

Universidade Presbiteriana Mackenzie

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais

Eduardo Perez Macho

**IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA BRASILEIRO DE
GEORREFERENCIAMENTO INDEPENDENTE DE OUTROS
SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE: O GEOLOCAL**

São Paulo

2018

LOMBADA:



IMPLANTAÇÃO DE UM SIST. BRAS. DE GEORREFERENCIAMENTO INDEPENDENTE DE OUTROS SIST. DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE: O GEOLOCAL
EDUARDO PEREZ MACHO

2018

Eduardo Perez Macho

**IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA BRASILEIRO DE
GEORREFERENCIAMENTO INDEPENDENTE DE OUTROS
SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE: O GEOLOCAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e Aplicações Geoespaciais.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Vicente Denser Pamboukian

São Paulo

2018

Ao Professor Doutor Pierre Kaufmann,
percursor da radioastronomia no Brasil
e idealizador do sistema Geolocal

AGRADECIMENTOS

Ao corpo docente do Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie pelos ensinamentos e disposição em ajudar sempre que necessário, aos colegas pelo apoio e incentivo durante meus estudos no mestrado e aos funcionários pela disponibilidade e suporte nas questões administrativas.

Ao meu orientador Sergio Vicente Denser Pamboukian por mostrar um caminho a ser seguido em meu trabalho de dissertação e por todas as correções e sugestões apontadas neste trabalho.

Aos demais membros da banca por aceitarem o convite e apresentar as melhorias necessárias ao aperfeiçoamento do trabalho.

A todos os familiares e amigos pelo apoio incondicional à minha escolha profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo suporte financeiro, oferecendo bolsa de estudo durante o mestrado.

“A melhor maneira de prever o futuro é cria-lo.”

Peter Drucker

RESUMO

Existe uma preocupação internacional quanto ao domínio do sistema de navegação GPS pelos Estados Unidos da América, e alguns países e continentes têm se empenhado em buscar soluções para se tornar independentes, como Rússia, União Europeia, China, Japão, Índia e Reino Unido. O Brasil, um dos países que utilizam o sistema norte americano para várias aplicações críticas e essenciais à sociedade, está desenvolvendo seu sistema próprio, o Geolocal, para garantir a independência e manter em funcionamento seus serviços essenciais, em caso de indisponibilidade do sistema americano. O sistema Geolocal utiliza um conceito de “GPS invertido” constituído de pelo menos 4 bases fixas no solo, 1 repetidora no espaço e 1 alvo no solo. O escopo deste trabalho é de compilar os documentos publicados sobre Geolocal, propor configurações para melhorar a acurácia do sistema aplicado à navegação de repetidoras e propor estudos que servirão de base para novas dissertações de mestrado, teses de doutorado e projetos de pesquisa. Como propostas de melhoria, estão a escolha das plataformas mais adequadas a cada situação para portar a repetidora no espaço; a identificação dos melhores modelos de propagação para cada altitude; o aprimoramento da geometria do sistema; o aumento da redundância de bases; e a avaliação da área de cobertura para determinar as distâncias entre bases para diferentes tipos e altitudes de repetidora.

Palavras-chave: Geolocal, sistema brasileiro de navegação, GPS invertido, independência de GNSS.

ABSTRACT

There is an international concern about the domain of United States of America regarding the GPS navigation system, and some countries and some continents have been committed to seek solutions to become independent, such as Russia, European Union, China, Japan, India and United Kingdom. Brazil, one of the countries that use the American system for many critical and essential applications to society, is developing its own system, the Geolocal, to guarantee the independence and keep its essential services working in case of unavailability of the American system. The Geolocal system uses the concept of “inverted GPS” with at least 4 fixed bases on the ground, 1 repeater in space and 1 target on the ground. The scope of this work is to compile the documents published about Geolocal, propose configurations to improve the accuracy of the system applied to the repeater’s navigation and propose studies that will be the basis of new master’s dissertations, doctoral theses and research projects. As proposed improvements, there are the choice of more appropriate platforms for each situation to carry the repeater in space; the identification of best propagation models for each altitude; the improvement of the geometry of the system; the increase of redundancy of bases; and the evaluation of the coverage area to determine the distances between bases for different kinds and altitudes of the repeater.

Key-words: Geolocal, Brazilian navigation system, inverted GPS, independence of GNSS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Constelação GPS com 24 satélites divididos em 6 planos orbitais a 20200 km de altitude e 55° de inclinação.	19
Figura 2: Tela de um software de posicionamento dinâmico de embarcações, mostrando as posições exatas dos satélites GPS e GLONASS visíveis em um determinado instante e os valores de HDOP e PDOP.	20
Figura 3: Sistema japonês QZSS com os 3 satélites em órbitas geossíncronas projetando um número 8 na superfície.	22
Figura 4: Sistema indiano NAVIC, com as projeções dos 3 satélites geoestacionários e 4 geossíncronos.	22
Figura 5: Sistema chinês BeiDou2, com as projeções dos 5 satélites geoestacionários, em vermelho, 5 geossíncronos, em azul, e dos satélites MEO, em verde.	23
Figura 6: Representação do sistema Geolocal com 4 bases fixas A, B, C e D, 1 repetidora no espaço R, e um alvo em terra P.	30
Figura 7: Cenário realístico de simulação com 4 bases de referências de posições geográficas conhecidas nas cidades paulistas de São Paulo, Itu, Campinas e Bragança Paulista, 1 aeronave portando 1 repetidora, sobrevoando a cidade de Jundiaí, e 1 alvo na cidade de Atibaia.	32
Figura 8: Repetidora de sinal R transportada por 1 aeronave vista pelas bases A, B, C e D auxiliando no sincronismo dos atuadores L, M e N localizados em posições geográficas conhecidas.	34
Figura 9: Sistema Geolocal, com as 3 bases fixas no solo, A, B e C, e a repetidora S no espaço, cuja altura é SS'	35
Figura 10: Sistema de coordenadas ortogonais e esféricas do projeto inicial do sistema Geolocal, com as 3 bases fixas no solo, A, B e C, e a repetidora R no espaço.	37
Figura 11: Plano xz, contendo a repetidora R, projetada no eixo x, formando 2 triângulos retângulos, usados para determinar o valor de xR	38

Figura 12: Plano xy, contendo a repetidora R, projetada na reta paralela ao eixo y, formando 2 triângulos retângulos, usados para determinar o valor de y_R	39
Figura 13: Posição de 4 repetidoras: R1, R2 e R3, definem as possíveis posições do alvo, P e P', e a repetidora R4 define a localização do alvo, P ou P'	40
Figura 14: Diagrama simplificado mostrando as 4 bases de referência no solo A, B, C e D, a repetidora R, e o alvo P.	41
Figura 15: Sistema de coordenadas ortogonais e esféricas do sistema Geolocal, com as 4 bases fixas no solo, A, B, C e D, a repetidora R no espaço, e um alvo P.....	43
Figura 16: Mapa do estado de São Paulo mostrando as cidades pré-selecionadas, utilizadas na simulação: bases A, B, C e D, alvo P e repetidora R.....	50
Figura 17: Diagrama de fluxo mostrando a rotina principal.	54
Figura 18: Diagrama de fluxo para determinar Δp_d e δR e a posição da repetidora em 4 instantes.	55
Figura 19: Diagrama de fluxo para determinar Δp_d e a posição do alvo.	58
Figura 20: Diagrama de fluxo para determinar a sincronização de relógio no alvo P.	59
Figura 21: Exemplo de erros causados por incertezas de sincronismos de relógio e atrasos de propagação, para uma faixa de $\pm 0,5$ ns.....	60
Figura 22: Exemplos de RPAs, da esquerda para a direita: ScanEagle da Insitu-Boeing; GlobalHank, da Northrop Grumman; e o protótipo Helios da AeroVironment.....	63
Figura 23: Representação dos ângulos zenitais z e z' , ângulo de elevação ϵ , raio da Terra R_e , altura da camada F2 da ionosfera H , base A, repetidora R e centro da Terra O, para ilustrar a conversão entre z e z'	71
Figura 24: Geometria de um sistema de localização de uma repetidora.	73
Figura 25: Posições no mapa das 5 bases, A, B, C, D, e E, e da repetidora R.	75
Figura 26: Posições no mapa de 12 bases, A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K e L, e 4 repetidoras, R1, R2, R3 e R4.....	79
Figura 27: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, B, C e D, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.....	83

Figura 28: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, B, C e E, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.	84
Figura 29: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, B, D e E, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.	85
Figura 30: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, B, C, D e E, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.	85
Figura 31: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, C, D e E, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.	86
Figura 32: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, B, C, D e E, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.	87
Figura 33: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K e L, a repetidora R1, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.	88
Figura 34: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K e L, a repetidora R2, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.	89
Figura 35: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K e L, a repetidora R3, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.	89
Figura 36: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K e L, a repetidora R4, e altitudes de de (a) 30 e (b) 40 km.	90
Figura 37: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, altitude de 30, para 5 bases (a, b, c, d) e 12 bases (e, f, g, h).	92
Figura 38: Representação de bases fixas (pontos pretos), bases de controle (pontos vermelhos e vazados), ângulos de elevação e distâncias, de uma possível distribuição de bases em uma certa região, para uma repetidora de altura h.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Localizações geográficas precisas (latitudes, longitudes e altitudes) das bases e do alvo, utilizadas nas simulações.....	49
Tabela 2: Localizações geográficas (latitudes, longitudes e altitudes) de uma repetidora sendo transportada por uma aeronave, sobre a cidade de Jundiaí.	49
Tabela 3: Localizações geográficas (latitudes, longitudes e altitudes), encontradas pela simulação MATLAB, de uma repetidora sendo transportada por uma aeronave, sobre a cidade de Jundiaí.	57
Tabela 4: Localização geográfica (latitude, longitude e altitude), encontrada pela simulação MATLAB, de um alvo P na cidade de Atibaia.	58
Tabela 5: Principais características das plataformas que podem ser utilizadas para portar a repetidora.	67
Tabela 6: Localizações geográficas (latitudes, longitudes e altitudes) das bases A, B, C, D e E e da repetidora R, utilizadas nas simulações.	75
Tabela 7: Cálculo do PDOP na simulação de 5 combinações de 4 bases fixas, e de 1 combinação de 5 bases fixas, para cada altitude da repetidora.	77
Tabela 8: Localizações geográficas (latitudes, longitudes e altitudes) de 12 bases e 4 repetidoras, utilizadas nas simulações.	78
Tabela 9: Valores dos PDOPs calculados pela simulação para cada repetidora; valores de elevação das repetidoras em relação a cada base; e elevação média.	80
Tabela 10: Localizações geográficas (latitudes, longitudes e altitudes) de uma repetidora, e erro na posição da repetidora, em 5 simulações diferentes.	82

LISTA DE ABREVIATURAS

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANT	<i>Autonomy and Navigation Technology</i>
APL	<i>Applied Physics Laboratory</i>
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DOP	<i>Dilution of Precision</i>
DSTL	<i>Defence Science and Technology Laboratory</i>
ECEF	<i>Earth Centered, Earth Fixed</i>
EHF	<i>Extremely High Frequency</i>
EUA	Estados Unidos da América
EUV	Extremo Ultra-Violeta
GEO	<i>Geostationary Orbit</i>
GLONASS	<i>Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPSDOP	<i>GPS disciplined oscillator</i>
GRC	<i>GNU Radio Companion</i>
HDOP	<i>Horizontal Dilution of Precision</i>
IPP	<i>Ionospheric Piercing Point</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
LLA	Latitude, Longitude, Altitude
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
NAVIC	<i>Navigation Indian Constellation</i>
OACI	Organização da Aviação Civil Internacional
OCXO	<i>Oven-Controlled Crystal Oscillator</i>
PDOP	<i>Position Dilution of Precision</i>
PDS	Processamento Digital de Sinais
QZSS	<i>Quasi-Zenith Satellite System</i>

RPA	<i>Remotely-Piloted Aircraft</i>
SDR	<i>Software-Defined Radio</i>
SHF	<i>Super High Frequency</i>
SoOP	<i>Signals of Opportunity</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TCXO	<i>Temperature-Compensated Crystal Oscillator</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
URSS	União da República Socialista Soviética
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VDOP	<i>Vertical Dilution of Precision</i>
VTEC	<i>Vertical Total Electron Content</i>
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

δ_r	Atraso na recepção
δ_R	Atraso na repetidora
δ_t	Atraso na transmissão
Δt	Diferença de tempo
Δpd	Atraso de propagação
ε	Ângulo de elevação
λ	Longitude
σ	Desvio padrão
τ_{atm}	Tempo de atraso atmosférico no zênite
φ	Latitude
a	Semieixo maior da Terra
b	Semieixo menor da Terra
c	Velocidade da luz
e	Excentricidade da Terra
E	Erro de posição
f	Frequência
h	Altura de um objeto
H	Altura da ionosfera
N	Raio de curvatura
N_e	Densidade eletrônica
P	Pseudo-distância
R	Repetidora
R_e	Raio da Terra
s	Distância de percurso
S_t	Fator de inclinação
t_z	Atraso de propagação vertical
x_R	Coordenada x da posição da repetidora

y_R	Coordenada y da posição da repetidora
z	Ângulo zenital
z_R	Coordenada z da posição da repetidora

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Origem da Navegação via Satélite	16
1.2. Sistemas Globais por Satélites	18
1.3. Sistemas Locais por Satélites	21
1.4. Sistemas Alternativos de Navegação	23
1.5. Objetivos da Dissertação	26
1.5.1. Objetivo Geral	26
1.5.2. Objetivos Específicos	26
1.6. Justificativa	27
2. O GEOLOCAL	30
2.1. Aspectos Gerais.....	30
2.2. Aplicações do Sistema Geolocal	33
3. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA GEOLOCAL	35
3.1. Escopo inicial	35
3.2. Cálculo das posições da repetidora e do alvo, utilizando 3 bases.	36
3.3. Escopo atual.	41
3.4. Cálculo da posição da repetidora utilizando 4 bases.	42
4. SIMULAÇÃO DO SISTEMA GEOLOCAL	49
4.1. Preparando os dados para a simulação – exemplo prático	50
4.2. Cálculo da posição da repetidora – exemplo prático.....	52
4.3. Simulação utilizando 4 bases para determinar a posição da repetidora e do alvo e para sincronizar relógio.....	54
4.4. Simulação incluindo incertezas	60
5. PROPOSTAS DE MELHORIA	62
5.1. A escolha da plataforma	62
5.2. A escolha de um modelo de propagação	67
5.3. Comparação entre distribuições de bases através do PDOP	72
5.4. Comparação entre distribuições de bases através do erro na posição da repetidora	82
5.5. A área de cobertura do sistema	93
6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	97
6.1. Conclusão.....	97
6.2. Trabalhos futuros.....	99
7. REFERÊNCIAS	101

1. INTRODUÇÃO

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

1.1. Origem da Navegação via Satélite

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

Sinais de 20MHz, propositalmente emitidos pelo Sputnik1 durante sua órbita na Terra, como forma de propaganda do feito soviético, tinha uma largura de banda de 1KHz suficiente para incluir o desvio Doppler durante sua passagem em um determinado local da Terra: quando o satélite se aproximava de um observador com uma antena receptora, a frequência aumentava, e quando o satélite se afastava, a frequência diminuía. Isto possibilitou aos pesquisadores do Laboratório de Física Aplicada (APL – *Applied Physics Laboratory*) Johns Hopkins que captassem e gravassem os sinais, identificando o instante exato em que o satélite aparecia no horizonte, o instante em que o satélite desaparecia no horizonte oposto, e o

instante em que o desvio doppler alternava de aproximação para afastamento. Com a diferença de tempo entre horizontes e com o desvio Doppler, foi possível identificar o momento em que a distância entre o satélite e o receptor era mínima, e determinar a órbita completa do satélite. Eles concluíram que seria possível inverter a solução, ou seja, determinar a posição de uma estação receptora, assumindo que a órbita de um satélite fosse conhecida (GUIER; WEIFFENBACH, 1998, p. 15-16).

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

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

O Transit permaneceu em funcionamento até 1996, e o GPS, em operação plena desde 1995, funciona até hoje e seu sistema é o mais utilizado no mundo – inclusive no Brasil. O projeto orbital do GPS foi desenhado de tal maneira que sempre existam, pelo menos, 4 satélites eletronicamente visíveis pelo equipamento de um usuário em qualquer lugar da Terra. O número mínimo para a constelação de satélites para que isso seja possível, considerando uma inclinação orbital de 55 graus com o plano do equador e um período orbital de 12 horas, é de 21, desde que estejam igualmente espaçados (HOFMANN-WELLENHOF et al, 1997, p. 3-4).

Um sistema de navegação que, como o GPS, integra satélites orbitando o planeta e permite uma cobertura global, é conhecido como Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS - *Global Navigation Satellite System*).

Atualmente, além do sistema americano GPS, existem outros sistemas GNSS, operando outras constelações de satélites, como o russo Sistema de Navegação Global por Satélite (GLONASS - *Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), o europeu Galileo, e o chinês BeiDou-2, também conhecido como Compass. O sistema GLONASS está totalmente operante e possui cobertura global desde 2011, e os sistemas Galileo e BeiDou-2 estão em operação parcial, com previsão de operação plena para 2020. Destes 4 sistemas, o Galileo é o único com origem não militar.

O Japão e a Índia também estão desenvolvendo seus sistemas próprios, mas em escala local, conhecidos, respectivamente, como Sistema de Satélites Quase-Zenital (QZSS – *Quasi-Zenith Satellite System*), e a Constelação Indiana de Navegação (NAVIC – *Navigation Indian Constellation*), em que os satélites são posicionados de maneira que fiquem sempre visíveis pelos usuários desses países.

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

1.2. Sistemas Globais por Satélites

Até o presente momento, existem 2 sistemas de navegação em pleno funcionamento que utilizam satélites e possuem cobertura global, ou seja, 2 sistemas GNSS: o

norte americano GPS e o russo GLONASS. Estes sistemas, em operação tanto para uso militar como civil, permitem obter a localização e navegação dos usuários, sob quaisquer condições meteorológicas. Como auxiliam um número ilimitado de usuários, e, além disso, são usados em operações críticas de segurança, esses sistemas são unidirecionais, ou seja, os usuários apenas recebem os sinais provenientes de satélites, sem transmitir nada a eles.

Os satélites GPS, mostrados na Figura 1, e GLONASS estão localizados na órbita terrestre média (MEO – *Medium Earth Orbit*), ou seja, em altitude acima de 2000 km e abaixo de 36000 km, sendo os satélites GPS localizados à 20200 km, e os satélites GLONASS à 19100 km da superfície da Terra. Estes satélites possuem excentricidades inferiores a 0,02, o que significa que suas órbitas são praticamente circulares, sendo que cada satélite GPS possui um período orbital de 11 horas e 58 minutos, e cada GLONASS, 11 horas e 15 minutos. Ambos os sistemas possuem 24 satélites, com a diferença de que o GPS se divide em 6 planos orbitais, com 4 satélites cada, e inclinação de 55 graus com o Equador, e o GLONASS se divide em 3 planos orbitais, com 8 satélites cada, e 65 graus de inclinação. Com isso, o GPS é capaz de fornecer melhor acurácia em latitudes baixas e médias, e o GLONASS, em latitudes altas (EL-RABBANY, 2002, p. 1-6; DALY, 1996, p.159-161).

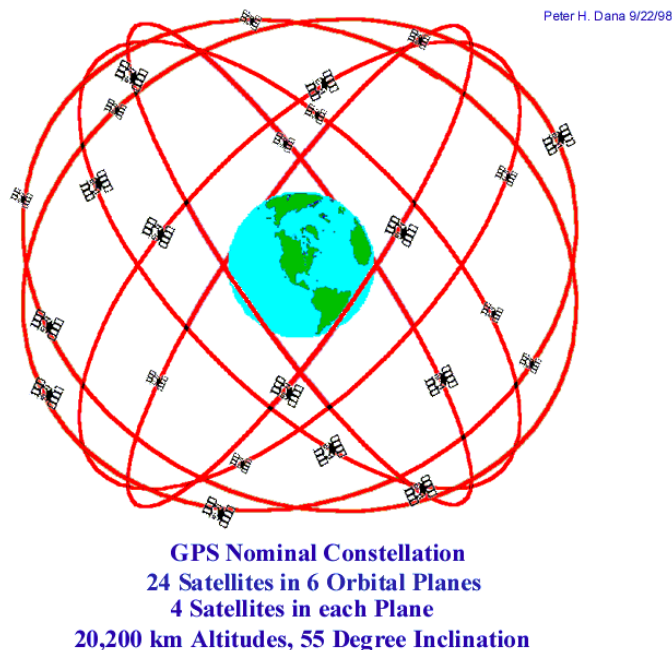


Figura 1: Constelação GPS com 24 satélites divididos em 6 planos orbitais a 20200 km de altitude e 55° de inclinação (DANA, 1998).

Em uma operação crítica, como, por exemplo, em uma aproximação de um navio petroleiro à uma plataforma, os sistemas GPS e GLONASS podem ser combinados, resultando em um aumento do número de satélites visíveis e uma geometria mais favorável, e, conseqüentemente, as estimativas de posição obtidas são mais precisas e exatas, e a disponibilidade é aumentada. Esta combinação não só melhora muitas aplicações, especialmente em condições de pouca visibilidade, mas também estas podem tirar partido das diferentes características de cada sistema (VALLEJO et al, 2014, p. 1).

A precisão do sistema é dimensionada por um fator de correção conhecido como Diluição de Precisão (DOP – *Dilution of Precision*), cujo valor indica a precisão das coordenadas geradas a partir da geometria dos satélites visíveis em um determinado instante. Quanto menor o valor de DOP, melhor a precisão, e valores próximos a 1,0 significam que os satélites não estão alinhados uns aos outros, mas bem espalhados, formando uma geometria favorável a fornecer um posicionamento bem preciso. A combinação de sistemas favorece a um valor de DOP menor, e a Figura 2 mostra um dos softwares utilizados em embarcações de apoio a plataformas, o Orion da Veripos, que contém uma tela onde aparecem as posições dos satélites visíveis por uma embarcação, em um determinado instante (VERIPOS, 2018).

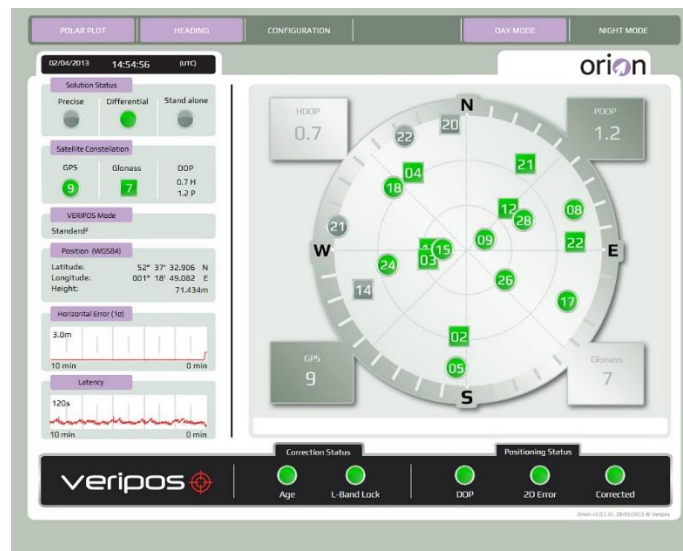


Figura 2: Tela de um software de posicionamento dinâmico de embarcações, mostrando as posições exatas dos satélites GPS e GLONASS visíveis em um determinado instante e os valores de HDOP e PDOP (VERIPOS, 2018).

No exemplo da Figura 2, aparecem 9 satélites GPS (em forma de círculos) e 7 GLONASS (em forma de quadrados). A sigla HDOP indica a precisão horizontal (*Horizontal*

DOP) e a sigla *PDOP* (*Position DOP*) é a combinação entre a precisão horizontal e vertical (*VDOP* - *Vertical DOP*). Neste caso, o valor de *HDOP* é 0,7 e o de *PDOP* é 1,2, ou seja, os satélites estão bem espalhados, como mostra a Figura 2, gerando valores de latitude e longitude precisos (precisão horizontal), bem como de altitude (precisão vertical), que para o caso de navios, é útil para verificar as condições de marés.

Os outros 2 sistemas que também adotaram o GNSS são o Galileo e a BeiDou-2. O sistema europeu, Galileo, foi fundado numa parceria entre a União Europeia e a Estação Espacial Europeia, e o sistema BeiDou-2, pela China; ambos objetivando uma independência dos sistemas americano e russo. Eles estão em operação parcial, com previsão de operação plena para 2020, sendo que o Galileo terá 30 satélites na altitude média de 23600 km, e o BeiDou-2 terá 27 satélites na altitude média de 21500 km, além de 5 satélites geoestacionários (na linha do equador, orbitando à 36000 km, onde os satélites possuem a mesma velocidade de rotação da Terra, ficando relativamente estáticos a um observador na superfície do planeta) e 3 satélites na órbita geossíncrona (órbita de 36000 km, porém não paralelo à linha do equador) com inclinação de 55° (XINGXING, 2015).

Dos 4 sistemas GNSS (GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou-2), o Galileo é o único desenvolvido exclusivamente para fins civis (por ex. JULIÃO, 2010).

1.3. Sistemas Locais por Satélites

Os sistemas locais que utilizam satélites são o sistema japonês, QZSS, o indiano, NAVIC, e, de forma parcial, o chinês BeiDou-2.

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

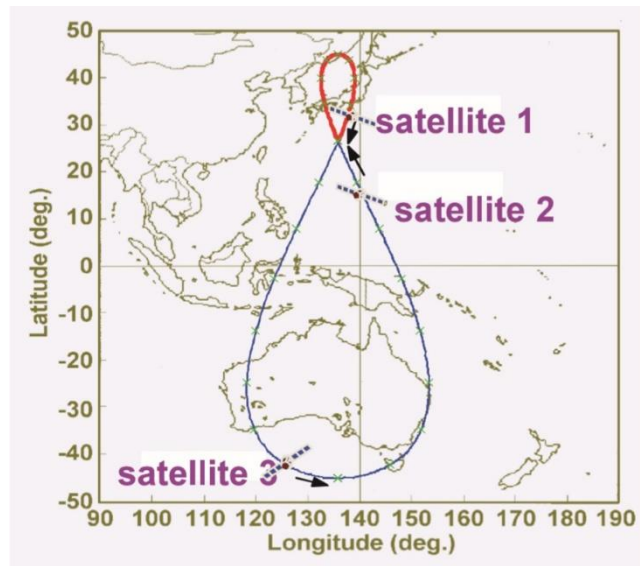


Figura 3: Sistema japonês QZSS com os 3 satélites em órbitas geossíncronas projetando um número 8 na superfície (HAMA et al, 2010, p. 3; animação: https://en.wikipedia.org/wiki/Quasi-Zenith_Satellite_System#/media/File:Qzss-01-120s2.gif).

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



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

E o sistema chinês BeiDou-2, mostrado na Figura 5, utiliza atualmente 5 satélites geostacionários (pontos vermelhos) e 5 geossíncronos (cujas órbitas estão representadas por linhas azuis) sobre o continente asiático, priorizando a cobertura local. Os satélites MEO (cujas órbitas estão representadas por linhas verdes) estão sendo lançados gradativamente para garantir a cobertura global até 2020 (XINGXING, 2015).

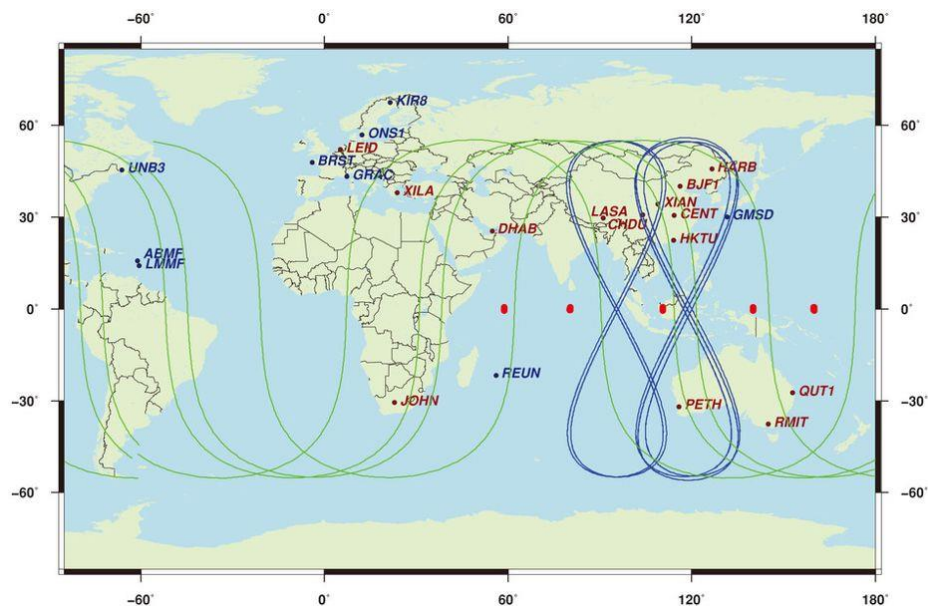


Figura 5: Sistema chinês BeiDou2, com as projeções dos 5 satélites geostacionários, em vermelho, 5 geossíncronos, em azul, e dos satélites MEO, em verde (LOU et al, 2014).

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

1.4. Sistemas Alternativos de Navegação

Os sistemas que utilizam satélites de navegação são amplamente utilizados no mundo. O GPS, especialmente, oferece uma alta precisão em sistemas militares, como em mísseis lançados a um alvo de coordenadas conhecidas, capazes de destruir um alvo inimigo

sem causar danos colaterais em regiões não envolvidas; em tanques de guerra; aeronaves e navios; e em aparelhos portáteis utilizados por soldados em campo aberto.

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

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

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

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

exatamente, está sendo transmitido, o sistema SoOP utiliza estações bases de coordenadas conhecidas, próximas ao usuário. Esse sistema, entretanto, não elimina erros de posicionamento resultantes de reflexões em áreas urbanas.

A terceira pesquisa, sistema de Navegação Assistida por Visão (*Vision Aiding Navigation*), também em desenvolvimento pelo ANT Center, utiliza o movimento percebido por câmeras instaladas em um veículo para detectar sua velocidade e rotação. Este sistema poderá ser utilizado em conjunto com o sistema de *beacons* ou o SoOP para garantir uma maior precisão na navegação via satélite (FISCHER; RAQUET, 2011, p. 27-30).

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

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

1.5. Objetivos da Dissertação

1.5.1. Objetivo Geral

O objetivo desta dissertação é analisar o estágio atual de desenvolvimento do sistema brasileiro de georreferenciamento (Geolocal), propondo melhorias para o mesmo e indicando como as pesquisas futuras podem ser conduzidas.

1.5.2. Objetivos Específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- compilar as informações (artigos, patentes, algoritmos, simulações e outras) apresentadas até o momento para o desenvolvimento e implantação do sistema Geolocal;
- identificar fatores que prejudicam a acurácia do sistema atual, como os modelos utilizados para estimar o atraso no tempo de propagação do sinal, a forma como é determinado o tempo de trânsito do sinal dentro da repetidora e outras incertezas;
- propor novas configurações para o sistema de forma a melhorar a acurácia do mesmo para navegação de repetidoras;
- analisar as novas propostas por meio de simulações computacionais;
- propor estudos detalhados sobre as características, implantação e funcionamento do sistema Geolocal que poderão servir de base para novas pesquisas.

1.6. 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. Além do GPS, como foi visto em subseções anteriores, existem outros 3 competidores potenciais que utilizam o sistema GNSS: o russo GLONASS, o europeu Galileo e o chinês BeiDou-2. E existem, também, países empenhados em obter tecnologia própria de geolocalização, como o Japão e a Índia, com seus sistemas locais de satélites, e o Reino Unido, com o sistema de Posicionamento Quântico, além de sistemas que estão sendo elaborados por entidades não governamentais.

Diversos países no mundo, inclusive o Brasil, ainda dependem inteiramente dos sistemas GNSS, principalmente o GPS, tanto para navegação terrestre quanto para várias aplicações críticas e essenciais, como transporte de veículos automotores, navegação aérea, navegação marítima, controle de máquinas agrícolas, construção, mineração, agrimensura, aerofotografia, mapeamento, automação de portos, sistema militar e de defesa, e aplicações com precisão de tempo (JEFFREY, 2010, p. 52).

Nos sistemas de transporte, a localização de veículos de carga, policiais ou bombeiros é utilizada em larga escala, bem como a navegação destes veículos. A maioria deles é equipada com monitores que sobrepõem a localização a um mapa previamente carregado. Na central de monitoramento, o GNSS é utilizado para rastrear e fornecer uma previsão da localização e da movimentação da frota e monitorar a rede de estradas, melhorando a eficiência do transporte e a segurança do motorista. No transporte de trens, o GNSS é usado em conjunto com *transponders* (repetidores de sinais) de localização de trens, que são monitorados a partir de uma central, que pode indicar com precisão a localização de cada locomotiva, a fim de reduzir acidentes e atrasos, e aumentar a segurança e a capacidade de transporte de cargas ou passageiros.

Na aviação, o GNSS é utilizado na navegação de aeronaves, desde a decolagem à aterrissagem, facilitando, principalmente, a navegação em áreas remotas que não são bem servidas por equipamento de auxílio terrestre, e tem como função primordial evitar acidentes aéreos e aumentar a segurança durante a aproximação da pista de aterrissagem.

Na navegação marítima, o GNSS oferece a acurácia necessária na determinação da posição de navios, tanto em mar aberto, como em manobras críticas em portos

congestionados. O GNSS é utilizado em conjunto com outros sistemas de auxílio à navegação, como radares, cartas náuticas eletrônicas e ecobatímetros.

O sistema GNSS também presta grande auxílio à agricultura, durante o planejamento, ao mapear o terreno, e durante o plantio, a fertilização e a colheita, ao guiar tratores e máquinas agrícolas pelo terreno, reduzindo custos e impactos ambientais, maximizando a eficiência do sistema de irrigação. As máquinas podem ser operadas, tanto de dia, como à noite, de forma automática, supervisionada por um condutor que somente atuará em caso de necessidade. As máquinas utilizadas em escavações também são beneficiadas com este sistema, nos processos de construção e mineração.

A agrimensura baseada em GNSS reduz o número de equipamentos de topografia e a quantidade de homens-hora necessária para a determinação de pontos sobre a superfície da Terra. Quando 2 pontos são separados por uma grande distância, ao invés de se utilizar múltiplas instalações de teodolitos, pode ser usado apenas uma base fixa e uma sonda que grava a posição de cada ponto.

Na aerofotografia e mapeamento, as aeronaves e satélites também se orientam pelo sistema GNSS, fornecendo um mapeamento cada vez mais preciso, com uma imagem espacial associada à imagem de construções locais, como é feito, por exemplo, pelo *Google Maps*, ou auxiliando no desenvolvimento de cartas náuticas, em conjunto com navios hidroceanográficos.

Os portos marítimos também estão cada vez mais se beneficiando com o sistema GNSS, durante o deslocamento de guindastes ao movimentar cargas e durante localização de containers no pátio, diminuindo perdas e aumentando a segurança dos estivadores.

Os sistemas militares de defesa utilizam o sistema GNSS para navegação, operações de busca e resgate, criação de mapas e uso de veículos não tripulados. Na navegação, soldados podem percorrer algum terreno desconhecido, conduzindo operações noturnas, através de receptores portáteis, e pilotos de aeronaves militares podem determinar sua posição e rumo a ser tomado. Nas operações de busca e resgate, em caso de acidente de uma aeronave, esta é equipada por um sinalizador GNSS que manda um sinal indicando sua posição para facilitar sua localização. O uso militar do GNSS também pode criar mapas ao percorrer território inimigo e desconhecido. Além disso, o GNSS pode ser usado em veículos não tripulados para reconhecimento de posição, logística, usado como isca para inimigos e para pesquisa e desenvolvimento.

Outra aplicação bastante importante dos sistemas GNSS é fornecer uma precisão de tempo em sistemas críticos e essenciais, como em sistemas de telecomunicação, redes elétricas e em sistemas financeiros. Como os satélites são equipados por relógios atômicos, com acurácia de poucos nanossegundos, estes importantes sistemas são sincronizados com os relógios dos satélites (JEFFREY, 2010, p. 53-58).

Devido a esta dependência dos sistemas GNSS para diversas aplicações importantes e essenciais à sociedade, muitos países estão empenhados em desenvolver um sistema próprio, e o Brasil, não podendo ficar de fora, pode se beneficiar com o sistema Geolocal, para garantir a independência e preservar seus serviços essenciais, em caso de indisponibilidade dos sistemas americano e russo.

2. O GEOLOCAL

Os sistemas que permitem as pessoas se orientarem na superfície da Terra podem fazer uso, ou não, de satélites orbitando o planeta. Os que usam satélites podem ter um alcance global – provendo cobertura para todo o planeta - ou local – para uma região, um país ou um continente. O Geolocal é um sistema de cobertura local e que não faz uso de satélites de navegação.

2.1. Aspectos Gerais

O Geolocal utiliza um conceito de “GPS invertido”, representado na Figura 6, com uma configuração mínima de 4 estações bases, fixas no solo, A, B, C e D, de coordenadas geográficas conhecidas, 1 repetidora no espaço R, e 1 alvo no solo P, que pode ser um usuário do sistema de navegação. A repetidora é o hardware responsável por retransmitir o sinal gerado por uma das bases, e o equipamento que carrega a repetidora é chamado de plataforma, que pode ser, por exemplo, uma aeronave tripulada ou não tripulada, um balão ou um satélite.

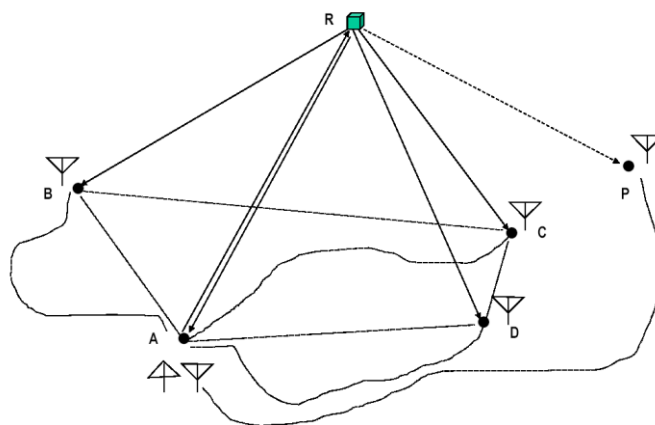


Figura 6: Representação do sistema Geolocal com 4 bases fixas A, B, C e D, 1 repetidora no espaço R, e um alvo em terra P (KAUFMANN et al, 2014, p. 3).

Para determinar a posição da repetidora, uma das bases é selecionada como base de controle, e, para este estudo, foi selecionada a base A. A base A envia um sinal, que é recebido pela repetidora e é retransmitido às 4 bases, gerando 4 medidas de tempo que permitem calcular as distâncias AR, BR, CR e DR. Com as distâncias calculadas, a posição da repetidora é encontrada pela triangulação das 4 bases, e, com 4 posições diferentes da repetidora, em tempos diferentes, ou 4 repetidoras, é possível determinar a posição do alvo, P. Cada distância é calculada através do tempo de propagação do sinal, desde a origem ao destino, multiplicando-o pela velocidade de propagação no meio. Estas distâncias calculadas devem sofrer correções, já que ocorrem atrasos de propagação nos instrumentos, cabos e conectores na transmissão e recepção, atrasos de propagação no meio atmosférico e atrasos devido ao trânsito do sinal na repetidora (KAUFMANN et al, 2014, p. 1-3).

Neste sistema, os atrasos nos equipamentos de transmissão e recepção podem ser determinados diretamente, com alta acurácia, dependendo apenas dos equipamentos utilizados, já que estão em bases fixas, de fácil acesso.

Os atrasos de propagação do sinal no meio são determinados por modelos de propagação. O modelo mais simples é o modelo baseado no conceito de planos paralelos, em que a correção de atraso de propagação (Δpd – *path delay*) é calculada como medida de distância pela Equação 1.

$$\Delta pd = c \cdot \tau_{atm} / \text{sen } \varepsilon \quad (1)$$

Na Equação 1, c é a velocidade da luz, τ_{atm} é o tempo de atraso atmosférico no zênite, e ε é o ângulo de elevação da repetidora em relação à base.

A repetidora que recebe o sinal da base A, pode sofrer um atraso antes de retransmitir o sinal. Este atraso de retransmissão na repetidora pode ser mensurável, caso o hardware seja de tecnologia própria do sistema Geolocal. Caso seja utilizada uma repetidora de terceiros, e o hardware for inacessível, este atraso não pode ser determinado diretamente, porém ele pode ser estimado através do algoritmo proposto por Kaufmann et al (2012). Para simular o comportamento do sistema Geolocal foi desenvolvido um software em MATLAB que implementa tal algoritmo (PAMBOUKIAN, 2012).

Utilizando-se este software, foi realizada uma simulação com 4 bases em posições geográficas conhecidas, nas cidades paulistas de São Paulo, Itu, Campinas e Bragança

Paulista, mostradas na Figura 7, uma aeronave sobrevoando a cidade de Jundiaí, carregando a repetidora a 6 km de altura, em 4 posições diferentes, e um alvo na cidade de Atibaia.

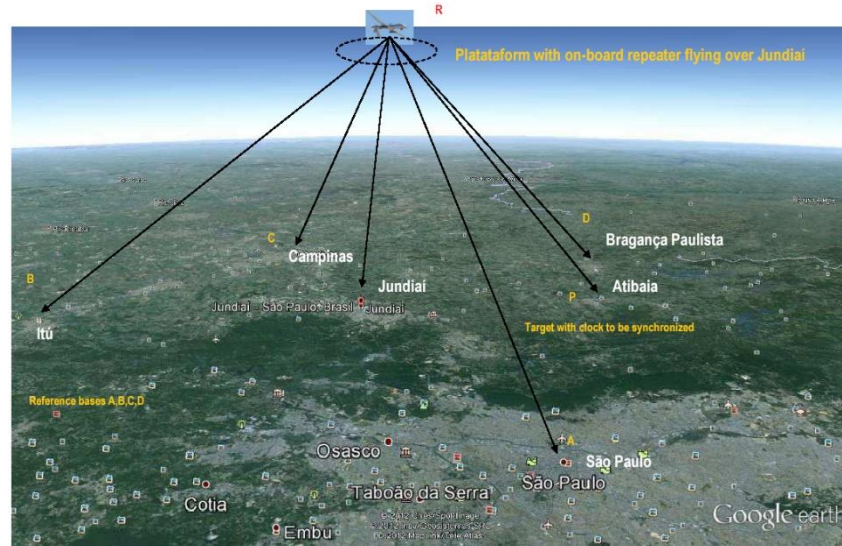


Figura 7: Cenário realístico de simulação com 4 bases de referências de posições geográficas conhecidas nas cidades paulistas de São Paulo, Itú, Campinas e Bragança Paulista, 1 aeronave portando 1 repetidora, sobrevoando a cidade de Jundiaí, e 1 alvo na cidade de Atibaia (KAUFMANN et al, 2014, p. 5).

Para validar o algoritmo proposto, a simulação foi realizada com um sistema ideal onde as bases possuem posições geograficamente bem definidas, os relógios estão perfeitamente sincronizados e os tempos de propagação e os *delays* (atrasos) são calculados de forma adequada desconsiderando-se as incertezas.

Os resultados obtidos com a simulação demonstraram que o algoritmo funciona de forma eficiente, com uma discrepância na posição do alvo de apenas 0,001 mm, considerada desprezível. Este valor, entretanto, serve apenas para validar o algoritmo, pois, na prática, as discrepâncias são maiores devido principalmente às incertezas de sincronização de relógio, tempos de propagação e atrasos na repetidora (KAUFMANN et al, 2014, p. 5-6).

A simulação em MATLAB também permitiu a realização de um estudo de acurácia do sistema quando são inseridas incertezas nos tempos de propagação no meio atmosférico, atrasos ocorridos nos instrumentos, cabos e conectores na transmissão e recepção, e atrasos devido ao trânsito do sinal na repetidora. Os resultados desta simulação estão descritos na subseção 4.4.

2.2. Aplicações do Sistema Geolocal

O sistema Geolocal pode ser utilizado para 3 aplicações básicas: navegação da plataforma que carrega uma repetidora no espaço, sincronismo remoto de relógio e localização remota de um alvo.

A primeira aplicação, navegação da plataforma que carrega uma repetidora no espaço, é obtida através dos tempos totais de propagação do sinal, desde sua transmissão pela base de controle até sua chegada em cada uma das 4 bases, subtraindo-se os atrasos de transmissão, propagação, retransmissão e recepção. Com isso, são calculadas as coordenadas da repetidora em cada iteração do algoritmo. A navegação da plataforma é, então, derivada em cada determinação sucessiva de posição (KAUFMANN et al, 2012, p. 6).

A segunda aplicação é a de sincronismo remoto de relógio. Cada sinal transmitido da base de controle A para as demais bases, também será recebido pelos alvos, que são os usuários do sistema, como, por exemplo, o alvo P da Figura 6. É possível calcular o horário que o sinal deveria chegar em P, e a diferença entre o horário previsto e o horário do relógio em P indica o ajuste que deve ser feito para sincronizar o relógio.

Um exemplo para esta segunda aplicação é mostrado na Figura 8. Uma repetidora R é transportada por uma aeronave que pode ser vista por várias torres de telecomunicações, descritos na Figura 8 como L, M e N, em posições geográficas conhecidas. Estas torres podem ser retransmissores de telecomunicações que possuem o requisito essencial de operarem em sincronismo para evitar chamadas cruzadas e distorções de mensagens causadas por interferências mútuas (KAUFMANN et al, 2012, p. 6-7).

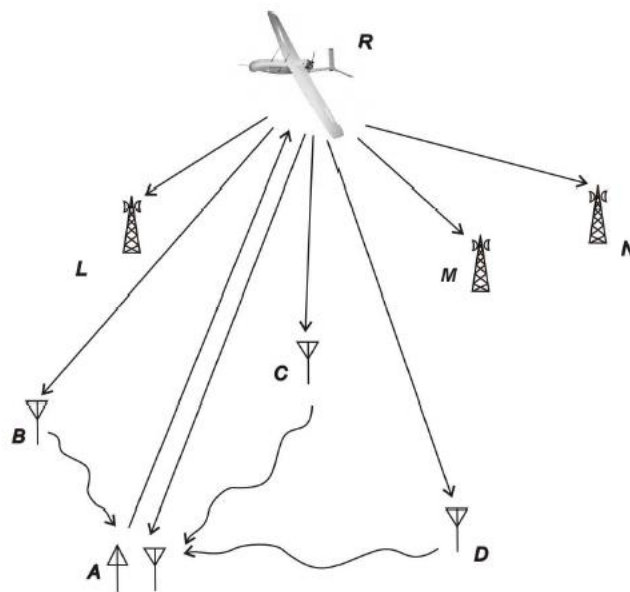


Figura 8: Repetidora de sinal R transportada por 1 aeronave vista pelas bases A, B, C e D auxiliando no sincronismo dos atuadores L, M e N localizados em posições geográficas conhecidas (KAUFMANN et al, 2012, p. 7).

A terceira aplicação é a de localização remota de um alvo, assumindo que a sua posição seja desconhecida. A distância da repetidora R ao alvo P pode ser determinada por uma simples iteração de tempo, levando em conta que o relógio em P esteja suficientemente bem sincronizado com as bases A, B, C e D e que o tempo de trânsito em R e os atrasos de propagação no meio já tenham sido calculados. As coordenadas geográficas de P são determinadas através de 4 medidas de distâncias PR em 4 posições diferentes da repetidora, em instantes diferentes, desde que estas posições não estejam alinhadas, ou através de 4 repetidoras diferentes no espaço, não alinhadas entre si (KAUFMANN et al, 2012, p. 7).

3. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA GEOLOCAL

O sistema Geolocal é o resultado de diversas pesquisas, artigos publicados e patentes submetidas e aprovadas, sob o pioneirismo do Professor Doutor Pierre Kaufmann, cuja ideia central é a de se obter um sistema próprio de posicionamento, independente dos sistemas GNSS atuais.

3.1. Escopo inicial

O Geolocal foi inicialmente projetado com 3 bases de referência no solo (A, B e C), com coordenadas geográficas conhecidas, e portando relógios sincronizados entre si; um transmissor instalado em uma das bases, responsável pela transmissão de sinais; e uma repetidora no espaço, com posição desconhecida, que na Figura 9 está representada pela letra S. A altura da repetidora, em relação à superfície da Terra, é representada pelo segmento SS' .

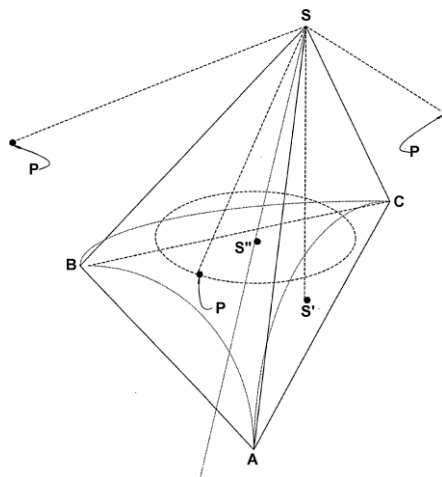


Figura 9: Sistema Geolocal, com as 3 bases fixas no solo, A, B e C, e a repetidora S no espaço, cuja altura é SS' (KAUFMANN, PI-2003, p.43).

No esquema da Figura 9, a base A transmite a informação do horário marcado em seu relógio para a repetidora S no espaço, que, por sua vez, o retransmite a todas as bases, incluindo a base A, e os alvos Ps, que são os usuários do sistema que desejam obter suas posições. Os horários de chegada nas bases são comparados com o horário de envio da base A,

produzindo diferenças de tempo para serem usadas no cálculo das distâncias entre as bases e a repetidora, e, conseqüentemente, obter as coordenadas geográficas da repetidora. Para determinar a posição de um dos alvos P, são feitas 4 medidas de posição entre S e P, em instantes diferentes. Para cada instante, é obtida uma esfera centrada em S, cuja intersecção com a superfície da Terra é uma circunferência de centro S''. O alvo P estará localizado em algum ponto desta circunferência.

Como a determinação de distâncias é baseada no tempo de propagação, é essencial conhecer os atrasos causados pelo cabeamento, circuitos e componentes eletrônicos, e loops dos sinais nas bases, no alvo e na repetidora, que devem ser determinados, cuidadosamente, para proceder ao cálculo.

Feitos os cálculos, a posição da plataforma que porta a repetidora é determinada para cada instante, e, portanto, sua trajetória torna-se conhecida. E, a partir de 4 medidas de distância entre a repetidora e o alvo, a posição do alvo também é determinada (KAUFMANN et al, 2006, p.1,2).

3.2. Cálculo das posições da repetidora e do alvo, utilizando 3 bases.

Para que o cálculo das posições fique correto, são necessárias 2 condições importantes: a primeira é que os relógios das bases e do alvo estejam sincronizados entre si; e a segunda é que a posição da repetidora, em relação às bases fixas no solo, seja determinada em uma única iteração, ou *snapshot*, não importando a natureza ou o movimento da plataforma que carrega a repetidora. Essa posição deve ser determinada uma única vez, e não requer nenhuma correção (como correção relativística) (KAUFMANN et al, 2006, p.3,4).

Para a primeira medição, a base de controle A envia um sinal em um determinado instante para a repetidora, que por sua vez retransmite para as bases A, B e C e o alvo P, que registram os instantes de chegada do sinal. A diferença de tempo entre saída e chegada do sinal para cada estação é transmitida para a estação de controle e processamento, que pode ser a base A. Este processo é repetido mais 3 vezes, e são obtidas as seguintes diferenças de tempo: Δ_{1tA} , Δ_{1tB} , Δ_{1tC} , Δ_{1tP} ; Δ_{2tA} , Δ_{2tB} , Δ_{2tC} , Δ_{2tP} ; Δ_{3tA} , Δ_{3tB} , Δ_{3tC} , Δ_{3tP} ; e Δ_{4tA} , Δ_{4tB} , Δ_{4tC} , Δ_{4tP} . Essas diferenças de tempo incluem os atrasos instrumentais: em cabos, circuitos, componentes eletrônicos e

processamento do sinal, tanto na transmissão pela base A, retransmissão pela repetidora, e recepção pelas bases A, B e C e pelo alvo.

Para cada conjunto de medição, por exemplo, $\Delta_1 t_A$, $\Delta_1 t_B$, $\Delta_1 t_C$, $\Delta_1 t_P$, é gerado o sistema de Equações 2.

$$\begin{aligned}\Delta_1 t_A &= \frac{2 \cdot AR}{c} + \delta_{A_t} + \delta_R + \delta_{A_r} \\ \Delta_1 t_B &= \frac{AR}{c} + \frac{BR}{c} + \delta_{A_t} + \delta_R + \delta_{B_r} \\ \Delta_1 t_C &= \frac{AR}{c} + \frac{CR}{c} + \delta_{A_t} + \delta_R + \delta_{C_r} \\ \Delta_1 t_P &= \frac{AR}{c} + \frac{PR}{c} + \delta_{A_t} + \delta_R + \delta_{P_r}\end{aligned}\quad (2)$$

Os atrasos instrumentais incluídos são: atrasos na base transmissora, δ_{A_t} , na repetidora, δ_R , nas bases receptoras, δ_{A_r} , δ_{B_r} , δ_{C_r} , e no alvo, δ_P . As Equações 2 utilizam a notação ilustrada na Figura 10, onde as bases A, B e C estão localizadas na superfície da Terra, e a repetidora R, acima dela.

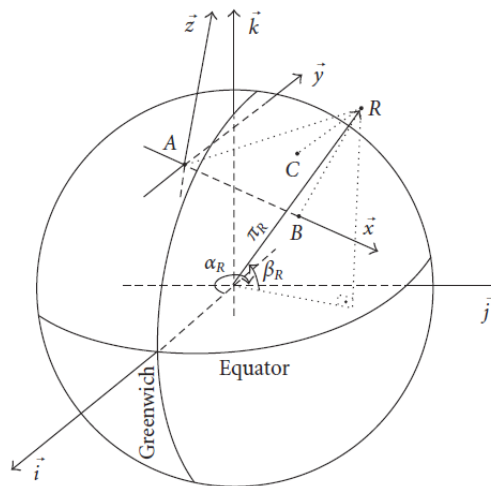


Figura 10: Sistema de coordenadas ortogonais e esféricas do projeto inicial do sistema Geolocal, com as 3 bases fixas no solo, A, B e C, e a repetidora R no espaço (KAUFMANN et al, 2006, p.3).

A posição de R está em uma das 2 intersecções das esferas centradas em A, B e C com raios AR , BR e CR , respectivamente. Uma das intersecções pode ser descartada pois estará localizada dentro da Terra.

Para simplificar a descrição dessas esferas, é conveniente descrevê-las no sistema de coordenadas ortogonais, mostrada na Figura 10 como $A, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ centrada em A, onde B está contido na reta determinada por A e \vec{x} ; C está contido no plano determinado por A, B e \vec{y} ; e \vec{z} apontando para fora da Terra, perpendicular ao plano, e passando por A (KAUFMANN et al, 2006, p.3,4).

O próximo passo é calcular a posição da repetidora em \vec{x}, \vec{y} e \vec{z} , ou seja, calcular os valores de x_R, y_R e z_R separadamente.

O cálculo de x_R é facilitado tomando, como base, o plano das coordenadas xz e projetando R em \vec{x} para determinar x_R , em que a reta projetada é r_1 , de acordo com a Figura 11.

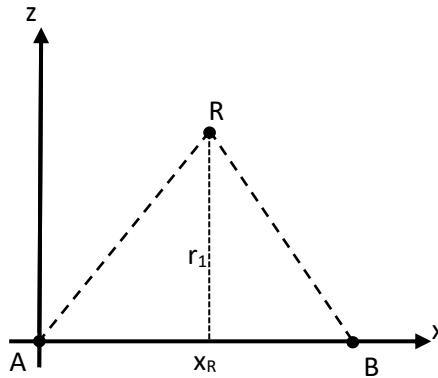


Figura 11: Plano xz , contendo a repetidora R, projetada no eixo x , formando 2 triângulos retângulos, usados para determinar o valor de x_R (Próprio Autor).

Na Figura 11, existem 2 triângulos retângulos, produzindo as 2 Equações 3.

$$AR^2 = x_R^2 + r_1^2 \quad ; \quad BR^2 = (AB - x_R)^2 + r_1^2 \quad (3)$$

Resolvendo as Equações 3, é encontrada a Equação 4.

$$r_1^2 = AR^2 - x_R^2 \quad ; \quad r_1^2 = BR^2 - AB^2 + 2 \cdot AB \cdot x_R - x_R^2$$

$$AR^2 - x_R^2 = BR^2 - AB^2 + 2 \cdot AB \cdot x_R - x_R^2$$

$$2 \cdot AB \cdot x_R = AR^2 - BR^2 + AB^2$$

$$x_R = \frac{AR^2 - BR^2 + AB^2}{2 \cdot AB} \quad (4)$$

Para o cálculo de y_R , é feita a projeção de R no plano xy, mostrada na Figura 12, onde r_1 é a projeção de R ao eixo \vec{x} ; h é a projeção de R à reta paralela ao eixo \vec{y} que passa por x_R , ou seja, a altura da repetidora em relação ao plano xy; e r_2 é a projeção de R à reta paralela ao eixo \vec{x} que passa por C.

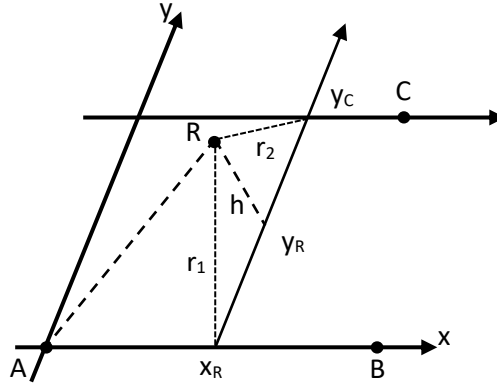


Figura 12: Plano xy, contendo a repetidora R, projetada na reta paralela ao eixo y, formando 2 triângulos retângulos, usados para determinar o valor de y_R (Próprio Autor).

Na Figura 12, são formados 2 triângulos retângulos, passando por R e pela reta paralela ao eixo \vec{y} , produzindo as 2 Equações 5.

$$r_1^2 = h^2 + y_R^2 \quad ; \quad r_2^2 = h^2 + (y_C - y_R)^2 \quad (5)$$

Resolvendo:

$$h^2 = r_1^2 - y_R^2 \quad ; \quad h^2 = r_2^2 - y_C^2 + 2 \cdot y_C \cdot y_R - y_R^2$$

$$r_1^2 - y_R^2 = r_2^2 - y_C^2 + 2 \cdot y_C \cdot y_R - y_R^2$$

$$2 \cdot y_C \cdot y_R = r_1^2 - r_2^2 + y_C^2$$

$$y_R = \frac{r_1^2 - r_2^2}{2 \cdot y_C} + \frac{y_C}{2}, \quad (6)$$

onde $r_1^2 = AR^2 - x_R^2$ e $r_2^2 = CR^2 - (x_C - x_R)^2$.

Para o cálculo de z_R , é feita a projeção de R no plano xy, mostrada na Figura 12, utilizando o triângulo retângulo de vértices R, x_R e y_R , que é equivalente ao primeiro triângulo da Equação 5. Como a altura h equivale ao próprio z_R , o resultado fica sendo a Equação 7.

$$z_R = \sqrt{r_1^2 - y_R^2} \quad (7)$$

Outra solução seria colocar o lado direito da Equação 7 como negativo, porém esta solução pode ser descartada, já que um ponto no eixo z negativo implicaria em uma localização no interior da Terra.

As Equações 4, 6 e 7 definem a posição da repetidora R no instante 1, ou seja, a posição de R₁. Repetindo o processo para 3 instantes consecutivos, são definidas, também, as posições de R₂ e R₃, que produzirão 3 esferas, em que uma das intersecções será a posição do alvo P. Uma quarta posição, R₄, é necessária para definir qual das 2 posições utilizar. Da mesma forma em que foi estabelecido o sistema A, \vec{x} , \vec{y} , \vec{z} como função dos pontos A, B e C, será estabelecido o sistema R1, \vec{u} , \vec{v} , \vec{w} como função dos pontos R₁, R₂ e R₃, ilustrados na Figura 13.

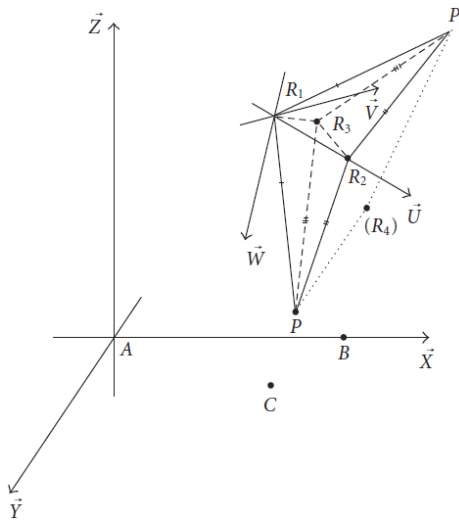


Figura 13: Posição de 4 repetidoras: R1, R2 e R3, definem as possíveis posições do alvo, P e P', e a repetidora R4 define a localização do alvo, P ou P' (KAUFMANN et al, 2006, p.6).

As Equações 8, 9 e 10 geradas são similares às Equações 4, 6 e 7, e representam a posição u, v, w do alvo P.

$$u_P = \frac{PR_1^2 - PR_2^2 + R_1R_2^2}{2 \cdot R_1R_2} \quad (8)$$

$$v_P = \frac{\rho_1^2 - \rho_2^2}{2 \cdot v_{R_3}} + \frac{v_{R_3}}{2} \quad (9)$$

$$w_P = \pm \sqrt{\rho_1^2 - v_P^2} \quad (10)$$

Uma quarta esfera é requerida para decidir qual w_P utilizar, a positiva ou negativa; para isso, é calculada a distância entre cada possível alvo e R_4 (KAUFMANN et al, 2006, p.5,6).

3.3. Escopo atual.

O escopo atual do Geolocal considera, no mínimo, 4 bases de referência fixas no solo A, B, C e D (o sistema anterior tinha 3 bases), com posições geográficas conhecidas, como ilustrado na Figura 14, onde R é a repetidora acima da superfície da Terra com posição desconhecida, e P é o alvo. Todas as bases e o alvo devem estar sincronizados no tempo, para a obtenção da melhor acurácia. O acréscimo da quarta base é necessário para determinar o atraso do sinal na repetidora e no meio atmosférico, utilizando, pelo menos, 3 conjuntos de 3 bases, como será visto na subseção 4.3.

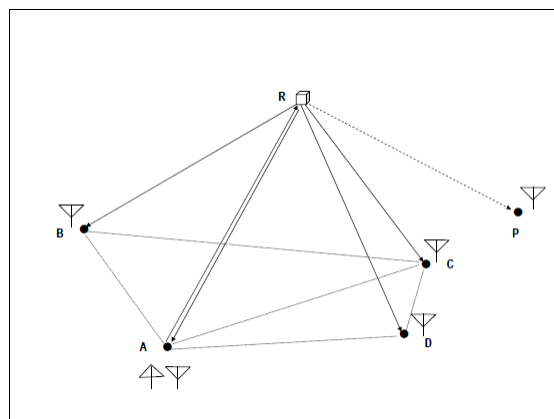


Figura 14: Diagrama simplificado mostrando as 4 bases de referência no solo A, B, C e D, a repetidora R, e o alvo P (KAUFMANN et al, 2012, p.3).

Se em um determinado instante, um sinal codificado é transmitido pela base A, recebido e retransmitido pela repetidora R e recebido pelas bases A, B, C e D, e pelo alvo P, as medidas de distâncias obtidas neste determinado instante podem ser descritas pelas Equações 11:

$$AR(\delta_R, \Delta_{pdAR}) = (\Delta t_A - \delta_{At} - \delta_{Ar} - \delta_R) \cdot (c/2) - \Delta_{pdAR} \quad (11)$$

$$BR(\delta_R, \Delta_{pdAR}, \Delta_{pdBR}) = (\Delta t_B - \delta_{At} - \delta_{Br} - \delta_R) \cdot c - AR(\delta_R) - \Delta_{pdBR} - \Delta_{pdAR}$$

$$CR(\delta_R, \Delta_{pdAR}, \Delta_{pdCR}) = (\Delta t_C - \delta_{At} - \delta_{Cr} - \delta_R) \cdot c - AR(\delta_R) - \Delta_{pdCR} - \Delta_{pdAR}$$

$$DR(\delta_R, \Delta_{pdAR}, \Delta_{pdDR}) = (\Delta t_D - \delta_{At} - \delta_{Dr} - \delta_R) \cdot c - AR(\delta_R) - \Delta_{pdDR} - \Delta_{pdAR}$$

$$PR(\delta_R, \Delta_{pdAR}, \Delta_{pdPR}) = (\Delta t_P - \delta_{At} - \delta_{Pr} - \delta_R) \cdot c - AR(\delta_R) - \Delta_{pdPR} - \Delta_{pdAR}$$

As Equações 11 são dependentes do atraso na repetidora, δ_R , e dos atrasos de propagação, Δ_{pdAR} , Δ_{pdBR} , Δ_{pdCR} , Δ_{pdDR} e Δ_{pdPR} . Os valores AR, BR, CR, DR e PR são as distâncias das bases A, B, C, D e do alvo P à repetidora R, respectivamente, expressas como uma função de variação do tempo, causada pelo trânsito do sinal na repetidora δ_R , e corrigida pelos atrasos de propagação. Os valores Δt_A , Δt_B , Δt_C , Δt_D e Δt_P são as diferenças de tempo efetivamente medidas nas bases A, B, C e D, e no alvo P, respectivamente, em relação aos seus relógios. O valor δ_{At} é a variação de tempo devido ao trânsito do sinal nos circuitos e cabos da base transmissora A, previamente medido e conhecido; os valores δ_{Ar} , δ_{Br} , δ_{Cr} , δ_{Dr} e δ_{Pr} são as variações de tempo devido ao trânsito do sinal nos circuitos e cabos das bases receptoras A, B, C e D e do alvo P, respectivamente, que também são previamente medidos e conhecidos; c é a velocidade da onda eletromagnética transportando o sinal codificado no espaço livre.

Como será visto na subseção 4.3, a posição da repetidora é, inicialmente, desconhecida, e a variação de tempo δ_R na repetidora e os atrasos de propagação são determinados simultaneamente (KAUFMANN et al, 2012, p.2-4).

3.4. Cálculo da posição da repetidora utilizando 4 bases.

Antes de determinar a posição da repetidora, é preciso definir o sistema de coordenada geográfica a ser utilizado. Na Figura 15 é possível verificar a presença de três sistemas de coordenadas.

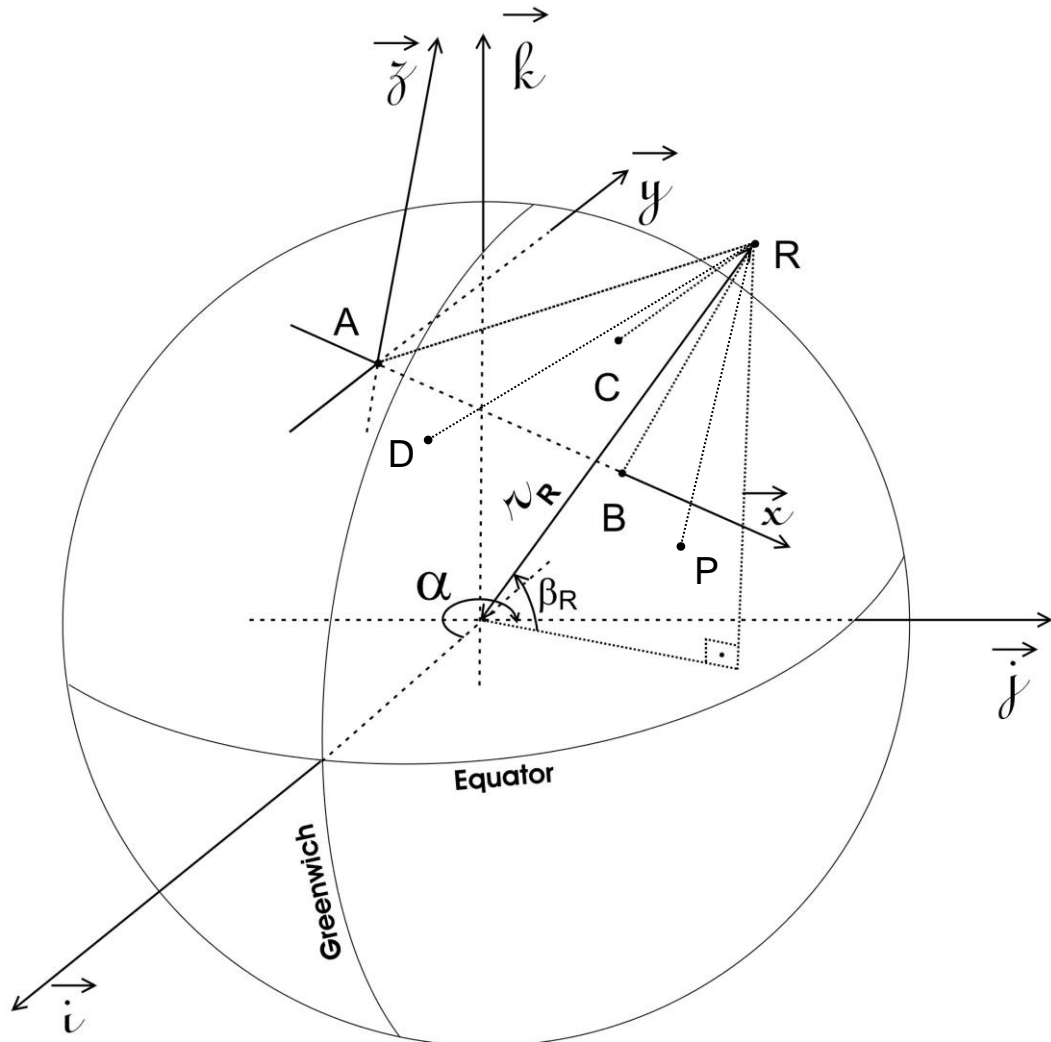


Figura 15: Sistema de coordenadas ortogonais e esféricas do sistema Geolocal, com as 4 bases fixas no solo, A, B, C e D, a repetidora R no espaço, e um alvo P (KAUFMANN et al, 2012, p.5).

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

Meridiano de Greenwich com a linha do Equador. A altitude é a distância perpendicular e acima da superfície do elipsoide (μ -BLOX, 1999, p. 1,2).

O segundo sistema, como foi visto na subseção 3.2, é o sistema de coordenadas ortogonais, $A, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ centrada em A, onde B está contido na reta determinada por A e \vec{x} ; C e D estão contidos no plano determinado por A, B e \vec{y} ; e \vec{z} apontando para fora da Terra, perpendicular ao plano, e passando por A.

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

Como as posições das bases são normalmente fornecidas no sistema de coordenadas LLA, é necessária a conversão deste sistema para o ECEF, para que seja possível o cálculo da posição das repetidoras. Para tanto, primeiro são definidos os parâmetros WGS84 na Equação 12, onde a indica o valor do semieixo maior da Terra, em metros, b indica o valor do semieixo menor da Terra, que, calculado a partir do achatamento (*flattening*) resulta em 6.356.752 metros, e indica a primeira excentricidade, calculada sobre o semieixo maior e e' indica a segunda excentricidade, calculada sobre o semieixo menor.

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

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}} ; e' = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{b^2}} \quad (12)$$

Para a conversão do sistema LLA para o ECEF, são utilizadas as Equações 13, 14 e 15, onde φ é a latitude de uma determinada localização, λ é a longitude, h é a altura acima do elipsoide, em metros, e N é o raio de curvatura do geoide, em metros, definida na Equação 16.

$$X = (N + h) \cdot \cos\varphi \cdot \cos\lambda \quad (13)$$

$$Y = (N + h) \cdot \cos\varphi \cdot \sen\lambda \quad (14)$$

$$Z = \left(\frac{b^2}{a^2} \cdot N + h\right) \cdot \sen\varphi \quad (15)$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad (16)$$

Se houver a necessidade de reverter a conversão do sistema ECEF para o LLA, basta utilizar as Equações 17, 18 e 19, onde p e θ são valores auxiliares, e são obtidos através das Equações 20 e 21 (μ -BLOX, 1999, p. 2-4).

$$\lambda = \arctan \frac{Y}{X} \quad (17)$$

$$\varphi = \arctan \frac{Z + e^2 \cdot b \cdot \sin^3 \theta}{p - e^2 \cdot a \cdot \cos^3 \theta} \quad (18)$$

$$h = \frac{p}{\cos \varphi} - N \quad (19)$$

$$p = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (20)$$

$$\theta = \arctan \frac{Z \cdot a}{p \cdot b} \quad (21)$$

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

Para definir as coordenadas da repetidora, x_R , y_R e z_R , são selecionados 3 conjuntos de bases dentre as 4 bases A, B, C e D. Para exemplificar, foram selecionados os conjuntos de bases A, B e C; A, B e D; e A, C e D da Figura 15. Para cada conjunto de bases é gerado um sistema de coordenadas da repetidora (x, y, z) diferente. O primeiro sistema de Equações 22 (x_R , y_R e z_R), é construído a partir do primeiro conjunto de bases (A, B e C), de forma similar às Equações 4, 6 e 7 do sistema inicial de 3 bases.

$$\begin{aligned} x_{R(\delta_R)} &= \frac{[AR(\delta_R)]^2 - [BR(\delta_R)]^2 + [AB]^2}{2 \cdot AB} \\ y_{R(\delta_R)} &= \frac{r_1^2(\delta_R) - r_2^2(\delta_R)}{2 \cdot y_C} + \frac{y_C}{2} \\ z_{R(\delta_R)} &= \sqrt{r_1^2(\delta_R) - y_{R(\delta_R)}^2} \end{aligned} \quad (22)$$

onde $r_1(\delta_R)^2 = AR(\delta_R)^2 - x_R(\delta_R)^2$ e $r_2(\delta_R)^2 = CR(\delta_R)^2 - (x_C - x_R(\delta_R))^2$.

Em seguida, é utilizado o segundo conjunto de bases (A, B e D) para definir o segundo sistema de coordenadas da repetidora (x_R' , y_R' e z_R') utilizando o sistema de Equações 23.

$$\begin{aligned} x'_{R(\delta_R)} &= \frac{[AR(\delta_R)]^2 - [BR(\delta_R)]^2 + [AB]^2}{2 \cdot AB} \\ y'_{R(\delta_R)} &= \frac{r'_{1(\delta_R)^2} - r'_{2(\delta_R)^2}}{2 \cdot y_D} + \frac{y_D}{2} \\ z'_{R(\delta_R)} &= \sqrt{r'_{1(\delta_R)^2} - y'_{R(\delta_R)^2}} \end{aligned} \quad (23)$$

onde $r_1'(\delta_R)^2 = AR(\delta_R)^2 - x_R'(\delta_R)^2$ e $r_2'(\delta_R)^2 = DR(\delta_R)^2 - (x_D - x_R'(\delta_R))^2$.

E, para o cálculo do terceiro sistema de coordenadas da repetidora (x_R'' , y_R'' e z_R''), é utilizado o terceiro conjunto de bases (A, C e D), através do sistema de Equações 24.

$$\begin{aligned} x''_{R(\delta_R)} &= \frac{[AR(\delta_R)]^2 - [CR(\delta_R)]^2 + [AC]^2}{2 \cdot AC} \\ y''_{R(\delta_R)} &= \frac{r''_{1(\delta_R)^2} - r''_{2(\delta_R)^2}}{2 \cdot y_D} + \frac{y_D}{2} \\ z''_{R(\delta_R)} &= \sqrt{r''_{1(\delta_R)^2} - y''_{R(\delta_R)^2}} \end{aligned} \quad (24)$$

onde $r_1''(\delta_R)^2 = AR(\delta_R)^2 - x_R''(\delta_R)^2$ e $r_2''(\delta_R)^2 = DR(\delta_R)^2 - (x_D - x_R''(\delta_R))^2$.

Para cada par de sistema de Equações, 22-23, 22-24 e 23-24, é encontrada uma diferença na posição da repetidora, em função de δ_R , definida, respectivamente, pelas Equações 25, 26 e 27.

$$\begin{aligned} f1(\delta_R) &= \{[x_R(\delta_R), y_R(\delta_R), z_R(\delta_R)] - [x'_R(\delta_R), y'_R(\delta_R), z'_R(\delta_R)]\}^2 \\ &= [x_R(\delta_R) - x'_R(\delta_R)]^2 + [y_R(\delta_R) - y'_R(\delta_R)]^2 + [z_R(\delta_R) - z'_R(\delta_R)]^2 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned}
f2(\delta_R) &= \{[x_R(\delta_R), y_R(\delta_R), z_R(\delta_R)] - [x_R''(\delta_R), y_R''(\delta_R), z_R''(\delta_R)]\}^2 \quad (26) \\
&= [x_R(\delta_R) - x_R''(\delta_R)]^2 + [y_R(\delta_R) - y_R''(\delta_R)]^2 + [z_R(\delta_R) - z_R''(\delta_R)]^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f3(\delta_R) &= \{[x_R'(\delta_R), y_R'(\delta_R), z_R'(\delta_R)] - [x_R''(\delta_R), y_R''(\delta_R), z_R''(\delta_R)]\}^2 \quad (27) \\
&= [x_R'(\delta_R) - x_R''(\delta_R)]^2 + [y_R'(\delta_R) - y_R''(\delta_R)]^2 + [z_R'(\delta_R) - z_R''(\delta_R)]^2
\end{aligned}$$

Este processo, como será visto na subsecção 4.3, é feito diversas vezes, com outros valores de δ_R , até que a diferença na posição da repetidora entre os sistemas de coordenadas seja próxima a zero.

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

Para encontrar o valor de cada versor do sistema A, \vec{x} , \vec{y} , \vec{z} , ou seja, do vetor unitário em cada eixo, é necessário encontrar um segmento paralelo a este eixo, determinar o valor do vetor deste segmento no sentido do eixo, e dividir este valor pelo tamanho deste segmento. Desta forma, o vetor paralelo ao eixo \vec{x} mais evidente na Figura 15 é o vetor \overrightarrow{AB} , que pode ser facilmente determinado subtraindo A de B. Portanto, para encontrar o versor \vec{x} , divide-se o valor deste vetor pelo comprimento do mesmo, de acordo com a Equação 28.

$$\vec{x} = \frac{\overrightarrow{AB}}{\|\overrightarrow{AB}\|} = \frac{\overrightarrow{AB}}{AB} \quad (28)$$

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

vetor paralelo ao eixo \vec{y} possível de ser encontrado na Figura 15 é o vetor \vec{AC} projetado em \vec{x} , subtraído de \vec{AC} , conforme a Equação 29

$$\vec{y} = \frac{\vec{AC} - \text{proj}_{\vec{x}} \vec{AC}}{\|\vec{AC} - \text{proj}_{\vec{x}} \vec{AC}\|}, \text{ onde } \text{proj}_{\vec{x}} \vec{AC} = (\vec{AC} \bullet \vec{x}) \cdot \vec{x} \quad (29)$$

Como o produto vetorial de 2 vetores é um vetor perpendicular a ambos, no sentido dado pela regra da mão direita, o valor do versor \vec{z} pode ser encontrado através do produto vetorial de \vec{x} por \vec{y} , de acordo com a Equação 30.

$$\vec{z} = \vec{x} \wedge \vec{y} \quad (30)$$

Com os versores \vec{x} , \vec{y} e \vec{z} determinados, a conversão do sistema de coordenadas ortogonais A, \vec{x} , \vec{y} , \vec{z} para o ECEF é feito através da Equação 31, onde x_R , y_R e z_R são as coordenadas x,y,z da repetidora e A é a posição ECEF da base A.

$$R (\text{ECEF}) = A + x_R \cdot \vec{x} + y_R \cdot \vec{y} + z_R \cdot \vec{z} \quad (31)$$

A função de minimização, que será vista na subseção 4.3, leva em conta, além do atraso na repetidora δ_R , o atraso de propagação Δ_{pd} .

Os atrasos de propagação são estimados ao adotar um modelo adequado de propagação, e o modelo depende da altura da repetidora, como será analisado na subseção 5.2.

Na próxima seção, seção 4, estão descritas as simulações feitas anteriormente e já publicadas em artigos científicos; e na seção 5 estão descritas as propostas de melhoria para o Geolocal.

4. SIMULAÇÃO DO SISTEMA GEOLOCAL

Para a simulação do sistema Geolocal, foi utilizada a linguagem de programação MATLAB. É possível demonstrar a performance do método e obter medidas práticas utilizando coordenadas reais de localidades que são escolhidas durante o processo de simulação (KAUFMANN et al, 2012, p. 7; PAMBOUKIAN, 2012).

Como exemplo prático de simulação, foram selecionadas 4 bases fixas, situadas nas cidades de São Paulo, Itú, Campinas e Bragança Paulista e um alvo na cidade de Atibaia. Suas localizações (latitude, longitude e altitude) são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Localizações geográficas precisas (latitudes, longitudes e altitudes) das bases e do alvo, utilizadas nas simulações (KAUFMANN et al, 2012, p.8).

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

A plataforma escolhida para carregar a repetidora no espaço foi a de uma aeronave sobrevoando a cidade de Jundiaí, a 6 km de altitude. Para a simulação, foram designadas 4 posições arbitrárias da repetidora, nas localizações indicadas pela Tabela 2.

Tabela 2: Localizações geográficas (latitudes, longitudes e altitudes) de uma repetidora sendo transportada por uma aeronave, sobre a cidade de Jundiaí (KAUFMANN et al, 2012, p.10).

Cidade	Posição	Latitude	Longitude	Altitude
Jundiaí	1	- 23° 11' 11''	- 46° 53' 03''	5761 m
Jundiaí	2	- 23° 11' 11''	- 46° 59' 03''	6000 m
Jundiaí	3	- 23° 15' 11''	- 46° 53' 03''	6200 m
Jundiaí	4	- 23° 15' 11''	- 46° 59' 03''	6800 m

A Figura 16 mostra o mapa do estado de São Paulo, com as cidades onde estão localizadas as bases A, B, C e D, a cidade onde está o alvo P, e a cidade onde está a aeronave portando a repetidora R.

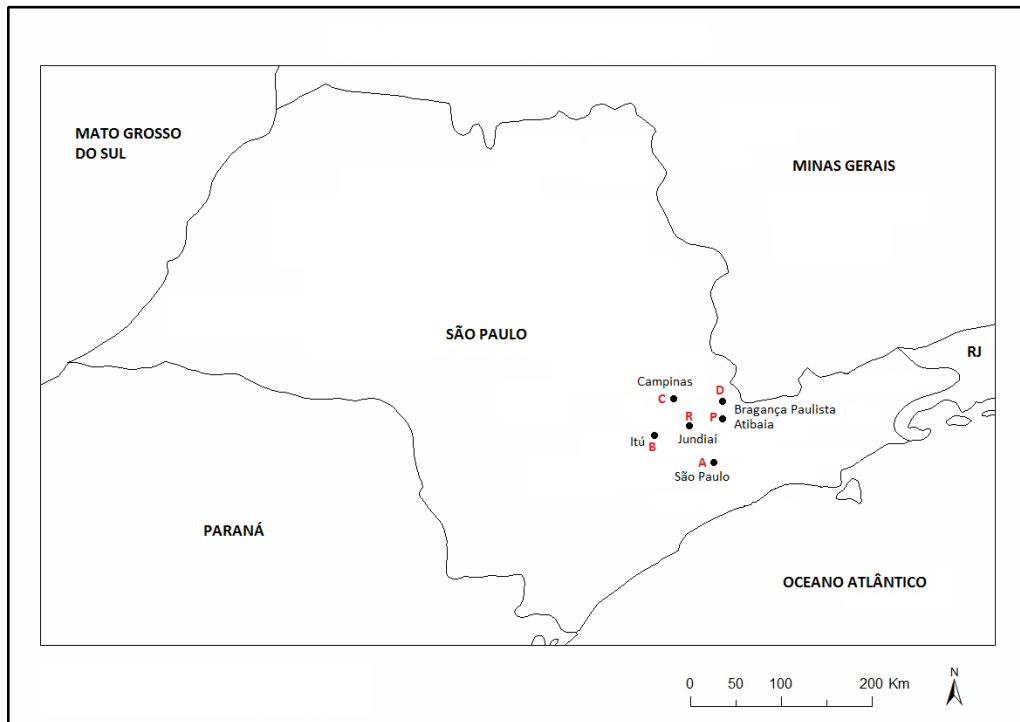


Figura 16: Mapa do estado de São Paulo mostrando as cidades pré-selecionadas, utilizadas na simulação: bases A, B, C e D, alvo P e repetidora R (KAUFMANN et al, 2012, p.8).

4.1. Preparando os dados para a simulação – exemplo prático

A simulação do Geolocal é feita em 3 partes distintas. A primeira calcula os tempos de propagação do sinal que sai da base A, passa pela repetidora R e chega às bases A, B, C e D, a partir de uma situação particular onde todos os outros parâmetros são conhecidos. Na segunda parte, apenas os parâmetros realmente conhecidos são inseridos na simulação e os demais parâmetros devem ser determinados pelo algoritmo do Geolocal. Na terceira parte, os valores obtidos são comparados com os valores corretos para medir a eficiência do algoritmo e determinar a acurácia do sistema.

Considerando, por exemplo, um sistema com 4 bases fixas, A, B, C, e D, e 1 repetidora R, em um certo sistema de coordenadas ortogonais ijk , de forma que suas coordenadas sejam:

$$A = (0,5 \ 0,6 \ 0,7) \text{ km,}$$

$$B = (1,4 \ 0,4 \ 0,6) \text{ km,}$$

$$C = (1,5 \ 0,9 \ 0,2) \text{ km,}$$

$$D = (1,5 \ 0,1 \ 5,0) \text{ km e}$$

$$R = (1,0 \ 0,1 \ 5,0) \text{ km,}$$

os valores das distâncias AB, AC, AD, AR, BR, CR, e DR podem ser calculados através das Equações 32.

$$AB = \sqrt{(1,4 - 0,5)^2 + (0,4 - 0,6)^2 + (0,6 - 0,7)^2} = 0,927361849549570 \text{ km}$$

$$AC = \sqrt{(1,5 - 0,5)^2 + (0,9 - 0,6)^2 + (0,2 - 0,7)^2} = 1,157583690279022 \text{ km}$$

$$AD = \sqrt{(0,9 - 0,5)^2 + (0,1 - 0,6)^2 + (0,8 - 0,7)^2} = 0,658074069840786 \text{ km}$$

$$AR = \sqrt{(1,0 - 0,5)^2 + (0,1 - 0,6)^2 + (5,0 - 0,7)^2} = 4,357751713900185 \text{ km} \quad (32)$$

$$BR = \sqrt{(1,4 - 1,0)^2 + (0,4 - 0,1)^2 + (0,6 - 5,0)^2} = 4,428317965096906 \text{ km}$$

$$CR = \sqrt{(1,5 - 1,0)^2 + (0,9 - 0,1)^2 + (0,2 - 5,0)^2} = 4,891829923454003 \text{ km}$$

$$DR = \sqrt{(0,9 - 1,0)^2 + (0,1 - 0,1)^2 + (0,8 - 5,0)^2} = 4,275511665286390 \text{ km}$$

Para a simulação, os atrasos de propagação do sinal durante a transmissão, δA_t , e durante a recepção em cada base, δA_r , δB_r , δC_r , e δD_r foram fixados em 0,0001 ms, e o tempo de trânsito do sinal ao passar pela repetidora, δR , foi fixado em 0,0002 ms. Com estes valores e as distâncias obtidas nas Equações 32, é possível obter o tempo total de propagação do sinal saindo da base A, passando pela repetidora R e chegando às bases A, B, C e D, através dos cálculos mostrados nas Equações 33, considerando o valor da velocidade do sinal c como 299,792458 km/ms. Neste exemplo não foram considerados os atrasos devido à mudança de velocidade no meio de propagação (*path delay*).

$$\begin{aligned}
\Delta t_A &= \frac{2 \cdot AR}{c} + \delta A_t + \delta R + \delta A_r = 0,029471790150906 \text{ ms} \\
\Delta t_B &= \frac{AR}{c} + \frac{BR}{c} + \delta A_t + \delta R + \delta B_r = 0,029707173828226 \text{ ms} \\
\Delta t_C &= \frac{AR}{c} + \frac{CR}{c} + \delta A_t + \delta R + \delta C_r = 0,031253283298255 \text{ ms} \\
\Delta t_D &= \frac{AR}{c} + \frac{DR}{c} + \delta A_t + \delta R + \delta D_r = 0,029197466876857 \text{ ms}
\end{aligned} \tag{33}$$

Uma vez obtidos os tempos totais de propagação, é possível simular o algoritmo do Geolocal.

4.2. Cálculo da posição da repetidora – exemplo prático

Em uma situação real, a posição das bases A, B, C e D são conhecidas. O tempo total de propagação do sinal saindo da base A, passando pela repetidora R e chegando às bases A, B, C e D também é conhecido. Os atrasos na transmissão e na recepção do sinal, δA_t , δA_r , δB_r , δC_r e δD_r podem ser medidos. E o tempo de trânsito na repetidora, dependendo do tipo de repetidora utilizada, também pode ser medido. Desta forma, o primeiro objetivo do algoritmo do Geolocal é determinar a posição da repetidora.

Nesta segunda parte da simulação, para determinar a posição da repetidora, primeiro, são calculados os versores \vec{x} , \vec{y} , e \vec{z} do sistema A, \vec{x} , \vec{y} , \vec{z} ilustrado na Figura 15, através das Equações 28, 29 e 30. Abaixo, são usados os dados do exemplo anterior.

$$\vec{x} = \frac{\overrightarrow{AB}}{\|\overrightarrow{AB}\|} = \frac{\overrightarrow{AB}}{AB}$$

$$\vec{x} = \frac{(1,4-0,5 \quad 0,4-0,6 \quad 0,6-0,7)}{0,927361849549570}$$

$$\vec{x} = (0,970494958830946 \quad -0,215665546406877 \quad -0,107832773203438)$$

$$\vec{y} = \frac{\overrightarrow{AC} - \text{proj}_{\vec{x}} \overrightarrow{AC}}{\|\overrightarrow{AC} - \text{proj}_{\vec{x}} \overrightarrow{AC}\|}$$

$$proj_{\vec{x}}^{\vec{AC}} = (\vec{AC} \bullet \vec{x}) \cdot \vec{x} = [(1,5 - 0,5 \quad 0,9 - 0,6 \quad 0,2 - 0,7) \bullet \vec{x}] \cdot \vec{x}$$

$$proj_{\vec{x}}^{\vec{AC}} = [0,9597116815106019] \cdot \vec{x}$$

$$proj_{\vec{x}}^{\vec{AC}} = (0,93139534883721 \quad -0,20697674418605 \quad -0,10348837209302)$$

$$\vec{y} = \frac{(0,068604651162791 \quad 0,506976744186046 \quad -0,396511627906977)}{\sqrt{0,068604651162791^2 + 0,506976744186046^2 + 0,396511627906977^2}}$$

$$\vec{y} = (0,105991406427514 \quad 0,783258528854173 \quad -0,612594399860719)$$

$$\vec{z} = \vec{x} \wedge \vec{y} = (0,21657644527335 \quad -0,58309042958208 \quad 0,78300714829594)$$

Resolvendo as Equações 4, 6 e 7, são determinadas as coordenadas xyz da repetidora R, com origem em A (0 0 0) resultando em $R = (0,129399327843553 \quad -2,972789480614246 \quad 3,183673745518316)$, e com os versores \vec{x} , \vec{y} , e \vec{z} calculados, são determinadas as coordenadas ijk da repetidora R, através da Equação 31, como mostra o exemplo abaixo.

$$R = A + x_R \cdot \vec{x} + y_R \cdot \vec{y} + z_R \cdot \vec{z}$$

$$R = (0,5 \quad 0,6 \quad 0,7) +$$

$$0,12939932784355 \cdot (0,97049495883095 \quad -0,21566554640688 \quad -0,10783277320344) \\ -2,97278948061425 \cdot (0,10599140642751 \quad 0,78325852885417 \quad -0,61259439986072) + \\ 3,183673745518316 \cdot (0,216576445273345 \quad 0,583090429582084 \quad 0,783007148295941)$$

$$R = (0,999999999999491 \quad 0,100000000000338 \quad 5,000000000000064) \text{ km}$$

Este resultado está muito próximo ao esperado $R = (1,0 \quad 0,1 \quad 5,0)$, já que não foram consideradas as imprecisões de medidas, validando desta forma a simulação. Se o valor de k_R fosse negativo, o cálculo teria que ser refeito utilizando o valor $-z_R$ na Equação 31.

4.3. Simulação utilizando 4 bases para determinar a posição da repetidora e do alvo e para sincronizar relógio

O diagrama de fluxo da Figura 17 mostra toda a simulação MATLAB utilizando 4 bases para determinar a posição da repetidora, do alvo e para sincronizar relógios. Este diagrama de fluxo começa obtendo as posições das bases A, B, C e D, que são conhecidas, e para esta simulação foram usadas as da Tabela 1; obtendo os tempos de transmissão, Δt_A , Δt_B , Δt_C e Δt_D ; e obtendo os atrasos de hardware e software, na transmissão e recepção, δA_t , δA_r , δB_r , δC_r , e δD_r . Em seguida, são utilizadas as sub-rotinas *SUB_REP* para calcular as posições da repetidora em 4 instantes diferentes, *SUB_TARG* para calcular a posição do alvo P e *SUB_SYNC* para sincronizar o relógio em P.

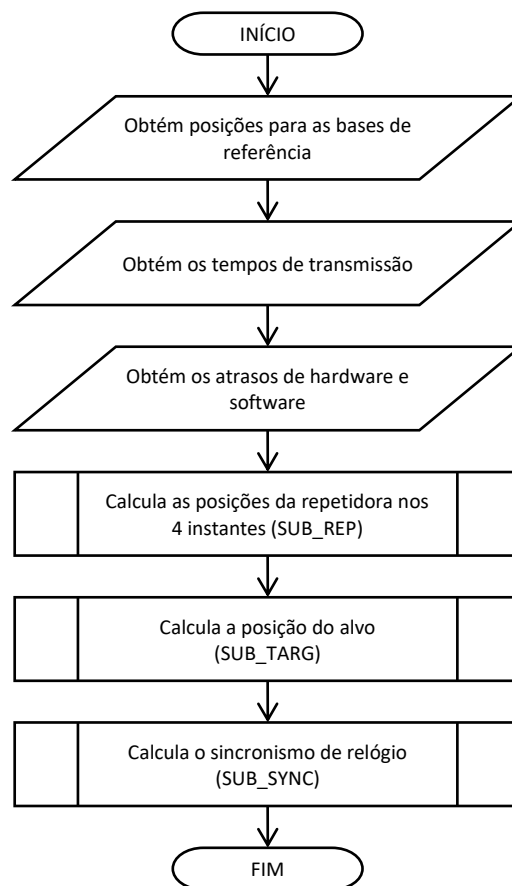


Figura 17: Diagrama de fluxo mostrando a rotina principal (KAUFMANN et al, 2012, p.9).

A simulação utilizando 4 bases tem como premissa o desconhecimento da posição da repetidora, dos valores de tempo de propagação do sinal no meio atmosférico e do

tempo de trânsito na repetidora, considerando-se uma plataforma com repetidora não proprietária e, portanto, com tempo de processamento do sinal desconhecido. Esta premissa gera 3 incógnitas: a posição da repetidora, o atraso de propagação no meio, em termos de distância, Δpd , definido na Equação 1 e o tempo de atraso do sinal na repetidora, δR , que são determinados através da sub-rotina *SUB_REP* mostrada no diagrama de fluxo da Figura 18.

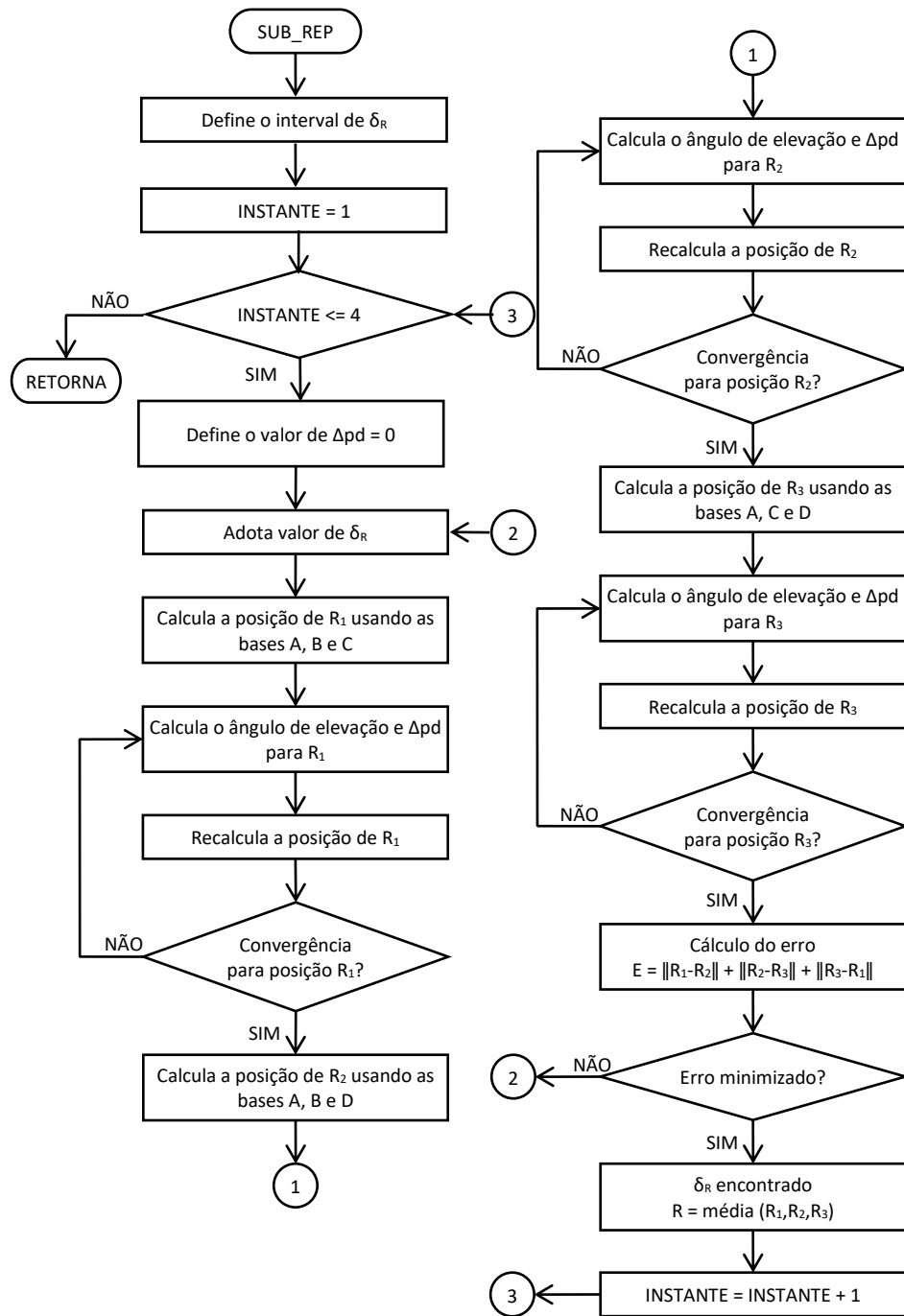


Figura 18: Diagrama de fluxo para determinar Δpd e δR e a posição da repetidora em 4 instantes (KAUFMANN et al, 2012, p.11).

Nesta sub-rotina, como a quantidade de incógnitas é grande e as mesmas são interdependentes, é necessário efetuar um cálculo iterativo, onde alguns valores convergem para o valor próximo ao real a cada iteração, e utilizar um algoritmo de minimização de erros para determinar o tempo de trânsito da repetidora. O MATLAB possui uma função de minimização chamada *fmincon* que é utilizada para determinar o valor de δR baseado em um valor inicial e um intervalo de busca.

Antes de iniciar o processo, é necessário definir o intervalo de busca para δR . Nesta simulação foi considerada uma faixa de valores com os limites $\delta R_{\text{inferior}} = 0 \text{ ns}$ e $\delta R_{\text{superior}} = 1000 \text{ ns}$.

Em seguida, são realizadas 4 iterações para determinar a posição da repetidora em 4 instantes diferentes, ou a posição de 4 repetidoras em um mesmo instante. Em cada iteração, o cálculo da posição da repetidora é feito em relação a cada conjunto de 3 bases (ABC, ABD e ACD) que contém a base de controle A.

Como o valor de Δpd depende da posição da repetidora, que inicialmente é desconhecida, adota-se o valor Δpd inicial como zero, ou seja, são desconsiderados os atrasos no meio de propagação. Também é necessário adotar um valor inicial para δR dentro do intervalo de busca. Nesta simulação foi considerado $\delta R_{\text{inicial}} = 100 \text{ ns}$.

Considerando-se apenas as bases A, B e C e os tempos de transmissão Δt_A , Δt_B e Δt_C medidos, além dos atrasos de instrumentação também conhecidos, é possível calcular a posição da repetidora, chamando-a de R1. A partir do momento que a posição R1 é conhecida, podemos calcular o ângulo de elevação da repetidora em relação a cada base, definido como ϵ na Equação 1, e o Δpd correspondente.

O próximo passo, utilizando o novo valor de Δpd , que já não é mais zero, é recalculer a posição inicial da repetidora referente às bases A, B e C, e atualizar a posição R1. Esse processo é repetido diversas vezes até que exista uma convergência de valores e o recálculo não gere mais modificações na posição R1.

Em seguida, o processo é repetido, utilizando como referência as bases A, B e D, e determinando a posição R2, e novamente repetido para as bases A, C e D, determinando a posição R3.

As posições R1, R2 e R3 encontradas deveriam ser iguais, mas provavelmente isto não irá ocorrer, pois o valor de δR foi adotado dentro do intervalo de busca e pode não corresponder ao valor real.

A Equação 34 mostra o erro de posicionamento da repetidora quando calculada através de conjuntos distintos de 3 bases.

$$E = |R1 - R2| + |R2 - R3| + |R3 - R1| \quad (34)$$

O erro E é calculado pela função objetivo utilizada no processo de minimização. Portanto, E é o valor a ser minimizado. Caso o valor de E seja superior a um limite pré-estabelecido, a função de minimização adota outro valor para δR dentro da faixa de busca, refaz o processo, encontrando novos valores de R1, R2 e R3, e recalculando o valor do erro E , repetindo o processo até que o erro esteja dentro do limite aceitável.

Finalizada a minimização, tem-se os valores de δR , Δp_d e a posição da repetidora determinados.

Para esta simulação, foram determinadas as 4 posições da repetidora em 4 instantes diferentes, cujos valores são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Localizações geográficas (latitudes, longitudes e altitudes), encontradas pela simulação MATLAB, de uma repetidora sendo transportada por uma aeronave, sobre a cidade de Jundiaí (KAUFMANN et al, 2012, p.10).

Cidade	Pos.	Latitude	Longitude	Altitude
Jundiaí	1	- 23° 11' 10,99999999973079''	- 46° 53' 03,00000000022578''	5761,0000008372590 m
Jundiaí	2	- 23° 11' 10,99999999990985''	- 46° 59' 03,00000000035880''	6000,0000002672896 m
Jundiaí	3	- 23° 15' 11,00000000065677''	- 46° 53' 03,00000000022578''	6200,0000010607764 m
Jundiaí	4	- 23° 15' 11,00000000052887''	- 46° 59' 03,00000000110060''	6800,0000007525086 m

Comparando-se os valores encontrados na simulação (Tabela 3) e os valores corretos ilustrados na Tabela 2, percebe-se que são muito próximos, com desvios de menos de 0,001 mm de altitude e menos de 10^{-9} segundos de arco de latitude e longitude, validando a simulação referente ao diagrama de fluxo da Figura 18.

A partir do momento que a posição da repetidora é conhecida em 4 instantes diferentes, ou que as posições de 4 repetidoras distintas são conhecidas em um mesmo instante, é possível determinar a posição de um alvo, em terra ou no ar, utilizando a sub-rotina

SUB_TARG. Esta sub-rotina, representada no diagrama de fluxo da Figura 19, utiliza um método de cálculo similar ao utilizado na sub-rotina *SUB_REP*.

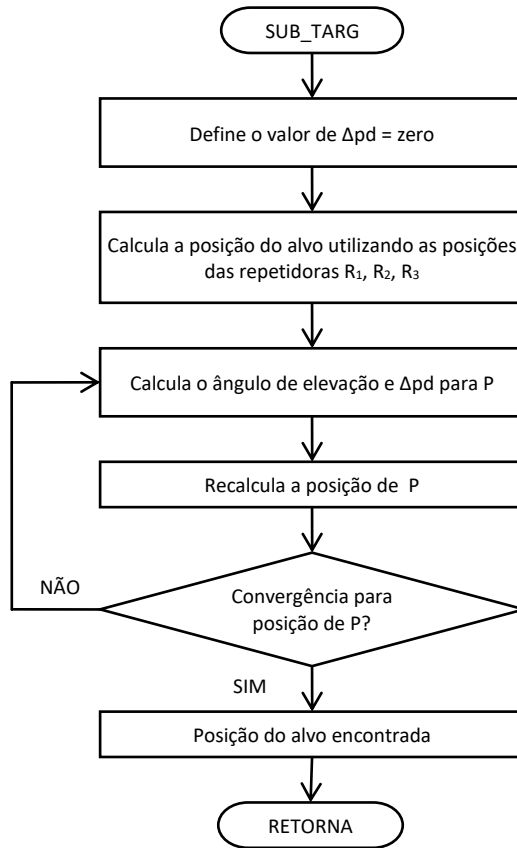


Figura 19: Diagrama de fluxo para determinar Δpd e a posição do alvo (KAUFMANN et al, 2012, p.11).

Esta sub-rotina define o valor Δpd inicial como zero e calcula a posição do alvo utilizando 3 das 4 repetidoras. Em seguida, calcula o ângulo de elevação do alvo em relação a cada repetidora e um novo valor de Δpd , que será a base de cálculo para um novo valor de posição do alvo. Este processo é repetido várias vezes, até que haja convergência para a posição correta do alvo.

Esta parte da simulação obteve como resultado os valores da Tabela 4.

Tabela 4: Localização geográfica (latitude, longitude e altitude), encontrada pela simulação MATLAB, de um alvo P na cidade de Atibaia (KAUFMANN et al, 2012, p.11).

Cidade	Latitude	Longitude	Altitude
Atibaia	- 23° 07' 00,9999999971089''	- 46° 33' 00,99999999755028''	803,0000006724149 m

Os valores encontrados nas Tabelas 1 e 4, referentes ao alvo P em Atibaia, são muito próximos, com desvios de menos de 0,002 mm de altitude e menos de 10^{-8} segundos de arco de latitude e longitude, demonstrando a funcionalidade do método.

Por fim, a sub-rotina *SUB_SYNC*, mostrada no diagrama de fluxo da Figura 20, é utilizada para sincronizar o relógio de um alvo P', utilizando o relógio da base de controle A. É importante esclarecer que os alvos P e P' são distintos. O alvo P é aquele que se quer determinar a posição e o alvo P' tem posição conhecida e se quer sincronizar seu relógio.

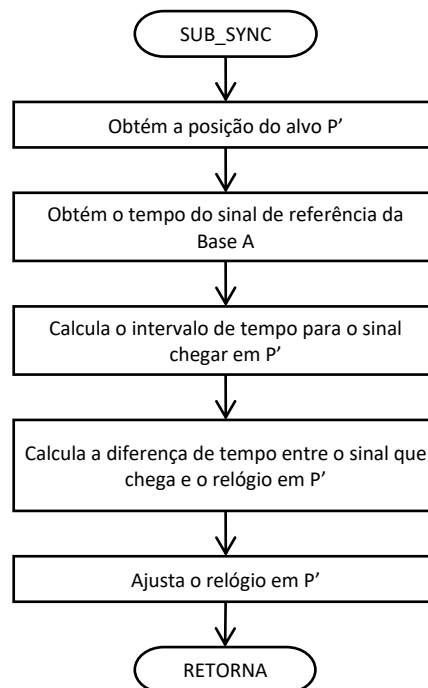


Figura 20: Diagrama de fluxo para determinar a sincronização de relógio no alvo P (KAUFMANN et al, 2012, p.11).

Esta sub-rotina, considerando que o alvo P' encontra-se em uma posição geodésica conhecida e que são conhecidos todos os demais parâmetros do sistema, obtém o horário do relógio da base A e calcula o intervalo de tempo que o sinal leva para se propagar entre a base A e o alvo P', determinando o horário previsto de chegada do sinal em P'. Esse horário é comparado com o relógio em P', e a diferença entre esses 2 tempos é usada para ajustar o relógio em P'.

4.4. Simulação incluindo incertezas

Alguns erros podem ser introduzidos na determinação dos atrasos do sistema. Existem erros no cálculo ou medição dos atrasos na instrumentação, erros na previsão dos atrasos de propagação no meio, erros de sincronização de relógios, entre outros. Desta forma, algumas incertezas foram incluídas na simulação, com distribuição normal, para verificar sua consequência na determinação do posicionamento da repetidora, do posicionamento do alvo e do sincronismo de relógios.

A Figura 21 mostra um exemplo de erro de propagação devido às incertezas mencionadas, para um erro com distribuição normal e desvio padrão de $\pm 0,5$ ns.

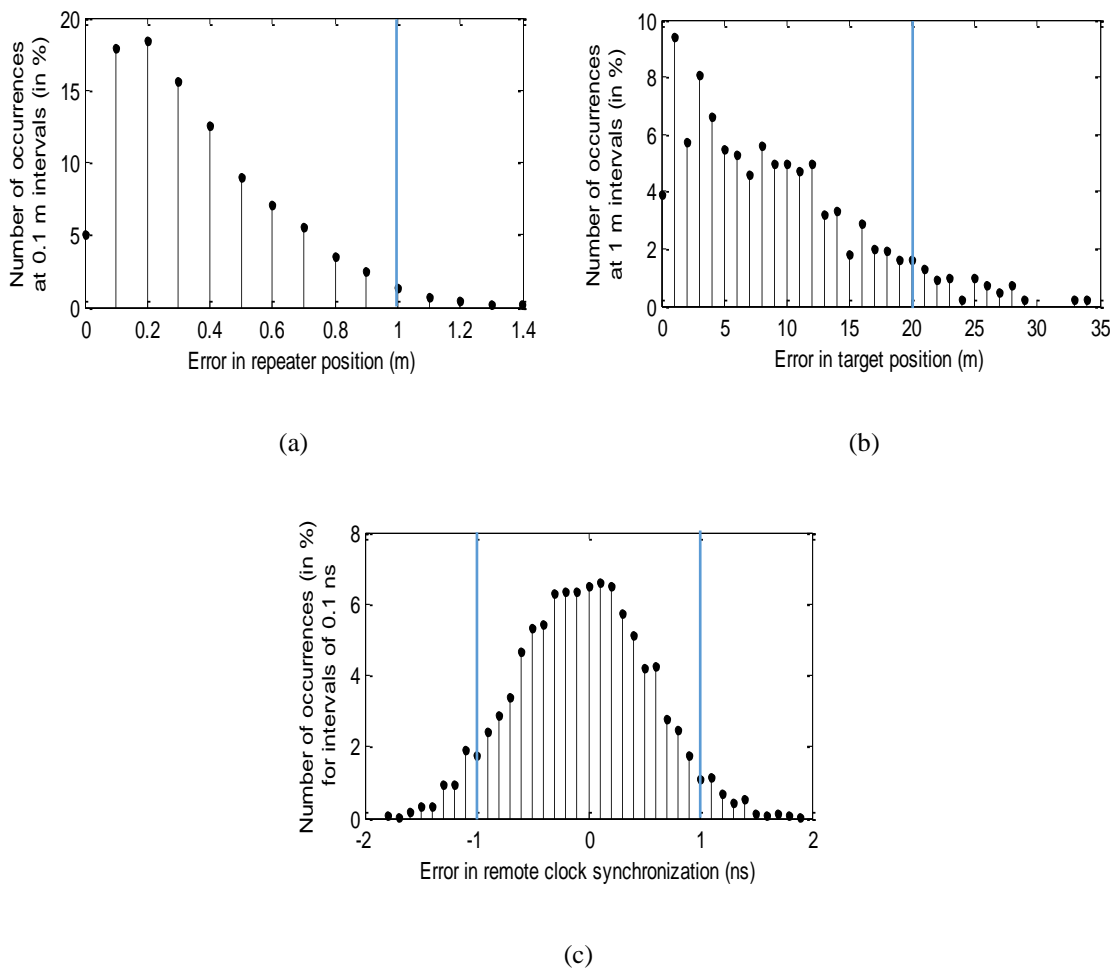


Figura 21: Exemplo de erros causados por incertezas de sincronismos de relógio e atrasos de propagação, para uma faixa de $\pm 0,5$ ns, mostrando (a) os efeitos na posição da repetidora, (b) os efeitos na posição do alvo e (c) os erros de sincronismo de relógio. As barras azuis indicam os extremos das ocorrências mais frequentes, considerando a faixa de incerteza de $\pm 0,5$ ns (KAUFMANN et al, 2014, p. 7).

Os gráficos da Figura 21 correspondem a uma amostragem de 1000 valores de atrasos gerados com distribuição normal para 4 posições diferentes da repetidora. Para cada atraso, foram determinados a posição da repetidora, a posição do alvo e a acurácia do sincronismo de relógio. Os erros mais frequentes para as incertezas dentro da faixa de $\pm 0,5$ ns são de menos de 1 metro para a posição da repetidora, menos de 20 metros para a posição do alvo e menos de 1 ns para o sincronismo de relógios, identificados pelas barras verticais azuis nos gráficos da Figura 21 (KAUFMANN et al, 2014, p. 6-7). Nota-se que o erro no posicionamento do alvo é maior do que o erro no posicionamento das repetidoras, pois existe um acúmulo de erros, uma vez que o alvo é determinado através da posição de repetidoras.

5. PROPOSTAS DE MELHORIA

As simulações do sistema Geolocal, com a inclusão de incertezas, mostraram erros significativos na localização do alvo. Existem algumas formas de minimizar estes erros e melhorar o desempenho do sistema, como: escolher a plataforma mais adequada para carregar uma repetidora, dependendo da aplicação; utilizar um modelo de propagação adequado; melhorar a disposição das bases fixas ou aumentar suas quantidades para diminuir o valor do PDOP e para diminuir o erro na posição da repetidora; avaliar a área de cobertura do sistema para determinar a distância ideal entre as bases para diferentes altitudes da repetidora. A seguir, estão incluídas algumas propostas de melhoria para o sistema Geolocal.

5.1. A escolha da plataforma

Quando o Geolocal for utilizado para a localização de um alvo em terra, a partir de um conjunto de repetidoras, a escolha da plataforma que carrega cada uma dessas repetidoras de sinal no espaço é um dos elementos principais do Geolocal e sua escolha deve levar em conta alguns fatores que viabilizem o sistema, proporcionando, ao mesmo tempo, uma melhor acurácia e um menor custo de implementação e de operação.

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

Apesar do baixo custo (de centenas a alguns milhares de dólares), os RPAs alcançam baixa altitude, abrangendo, portanto, uma pequena área de cobertura na superfície terrestre, e com isso, necessitando um maior número de bases fixas para garantir uma melhor acurácia. Além disso, a autonomia é pequena, geralmente abaixo de uma hora. O modelo Phantom IV PRO, por exemplo, conhecido também como *drone* do tipo quadricóptero, por ser

sustentado por 4 hélices, pode atingir um teto de voo máximo de 6 km (acima do nível do mar), e pode voar até meia hora (DJI, 2018). A maior vantagem de uma plataforma de baixa altitude, além do baixo custo, é a de se usar um modelo de propagação que não leve em conta o atraso gerado pela ionosfera.

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

Existem algumas empresas que desenvolvem modelos de RPAs com o formato de um avião, e de maior autonomia, como é o caso da AeroVironment, com o modelo Puma AE RQ-20B, que ultrapassa 3 horas de voo, porém com altitude de operação típica de apenas 150 metros (AEROVIRONMENT, 2017) e a Insitu-Boeing, com o modelo ScanEagle 3, lançado através de um sistema de catapulta, que pode chegar a 18 horas de voo e atingir 6 km de altitude (INSITU-BOEING, 2016). Esses modelos, porém, possuem um custo bem mais elevado, de centenas de milhares a centenas de milhões de dólares, como é o caso do GlobalHawk, da Northrop Grumman, uma aeronave de grande porte, pilotada remotamente e utilizada pela NASA para pesquisas e pela Força Aérea e Marinha dos EUA para vigilância e segurança; esta aeronave pode atingir 20 km de altitude (GIBBS, 2014). A NASA também desenvolveu, em conjunto com a AeroVironment, um protótipo de uma aeronave de grande autonomia que utiliza células solares, cujos testes foram cancelados após uma queda no oceano. Alguns destes exemplos estão mostrados na Figura 22.



Figura 22: Exemplos de RPAs, da esquerda para a direita: ScanEagle da Insitu-Boeing; GlobalHawk, da Northrop Grumman; e o protótipo Helios da AeroVironment (HOBBS, 2016, p. 1).

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

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

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

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

O Geolocal também pode ser útil na navegação de aeronaves, pilotadas ou não. No caso de aeronaves comerciais, que hoje são dependentes dos sistemas GPS e GLONASS, o Geolocal, tendo bases fixas espalhadas pelo território brasileiro, poderá ser capaz de promover a navegação de aeronaves no país e, além disso, essas aeronaves podem ter a função de repetidoras para a geolocalização de um alvo na superfície terrestre, dentro do Brasil.

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

Para que a quantidade de repetidoras seja menor, a plataforma precisa estar em altitudes maiores, onde o ângulo de elevação é maior. Nessas altitudes, estão os satélites de baixa órbita (LEO – *Low Earth Orbit*), em torno de 500 km, os de média órbita (MEO – *Medium*

Earth Orbit), que incluem os atuais satélites de navegação, com altitude média de 20 mil km, e os geoestacionários (GEO – *Geostationary Orbit*), a aproximadamente, 36 mil km. Como o sinal, para chegar a esses satélites, precisa passar pela ionosfera, o modelo de propagação baseado em planos paralelos, definido na Equação 1, não é suficiente. Outros modelos precisam ser utilizados, como o de Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Content*), que será descrito na próxima subseção.

Como foi visto na subseção 1.2, os satélites dos sistemas GNSS atuais, GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou, estão localizados na MEO, sendo que o sistema chinês BeiDou também utiliza satélites na GEO. Como as altitudes dessas órbitas são consideravelmente altas, pouco mais de 3 raios terrestres para a MEO e pouco menos de 6 raios terrestres para a GEO, cada satélite pode ser visto por uma grande área da superfície terrestre. Na prática, a área abrangida é menor, devido à necessidade de excluir baixos ângulos de elevação.

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

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

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

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

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

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

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

Caso os aviões comerciais venham a portar repetidoras, eles também serão úteis no georreferenciamento de alvos na superfície terrestre. Como já existe uma grande frota no território brasileiro, eles poderão fazer parte de uma rede aérea de repetidoras, onde poderão ser incluídos balões estratosféricos em áreas de menor movimento e CubeSats, que estão na

órbita LEO. Essas plataformas, aviões comerciais, balões estratosféricos e CubeSats, por estarem em altitudes inferiores às dos satélites nas órbitas MEO e GEO, possuem um atraso de propagação no meio atmosférico menor, e, portanto, o erro de medida de posição diminui. Entretanto, caso o hardware das repetidoras utilizado nessas plataformas não seja próprio, é necessário acrescentar a função de minimização para estimar o atraso de propagação na repetidora.

A Tabela 5 sintetiza as principais características das plataformas sugeridas.

Tabela 5: Principais características das plataformas que podem ser utilizadas para portar a repetidora.

Características	RPA (Phantom IV Pro)	Aeronave Comercial	Balão Estratosférico	CubeSat	Satélite
Custo de implementação	baixo	baixo	médio	médio a alto	alto
Altitude máxima	6 km	14 km	30 km	600 km	36000 km
Altura padrão	120 m	10 km	20 a 25 km	400 a 500 km	500 km
Área abrangida	pequena	média	média	grande	muito grande
Autonomia máxima	30 min (solar 1h)	depende do tempo de voo	15 dias (s/press) 100 dias (c/press)	1 ano	15 anos
Outras vantagens	hardware próprio fica na troposfera	grande quantidade fica na troposfera	hardware próprio fica na estratosfera	custo da plataforma	grande quantidade
Outras desvantagens	restrições de uso	hw não próprio	restrições de uso	hw não próprio passa pela ionosfera	hw não próprio passa pela ionosfera

5.2. A escolha de um modelo de propagação

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

Para baixas altitudes, onde o sinal não é afetado pela ionosfera, um modelo de propagação que pode ser utilizado é o baseado no conceito de planos paralelos, que assume que, tanto a superfície da Terra quanto o plano horizontal onde se encontra a repetidora sejam planos e paralelos e, neste caso, a correção de atraso de propagação (Δp_d) pode ser calculada como

medida de distância pela Equação 35, onde c é a velocidade de propagação no meio, τ_{atm} é o tempo de atraso atmosférico na direção perpendicular aos planos paralelos, no local onde se encontra a base, ou seja, na direção do zênite, e ϵ é o ângulo de elevação da repetidora em relação à base.

$$\Delta pd = c \cdot \tau_{atm} / \text{sen } \epsilon \quad (35)$$

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

O modelo de propagação baseado em planos paralelos da Equação 35 é bastante apropriado nas situações onde a repetidora se localiza em baixa altitude, na troposfera (da superfície da Terra até 15 km de altitude) e na estratosfera (de 15 a 50 km de altitude). Para que o modelo de planos paralelos seja utilizado em altitudes mais elevadas, onde o sinal atravessa a região da ionosfera, o sinal teria que ser transmitido nas mais altas de frequências do rádio, como Frequências Super Altas (SHF – *Super High Frequency*), com ondas de 3 a 30 GHz, ou 1 a 10 centímetros, conhecidas como ondas centimétricas ou micro-ondas, e Frequências Extremamente Altas (EHF – *Extremely High Frequency*), com ondas de 30 a 300 GHz, ou 1 a 10 milímetros, conhecidas como ondas milimétricas (KAUFMANN et al, 2012, p. 6). Nessas frequências, a contribuição ionosférica não é dominante, permanecendo apenas o efeito não dispersivo troposférico (HONMA et al, 2008, p. 951).

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

Por outro lado, frequências acima de 2 GHz não são utilizadas, pois seria necessário utilizar uma antena direcional para receber o sinal (OGAJA, 2011, p. 165).

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

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

De acordo com a produção iônica e a altitude, a ionosfera se divide em camadas. A camada F2 é a região onde a produção é máxima, e está situada entre 250 e 400 km de altitude, com pico ao redor de 350 km. Nessa camada são produzidos íons de N_2^+ , O_2^+ e, principalmente, O^+ (KIRCHHOFF, 1991, p. 77).

As ondas eletromagnéticas de frequências entre 1 e 2 GHz são afetadas pelo plasma ionosférico, principalmente pela camada F2. Ao passar por este plasma, a onda portadora que sai do transmissor sofre um desvio de polarização, conhecido como Rotação Faraday (*Faraday Rotation*), e um desvio de rota, devido à refração do sinal, ocasionando um atraso em sua chegada. Este atraso de propagação pode ser estimado pelo TEC acumulado durante o percurso entre o transmissor e a repetidora no espaço. O valor do TEC é definido como a quantidade de elétrons no percurso de propagação, em unidades de 10^{16} elétrons/m², de acordo com a Equação 36, em que N_e é a densidade eletrônica em um metro cúbico e s é a distância do percurso, em metros (ITU-R, 2016, p. 1-3; HUNT et al, 2000, p. 56).

$$TEC = \int_{base}^{repetidora} N_e \cdot s \cdot ds \quad (36)$$

O TEC representa, portanto, a quantidade de elétrons contida em um cilindro, cuja área de base vale 1 m² e o comprimento equivale à distância entre a base e a repetidora. O valor do TEC varia em função da radiação solar, localização geográfica e do campo magnético da Terra. E esse comportamento é verificado regularmente, ao longo do dia (variações diurnas),

ao longo das estações do ano (variações sazonais) e ao longo do ciclo de atividade solar (variação de 11 anos). Além disso, existem as variações abruptas, resultantes de explosão solar, ejeção de massa coronal (CME – *Coronal Mass Ejection*) e tempestade magnética, que aumentam a ionização da ionosfera, aumentando, conseqüentemente, o valor do TEC.

Sinais de diferentes frequências sofrem desvios de propagação diferentes ao encontrar elétrons livres na camada F2 da ionosfera, portanto as distâncias de percurso são diferentes para cada frequência. Os sistemas GNSS utilizam 2 frequências para calcular o valor do TEC, através da Equação 37, onde $P1$ e $P2$ são chamadas de pseudo-distâncias, pois são calculadas indiretamente a partir da diferença de tempo de propagação entre as 2 no percurso, e equivalem às frequências $f1$ e $f2$, respectivamente (MARCOVIC, 2014, p. 5).

$$TEC = \frac{1}{40,3} \cdot \frac{f1 \cdot f2}{f1 - f2} \cdot (P2 - P1) \quad (37)$$

Normalmente, as comparações diurnas são feitas através das variações do conteúdo de elétrons no zênite, ou seja, perpendicularmente à superfície terrestre em um determinado local. Este valor é conhecido como TEC Vertical (VTEC – *Vertical TEC*), e seu valor, além de variar durante o dia, também depende da estação do ano, da latitude e da atividade solar, variando, tipicamente, entre $10 \cdot 10^{16}$ e $50 \cdot 10^{16}$ elétrons. Para a simulação em MATLAB, o valor de VTEC, foi definido como $10 \cdot 10^{16}$, ou seja, 10^{17} elétrons. Ao definir um valor para o VTEC, é possível determinar o atraso de propagação vertical, t_z , através da Equação 38 (ITU-R, 2016, p. 5).

$$t_z = 1,345 \cdot \frac{VTEC}{f^2} \cdot 10^{-7} \quad (38)$$

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

Com base na Figura 23, primeiro, é utilizado o ângulo zenital z , do ponto de vista da base, e transformado em um ângulo zenital z' , do ponto de vista da região central da camada F2 da ionosfera, conhecida como Ponto Penetrante Ionosférico (IPP – *Ionospheric Piercing Point*), onde o pico de densidade eletrônica é máximo. A conversão é feita utilizando a Equação 39, onde R_e é o raio da Terra, que vale aproximadamente 6370 km e H é a altura do IPP, em torno de 350 km

$$\text{sen}(z') = \frac{R_e}{R_e+H} \cdot \text{sen}(z) \quad (39)$$

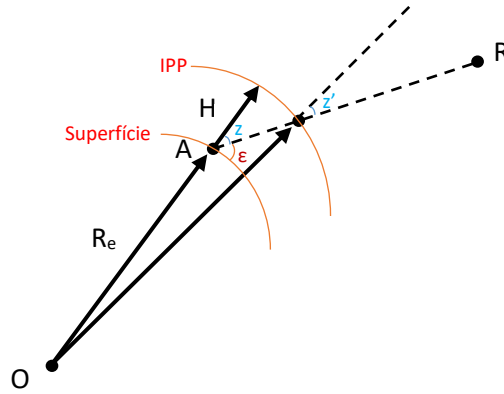


Figura 23: Representação dos ângulos zenitais z e z' , ângulo de elevação ϵ , raio da Terra R_e , altura da camada F2 da ionosfera H , base A , repetidora R e centro da Terra O , para ilustrar a conversão entre z e z' (Próprio Autor).

Analisando a Figura 23, o fator S_t será o inverso do cosseno do ângulo z' , definido pela Equação 40.

$$S_t = \frac{1}{\cos(z')} = \frac{1}{\cos[\arcsen(\frac{R_e}{R_e+H} \cdot \text{sen}(z))]} \quad (40)$$

A Equação 40 é equivalente à Equação 41, onde ϵ é o ângulo de elevação da repetidora em relação à base.

$$S_t = \frac{1}{\cos[\arcsen(\frac{R_e}{R_e+H} \cdot \cos(\epsilon))]} \quad (41)$$

Quanto menor o ângulo de elevação ϵ , maior o fator de correção. Por exemplo, para um ϵ de 60° , S_t vale 1,13566, e para um ϵ de 30° , S_t vale 1,75118. A correção S_t é usada na Equação 42 para calcular o Δpd , em unidade de distância, relativo à cada uma das bases.

$$\Delta pd = t_z \cdot S_t \cdot c \quad (42)$$

Além de sofrer atraso, o sinal pode sofrer o efeito de cintilação, que são rápidas variações de amplitude e fase do sinal de rádio que atravessa a ionosfera, degradando a relação

sinal-ruído de uma transmissão. A cintilação ocorre, normalmente, após o pôr do Sol, e atinge o auge nas épocas de alta atividade solar. Ela é causada pela alteração da densidade eletrônica, quando há um aumento da taxa de ionização, ou irregularidades na camada ionosférica devido à dinâmica das correntes ionosféricas, gerando uma região de rarefação dessa densidade eletrônica no plasma. Essas irregularidades podem evoluir para estruturas maiores de rarefação, conhecidas como bolhas ionosféricas (OLIVEIRA, 2012).

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

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

5.3. Comparação entre distribuições de bases através do PDOP

Uma das formas de se avaliar se a geometria do sistema é favorável é através do cálculo do PDOP. O PDOP é um coeficiente que indica quão diluída é a precisão da posição, baseada na geometria do sistema de localização da repetidora pelas bases que estão na superfície da Terra. Conforme a Equação 43, multiplicando o desvio padrão do erro das medidas de

pseudo-distâncias entre uma repetidora e as bases vistas pela repetidora, σ_0 , pelo fator PDOP, resulta no desvio padrão do erro da posição da repetidora.

$$\sigma = PDOP \cdot \sigma_0 \quad (43)$$

Por exemplo, se as medidas de pseudo-distâncias resultarem em um desvio padrão de erro de 6 metros de distância, e o fator PDOP for 1,5, a acurácia da posição terá um desvio padrão de erro de 9 metros (SICKLE, 2018).

O valor ideal de PDOP é 1, porém abaixo de 4 já é considerado aceitável para a maioria das aplicações. Valor menor de PDOP implica melhor geometria, e existem algumas formas de diminuir este valor, como aumentar o número de bases e evitar que as bases fiquem alinhadas em relação à repetidora. Outra forma de diminuir o PDOP é melhorar a distribuição das bases, de forma que as esferas de distâncias centradas nas bases interceptem a repetidora onde, ao incluir uma incerteza de distância, para mais ou para menos, a região interna da intersecção seja a menor possível, como mostra a Figura 24a. A Figura 24b mostra uma geometria desfavorável, pois a região de intersecção é maior. As intersecções mostradas nas Figura 24a e 24b são conhecidas como regiões de incerteza, e a precisão do sistema da Figura 24b é considerada como diluída em relação a da Figura 24a (LANGLEY, 1999, p. 52-53).

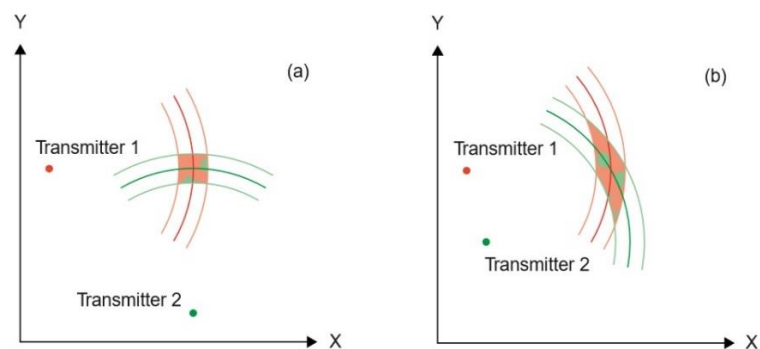


Figura 24: Geometria de um sistema de localização de uma repetidora, onde a região de intersecção indica a incerteza de posição: em (a) a região de incerteza é menor, portanto em (b) a diluição de precisão é maior (LANGLEY, 1999, p. 52).

O cálculo a seguir proposto por Dana (1996), é utilizado no sistema de coordenadas ECEF. Para um sistema de 4 bases e 1 repetidora, o primeiro passo para calcular o PDOP de 1 repetidora em relação à 4 bases no sistema de coordenadas ECEF é calcular as distâncias das bases à repetidora (AR, BR, CR e DR) utilizando as posições x, y e z das bases

(Ax, Ay, Az, Bx, By, Bz, Cx, Cy, Cz, Dx, Dy e Dz) e da repetidora (Rx, Ry e Rz) conforme o conjunto de Equações 44.

$$\begin{aligned}
 AR &= \sqrt{(Ax - Rx)^2 + (Ay - Ry)^2 + (Az - Rz)^2} \\
 BR &= \sqrt{(Bx - Rx)^2 + (By - Ry)^2 + (Bz - Rz)^2} \\
 CR &= \sqrt{(Cx - Rx)^2 + (Cy - Ry)^2 + (Cz - Rz)^2} \\
 DR &= \sqrt{(Dx - Rx)^2 + (Dy - Ry)^2 + (Dz - Rz)^2}
 \end{aligned} \tag{44}$$

Os valores encontrados nas Equações 44 são usados na matriz A, Equação 45. Nesta matriz, as três primeiras colunas representam os componentes x, y e z do vetor unitário da distância entre as bases e a repetidora, enquanto que a quarta coluna é incluída para o cálculo do fator de diluição de tempo.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{Ax-Rx}{AR} & \frac{Ay-Ry}{AR} & \frac{Az-Rz}{AR} & -1 \\ \frac{Bx-Rx}{BR} & \frac{By-Ry}{BR} & \frac{Bz-Rz}{BR} & -1 \\ \frac{Cx-Rx}{CR} & \frac{Cy-Ry}{CR} & \frac{Cz-Rz}{CR} & -1 \\ \frac{Dx-Rx}{DR} & \frac{Dy-Ry}{DR} & \frac{Dz-Rz}{DR} & -1 \end{bmatrix} \tag{45}$$

Em seguida, é calculada a matriz P, que é a matriz inversa da matriz transposta de A multiplicada pela matriz A, como mostra a Equação 46.

$$P = (A^t \cdot A)^{-1} \tag{46}$$

A Equação 46 será aplicável na situação em que $A^t \cdot A$ não resulte em uma matriz singular, ou seja, o determinante de $A^t \cdot A$ não seja nulo. Caso contrário, essa matriz não será invertível. Para isso, é necessário incluir no código o cálculo do determinante da matriz $A^t \cdot A$. Se o resultado for nulo, basta modificar um dos elementos da matriz, acrescentando um valor irrisório e refazer o cálculo do determinante até que o resultado não seja mais nulo.

O valor do PDOP é encontrado através da Equação 47, que utiliza 3 dos elementos da diagonal da matriz P.

$$PDOP = \sqrt{P_{0,0} + P_{1,1} + P_{2,2}} \tag{47}$$

Caso sejam utilizadas mais de 4 bases, novas linhas são adicionadas à matriz A, da Equação 45, mantendo o padrão.

Para exemplificar a variação do PDOP com a altitude, foi feita uma simulação em que foram posicionadas 5 bases fixas, A, B, C, D, e E, e 1 repetidora R em 5 cidades do estado de São Paulo nas coordenadas geográficas indicadas na Tabela 6 e ilustradas na Figura 25.

Tabela 6: Localizações geográficas (latitudes, longitudes e altitudes) das bases A, B, C, D e E e da repetidora R, utilizadas nas simulações.

Cidade	Elemento	Latitude	Longitude	Altitude
Rio Claro	Base A	- 22° 24' 48''	- 47° 34' 11''	592 m
Piracicaba	Base B	- 22° 43' 30''	- 47° 38' 51''	524 m
Botucatu	Base C	- 22° 53' 25''	- 48° 27' 19''	828 m
Campinas	Base D	- 22° 54' 23''	- 47° 03' 42''	677 m
Itu	Base E	- 23° 15' 57''	- 47° 17' 57''	577 m
Piracicaba	Repetidora R	- 22° 43' 30''	- 47° 40' 51''	variável

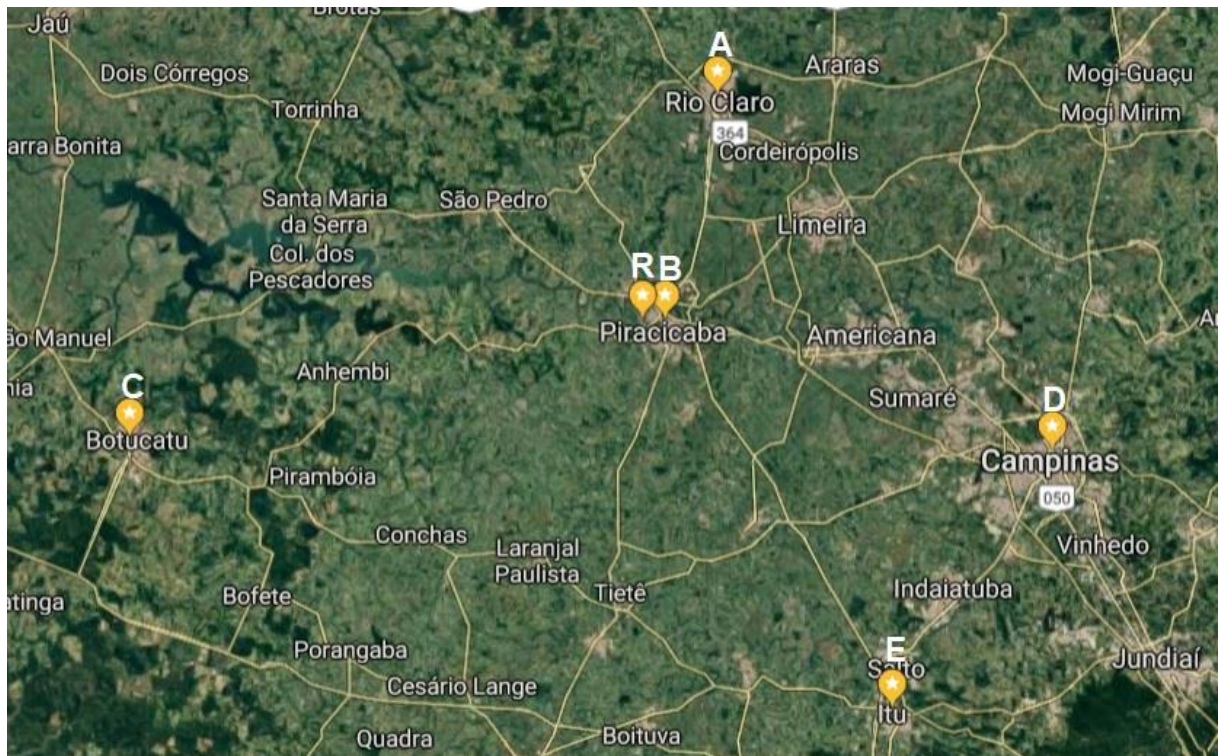


Figura 25: Posições no mapa das 5 bases, A, B, C, D, e E, e da repetidora R (adaptado de Google Maps).

As cidades de Rio Claro, Botucatu, Campinas, e Itu onde estão as bases A, C, D, e E formam um quadrilátero com centro próximo à cidade de Piracicaba, onde está a base B; a

repetidora R está um pouco ao oeste de B. A repetidora R foi posicionada em diferentes altitudes e para cada uma delas, os respectivos PDOPs foram calculados pela simulação e anotados na Tabela 7. A simulação inclui todas as combinações possíveis com 4 bases, ABCD, ABCE, ABDE, ACDE, e BCDE, e a combinação com todas as bases, ABCDE. Para cada combinação, e para cada altitude, o resultado da combinação mostra, além do PDOP, a elevação da repetidora em relação a cada uma das bases e a elevação média. A elevação da base B em Piracicaba é de cerca de 90° para qualquer altitude, pois a repetidora está próxima ao zênite, e, portanto, não é computada na elevação média.

A combinação ACDE, que desconsidera a base B no cálculo, apresentou valores de PDOP bem acima do aceitável, com um mínimo de 13,25 em 40000 metros de altitude. De acordo com McPherron (2002, p. 60), uma das formas de diminuir o PDOP é posicionar a repetidora próxima ao zênite de uma das bases, como foi feito nas combinações ABCD, ABCE, ABDE e BCDE da Tabela 7. Nesses casos, os valores do PDOP diminuem com a altitude, e comparando esses valores, as combinações ABCD e ABCE apresentaram ter melhores geometrias que ABDE e BCDE. Para esses 4 casos de melhor geometria, a altitude mínima aceitável para evitar ângulos inferiores a 15° é de 30000 metros. Ângulos inferiores a 15° não são recomendáveis, pois o sinal pode ser afetado por relevos ou construções e os efeitos de refração na atmosfera são maiores.

Quando a repetidora está localizada no centro de uma distribuição de 4 bases, como ocorre na combinação ACDE, o ângulo de elevação médio para o mínimo PDOP é próximo a 35° . Outras simulações com 4 bases foram feitas em diferentes localidades, com as bases formando um quadrilátero na superfície da Terra, de mesma distância entre os vértices, e com a repetidora posicionada no centro. O que se variou foram a distância entre os vértices, ou seja, o espaçamento entre as bases, e a altitude da repetidora. Na maioria das simulações que fizemos, o PDOP é mínimo quando a elevação da repetidora em relação às bases é de 35° .

A outra forma de diminuir o PDOP é aumentar o número de bases. A simulação mostrada na Tabela 7 mostrou que os valores de PDOP da combinação ABCDE de 5 bases são menores que os valores das demais combinações de 4 bases e, assim como os casos anteriores, o PDOP diminui com a altitude, sendo a altitude mínima aceitável também de 30000 metros.

Tabela 7: Cálculo do PDOP na simulação de 5 combinações de 4 bases fixas, e de 1 combinação de 5 bases fixas, para cada altitude da repetidora.

Altitude		10 km	20 km	30 km	40 km	50 km	60 km
Combinação ABCD	PDOP	1,98	2,21	2,60	3,11	3,73	4,46
	Elevação em A	14,50°	28,06°	38,90°	47,22°	53,54°	58,41°
	Elevação em B	70,12°	80,01°	83,36°	85,03°	86,03°	86,69°
	Elevação em C	6,41°	13,20°	19,63°	25,58°	30,98°	35,82°
	Elevação em D	7,95°	16,14°	23,69°	30,46°	36,39°	41,53°
	Elevação média	9,62°	19,13°	27,41°	34,42°	40,30°	45,25°
Combinação ABCE	PDOP	2,00	2,26	2,71	3,31	4,05	4,92
	Elevação em A	14,50°	28,06°	38,90°	47,22°	53,54°	58,41°
	Elevação em B	70,12°	80,01°	83,36°	85,03°	86,03°	86,69°
	Elevação em C	6,41°	13,20°	19,63°	25,58°	30,98°	35,82°
	Elevação em E	7,50°	15,17°	22,31°	28,78°	34,53°	39,58°
	Elevação média	9,47°	18,81°	26,95°	33,86°	39,68°	44,60°
Combinação ABDE	PDOP	3,37	4,00	4,84	5,91	7,23	8,81
	Elevação em A	14,50°	28,06°	38,90°	47,22°	53,54°	58,41°
	Elevação em B	70,12°	80,01°	83,36°	85,03°	86,03°	86,69°
	Elevação em D	7,95°	16,14°	23,69°	30,46°	36,39°	41,53°
	Elevação em E	7,50°	15,17°	22,31°	28,78°	34,53°	39,58°
	Elevação média	9,98°	19,79°	28,30°	35,49°	41,49°	46,51°
Combinação ACDE	PDOP	30,83	17,47	14,21	13,50	13,89	14,93
	Elevação em A	14,50°	28,06°	38,90°	47,22°	53,54°	58,41°
	Elevação em C	6,41°	13,20°	19,63°	25,58°	30,98°	35,82°
	Elevação em D	7,95°	16,14°	23,69°	30,46°	36,39°	41,53°
	Elevação em E	7,50°	15,17°	22,31°	28,78°	34,53°	39,58°
	Elevação média	9,09°	18,14°	26,13°	33,01°	38,86°	43,84°
Combinação BCDE	PDOP	3,21	3,39	3,73	4,19	4,77	5,45
	Elevação em B	70,12°	80,01°	83,36°	85,03°	86,03°	86,69°
	Elevação em C	6,41°	13,20°	19,63°	25,58°	30,98°	35,82°
	Elevação em D	7,95°	16,14°	23,69°	30,46°	36,39°	41,53°
	Elevação em E	7,50°	15,17°	22,31°	28,78°	34,53°	39,58°
	Elevação média	7,29°	14,83°	21,88°	28,27°	33,97°	38,98°
Combinação ABCDE	PDOP	1,82	2,06	2,46	2,96	3,55	4,25
	Elevação em A	14,50°	28,06°	38,90°	47,22°	53,54°	58,41°
	Elevação em B	70,12°	80,01°	83,36°	85,03°	86,03°	86,69°
	Elevação em C	6,41°	13,20°	19,63°	25,58°	30,98°	35,82°
	Elevação em D	7,95°	16,14°	23,69°	30,46°	36,39°	41,53°
	Elevação em E	7,50°	15,17°	22,31°	28,78°	34,53°	39,58°
	Elevação média	9,09°	18,14°	26,13°	33,01°	38,86°	43,84°

De acordo com os resultados apresentados por Celmer (2004), que calcula o valor mínimo possível do PDOP para diferentes ângulos de corte e quantidades de satélites que variam de 4 a 14, a quantidade ideal de satélites de um sistema GNSS para um PDOP próximo ao ideal - que no caso do Geolocal seria análogo à quantidade de bases - é em torno de 12. Para 12 bases e ângulo de corte de 15°, o valor mínimo de PDOP é de aproximadamente 1,15.

Para exemplificar uma situação realística, foram feitas simulações com 4 repetidoras e 12 bases fixas, em diferentes cidades do estado de São Paulo e com as coordenadas geográficas e altitudes mostradas na Tabela 8.

Tabela 8: Localizações geográficas (latitudes, longitudes e altitudes) de 12 bases e 4 repetidoras, utilizadas nas simulações.

Cidade	Elemento	Latitude	Longitude	Altitude
Rio Claro	Base A	- 22° 24' 48''	- 47° 34' 11''	592 m
Piracicaba	Base B	- 22° 43' 30''	- 47° 38' 51''	524 m
Botucatu	Base C	- 22° 53' 25''	- 48° 27' 19''	828 m
Campinas	Base D	- 22° 54' 23''	- 47° 03' 42''	677 m
Itu	Base E	- 23° 15' 57''	- 47° 17' 57''	577 m
Jaú	Base F	-22° 17' 47''	-48° 33' 28''	522 m
Brotas	Base G	-22° 17' 03''	48° 07' 36''	647 m
Santa Maria da Serra	Base H	-22° 34' 02''	-48° 09' 38''	495 m
Conchas	Base I	-23° 00' 55''	-48° 00' 38''	503 m
Boituva	Base J	-23° 17' 00''	-47° 40' 20''	637 m
Mogi Mirim	Base K	-22° 25' 55''	-46° 57' 30''	617 m
Bofete	Base L	-23° 06' 08''	-48° 15' 28''	576 m
Piracicaba	Repetidora R1	- 22° 43' 30''	- 47° 40' 51''	variável
Limeira	Repetidora R2	-22° 33' 52''	-47° 24' 01''	variável
Charqueada	Repetidora R3	-22° 30' 39''	-47° 46' 40''	variável
Anhembi	Repetidora R4	-22° 47' 22''	-48° 07' 38''	variável

As localizações das 4 repetidoras, R1, R2, R3 e R4, e das 12 bases estão ilustradas na Figura 26, onde as repetidoras estão marcadas em vermelho para diferenciar das bases. O resultado da simulação com os valores dos PDOPs, das elevações da repetidora em relação a cada base, e da média das elevações, estão apresentados na Tabela 9 para as altitudes de 10000 a 60000 metros. No cálculo da média das elevações para a repetidora R1, que está

próxima ao zênite da base B, em Piracicaba, os valores de elevação de cerca de 90° não foram considerados.

A intenção da escolha das bases é de simular uma situação que possa estar mais próxima da realidade, onde as distâncias entre as bases possuam valores diferentes e suas disposições não infiram qualquer tipo de simetria. A repetidora R1 foi colocada propositalmente próxima ao zênite e as outras 3 em outras posições aleatórias, como pode ser observado na Figura 26.

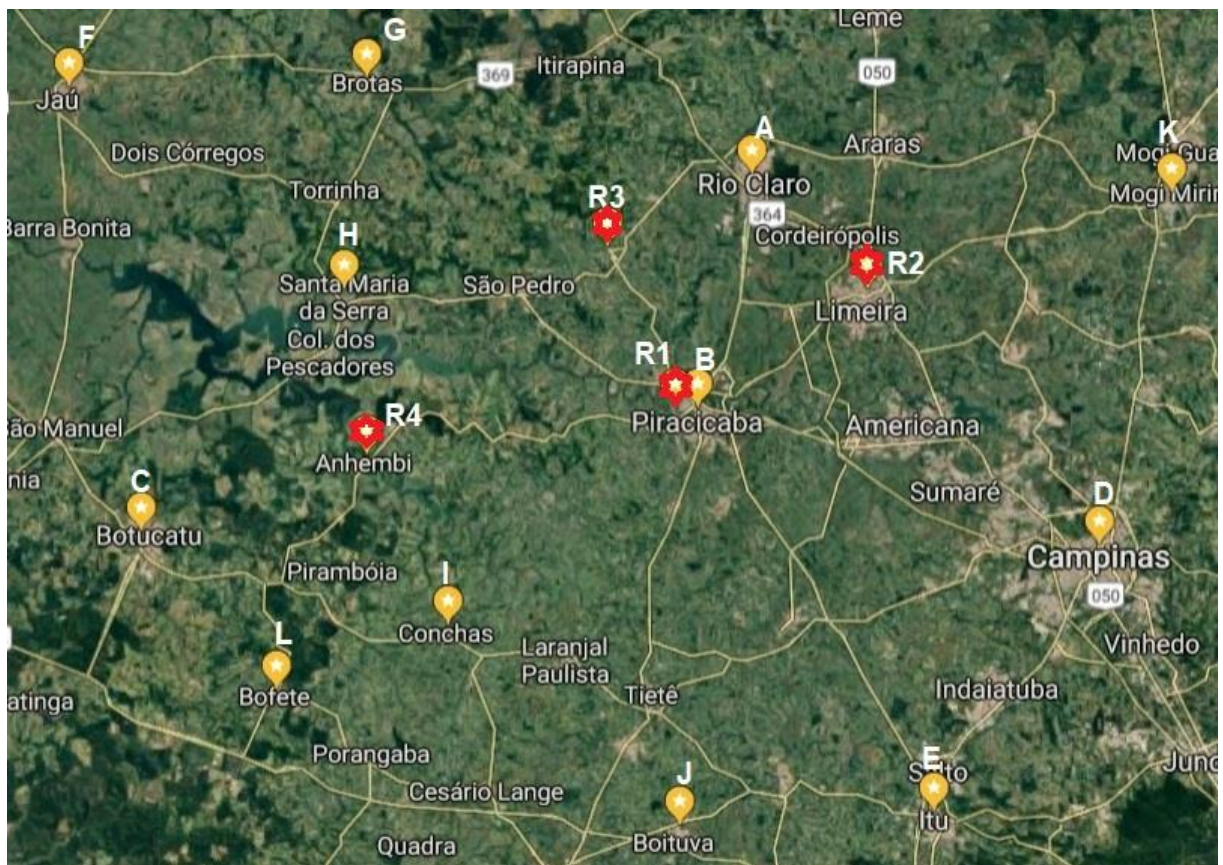


Figura 26: Posições no mapa de 12 bases, A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K e L, e 4 repetidoras, R1, R2, R3 e R4 (adaptado de Google Maps).

De acordo com os resultados da simulação, apresentados na Tabela 9, todos os valores de PDOP se mostraram dentro do limite aceitável, com destaque para a repetidora R1, onde esses valores estão mais próximos do ideal.

Tabela 9: Valores dos PDOPs calculados pela simulação para cada repetidora; valores de elevação das repetidoras em relação a cada base; e elevação média (continua).

Altitude:		10 km	20 km	30 km	40 km	50 km	60 km
Repetidora R1	PDOP	1,49	1,59	1,76	1,96	2,20	2,47
	Elevação em A	14,50°	28,06°	38,90°	47,22°	53,54°	58,41°
	Elevação em B	70,12°	80,01°	83,36°	85,03°	86,03°	86,69°
	Elevação em C	6,41°	13,20°	19,63°	25,58°	30,98°	35,82°
	Elevação em D	7,95°	16,14°	23,69°	30,46°	36,39°	41,53°
	Elevação em E	7,50°	15,17°	22,31°	28,78°	34,53°	39,58°
	Elevação em F	5,31°	10,80°	16,09°	21,11°	25,80°	30,14°
	Elevação em G	7,94°	16,09°	23,61°	30,35°	36,27°	41,41°
	Elevação em H	10,29°	20,42°	29,36°	36,97°	43,31°	48,55°
	Elevação em I	11,49°	22,64°	32,23°	40,15°	46,57°	51,76°
	Elevação em J	8,60°	17,36°	25,35°	32,40°	38,49°	43,69°
	Elevação em K	6,60°	13,42°	19,88°	25,84°	31,24°	36,09°
	Elevação em L	7,41°	14,99°	22,06°	28,48°	34,20°	39,23°
	Elevação média	8,54°	17,12°	24,83°	31,58°	37,39	42,38°
Repetidora R2	PDOP	3,87	2,44	2,23	2,30	2,51	2,78
	Elevação em A	21,25°	38,72°	50,52°	58,40°	63,85°	67,77°
	Elevação em B	16,98°	32,09°	43,48°	51,76°	57,82°	62,35°
	Elevação em C	4,59°	9,51°	14,29°	18,87°	23,21°	27,27°
	Elevação em D	10,27°	20,57°	29,64°	37,32°	43,70°	48,95°
	Elevação em E	6,85°	13,90°	20,53°	26,63°	32,14°	37,04°
	Elevação em F	4,41°	9,00°	13,47°	17,77°	21,87°	25,74°
	Elevação em G	6,58°	13,42°	19,88°	25,85°	31,26°	36,11°
	Elevação em H	6,93°	13,98°	20,63°	26,73°	32,24°	37,14°
	Elevação em I	6,75°	13,66°	20,17°	26,17°	31,61°	36,47°
	Elevação em J	6,33°	12,91°	19,15°	24,94°	30,24°	35,01°
	Elevação em K	11,10°	22,05°	31,53°	39,41°	45,83°	51,05°
	Elevação em L	5,06°	10,34°	15,44°	20,29°	24,85°	29,10°
	Elevação média	8,93°	17,51°	24,89°	31,18°	36,55°	41,17°
Repetidora R3	PDOP	3,66	2,30	2,07	2,12	2,28	2,51
	Elevação em A	21,40°	38,94°	50,74°	58,60°	64,02°	67,92°
	Elevação em B	19,17°	35,52°	47,19°	55,31°	61,07°	65,29°
	Elevação em C	6,43°	13,25°	19,69°	25,65°	31,06°	35,92°
	Elevação em D	6,21°	12,70°	18,86°	24,60°	29,85°	34,59°
	Elevação em E	5,55°	11,31°	16,84°	22,06°	26,92°	31,38°
	Elevação em F	6,45°	13,07°	19,35°	25,17°	30,47°	35,25°
	Elevação em G	12,04°	23,79°	33,75°	41,83°	48,28°	53,43°
	Elevação em H	13,40°	26,03°	36,44°	44,65°	51,04°	56,05°
	Elevação em I	8,88°	17,76°	25,84°	32,94°	39,06°	44,26°

Tabela 9: Valores dos PDOPs calculados pela simulação para cada repetidora; valores de elevação das repetidoras em relação a cada base; e elevação média (continuação).

	Elevação em J	6,19°	12,64°	18,76°	24,47°	29,69°	34,42°
	Elevação em K	6,31°	12,86°	19,07°	24,85°	30,12°	34,88°
	Elevação em L	6,55°	13,31°	19,70°	25,62°	30,99°	35,81°
	Elevação média	9,88°	19,27°	27,19°	33,81°	39,38°	44,10°
Repetidora R4	PDOP	3,95	2,51	2,29	2,35	2,53	2,78
	Elevação em A	7,56°	15,29°	22,49°	29,00°	34,78°	39,84°
	Elevação em B	10,77°	21,33°	30,57°	38,32°	44,71°	49,94°
	Elevação em C	14,48°	28,35°	39,36°	47,74°	54,08°	58,94°
	Elevação em D	4,83°	9,94°	14,88°	19,59°	24,04°	28,20°
	Elevação em E	5,38°	10,98°	16,37°	21,47°	26,22°	30,62°
	Elevação em F	7,67°	15,46°	22,70°	29,24°	35,03°	40,10°
	Elevação em G	9,48°	19,05°	27,62°	35,03°	41,30°	46,55°
	Elevação em H	20,92°	38,09°	49,83°	57,75°	63,26°	67,24°
	Elevação em I	18,89°	35,07°	46,70°	54,85°	60,65°	64,91°
	Elevação em J	7,42°	15,05°	22,17°	28,63°	34,37°	39,42°
	Elevação em K	4,24°	8,70°	13,04°	17,24°	21,24°	25,04°
	Elevação em L	14,23°	27,57°	38,32°	46,62°	52,97°	57,87°
	Elevação média	10,49°	20,41°	28,67°	35,46°	41,05°	45,72°

Na repetidora R1, o valor do PDOP aumenta com a altitude, porém as altitudes de 10000 e 20000 metros não são recomendadas, pois possuem diversas ocorrências de elevação abaixo de 15°. A altitude de 30000 metros se apresenta como a mais indicada para esta configuração. Para poder utilizar repetidoras em menores altitudes, é necessário que as bases estejam mais próximas entre si.

Em relação às repetidoras R2, R3 e R4, o valor do PDOP diminui até uma altitude próxima a 30000 metros e depois aumenta novamente. A repetidora R2 possui PDOP de 2,23 em 30000 metros de altitude, porém existem 2 valores de elevação abaixo de 15°, bases C e F, localizadas nas distantes cidades de Botucatu e Jaú, respectivamente. Estas cidades podem ser descartadas no cálculo do PDOP, e seu valor muda para 2,51. Neste caso, uma repetidora em 40000 metros de altitude teria um valor de PDOP menor que em 30000 metros. Na repetidora R3, não há elevação menor que 15° em 30000 metros para a configuração mostrada na Figura 26, e na repetidora R4 existem 2: na base D, em Campinas, e na base K, em

Mogi Mirim. Desconsiderando essas bases, o PDOP diminui para 2,46, maior que o valor em 40000 metros, de 2,35.

5.4. Comparação entre distribuições de bases através do erro na posição da repetidora

Além do PDOP, a melhoria da acurácia de acordo com a distribuição e quantidade de bases pode ser determinada através de uma incerteza introduzida na simulação. Esta incerteza se refere à sincronização de relógios entre as bases, imprecisão dos modelos de propagação, e imprecisão nas medidas de atrasos de transmissão, repetição e na repetidora. Para esta proposta, foi utilizada uma distribuição gaussiana centrada em zero e com desvio padrão de 3,3 ns - maior que o proposto por KAUFMANN et al (2014) de 0,5 ns - e foi considerado como desconhecido o tempo de trânsito do sinal na repetidora, fazendo-se, portanto, necessários os cálculo do atraso de propagação (*path delay*) e atraso do sinal na repetidora, durante a simulação. O erro introduzido é acrescentado ao tempo que o sinal leva para trafegar da base de controle para cada base que esteja ao alcance visual da repetidora, respeitando o ângulo de elevação mínimo de 15°. A simulação gera valores aleatórios de tempo que atendam o desvio padrão de 3,3 ns em uma distribuição gaussiana centrada em zero. O valor de erro gerado é acrescentado a um dos percursos (por exemplo, base A – repetidora R1 – base B), e este erro pode ser positivo ou negativo. Para um próximo percurso, um novo valor é gerado, e assim, sucessivamente.

Após introduzidos na simulação os erros de todos os percursos referente a uma determinada repetidora, são calculadas a latitude, a longitude e a altitude desta repetidora, e em seguida, é calculado o erro da posição da repetidora.

Como exemplo, considerando os valores apresentados na Tabela 6, após rodar a simulação para as bases A, B, C e D e a repetidora R por 5 vezes, foram encontrados os valores apresentados na Tabela 10, onde os valores reais da posição da repetidora (latitude, longitude e altitude) foram inseridos na última linha para facilitar a visualização.

Os valores de posição geográfica de cada uma das 5 simulações podem ser comparados com os da posição real na última linha, e o erro na posição da repetidora para cada simulação é mostrado na última coluna.

Como existe uma variação considerável de erro na posição da repetidora, já que os valores aleatórios são modificados em cada simulação, se faz necessária uma quantidade grande de amostras para que a comparação entre diferentes distribuições de bases possa ser melhor analisada.

Tabela 10: Localizações geográficas (latitudes, longitudes e altitudes) de uma repetidora, e erro na posição da repetidora, em 5 simulações diferentes.

Simulação	Latitude	Longitude	Altitude	Erro na posição
1	- 22° 43' 30,0242''	- 47° 40' 51,0115''	30,0008 km	1,1438 metros
2	- 22° 43' 30,0675''	- 47° 40' 51,0092''	29,9988 km	2,4297 metros
3	- 22° 43' 30,0313''	- 47° 40' 51,0431''	29,9994 km	1,6906 metros
4	- 22° 43' 29,9930''	- 47° 40' 51,0006''	30,9992 km	0,8378 metros
5	- 22° 43' 29,9550''	- 47° 40' 51,0178''	30,0011 km	1,8299 metros
Valores reais	- 22° 43' 30''	- 47° 40' 51''	30 km	-

Partindo das posições das 5 bases apresentadas na Tabela 6 e mostradas na Figura 25, foram feitas 1000 simulações para cada combinação de bases e para as 2 altitudes que apresentaram um PDOP mais favorável em todos os casos: 30 e 40 km. Considerando apenas as bases A, B, C e D, os erros na posição da repetidora são mostrados na Figura 27, em (a) para 30 km e (b) para 40 km.

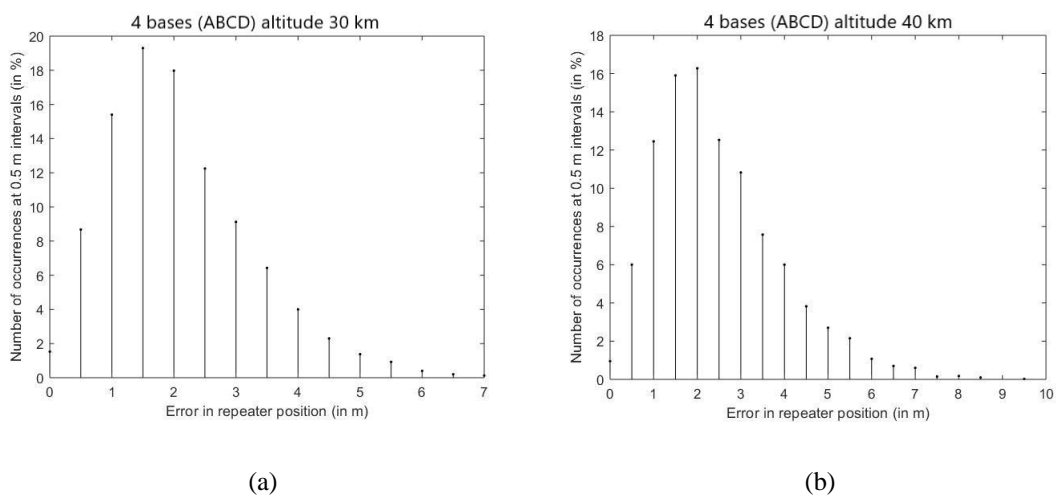


Figura 27: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, B, C e D, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.

Para as 2 altitudes, a grande maioria dos erros foi no máximo de 3 metros: mais de 80% para 30 km e 75% para 40 km, com algumas ocorrências maiores que 7 metros em 40 km. Considerando as altitudes da repetidora nesta simulação, na metade superior da estratosfera, onde somente os balões de maiores altitudes conseguem atingir, um erro de 3 metros é bem aceitável.

Utilizando a mesma Tabela 6 e Figura 25 como referência, outras 1000 simulações foram feitas para as mesmas altitudes de 30 e 40 km, porém considerando apenas as bases A, B, C e E. O resultado é mostrado na Figura 28, e de igual maneira, em (a) para 30 km e (b) para 40 km.

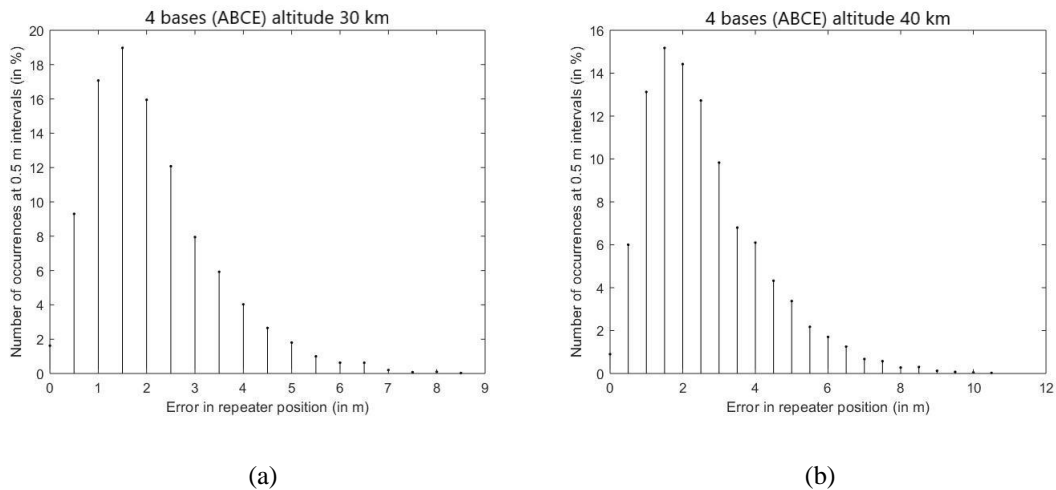


Figura 28: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, B, C e E, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.

Nessa distribuição de bases, assim como na distribuição anterior, a maior parte dos erros está concentrada abaixo de 3 metros: mais de 80% para 30 km e mais de 70% para 40 km, com poucas ocorrências com mais de 7 metros nos 2 casos.

Tanto a combinação ABCD quanto ABCE eram as que apresentavam melhor distribuição, de acordo com os PDOPs mostrados na Tabela 7 (30 km: 2,60; 40 km: 3,11 e 30 km: 2,71; 40 km: 3,31 respectivamente para ABCD e ABCE), e a boa distribuição também se confirmou nas ocorrências de baixos erros na posição da repetidora. Nestes 2 casos, é possível notar na Figura 25, que a repetidora aparece no centro da distribuição, e, além disso, próxima ao zênite da base B.

As próximas 1000 simulações foram feitas utilizando a combinação de bases ABDE e mostradas na Figura 29.

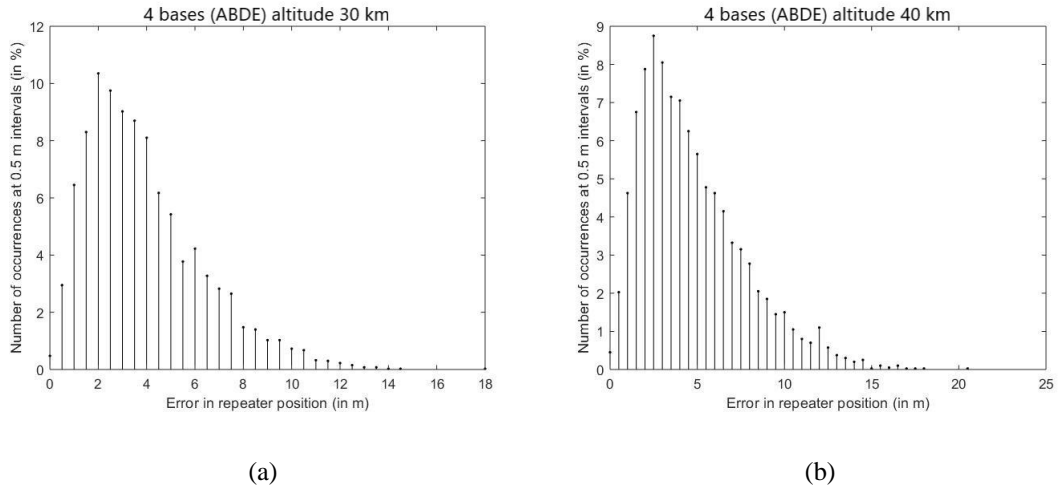


Figura 29: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, B, D e E, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.

Nessa distribuição, mais de 75% das ocorrências aparecem com erro até 5 metros para 30 km de altitude e mais de 75% com erro até 7 metros para 40 km de altitude.

Na Figura 30, estão mostradas as ocorrências de erros para 1000 simulações que utilizam a combinação de bases BCDE.

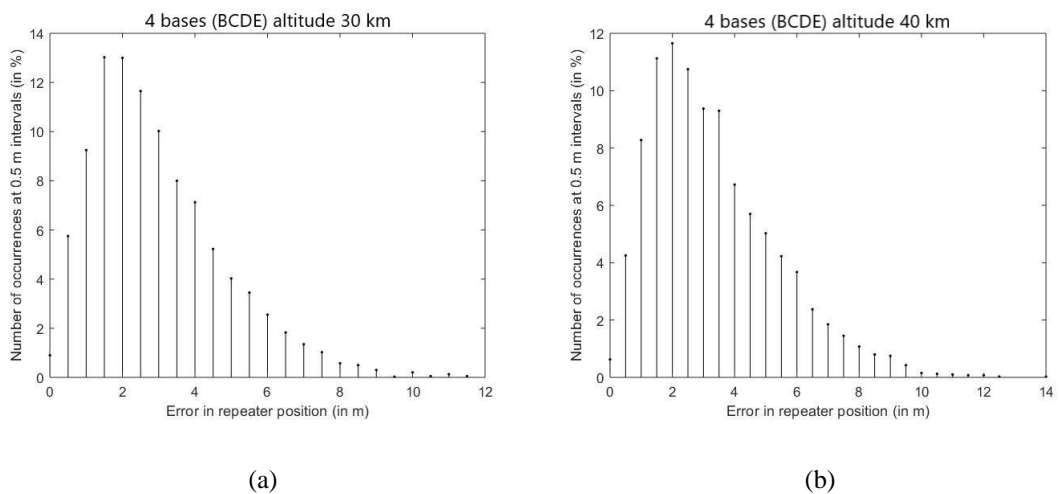


Figura 30: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, B, C, D e E, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.

Nessa distribuição, pouco mais de 85% das ocorrências possuem erro de até 4 metros para 30 km e mais de 80% até 5 metros para 40 km.

Nestas 2 últimas combinações, ABDE e BCDE, as ocorrências de erros na posição da repetidora são um pouco maiores que as combinações anteriores (ABCD e ABCE), porém são ainda aceitáveis, levando em conta a alta altitude da repetidora (30 e 40 km). Os PDOPs destas 2 combinações estavam no limite do aceitável (30 km: 4,84; 40 km: 5,91 e 30 km: 3,73; 40 km: 4,19 respectivamente para ABDE e BCDE) e confirmam as distribuições menos favoráveis da Figura 25, onde a base B já não aparece no centro, mas em uma das extremidades das distribuições de 4 bases. Entretanto, estas distribuições contam com a vantagem de a repetidora estar posicionada próxima ao zênite de uma das bases (base B).

Para a seguinte distribuição de 4 bases, ACDE, as ocorrências de erros de 1000 simulações estão mostradas na Figura 31.

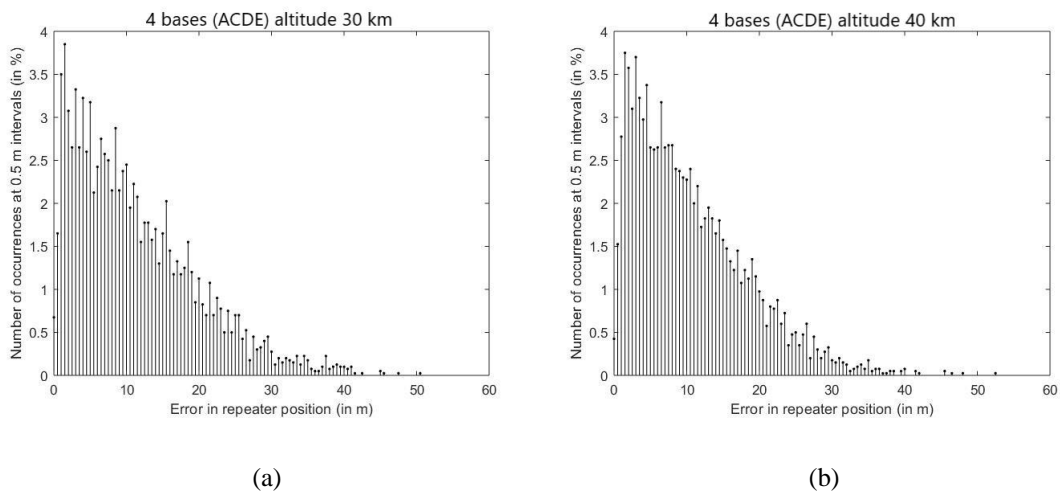


Figura 31: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, C, D e E, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.

Nessa distribuição, os erros na posição da repetidora são consideravelmente maiores que os casos anteriores, onde cerca de 70% das ocorrências aparecem com até 15 metros de erro e 30% acima de 15 metros, para as 2 altitudes. Esta maior quantidade de erro também foi confirmada, pela Tabela 7, em que os PDOPs também foram altos (30 km: 14,21; 40 km: 13,50). De acordo com a Figura 25, as 4 bases formam um quadrilátero com a repetidora

no centro, porém nesta combinação, ACDE, a repetidora não está posicionada próxima ao zênite de nenhuma das bases.

Finalmente, foram feitas 1000 simulações considerando as 5 bases da Tabela 6 e Figura 25, ou seja, a combinação ABCDE, e mostrada na Figura 32.

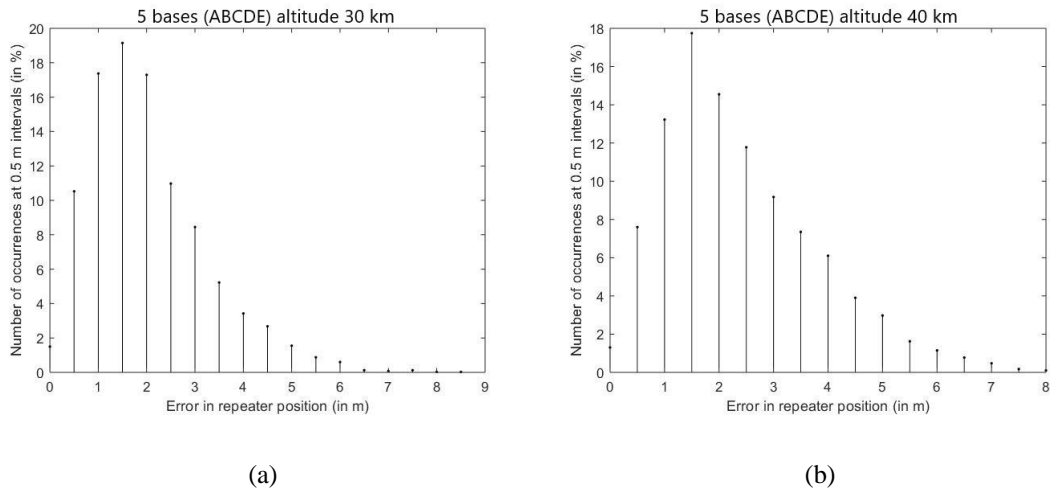


Figura 32: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, B, C, D e E, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.

Neste caso, os erros na posição da repetidora foram baixos, cerca de 85% das ocorrências aparecem com até 3 metros de erro para 30 km e mais de 75% com até 3 metros de erro para 40 km. Os PDOPs também confirmaram a melhor distribuição (30 km: 2,46; 40 km: 2,96). Os 2 fatores que contribuíram para os baixos erros foram a distribuição relativamente simétrica com a repetidora no centro e próxima ao zênite da base B, e o aumento do número de bases de 4 para 5.

Também foram feitas 1000 simulações para os casos mostrados na Tabela 8, e na Figura 26, de 12 bases. A Figura 33 mostra a distribuição de erros considerando essas 12 bases e a repetidora R1, mantendo o padrão de comparação de desvio padrão de 3,3 ns, em (a) para 30 km e (b) para 40 km.

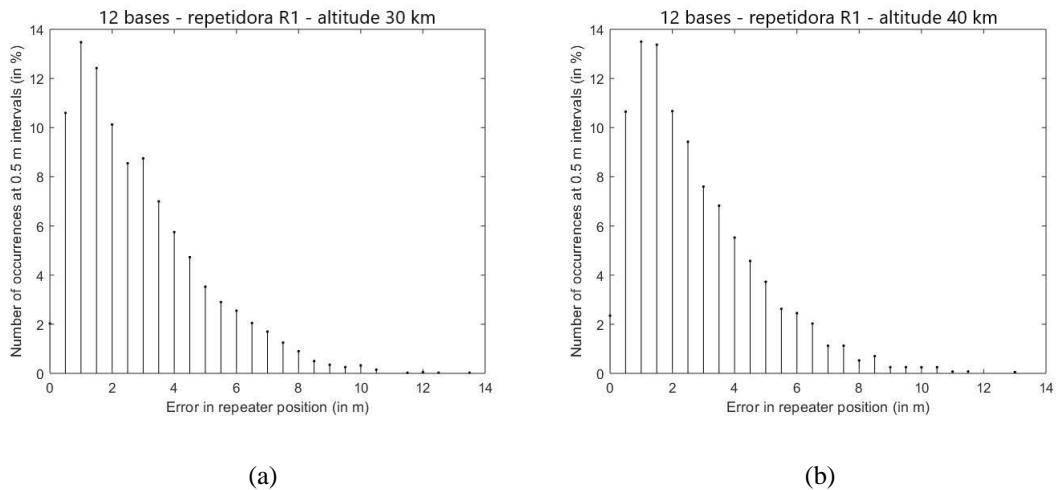


Figura 33: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K e L, a repetidora R1, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.

Nesta distribuição, os erros na posição da repetidora R1 são de mais de 75% das ocorrências até 4 metros de erro para 30 km de altitude e cerca de 80% das ocorrências até 4 metros de erro para 40 km. É possível notar algumas poucas ocorrências de erros superiores a 10 metros nos 2 casos. Na distribuição da Figura 26, a repetidora R1 aparece próxima ao centro da distribuição e próxima ao zênite da base B. Os PDOPs foram baixos e próximos ao ideal (30 km: 1,76; 40 km: 1,96). Em relação aos erros da distribuição de 5 bases, a concentração de erros foi similar, e com a maior quantidade de ocorrências entre 1 e 1,5 metros, apesar das ocorrências acima de 10 metros na distribuição de 12 bases.

As 1000 simulações feitas para as 12 bases e a repetidora R2 podem ser visualizadas na Figura 34.

Neste caso, cerca de 80% das ocorrências estão dentro dos 3 metros de erro para a altitude de 30 km e um pouco menos que 80% dentro dos 3 metros para 40 km. Os PDOPs foram um pouco maiores que o caso anterior, porém dentro do aceitável (30 km: 2,23; 40 km: 2,30). A concentração de erros foi similar a anterior, com as maiores ocorrências entre 1 e 1,5 metros e bem poucas ocorrências acima de 10 metros. O que pode ser inferido é que, com uma quantidade maior de bases, mesmo não estando a repetidora posicionada próximo ao zênite de uma das bases, o erro é relativamente baixo. A posição da repetidora R2 em relação às bases, para o caso da Figura 26 proporcionou erros ligeiramente menores que R1.

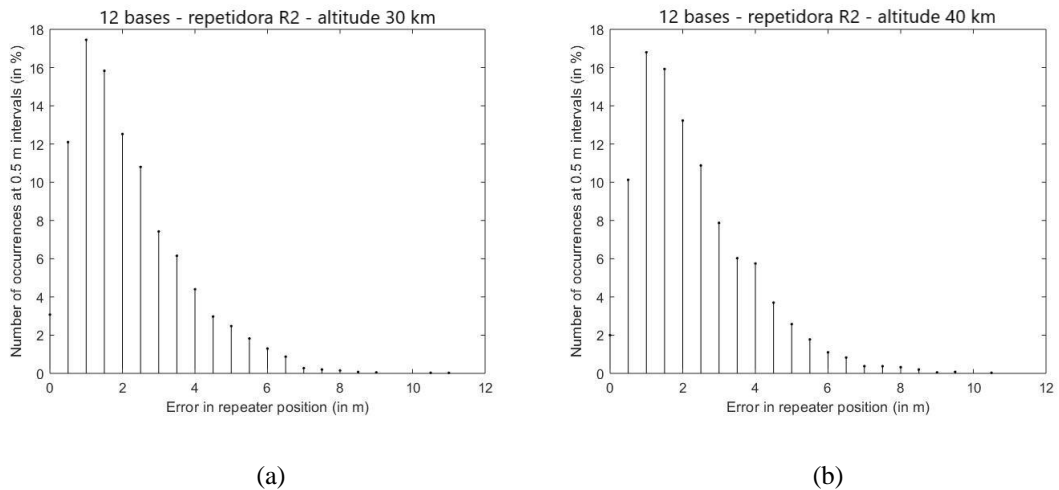


Figura 34: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K e L, a repetidora R2, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.

A Figura 35 mostra as 1000 simulações para os 2 casos referentes à repetidora R3.

Nesta distribuição, a maior parte dos erros são de no máximo 3 metros, pouco mais de 80% para 30 km e 75% para 40 km, e os gráficos são bem similares aos anteriores (com a repetidora R2). Segundo a Tabela 9, os PDOPs também eram comparáveis aos anteriores (30 km: 2,07; 40 km: 2,12), confirmando a boa distribuição das bases em relação à repetidora R3.

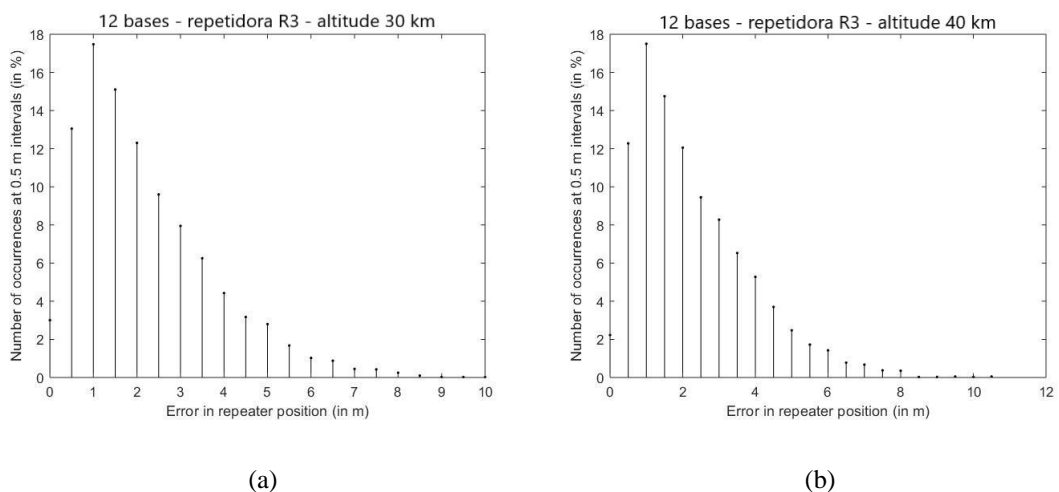


Figura 35: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K e L, a repetidora R3, e altitudes de (a) 30 e (b) 40 km.

E, por último, a Figura 36 mostra as 1000 simulações para os 2 casos referentes à repetidora R4.

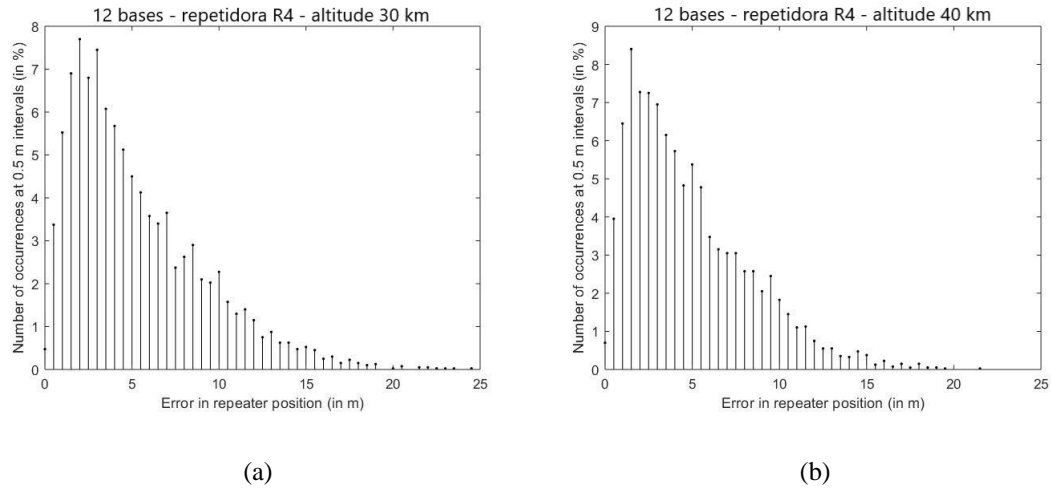


Figura 36: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, considerando as bases, A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K e L, a repetidora R4, e altitudes de de (a) 30 e (b) 40 km.

Na distribuição referente à repetidora R4, certa de 75% das ocorrências possuem até 7 metros de erro e 25% acima disso, para as 2 altitudes. A maior parte das ocorrências estão entre 1,5 e 3 metros. Existem algumas ocorrências acima de 15 metros, dentre elas algumas poucas acima de 20 metros. Os PDOPs para esta distribuição foram baixos (30 km: 2,29; 40 km: 2,35). Este maior erro apresentado, possivelmente, se deve às maiores distâncias entre a repetidora R4 e as bases D, E e K. De qualquer forma, o maior erro encontrado na posição da repetidora, de 25 metros, apesar de ser maior que os demais casos de distribuições, ainda é baixo, tendo em vista as grandes altitudes da 30 e 40 km.

Existem também outras maneiras de diminuir o erro na posição da repetidora, como, por exemplo, aprimorar a sincronização de relógios entre as bases fixas, aperfeiçoar a determinação de atrasos de propagação através de modelos, conhecer antecipadamente o valor do atraso do sinal na repetidora, que ocorre quando o hardware instalado na plataforma é próprio do Geolocal, entre outras. Neste último caso, o valor do atraso não é calculado pelo algoritmo.

Na Figura 37 estão mostrados 4 gráficos referentes às 5 bases da Figura 25 (37a, 37b, 37c, 37d) e 4 gráficos referentes às 12 bases e à repetidora R1 da Figura 26 (37e, 37f, 37g,

37h). Para efeito de comparação, todos os gráficos utilizaram 1000 simulações e a mesma altitude de 30 km.

Nos gráficos 37a e 37e, foi inserida como incerteza uma distribuição gaussiana centrada em zero e desvio padrão de 3,3 ns, ou seja, da mesma forma que os gráficos anteriores. Nos gráficos 37b e 37f, foi utilizado um desvio padrão de 0,5 ns, o mesmo sugerido por KAUFMANN et al (2014). Nos gráficos 37c e 37g, foi inserido manualmente a incerteza na posição da repetidora como sendo 0,0002 ms, para um desvio padrão de 3,3 ns. E, no quarto, a mesma incerteza de 0,0002 ms para um desvio padrão de 0,5 ns. Nestes 2 casos, portanto, o algoritmo não calculou o atraso do sinal na repetidora.

Os gráficos 37a, 37b, 37c, 37d, referentes à 5 bases, mostram que reduzindo o desvio padrão de 3,3 ns para 0,5 ns, o erro na posição da repetidora praticamente não se altera, haja vista que, comparando o gráfico 37a com o 37b e o gráfico 37c com o 37d, a distribuição é quase a mesma. Porém existe uma redução significativa deste erro quando o atraso do sinal na repetidora não é calculado pelo algoritmo, e isso pode ser visualizado pelos gráficos 37c e 37d, quando comparados com os gráficos 37a e 37b.

Os gráficos 37e, 37f, 37g, 37h, referentes à 12 bases, mostram que existe uma redução significativa do erro na posição da repetidora, tanto ao diminuir o desvio padrão para 0,5 ns (37f, 37h) quanto ao introduzir manualmente o atraso do sinal na repetidora (37g, 37h). Vale notar que no gráfico 37h, devido ao erro ser bem pequeno, a quantidade de ocorrências está espaçada em intervalos de 0,1 metros, ao contrário dos demais, onde o espaçamento é de 0,5 metros.

O conhecimento antecipado do atraso do sinal na repetidora influi, portanto, consideravelmente na diminuição do erro na posição da repetidora, como pode ser visto nos 2 casos (5 e 12 bases), e a precisão na sincronização dos relógios das bases e dos modelos de propagação também se tornam importantes a medida que o número de bases aumenta. Essas melhorias devem ser levadas em conta durante um projeto de distribuição de bases do sistema Geolocal.

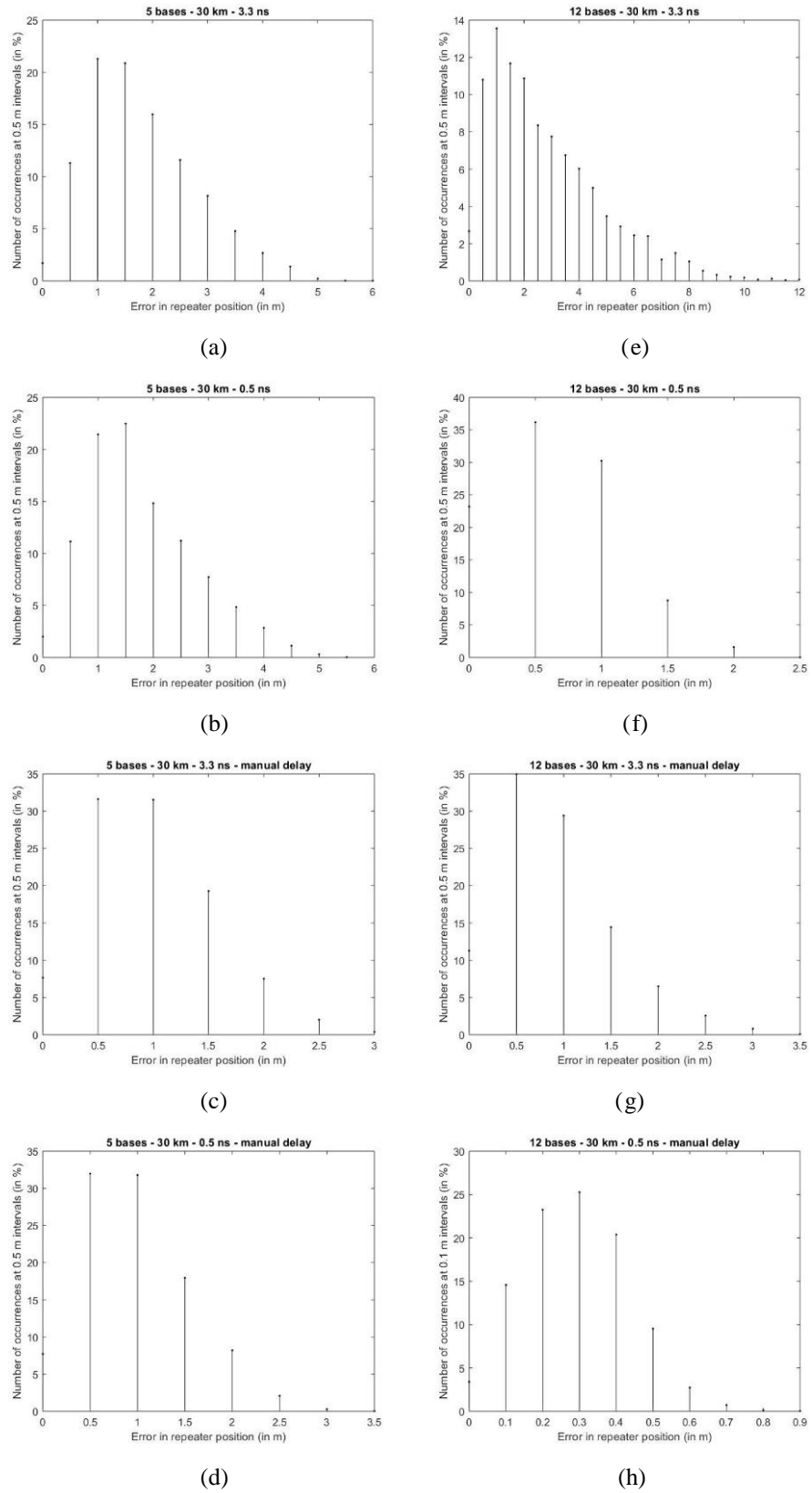


Figura 37: Distribuição dos erros na posição da repetidora para 1000 simulações, altitude de 30, para 5 bases (a, b, c, d) e 12 bases (e, f, g, h).

5.5. A área de cobertura do sistema

A seguinte proposta tem como objetivo quantificar o número de bases fixas e o número de bases de controle fixas para uma determinada área, quer pode ser, por exemplo, o território brasileiro, levando em conta algumas altitudes de repetidoras instaladas em diferentes tipos de plataformas.

A Figura 38 mostra uma hipotética distribuição de bases simetricamente instaladas em uma determinada região, onde os pontos vermelhos e vazados representam as bases de controle e os pontos pretos, as bases fixas que não possuem função de controle, mas somente recepção do sinal.

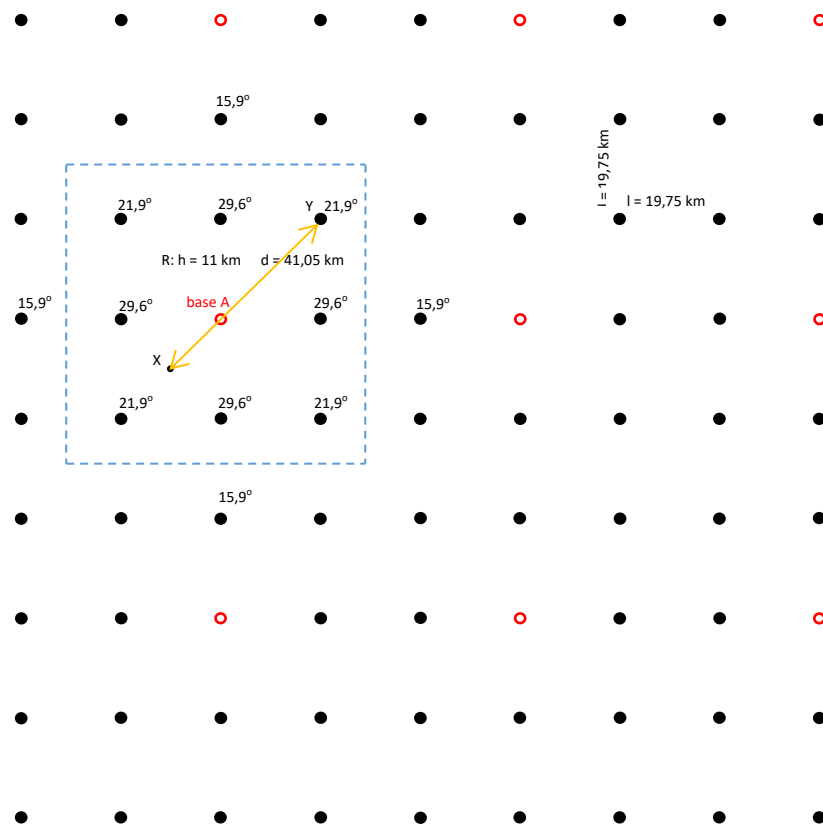


Figura 38: Representação de bases fixas (pontos pretos), bases de controle (pontos vermelhos e vazados), ângulos de elevação e distâncias, de uma possível distribuição de bases em uma certa região, para uma repetidora de altura h (Próprio Autor).

Uma das aplicações vista na subseção 5.1 era a da navegação de aviões comerciais. Para poder definir a quantidade de bases fixas (de controle ou não), e o espaçamento entre as bases, para que seja possível promover a navegação dos aviões dentro do território brasileiro, primeiro é feito uma análise em uma região menor, onde a repetidora instalada em um avião qualquer possa ser vista por pelo menos 12 bases, com ângulo de elevação de pelo menos 15° , em qualquer posição que a repetidora se encontre. Quantidades inferiores a 12 bases não seriam indicadas pois os valores de PDOP e de erro na posição da repetidora poderiam aumentar para níveis acima do aceitável.

Supondo a região definida na Figura 38, onde a repetidora está localizada em uma altitude padrão de cruzeiro de aviões, de 11 km, a base de controle a ser utilizada para transmissão do sinal e cálculo da posição da repetidora será a mais próxima desta repetidora. Por exemplo, para que a base de controle indicada como base A seja a de controle da repetidora em questão, a repetidora deve estar localizada dentro do quadrado tracejado azul. Caso esteja fora do quadrado azul, a repetidora será controlada por uma outra base de controle fora deste quadrado.

Dentro do quadrado tracejado azul, existem 9 bases fixas, porém, dependendo da posição da repetidora, ela poderá ser vista por bases fora deste quadrado. Para determinar o espaçamento ideal entre as bases fixas, primeiro, se supõe que a repetidora se encontre em uma posição onde exista uma menor quantidade de bases para uma mesma distância, que neste caso pode ser o ponto intermediário entre 4 bases vizinhas entre si. Supondo que este ponto seja o ponto X da Figura 38, é necessário que a repetidora seja vista pelo ponto Y para que uma maior quantidade de bases fixas esteja ao alcance visual. A mínima distância entre os pontos X e Y, indicada pela letra d deve ser a que forma um ângulo de elevação de 15° no ponto Y e é calculada pela Equação 48.

$$d = \frac{11 \text{ km}}{\text{tg}(15^\circ)} = 41,05 \text{ km} \quad (48)$$

A distância ideal entre bases será a maior distância possível entre 2 bases fixas, ou seja, é a distância que resulte no valor d encontrado na Equação 48. Denominando a distância ideal entre bases de l , seja um triângulo retângulo cuja hipotenusa vale d , o valor de l pode ser calculado pela Equação 49.

$$d^2 = (1,5 \cdot l)^2 + (1,5 \cdot l)^2 \quad (49)$$

O resultado é dado pela equação 50, onde h é a altura da repetidora.

$$l = 1,76h \quad (50)$$

Para aviões comerciais, com h valendo 11km, a distância ideal entre bases é de 19,35 km, e a distância ideal entre bases de controle é o triplo deste valor: 58,06 km.

Os valores de h , d e l estão identificados na Figura 38 para a hipótese de a repetidora estar na altitude de 11 km. E os ângulos identificados são ângulos hipotéticos, caso a repetidora esteja a 11 km de altitude e no zênite da base A. Neste caso, a repetidora poderá ser vista (respeitando o mínimo de 15° de elevação) por 13 bases. Caso a repetidora esteja no ponto X, ela poderá ser vista por 16 bases. Se estiver em outros locais, a repetidora será vista por valores intermediários, entre 13 e 16 bases, o que resultaria em valores de PDOPs e erros na posição da repetidora dentro do aceitável.

Sabendo a distância ideal entre bases e bases de controle, o próximo passo é determinar a quantidade das mesmas em uma macrorregião. Para cobrir todo o território brasileiro, é possível verificar na Figura 38, que para respeitar o espaçamento calculado na Equação 50, deverá ser fixada uma base de controle a cada 3.369,8 km² e uma base a cada 374,4 km². Como o território brasileiro possui 8.516.000 km² de área, a quantidade de bases de controle será de 2.527 e a quantidade de bases apenas receptoras, será de 20.219.

Estas serão as quantidades mínimas necessárias para que o sistema Geolocal seja utilizado na navegação de aviões comerciais. Porém, próximos aos aeroportos do país, as altitudes das aeronaves diminuam, portanto, o espaçamento entre bases deverá ser menor, e a quantidade de bases e de bases de controle será maior que a calculada.

Supondo agora uma hipótese em que exista uma intenção de se cobrir o território da Antártica com o sistema Geolocal para navegação de balões estratosféricos sobrevoando a 20 km de altitude.

Neste caso, pela Equação 50, a distância entre bases será de 35,2 km e entre bases de controle, de 105,6 km. Isso significa que será necessário fixar uma base a cada 1.239 km², e uma base de controle a cada 11.150 km². Como a área da Antártica é de 14 milhões de km², serão necessárias 1.256 bases de controle, e 10.044 bases de apenas recepção.

Uma outra aplicação do sistema Geolocal é a de navegação de RPAs (*drones*) em um determinado terreno rural. Para uma altura típica de um RPA de 120 metros, a distância entre bases será de 211,2 metros, e entre bases de controle, de 633,6 metros. Será então necessária uma base a cada 44.605 m² e uma base de controle a cada 405.259 m². Supondo a

necessidade de se implantar o Geolocal em um sítio de 20 alqueires, ou seja, 484.000 m², será necessária a fixação de 1 ou 2 bases de controle, e 10 ou 11 bases de apenas recepção. É válido notar que esta quantidade pode ser maior, dependendo do relevo e da geometria do sítio, por isso, é importante fazer uma pesquisa de campo e análise da planta do local antes de iniciar o planejamento de instalação das bases.

Outra aplicação possível é a de navegação de satélites LEO ou de CubeSat. Supondo ser necessária a navegação de CubeSats na órbita de 500 km de altitude, dentro do território brasileiro, a distância entre bases será de 880 km e entre bases de controle, de 2.640 km, ou seja, uma base a cada 774.400 km² e uma base de controle a cada 6.969.600 km². Como a distribuição do território brasileiro é irregular, poderá ser necessária a fixação de 2 ou mais bases de controle, e de pelo menos 22 bases receptivas, ou seja, de pelo menos 2 conjuntos de 12 bases.

6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foi analisado o estado da arte dos sistemas de navegação globais e locais, e mostrado como diversos países têm se empenhado em buscar soluções para garantir a independência, principalmente, dos sistemas GPS e GLONASS utilizados atualmente em todo o mundo. Foram compilados, também, os artigos científicos publicados sobre o sistema brasileiro de georreferenciamento (Geolocal) idealizado pelo Professor Doutor Pierre Kaufmann, desde o início da implantação, quando a proposta era a de se utilizar 3 bases fixas, até as mais recentes publicações com 4 bases fixas; as patentes do sistema e do software; os algoritmos propostos nas publicações; e as simulações do Geolocal com seus devidos resultados. Algumas propostas de melhoria também foram incluídas neste trabalho: a escolha da plataforma mais adequada para determinada aplicação; o uso do modelo de propagação mais compatível com a altitude da repetidora; a diminuição do PDOP e do erro na posição da repetidora através de uma distribuição adequada das bases fixas; e a avaliação da área de cobertura para determinar a distância ideal entre bases para diferentes altitudes da repetidora.

6.1. Conclusão

De acordo com a primeira proposta, onde foram analisadas diferentes plataformas, foi verificado que quando for iniciada a fase de testes do Geolocal para navegação de repetidoras, a plataforma mais adequada será o RPA (*drone*) do tipo leve e de baixa altitude, devido ao baixo custo, à possibilidade de uso de repetidora própria e, com isso, tornando o cálculo da posição da repetidora mais simples e com maior acurácia, ao uso de modelos menos sofisticados de propagação de sinal no meio atmosférico, e à facilidade de controle de sobrevoo. Em seguida, o Geolocal poderá ser útil também na navegação de aviões comerciais, balões estratosféricos, satélites e CubeSats. Para uma seguinte fase do sistema, quando serão feitos georreferenciamentos de alvos na superfície, os aviões comerciais, por contarem com uma grande quantidade já em operação, serão bastante úteis na formação de uma rede aérea de repetidoras, onde também poderão ser incluídos balões e CubeSats.

Quanto à análise do modelo de propagação, pode-se concluir que quando o Geolocal utilizar uma repetidora que esteja abaixo da camada ionosférica, será possível fazer

uso de modelos simples de propagação, como o modelo de planos paralelos proposto neste trabalho, porém, se a repetidora estiver acima desta camada, serão necessárias bases de apoio na superfície que emitam 2 frequências diferentes para o cálculo do TEC, bem como receptores de dupla frequência, e o resultado deverá ser transferido às demais bases, onde o ajuste deverá ser realizado de acordo com o TEC local. Para a determinar a posição da repetidora, serão usados receptores de frequência única. Além disso, a cintilação deverá ser levada em conta, principalmente em regiões próximas à anomalia equatorial, utilizando receptores que suportem o ruído térmico causado pela variação da amplitude do sinal.

Para identificar se uma distribuição de bases fixas, bem como a quantidade de bases vista por uma determinada repetidora é adequada, o cálculo do PDOP servirá como uma importante ferramenta. Se a repetidora for vista por apenas 4 bases, por exemplo, considerando uma elevação mínima de 15° , o valor do PDOP será elevado, exceto se a repetidora estiver no zênite de uma das bases. Como a repetidora, provavelmente não estará próxima ao zênite de uma das bases na maior parte do tempo, será necessário aumentar o número de bases. Simulações mostraram que aumentando a quantidade de bases vistas por uma repetidora, para pelo menos 12 bases, mesmo que a repetidora não esteja próxima ao zênite de alguma das bases, o valor do PDOP estará dentro do aceitável.

Nas simulações também foi possível determinar o erro na posição da repetidora de acordo com diferentes distribuições e quantidades de bases fixas. Pode-se concluir que assim como foi mostrado pelo cálculo de PDOP, para uma quantidade de pelo menos 12 bases, estando ou não a repetidora próxima ao zênite de uma das bases, o erro será relativamente baixo. O mesmo não ocorre para uma quantidade menor de bases.

Tanto o PDOP quanto o erro na posição da repetidora diminuem, a medida que a quantidade de bases aumenta, o que está de acordo com os cálculos apresentados por Cellmer (2004).

Para diminuir este erro ainda mais, será necessário conhecer de antemão o atraso do sinal na repetidora, haja vista que as simulações mostraram que ao desconsiderar o cálculo deste atraso no algoritmo, o erro diminui consideravelmente. Outra forma de diminuir este erro será a de diminuir as incertezas das pseudo-distâncias entre as bases e a repetidora, melhorando a precisão na sincronização dos relógios entre as bases e utilizando um modelo de propagação adequado, pois as simulações mostraram que, para algumas situações, aumentando a quantidade de bases sem diminuir as incertezas, o erro na posição da repetidora piora.

Portanto, o conhecimento prévio do atraso do sinal na repetidora, bem como a diminuição das incertezas para valores inferiores a 3 ns, são importantes para garantir a acurácia do sistema.

E a última proposta sugeriu um método de quantificação de bases fixas e bases fixas de controle, bem como o espaçamento entre as mesmas para uma determinada altitude da repetidora. O Geolocal terá a versatilidade de funcionar localmente em diferentes áreas territoriais, desde uma região rural onde, por exemplo, se queira estabelecer um plantio específico, até um país inteiro, de forma autônoma e independente de outros sistemas de navegação.

6.2. Trabalhos futuros

A partir desta dissertação, será possível continuar a pesquisa em outros trabalhos e estudos. Um dos possíveis trabalhos futuros será o de propor, para uma determinada região, uma configuração de bases e fazer as simulações para uma determinada plataforma que portará uma repetidora. Por exemplo, poderá ser feito um estudo em um terreno real, com uma planta cartográfica em mãos, onde se deseja navegar um RPA. Será necessário obter as especificações exatas do RPA, como altura máxima de sobrevoo, altura padrão e tempo máximo de sobrevoo. A partir da planta do terreno, será necessário distribuir as bases fixas e bases fixas de controle para a navegação da repetidora, determinar o espaçamento ideal entre essas bases e a quantidade ideal. Com esses dados, obter as coordenadas geográficas dessas bases, a partir da planta do terreno e convertê-las para o sistema ECEF a fim de fazer simulações. Estas simulações deverão ser feitas com a repetidora posicionada em diversos pontos do terreno, em diferentes alturas, dentro das especificações do RPA, para que sejam calculados o PDOP e o erro na posição da repetidora em cada ponto.

Outros estudos deverão incluir a legislação atual do local onde se queira implantar o sistema sobre o uso do espaço aéreo para a plataforma que se deseja navegar. Por exemplo, quais as áreas permitidas e proibidas para navegar um RPA ou um balão estratosférico, e quais as alturas permitidas, ou então, quais as órbitas permitidas para um determinado tipo de satélite ou um CubeSat. Também será necessário um estudo das frequências de rádio disponíveis e permitidas para a navegação de uma determinada repetidora. No Brasil, a agência reguladora das telecomunicações, a Agência Nacional de

Telecomunicações (ANATEL), é a responsável pela licença e disponibilização dessas frequências.

Além disso, será necessário pesquisar diversos dispositivos de referência de tempo, como relógios atômicos utilizando oscilações do Césio-133 ou Rubídio-87, cristais controlados do tipo Oscilador de Cristal Forno-Controlado (OCXO - *Oven-Controlled Crystal Oscillator*) e Oscilador de Cristal Compensado por Temperatura (TCXO - *Temperature-Compensated Crystal Oscillator*) e cristais não controlados, e Oscilador Disciplinado de GPS (GPSDO - *GPS disciplined oscillator*) que serão de grande auxílio na diminuição das incertezas, contribuindo para a diminuição do erro da posição na repetidora, e, conseqüentemente, aumentando a acurácia do Geolocal.

Também deverão ser desenvolvidos algoritmos de Processamento Digital de Sinais em C++ e Python, ambiente GRC (*GNU Radio Companion*) para operação em tempo real no kit de Rádio Definido por Software (SDR – *Software-defined Radio*) para modulação e demodulação da camada física do Geolocal. O SDR é um sistema de comunicação em que os componentes que são tipicamente implementados em hardware, como misturadores, filtros, amplificadores, moduladores, demoduladores e detectores, são implementados por meio de software em computadores pessoais ou em sistemas embarcados, ou seja, em uma placa dedicada a esse propósito (SDR-RADIO). Para tanto, deverão ser realizados testes de laboratório e validadas as implementações para futuros testes de campo.

A partir de todas as especificações, quantidades de bases e bases de controles a serem instaladas, tipo de plataforma que portará a repetidora, licenciamento de frequências, dispositivos de referência de tempo e demais softwares e hardwares, será importante fazer uma análise da viabilidade econômica do projeto a ser implementado.

7. REFERÊNCIAS

AEROVIRONMENT. *Puma All Environment RQ-20B*. EUA, 2017. Disponível em <http://www.avinc.com/images/uploads/product_docs/PumaAE_Datasheet_2017_Web_v1.1.pdf>. Acesso em 02 dez. 2018.

CELLMER, S. Theoretical Minimum Value of PDOP Determination. *Technical Sciences*. Polônia, 2004.

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

DANA P. *Global Positioning System Overview: GDOP computation example*, 1996. Disponível em <<https://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gif/gdop.gif>>. Acesso em 11 jun. 2018.

DANA P. *Global Positioning System Overview: GPS Nominal Constellation*, 1998. Disponível em <https://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html>. Acesso em 09 jul. 2018.

DECEA. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. *Circular de Informações Aeronáuticas AIC-N-17: Aeronaves remotamente pilotadas para uso recreativo*, 2018. Disponível em <<https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4696>>. Acesso em 16 mai. 2018.

DJI. Dà-Jiǎng Innovations. *Phantom 4 Pro*. China, 2018. Disponível em <<https://www.dji.com/company?site=brandsite&from=footer>>. Acesso em 02 dez. 2018.

DODSON, B. Launch your own satellite for US\$8000. *New Atlas*, 2012. Disponível em <<https://newatlas.com/tubesat-personal-satellite/22211/>>. Acesso em 02 dez. 2018.

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

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.

GIBBS, Y. Global Hawk Performance and Specifications. NASA, 2014. Disponível em <<https://www.nasa.gov/centers/armstrong/aircraft/GlobalHawk/performance.html>>. Acesso em 02 dez. 2018.

GUIER, W. H; WEIFFENBACH, GC. Genesis of Satellite Navigation. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, v. 19, n. 1, 1998. Disponível em <<http://techdigest.jhuapl.edu/TD/td1901/guier.pdf>>. Acesso em 04 set. 2018.

HAMA, S; TAKAHASHI, Y, KIMURA, K; ITO, H; AMAGAI, J. Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) Project. *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, Japão, v. 57, n. 3/4, 2010.

HOBBS, A. Remotely Piloted Aircraft Systems. *San Jose State University Foundation*, EUA, 2016. Disponível em <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160014467.pdf>>. Acesso em 02 dez. 2018.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H; COLLINS, J. *Global Positioning System: theory and practice*. Austria: Springer-Verlag Wien, 1997.

HONMA, M.; TAMURA, Y; REID, M. J. Tropospheric delay calibrations for VERA. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Japão, v. 60, n. 5, 2008.

HUNT, S. M.; CLOSE, S; COSTER, A. J.; STEVENS, S; SCHUETT, L. M; VARDARO, A. Equatorial atmospheric and ionospheric modeling at Kwajalein missile range. *Lincoln Laboratory Journal*, EUA, v. 12, n. 1, 2000.

IDST. International Defence Security and Technology. Quantum Positioning for Future Accurate Navigation of Submarines and Missiles, 2016. Disponível em <<http://idstch.com/home5/international-defence-security-and-technology/technology/quantum/quantum-positioning-can-be-future-of-submarine-navigation/>>. Acesso em 04 jun 2018.

INSITU-BOEING. *ScanEagle 3*. EUA, 2016. Disponível em <https://www.insitu.com/images/uploads/pdfs/2018_ScanEagle3_Subfolder_051618_lowres.pdf>. Acesso em 02 dez. 2018.

ISRO. Indian Space Research Organization. Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) – NavIC, 2018. Disponível em <<https://www.isro.gov.in/irnss-programme>>. Acesso em 02 dez. 2018.

ITU-R. International Telecommunication Union - Radiocommunication. Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems. Recommendation ITU-R P.531-13. *International Telecommunication Union*. Suíça, 2016. Disponível em <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.531-13-201609-I!!PDF-E.pdf>. Acesso em 02 dez. 2018.

JEFFREY C. *An Introduction to GNSS: GPS, GLONASS, Galileo and other Global Navigation Satellite Systems*. 1 ed. Canadá: Novatel Inc, 2010.

JULIÃO, A. A Guerra do GPS. Isto É, ed. 2111, 2010. Disponível em <http://istoe.com.br/66917_A+GUERRA+DO+GPS/>. Acesso em 02 dez. 2018.

KAUFMANN, P. *Sistema e processo de posicionamento geográfico e especial*. Patente de Invenção PI 03003968-4, depositada 08 out. 2003. Correspondente à *Geographic and space positioning system and process*. International Patent Cooperation Treaty PCT/BR2004/000190, , depositada 04 out. 2004.

KAUFMANN, P.; KAUFMANN, P. L.; PAMBOUKIAN, S. V. D., MORAES, R. V. A New Independent GPS-Free System for Geo-Referencing from Space. *Scientific Research Publishing*. 2014.

KAUFMANN, P.; KAUFMANN, P. L.; PAMBOUKIAN, S. V. D., MORAES, R. V. Signal Transceiver Transit Times and Propagation Delay Corrections for Ranging and Geo-Referencing Applications. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012.

KAUFMANN, P.L.; MORAES, R. V.; KUGA, H. K.; BERALDO, L. A.; MARINS, C. N. M.; KAUFMANN, P. Nonrecursive Algorithm for Remote Geolocation Using Ranging Measurements. *Mathematical Problems in Engineering*, 2006.

KINGRY N.; TOWERS, L; LIU, Y. C.; ZU, Y.; WANG, Y.; STAHELI, B.; KATAGIRI, Y.; COOK, S.; DAI, R. Design, Modeling and Control of a Solar-Powered Quadcopter. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2018. Disponível em <<https://aol.osu.edu/sites/aol.osu.edu/files/uploads/icra2018.pdf>>. Acesso em 02 dez. 2018.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. *Introdução à Geofísica Espacial*. São Paulo: Nova Stella, *Editora da Universidade de São Paulo*: FAPESP, 1991.

KULU, E. Nanosatellite and Cubesat Database, 2018. Disponível em <<http://www.nanosats.eu/>>. Acesso em 02 dez. 2018.

- LANGLEY, R. Dilution of Precision. *GPS World*, 1999. Disponível em <<http://www2.unb.ca/gge/Resources/gpsworld.may99.pdf>>. Acesso em 02 dez. 2018.
- LOU, Y; LIU, Y; SHI, C. Precise Orbit Determination of BeiDou constellation based on BETS and MGEX Network. *Nature Scientific Reports*, n. 4692, 2014. Disponível em <<https://www.nature.com/articles/srep04692>>. Acesso em 02 dez. 2018.
- MARCOVIC, M. Determination of Total Electron Content in the ionosphere using GPS technology. *Geonauka*, Sérvia, v. 2, n. 2, 2014.
- MCPHERRON, S. P.; DIBBLE, H. L. *The Global Positioning System: Mapping Equipment*, McGraw Hill, 2002.
- OGAJA, C. *Applied GPS for Engineers and Project Managers*. 1 ed. EUA: American Society of Civil Engineers, 2011.
- OLIVEIRA, K; MOURA, L. C. M. Os Efeitos da Cintilação Ionosférica na Propagação de Ondas Eletromagnéticas Aplicados nos Sistemas GPS. *ResearchGate*, 2012. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/262297871_Os_efeitos_da_cintilacao_ionosferica_na_propagacao_de_ondas_eletromagneticas_aplicados_nos_sistemas_GPS>. Acesso em 02 dez. 2018.
- OTSUKA, Y.; OGAWA, T.; SAITO, A; TSUGAWA, T.; FUKAO, S.; MIYAZAKI, S. A New Technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan. *Earth Planets Space*, 2002.
- PAMBOUKIAN, S. *Novo processo de georeferenciamento: determinação de posição de transponder remoto e aplicações no posicionamento de alvos e disseminação de tempos*. Software registrado no Brasil, Número do registro: BR5120130006163, data de registro: 07/03/2012, Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial, 2012.
- PROL, F. S.; CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G; MUELA, M. T. A. H. Assessment of a TEC calibration procedure by single frequency PPP. *GPS Solutions*, 2018.
- SDR-RADIO. Software-defined Radio Disponível em <<https://www.sdr-radio.com/>>. Acesso em 15 jan. 2019.

SICKLE, J. GPS and GNSS for Geospatial Professionals On-line Training. PennState, 2018. Disponível em <<https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1771>>. Acesso em 02 dez. 2018.

μ-BLOX. Datum Transformations of GPS Positions. Suíça, 1999. Disponível em <<https://microem.ru/files/2012/08/GPS.G1-X-00006.pdf>>. Acesso em 02 dez. 2018.

VALLEJO, R.; SANGUINO, J.; RODRIGUES, A. Posicionamento com GNSS em cenários de multi-constelação. *Universidade de Lisboa*. Portugal, 2014. Disponível em <https://www.anacom.pt/streaming/RitaVallejo_8congURSI.pdf?contentId=1342425&field=ATTACHED_FILE> Acesso em 02 dez. 2018.

VERIPOS. *Precise Satellite Positioning Services: Orion*. 2018. Disponível em <<https://www.veripos.com/assets/Documents/Data-Sheets/VERIPOS-ORION-Datasheet.pdf>>. Acesso em 22 jan. 2018.

WAKKER, K. F.; AMBROSIUS, A. C.; LEENMAN, H; NOOMEN, R. Navigation and Orbit Computation Aspects of the ESA NAVSAT System Concept. *Acta Astronautica*, v. 15, n. 4. 1987.

XINGXING, L.; ZHANG, X; REN, X.; FRITSCHÉ, M. WICKERT, J.; SCHUH, H. Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. *Nature Scientific Reports*, n.5/8328, 2015. Disponível em <<http://www.nature.com/articles/srep08328>>. Acesso em 02 dez. 2018.

ZELL, H. Types of Ballons. *NASA*, 2017. Disponível em <<https://www.nasa.gov/scientific-balloons/types-of-balloons>>. Acesso em 02 dez. 2018.