XV; e o cronômetro marinho, inventado em 1761). No entanto, eles também se basearam fortemente na observação atenta do mar e em um grande conjunto de conhecimentos da tradição oral. Um dispositivo tradicional para ensinar navegação no Pacífico era uma espécie de gráfico de varas usado em terra nas Ilhas Marshall para servir como

representações espaciais das ilhas e as condições ao seu redor. Estes não foram transportados a bordo e não são conhecidos por terem sido usados por polinésios que usavam dispositivos não físicos, como músicas e histórias para memorizar as propriedades de estrelas, ilhas e rotas de navegação (GATTI, 1958)

As posições das estrelas ajudaram a guiar viagens polinésias. As estrelas, ao contrário dos planetas, mantêm posições celestes fixas durante todo o ano, mudando apenas seu tempo de ascensão com as estações. Cada estrela tem uma declinação específica, e pode dar um suporte para a navegação à medida que sobe ou define. Viajantes polinésios referenciavam uma estrela perto do horizonte, mudando para uma nova quando a anterior estava muito alta no firmamento. Uma sequência específica de estrelas seria memorizada para cada rota. Os polinésios também tomavam medidas de elevação estelar para determinar sua latitude. As latitudes de ilhas específicas também eram conhecidas, e a técnica de "navegar pela latitude" foi usada (Encyclopædia Britannica, 2015).

2.2.2 O sextante

Um sextante é um instrumento de navegação duplamente refletido que mede a distância angular entre dois objetos visíveis (Figura 1). O uso primário de um sextante é medir o ângulo entre um objeto astronômico e o horizonte para fins de navegação celestial. O ângulo, e o tempo em que foi medido, podem ser usados para calcular uma linha de posição em um gráfico náutico ou aeronáutico — por exemplo, avistar o Sol ao meio-dia ou a estrela Polar à noite (no Hemisfério Norte) para estimar a latitude. Avistar a altura de um marco pode dar uma medida de distância e, realizada horizontalmente, um sextante pode medir ângulos entre objetos para uma posição em um gráfico. Um sextante também pode ser usado para medir a distância "lunar", entre a lua e outro objeto celeste (como uma estrela ou planeta), a fim de determinar o Tempo Médio de Greenwich e, portanto, a longitude. O princípio do instrumento foi descrito pela primeira vez por volta de 1731 por John Hadley (1682-1744) e Thomas Godfrey (1704-1749), mas também foi encontrado mais tarde em escritos de Isaac Newton (1643-1727). Em 1922, foi modificado para navegação aeronáutica pelo navegador português e oficial naval Gago Coutinho (Encyclopædia Britannica, 2015 e BOWDITCH, 2002)

Figura 1 – Sextante “Bell” Pattern Mark III, de 1920



Fonte: autoria própria

2.2.3 A bússola

Uma bússola é um tipo de magnetômetro usado para navegação e orientação que mostra direção relativa às direções cardeais geográficas, ou pontos cardeais (Figura 2). Normalmente, um diagrama chamado uma rosa da bússola mostra as direções norte, sul, leste e oeste na face da bússola como iniciais abreviadas. Quando a bússola é usada, a rosa pode ser alinhada com as direções geográficas correspondentes; por exemplo, a marca "N" nos pontos de rosa para o norte. As bússolas frequentemente exibem marcas para ângulos em graus, além (ou às vezes em vez de) a rosa. Norte corresponde a 0° , e os ângulos aumentam no sentido horário, então leste é 90° graus, sul é 180° , e oeste é 270° . Esses números permitem que a bússola mostre azimutes norte magnéticos ou verdadeiros azimutes ou rolamentos do Norte, que são comumente declarados nesta notação. Se a declinação magnética entre o Norte magnético e o Norte verdadeiro no ângulo de latitude e ângulo de longitude é conhecida, então a direção do Norte magnético também dá direção ao Norte verdadeiro. A bússola magnética foi inventada e utilizada como um dispositivo de adivinhação na Dinastia Han chinesa (desde 206 a.C.), e mais tarde adotada para navegação pela Dinastia Song chinesa durante o

século XI. A primeira utilização de uma bússola na Europa Ocidental e no mundo islâmico ocorreu por volta de 1190 (Encyclopædia Britannica, 2015).

Figura 2 - Bússola topográfica Keuffel & Esser CO.



Fonte: autoria própria

2.2.4 RADAR

O RADAR (*RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging, Detecção e Telemetria por Rádio) foi desenvolvido secretamente para uso militar por várias nações no período anterior e durante a Segunda Guerra Mundial e este acrônimo foi criado pela Marinha dos Estados Unidos em 1940. Um desenvolvimento fundamental para o RADAR foi o “*magnetron* da cavidade” pelo Reino Unido, o que permitiu a criação de sistemas relativamente pequenos com grande resolução. Trata-se de um sistema de detecção que usa ondas de rádio para determinar o alcance, ângulo ou velocidade dos objetos. Pode ser usado para detectar aeronaves, navios, espaçonaves, mísseis guiados, veículos motorizados, formações meteorológicas e terrenos. Um sistema de radar consiste em um transmissor produzindo ondas eletromagnéticas no domínio de rádio ou micro-ondas, uma antena transmissora, uma antena receptora (muitas vezes a mesma antena é usada para transmitir e receber) e um receptor e processador para determinar propriedades do objeto. Ondas de rádio (pulsadas ou contínuas) do transmissor refletem o objeto e retornam ao receptor, fornecendo informações sobre a localização e velocidade do objeto (WATSON, 2009).

2.2.5 LORAN

Significa Navegação de Longo Alcance (LORAN, *Long-Range Navigation*). Foi um sistema de navegação de rádio desenvolvido nos Estados Unidos durante a Segunda Guerra Mundial e operava em frequências mais baixas a fim de fornecer um alcance melhorado até 2.400 Km, com uma precisão de dezenas de quilômetros. Foi usado pela primeira vez para comboios de navios que atravessavam o Oceano Atlântico e depois por aeronaves de patrulha de longo alcance, mas encontrou seu principal uso nos navios e aeronaves que operavam no Pacífico durante a Segunda Guerra Mundial. Em sua forma original, era um sistema caro de implementar, exigindo um tubo de raios catódicos (CRT, *Cathodic Ray Tube*). Este uso limitado para os militares e grandes usuários comerciais. Receptores automatizados tornaram-se disponíveis na década de 1950, mas a mesma eletrônica melhorada também abriu a possibilidade de novos sistemas com maior precisão. A Marinha dos EUA começou o desenvolvimento do Loran-B, que oferecia precisão na ordem de algumas dezenas de metros, mas teve problemas técnicos significativos. A Força Aérea dos EUA trabalhou em um conceito diferente, Cyclan, que a Marinha assumiu como Loran-C, que oferecia maior alcance do que LORAN e precisão de centenas de metros. A Guarda Costeira dos EUA assumiu as operações de ambos os sistemas em 1958 (BOWDITCH, 2002).

2.2.6 A era dos satélites

Pela definição, satélite é todo objeto que orbita um planeta. Um satélite natural também é chamado de “lua” (LANG, 2011). A primeira discussão sobre satélites artificiais pode ser atribuída a Sir Isaac Newton, quando em sua *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* - o próprio livro que definiu a física clássica e forneceu a base teórica para viagens espaciais e foguetes - sugeriu o uso de um canhão hipotético para alcançar uma órbita. Sir Isaac Newton usou o seguinte "experimento do pensamento" para explicar o princípio das órbitas ao redor da Terra:

Imagine uma montanha tão alta que seu pico está acima da atmosfera da Terra. Imagine no topo daquela montanha um canhão que dispara horizontalmente. Quanto mais explosivo é usado a cada tiro, maior a velocidade da bala de canhão e o projétil atingirá o solo cada vez mais longe da montanha. Finalmente, a uma certa velocidade, a bala de canhão não atingirá o chão: ela cairá em direção à Terra na mesma proporção que a Terra se curva. Na ausência de arrasto da atmosfera, continuará para sempre em uma órbita ao redor da Terra (NEWTON, 1687).

Em 1903, Tsiolkovsky (Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky, 1857-1935) publicou *Explorando o Espaço Usando Dispositivos de Propulsão a Jato*, que é considerado o primeiro tratado acadêmico sobre o uso de foguetes para lançar naves espaciais. Ele calculou a velocidade orbital necessária para uma órbita mínima e que um foguete multi-estágio, alimentado por propulsores líquidos, poderia conseguir isso. Juntamente com o francês Robert Esnault-Pelterie, o alemão da Hermann Oberth e o americano Robert H. Goddard, Tsiolkovsky é considerado um dos fundadores da astronáutica moderna e “pai” dos foguetes.

Em 1945, um artigo de da revista *Wireless World* assinado pelo inglês de ficção científica Arthur C. Clarke descreveu em detalhes o possível uso de satélites de comunicação para comunicações em massa. Nesse artigo ele sugeriu que três satélites geoestacionários forneceriam cobertura suficiente para todo o planeta (CLARKE, 1945)

Após a Segunda Guerra Mundial, duas potências vencedoras, os Estados Unidos da América (EUA) e a extinta União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), emergiram como dois grandes polos de interesses 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 duas 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 Sputnik 1 (em russo: *Спутник*, Companheiro Viajante ou Satélite). O lançamento do Sputnik 1 marcou o início da corrida espacial entre as duas potências da época, culminando com a chegada do homem à Lua em 1969. O Sputnik 1 emitia um sinal de 20 MHz em sua órbita pela Terra. Esse sinal tinha uma banda de 1 KHz, permitindo analisar o efeito Doppler durante seu deslocamento (aumentava a frequência ao se aproximar e diminuía ao se afastar). Pesquisadores do Laboratório de Física Aplicada Johns Hopkins captaram esses sinais nos instantes em que o satélite surgia num horizonte, desaparecia no horizonte oposto e quando o desvio Doppler mudava de aproximação para afastamento. De posse dessas diferenças de tempo e do desvio foi possível determinar-se as características da órbita do satélite. E concluíram que seria possível fazer o inverso, ou seja,

determinar a posição de um receptor em solo conhecendo a órbita do satélite (DORIS, 2020; WEIFFENBACH, 1998).

Nesta mesma época, a Marinha Americana buscava soluções para determinar a posição de submarinos e patrocinou o sistema Transit, com seu primeiro satélite lançado em 1960 e até 1963 o sistema estava completo, contando com seis satélites em órbita circular próxima à polar, a 1100 Km de altitude. Neste mesmo ano também foi colocado em órbita o primeiro satélite geoestacionário (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 1997).

2.3 SISTEMAS GLOBAIS POR SATÉLITES – OS GNSS

Usa-se a sigla GNSS (*Global Navigation Satellite System*, Sistema Global de Navegação por Satélite) de uma forma generalizada para todo sistema de navegação que integra satélites orbitando o planeta e permite uma cobertura global. Atualmente temos quatro GNSS em operação: o GPS (*Global Positioning System*, Sistema de Posicionamento Global) americano, o GLONASS (*Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*, Sistema Global de Navegação por Satélites) russo, o GALILEO europeu e o BDS (*BeiDou Navigation Satellite System*, Sistema de navegação por Satélites BeiDou) chinês (MONICO, 2008).

Todos esses sistemas permitem um número ilimitado de usuários por serem unidirecionais (os usuários apenas recebem os sinais, sem transmitir de volta) (ISRO, 2020).

2.3.1 GPS

O número de satélites do sistema Transit era insuficiente para proporcionar uma boa acurácia e bom tempo de resposta: era necessário aguardar cerca de 90 minutos pela passagem do satélite e o usuário acabava por fazer interpolações. Ficou em uso até 1996 e finalmente foi substituído pelo sistema NAVISTAR/GPS (iniciado em 1995), inicialmente de uso exclusivamente militar e desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos EUA (KAPLAN, 1996). Enquanto o Transit utilizava o desvio Doppler para determinar a posição de um receptor em Terra, o GPS utiliza o método de multilateração, a partir de pelo menos quatro satélites em órbita, medindo o tempo de percurso do sinal entre cada satélite e o receptor para calcular a pseudodistância 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, AMBROSIUS, *et al.*, 1987).

Os satélites da constelação GPS estão localizados na órbita terrestre média¹ a 20200 km da superfície. Seus 24 satélites distribuem-se em seis planos orbitais com quatro satélites cada, igualmente espaçados, a 55° de inclinação em relação ao plano equatorial, o que confere uma melhor acurácia em latitudes médias e baixas. Suas órbitas têm excentricidade de 0,02 (praticamente circular) e período de 11h58m (EL-RABBANY, 2002; DALY, 1996). A configuração do GPS foi desenhada para que o equipamento do usuário tenha pelo menos quatro satélites eletronicamente acessíveis a qualquer momento em qualquer lugar da Terra (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 1997)

2.3.2 GLONASS

Os satélites GLONASS também estão localizados na órbita terrestre média a 19100 km da superfície da Terra, com excentricidade inferior a 0,02 (órbitas praticamente circulares) e período orbital de 11 horas e 15 minutos. São 24 satélites em três planos orbitais, com oito satélites cada e órbitas a 65 graus de inclinação proporcionando mais acurácia em latitudes altas que o GPS (EL-RABBANY, 2002).

Segundo Vallejo et al (2014) e Macho (2018), os sistemas GPS e GLONASS podem ser combinados quando há uma operação mais crítica como, por exemplo, a aproximação de um navio petroleiro a uma plataforma ou uma medição topográfica. Com um maior número de satélites visíveis e uma geometria mais favorável, as estimativas de posição obtidas são mais precisas.

2.3.3 GALILEO

Galileo é um GNSS que entrou em operação em 2016, criado pela União Europeia através da ESA (*European Space Agency*, Agência Espacial Europeia), operado pela GSA (*European GNSS Agency*, Agência Europeia de GNSS), com sede em Praga, República Tcheca. Possui dois centros de operações em Fucino, Itália, e Oberpfaffenhofen, Alemanha. O projeto, originalmente orçado em 10 bilhões de euros, tem esse nome em homenagem ao astrônomo italiano Galileu Galilei. Um dos objetivos da Galileo é fornecer um sistema de posicionamento independente de alta precisão para que as nações europeias não precisem contar com o GPS dos

¹ MEO (*Medium Earth Orbit*, Órbita Terrestre Média) é a sigla atribuída à faixa orbital entre 2000 km e 36000 km da superfície da Terra (EL-RABBANY, 2002; DALY, 1996)

EUA, ou os sistemas GLONASS russos, que podem ser desativados ou degradados por seus operadores a qualquer momento. O uso de serviços básicos (de baixa precisão) da Galileo é gratuito e aberto a todos. Os recursos de maior precisão estão disponíveis para usuários comerciais pagos. A Galileo destina-se a fornecer medições de posição horizontal e vertical dentro de 1 metro de precisão, e melhores serviços de posicionamento em latitudes mais altas do que outros sistemas de posicionamento. O primeiro satélite de teste, o GIOVE-A, foi lançado em 28 de dezembro de 2005, e o primeiro satélite operacional foi lançado em 21 de outubro de 2011. Em julho de 2018, 26 dos 30 satélites ativos planejados (incluindo os de reposição) estavam em órbita. Galileo começou a oferecer serviços iniciais em 15 de dezembro de 2016 e atingiu capacidade plena em 2019. Sua constelação possui 24 satélites ativos e espera-se estar completa em 2021. Após 2025 devem entrar em operação os primeiros satélites da próxima geração, em substituição aos antigos que ficarão disponíveis como *backup*. O sistema Galileo tem uma precisão inferior a um metro (melhor que o GPS que é de três metros) quando se usam as efemérides de transmissão, podendo chegar a 1,6 centímetros usando-se correções de tempo real para os relógios e as órbitas dos satélites (no caso do GPS, 2,3 centímetros) (GSA, 2020).

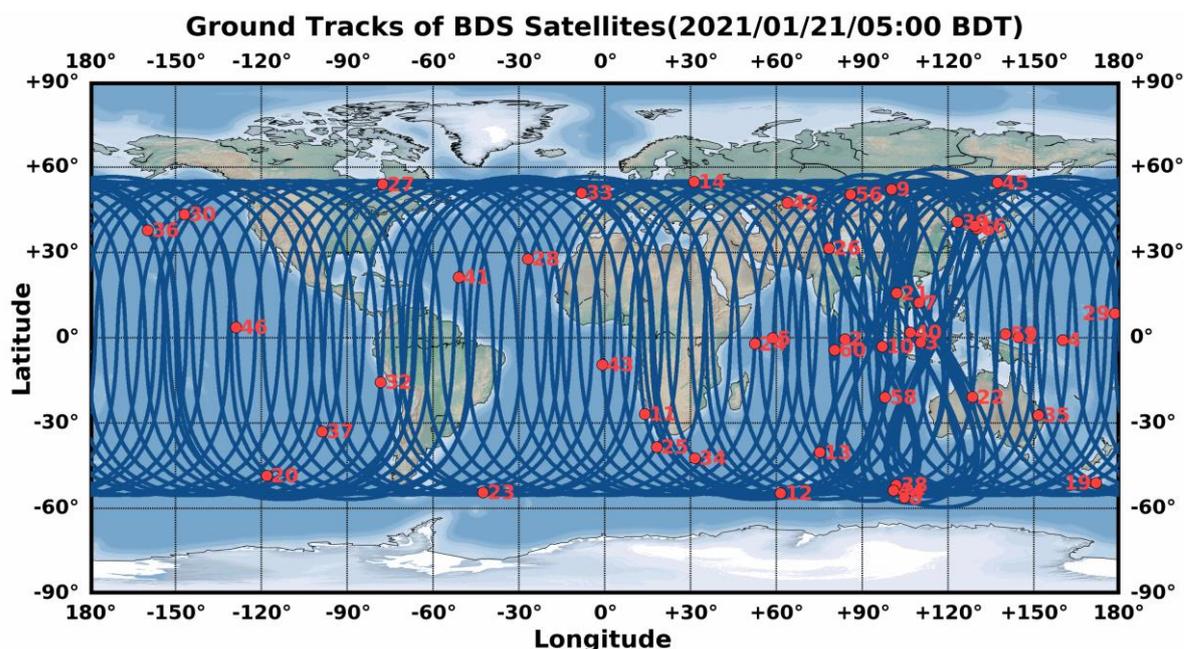
2.3.4 BEIDOU

No final do século XX, a China começou a elaborar um sistema de navegação por satélite, o BDS ou BeiDou. Essa é uma expressão da língua chinesa e refere-se à constelação da “Grande Concha” que no ocidente representa a constelação Ursa Maior. Uma dessas estrelas é *Polaris*, a estrela polar.

A Agência Espacial Chinesa gradualmente formulou uma estratégia de desenvolvimento do sistema em três etapas, aumentando progressivamente a cobertura: o BDS-1, com cobertura da China (2000); o BDS-2, cobrindo Ásia-Pacífico (2012); e o BDS-3, com abrangência mundial (Figura 3). A terceira fase do sistema inclui três satélites geostacionários, três satélites geossíncronos e vinte e quatro satélites em órbita média a 21500 km com inclinação de 55° (XINGXING, 2015), introduzindo as frequências de sinal B1C/B1I/B1A (1575,42 MHz), B2a/B2b (1191.795 MHz), B3I/B3Q/B3A (1268,52 MHz) e BS (2492.028 MHz). Em 23 de junho de 2020, a implantação da constelação BDS-3 foi totalmente concluída depois que o último satélite foi lançado com sucesso no Centro de Lançamento de Satélites

Xichang. A Figura 3 mostra a cobertura orbital e podem-se notar, sobre a China, órbitas em formato de “8” correspondente aos satélites geossíncronos, bem como a posição dos geostacionários. Os satélites BDS-3 também incluem recursos SBAS (B1C, B2a, B1A) e SAR para apoio à navegação aérea (BDS, 2020).

Figura 3 - Cobertura orbital do sistema BDS-3 chinês e o posicionamento de seus satélites.



Fonte: (BDS, 2020)

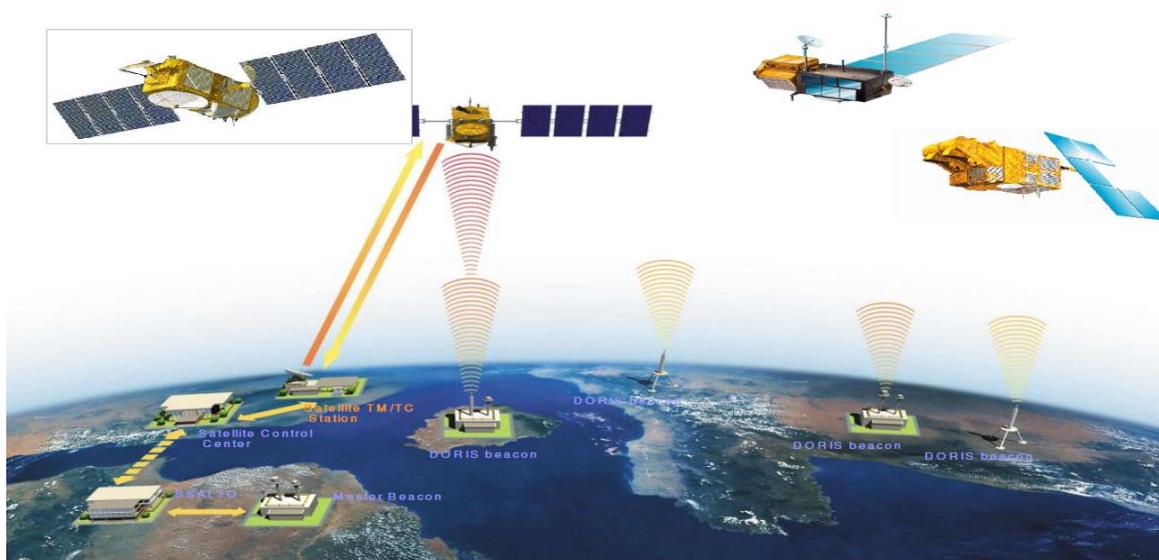
2.3.5 DORIS

DORIS significa Orbitografia e Radioposicionamento Doppler Integrado por Satélite (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*). É um sistema francês, civil, para determinação e posicionamento de órbita. Fundamenta-se no princípio do efeito Doppler², com uma rede de sinalizadores terrestres e um conjunto composto por transmissores e instrumentos a bordo de um satélite (antena, rádio e oscilador ultra estável), como mostrado na Figura 5. O sistema DORIS foi projetado pelo Centro Nacional de Estudos Espaciais (CNES, *Centre National D'Études Spatiales*), a agência espacial francesa, em parceria com o Instituto

² Segundo Giordano (2009) e Halliday et al (2009), efeito Doppler é um fenômeno físico observado nas ondas quando emitidas ou refletidas por um objeto que está em movimento com relação ao observador. Foi-lhe atribuído este nome em homenagem a Christian Andreas Doppler (29/11/1803 – 17/03/1853), matemático e físico de Salzburg (Áustria), que em 1842 estudou e teorizou o princípio onde a frequência observada de uma onda depende da velocidade relativa entre a fonte e o observador. Ele usou este princípio para explicar a variação de cores de estrelas binárias.

Geográfico Nacional (IGN, *Institut Géographique National*) e o Grupo de Pesquisa de Geodésia Espacial (GRGS *Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale*). Desde 2003, o IDS é um serviço internacional que oferece suporte através de dados e produtos da DORIS. As sucessivas missões desde Spot 2 e Topex/Poseidon realmente demonstraram seu desempenho (IDS-DORIS, 2020).

Figura 4 - Diagrama do sistema DORIS



Fonte: IDS-DORIS (2020)

Segundo IDS-Doris (2020), este sistema é composto por:

- uma rede com cerca de cinquenta estações distribuídas pelo mundo de maneira uniforme, todas precisamente GEOLOCALIZADAS e que emitem o sinal DORIS para os satélites (Figura 5);
- um conjunto de satélites que carregam os receptores DORIS. Cada receptor faz medições de orbitografia a partir do sinal emitido pelas estações. As medidas são usadas para calcular a trajetória do satélite;
- um segmento terrestre, responsável pela coleta de dados do DORIS, que utiliza para verificar a condição de todo o sistema (rede de estação, receptores a bordo, segmento terrestre) e desenvolve produtos de saída e altimetria do DORIS.

Tabela 1 - Satélites atualmente ativos com o conjunto DORIS

| Satélite | Lançamento |
|-------------|------------|
| SENTINEL-6A | 2020-11-21 |
| HY-2C | 2020-09-21 |
| SENTINEL-3B | 2018-04-25 |
| SENTINEL-3A | 2016-02-16 |
| JASON-3 | 2016-01-17 |
| SARAL | 2013-02-25 |
| CRYOSAT-2 | 2010-04-08 |

Fonte: IDS-DORIS (2020)

Dentre todas as estações, cabe aqui destacar a do município de Cachoeira Paulista, mantida pelo INPE (Figura 6).

Figura 6 - Antena DORIS em Cachoeira Paulista, Brasil



Fonte: IDS-DORIS (2020)

2.4 SISTEMAS LOCAIS POR SATÉLITES

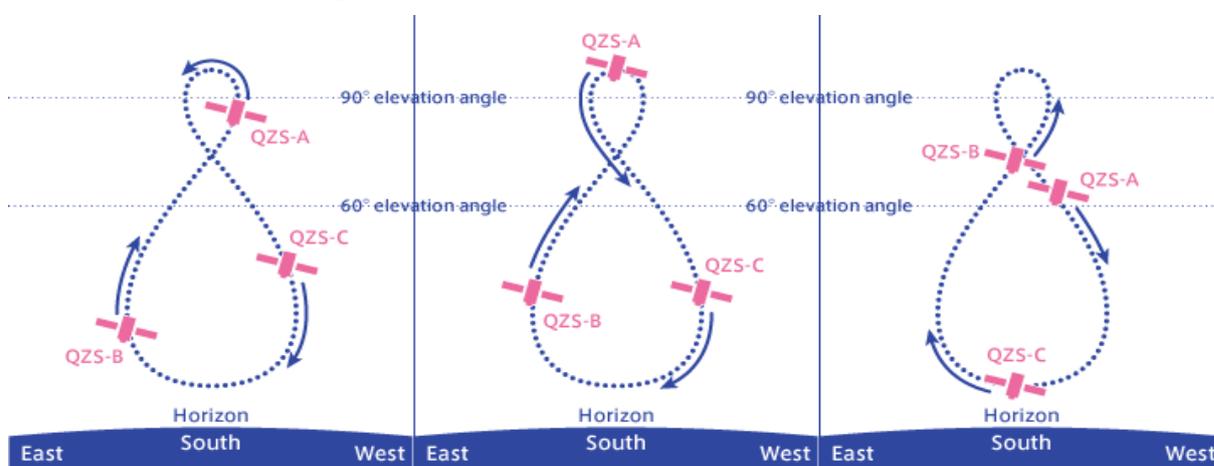
Sistemas locais são aqueles que atendem a uma determinada região da Terra. São considerados “locais” pelas características de cobertura de suas órbitas geossíncronas e geoestacionárias³. Atualmente com estas características há o sistema QZSS japonês e o NavIC indiano.

³ Órbita geossíncrona é uma órbita que ocorre quando seu período corresponde exatamente a um dia sideral da Terra (23h56m4s). Órbita geoestacionária é um caso particular da órbita geossíncrona, quando sua inclinação e excentricidade são iguais a zero, ou seja, perfeitamente circular e no plano do Equador terrestre (BROWN, 1998).

2.4.1 QZSS

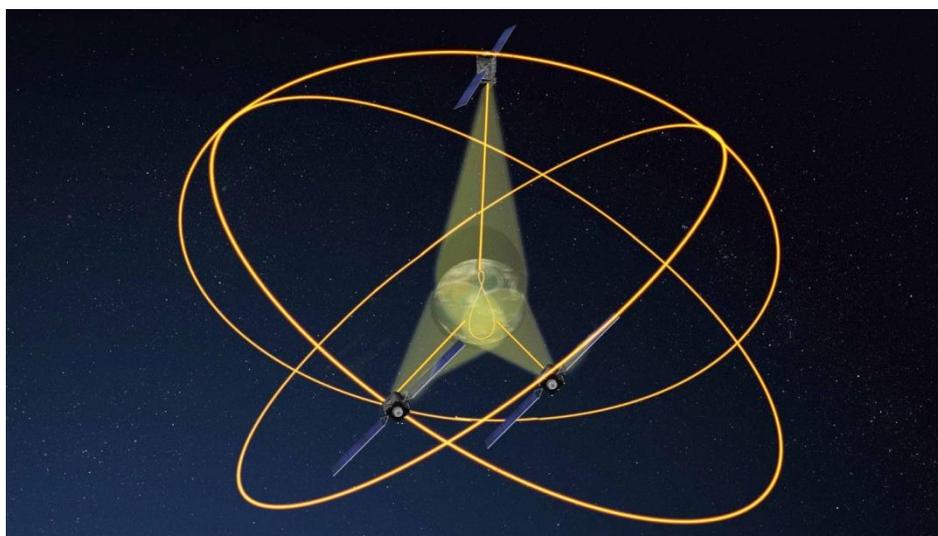
O sistema QZSS (*Quase-Zenith Satellite System*, Sistema de Satélites Próximos ao Zênite) é resultado de uma parceria entre a Agência Espacial Japonesa JAXA e a Mitsubishi Electric. Usa três satélites em órbita elíptica e geossíncrona espaçados a 120° , com inclinação de $43^\circ \pm 4^\circ$ e excentricidade de $0,075 \pm 0,015$ (QZSS, 2020). Essas características orbitais fazem com que eles descrevam um movimento aparente ilustrado na Figura 7 - Movimento aparente dos satélites QZSS..

Figura 7 - Movimento aparente dos satélites QZSS.



Fonte: SPACEFLIGHR101 (2020)

Figura 8 - Órbitas dos satélites do QZSS e sua projeção sobre a Terra



Fonte: JAXA (2020)

A excentricidade torna a figura assimétrica e cada satélite permanece sobre o Japão por oito horas. Sendo geossíncrona, sua elevação é alta, o que aumenta a efetividade em regiões com grande concentração de edifícios (HAMA, TAKAHASHI, *et al.*, 2010).

A Figura 8 ilustra a projeção dessa órbita sobre a superfície da Terra, o que define sua área de cobertura (JAXA, 2010).

2.4.2 NAVIC

O Sistema Indiano de Navegação Regional por Satélite (IRNSS, *Indian Regional Navigation Satellite System* (ISRO, 2020), também conhecido por NavIC, é composto por três satélites geoestacionários e quatro geossíncronos com inclinação de 29° envolvendo a Índia e seu entorno numa região que se estende a 1500 km além de suas fronteiras (Figura 9).

Figura 9 - Projeção dos sete satélites do sistema indiano NavIC.



Fonte: ISRO (2020)

Há planos para aumentar sua área de cobertura com mais quatro satélites. Estes sistemas, em operação para uso militar e civil, permitem obter a localização e navegação praticamente sob quaisquer condições meteorológicas (ISRO, 2020).

2.5 SISTEMAS ALTERNATIVOS DE NAVEGAÇÃO

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 três nações que já possuem essa tecnologia: EUA, Rússia e China (FISCHER e RAQUET, 2011)

Para superar essas limitações, algumas pesquisas vêm sendo desenvolvidas em sistemas alternativos de navegação.

Uma delas, desenvolvida pela Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa (DARPA – *Defense Advanced Research Projects Agency*), utiliza *beacons* ou “radio-faróis”, 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* (interceptadores de sinais de rádio) 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. (FISCHER e RAQUET, 2011)

Outra pesquisa, desenvolvida por pesquisadores do Centro de Autonomia e Tecnologia de Navegação (ANT Center, *Autonomy and Navigation Technology Center, Centro Tecnológico de Autonomia e Navegação*), utiliza Sinais Oportunos (SoOP – *Signals of Opportunity*) que aproveita sinais de satélites que seriam destinados a comunicação, para a navegação. 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. Há também a Navegação Assistida

por Visão (*Vision Aiding Navigation*), também em desenvolvimento pelo ANT Center, que utiliza o movimento percebido por câmeras instaladas em um veículo para detectar sua velocidade e rotação. (FISCHER e RAQUET, 2011).

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 satélite 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 quase a zero grau absoluto. Uma vez resfriados, esses átomos adquirem um estado quântico capaz de ser facilmente perturbado por uma força externa. Outro feixe de laser pode ser usado para captar a perturbação e, com isso, calcular a força externa correspondente ao movimento (IDST, 2016).

2.6 GEOLOCAL

O GEOLOCAL é um novo sistema de navegação e geoposicionamento que usa um conceito diferente dos GNSS.

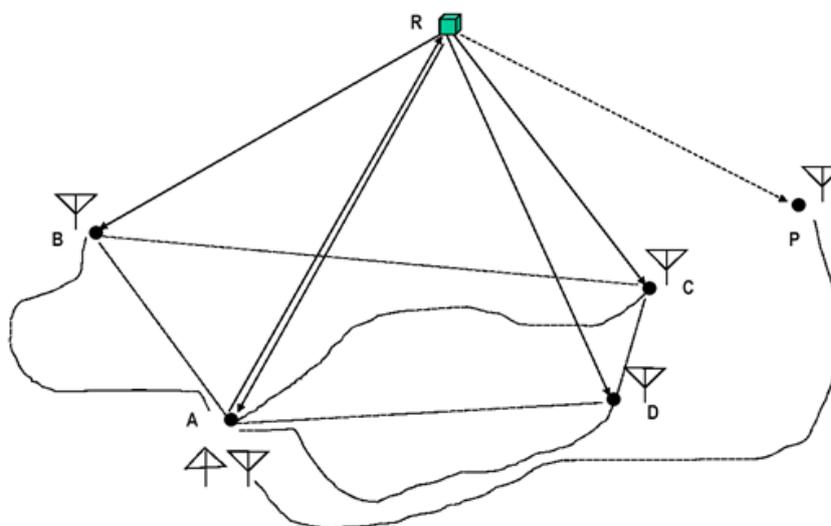
Até o momento há extensa pesquisa de cunho matemático e físico sobre o assunto. Simulações por computador foram realizadas por pesquisadores diferentes, demonstrando sua viabilidade. Vários artigos foram publicados, há patentes nacionais e internacionais, registro de software e duas dissertações de mestrado.

Desenvolveu-se a partir de um conceito de sistema e processos cuja primeira patente foi submetida em 1991, concedida em 1997 (KAUFMANN, 1997) e teve aditivo submetido em 2001. Posteriormente o sistema de geolocalização e os conceitos de processos foram modificados e melhorados, resultando em mais duas patentes datadas de 2003 (KAUFMANN, 2003) e 2012 (KAUFMANN e KAUFMANN, 2012).

Em 2 de Fevereiro de 2021 o INPI (Instituto Nacional de Propriedade Industrial) concedeu ao Titular Instituto Presbiteriano Mackenzie a Carta Patente BR102012006120-1 para o **Processo e sistema para determinar alterações temporais na retransmissão e propagação de sinais, para medir distâncias, sincronizar atuadores e georeferenciamento**, da autoria de Pierre Kaufmann e Pedro Levit Kaufmann. O pedido havia sido depositado em 19 de março de 2012 e a carta possui validade até 2031 (KAUFMANN e KAUFMANN, 2012).

Em sua configuração básica ele consiste em **estações**⁴ transmissoras no solo e **transponders**⁵ no espaço acima das estações. As estações têm suas posições conhecidas e seus relógios estão sincronizados. Através dos *transponders*, um alvo recebe o sinal das estações e consegue, por triangulação⁶, localizar sua posição e sincronizar seu relógio. Funciona como um “GPS invertido” (Fonte: KAUFMANN e SILVEIRA (2004 e MACHO, 2018).

Figura 10 - Representação inicial do sistema GEOLocal com três estações fixas A, B e C, um *transponder* no espaço R e um alvo em terra P



Fonte: KAUFMANN e SILVEIRA (2004)

⁴ Este trabalho usa o termo **estação** para designar o que, em trabalhos anteriores, se convencionou como “bases” e evitar ambiguidades com expressões como “base de tempo” e “base de frequência”.

⁵ Este trabalho usa o termo inglês **transponder** ao invés de “repetidora”. *Transponder* significa um equipamento de rádio ou radar que, ao receber um sinal designado, emite um sinal de rádio próprio, que é usado especialmente para a detecção, identificação e localização de objetos e em satélites para transmitir sinais de comunicação. Na literatura especializada é usualmente abreviado como XPDR, XPNDR, TPDR ou TP (MERRIAN-WEBSTER, 2020).

⁶ A expressão correta seria **multilateração** (INCRA, 2013), pois estamos tratando de distâncias e não de ângulos. Vide item 3.2.

É importante salientar que os primeiros trabalhos sobre o GEOLOCAL consideravam a colocação de satélites em órbita e o aproveitamento de satélites de comunicação geoestacionários. A partir de 2012 os trabalhos começaram a considerar outros tipos de suporte para as *transponders* como aviões, balões, torres e drones.

O processo, de forma simplificada, inicia quando a estação de controle (A) envia um sinal para o *transponder*, que reenvia simultaneamente para todas as estações (incluindo a própria estação A) e o alvo (Figura 10). Tanto o alvo quanto as estações enviam à estação de controle a informação do instante em que receberam o sinal. Esse envio pode ser feito por qualquer meio de comunicação disponível (rádio, internet, celular, link de micro-ondas). A estação de controle pode, então, computar as diferenças entre o instante de envio e o de recebimento e assim calcular as distâncias a partir do tempo de propagação e, com isso, calcular também as posições do *transponder* e do alvo. Esta geometria, composta inicialmente por três estações em solo, foi posteriormente modificada para um mínimo de quatro estações como uma forma de reduzir erros e incertezas no processo de cálculo (KAUFMANN, 2003)

O GEOLOCAL não pretende competir com os sistemas ora existentes. Ele, na verdade, provê sistemas e processos alternativos oferecendo múltiplas opções técnicas em diferentes aplicações podendo inclusive complementar outros sistemas. Traz vantagens atrativas quando comparado com os sistemas tradicionais por satélite - GNSS (KAUFMANN e SILVEIRA, 2004):

- requerimentos técnicos reduzidos para o segmento espacial (satélite). Requer um simples *transponder* ou repetidor e uma antena com abertura definida pela área de cobertura;
- o controle de atitude (efemérides) do satélite não é crítico;
- é possível usar satélites de pouca massa (*Cubesats*) em orbita baixa, com baixo custo de construção, inserção em órbita e operação;
- permite o uso de canais de comunicação já existentes em outros satélites;
- as estações de controle podem ser em pequeno número e com baixa complexidade técnica;

- o posicionamento pode ser determinado tanto pelo alvo quanto por uma estação central;
- opcionalmente pode-se usar o *transponder* para retornar as mensagens do alvo e das demais estações e com isso tornar o sistema autossuficiente.

Ainda segundo Kaufmann e Silveira (2004), o GEOLOCAL abre espaço para várias frentes de estudo como:

- orbitografia e navegação espacial;
- sistemas de telecomunicação e modulação de sinais;
- desenvolvimento de hardware para as estações e alvos;
- desenvolvimento de satélites e *transponders*;
- operação de sistemas usando canais de comunicação de satélite para provas de conceito;
- estudos de custo e *marketing* para eventuais produtos comerciais.

Considerando que o GEOLOCAL permite o uso de maneira restrita e localizada (regional) ou abrangente (continental), os trabalhos anteriores propuseram algumas aplicações (MACHO, 2018):

- geolocalização e suporte à navegação terrestre, naval, aérea e orbital;
- geolocalização em áreas inóspitas (Antártida, por exemplo);
- suporte seguro a operações militares;
- sincronismo preciso de bases de tempo;
- navegação de drones em agricultura de precisão e sensoriamento remoto;
- georeferenciamento de precisão nos levantamentos topográficos por aerofotogrametria.

Pode ser usado como *backup* para sistemas GNSS em aplicações críticas ou em locais onde esses sistemas não estão disponíveis

Partes deste trabalho são fruto de uma pesquisa iniciada em 2019, coordenada pelo Prof. Pamboukian e suportada por uma equipe de excelência. O projeto, patrocinado pelo Fundo Mackenzie de Pesquisa (Mack Pesquisa), além de adquirir equipamentos e materiais necessários, também disponibilizou algumas bolsas de estudo. O grupo de pesquisa contou com a colaboração de docentes especialistas em áreas variadas da engenharia e astrofísica (incluindo outras

instituições como UNIFESP, IAG/USP, INPE, UFABC), bem como a participação voluntária de discentes de graduação e pós-graduação (PAMBOUKIAN, 2020).

Concluído em 2020, atingiu seus objetivos principais:

- revisar e atualizar os conceitos do GEOLOCAL;
- consolidar as pesquisas realizadas até o momento;
- estudar as possíveis topologias do sistema e suas aplicações;
- planejar os testes de campo;
- caracterizar as fontes de atraso na medição de tempo;
- especificar e construir protótipos da instrumentação para as primeiras provas de conceito e outros experimentos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão revistas as teorias e conceitos necessários para embasar a proposta do protótipo, a saber:

- a razão de se usar ondas de rádio para medir distância e quais as vantagens sobre outros métodos possíveis;
- os fundamentos da geolocalização moderna;
- princípio de funcionamento dos GNSS (pseudodistância, *Doppler* e fase da portadora);
- a influência da geometria do sistema na precisão final: o PDOP (*Position Dilution of Precision*, Diluição de Precisão na Posição);
- princípios de comunicação por rádio: o radiotransmissor básico, formas de se colocar uma informação no sinal de rádio (modulação), evolução tecnológica;
- as opções tecnológicas para prototipagem de sistemas de comunicação por rádio.

3.1 PRINCÍPIOS DE MEDIÇÃO DE DISTÂNCIAS USANDO ONDAS

Uma distância pode ser medida de forma direta ou indireta. A forma direta é o uso de uma referência como, por exemplo, uma trena. O tamanho da distância medida está, portanto, relacionada com o tamanho da trena e o total de vezes que precisamos usar essa referência. Ou seja, uma trena de 20 metros pode determinar 400 metros desde que se façam 20 medidas sucessivas, cada uma delas iniciando no ponto em que terminou a medida anterior.

Os métodos indiretos valem-se do uso de instrumentos que medem outras grandezas diferentes da distância e chegam ao seu valor através de algum cálculo. Um exemplo é a utilização de uma fonte de som ou radiação eletromagnética, como será mostrado a seguir.

3.1.1 Fenômenos ondulatórios

A Física define que onda é uma perturbação oscilante de alguma grandeza física no espaço e periódica no tempo (movimento harmônico simples). A oscilação, no espaço, caracteriza-se pelo comprimento de onda e o tempo decorrido entre duas oscilações subsequentes é denominado período da onda. A frequência, que é o

número de oscilações por unidade de tempo, é o inverso do período. O comprimento de onda e a frequência estão relacionados com a velocidade de propagação dessa onda. Em termos matemáticos (unidades no Sistema Internacional),

T = período (s)

f = frequência (Hz)

λ = comprimento de onda (m)

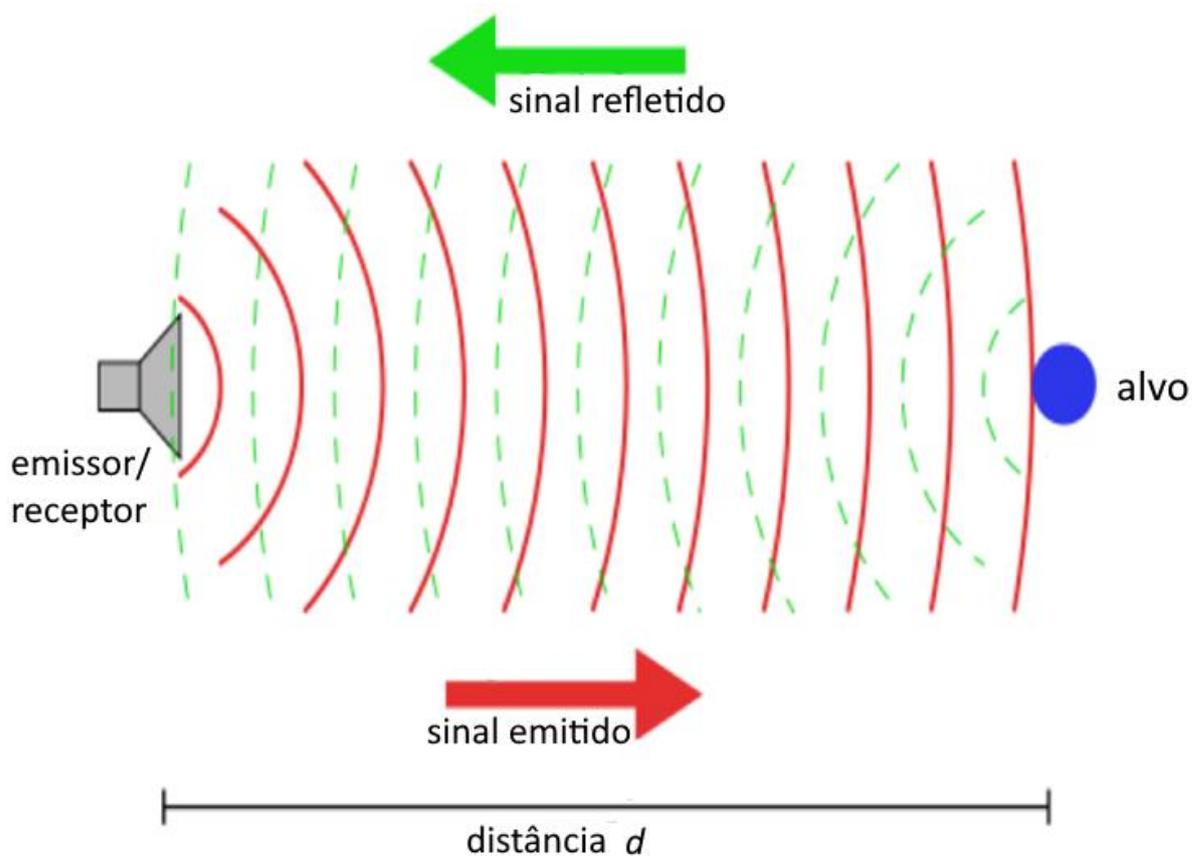
v = velocidade de propagação (m/s)

E as relações são:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{v}{\lambda} \quad (3.1)$$

Um exemplo prático para medir distâncias é com o eco: um som que reflete em um alvo e retorna à sua origem (Figura 11).

Figura 11 - Medida de distâncias através da reflexão de ondas.



Fonte: ALTAMIRANO, 2016.

Pode-se medir o tempo entre a geração do som e seu retorno. Sabendo antecipadamente que a velocidade do som (ao nível do mar) é de 340 m/s, basta

multiplicar esse tempo pela velocidade e obteremos assim a distância. Esta técnica é conhecida na literatura como TOF (*Time Of Flight*, Tempo De Vôo ou Tempo de Propagação). No caso da medição do tempo de ida e volta do sinal, considerando t como tempo que o sinal leva para ir e voltar e v a velocidade de propagação, a distância d é dada por:

$$d = \frac{vt}{2} \quad (3.2)$$

Este mecanismo é utilizado por morcegos, em sonares e equipamentos de ultrassonografia.

Os fenômenos ondulatórios podem ser mecânicos, quando sua propagação acontece em meios materiais (ondas sonoras ou ondas do mar, por exemplo) e eletromagnéticos, resultantes da combinação de um campo magnético com um campo elétrico e não dependem da existência de um meio para sua propagação. No vácuo, as ondas eletromagnéticas propagam-se em velocidade constante $c = 299.792.458$ m/s.

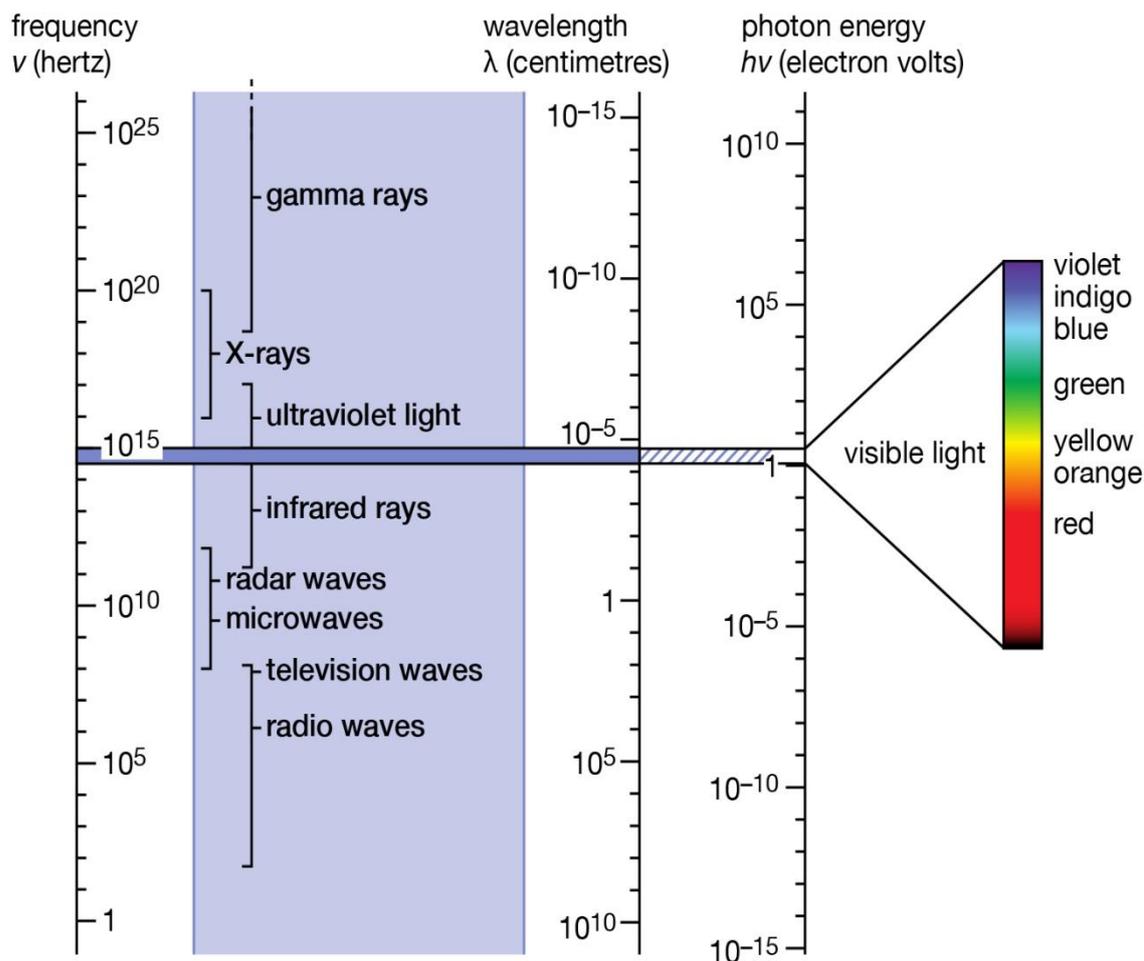
3.1.2 Ondas eletromagnéticas

Radiação eletromagnética, na física clássica, é o fluxo de energia à velocidade universal da luz através do espaço livre ou através de um meio material na forma dos campos elétricos e magnéticos que compõem ondas eletromagnéticas como ondas de rádio, luz visível e raios gama. Em tal onda, campos elétricos e magnéticos variados do tempo são mutuamente ligados entre si em ângulos retos e perpendiculares à direção do movimento. Uma onda eletromagnética é caracterizada por sua intensidade e a frequência da variação temporal dos campos elétrico e magnético (PHILLIPS e FRITZSCHE, 2015).

Espectro eletromagnético é a distribuição de radiação eletromagnética de acordo com a frequência ou comprimento de onda. Embora todas as ondas eletromagnéticas viajem à velocidade da luz no vácuo, elas o fazem em uma ampla gama de frequências, comprimentos de onda e energias de fóton. Segundo Phillips e Fritzsche (2015), o espectro eletromagnético abrange todas as radiações eletromagnéticas e consiste várias faixas, como a luz visível ou radiação ultravioleta (Figura 12). As várias faixas possuem nomes diferentes com base em diferenças de

comportamento na emissão, transmissão e absorção das ondas correspondentes e também com base em suas diferentes aplicações práticas. Não há limites precisos entre qualquer uma dessas faixas contíguas, então elas tendem a se sobrepor.

Figura 12 - O espectro eletromagnético



© Encyclopædia Britannica, Inc.

Para medições a longas distâncias ou em situações em que não há um meio físico de propagação (exemplo: espaço), as ondas eletromagnéticas são a opção. E dentro do espectro eletromagnético há duas faixas de interesse: as ondas de rádio e a luz visível.

3.1.3 Reflexão passiva de ondas de rádio

A utilização de ondas de rádio para medição de distâncias usa diferentes metodologias e técnicas que podem ser combinadas para se obter melhores resultados.

A técnica utilizada no RADAR mede o tempo de trânsito de um pulso de onda de rádio emitido por uma antena geradora, refletindo no alvo e retornando a uma antena receptora. A precisão do cálculo depende, fundamentalmente, da precisão da base de tempo utilizada, lembrando que cada nano segundo produz uma incerteza de 30 centímetros. Neste caso, o TOF considera que a velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo é $c = 299.792.458$ m/s e a equação 3.1 muda para:

$$d = \frac{ct}{2} \quad (3.3)$$

Ainda dentro da reflexão, comparando a frequência emitida com a recebida, é possível estabelecer o movimento do alvo através das propriedades do efeito Doppler (RIDENOUR, 1947). Definindo f_t como a frequência transmitida pela fonte, f_r como a frequência recebida pelo observador, c como a velocidade da luz no vácuo e v como a velocidade entre a fonte e o observador, temos:

$$f_r = f_t \left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \right) \quad (3.4)$$

Simplificando,

$$f_r = f_t \left(\frac{c+v}{c-v} \right) \quad (3.5)$$

Sendo f_d a diferença de frequência entre o sinal emitido e o recebido (frequência Doppler), a equação fica:

$$f_d = f_r - f_t = f_t \left(\frac{c+v}{c-v} \right) - f_t = 2v \frac{f_t}{c-v} \quad (3.6)$$

Para fontes se deslocando em velocidades muito menores que a luz, temos $(c - v) \rightarrow c$. Logo, a equação fica:

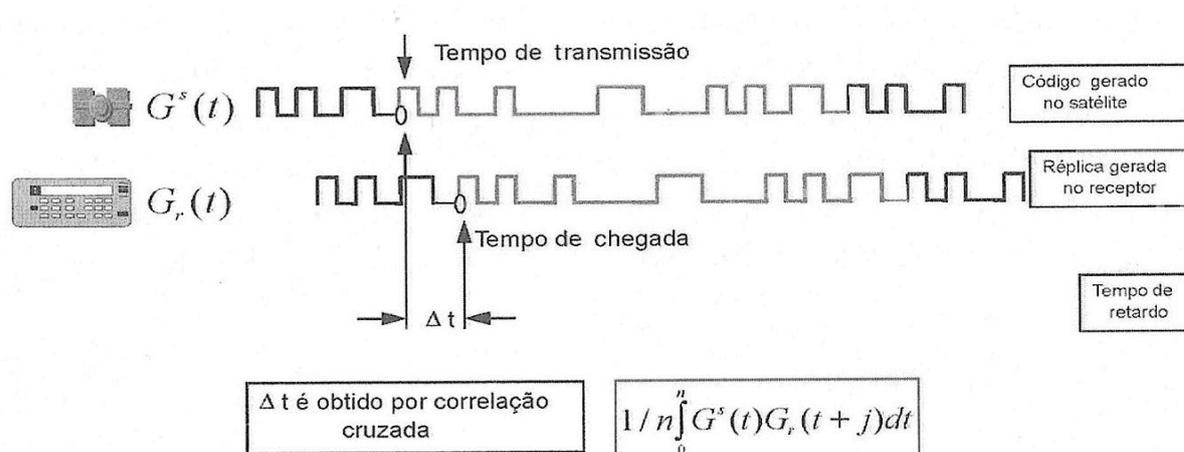
$$f_d \approx 2v \frac{f_t}{c} \quad (3.7)$$

3.1.4 Pseudodistância e fase de onda

Segundo Langley (1996), sistemas como o GNSS possuem um transmissor de rádio muito distante, num satélite, e um receptor na superfície. Este transmissor emite uma onda de rádio (“portadora”) que carrega uma informação codificada (“código”). O sinal percorre um caminho só de ida entre satélite e receptor. São chamadas de “observáveis básicas”, capazes de determinar posição, velocidade e tempo, a pseudodistância a partir do código e a fase de onda, ou diferença de fase, da portadora, o efeito Doppler e a relação sinal/ruído.

O código é emitido pelo satélite em tempos muito bem definidos. O receptor, por seu lado, gera internamente uma réplica deste sinal no mesmo instante de tempo. Devido ao tempo de propagação, haverá um retardo no receptor entre o sinal emitido pelo satélite e sua réplica. Ambos os sinais são comparados entre si por um processo de correlação (Figura 13) e este valor, em segundos, multiplicado pela velocidade da luz, dá a distância entre o satélite e o receptor. Na literatura, esta distância é tratada como “pseudodistância” visto que não há um sincronismo perfeito entre os relógios do transmissor e do receptor. Entretanto, considerando-se as tolerâncias aceitáveis, tal medida pode ser, inclusive, considerada “distância”. Tais tolerâncias, a depender da eletrônica dos receptores, podem ter erros de um metro a centenas de metros. Outro fator a ser considerado é a velocidade de propagação do sinal que, dentro da ionosfera, tem uma diminuição com relação à velocidade no vácuo. Esta informação normalmente é calculada e informada dentro do código para ser utilizada como fator de correção nos cálculos (MONICO, 2008).

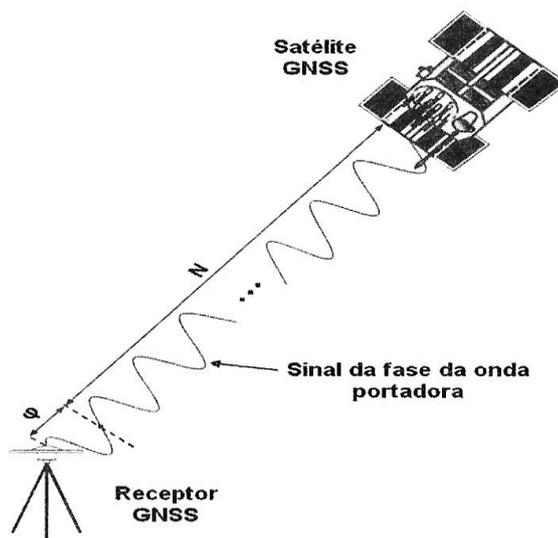
Figura 13 - Defasagem do sinal entre transmissor e receptor num sistema GNSS



Fonte: MONICO (2008)

Observável muito mais precisa, a fase de onda da portadora corresponde à diferença de fase entre o sinal recebido do satélite e o sinal gerado pelo receptor. Os receptores medem a parte fracionária ϕ da portadora e em seguida contam o número de ciclos N (Figura 14). A distância é dada pelo total de ciclos mais a fração do primeiro ciclo, multiplicado pelo comprimento de onda (MONICO, 2008).

Figura 14 - Recepção da fase da Portadora



Fonte: MONICO (2008)

Os GNSS trabalham, em sua maioria, em faixas de frequência no entorno de 1,5 GHz, conforme a Tabela 2:

Tabela 2 - Frequências de trabalho dos principais sistemas GNSS

| Identificador | Sistema, faixa e sinal | Frequência da portadora (MHz) |
|---------------|------------------------|-------------------------------|
| 1G | Glionass L1 C/A | 1602.00 |
| 1C | GPS L1 C/A | 1575.42 |
| 2G | Glionass L2 C/A | 1246.00 |
| 2S | GPS L2 L2CM | 1227.60 |
| L5 | GPS L5C | 1176.45 |

Fonte: (GNSS-SDR, 2019)

Pela equação 3.1 (3.1.1), podemos definir que o comprimento de onda λ , em metros, é:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.7)$$

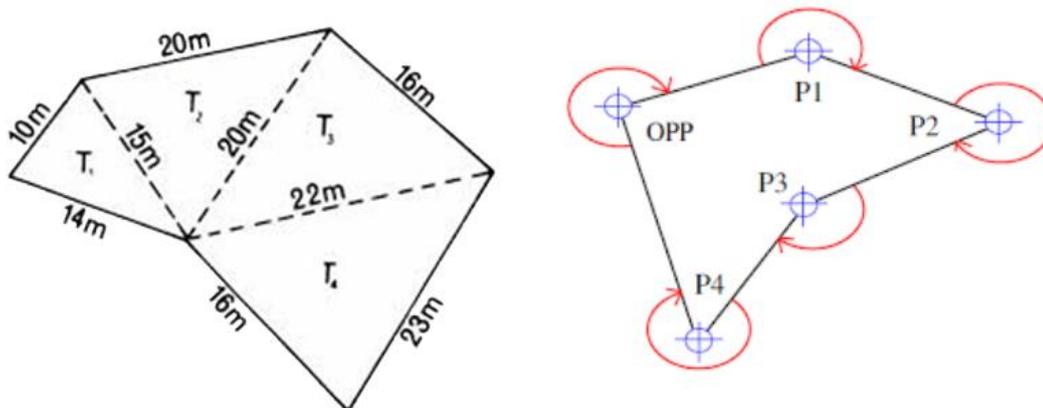
Considerando que $v = c$, para uma frequência aproximada de 1,5 GHz temos $\lambda \approx 20$ cm. Segundo Monico (2008), a medida da parte fracionária da onda pode chegar a 1/1000 do ciclo, ou seja, dois milímetros de erro. Entretanto, o número de ciclos inteiros na primeira medição é desconhecido e a este valor dá-se o nome de “ambiguidade”. É estimado por ajustamento, utilizando-se sucessivas medições a partir de dois ou mais satélites e há diversos algoritmos disponíveis para esta solução.

Os outros processos medem a diferença de fase da portadora do sinal recebido, desvio de frequência por efeito *Doppler* e banda de fase. Todos esses processos combinados servem para melhorar a precisão do cálculo.

3.2 MULTILATERAÇÃO, TRILATERAÇÃO E TRIANGULAÇÃO

Para determinar posições em áreas planas (um levantamento topográfico, por exemplo), tomam-se pontos de referência com posição conhecida e a partir deles determinam-se os demais. Isso pode ser feito a partir da medida de distâncias, a **trilateração**, ou a partir de ângulos, a **triangulação** (Figura 15)

Figura 15 - Exemplos de triangulação (à direita) e trilateração (à esquerda).



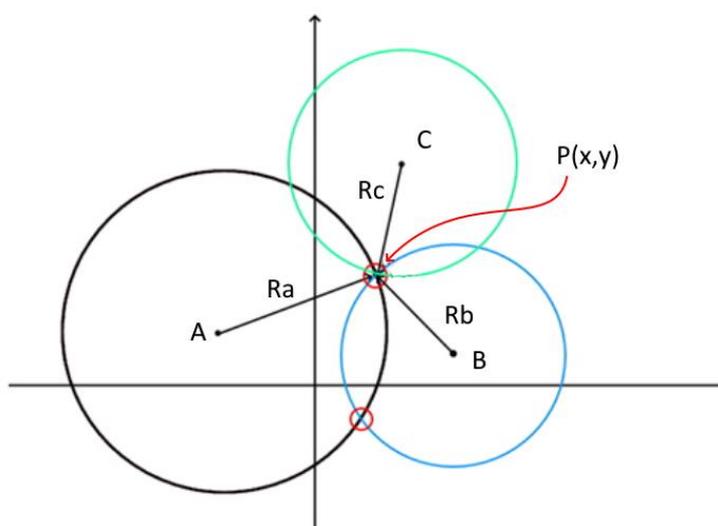
Fonte: UNIMAR (2020)

A multilateração é um método para determinar a localização de um veículo móvel ou ponto estacionário no espaço usando múltiplas distâncias entre o veículo/ponto e vários locais conhecidos separados espacialmente (muitas vezes denominados de estações ou satélites). O nome é derivado da trilateração, o problema geométrico de determinar uma posição desconhecida em um plano

baseado na distância de outros dois vértices conhecidos de um triângulo (o comprimento de dois lados). A multilateração é um tópico matemático e uma técnica aplicada usada em vários campos. Uma aplicação prática envolvendo um local fixo é o método de trilateração de um levantamento topográfico. O princípio da trilateração envolve o problema onde, dado um alvo no ponto P em uma área plana, são necessários pelo menos três pontos com posição conhecida para localizarmos este alvo (GOLDONI, SAVIOLI, *et al.*, 2010).

Vamos considerar, por exemplo, a Figura 16 onde se deseja conhecer as coordenadas do ponto P(x,y). Pelo A (conhecido), pode-se saber a distância R_a entre A e P, mas isso não é suficiente, pois temos um círculo de raio R_a como solução. Toma-se então um segundo ponto B, também de coordenadas conhecidas, e a distância R_b , mas ainda não se chega na solução, visto que há uma ambiguidade devido aos dois pontos de intersecção. Finalmente, para resolver a ambiguidade e chegar à solução é necessário tomar um terceiro ponto C.

Figura 16 – Trilateração com três referências



Fonte: Autoria própria

Matematicamente falando, consideremos a equação da circunferência:

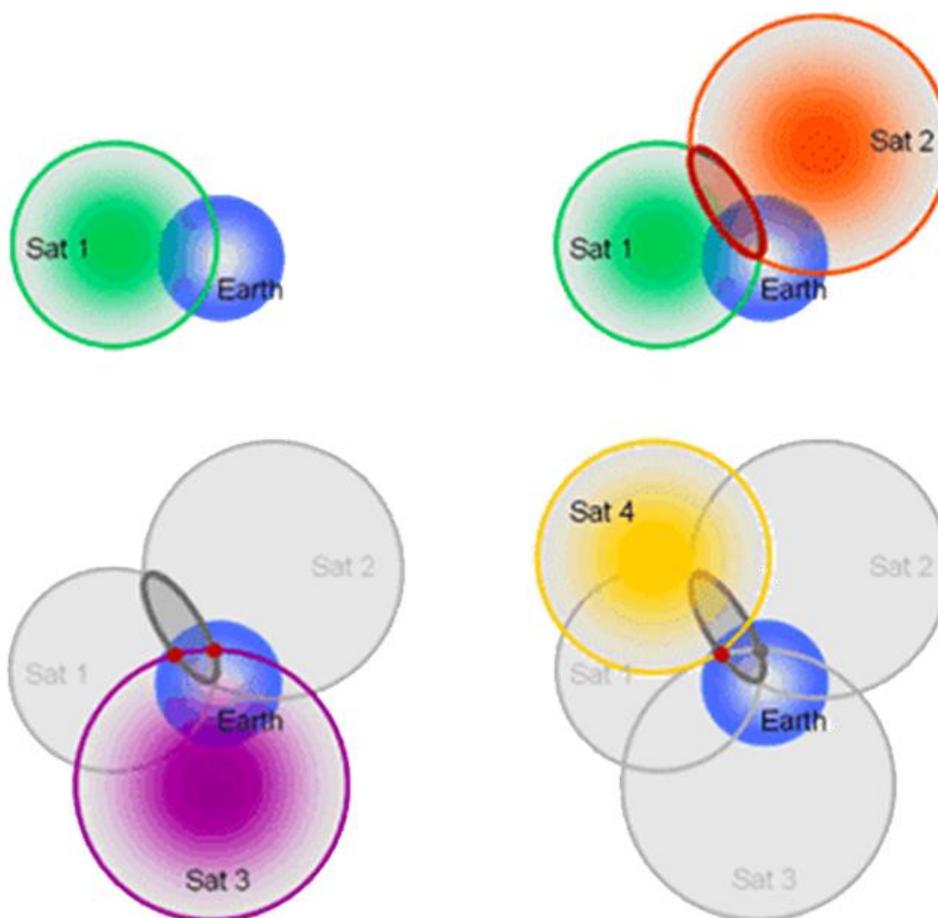
$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = r_i^2 \quad (3.8)$$

Aplicando à situação da Figura 16 e considerando conhecidos os valores R_A , R_B , R_C e as coordenadas de A, B e C, a localização (x,y) do ponto P pode ser determinada pela intersecção de 3 círculos resolvendo-se o sistema:

$$\begin{cases} (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 = R_A^2 \\ (x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 = R_B^2 \\ (x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 = R_C^2 \end{cases} \quad (3.9)$$

Entretanto, quando se pretende localizar um ponto no espaço, três pontos conhecidos não são suficientes. Por exemplo, no caso de satélites GPS e um ponto sobre a Terra temos as situações ilustradas na Figura 17. Na primeira, acima e à esquerda, com apenas um satélite, a posição fica localizada dentro de uma superfície esférica. Com mais um satélite, a posição fica determinada pela intersecção de duas superfícies esféricas, ou seja, um círculo (acima e à direita). Com um terceiro satélite temos a intersecção do círculo com a superfície esférica resultando em dois pontos (abaixo e à esquerda). E o quarto satélite finalmente resolve a ambiguidade.

Figura 17 - Multilateração no espaço



Fonte: GISCOMMONS (2020)

Para este caso, podemos escrever o sistema que determina o ponto de intersecção $P(x,y,z)$:

$$\begin{cases} (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 + (z - z_A)^2 = R_A^2 \\ (x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + (z - z_B)^2 = R_B^2 \\ (x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2 = R_C^2 \\ (x - x_D)^2 + (y - y_D)^2 + (z - z_D)^2 = R_D^2 \end{cases} \quad (3.10)$$

Godoni et al (2010) ainda lembra que as medidas de raio R_i , na prática, não são absolutos, possuindo alguma tolerância. Desta forma a solução do sistema resultará em uma pequena área no espaço que vai variar de tamanho e forma de acordo com a geometria ou localização dos satélites em relação ao ponto P e conforme as tolerâncias e erros inerentes ao sistema. A distribuição estatística do erro nesta área pode ser analisada através do cálculo do valor do PDOP (*Position Dilution of Precision*, Diluição de Precisão por Posicionamento)

3.3 PDOP (POSITION DILUTION OF PRECISION)

Este item foi escrito e adaptado dos trabalhos de Macho (2018), Friolani (2020) e Langley (1999).

Para que a multilateração 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 estações. Além disso, algumas incertezas podem ser geradas pela distribuição inadequada das estações no solo.

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 do *transponder* (σ). Este desvio padrão pode ser obtido multiplicando-se o valor do PDOP pelo desvio padrão do erro das medidas de distâncias entre cada estação e o *transponder* (σ_0) conforme visto na equação 3.11 (LANGLEY, 1999).

$$\sigma = PDOP \cdot \sigma_0 \quad (3.11)$$

O cálculo a seguir, ilustrado por Dana (1996), emprega o sistema de coordenadas ECEF (*Earth Centered, Earth Fixed*, Fixo no Centro da Terra) e considera modelos com quatro estações (A, B, C e D) e um *transponder* (R), que é o caso do Sistema GEOLOCAL. Os dados de entrada são as coordenadas x, y e z das estações ($A_x, A_y, A_z, B_x, B_y, B_z, C_x, C_y, C_z, D_x, D_y, D_z$) e as coordenadas do *transponder* (R_x, R_y, R_z). As distâncias entre as estações e o *transponder* (AR, BR, CR e DR) podem ser determinadas utilizando o conjunto de equações 3.12.

$$\begin{aligned} AR &= \sqrt{(A_x - R_x)^2 + (A_y - R_y)^2 + (A_z - R_z)^2} \\ BR &= \sqrt{(B_x - R_x)^2 + (B_y - R_y)^2 + (B_z - R_z)^2} \\ CR &= \sqrt{(C_x - R_x)^2 + (C_y - R_y)^2 + (C_z - R_z)^2} \\ DR &= \sqrt{(D_x - R_x)^2 + (D_y - R_y)^2 + (D_z - R_z)^2} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Após a determinação das distâncias os valores são empregados na matriz A (equação 3.13). Suas três primeiras colunas correspondem às componentes x, y e z do versor das distâncias entre cada estação e o *transponder*, e a última coluna é utilizada para o cálculo do fator de diluição de tempo.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{A_x - R_x}{AR} & \frac{A_y - R_y}{AR} & \frac{A_z - R_z}{AR} & -1 \\ \frac{B_x - R_x}{BR} & \frac{B_y - R_y}{BR} & \frac{B_z - R_z}{BR} & -1 \\ \frac{C_x - R_x}{CR} & \frac{C_y - R_y}{CR} & \frac{C_z - R_z}{CR} & -1 \\ \frac{D_x - R_x}{DR} & \frac{D_y - R_y}{DR} & \frac{D_z - R_z}{DR} & -1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

A matriz P, equação 3.14, é definida como a matriz inversa da matriz transposta de A multiplicada pela própria matriz A:

$$P = (A^t \cdot A)^{-1} \quad (3.14)$$

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 três elementos da matriz P, como mostra a Equação 3.15:

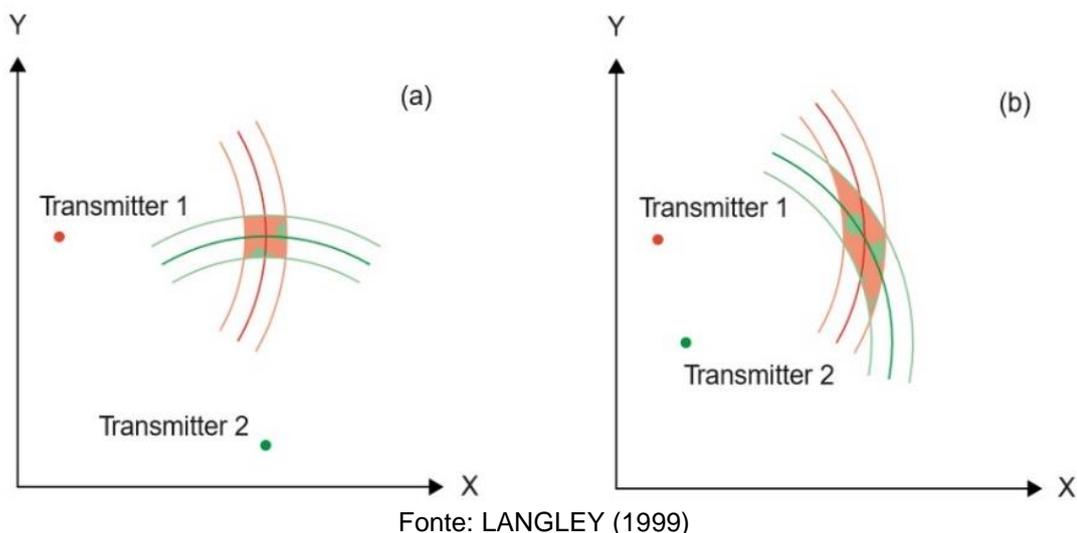
$$PDOP = \sqrt{P_{0,0} + P_{1,1} + P_{2,2}} \quad (3.15)$$

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

Por ser um índice de desvio padrão, quanto menor o valor do PDOP maior a acurácia dos dados. Embora o ideal sejam valores menores que 1, a maioria das aplicações práticas trabalha com valores até 4 (LANGLEY, 1999).

Obter valores menores de PDOP implica em melhorar a geometria do sistema, por exemplo, aumentando o número de estações ou evitando que as estações fiquem alinhadas em relação à *transponder*. Outra forma de diminuir o PDOP é melhorar a distribuição das bases, de forma que as esferas de distâncias centradas nas estações interceptem o *transponder* 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 21a. A Figura 21b mostra uma geometria desfavorável, pois a região de intersecção é maior. As interseções mostradas nas Figuras 21a e 21b são conhecidas como regiões de incerteza. A precisão do sistema da Figura 21b é considerada como diluída em relação à da Figura 21a (LANGLEY, 1999).

Figura 18 - Geometria de um sistema de localização 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.



Melhorar o valor de PDOP significa, portanto, determinar a distribuição das estações *versus* a altitude dos *transponders*. Em estudo realizado por Friolani, Fuller e Pamboukian (2019), foi determinado o espaçamento ideal entre as estações para um *transponder* posicionado em altitude fixa, considerando o menor valor de PDOP

e a menor quantidade de estações necessárias. Para isto, foram feitas simulações utilizando algoritmos desenvolvidos no software MATLAB (FRIOLANI, FULLER e PAMBOUKIAN, 2019). A Tabela 3 relaciona a altura da plataforma do *transponder* com a área de cobertura. Nesta tabela, algumas medidas superam o diâmetro da Terra e não foram consideradas.

Tabela 3 - Espaçamento e altitude ideais para cada plataforma do *transponder*.

| Plataforma | Altitude (m) | Espaçamento (m) | Raio de cobertura (m) |
|--------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| 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 | * | * |
| Satélite Geoestacionário | 36.000.000 | * | * |

Fonte: Adaptado de Friolani, Fuller e Pamboukian (2019)

3.4 PRINCÍPIOS DA GEODÉSIA

Entender os sistemas geodésicos é fundamental para o desenvolvimento de qualquer sistema ou dispositivo de geolocalização.

A Geodésia é a ciência que tem por objetivo o estudo e determinação da forma, dimensões, orientação, rotação e campo da gravidade da Terra, bem como as suas variações ao longo do tempo (SIDERIS, 2009). Portanto, no contexto atual, a Geodésia é o campo das Geociências que estuda o globo terrestre como um sistema dinâmico e complexo, formado por muitas camadas que interagem entre si e com a atmosfera e os oceanos, cujas variações devem ser monitoradas e modeladas no tempo e no espaço. Cabe à Geodésia fornecer os sistemas de referência necessários para a vasta gama das demais ciências da Terra que necessitam posicionar, representar e modelar, através de coordenadas, informações sobre eventos e fenômenos na sua superfície e entorno próximo (IBGE, 2019).

Em síntese, as três superfícies da Geodésia são:

- a **superfície física** (superfície equipotencial de referência): geóide (superfície de referência vertical);
- a **superfície matemática**: elipsoide (superfície de referência planialtimétrica);
- a **superfície terrestre**, onde são realizadas as medições e se realizam a maioria das atividades humanas.

Deve-se ao matemático e geodesta alemão Johann Carl Friedrich Gauss o conceito original da superfície que intercepta a direção da gravidade segundo ângulos retos, e da qual faz parte a superfície dos oceanos. Posteriormente, tal superfície foi denominada geóide por seu assistente e sucessor Johann Benedict Listing (TORGE e MÜLLER, 2012). Assim, o chamado “geóide de Gauss-Listing” é tradicionalmente definido como a superfície equipotencial do campo da gravidade da Terra que coincide com o nível médio não perturbado dos mares ou, modernamente, como a que “melhor se ajusta, em termos de mínimos quadrados, ao nível médio global dos oceanos” (SANCHEZ, 2007). Muitos esforços da Geodésia têm se concentrado na determinação do geóide como superfície de referência para a representação das altitudes de forma consistente com o entendimento da direção do fluxo das águas.

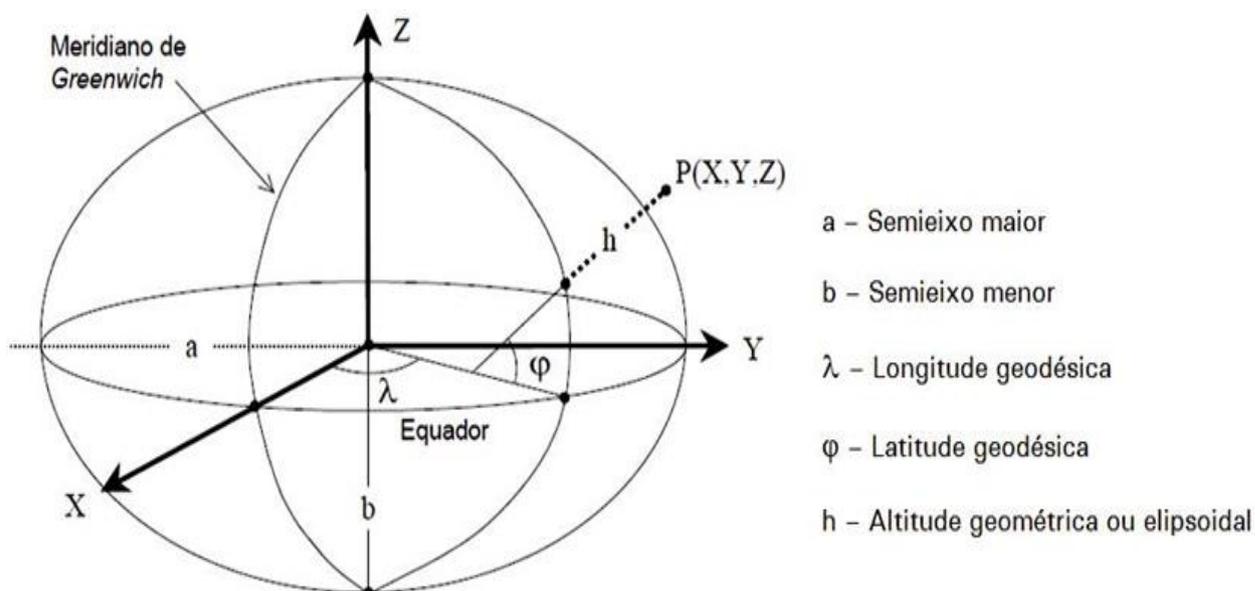
O geóide tem formato levemente irregular que acompanha as variações de distribuição de massa da Terra. As chamadas ondulações geoidais, também conhecidas como alturas geoidais, são suaves e variam globalmente entre -110m e +85m, em relação ao elipsoide de referência.

Segundo IBGE (2019), elipsoide de revolução é o sólido mais adequado para representar informações na superfície da Terra e é obtido a partir da figura geométrica de uma elipse, rotacionando-a em torno de seu eixo menor (Figura 19). Tendo em vista que os sistemas de referência geodésicos são realizados por meio de coordenadas cartesianas (xyz), a associação de um elipsoide de revolução aos eixos cartesianos possibilita a obtenção das coordenadas geodésicas ou elipsoidais, sendo elas:

- Longitude geodésica (λ): ângulo entre o plano do meridiano de referência (Greenwich) e o do meridiano do ponto considerado, contado no plano do equador, variando de 0° a 360° ou de -180° a $+180^\circ$;

- Latitude geodésica (ϕ): ângulo entre o plano equatorial e a normal ao elipsoide que passa pelo ponto considerado, contado ao longo do meridiano do ponto, variando de 0° a $\pm 90^\circ$ entre o Equador e os Polos;
- Altitude geométrica ou elipsoidal (h): distância medida ao longo da normal ao elipsoide entre este e o ponto considerado. As altitudes geométricas não podem ser utilizadas para representar a direção do fluxo das águas, pois não possui vínculo com o campo da gravidade.

Figura 19 - Elipsoide de revolução



Fonte: Gemael (1994)

Com o objetivo de se obter altitudes vinculadas ao campo da gravidade adota-se o geóide como superfície de referência, sendo necessário determinar a separação entre geóide e elipsoide, a ondulação geoidal (IBGE, 2019). Deste modo define-se:

Altitude ortométrica (H): distância medida ao longo da vertical do lugar, do ponto considerado até o geóide. Ela independe do elipsoide de referência e tem significado físico. Historicamente, em função da inexistência de informação gravimétrica nos primeiros anos de implantação da Rede Altimétrica, o IBGE utilizou uma aproximação da altitude ortométrica, sem, contudo, alterar esse nome. A bibliografia geodésica científica atribui a denominação “normal ortométrica” àquela aproximação. Atualmente, o IBGE utiliza outro tipo de altitude física, devido à dificuldade de obtenção da gravidade média entre a superfície física e o geóide

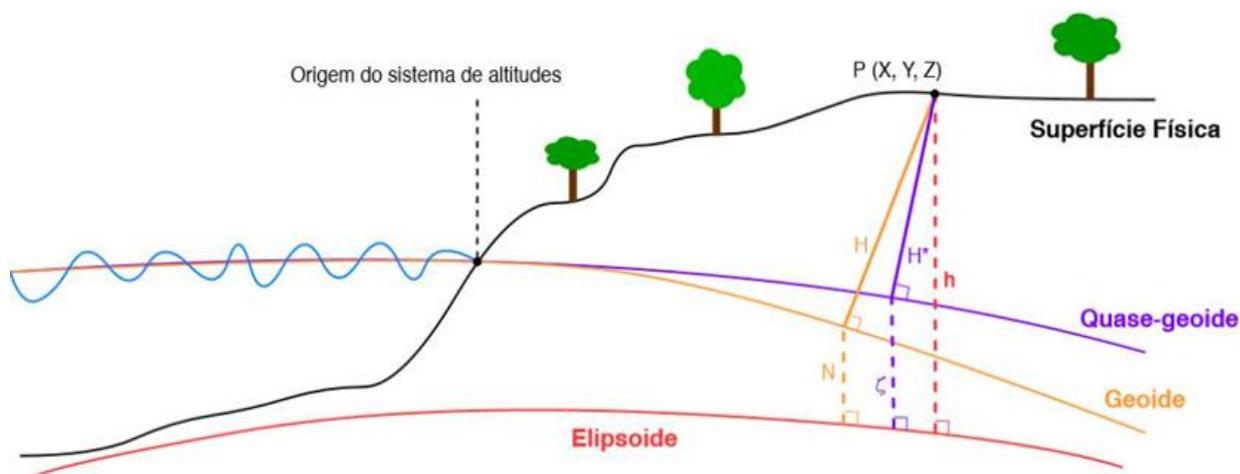
(IBGE, 2019) - as altitudes normais (H^*), cuja superfície de referência não é o geóide, mas sim o quase-geóide.

Ondulação geoidal ou altura geoidal (N): distância entre as superfícies do geóide e a do elipsoide, contada ao longo da normal do ponto considerado. No caso de adoção de outros tipos de altitude física que não a ortométrica, deve-se proceder à adequada substituição da altura geoidal; para as altitudes normais, a opção correta é a chamada anomalia de altura, ζ . As equações 2.1 e 2.2 apresentam a relação aproximada entre estas superfícies. A Figura 20 apresenta a associação entre superfícies e altitudes.

$$H = h - N \quad (3.16)$$

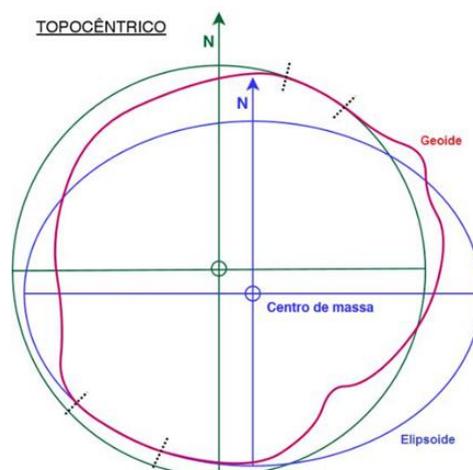
$$H^* = h - \zeta \quad (3.17)$$

Figura 20 - As superfícies associadas à altitude



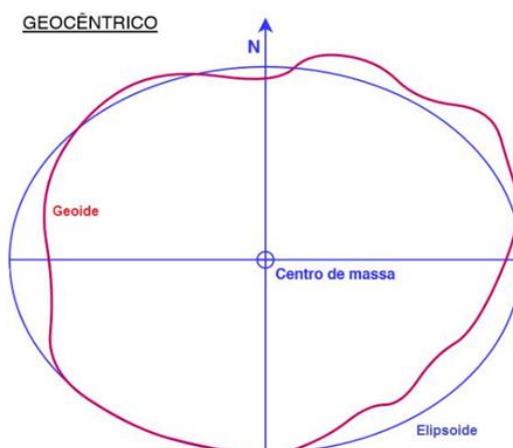
Fonte: IBGE (2019)

Os sistemas geodésicos regionais, conforme ilustra a Figura 4, eram referenciais adaptados a uma região (país ou continente) devido à limitação dos métodos de posicionamento então utilizados, como, por exemplo, a poligonização. Permite a possibilidade de existência de mais de um sistema de referência em cada região ou país. No Brasil, por exemplo, os sistemas geodésicos regionais utilizados foram: Chuá-Astro Datum; South American Datum 1969 - SAD 69 e Córrego Alegre.

Figura 21 - Referencial geodésico **regional**

Fonte: IBGE (2019)

Os sistemas geodésicos globais, conforme ilustra a Figura 22, são compatíveis com as modernas técnicas de posicionamento espacial e possibilita levantamentos de melhor precisão e acurácia. Como exemplo, pode-se destacar os GNSS. A origem destes sistemas é o centro de massa da Terra e por isso são denominados de Sistemas Geocêntricos. No caso do GPS, o sistema de referência é o *World Geodetic System 1984 - WGS84*. O Brasil adotou oficialmente o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas - SIRGAS2000, época 2000.4, compatível com o WGS84, e é uma densificação do Sistema/Rede de Referência Internacional (ITRS/ITRF, *International Terrestrial Reference System/Frame*) 2000 nas Américas (IBGE, 2019).

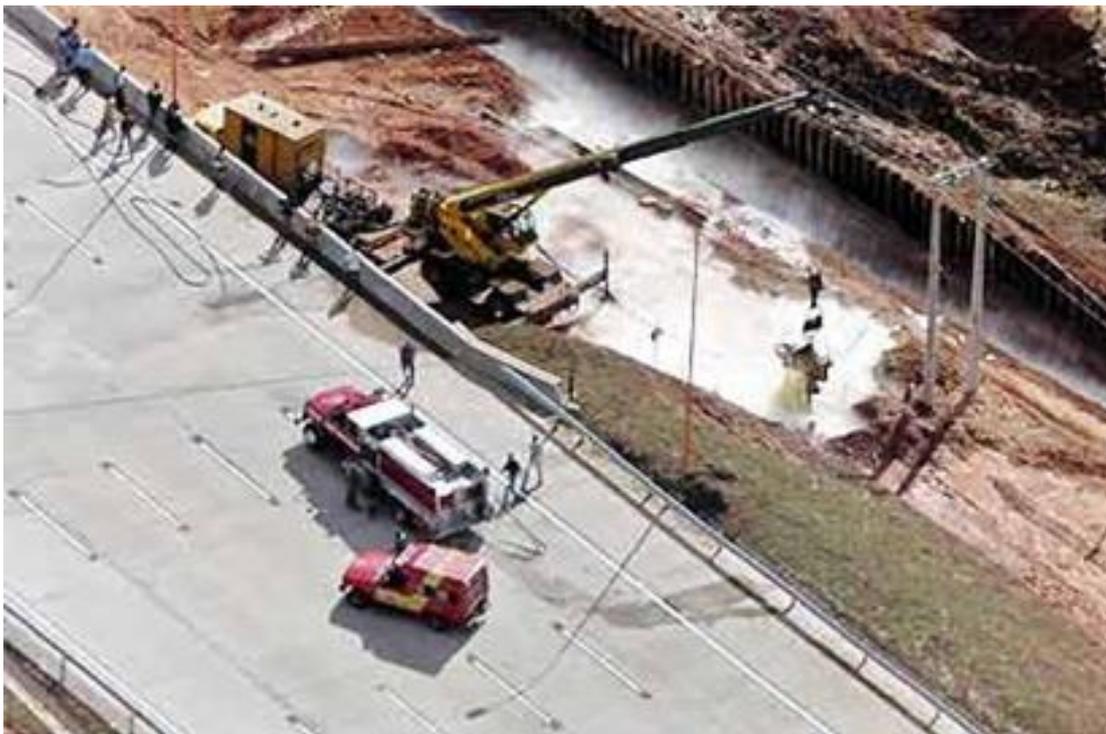
Figura 22 - Referencial geodésico **global**

Fonte: IBGE (2019)

Para que uma informação seja representada em um mapa, as coordenadas que descrevem sua posição devem ser expressas no mesmo sistema geodésico de

referência adotado. Caso a informação tenha as coordenadas referidas a um sistema geodésico diferente daquele adotado no mapa, elas deverão ser adequadamente transformadas. Caso contrário, podem advir problemas como o da Figura 23.

Figura 23 - Acidente em função do uso de referenciais geodésicos distintos em 2001 quando a máquina de perfuração da empreiteira atingiu um gasoduto da Petrobrás, justamente pelos mapas e plantas utilizarem sistemas de referência diferentes.



Fonte: IBGE (2019)

Por exemplo, as coordenadas atualmente disponíveis no Banco de Dados Geodésicos (BDG) do IBGE (2019) referem-se ao SIRGAS2000, que, em relação ao SAD69, apresentam diferenças aproximadas de 48 metros em longitude, 37 metros em latitude e 23 metros na altitude elipsoidal, na região de Macapá, enquanto que, em João Pessoa, as diferenças aproximadas se alteram para 35m, 44m e 29m, respectivamente.

Sob o aspecto Legal, Segundo o Art. 21 da Constituição Federal do Brasil de 1988, compete à União organizar e manter os serviços oficiais de estatística, geografia, geologia e cartografia de âmbito nacional. O Art. 22 diz que compete privativamente à União legislar sobre os sistemas estatístico, cartográfico e de geologia nacionais. O Decreto-Lei n. 243, de 28.02.1967, que fixa as diretrizes e

bases da cartografia brasileira, diz no Art. 12 que compete, sobretudo, ao IBGE promover o estabelecimento da rede geodésica fundamental, do sistema plano-altimétrico único. O Art. 15 diz que o estabelecimento de normas técnicas para a cartografia brasileira compete ao IBGE no que concerne à rede geodésica fundamental. Em 25 de fevereiro de 2015, o SIRGAS2000 foi adotado, em definitivo, como o referencial geodésico oficial do Brasil (IBGE, 2019) conforme os parâmetros a seguir:

- Época de Referência: 2000, 4
- Elipsoide: GRS80
- Semieixo maior: 6 378 137 m
- Achatamento: 1/298,257222101
- Origem: Centro de massa da Terra

3.5 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, KAUFMANN, *et al.*, 2014). Cabe aqui um rápido estudo sobre os rádios e suas tecnologias atuais.

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

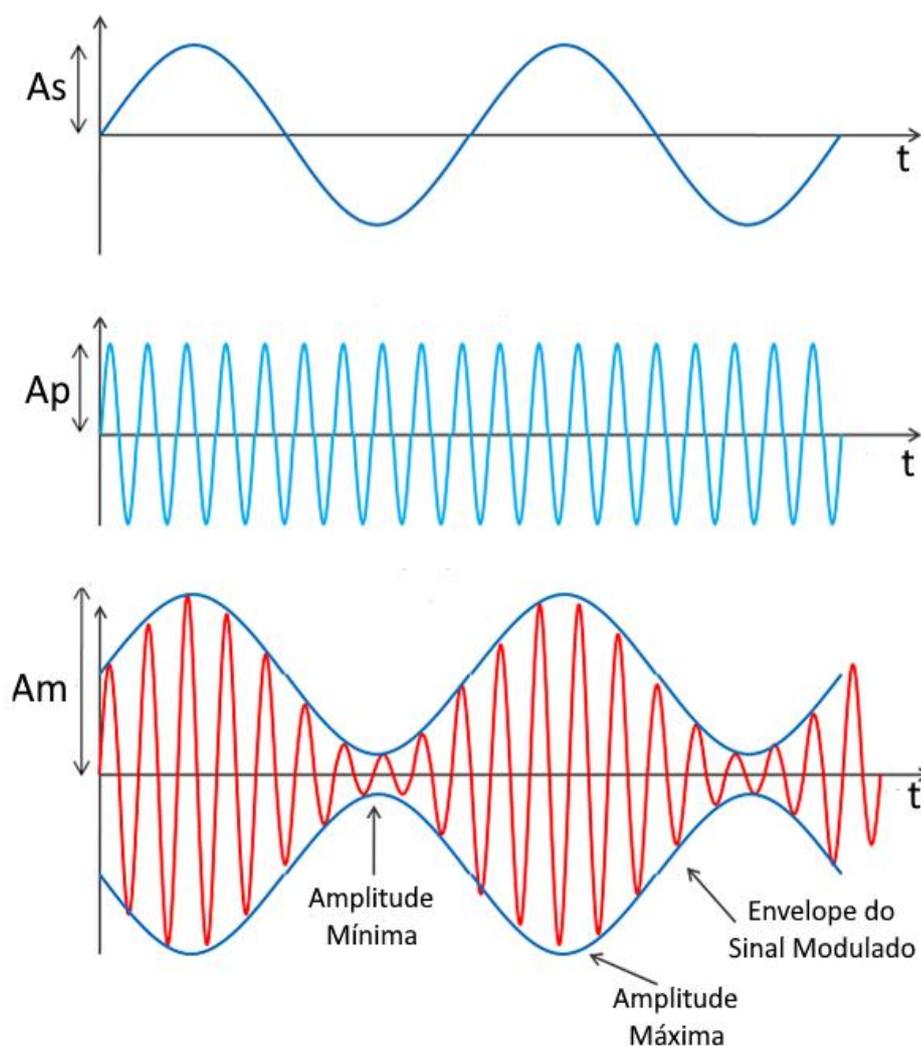
Rádio, por outro lado, é a tecnologia que permite sinalização e comunicação utilizando essas ondas de rádio. Os dispositivos eletrônicos que emitem essas ondas são chamados transmissores e os que as recebem, receptores. Genericamente pode-se referir a transmissores e receptores como “rádios” e a interface entre o circuito elétrico do rádio e o meio de propagação das ondas (vácuo, ar ou outro meio físico) é a 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, sua frequência ou sua fase (SHAIK, 2021).

Figura 24 - Modulação AM

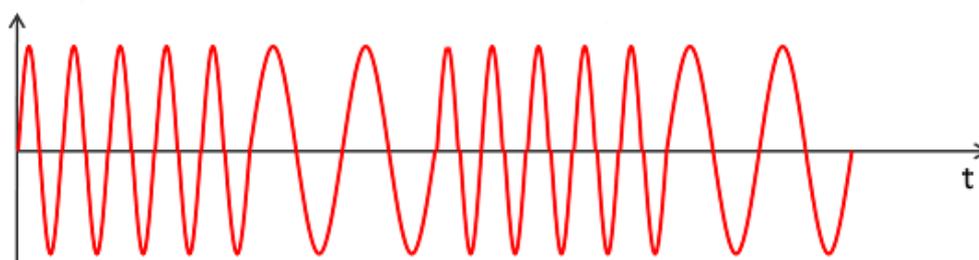


Fonte: Shaik, 2021

Na modulação AM (*Amplitude Modulation* ou Modulação em Amplitude), apenas a amplitude da onda portadora é modificada, mantendo-se sua frequência e fase. A Figura 24 mostra a representação de um sinal que se quer transmitir, com uma amplitude A_s , e a onda portadora, com amplitude A_p . Combinando ambos, tem-se o sinal modulado onde a amplitude resultante A_m é dada pela soma das amplitudes do sinal A_s e da portadora A_p .

A modulação FM (*Frequency Modulation* ou Modulação em Frequência) é um tipo de modulação onde a frequência da portadora varia de acordo com a amplitude do sinal. A amplitude do sinal modulado resultante mantém-se constante. A Figura 25 mostra o sinal modulado em sua frequência a partir do sinal e portadora da Figura 24.

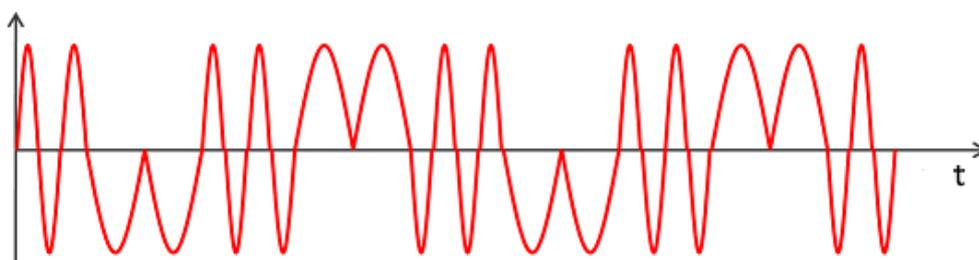
Figura 25 - Modulação FM



Fonte: Shaik, 2021

Já na modulação fase (PM, *Phase Modulation* ou Modulação de Fase), a fase da onda portadora é alterada em função da amplitude do sinal, como mostra a Figura 26. Esta é a modulação mais utilizada na transmissão de sinais digitais, incluindo os GNSS.

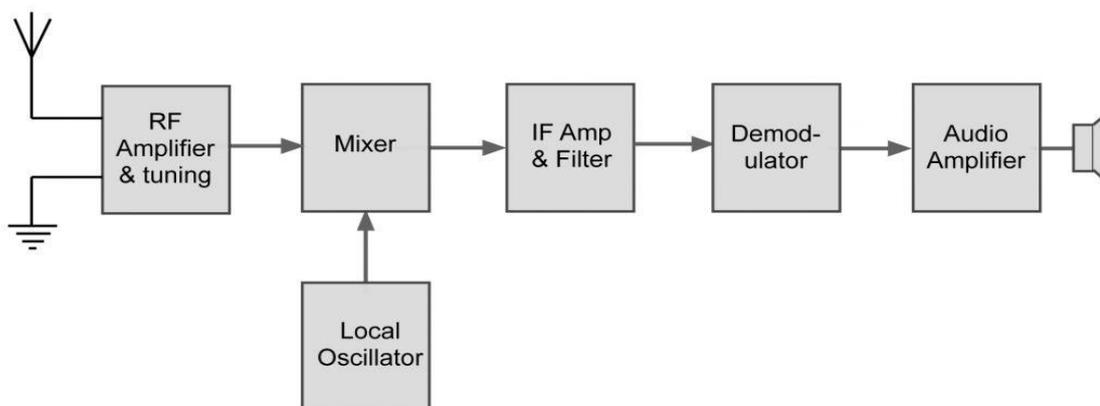
Figura 26 - Modulação por fase



Fonte: Shaik, 2021

Todo este processo, dentro de um rádio, é realizado por componentes discretos (capacitores, resistores, válvulas a vácuo, indutores e transistores, entre outros). A Figura 27 mostra o diagrama em blocos dos principais processos.

Figura 27 - Diagrama em blocos de um receptor de rádio.



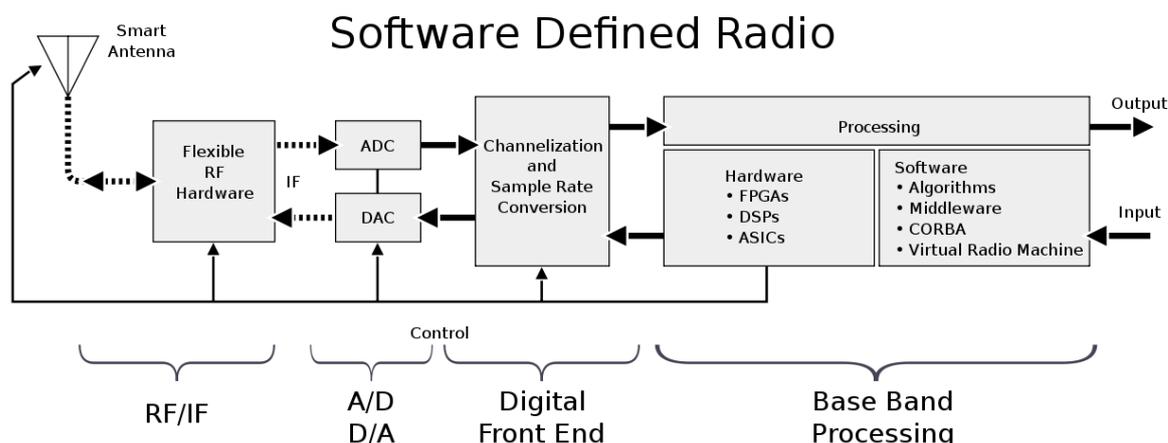
Fonte: Electronics Notes (2020)

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 (Analogico-Digital) na entrada e um DA (Digital-Analogico) na saída (Figura 28). A este aparelho dá-se o nome de SDR (*Software-Defined Radio*, ou Rádio Definido por Software).

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.

Figura 28 - Diagrama de um SDR.



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 de frequência, por exemplo. Ou seja, para um mesmo hardware pode-se implementar os mais diversos tipos de rádios, frequências e modulações apenas trocando os algoritmos de software.

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.

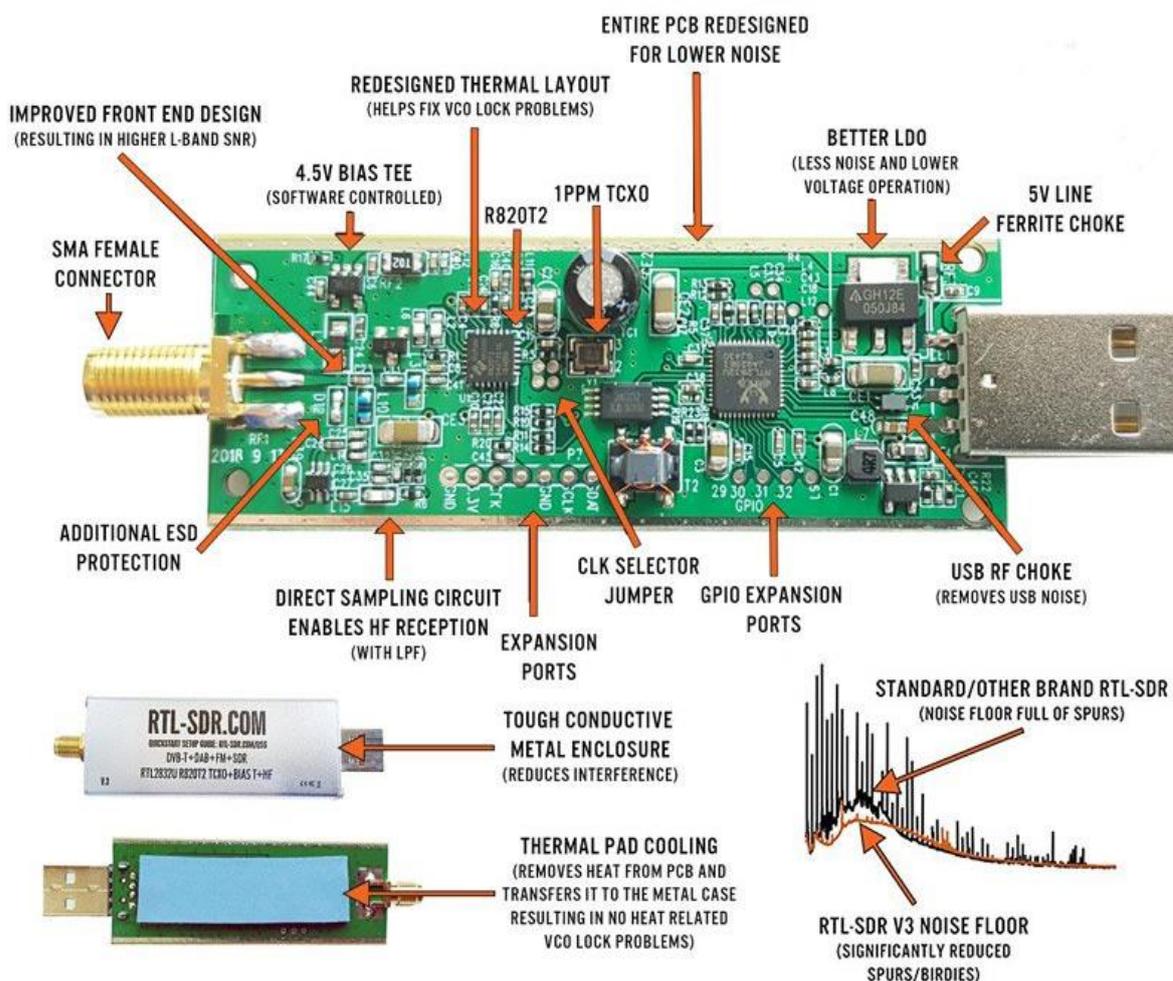
3.5.1 RTL-SDR

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 foi desenvolvido para receptores de TV USB em notebooks, porém os esforços de Antti Palosaari, Eric Fry e Steve Markgrafa da Osmocon (RTL-SDR, 2020) identificaram a possibilidade de este dispositivo ser programado através de plataformas como a GNURadio (GNURADIO, 2020).

Este dispositivo tem um custo reduzido⁷ e, 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 29). Permite, por exemplo, receber sinais de GPS.

⁷ Cerca de 50 dólares americanos em 2020

Figura 29 - RTL-SDR e seus componentes internos.



Fonte: RTL-SDR (2020)

3.5.2 USRP

Para aplicações que demandam transmissão e recepção, com maior banda de frequência e FPGA⁸ para implementação de parte do software conferindo maior velocidade de processamento, há os USRP (*Universal Software Radio Peripheral*, Periférico de Software Radio Universal). Dentre eles, destaca-se a linha completa de dispositivos da Ettus Research / National Instruments (ETTUS, 2020), em especial os modelos USRP B200 e B210.

⁸ Um FPGA (*Field Programmable Gate Array*, Arranjo de Portas Programáveis em Campo) é um circuito integrado projetado para ser configurado por um consumidor ou projetista após a fabricação – de onde advém "programável em campo". A grande maioria dos chips que encontramos em nosso dia-a-dia, circuitos que acompanham as televisões, celulares, etc., já vêm todos pré-programados, isto é, com as suas funcionalidades todas definidas no ato de fabricação. Surgiu então uma categoria nova de hardware reconfigurável, o qual têm as suas funcionalidades definidas exclusivamente pelos usuários e não pelos fabricantes.

A opção B200 possui um canal *full duplex*⁹ 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 30).

Figura 30 - USRP B200 da Ettus Research.



Fonte: 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 (pulso por segundo) e 10 MHz (fornecidos por geradores externos), bem como um conector tipo molex padrão para incorporar bases de tempo como o OCXO (*oven-controlled oscillator*) e o Oscilador Disciplinado por GPS (GPSDO, *GPS Disciplined Oscillator*,) mostrado na Figura 31. Aceita também um oscilador *on-board* de Césio (ETTUS, 2020).

⁹ **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 31 - GPSDO para o USRP B200 da Ettus Research.

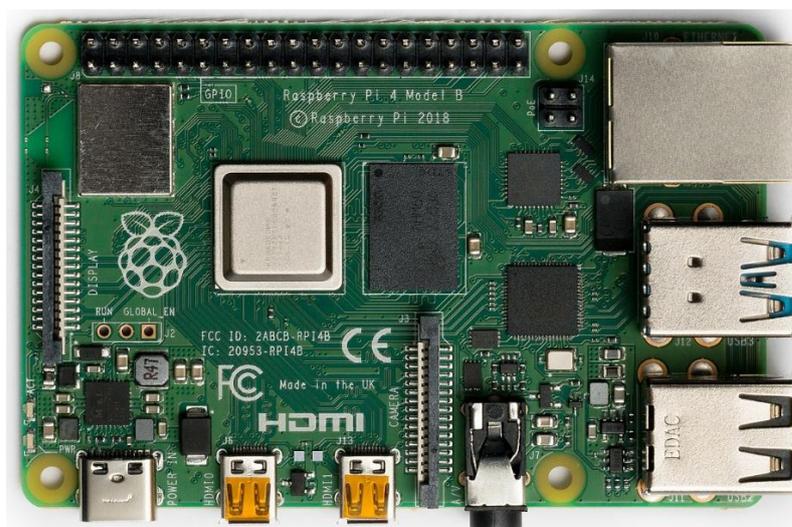


Fonte: Ettus (2020)

3.5.3 Raspberry Pi

O SDR depende de um suporte computacional para funcionar. Pode-se usar um notebook ou um computador desktop convencional, mas quando se pensa em trabalho de campo faz-se necessária a utilização de *hardware* mais compacto. Usa-se a sigla SBC (*Single-Board Computer*, Computador em uma única placa) quando o computador completo está em uma única placa de circuito impresso contendo o processador, memória e dispositivos de entrada e saída. Dentre os vários modelos e fabricantes existentes no mercado, destaca-se o Raspberry Pi (Figura 32), desenvolvido na Inglaterra (RASPBERRY PI FOUNDATION, 2020).

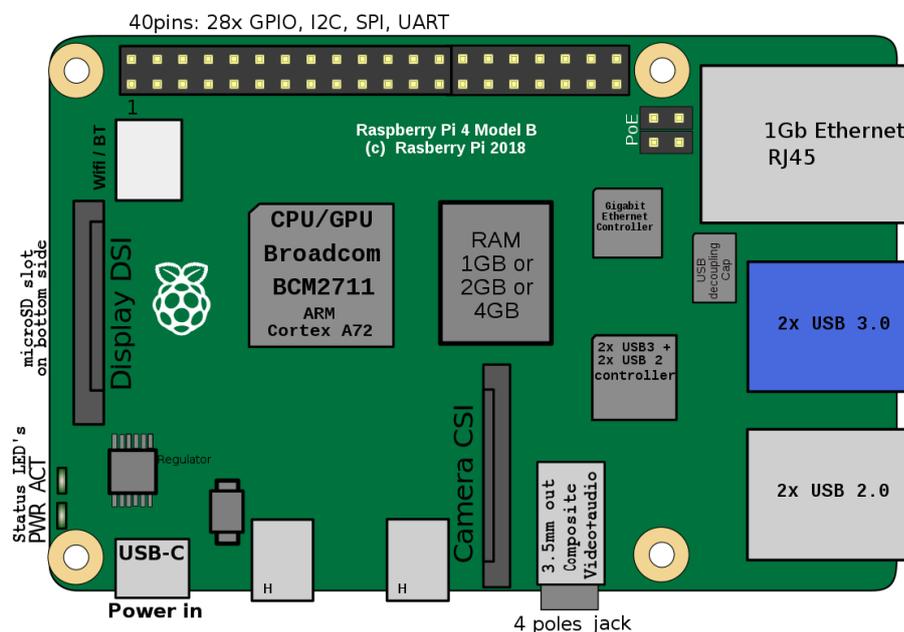
Figura 32 - Raspberry Pi 4.



Fonte: RASPBERRY PI FOUNDATION (2020).

Em sua versão mais recente de 2020, segundo a Raspberry Pi Foundation (2020), o Raspberry Pi 4 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*, Entrada/Saída de Uso Geral). É comercializado com três opções de memória interna (2, 4 e 8 GB) e usa um cartão MicroSD para armazenamento e instalação do Sistema Operacional (Figura 33). Suas dimensões são reduzidas (86 x 57 cm) quando comparado a um computador desktop ou notebook, e o consumo de energia é de apenas 3.4 W em repouso, tornando o Raspberry uma excelente opção para produtos ou protótipos onde é necessário embarcar um suporte computacional. A fonte de alimentação recomendada pelo fabricante é de 15 W (5 V em 3 A), permitindo o uso de baterias de LiMH (*Lithium-Metal Hydride*, Hidreto Metálico de Lítio) em aplicações autônomas.

Figura 33 - Disposição de componentes e conectores do Raspberry Pi.



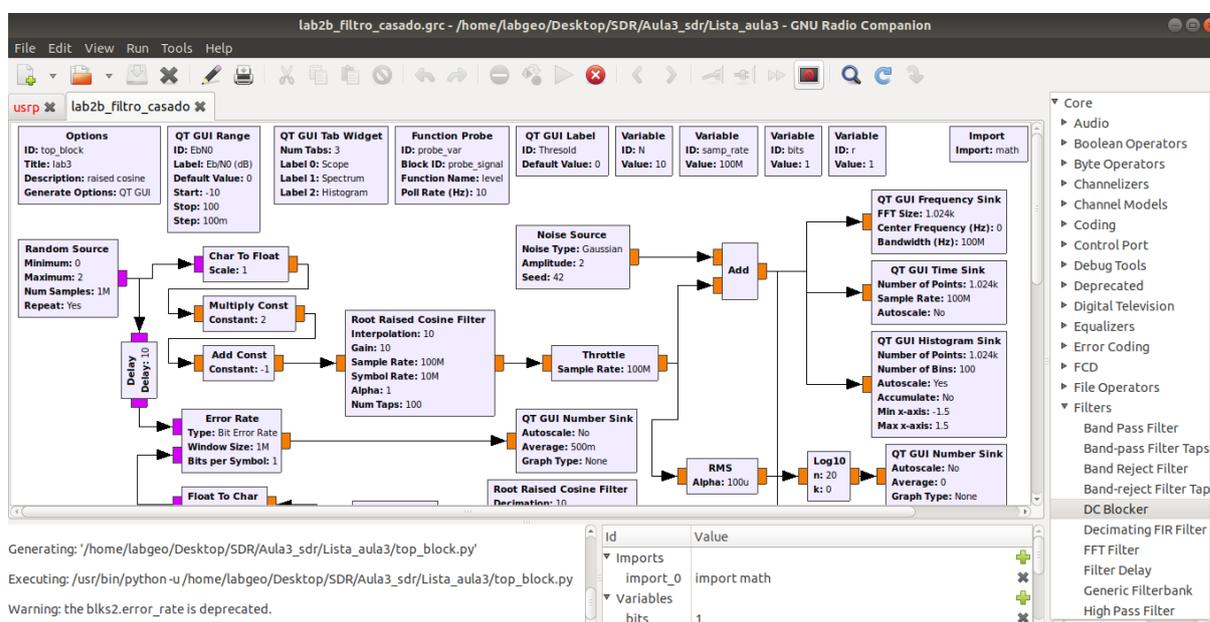
Fonte: RASPBERRY PI FOUNDATION (2020).

3.5.4 GNURadio

Há três principais plataformas de desenvolvimento de software para os SDR: MATLAB (MathWorks), LabVIEW (National Instruments) e GNURadio. Levando em consideração que LabView e MATLAB são ferramentas pagas e GNURadio é software livre, este trabalho vai se concentrar nesta solução.

O GNURadio é um conjunto de ferramentas de desenvolvimento de software gratuito criado em 2001. Sua interface usa blocos de processamento de sinais que são conectados graficamente para programar rádios definidos por software e sistemas de processamento de sinais. Pode ser usado com hardware RF externo para criar rádios reais ou sem hardware, em um ambiente de simulação. É amplamente utilizado em ambientes de *hobby*, acadêmico e comercial dando suporte tanto às pesquisas de comunicações sem fio quanto a sistemas de rádio do mundo real.

Figura 34 - Interface gráfica do GNURadio.



Fonte: Autoria própria.

O GNURadio fornece a estrutura e as ferramentas para construir e executar rádios definidos por software ou apenas aplicativos gerais de processamento de sinal. Os aplicativos do GNURadio são geralmente conhecidos como "*flowgraphs*", que são uma série de blocos de processamento de sinal conectados em conjunto, descrevendo assim um fluxo de dados (Figura 34).

Cada bloco representa um programa escrito em C++ que realiza algum tipo de processamento como um filtro, somador de sinais, gerador de ruído ou interface com hardware externo. Este programa normalmente está associado com um programa em Python que implementa sua interface gráfica. Como todos os sistemas de rádio definidos por software, a capacidade de reconfiguração é um recurso-chave. Em vez de usar diferentes rádios projetados e construídos para fins

específicos usando componentes físicos, um rádio único, de uso geral, pode ser usado como *front-end* e o software de processamento de sinal (o GNURadio) irá definir o que o rádio irá fazer. O GNURadio fornece muitos recursos de plotagem e visualização de dados, incluindo displays, diagramas de constelação de símbolos e displays de escopo. Estes são comumente usados tanto para depurar aplicativos de rádio quanto como uma interface do usuário para o aplicativo final (GNURADIO, 2020).

Além de acelerar o processo de desenvolvimento, o produto final pode resultar em um produto compacto instalado em algum suporte computacional embarcado, com sistema operacional Linux¹⁰, tornando-se 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.

3.6 ANTENAS

Segundo Graf (1999), na engenharia de comunicações uma antena é a interface entre ondas de rádio que se propagam através do espaço e correntes elétricas movendo-se em condutores de metal de um transmissor ou receptor. Na transmissão, o rádio fornece uma corrente elétrica aos terminais da antena e a antena irradia essa energia sob a forma de ondas eletromagnéticas (ou ondas de rádio). Na recepção, uma antena intercepta parte da potência dessa onda e produz uma corrente elétrica em seus terminais, que é aplicada a um receptor.

A história da antena tem seu início em 1842. Neste ano, o inventor da telegrafia por fio, Joseph Henry, em uma sala da Universidade de Princeton, aplicou um sinal a um circuito e observou que as agulhas de outro circuito, localizado na adega, foram magnetizadas pela corrente. O experimento foi repetido algumas vezes até se atingir uma distância de mil metros entre os dois circuitos (STUTZMAN e THIELE, 1998).

¹⁰ 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.

Porém foi Hertz quem realizou o primeiro experimento aceitável de antena em 1887, que consistiu em um sistema para produzir e detectar ondas eletromagnéticas de rádio aplicando os princípios das Equações de Eletromagnetismo de Maxwell. 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 e BOYLE, 2008).

Uma antena é composta por uma matriz de condutores (elementos), eletricamente conectados ao receptor ou transmissor. As antenas podem ser projetadas para transmitir e receber ondas de rádio em todas as direções horizontais igualmente (antenas omnidirecionais), ou preferencialmente em uma determinada direção (antenas direcionais ou de alto ganho). Uma antena pode incluir componentes não conectados ao transmissor, refletores parabólicos ou elementos ditos parasitas ou passivos, que servem para direcionar as ondas de rádio para um padrão de radiação desejado (BALANIS, 2005 e PAMBOUKIAN, 2020).

3.6.1 Antenas Independentes da Frequência

Antenas Independentes da Frequência, também conhecidas como Antenas de Banda Larga, são capazes de trabalhar em uma faixa ampla de frequências. Este termo surgiu após a década de 1950 (BALANIS, 2005), quando houve a necessidade de estender as larguras de banda para valores mais elevados.

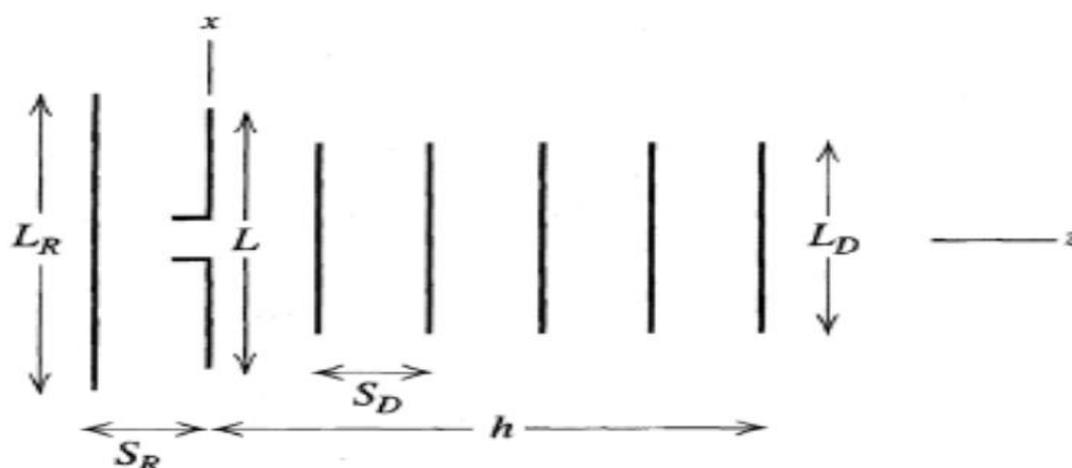
Neste conceito as características fundamentais podem ficar inalteradas se seu tamanho físico e a frequência operação, ou comprimento de onda, forem modificados em conjunto. Segundo Balanis (2005), se todas as dimensões físicas forem reduzidas por um fator de dois, o desempenho da antena permanecerá inalterado se a frequência operação for aumentada por um fator de dois.

3.6.2 Antena Log-Periódica – Conjunto de Dipolos

A log-periódica não faz parte das antenas independentes da frequência mas suas características aproximam-se delas. Assemelha-se a uma Yagi-Uda, também formada por um conjunto de dipolos, porém todos os seus elementos são energizados, ou seja, todos os elementos são ativos. Stutzman e Thiele (1998) apontam também que a antena log-periódica possui uma largura de banda ativa muito maior do que a Yagi-Uda.

Stutzman e Thiele (1998) explicam a estrutura da antena YAGI-UDA: possuem apenas um elemento energizado (ressonante, L) e os demais são ditos “parasitas” (refletores (L_R) ou direcionais (L_D)). Os espaçamentos desses elementos dividem-se em espaçamento do refletor (S_R) e espaçamento do direcional (S_D) (Figura 35).

Figura 35 - Representação de uma antena YAGI-UDA

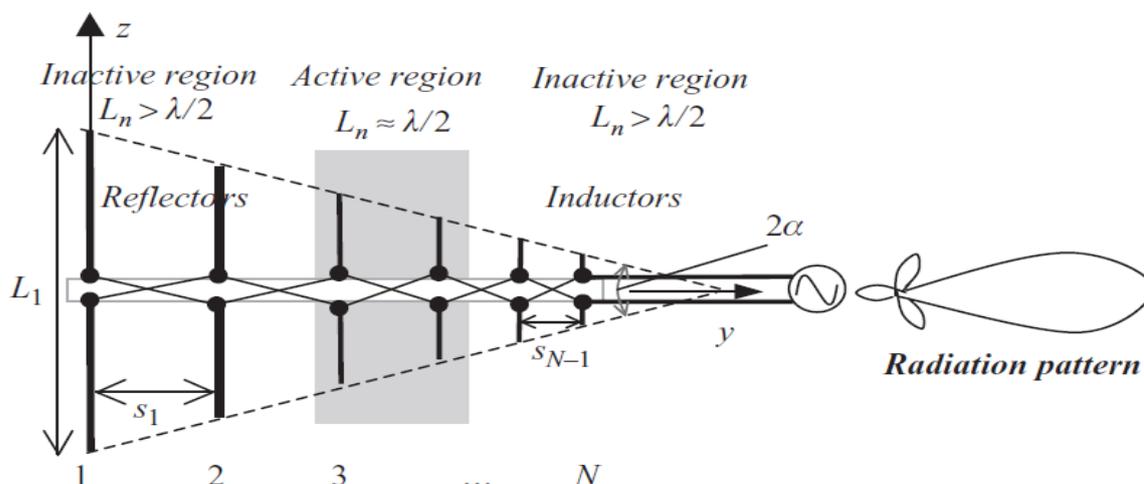


Fonte: Stutzman e Thiele, 1998

Já a log-periódica tem todos seus elementos alimentados e essa alimentação ocorre normalmente em sua extremidade, onde o comprimento do dipolo é menor. Segundo Stutzman e Thiele (1998), antena log-periódica é definida pela sua geometria estrutural (Figura 36) onde suas características de impedância e irradiação são repetidas periodicamente em função do logaritmo da frequência. Sua geometria consiste em múltiplos dipolos com diferentes comprimentos

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

Figura 36 - Representação da geometria da antena log-periódica



Fonte: Huang e Boyle (2008)

Na Figura 36, Huang e Boyle (2008) apresentam a geometria e o padrão de irradiação da antena log-periódica (direcional). A relação de escala e o fator de espaçamento são dados como:

$$\tau = \frac{L_2}{L_1} = \frac{L_{n+1}}{L_n} = \frac{s_{n+1}}{s_n} = \frac{d_{n+1}}{d_n} = \frac{g_{n+2}}{g_n} < 1 \quad (3.18)$$

$$\sigma = \frac{s_1}{2L_1} = \frac{s_n}{2L_n} \quad (3.19)$$

Onde temos os seguintes parâmetros:

- 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;
- τ = relação de fator de escala;
- σ = fator de espaçamento.
- g = espaçamento entre os elementos

3.6.3 Antena omnidirecional

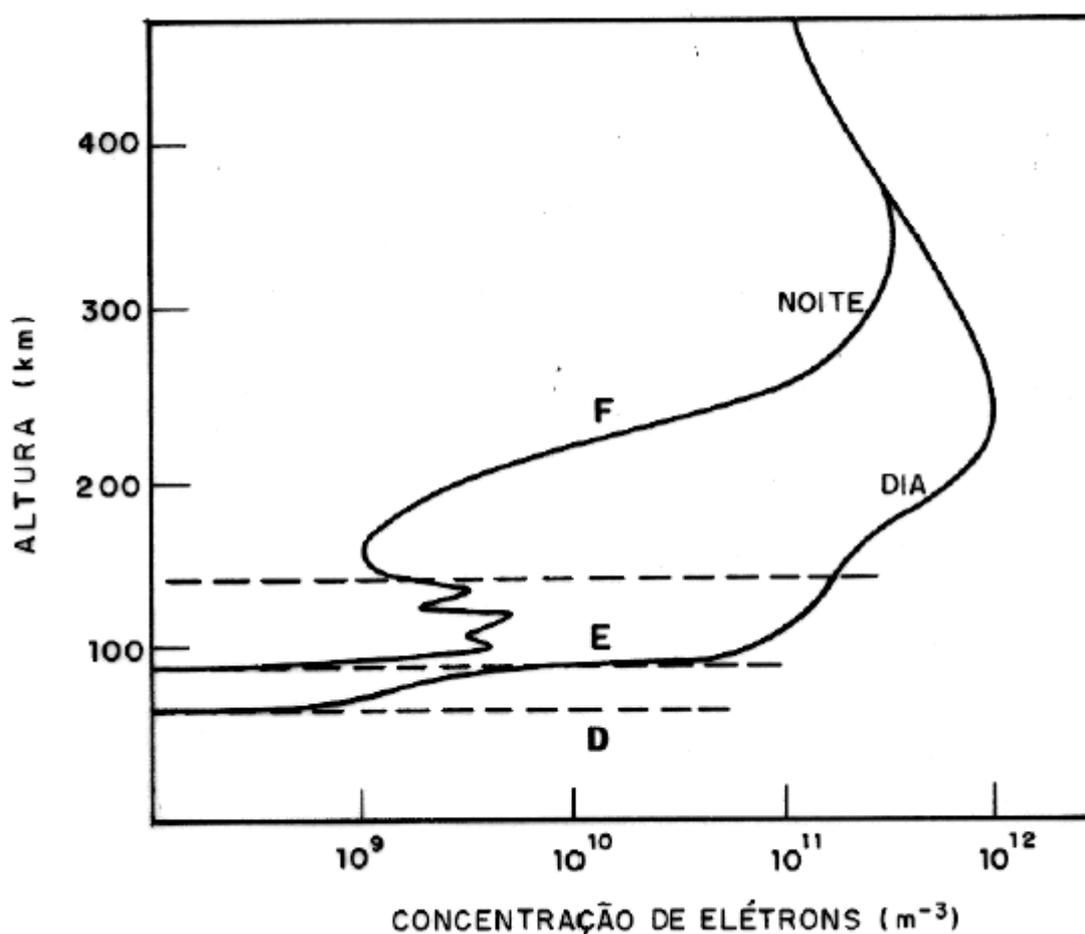
Antena omnidirecional é aquela na qual a onda eletromagnética propaga-se em todas as direções perpendiculares a um eixo. Esse tipo de antena tem uso facilitado por não precisar de direcionamento, embora demandem mais potência que as antenas direcionais, onde toda a energia a ser transmitida é concentrada em um único feixe. Não funcionam bem para enlaces longos, a não ser que sejam utilizados amplificadores externos (BALANIS, 2005).

3.7 FREQUÊNCIAS E PROPAGAÇÃO

A escolha das frequências utilizadas em um projeto envolvendo radio responde a diferentes critérios. O primeiro é a adequação às regras definidas pela União Internacional de Telecomunicações (ITU, *International Telecommunications Union*). A ITU 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).

O segundo fator é o meio de propagação, que inclui a atmosfera “neutra” terrestre e suas camadas, definidas pelas propriedades físicas do gás que as compõe (temperatura, pressão, umidade e composição): troposfera (0-10 km), estratosfera (10-50 km), mesosfera (50-80 km), termosfera (80-500 km), e exosfera (> 500 km). Superposto à componente neutra da atmosfera há um meio fracamente ionizado contendo elétrons livres, a ionosfera. É formada pela ionização da componente neutra pela radiação solar UV, EUV e raios X. Estende-se entre 60 km e 1000 km de altura. De acordo com a produção iônica e a altitude, a ionosfera se divide em camadas (Figura 37). A camada F2 é a região onde a produção é máxima, 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).

Figura 37 – A partir dos gráficos feitos por uma ionossonda, pode-se desenhar a representação das camadas da ionosfera e suas altitudes em condições diurnas e noturnas, versus o EDP (*electron density profile*, perfil de densidade de elétrons)



Fonte: (GIRO, 2020)

A metodologia adotada para tratar a propagação nos dois meios, a atmosfera neutra e a ionosfera, é diferente: 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. Atrasos de propagação¹¹ podem gerar uma diferença entre a posição estimada e sua posição atual quando se utiliza de radiofrequências para medição de distância. Estes atrasos no trajeto podem ser estimados através de um modelo de propagação adequado, conforme a faixa de frequência utilizada. 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 (PAMBOUKIAN, 2020).

¹¹ Para ondas eletromagnéticas, atraso de propagação é o desvio entre a propagação em um meio qualquer e a propagação realizada na velocidade da luz.

Segundo Macho (2018) e Honma et al (2008) há diversos modelos de propagação do sinal no meio atmosférico, e sua escolha depende da altitude do *transponder*. Para baixas altitudes (até 50 km) o sinal não é afetado pela ionosfera e pode-se aplicar o conceito de planos paralelos. Ou seja, supõe-se que tanto a superfície da Terra, onde fica a estação, quanto o plano onde está o *transponder* sejam paralelos. A correção de atraso de propagação (Δ_{pd}) pode ser calculada por:

$$\Delta_{pd} = \frac{c \times T_{atm}}{\sin \varepsilon} \quad (3.20)$$

Nesta equação, c é a velocidade da luz, T_{atm} é o tempo de atraso atmosférico na direção perpendicular aos planos paralelos (zênite) e ε é o ângulo de elevação do *transponder* em relação à estação em Terra (KAUFMANN e KAUFMANN, 2012)

Já a parte ionizada da atmosfera terrestre, ou ionosfera, é um meio dispersivo, onde o índice de refração N depende da radiofrequência. 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 (TEC – *Total Electronic Content*) ao longo da linha de visada. Para radiofrequências na faixa de micro-ondas são esperados atrasos temporais da ordem de alguns ns (nano segundos, ou seja, 10^{-9} s) (PAMBOUKIAN, 2020).

Considerando que este trabalho tem como escopo instrumentação para uso na troposfera e estratosfera, o aprofundamento sobre os atrasos ionosféricos será objeto de trabalhos futuros. Uma boa referência sobre isso está em Pamboukian (2020) e Macho (2018), onde os atrasos ionosféricos foram caracterizados. Para os protótipos será utilizada a frequência de 410 MHz sugerida em Pamboukian (2020), visto que os primeiros ensaios ocorrerão na troposfera e permitem um ganho maior com antenas omnidirecionais (BALANIS, 2005).

3.8 BASES DE TEMPO

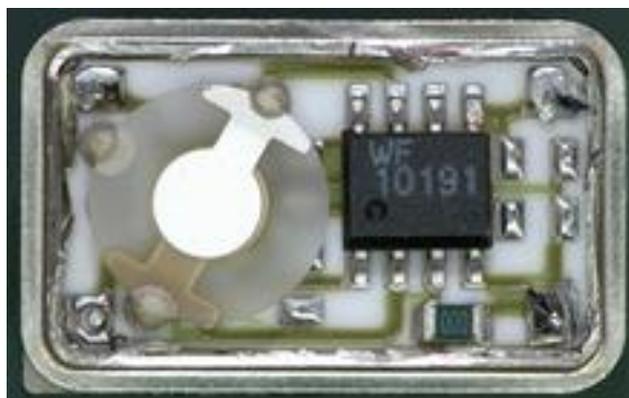
Base ou referência de tempo, em eletrônica, é um dispositivo ou circuito que determina um ritmo ao circuito através do fornecimento de um sinal em frequência constante. Este sinal pode ser utilizado para contagem de tempo e outras aplicações dentro do circuito (MARRIAM-WEBSTER, 2018).

Há vários tipos de circuitos ou dispositivos utilizados para a geração de bases de tempo, sendo os principais: a combinação de um indutor a um capacitor, cristais de quartzo (com ou sem estabilização térmica, podendo ser disciplinados por um sinal externo), GPSDO e relógios atômicos (KUMAR, 2008).

3.8.1 Osciladores

Um oscilador de cristal é um circuito eletrônico que usa a ressonância mecânica de um cristal vibratório de material piezelétrico¹² para criar um sinal elétrico com frequência constante. Esta frequência é frequentemente usada para acompanhar o tempo, como em relógios de quartzo, para fornecer um sinal de relógio estável para circuitos integrados digitais, e para estabilizar as frequências para transmissores de rádio e receptores. O tipo mais comum de ressonador piezelétrico usado é o cristal de quartzo, de modo que circuitos osciladores que os incorporam ficaram conhecidos como osciladores de cristal, mas outros materiais piezelétricos, incluindo cerâmicas policristalinas, são usados em circuitos semelhantes (HOROWITZ e HILL, 1989).

Figura 38 - Vista interna de um moderno oscilador a cristal.



Fonte: David L Jones, 2018

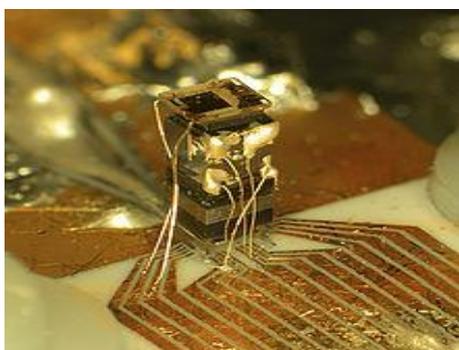
O circuito oscilador de cristal usa um sinal de tensão variável de um ressonador a quartzo. A taxa de expansão e contração do quartzo é a frequência ressonante, e é determinada pelo corte e tamanho do cristal. Sua frequência, ainda

¹² Piezeletricidade foi descoberta por Jacques e Pierre Curie em 1880. Paul Langevin investigou pela primeira vez ressonadores de quartzo para uso em sonar durante a Primeira Guerra Mundial. O primeiro oscilador controlado por cristais, usando um cristal de sal Rochelle, foi construído em 1917 e patenteado em 1918 por Alexander M. Nicholson no Bell Telephone Laboratories, embora sua prioridade tenha sido contestada por Walter Guyton Cady. Cady construiu o primeiro oscilador de cristal de quartzo em 1921. Outros inovadores iniciais em osciladores de cristal de quartzo incluem G. W. Pierce e Louis Essen.

que bastante precisa para a maioria dos dispositivos eletrônicos como celulares e computadores, possui variações tanto em operação quanto com o seu tempo de uso. Um dos principais fatores para essas variações é a temperatura ambiente. Dispositivos como os TCXO (*Temperature-compensated crystal oscillator*, Oscilador a Cristal com Compensação por Temperatura) e os OCXO (*Oven Compensated Crystal Oscillator*, Oscilador a Cristal Compensado por Forno) encapsulam os osciladores de quartzo em uma câmara com controle de temperatura que, no caso dos OCXO, pode chegar a 80 graus (HOROWITZ e HILL, 1989).

Alguns osciladores podem ter essa variação compensada através de sinais externos de alta precisão. Diz-se, nesse caso, que são osciladores “disciplinados”. Normalmente usam fontes atômicas como rubídio, césio ou outras técnicas que aproveitam as oscilações naturais de átomos. No caso do césio em particular, sua oscilação de aproximadamente 9×10^9 Hz é utilizada atualmente para definir um segundo¹³. Outra forma de se disciplinar osciladores é através do sinal de tempo emitido pelos sistemas GPS, que usa relógios atômicos como referência. Atualmente chegou-se a um grau de miniaturização que relógios atômicos foram reduzidos a um encapsulamento de 4 x 3.5 x 1 cm e podem ser incorporados a placas de circuito impresso. Estes dispositivos são conhecidos como CSAC (*Chip Scale Atomic Clock*, Relógios Atômicos em Tamanho de Chip), como o da Figura 39. Seu custo, embora ainda alto (cerca de 6 mil dólares americanos em 2019) ainda é muito mais acessível que os tradicionais relógios atômicos de laboratório (MICROSEMI, 2019).

Figura 39 - O relógio de césio miniaturizado de um CSAC (esquerda) e seu encapsulamento comercial (direita)



Fonte: (MICROSEMI, 2019)

¹³ Atualmente o segundo é a duração de 9.192.631.770 períodos da radiação correspondente à transição entre dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133, segundo o Comitê Internacional de Pesos e Medidas.

3.8.2 Usando o próprio GPS: o GPSDO

GPSDO (*GPS Disciplined Oscillator*, Oscilador Disciplinado ou Sincronizado por sinal de GPS) é um oscilador a quartzo estabilizado termicamente (OCXO/TCXO) ou mesmo de rubídio que periodicamente é aferido pelo sinal de tempo enviado pelos satélites dos sistemas GNSS. Os GPSDO são utilizados como uma referência de tempo indispensável para uma variedade de aplicações. Por exemplo, são usados como base para o Tempo Universal Coordenado (UTC, *Universal Time Coordination*) em todo o mundo e é controlado pelo Instituto Internacional de Pesos e Medidas (BIPM, *Bureau International des Poids et Mesures*).

Centros de cronometragem em todo o mundo usam GPS para alinhar suas próprias escalas de tempo à UTC. Os padrões baseados em GPS são usados para fornecer sincronização com estações base sem fio e como padrões de laboratórios como uma alternativa de menor custo às referências baseadas em césio. Os GPSDOs podem ser usados para sincronizar múltiplos receptores de RF, permitindo a operação coerente de fase entre os receptores (NIST, 2020).

3.8.3 Aging, drift e accuracy das bases de tempo

Na literatura pesquisada fala-se de *drift*, *aging* e *accuracy* das bases de tempo (HOROWITZ e HILL, 1989). Esses dados, aliados ao custo, são de grande importância 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** (deriva) é o acúmulo de erro de acurácia ao longo do tempo;
- **aging** (envelhecimento ou degradação): bases de tempo, durante sua vida útil, sofrem uma degradação 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 4 mostra uma comparação entre diversos tipos de osciladores e seus desvios ao longo do tempo comparados com oscilador de Césio (referência internacional de tempo):

Tabela 4 - Acurácia e *aging* dos principais tipos de bases de tempo.

| Oscilador | Acurácia | | Deriva | | | |
|-----------|-------------|--------------|-------------|--------------|---------------|-----------------|
| | 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 |
| Rubídio | 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 |
| Césio | 2E-11 | 0,02 | 0E+00 | 0,00 | 0,000 | 0,00000 |

3.9 O QUE É O GNSS

GNSS significa *Global Navigation Satellite System* e representa um conjunto de sistemas que utilizam satélites como referencial para geolocalização e navegação. Nosso planeta é servido por alguns sistemas GNSS: GPS americano, GALILEO europeu, GLONASS russo, BEIDOU chinês entre outros. Levando em conta o nosso país e a cobertura, os sistemas que mais nos atendem são o GPS e o GLONASS (MONICO, 2008). Estes satélites possuem muitos equipamentos embarcados: relógios de precisão (atômicos), equipamentos de transmissão do sinal GEOLOCALizador e receptor/transmissor para as operações de controle, sistemas de controle de atitude, placas fotovoltaicas. Também há proteção contra raios cósmicos e radiações solares. Estes e outros dispositivos encarecem e aumentam seu peso.

Ainda segundo Monico (2008), tomando como base o GPS americano, cada satélite tem o tamanho de um pequeno ônibus e pesa cerca de quatro toneladas. Têm um custo aproximado de USD 550 milhões cada. Incluindo as estações de monitoramento e controle, a constelação de 32 satélites da terceira geração do GPS americano custará, assim que estiver implementada, algo na ordem de USD 25 bilhões, ou 2 bilhões por ano de operação fora os custos de operação e lançamento.

Os sistemas de GNSS atualmente em operação consistem em uma constelação de satélites em grande altitude dispostos em planos orbitais de tal modo

que pelo menos quatro deles estejam em posição favorável para que o receptor no alvo possa se localizar através de triangulação.

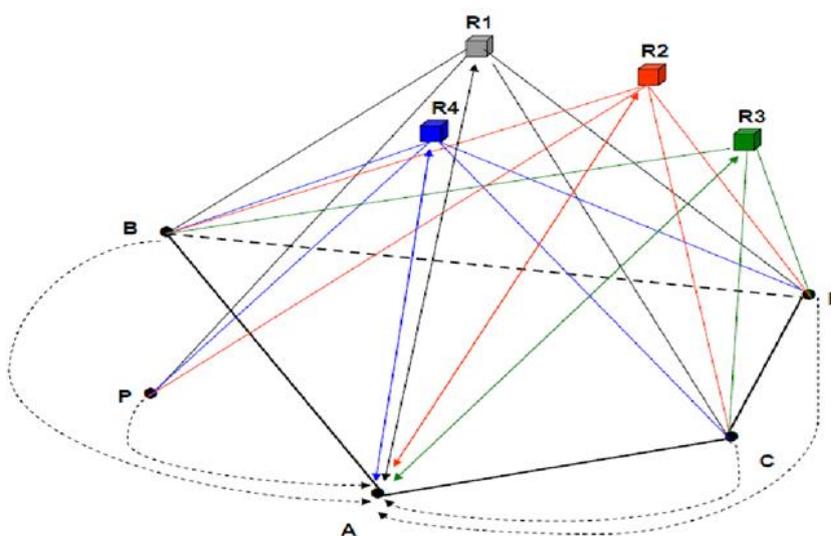
3.10 FUNDAMENTOS DO GEOLOCAL

O GEOLOCAL propõe determinar a posição de um alvo P através da determinação de distâncias calculadas a partir dos tempos de propagação de sinais de rádio entre um rádio receptor (o alvo P) e transmissores (as “estações”) localizados em solo. O sinal das estações chega ao alvo através de um *transponder* no espaço, como ilustra a Figura 40. As estações possuem relógios sincronizados e suas coordenadas geográficas estão definidas.

O *transponder* pode ser instalado a bordo de um satélite, balão estratosférico, avião, drone, nano satélite ou *transponder* natural, como o excesso de ionização produzido durante chuvas de meteoros. A posição do *transponder* é desconhecida e ele inclusive pode estar em movimento, mas isso pode ser determinado por multilateração (3.2) a partir das estações.

Entretanto, para a localização do alvo, não basta apenas um *transponder*: são necessários pelo menos quatro ou o mesmo em quatro posições diferentes e não alinhadas ao longo do tempo, como proposto pela Figura 40.

Figura 40 - Representação do sistema GEOLOCAL com quatro estações (A, B, C e D), quatro *transponders* (R1, R2, R3 e R4) e um alvo P.



Fonte: PAMBOUKIAN et al., 2016.

3.10.1 Algoritmo de cálculo

O texto deste item foi transcrito e adaptado do artigo *A New Independent GPS-Free System for Geo-Referencing from Space* (KAUFMANN, KAUFMANN, *et al.*, 2014)

O sinal codificado é transmitido pela estação de controle A, retransmitido pelos *transponders* no espaço (R1, R2, R3, R4) e recebido pelas quatro estações de referência (A, B, C, D) e pelo alvo (P), produzindo cinco medidas de tempo entre transmissão e recepção. As diferenças de tempo dos relógios medidas nas estações e no alvo são enviadas, por algum meio, para a estação de controle A (linhas tracejadas na Figura 14), que calcula as distâncias AR, BR, CR, DR e PR.

No sistema GEOLocal as distâncias podem ser determinadas pelo conjunto de equações 3.1:

$$\begin{aligned}
 AR(\delta_R, \Delta_{pdAR}) &= (\Delta t_A - \delta_{At} - \delta_{Ar} - \delta_R) (c/2) - \Delta_{pdAR} \\
 BR(\delta_R, \Delta_{pdAR}, \Delta_{pdBR}) &= (\Delta t_B - \delta_{At} - \delta_{Br} - \delta_R) c - \Delta_{pdBR} - \Delta_{pdAR} - AR(\delta_R) \\
 CR(\delta_R, \Delta_{pdAR}, \Delta_{pdCR}) &= (\Delta t_C - \delta_{At} - \delta_{Cr} - \delta_R) c - \Delta_{pdCR} - \Delta_{pdAR} - AR(\delta_R) \quad (3.21) \\
 DR(\delta_R, \Delta_{pdAR}, \Delta_{pdDR}) &= (\Delta t_D - \delta_{At} - \delta_{Dr} - \delta_R) c - \Delta_{pdDR} - \Delta_{pdAR} - AR(\delta_R) \\
 PR(\delta_R, \Delta_{pdAR}, \Delta_{pdPR}) &= (\Delta t_P - \delta_{At} - \delta_{Pr} - \delta_R) c - \Delta_{pdPR} - \Delta_{pdAR} - AR(\delta_R)
 \end{aligned}$$

onde:

- **AR, BR, CR, DR e PR:** distâncias das estações A, B, C, D e do alvo P à *transponder* R. São expressas em função do atraso causado pelo tempo de trânsito do sinal dentro do *transponder* (δ_R) e corrigidas pelos respectivos atrasos de propagação (*path delays*) Δ_{pd} ¹⁴.
- **$\Delta t_A, \Delta t_B, \Delta t_C, \Delta t_D$ e Δt_P :** diferenças de tempo medidas nas estações 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 estação A, sua retransmissão pelo *transponder* R e a chegada às estações ou ao alvo;
- **δ_{At} :** tempo de trânsito do sinal nos circuitos, cabos e antena da estação A;
- **$\delta_{Ar}, \delta_{Br}, \delta_{Cr}, \delta_{Dr}$ e δ_{Pr} :** tempo de trânsito do sinal nos circuitos, cabos e antenas das estações A, B, C, D e do alvo P;
- **δ_R :** tempo de trânsito do sinal no *transponder* (R);

¹⁴ Em um sistema ideal a propagação dos sinais se daria na velocidade da luz no vácuo. Entretanto, este sinal passa por meios bem diferentes do vácuo: ionosfera, troposfera, fios, circuitos. O conhecimento, medição ou estimativa desses atrasos é de fundamental importância considerando-se que 10 ns correspondem a um erro aproximado de 3 metros na determinação da distância.

- c : velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo;
- Δ_{pdAR} , Δ_{pdBR} , Δ_{pdCR} , Δ_{pdDR} e Δ_{pdPR} : atrasos na propagação do sinal (*path delays*).

O segmento AR é descontado do percurso em cada uma das equações; na primeira equação a distância é dividida por dois 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:

- δ_{At} , δ_{Ar} , δ_{Br} , δ_{Cr} , δ_{Dr} e δ_{Pr} – podem ser estimados ou medidos em bancada;
- Δt_A , Δt_B , Δt_C , Δt_D e Δt_P – são calculados considerando a diferença entre o instante de transmissão e o de chegada do sinal.

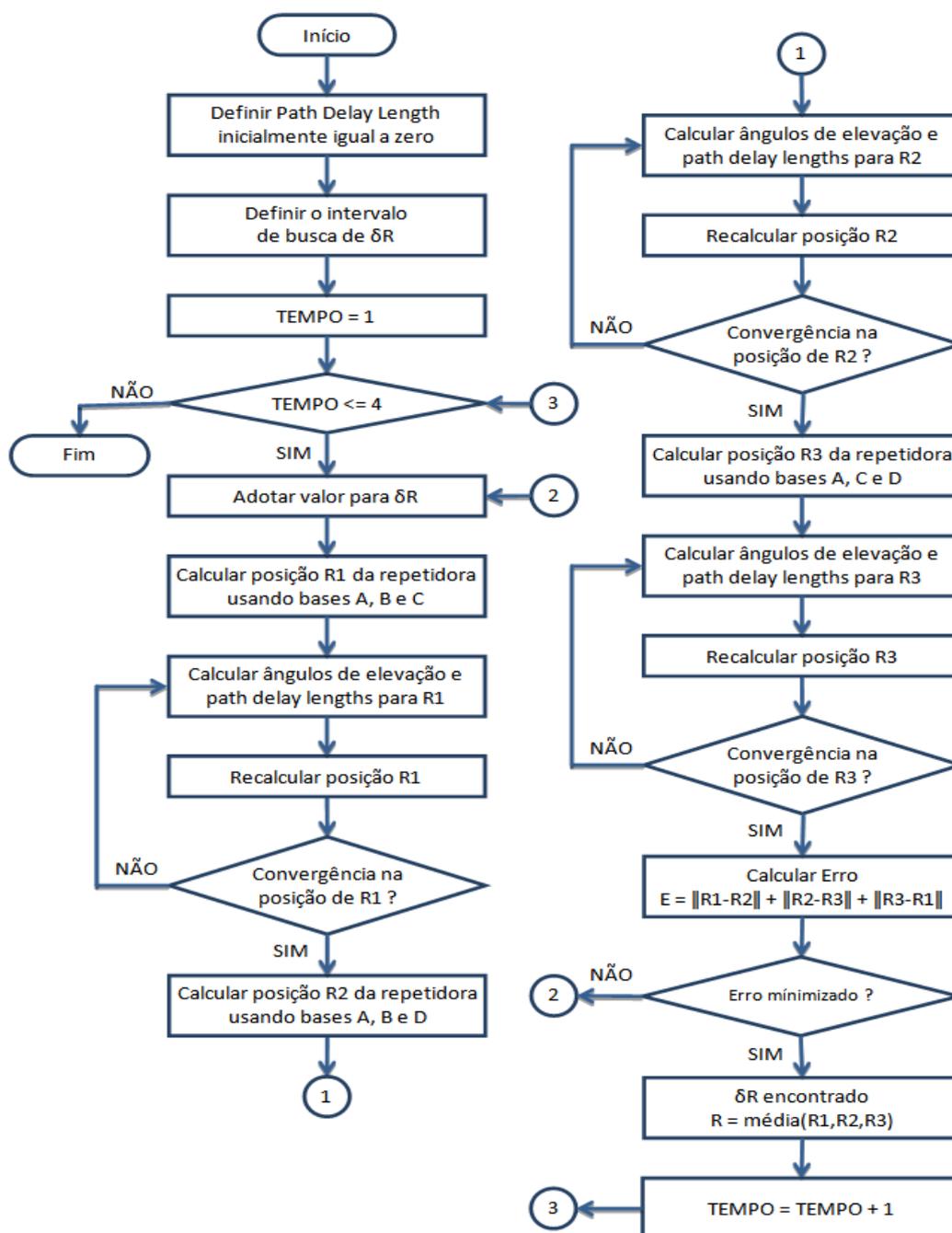
Desconhecidas:

- Posição do *transponder* R;
- AR, BR, CR, DR e PR;
- δ_R ;
- Δ_{pdAR} , Δ_{pdBR} , Δ_{pdCR} , Δ_{pdDR} e Δ_{pdPR} – podem ser estimadas por modelos, mas dependem da posição do *transponder*.

Uma proposta para a solução das equações 3.17 é um algoritmo iterativo que trabalhe com minimização de erros. O fluxograma completo é exibido na Figura 41 e consiste, resumidamente, em:

- 1) desconsiderar o *path delay length*, definindo seu valor como 0 (zero);
- 2) adotar valor para δ_R dentro de um intervalo de busca previamente definido;
- 3) calcular posição do *transponder* R a partir de um conjunto de três estações;
- 4) calcular o ângulo de elevação do *transponder*;
- 5) recalculando 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 três estações (ABC, ABD e ACD) até a convergência na posição de R;
- 8) executar este procedimento para cada uma das quatro *transponders* ou para um único *transponder* em quatro instantes distintos.

Figura 41 - Fluxograma para o cálculo do tempo de trânsito no *transponder*, *path delays* e posição do *transponder*.



Fonte: KAUFMANN et al. (2012).

Este algoritmo permite a localização de um *transponder* a partir de quatro estações fixas. De forma similar, podemos localizar um alvo em terra (ou no ar) utilizando quatro *transponders* no espaço.

Já a sincronização dos relógios acontece assumindo que o alvo P possui posição bem conhecida e, uma vez determinadas as coordenadas do *transponder* R,

o segmento PR torna-se conhecido. O intervalo de tempo esperado para a chegada do sinal é visto na equação 3.2:

$$\Delta t_P = \frac{AR}{c} + \frac{PR}{c} + \delta A_t + \delta R + \delta P_r + \delta p_{dAR} + \delta p_{dPR} \quad (3.22)$$

Este intervalo, acrescido do horário de envio do sinal na estação 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 estações e *transponders*, onde todas as estações podem transmitir e receber sinais, melhorando a acurácia do sistema através de redundância de informações.

4 ANÁLISE, RESULTADOS E DISCUSSÃO

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, problemas são identificados e soluções são sugeridas.

Ao final são apresentadas as especificações de hardware e software, o protótipo construído sob estas especificações e os resultados dos primeiros testes.

4.1 AS PREMISSAS DO GEOLOCAL

Os itens a seguir relacionam as premissas do GEOLOCAL, consolidando o que já foi tratado em trabalhos anteriores e em Patentes.

4.1.1 GPS invertido

O GEOLOCAL tem como finalidade localizar um alvo, sincronizar relógios remotamente e navegar o *transponder*. Sua característica, inédita, é geometria de um “GPS invertido, como se os satélites estivessem no solo” (KAUFMANN, 1996): as estações, que são posicionadas em coordenadas bem conhecidas e definidas. Com os equipamentos de rádio 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 das estações também é facilitada.

Uma das estações, que será a central, é a única dentre as estações com capacidade para transmitir e receber sinais de rádio. Ela transmite um sinal para todas as demais estações e alvos (que apenas recebem) através dos transponders. Transponders, como a estação central, também possuem a capacidade de transmitir e receber sinais. As estações e os alvos informam esse recebimento para a estação central através de algum meio que pode ser cabo, celular, micro-ondas.

4.1.2 Os *transponders*

Conforme os documentos originais citados em 2.6, especialmente em KAUFMANN e SILVEIRA (2004), os *transponders* servem para retransmitir o sinal emitido pela base principal para as demais bases e alvos. Esses dispositivos estariam em satélites de baixa órbita ou satélites de telecomunicação já existentes. Sobre este último, bastaria contratar junto ao operador do satélite um canal para o

transponder. A posição destes *transponders* sempre seria conhecida pela telemetria (efeméride) do satélite correspondente, fornecida pela operadora.

A partir dos trabalhos de Kaufmann e Kaufmann (2012) foram introduzidas outras possibilidades de suporte para os *transponders*, incluindo-se opções como drones, balões e aviões.

4.1.3 O alvo

Para o alvo obter sua localização ele precisaria receber os sinais de pelo menos quatro dos “satélites em terra” (estações) através de pelo menos quatro *transponders* (ou quatro medições, considerando um mesmo *transponder* em quatro posições diferentes). O instante de recebimento desses sinais seria informado à estação central para que ela fizesse o cálculo. Essa comunicação seria feita por qualquer meio disponível (telefonia digital, internet). Eventualmente o alvo poderia ter a capacidade de processamento para ele próprio calcular sua posição (KAUFMANN e KAUFMANN, 2012).

4.1.4 O sincronismo de tempo

O modelo proposto pressupõe que há sincronismo entre todos os componentes do sistema visto que, para calcular as distâncias, é necessário que os relógios de todos os componentes do sistema estejam sincronizados.

Entretanto, a metodologia e o processo para o sincronismo dos relógios das estações e do alvo não foram definidos nos trabalhos anteriores, seja na inicialização do sistema (quando ele é ligado pela primeira vez - *startup*) ou periodicamente para compensar desvios¹⁵. Em Kaufmann e Silveira (2004) e Macho (2018) isso é tratado como uma premissa (“supõe-se que todos estejam sincronizados”).

4.1.5 A comunicação entre as estações

Um ponto a considerar no modelo atual do GEOLOCAL é a comunicação entre os elementos em solo. Por este canal, estações e alvo retornam à estação principal a informação enviada por ela através dos *transponders*. Logo, essa comunicação é fundamental no processo de determinação de posições. São sugeridos links de micro-ondas, internet, comunicação dedicada, telefonia.

¹⁵ **Drifting e aging**, que ocorrem em qualquer base de tempo incluindo as atômicas mais precisas (3.7.2)

Cada uma dessas tecnologias depende de fatores como visada direta à estação central (link de micro-ondas), disponibilidade de cabos (ou a possibilidade de serem passados), cobertura de celular.

Nos estudos sobre posicionamento das estações, em função da área de cobertura, é possível que alguma estação precise ser posicionada em local sem serviço de comunicação disponível. Outro problema, neste modelo é que o GEOLOCAL ficaria dependente de terceiros (operadoras de celular, por exemplo). Uma falha no suporte desses terceiros ou mesmo uma área de sombra na cobertura inviabilizaria parte ou todo o sistema. O GNSS, embora também tenha áreas de sombra, não depende de uma operadora ter implementado ou não uma antena porque o sinal do GNSS normalmente tem abrangência mundial.

Importante também salientar a questão centralizadora, ou seja, todos os cálculos neste modelo são feitos pela estação central independente de quantas estações ou alvos existam. Em Kaufmann e Silveira (2004) há a sugestão de usar os *transponders* como canal de comunicação e assim tornar o sistema independente e autossuficiente.

4.1.6 Precisão almejada

As simulações realizadas por Pamboukian (2012) e Macho (2018) mostraram que o processo e algoritmo do GEOLOCAL nos dão precisão inferior a milímetro, desde que não haja incertezas e os valores dos diversos atrasos, em todo o sistema, estejam bem definidos.

Entretanto, nos trabalhos não foi especificada a precisão almejada. Com esta questão em aberto, para as provas de conceito inicial pode-se trabalhar com precisões mais conservadoras, inicialmente na ordem de metros, reduzindo-se este valor com o avanço das pesquisas e o desenvolvimento de melhorias.

4.1.7 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, segundo sua proposta original:

- o sistema centraliza todas as operações em uma estação central que realiza os cálculos de distância e posicionamento. As demais estações e o próprio alvo são apenas receptores e devem enviar, por algum meio de comunicação disponível, as leituras que fizerem. Essa dependência de

canais de comunicação cria uma vulnerabilidade no sistema visto que nem todo lugar tem cobertura de telecomunicação;

- as análises matemáticas até o momento partem da premissa que todos os equipamentos estão com seus relógios sincronizados. Entretanto, o processo de sincronismo, incluindo o de *startup*, não está definido;
- os atrasos que ocorrem no interior do equipamento ou mesmo na propagação de sinal foram presumidos como medidos ou previstos, mas não foram realmente medidos ou analisados, faltando um trabalho de pesquisa neste sentido;
- as precisões desejadas ou almejadas não foram definidas;
- o número de estações necessárias para cobrir uma determinada área guarda relação com a altitude do *transponder* e seu suporte. A viabilidade de cada tipo de suporte precisa ser analisada;
- as frequências de trabalho estão em aberto;
- não está determinada a 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) e Macho (2018) fala-se em cobertura menores, tanto para efeito das simulações e provas de conceito quanto em possíveis aplicações do sistema.

4.2 UMA NOVA IMPLEMENTAÇÃO PARA O GEOLOCAL

O GEOLOCAL é um sistema de telecomunicações com vários elementos trocando informações entre si. Isso significa que cada elemento deve ter um identificador único associado à informação que ele envia para que não haja ambiguidade nos dados recebidos pela estação central e todos os elementos se comunicam através de um mesmo canal ou frequência.

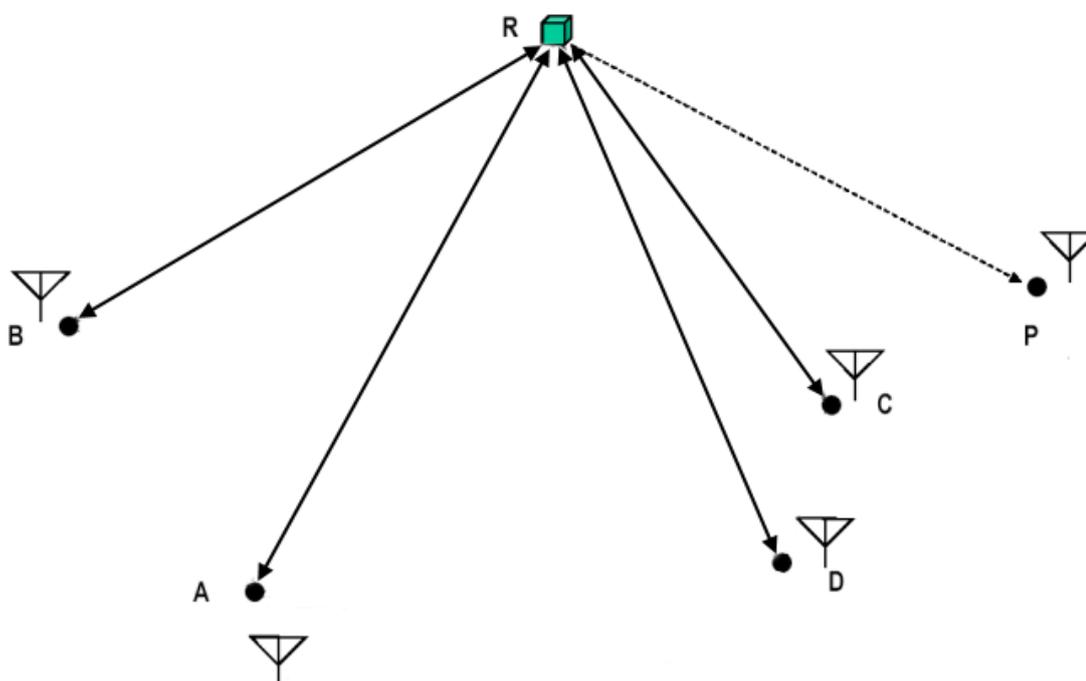
Embora os estudos feitos até o momento falem de apenas nove elementos no total (quatro estações, sendo uma a central, quatro *transponders* e um alvo), sistemas comerciais podem ter dezenas de estações e *transponders* e uma quantidade imprevisível de alvos (por exemplo, telefones celulares de uma cidade). Cabe, portanto, uma revisão na topologia proposta até o momento sob o ponto de vista da sua implementação prática.

4.2.1 A comunicação entre estações e *transponders*

Embora por um lado seja uma vantagem as estações contarem com a flexibilidade de diferentes meios de comunicação para comunicarem-se com as bases, em um sistema comercial isso pode vir a encarecer o equipamento ou torná-lo mais complexo, além do que o sistema estaria à mercê de outros sistemas e fornecedores e isso pode, em algumas situações, comprometer a disponibilidade.

Atualmente os sistemas de rádio digitais evoluíram muito e seu custo está bastante competitivo. Como apresentado em 3.4.2, dispositivo como o USRP da National Instruments concentra em uma única placa até dois transmissores *full duplex* a um preço aproximado de 700 dólares americanos (ETTUS, 2020). Tanto estações quanto *transponders* podem utilizar dispositivos como este. Desta forma, pode-se estabelecer uma comunicação de duas vias entre as estações utilizando os *transponders* como repetidores de sinal. O sistema, então, passa a depender apenas de si para todas as operações.

Figura 42 - Topologia proposta para o GEOLocal



Fonte: autoria própria

Esta opção tecnológica dos sistemas de rádio, tanto nas estações quanto nos *transponders*, serem todos *full duplex* e não apenas a estação central. Foi sugerida em Kaufmann e Silveira (2004). Desta forma, o sistema assumiria o diagrama da Figura 42.

O espectro de frequências é limitado e regulamentado. O GEOLOCAL poderá contar com uma ou talvez duas frequências de operação embora preveja em suas premissas a comunicação simultânea dos diversos elementos. Para que isso aconteça é necessária a utilização de métodos e técnicas de compartilhamento de frequência. Sugere-se utilizar a mesma tecnologia ora existente nos GNSS atuais, o CDMA¹⁶ (MONICO, 2008). Embora a descrição detalhada deste processo esteja fora do escopo deste trabalho e vise pesquisas futuras, nesta análise é importante lembrar que o CDMA tem um número restrito de canais, onde cada canal corresponderia a um dos elementos do GEOLOCAL. Este número vai depender da largura de banda de frequência que for determinada pelas autoridades reguladoras mas normalmente as bandas permitem cerca de 1024 canais.

Uma possibilidade importante de ser explorada em trabalhos futuros é que não é necessário fixar, no sistema, uma estação central específica. As estações podem decidir isso entre si, através de algoritmos de Inteligência Artificial, desde que todas as estações tenham as mesmas capacidades e acessos. Desta forma, descentraliza-se o sistema e confere-se maior disponibilidade, visto que no caso de uma estação central se tornar indisponível por algum motivo (falta de energia ou problemas de comunicação) as demais estações “perceberiam” isso e uma nova estação central seria atribuída.

4.2.2 A proposta para os alvos

O alvo, segundo as propostas originais do GEOLOCAL, também se comunica com a estação central. Embora isso possa ser resolvido usando-se o mesmo equipamento *full duplex* das estações e *transponders*, as considerações sobre o alvo são outras.

Os trabalhos publicados até o momento consideram um modelo de estudo com quatro estações, quatro *transponders* (ou um, em quatro posições diferentes) e um alvo. Um sistema comercial, entretanto, teria um número muito grande de alvos e, no modelo original (que considera o cálculo da posição do alvo feita pela estação

¹⁶ Segundo Torrieri (2018) e Stubber (2017), **Acesso Múltiplo por Divisão de Código** (CDMA, *Code-division multiple access*) é um método de acesso de canal utilizado por várias tecnologias de radiocomunicação. O CDMA é um exemplo de acesso múltiplo, onde vários transmissores podem enviar informações simultaneamente por um único canal de comunicação. Isso permite que vários usuários compartilhem uma mesma faixa de frequência ou largura de banda. Para permitir isso sem interferência indevida entre os usuários, o CDMA emprega tecnologia de difusão de espectro e um esquema especial de codificação (onde cada transmissor tem atribuído um código). O CDMA é usado como o método de acesso telefonia celular e em GNSS.

central), poderia haver congestionamento do processamento. Ou mesmo poderia extrapolar o número de canais permitidos pelo sistema (item 4,.2.1).

Propõe-se, da mesma forma que ocorre nos GNSS atuais, que os alvos sejam apenas receptores e calculem suas próprias posições sem depender de se comunicar com a estação principal. A miniaturização e o atual poder de processamento permitiriam isso e, desta forma, alvos não precisariam ter qualquer comunicação com a estação central. Apenas necessita ter seu relógio sincronizado.

4.2.3 Ciclo de trabalho proposto

Fundamentado no que foi exposto, propõe-se um novo ciclo de trabalho para todo o sistema, a ser testado pelos equipamentos utilizados nas provas de conceito, onde:

- a. o sistema sincroniza os relógios de todos os seus elementos;
- b. os *transponders* recebem um sinal de tempo das estações e, com isso calculam sua própria posição;
- c. as estações enviam ao alvo, através dos *transponders*, um sinal contendo a posição das estações, posição dos *transponders* e sinal de tempo;
- d. o alvo calcula sua posição.

4.3 A ESCOLHA DAS FREQUÊNCIAS

Para as provas de conceito, o projeto GEOLocal (PAMBOUKIAN, 2020) sugere a utilização das radiofrequências de 410 MHz e 2.1 GHz. A frequência de 2.1 GHz pode ser usada independente da altitude do transponder, desde um drone, até um satélite. A radiofrequência de 410 MHz pode ser utilizada para estimar os efeitos e atrasos na ionosfera, quando comparada com a propagação da onda principal em 2,1 GHz.

Essas frequências atendem perfeitamente as necessidades das provas de conceito. Entretanto, quanto maior a frequência, mais direcional deve ser a antena em virtude do seu ganho e alcance (BALANIS, 2005). Logo, em aplicações práticas, essas frequências poderão ser revistas e o uso de SDRs nos protótipos facilita este tipo de mudança. Num primeiro momento, os protótipos irão trabalhar com antenas direcionais (para visada direta) e omnidirecionais.

Considerando que os experimentos iniciais serão feitos em altitudes abaixo da ionosfera, será utilizada apenas a frequência de 410 MHz, deixando a frequência de 2,1 GHz para trabalhos futuros (PAMBOUKIAN, 2020).

Importante destacar que uma frequência seria suficiente visto que os processos no ciclo de trabalho do sistema acontecem em momentos independentes.

Conforme fundamentado em 3.6, há vários tipos de antenas que podem ser utilizadas nos experimentos práticos. Para as provas de conceito iniciais, onde os equipamentos estarão colocados a pequenas distâncias e possíveis de serem alinhados entre si, a sugestão é que se usem antenas direcionais, log-periódicas, que nas curtas distâncias dispensariam a necessidade de amplificadores. Experimentos mais avançados, usando transponders em movimento, entretanto, poderão necessitar de antenas omnidirecionais e amplificadores, objeto de pesquisas futuras.

4.4 AS PLATAFORMAS PARA OS *TRANSPONDERS*

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

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

4.4.1 Torres

Torres são uma opção interessante, pois uma vez que o *transponder* esteja acoplado, estará sempre disponível e com posição conhecida. Por outro lado, o raio de cobertura é o mais limitado de todos, pois depende da altura da torre¹⁷ e dificilmente se acham 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 estações estariam dentro dessa área, que teria alguns hectares, com suas posições já conhecidas. Para distâncias da ordem de centenas

¹⁷ O raio de cobertura de cada *transponder* é aproximadamente quatro vezes sua altura, considerando o PDOP próximo do ideal (FRIOLANI, 2020).

de metros os métodos convencionais de topografia com trenas e triangulação seriam suficientes.

4.4.2 Drones e RPAs

Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2020), cabe aqui alguns esclarecimentos:

- *aeronave* é todo aparelho que voa por meios próprios;
- *aeromodelo* é uma aeronave não tripulada para fins de recreação;
- *Aeronave Remotamente Pilotada (RPA, Remotely-Piloted Aircraft)* é uma aeronave não tripulada pilotada a partir de uma estação de pilotagem remota com finalidade diversa de recreação.

O termo “DRONE” (zangão) é uma expressão popular que se aplica, principalmente, às aeronaves multi-rotor (quadricópteros e similares) por conta do ruído que fazem, similar ao do inseto. Oficialmente o Brasil usa-se o termo RPA.

Embora os equipamentos comerciais existentes no mercado tenham capacidade de vôo autônomo, teto em torno de 5000 metros e um alcance de rádio de até 8 km (DJI, 2019), o documento RBAC-E nº 94 da ANAC estabelece limites de vôo, a saber:

- não é permitido no Brasil voo autônomo, devendo o RPA estar 100% do tempo sob controle e comando de seu piloto;
- a aeronave deve estar sempre dentro do campo de visão do piloto;
- o teto de operação é de 120 metros (400 pés) para áreas urbanas e 60 metros (200 pés) para área rural, para não interferir nos limites de voo de helicópteros;
- voos próximos a aeródromos, aeroportos, heliportos e helipontos precisam da anuência por escrito das respectivas administrações do local;
- a aeronave deve se manter distante a, no mínimo, 30 metros horizontais de pessoas não anuentes e de edificações.

Resumindo, RPAs têm um raio de atuação de até 500 metros de distância horizontal e altura limitada entre 60 metros (rural) e 120 metros (urbano), algo comparável às torres. Por ser móvel, tem a vantagem de transportar o *transponder* em várias posições, embora tenha o 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 uma aplicação comercial.

4.4.3 Balão cativo

É um balão de látex cheio de gás hélio e preso a um guincho de controle em solo (ZELL, 2017). 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.

4.4.4 Balão meteorológico

Mesmo material que o balão cativo, pode levar o *transponder* a altitudes acima de 20 mil metros. Conforme sobe, seu envelope de látex dilata até romper e a carga (em nosso caso, o *transponder*) retorna ao solo por meio de um paraquedas (ZELL, 2017). Neste caso há a questão de permissão de tráfego aéreo na região de lançamento, a dificuldade em manter o balão com o *transponder* 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, esta opção é adequada a provas de conceito.

4.4.5 Balão estratosférico

Segundo Yamagami (2004), balões estratosféricos permanecem no ar por 100 dias e chegam 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.

4.4.6 Cubesats

Satélites de 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 (e cabe um estudo futuro sobre isso) seria possível

cobrir o planeta inteiro (MEHRPARVAR, 2014). A vida útil do satélite vai depender muito das características de projeto, inserção orbital e planejamento para *deorbiting* (retirar o satélite de órbita ao fim de seu período de uso). Cubesats podem permanecer em órbita por até 25 anos.

4.4.7 Satélites de 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.

4.4.8 Considerações sobre as plataformas

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 do *transponder* (FRIOLANI et al., 2020). Um drone a 120 metros de altura cobre uma área de aproximadamente 480 metros de raio (Tabela 3). Para áreas extensas seria necessário aumentar o número de equipamentos e comprometer sua viabilidade econômica, a não ser que se aumente a altitude dos *transponders*;
- 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.

A opção de usar drones ou torres é bastante razoável para as provas de conceito em ambiente limitado. Ou para aplicações de pequenas áreas. Quanto

maior a área, porém, maior a altitude do *transponder*, que entraria em conflito com outros tipos de aeronaves ou não cumpriria a condição de disponibilidade sobre a área desejada. O sistema passa a ser novamente viável com a repetidora situada a partir de órbitas baixas e além.

4.5 ANÁLISE DOS ATRASOS NO SISTEMA

Os trabalhos anteriores (2.6) dão grande importância à determinação do que se convencionou chamar de “atrasos”. A análise a seguir detalha cada um dos componentes que provocam atrasos e sugere formas de determinar seus valores ou mesmo contorná-los.

O sistema GEOLOCAL tem como princípio de funcionamento o que se convencionou chamar de TOF (*Time Of Flight*, Tempo de Voo), onde o tempo de deslocamento Δt_{AB} de um sinal de rádio entre dois pontos A e B pode definir a distância AB (equação 4.1).

$$AB = \Delta t_{AB} \times c \quad (4.1)$$

Nesta equação, c é a velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo, que corresponde à velocidade da luz (aproximadamente 3×10^9 m/s). Entretanto, se este sinal atravessar meios diferentes como ionosfera, troposfera, antenas e fios ou circuitos elétricos, a velocidade da onda eletromagnética é menor e, portanto, o tempo de propagação Δt_{AB} terá um acréscimo, sobre o valor teórico ideal, de δ_{AB} . Considerando c constante, chegamos numa medida maior que a real (AB). Chamaremos essa medida de *pseudodistância* AB, ou AB'.

$$AB' = (\Delta t_{AB} + \delta_{AB}) \times c \quad (4.2)$$

Ou

$$AB' = \Delta t_{AB} \times c + \delta_{AB} \times c \quad (4.3)$$

Substituindo 4.1 em 4.3, temos:

$$AB' = AB + \delta_{AB} \times c \quad (4.4)$$

E, finalmente, podemos escrever a equação 4.4, que relaciona a distância real AB com a pseudodistância medida:

$$AB = AB' - \delta_{AB} \times c \quad (4.5)$$

O termo δ_{AB} é o atraso total em segundos causado pelo meio de propagação do sinal no espaço (entre as antenas), nos condutores e circuitos, bem como eventuais atrasos de processamento. Logo, para encontrarmos a distância AB precisamos saber de antemão este valor, poder medi-lo ou mesmo calculá-lo.

Em uma situação real com um equipamento de rádio, a onda eletromagnética passa por meios distintos (ionosfera, troposfera, vácuo, antenas, fiações, circuitos), cada um deles com suas próprias características físicas e cujo total formará o termo δ_{AB} . Seus diversos componentes podem ser relacionados como o atraso de propagação da onda eletromagnética devido ao meio entre as antenas; o atraso no hardware (em cabos, antenas e circuito, que seria a parte física do equipamento de rádio); e os programas de computador responsáveis pelo tratamento das informações (*software*). Detalhando, tem-se:

- δ_{meio} atraso de propagação no meio;
- δ_{cabo} atraso no cabo coaxial entre o centro de fase da antena e o rádio;
- δ_{ampl} atraso na etapa de amplificação;
- δ_{DAC} atraso no processamento nos conversores analógico-digitais;
- δ_{USB} atraso do cabo USB e das interfaces;
- δ_{comp} atraso na eletrônica do computador;
- δ_{soft} atraso pelo tempo de execução do software.

Estes componentes são combinados de forma diferente conforme a topologia do sistema e a forma de medição. Isso será analisado a seguir, considerando o uso de SDR como solução de prototipagem.

4.5.1 Atraso de propagação

Atraso de propagação é a diferença entre o tempo que uma onda eletromagnética se propaga em um determinado meio e o correspondente tempo no vácuo, para uma mesma distância (δ_{meio}). Pode ser medida, pode ser calculada. Os GPS utilizam duas frequências diferentes e comparam a diferença na chegada dos dois sinais para determinar esse tempo através de modelos matemáticos (MONICO,

2016). Já o tempo de propagação de uma onda eletromagnética no ar ou através da atmosfera pode ser calculado através de modelos (MACHO, 2018).

4.5.2 Atraso nos cabos e antenas

Os índices δ_{cabo} e δ_{USB} se referem, respectivamente, ao cabo coaxial ligando a antena ao rádio e ao cabo USB (*Universal Serial Bus*, Barramento Serial Universal) ligando o rádio ao computador. Usa-se para o cálculo o Fator de Velocidade (VF, *Velocity Factor*) dos cabos, que é dependente de sua geometria e materiais utilizados (dielétricos). 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 como um percentual. Para um dado valor de VF, a velocidade de propagação no cabo pode ser calculada em função do comprimento do cabo l_{cabo} (GOTTLIEB, 1993). Desta forma, podemos escrever o atraso no cabo como o tempo de propagação considerando o VF menos o tempo de propagação no vácuo:

$$\delta_{cabo} = \text{Fator de Velocidade (VF, Velocity Factor)} \frac{l_{cabo}}{VF \times c} - \frac{l_{cabo}}{c} \quad (4.6)$$

Ou:

$$\delta_{cabo} = \frac{l_{cabo}(1-VF)}{c} \quad (4.7)$$

4.5.3 Atraso de software

Todo o processamento do sinal feito pelo SDR é executado através de um software, tornando este atraso talvez o mais difícil de mensurar ou prever. A execução do software vai depender da velocidade de processamento dos algoritmos pelo computador, algo que não pode ser calculado com precisão. Entre outros fatores, os modernos processadores possuem mecanismos de alterar a velocidade do *clock* conforme fatores externos como temperatura. E o sistema operacional pode executar outros programas em paralelo.

Há algumas opções para minimizar este problema.

A primeira é usar um ambiente como o **Linux**, sem interface gráfica. Pode ser até uma versão especificamente preparada para o GEOLOCAL que teria funções desnecessárias retiradas.

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 de desenvolvimento.

Finalmente, cabe considerar um fato relevante: o SDR pode incorporar o tempo de chegada ao próprio sinal antes de enviar ao software de processamento. Considerando a Figura 28 (item 3.4), o sinal de rádio é captado, amplificado, digitalizado e somente neste instante ele é enviado ao software por uma interface USB. Tudo isso é controlado, na placa USRP, por um processador FPGA. Por ser um circuito eletrônico reconfigurável, o atraso devido ao tempo de execução pode ser estabelecido experimentalmente.

Outro ponto a considerar é que a base de tempo é um circuito independente do restante do SDR, proporcionando uma referência livre de interferências.

O FPGA pode, então, ser programado para combinar o sinal digitalizado de rádio com a informação de tempo precisa que este sinal chegou ao receptor. O software, por sua vez, não precisaria medir o tempo de chegada do sinal no SDR, mas apenas fazer os cálculos para determinar as distâncias.

Com esta proposta, a variável δ_{soft} **deixa de participar do cálculo de atraso do sistema**.

4.5.4 Atraso de circuito

O atraso de circuito é ligado à parte física do equipamento em si e é formado por componentes, cabos e outros elementos eletrônicos. Alguns desses elementos permitem medições de bancada e terão valores razoavelmente determinados.

Vamos chamar de δ_{CIR} o atraso total no circuito eletrônico, incluindo antenas, cabos e fios, do rádio:

$$\delta_{CIR} = \delta_{cabo} + \delta_{ampl} + \delta_{DAC} \quad (4.8)$$

Ou seja, o sinal recebido passa pelo cabo da antena, pelo amplificador, pela digitalização, cabo USB e circuitos de entrada do computador antes de serem lidos pelo software. Na transmissão a ordem é reversa, mas os termos são os mesmos.

Ao combinar os processos de transmissão e recepção, podemos escrever o tempo total entre o instante de geração do sinal e sua recepção e interpretação Δt , supondo que ambos os equipamentos sejam idênticos (equação 4.9):

$$\Delta t = \Delta t_{AB} + \delta_{meio} + 2(\delta_{comp} + \delta_{USB} + \delta_{DAC} + \delta_{ampl} + \delta_{cabo}) + \delta_{soft} \quad (4.9)$$

Supondo que o software é tratado como o descrito em 4.5.3, os atrasos de software, circuito do computador e cabo USB seriam retirados da equação. E supondo também que as antenas são substituídas por um cabo muito curto neste teste em particular, conectando ambos os rádios numa bancada, o que eliminaria o tempo de propagação no meio. Teríamos:

$$\Delta t = 0 + 0 + 2(0 + 0 + \delta_{DAC} + \delta_{ampl} + \delta_{cabo}) + 0 \quad (4.10)$$

$$\Delta t = 2(\delta_{DAC} + \delta_{ampl} + \delta_{cabo}) \quad (4.11)$$

Comparando-se as equações 4.8 e 4.10, vemos que:

$$\Delta t = 2\delta_{CIR} \quad (4.11)$$

Desta forma o atraso de circuito **pode ser medido**, inclusive de forma repetitiva, para se determinar uma média e desvio padrão.

4.6 A PROPOSTA DE SINCRONISMO DAS ESTAÇÕES

Entre os trabalhos publicados até o momento (2.6) há uma premissa de que as estações e *transponders* estejam com seus relógios perfeitamente sincronizados. Embora a manutenção deste sincronismo já tenha sido definida em trabalhos anteriores, falta definir o procedimento para $t=0$, ou seja, para quando o sistema é ligado pela primeira vez.

Vamos considerar a equação 4.9, que permite calcular a distância entre dois rádios a partir do tempo de propagação de sinal entre eles. Sabendo-se a distância AB, é possível calcular o tempo de propagação. Supondo que a estação A seja a referência, envia-se para a estação B via sinal de rádio o valor da distância AB e o horário de A. A estação B calcula Δt_{AB} e soma com o valor da hora de emissão, acertando seu relógio adequadamente.

Entretanto, a distância AB não é conhecida, visto que quem faz a conexão entre AB é um *transponder* R que pode estar em movimento ou sua coordenada não foi estabelecida. Logo, o sistema não tem como calcular distâncias visto que não há garantia que os relógios estejam sincronizados, nem sincronizar os relógios pois a distância percorrida pelo sinal é desconhecida.

É de se presumir que, neste momento inicial, ocorram duas condições:

- as estações não serão ligadas necessariamente no mesmo instante;
- os relógios internos iniciarão uma contagem de tempo a partir de um valor qualquer.

Em outras palavras, cada estação irá marcar um horário diferente e não é conhecida a dimensão dessa falta de sincronismo. Também se desconhecem os tempos de propagação de sinal e os atrasos 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) essa estação central envia a todo o sistema o horário correto;
- c) estações e *transponders* retransmitem este sinal, que é recebido pela estação central;
- d) a estação central avalia, para cada *transponder* e estação 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 *transponder* e estação;
- f) estações e *transponders*, de posse de seus respectivos tempos de trânsito, acertam seus relógios fazendo a compensação de tempo.

Este processo elimina a necessidade de se conhecer cada um dos atrasos individuais do sistema. 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.

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.

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

4.6.1 Periodicidade do sincronismo de relógios

Como visto em 3.7, os dispositivos de referência de tempo para os relógios internos das estações, repetidoras e até mesmo do alvo acumulam um desvio ao longo do tempo (*drifting*) e o sistema como um todo precisa ser sincronizado periodicamente. A frequência depende do erro aceitável. Por exemplo, se o oscilador for um TCXO (o mais barato e comum), consultando-se a

Tabela 4 vemos que o desvio acumulado neste tipo de oscilador é de 2×10^{-6} s em um ano. Considerando a velocidade da luz num valor aproximado de 3×10^8 m/s, o erro induzido (sem correções) seria de 6.000 metros por ano ou 68 centímetros por hora. Conforme a precisão desejada, sincroniza-se em intervalos inferiores a uma hora.

Um processo simples de sincronização seria utilizar em bancada ou em campo um relógio de césio. Entretanto, as estações 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 estação também se coloca inviável em virtude do elevado preço. Também deve-se considerar os efeitos relativísticos, visto que o simples deslocamento de uma estação em relação às demais provocaria uma variação nos relógios.

Algumas opções a se considerar:

- adotar em todas as estações e alvo um relógio de alta precisão de césio ou rubídio que não precisam ser sincronizados periodicamente, mas apenas no momento da instalação. Nesta opção vale salientar 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;
- 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, que resultaria num erro de medição aproximado de 0,02 mm por hora. 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.

Importante salientar que a opção do GPSDO vai de encontro com a proposta do GEOLOCAL, que é ser independente de outros sistemas de geolocalização. Entretanto, para efeito de testes e provas de conceito, é necessária uma base de tempo de precisão e esta opção se mostra vantajosa economicamente, visto que a alternativa seria um relógio atômico cujo custo subiria dos atuais USD 400 do GPSDO (ETTUS, 2020) para USD 8000 de um CSAC (MICROSEMI, 2018). Para efeito de um sistema prático ou comercial, o CSAC é imprescindível para se garantir essa independência. Já na prototipagem e provas de conceito, o GPSDO é preciso e conveniente, suprimindo todas as necessidades na estação central.

As demais, mesmo com TCXO que é o mais impreciso, podem passar por ciclos de sincronismo periódicos e manter seus relógios com razoável precisão.

4.7 PROTÓTIPOS

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

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

4.7.1 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 programas que virtualizam os circuitos do rádio e conferem agilidade ao desenvolvimento.

É justamente por isso que se propõe a tecnologia SDR (*Software Defined Radio*, Rádio Definido por Software) para todas as estações, *transponders* 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 no *transponder*, que recebe e também transmite o sinal de localização. O alvo, por outro lado, pode ser apenas um receptor;
- operar em frequências que cheguem a 2 GHz: a frequência, embora definida neste e em outros trabalhos (PAMBOUKIAN, 2020), pode ser alterada em trabalhos futuros conforme a evolução dos experimentos. Desta forma, é interessante que o equipamento tenha uma banda de frequência bem flexível para ser reconfigurado;
- permitir a utilização de uma base de tempo bem estável e disciplinada externamente como, por exemplo, um GPSDO, TCXO ou relógio atômico. 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.

Para este trabalho optou-se, dentre outros modelos 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). O principal motivo desta escolha é que há representante formal aqui no Brasil (National Instruments), enquanto as demais opções de mercado envolveriam importação.

No receptor dos alvos o RTL/SDR apresentado em 3.4.1 oferece uma opção de baixo custo e dentro das necessidades.

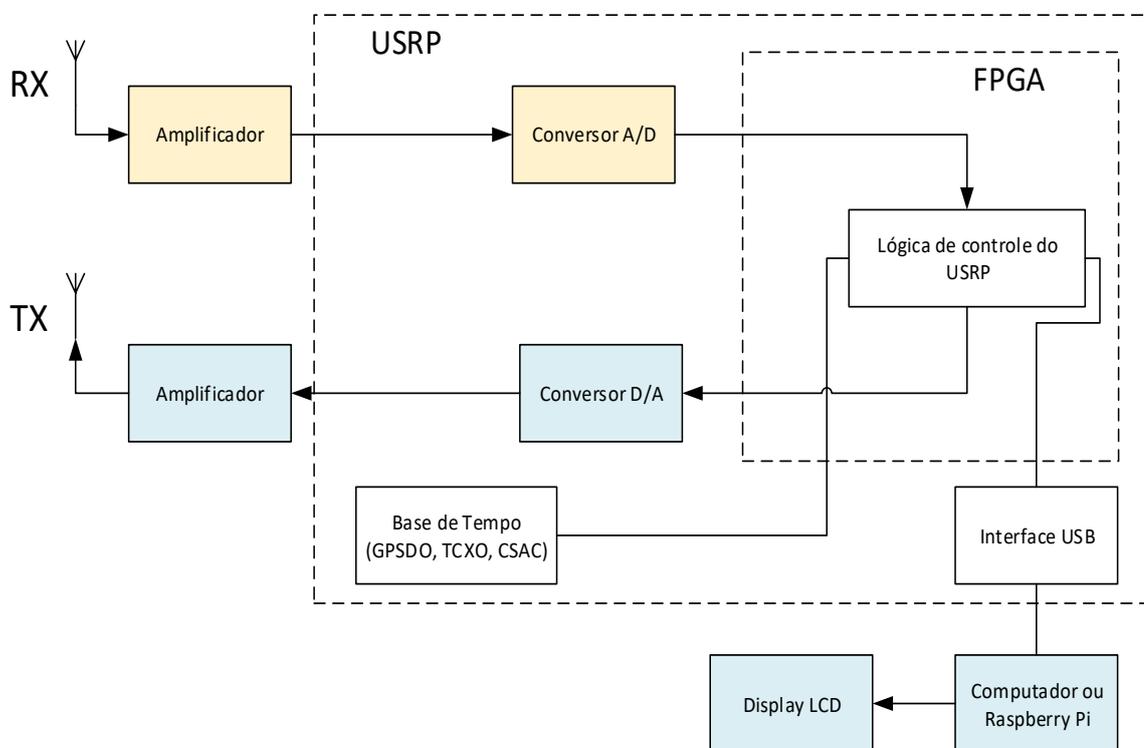
As antenas vão estar relacionadas com o tipo de experimento a ser realizado. Para laboratório e curtas distâncias na ordem de dezenas de metros, antenas simples omnidirecionais devem ser suficientes, podendo ser trocadas por antenas direcionais log-periódicas (3.5.2) projetadas e construídas especificamente para este fim. O projeto destas antenas pode ser visto em Pamboukian (2020) com mais detalhes.

O SDR necessita, para controlar seu funcionamento, de uma plataforma computacional. Por se tratar de um protótipo que vai ser operado em testes de campo, essa plataforma precisa ser leve e funcionar em baterias. A opção inicial é

um notebook, que através do conector USB consegue fornecer energia suficiente para a placa USRP.

Também foi trabalhada uma segunda opção para estações remotas usando outra plataforma computacional, o Raspberry Pi 4. Este dispositivo foi detalhado no item 3.4.5 e 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 *transponders* e alvos.

Figura 43 - Diagrama em blocos do protótipo proposto



Fonte: Autoria própria

O diagrama em blocos da Figura 43 detalha as partes do protótipo. O sinal de rádio, entrando pela antena de recepção RX, passa por uma etapa de amplificação¹⁸. Em seguida, este sinal é digitalizado pelo Conversor A/D (analógico/digital) e através do FPGA é conduzido ao computador que vai executar os algoritmos de processamento. Algum processamento deste sinal pode ser feito dentro do FPGA. O caminho reverso vem do software onde o sinal é gerado, passa

¹⁸ A placa USRP possui um amplificador interno mas pode ser necessário acrescentar amplificador externo em experimentos a grandes distâncias. O projeto desses amplificadores é uma proposta para pesquisas futuras.

pelo FPGA, é convertido em radiofrequência, amplificado e emitido pela antena TX (transmissão).

A placa USRP possui uma base de tempo interna que pode ser substituída por opções mais precisas como um TCXO, GPSDO ou relógio de césio, bem como ser disciplinada por sinais externos de 1 ppm.

4.7.2 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 GNURadio¹⁹ 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 interface gráfica. Além disso, é um sistema operacional que possui como linguagens nativas Python e C++.

Três fatores principais direcionam a escolha do sistema operacional para o Linux. O primeiro deles é a escolha do GNURadio (plataforma gratuita) e o suporte desta ferramenta em outros ambientes operacionais é incompleta. O próprio site do fabricante recomenda o Linux (GNURadio, 2020). O segundo fator é a possibilidade do Linux ser instalado sem a interface gráfica, melhorando o desempenho do software executado. O terceiro é que, com relação aos computadores embarcados (Raspberry Pi), embora eles tenham suporte para uma versão compacta do Windows, o próprio fabricante recomenda utilizar Linux .

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

Durante os experimentos, tal equipamento tornará possível testar diversos algoritmos de medição, tanto individualmente quanto em conjunto. Estes métodos, citados em 3.1, serão objeto de pesquisas e desenvolvimentos futuros.

Cabe, entretanto, citar a importância de se desenvolver códigos de sinais e algoritmos de software compatíveis com os receptores de GNSS atuais (U-BLOX e outros), de tal sorte que o GEOLOCAL possa ser implementado nestes receptores por mera atualização do software interno dos receptores (*firmware*), tornando-o mais

¹⁹ As outras opções seriam LabVIEW e MatLAB, segundo o fabricante do SDR. GNURadio é uma opção gratuita.

uma opção para os milhões de celulares e receptores de GNSS existentes mundialmente.

4.7.3 Equipamentos

Foi disponibilizada pelo Mack Pesquisa uma verba de R\$ 60.000 para este projeto. Com essa verba foram adquiridos instrumentos de bancada e equipamentos conforme a Tabela 5. Pode-se ver a instrumentação já na bancada (Figura 44) bem como os SDR (Figura 45) necessários para montagem de seis estações ou *transponders*.

Tabela 5 - Equipamentos utilizados e suas justificativas de compra

| Equipamento | Quantidade | Justificativa |
|---|------------|---|
| Kit ETTUS Research USRP. Acompanha: placa USRP B210 SDR 2x2 motherboard de 50 MHz – 6GHz (PN156278A-01L) | 6 | Utilizado no estágio de desenvolvimento dos algoritmos de transmissão/recepção para a captura dos sinais de RF e a transmissão destes sinais nos testes de laboratório e campo. Corresponde à parte principal do funcionamento das estações. |
| Kit Ettus GPSDO (GPS-DISCIPLINED TCXO) para placa USRP B200 | 1 | Proporciona uma referência de tempo de alta precisão (10^{-13} s) para as placas SDR USRP. |
| Desktop Dell XPS 8930 | 1 | Acoplados às placas SDR e utilizados como estações de trabalho. Ambiente de software para desenvolver os algoritmos de transmissão e recepção do GPS/GEOLOCAL, os processamentos (PDOP, modelos de propagação, cálculos), visualização de sinais captados e resultados e para os testes em laboratório. |
| Notebook Dell Inspiron 15 7000 | 1 | Para processamento e controle dos protótipos em sua versão portátil, faz o papel dos computadores desktop e notebooks no gerenciamento das placas USRP. |
| Raspberry Pi 4 Model B 4GB | 3 | Para interface com os Raspberry Pi nos protótipos versão portátil. |
| Display Raspberry Pi Touchscreen 7" | 2 | Instrumento de medição. |
| Multímetro digital | 1 | Para a medição das frequências de trabalho, aferição das bases de tempo e contagem de pulsos. |
| Frequencímetro digital de 2,4 GHz | 1 | Para a visualização gráfica, dos diversos sinais envolvidos. |
| Osciloscópio digital 350 MHz 4 canais Tektronix | 1 | Ferramental básico para bancada de eletrônica. |
| Estação de Solda | 2 | Ferramental básico para bancada de eletrônica. |
| Fonte de alimentação digital de bancada 32V/5A | 2 | |

Fonte: Autoria própria

Figura 44 - Detalhe da instrumentação de bancada. Da esquerda para a direita: duas fontes de alimentação 30V/5A, osciloscópio 350 MHz Tektronix, freqüencímetro digital e multímetro



Fonte: Autoria própria

Figura 45 - Placa USRP B200 SDR da Ettus Research

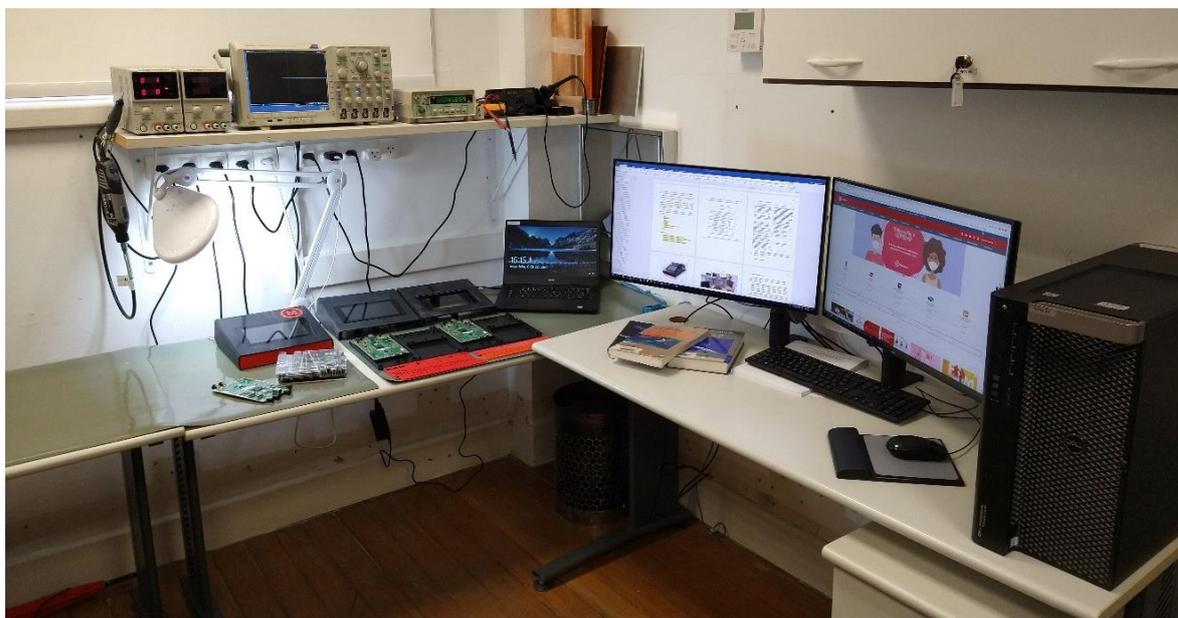


Fonte: Autoria própria

4.7.4 Laboratório

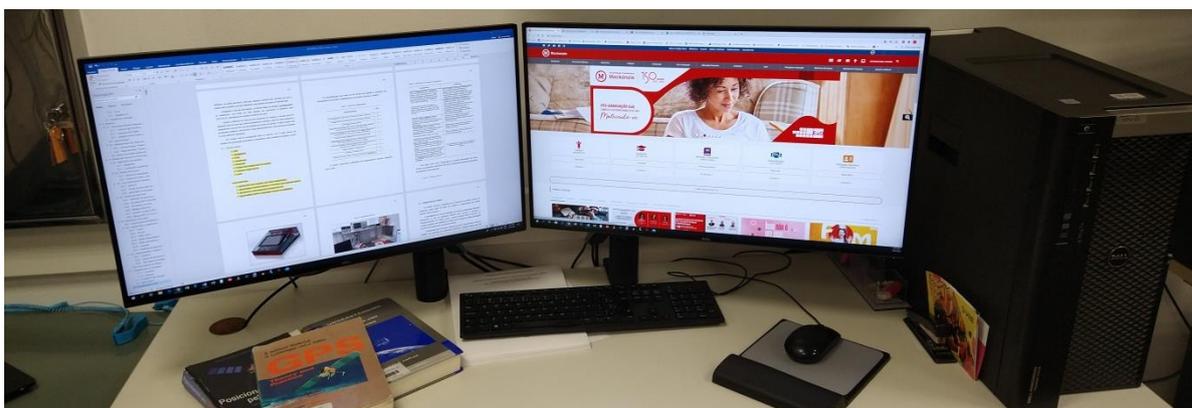
Com o investimento obtido, o projeto agora conta com um pequeno, mas bem equipado, laboratório de eletrônica para o desenvolvimento das atividades práticas (Figura 46). Esta bancada foi instalada no Laboratório de Geotecnologias da Escola de Engenharia da UPM que, além de ceder o espaço, colocou à nossa disposição estações de trabalho de alto desempenho (Figura 47), material de consumo e impressoras 3D para a fabricação das partes do gabinete do protótipo.

Figura 46 – O laboratório GEOLOCAL



Fonte: Autoria própria

Figura 47 - Uma das estações de trabalho do Laboratório de Geotecnologias usada nas pesquisas



Fonte: Autoria própria

4.7.5 Gabinete em CAD

Foram desenhados em ferramenta CAD, na ferramenta 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 em CAD várias propostas da caixa/gabinete até chegarmos a uma versão adequada às necessidades do projeto, compacta, leve e portátil (Figura 48). Este modelo foi, então, confeccionado usando-se uma impressora 3D GTMax GT2 de grande tamanho.

Figura 48 - Projeto em CAD 3D



Fonte: Autoria própria

4.7.6 Montagem final do protótipo

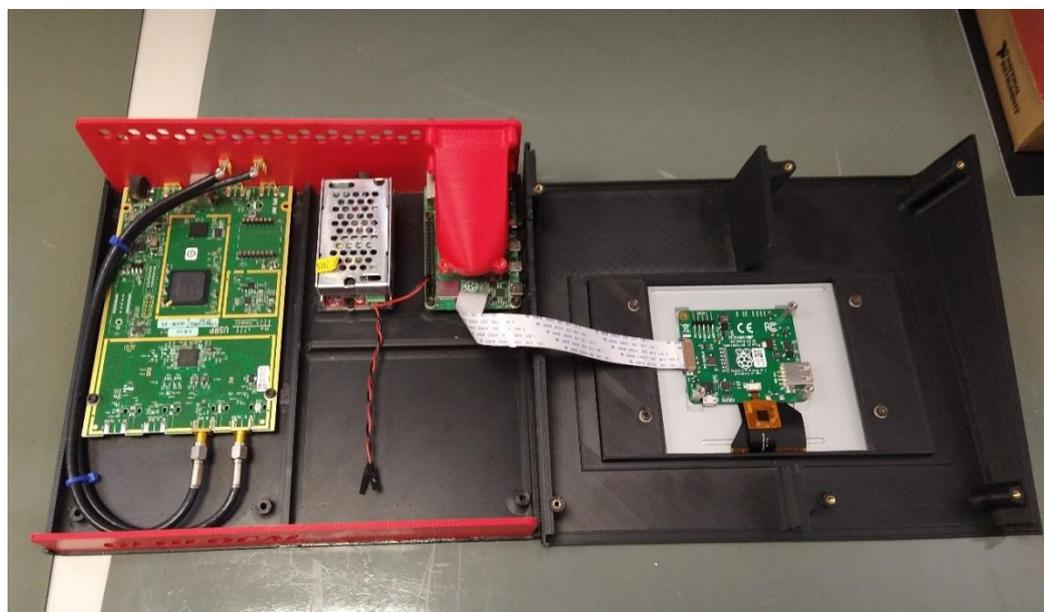
Foram construídos três protótipos, sendo dois com display LCD para monitoramento de processos e um terceiro sem, para funcionar como base central ligado diretamente ao notebook. A Figura 49 mostra a montagem e construção em diferentes etapas e a Figura 50 mostra o interior de um protótipo finalizado apresentando detalhes de sua construção interna.

Figura 49 - Protótipos em diversas etapas de montagem



Fonte: Autoria própria

Figura 50 - Disposição interna dos elementos. Da esquerda para a direita, a placa USRP, fonte de alimentação chaveada, Raspberry Pi 4 (sob o cooler) e o display com sua placa controladora.



Fonte: Autoria própria

4.8 CONFIGURAÇÃO E TESTES INICIAIS

Os testes iniciais consistiram numa verificação geral de funcionamento e conectividade entre as partes. Posteriormente, para verificação do rádio e

capacidade de processamento foi instalado no ambiente operacional o software GNSS-SDR que realiza as funções de um GPS.

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

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

O notebook em particular foi formatado previamente para retirar qualquer vestígio de outro sistema que acompanha o equipamento garantindo 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.

Foram realizados testes funcionais com o equipamento:

- teste de funcionamento da interface do GNURadio;
- teste de funcionamento da placa USRP;
- sugestão de flowchart para processamento de sinais.

4.8.1 Teste do GNURADIO

Definiu-se para este teste que um flowchart seria implementado no GNURadio e executado, mostrando-se o resultado em uma tela do próprio ambiente. Este tipo de teste verifica:

- a instalação correta do Linux;
- a instalação e integração com o GNURadio e suas bibliotecas;
- o funcionamento do SDR em modo de simulação.

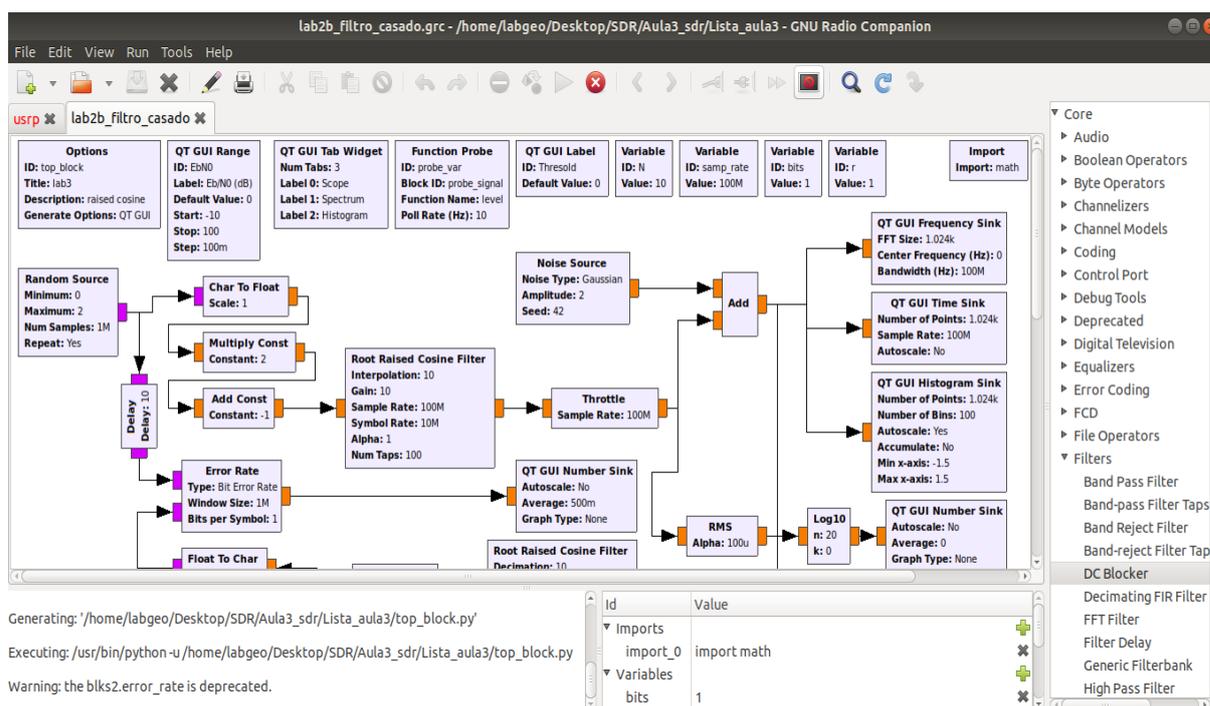
Para o teste utilizou-se um *flowchart* exemplo do GNURadio para implementação de filtro casado do tipo cosseno levantado (Figura 51). Um sinal digital randômico é gerado pelo bloco *Random Source* e, após seu condicionamento, é enviado ao bloco *Root Raised Cosine Filter*. A saída desde filtro é combinada com uma inserção de ruído pelo bloco Add e enviada aos blocos de saída, em especial o **QT GUI Frequency Sink**²⁰. O sinal combinado no bloco Add também é enviado ao bloco *Error Rate* que vai comparar o sinal gerado por **Random Source** com a saída

²⁰ No GNURadio, todo bloco com sufixo *SINK* representa uma visualização de saída. E todo bloco com sufixo *SOURCE* representa ou controla um dispositivo de entrada.

após a inserção de ruído e avaliar a Relação Sinal/Ruído, cujo resultado é apresentado no display através do bloco **QT GUI Number Sink**.

Importante destacar que este *flowchart* não está ainda associado a um equipamento real de rádio, apenas está simulando a geração de sinais e ruídos para avaliar o funcionamento do filtro. A finalidade, aqui, é realizar apenas um teste funcional do processamento do GNURadio em tempo real.

Figura 51 - Flowchart do GNURadio para filtro casado.

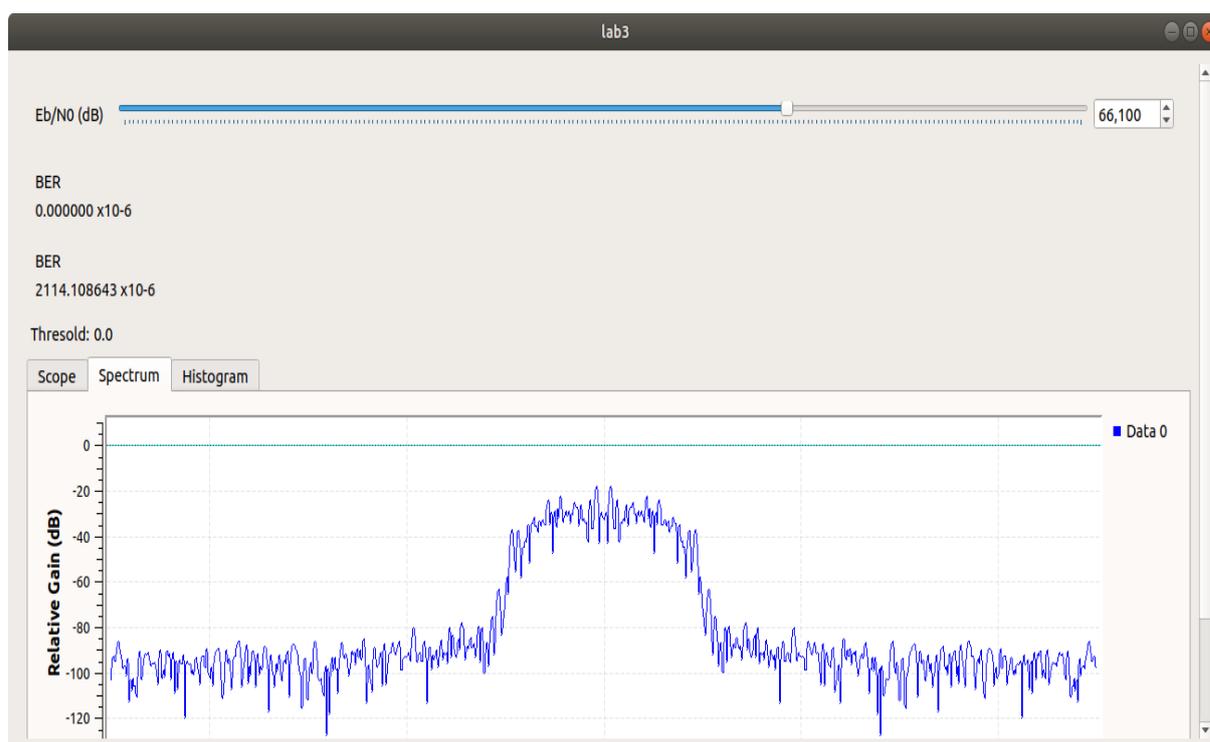


Fonte: Autoria própria

O resultado desta simulação é apresentado na Figura 52. Nota-se o BER (*Bit Error Rate*, Taxa de Bits com Erro) bastante elevado devido ao ruído, que cai para uma taxa zero após passar pelo filtro. O gráfico mostra que o sinal, em torno da frequência central, tem uma relação sinal/ruído de -66.1 dB.

Os resultados gráficos e de valores comprovam que a instalação do GNURadio está correta e funcional, permitindo um primeiro experimento prático.

Figura 52 - Análise de espectro para o filtro casado da Figura 45.



Fonte: Autoria própria

4.8.2 Teste de funcionamento da placa USRP

Para facilitar os testes funcionais, optou-se por uma solução chamada GNSS-SDR (2020). Esta solução é, na verdade, um aplicativo desenvolvido na plataforma GNURadio que implementa as funções de GNSS. O processamento é feito em rotinas próprias compondo uma solução completa e modular que permite, desde a recepção do sinal, até sua integração com mapas do Google ou outros aplicativos desde que com uma interface adequada.

Embora sem interface gráfica, sua operação é extremamente simples e a configuração dos blocos usa um arquivo texto com extensão *CONF* (GNSS-SDR, 2020).

Foi conectada uma antena de GNSS ao USRP e executado o comando de captura com o resultado apresentado pela Figura 53. Há de se notar que nas linhas verdes o aplicativo mostra as coordenadas capturadas.

Figura 53 - As mensagens de processamento de sinal na tela do Linux.

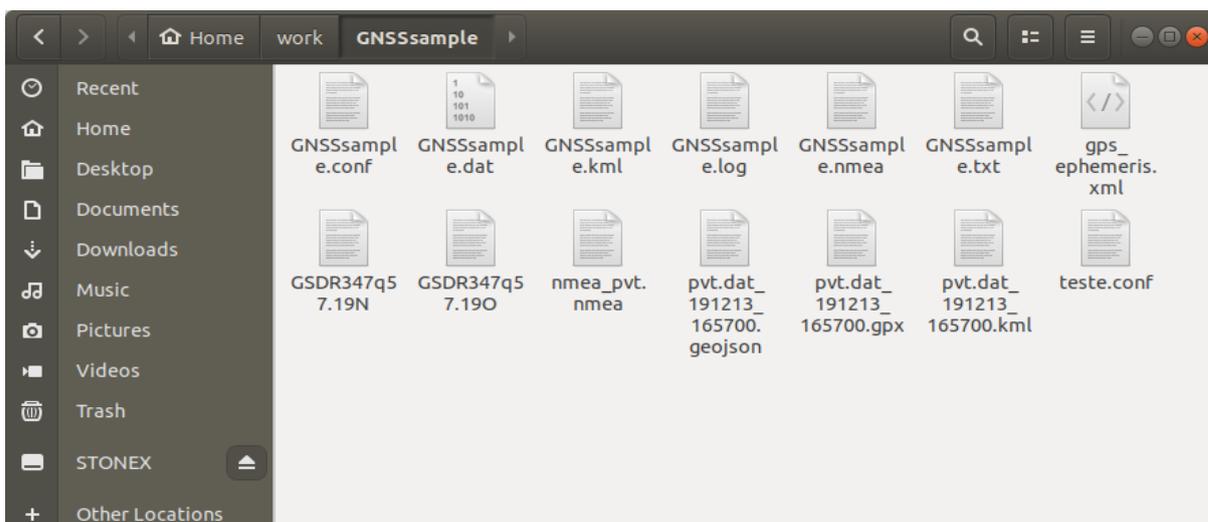
```
labgeo@station2: ~/work/GNSSsample
File Edit View Search Terminal Help
Position at 2013-Apr-04 06:24:43.000000 UTC using 5 observations is Lat = 41.27
4857734 [deg], Long = 1.987743901 [deg], Height = 76.297 [m]
Position at 2013-Apr-04 06:24:43.500000 UTC using 5 observations is Lat = 41.27
4778546 [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$
```

Fonte: Autoria própria

Ao final, o diretório mostrou os resultados em alguns arquivos (Figura 54). Estes arquivos podem ser processados por outros programas ou o próprio Google Maps.

Um teste final foi o de plotar sobre um mapa as coordenadas recebidas. A qualidade do sinal, durante o primeiro experimento, não estava adequada e as coordenadas estavam muito imprecisas e um experimento de campo, onde o sinal é mais adequado, fica como sugestão para pesquisas futuras.

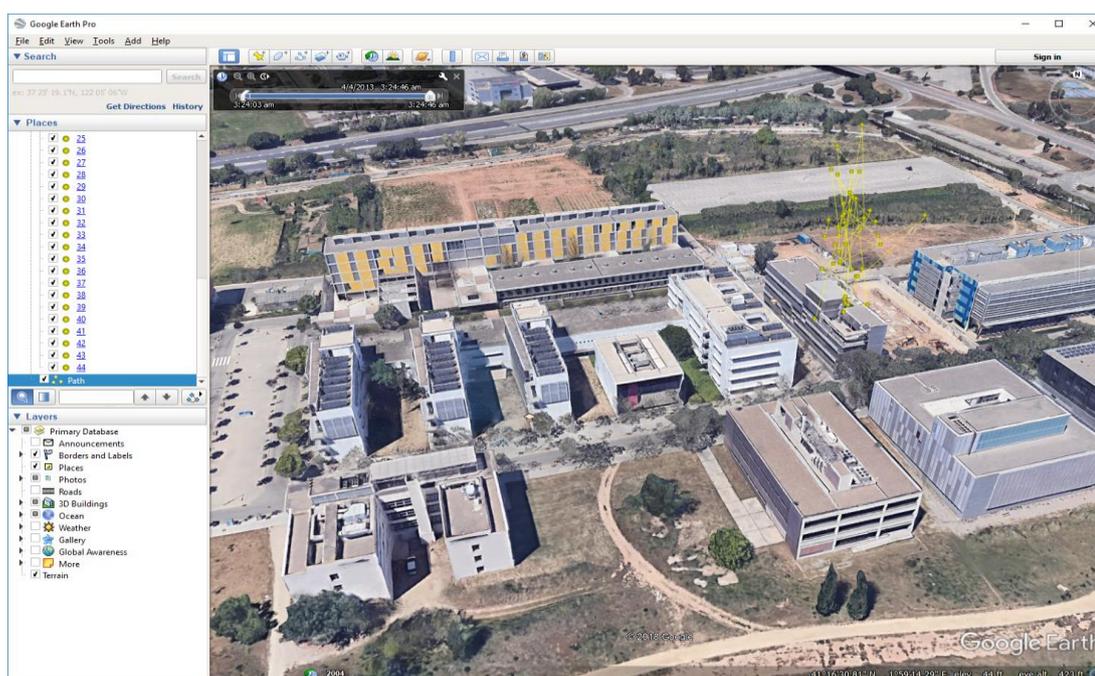
Figura 54 - Arquivos resultantes



Fonte: Autoria própria

No teste final de plotagem utilizou-se um arquivo exemplo obtido no próprio site da aplicação: o arquivo *pvt_dat_191213_165700.klm*, que foi aberto utilizando-se o software Google Maps. Isso nos levou ao *Baix Llobregat Campus* (Figura 55), um dos Campi da Universidade de Tecnologia da Catalonia (Espanha). Esses dados ainda precisariam passar por processos de correção e geolocalização.

Figura 55 - Representação gráfica do resultado do processamento das coordenadas processadas pelo software do protótipo

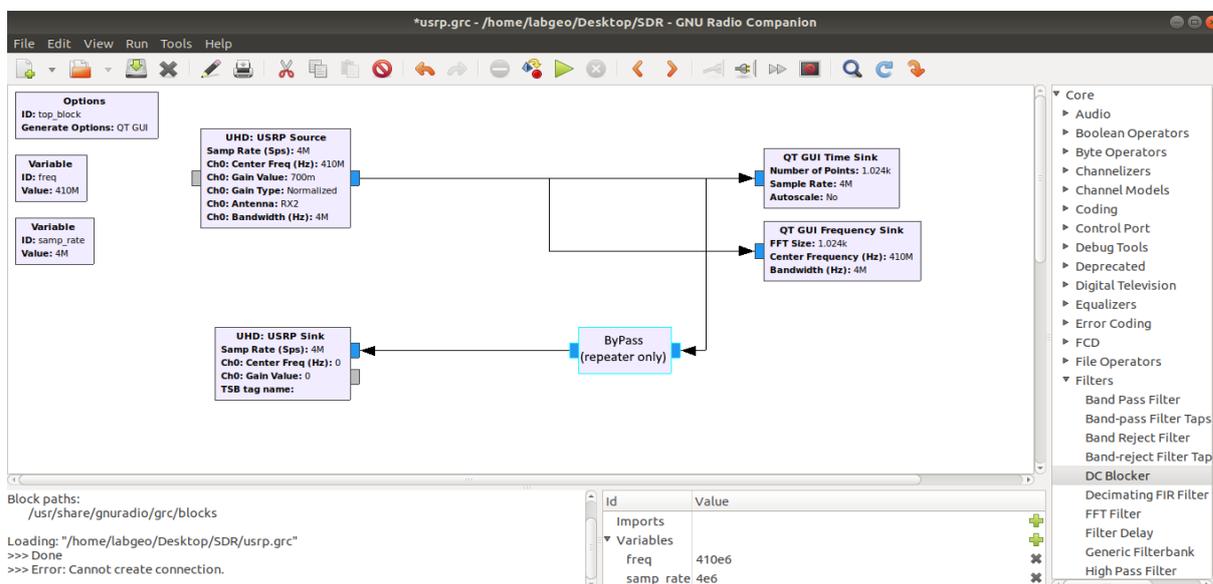


Fonte: Autoria própria

4.8.3 Uma sugestão de *flowchart* para teste de transmissão

O objetivo do *flowchart* da Figura 56 é a implementação no GNURadio de um transponder.

Figura 56 - *Flowchart* de transponder



Fonte: Autoria própria

Neste *flowchart* a placa USRP está conectada ao computador. Ela é controlada pelo bloco **USRP Source**, que está parametrizando diversas propriedades da placa. Em especial, cabe destacar a frequência na qual a placa está trabalhando (410 MHz), a banda de frequência (4 MHz, dos 56 MHz disponíveis) e que está em modo de recepção de sinais (RX2).

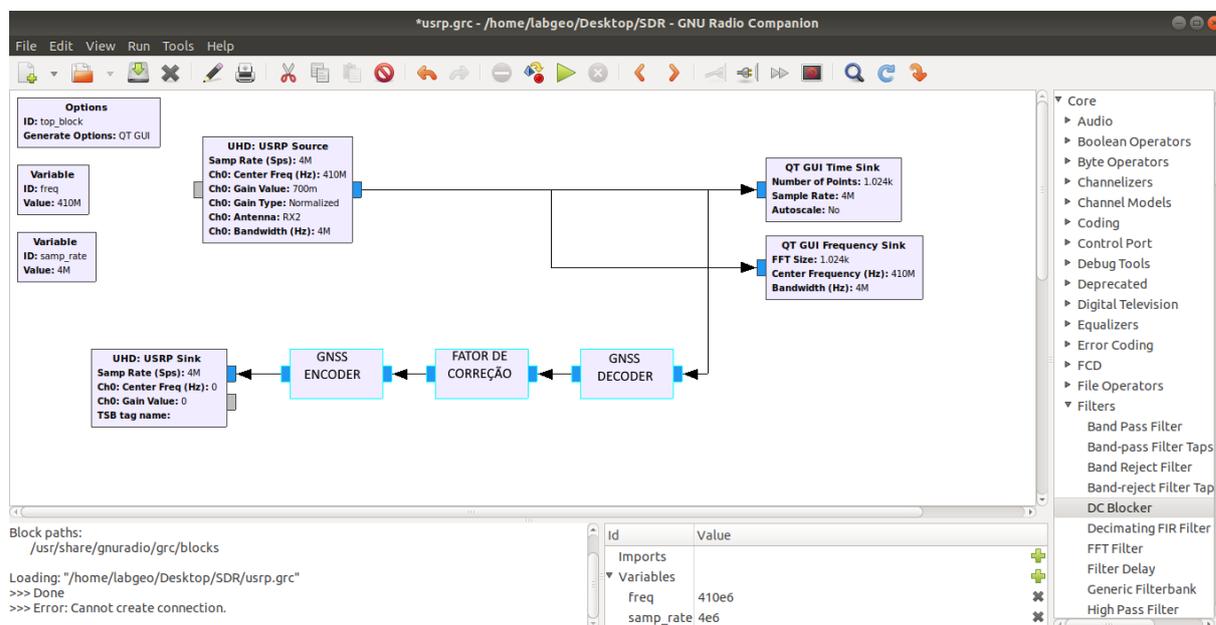
O sinal recebido pela placa sai do bloco **USRP Source** e é direcionado a dois monitoramentos (**QT GUI Time Sink** e **Frequency Sink**, que funcionam como um osciloscópio e um medidor de espectro). Além do monitoramento, é encaminhado a um bloco **ByPass** e em seguida para o USRP Sink, responsável pela transmissão do sinal.

Desta forma está implementado um transponder do GEOLocal onde todo o sinal que é recebido é retransmitido, porém apresentado em instrumentação de monitoramento para os testes.

O bloco **ByPass** representa um ou mais blocos a serem especificados e desenvolvidos em C++/Python, que irão, em trabalhos futuros e durante as provas de conceito, implementar possíveis condicionamentos de sinal do GEOLocal.

Um exemplo da aplicação de módulos de condicionamento de sinal está na Figura 57, onde o sinal recebido por um GNSS pode ser decodificado, alterado, recodificado e retransmitido.

Figura 57 - Flowchart de repetidor com fator de correção



Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÕES E PESQUISAS FUTURAS

Neste trabalho abordamos a análise do Sistema GEOLOCAL sob o ponto de vista de engenharia para definir as especificações dos equipamentos e fatores de ambiente necessários para experimentos iniciais e provas de conceito, bem como desenvolver protótipos.

Os objetivos de análise foram explanados e alcançados no Capítulo 4 (Análise, Resultados e Discussão), iniciando por detalhar as premissas e propostas iniciais do sistema, avaliar opções e impactos sob o ponto de vista de projeto e sugerir soluções para os problemas que se apresentaram ao longo da pesquisa.

A análise das premissas mostrou ser necessária a definição de algumas especificações que estavam em aberto como, por exemplo, a comunicação entre as bases, o sincronismo de tempo, a flexibilização da base central, os suportes viáveis para os *transponders*, a combinação de mais de um método para o cálculo preciso de distâncias, limitações de banda de frequência e a compatibilidade do sistema com a atual base instalada de milhões de receptores de GNSS, entre outras. Após esta análise, verificou-se ser necessária a reformulação da proposta inicial do sistema.

Com a introdução de rádios full duplex, toda a comunicação das estações, tanto para medição de distâncias quanto para sincronismo de tempo com a central fica independente de outros sistemas. E sendo todas as estações iguais com relação a projeto, qualquer uma delas pode assumir o papel de estação central e coordenar as operações do sistema de forma automática no caso da estação central atual falhar ou tornar-se indisponível.

Em relação à topologia do sistema, foi proposta para os protótipos uma nova estrutura utilizando rádios SDR *full-duplex* para estações e *transponders*, permanecendo apenas o alvo com um rádio apenas receptor. O motivo da escolha da tecnologia SDR é que ele pode ser totalmente reconfigurado em funcionalidades e frequências apenas atualizando seu software, inclusive de forma remota. Isso agiliza o desenvolvimento de experimentos e protótipos mas também permite, para o produto final, atualizações futuras à medida que a tecnologia amadurece.

O processo proposto considera que os *transponders* poderão calcular por si seu posicionamento e navegação, torna-os peças ativas do sistema, com relógios sincronizados com as estações. Este processo pode ser implementado em

dispositivos já existentes como *transponders* de satélites de telecomunicações já existente meramente por software, através de contratação de canais e funcionalidades, sem a necessidade de se acrescentar hardware adicional.

O alvo passa a ser tratado, nesta nova proposta, como um dispositivo exclusivamente receptor, sem a necessidade de comunicação com a estação central, mantendo compatibilidade de tal modo que o GEOLOCAL possa ser implementado em todos os receptores de GNSS atuais meramente por atualização de seu software interno (*firmware*).

Foi proposto um procedimento para sincronia de tempo (inicial e periódica). Este processo considera que o sinal enviado pela estação central é retransmitido pelas repetidoras e demais estações, permitindo assim determinar os atrasos e sincronizar os relógios. Este processo, embora simples e funcional, pode guardar incorreções visto que os tempos de propagação podem ser diferentes entre o percurso de ida e volta do sinal, devendo ser confirmado por trabalhos futuros de simulação e experimentos práticos.

Os atrasos foram analisados e identificados seus componentes individuais, bem como as formas de medi-los, estimá-los ou eliminá-los. Dentre eles, destaca-se a possibilidade de desconsiderar os atrasos de processamento considerando-se a possibilidade de acoplar ao sinal recebido a referência de tempo usando-se o hardware do SDR através de reprogramação do FPGA da placa USRP.

O trabalho propõe inicialmente a utilização, para protótipos, da frequência de 410 Mhz e de antenas direcionais para os experimentos em áreas limitadas e com visada dos equipamentos, reduzindo a necessidade de utilização de amplificadores. Para experimentos em maior escala, sugere-se o estudo de amplificadores de RF e antenas omnidirecionais.

Este trabalho também analisou as diversas plataformas disponíveis para portar a repetidora e a sua viabilidade de implementação tanto na fase de testes quanto na fase de operação real do sistema. Chegou-se à conclusão que os *transponders*, em sistemas comerciais, são mais viáveis colocados em um segmento espacial (satélites). As demais opções a partir da estratosfera e abaixo prestam-se fundamentalmente para estudos acadêmicos e provas de conceito dadas as suas limitações de permanência no espaço aéreo, custo e outros fatores, incluindo a relação de área de cobertura do sistema para cada opção.

Em relação ao protótipo construído, foram analisadas opções de hardware e software para as estações e repetidoras e a configuração proposta, tanto para testes quanto para a operação real, é de um equipamento fundamentado em rádio SDR USRP B200 da National Instruments, disponível no mercado brasileiro através de seu representante comercial, que atende a faixa de frequência e as especificações. Possui suporte e literatura amplamente disponíveis.

Juntamente com o rádio, duas opções para o suporte computacional: um computador desktop ou notebook, para testes de bancada, e um Raspberry Pi para soluções compactas e de campo. Ambos com ambiente operacional Linux e desenvolvimento em C++ através de um *framework* gratuito e de arquitetura aberta GNURadio.

O protótipo foi construído e os primeiros testes mostraram que a integração das diversas partes do hardware não só criaram um ambiente adequado para desenvolvimento, mas também comprovaram seu funcionamento através de alguns experimentos práticos iniciais.

Considerando-se os aspectos analisados acima, concluímos que os objetivos propostos inicialmente na introdução deste trabalho foram alcançados. Fica claro, também, que o tema não está esgotado e abrem-se a partir daqui possibilidades para novos trabalhos e pesquisas.

5.1 PESQUISAS FUTURAS

Este trabalho não pretende esgotar todo o assunto sobre o GEOLOCAL. A intenção é servir como mais uma referência para pesquisas futuras. Algumas sugestões:

- implementar algoritmos e realizar as provas de conceito, inicialmente em superfície e depois com as *transponders* no espaço aéreo;
- validar e aperfeiçoar o algoritmo proposto como startup do sistema (item 4.5);
- Definir os protocolos de comunicação e os pacotes de dados que vão trafegar pelo sistema;
- Estudar a propagação de sinais entre os elementos do sistema, os tipos de antena, potências de transmissão e sensibilidade de recepção para avaliar as dimensões dos equipamentos e sua viabilidade em todas as plataformas previstas;

- Estudar o efeito do PDOP quando a projeção vertical dos *transponders* está sobre e além das linhas de fronteira do polígono formado pelas estações (esta situação vai ocorrer);
- Estudar a implementação de processos críticos do GEOLOCAL em FPGA e DSP ao invés de software, para reduzir o tempo e as incertezas da latência;
- Estudar o *drifting* e o *aging* em bancada, para as diversas estações de tempo, estabelecendo, dentro dos algoritmos do sistema, a periodicidade de se refazer o sincronismo entre estações e *transponders*;
- Pesquisar o uso de técnicas de Inteligência Artificial no software das estações para minimizar as incertezas.

REFERÊNCIAS

SPACEFLIGHT101, 2020. Disponível em: <spaceflight101.com/spacecraft/qzss/>. Acesso em: Abril 2020.

ANAC. **Drones**, 2020. Disponível em: <www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/drones>. Acesso em: Dezembro 2020.

ANATEL. **Plano de atribuição, destinação e distribuição de frequências no Brasil**. [S.l.]: Agência Nacional De Telecomunicações, 2020. Disponível em: <www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?numeroPublicacao=347196>. Acesso em: 28 set. 2020.

BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 3. ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2005. ISBN 978-0471667827.

BDS. **BeiDou Satellite System**, 2020. Disponível em: <en.beidou.gov.cn>. Acesso em: 2021.

BOWDITCH, N. **The American Practical Navigator**. 2002. ed. Bethesda, MD: National Imagery and Mapping Agency. ISBN 0-939837-54-4.

BROWN, C. D. **Spacecraft Mission Design**. 2. ed. [S.l.]: AIAA Education Series, 1998. 81 p. ISBN 978-1-60086-115-4.

CARREL, R. L. **Analysis and design of log-periodic dipole antenna**. Illinois: University of Illinois, 1961.

CHISHOLM, H. **Navigation**. 11th ed. ed. [S.l.]: Encyclopædia Britannica, v. 19, 2015.

CLARKE, A. C. Extra-Terrestrial Relays – Can Rocket Stations Give World-wide Radio Coverage?, v. 51, n. 10, p. 305–308, Outubro 1945.

DALY, P.; RILEY, S. **GPS/GLONASS Time Transfer with 20-Channel Dual GNSS Receiver**. UK: CAA Institute of Satellite Navigation, 1996.

DANA, P. Global Positioning System Overview: GPS Nominal Constellation, 1998. Disponível em: <www.colorado.edu>. Acesso em: 9 Novembro 2019.

DJI. Dà-Jiǎng Innovations, China. **Phantom 4 Pro**, 2019. Disponível em: <www.dji.com>. Acesso em: 02 dez 2019.

EL-RABBANY, A. **Introduction to GPS: the Global Positioning System**. EUA: Artech House, 2002.

ETTUS. USRP. **USRP**, 2020. Acesso em: ago. 2020.

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: [s.n.]. 2019.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Editora UFPR, 1994.

GIRO. **Global Ionosphere Radio Observatory**, 2020. Disponível em: <giro.uml.edu>. Acesso em: jan. 2021.

GNSS-SDR. **GNSS-SDR**, 2019. Disponível em: <www.gns-sdr.org>. Acesso em: nov. 2019.

GOLDONI, E. et al. **Experimental analysis of RSSI-based indoor localization with IEEE 802.15.4**. European Wireless Conference (EW). Lucca, Italy: [s.n.]. 2010. p. 71-77.

GOTTILEB, I. M. Practical RF power design techniques. [S.l.]: TAB Books, 1993. p. 251. ISBN 0-8306-4129-7.

GSA. **Galileo Satellite Agency**, 2020. Disponível em: <www.gsa.europa.eu>. Acesso em: 2020.

GUIER, W. H.; WEIFFENBACH, G. C. Genesis of Satellite Navigation. **Johns Hopkins APL Technical Digest**, v. 19, n. 1, 1998.

HAMA, S. et al. Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) Project. **Journal of the National Institute of Information and Communications Technology**, Japão, v. 57, n. 3/4, 2010.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **Global Positioning System: Theory and Practice**. 1997. ed. Viena: Springer-Verlag, 1997.

HOROWITZ, ; HILL, W. **The Art of Electronics Second Edition**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1989. ISBN 0-521-37095-7.

HUANG, Y.; BOYLE, K. **Antennas: From Theory to Practice**. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2008.

IBGE. **Acesso e uso de dados geoespaciais**. Rio de Janeiro: IBGE, Coordenação de Cartografia, 2019. ISBN 978-85-240-4508-0.

IDST. Quantum Positioning for Future Accurate Navigation of Submarines and Missiles. **International Defence Security and Technology**, 2016. Disponível em: <idstch.com/home5/international-defence-security-and-technology/technology/quantum-technology/quantum-positioning-can-be-future-of-submarine-navigation/>. Acesso em: 4 Junho 2018.

INCRA. **Manual Técnico de Posicionamento**. 1ª. ed. [S.l.]: [s.n.], 2013. Disponível em: <http://www.incra.gov.br/sites/default/files/uploads/estrutura-fundiaria/regularizacao-fundiaria/certificacao-de-imoveis-rurais/manual_tecnico_de_posicionamento_1_edicao.pdf>. Acesso em: 2020.

ISRO. Indian Space Research Organization. **Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) – NavIC**, 2020. Disponível em: <www.isro.gov.in>. Acesso em: Dezembro 2020.

JAXA. QZSS. **JAXA Japan Aerospace Agency**, 2010. Disponível em: <<https://global.jaxa.jp/projects/sat/qzss/>>. Acesso em: FEV 2020.

KAPLAN, E. D. **Understanding GPS: principles and applications**. Norwood, MA: Artech House, Inc., 1996.

KAUFMANN, P. **Sistema e Processo de Posicionamento Geográfico**. PI 9101270-8, 30 set. 1997. Depositada em 25/03/1991.

KAUFMANN, P. **Sistema e Processo de Posicionamento geográfico**. CI 9101270-8, 17 maio 2002.

KAUFMANN, P. **Sistema e Processo de Posicionamento Geográfico e Espacial**. PI 03003968-4, 08 out. 2003.

KAUFMANN, P. et al. A New Independent GPS-Free System for Geo-Referencing from Space. **Positioning**, 2014. 37-45.

KAUFMANN, P.; KAUFMANN, P. L. **Processo e sistema para determinar alterações temporais na retransmissão e propagação de sinais, para medir distâncias, sincronizar atuadores e georeferenciamento**. PI 1102017-2, BR102012006120-1 A2, 19 mar. 2012. Depositada em 19/03/2012 e concedida em 02/02/2021.

KAUFMANN, P.; SILVEIRA, A. C. D. **GEOLOCAL: New Space Telecommunication Concept for Remote Positioning and Navigation**. IWT - International Workshop on Telecommunications. Santa Rita o Sapucaí - MG: INATEL. 2004. p. 69-72.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à Geofísica Espacial**. [S.l.]: EDUSP, 1991. ISBN 978-8572330015.

KLEIN, A. G.; SETHARES, W. A.; JOHNSON JR., C. R. **Software Receiver Design: Build your own digital communications system in five easy steps.** Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011.

KUMAR, A. A. **Fundamentals of Digital Circuits.** India: PHI Learning Pvt. Ltd., 2008.

LANG, K. **The Cambridge Guide to the Solar System.** [S.l.]: [s.n.], 2011. 15 p.

LANGLEY, R. B. Dilution of Precision. **GPS World**, Maio 1999. 52-59.

MACHO, E. P. Implantação de um Sistema Brasileiro de Georeferenciamento Independente de Outros Sistemas de Navegação por Satélite: O GEOLOCAL, São Paulo, 2018.

MEHRPARVAR, A. **CubeSat Design Specification.** California: The CubeSat Program, CalPoly SLO, 2014. Disponível em: <https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf>. Acesso em: dez. 2020.

MICROSEMI. CSAC Chip Scale Atomic Clock, 2019. Disponível em: <www.microsemi.com>. Acesso em: fev 2019.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações.** 2.ed. ed. São Paulo: UNESP, 2008.

NEWTON, S. I. **Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica.** 1687. ed. [S.l.]: Jussu Societatis Regiæ ac Typis Joseph Streater, 1687.

NIST , 2020. Disponível em: <tf.nist.gov/general/pdf/2297.pdf>. Acesso em: 2020.

PAMBOUKIAN, S. V. D. **Implementação das funções básicas do Geolocal: um sistema de navegação brasileiro independente de GNSS.** Instituto Presbiteriano Mackenzie. São Paulo, p. 225. 2020.

PHILLIPS, ; FRITZSCHE, H. Electromagnetic radiation. In: _____ **Encyclopedia Britannica**. [S.l.]: [s.n.], 2015. Disponível em: <www.britannica.com/science/electromagnetic-radiation>. Acesso em: mar. 2020.

QZSS. **Quasi-Zenith Satellite System**, 2020. Disponível em: <qzss.go.jp/en/>.

RIDENOUR. Radar System Engineering. In: _____ **MIT Radiation Labs series**. [S.l.]: MIT, v. 1, 1947.

ROLLER, D. W. **Eratosthenes' Geography**. New Jersey: Princeton University Press, 2010.

SHAIK, A. **Physics and Radio-Electronics**, 2021. Disponível em: <www.physics-and-radio-electronics.com>. Acesso em: Jan 2021.

SHI, C. et al. Precise orbit determination of Beidou Satellites with precise positioning. In: _____ **SCIENCE CHINA Earth Sciences**. [S.l.]: [s.n.], v. 55(7), 2012. p. 1079-1086.

STUTZMAN, W. L.; THIELE, G. A. **Antenna Theory and Design**. 2. ed. New York.: John Wiley & Sons, Inc, 1998.

TORRIERI, D. **Principles of Spread-Spectrum Communication Systems**. 4. ed. [S.l.]: [s.n.], 2018.

US GOVERNMENT. **Official US Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics**, 2019. Disponível em: <www.gps.gov/>. Acesso em: nov. 2019.

VALLEJO, R.; SANGUINO, J.; RODRIGUES, A. **Posicionamento com GNSS em cenários de multi-constelação**. [S.l.]: Universidade de Lisboa, 2014. Disponível em: <www.anacom.pt/streaming/RitaVallejo_8congURSI.pdf?contentId=1342425>. Acesso em: 02 Dezembro 2018.

WAKKER, K. F. et al. Navigation and Orbit Computation Aspects of the ESA NAVSAT System Concept. **Acta Astronautica**, v. 15, n. 4, 1987.

WATSON, R. C. **Radar Origins Worldwide: Histpry of Its Evolution in 13 Nations Through World War II.** [S.l.]: Trafford Publishing, 2009. ISBN 978-1-4269-2111-7.

WELLENHOF, B. H.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **Global Positioning System: Theory and Practice.** 4th. ed. Viena: Springer Publish Company, 1997.

XINGXING, L. et al. Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. In: _____ **Nature Scientific Reports.** [S.l.]: [s.n.], v. n.5/8328, 2015. Disponivel em: <www.nature.com/articles/srep08328>. Acesso em: 2 Dezembro 2018.

YAMAGAMI, T. et al. Development of the highest altitude balloon. **Advances in Space Research**, n. 33, p. 1653–1659, 2004.

ZELL, H. Types or Ballons. **NASA**, 2017. Disponivel em: <www.nasa.gov/scientific-balloons/types-of-balloons>. Acesso em: out. 2020.