

ESTUDO DA TOPOLOGIA DO SISTEMA GEOLOCAL: UM SISTEMA DE NAVEGAÇÃO BRASILEIRO INDEPENDENTE DE GNSS

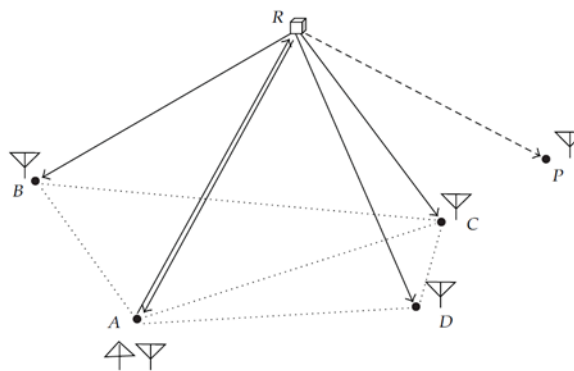
1. INTRODUÇÃO

A importância de um sistema de georreferenciamento para um país não está só na localização precisa de um alvo no espaço, mas em estratégias políticas, econômicas e em serviços essenciais à população. Algumas aplicações que podem ser destacadas são: sincronismo de relógios, navegação de aeronaves e balões, rastreamento de mísseis e bombas inteligentes e determinação da órbita de satélites (KAUFMANN et al, 2014).

Atualmente, o sistema de navegação mais conhecido é o *Global Positioning System* (GPS), dos Estados Unidos da América. Sem a garantia de sua continuidade ou gratuidade, outros países tiveram a iniciativa de desenvolver sistemas próprios, alguns deles são: o GLONASS russo, o Galileo europeu, BeiDou-2 chinês e o QZSS japonês.

Visando essa independência, está em desenvolvimento no Brasil, na Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie com integração a outras instituições, o sistema Geolocal, um sistema de georreferenciamento independente de GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de cobertura local. O sistema consiste em um “GPS invertido” formado por, no mínimo, 4 bases A, B, C, D e 1 alvo P no solo e 1 repetidora R no espaço, segundo a Figura 1.

Figura 1: Representação gráfica do Sistema Geolocal com as 4 bases A, B, C e D fixas no solo, uma repetidora R no espaço e um alvo P em terra



Fonte: Kaufmann, Kaufmann, Pamboukian e Moraes (2012)

As posições das bases A, B, C e D são conhecidas, mas a da repetidora R e do alvo P não são. Dessa forma, é tomada uma das bases como base de controle, neste caso será a base A, já selecionada como base de controle em outros estudos. A base A envia um sinal à repetidora e essa o retransmite às 4 bases e ao alvo. A diferença de tempo entre o envio e a devolução do

sinal pela repetidora e a velocidade de propagação do sinal permitem calcular as distâncias AR, BR, CR, DR e PR. A posição da repetidora é determinada pela triangulação das 4 bases por meio das distâncias calculadas e a localização do alvo P é encontrada através de 4 posições diferentes da repetidora em 4 instantes distintos, ou mesmo através de 4 repetidoras, utilizadas em modelos mais complexos que precisam de mais precisão ou cobertura de área maior (MACHO, 2018).

A repetidora é acoplada em uma plataforma que pode ser um drone, balão estratosférico, avião ou até satélite. A definição da plataforma adequada para cada aplicação dependerá das normas que regem o uso do espaço aéreo para a região e da disposição das bases no terreno, que determina a altitude necessária para evitar altos valores da diluição de precisão (PDOP – *Position Dilution of Precision*) e ângulos inferiores a 15° entre as bases e a repetidora, evitando que o sinal seja afetado por relevos ou construções, que causa imprecisões por conta de atrasos na recepção do sinal da base de controle (MACHO, 2018).

1.1. Problema de pesquisa

O sistema Geolocal vem sendo estudado desde 1997 e conta com seus conceitos e simulações de algoritmos finalizados, além de patentes já concedidas. Em 2019, está se iniciando a implementação prática do sistema, que será realizada em 4 fases. A Fase 1, que será descrita posteriormente neste trabalho, tem como objetivo a criação de protótipos e a definição da instrumentação utilizada pelas bases e repetidoras do sistema, essenciais à fase seguinte na qual serão realizados testes em campo.

Tem-se como problema de pesquisa a definição dos locais e plataformas compatíveis com as condições da geometria do projeto para os testes do sistema Geolocal.

As bases deverão manter linha de visada com a repetidora para que o trajeto do sinal seja correspondente à distância entre elas, resultando em dados mais confiáveis. Os ângulos de elevação entre cada base e a repetidora devem ser de pelo menos 15° , para que seja evitada a interferência do relevo e demais elementos do local. Em função dessas condições e da geometria do sistema, as possíveis plataformas para a repetidora serão indicadas.

A geometria do sistema interfere na qualidade dos resultados, essa precisão é medida através do valor da diluição de precisão, PDOP, que é a combinação entre a precisão vertical (VDOP – *Vertical DOP*) e horizontal (HDOP – *Horizontal DOP*). Quanto menor o PDOP, maior a acurácia do sistema e menos erros na determinação da posição da repetidora e do alvo.

1.2. Justificativa

O projeto Geolocal é dividido em 4 fases: Fase 1 – Pesquisa Aplicada, Fase 2 – Experimentos em Campo, Fase 3 – Navegação da Plataforma da Repetidora e Fase 4 – Geolocalização de Alvos em Solo. A primeira fase já foi aprovada em projeto submetido ao MackPesquisa e sua execução deve ocorrer em 2019/2020. As demais fases serão propostas futuramente para outras agências de fomento.

A Fase 1 do projeto consiste nos estudos da topologia do sistema, planejamentos necessários para a realização dos testes em campo, definição das frequências que serão utilizadas para a transmissão do sinal, desenvolvimento de algoritmos de processamento, estudo das referências de tempo e desenvolvimento dos protótipos das estações (PAMBOUKIAN, 2018).

Este trabalho de Iniciação Científica está contido na fase descrita e tem o intuito de realizar os estudos necessários para definir os locais, indicar as melhores combinações e geometrias do sistema e apontar as plataformas viáveis para a fase de testes, Fase 2, dando seguimento ao projeto, de forma que os resultados dos testes possam ser previstos em simulações e eventuais problemas sejam resolvidos antes de ir à campo.

1.3. Objetivos

O objetivo desta pesquisa é estudar a topologia do sistema Geolocal com foco no planejamento dos testes em campo, estudando e definindo o local, a distribuição das bases, a altitude da repetidora e sua possível plataforma de modo que sejam obtidas as melhores combinações e geometrias resultando em baixos valores de PDOP.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- definir os locais para a realização dos testes do sistema Geolocal;
- analisar o relevo dos locais de teste;
- estudar as normas que regem o uso do espaço aéreo;
- selecionar favoráveis distribuições das bases no terreno;
- identificar as possíveis plataformas para a repetidora;
- simular as diferentes combinações e geometrias em MATLAB;
- analisar o valor do PDOP do modelo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção tem como base os estudos realizados sobre o sistema Geolocal e pesquisas sobre os tópicos determinantes para o cumprimento dos objetivos apresentados.

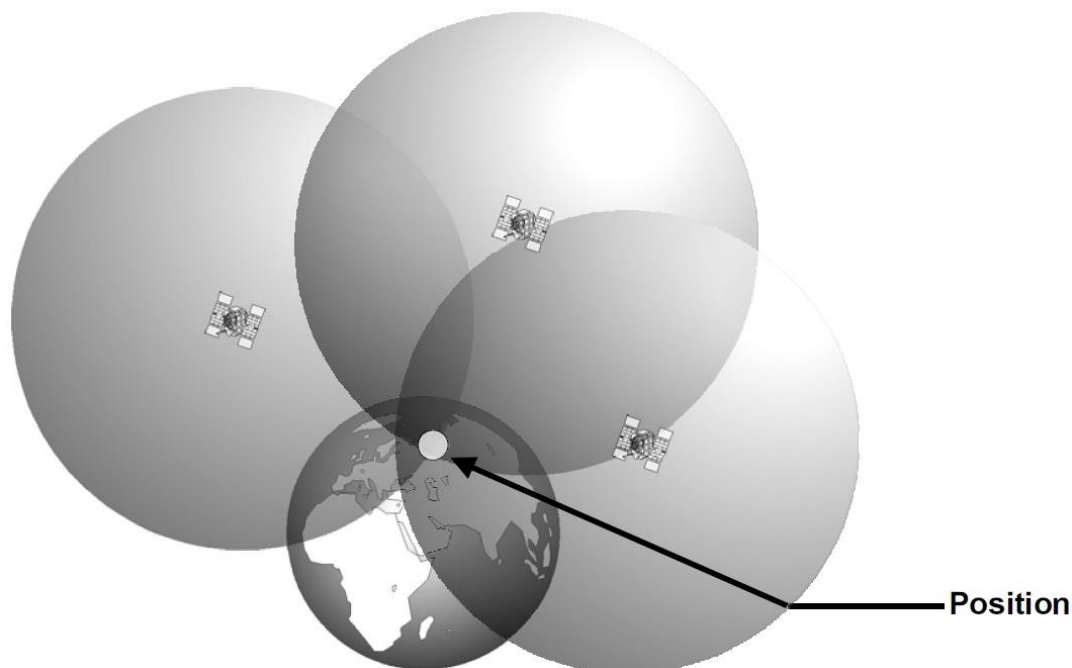
2.1. GNSS (*Global Navigation Satellite System*)

O GNSS teve seu início na década de 1970 com a invenção do GPS pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos. Suas primeiras aplicações eram militares, porém logo seu uso se expandiu para outras áreas sendo empregado em pesquisas e mapeamento. Atualmente o sistema conta com 27 satélites que promovem cobertura global e é amplamente utilizado (JEFFREY, 2012).

Outros sistemas GNSS que podem ser citados são: o GLONASS, criado pela Rússia, com uma constelação de 24 satélites e cobertura global; o Galileo, da União Europeia, com 27 satélites e também cobertura global; o BeiDou-2, da China, que é composto por 5 satélites geostacionários e 5 geossíncronos, fornecendo cobertura local e o QZSS, que está sendo desenvolvido pelo Japão e fornecerá cobertura para o próprio país e para a região da Ásia e Oceania (JEFFREY, 2012).

O princípio dos sistemas de navegação por satélite, não levando em conta atrasos na transmissão do sinal de rádio e demais fatores que influenciam a precisão do sistema, é a localização de um alvo através da posição conhecida de pelo menos 3 satélites e suas distâncias até o alvo (Figura 2).

Figura 2: Localização de alvo por triangulação utilizando 3 satélites



Fonte: Bogovic (2013)

A acurácia dos dados fornecidos é determinada pelo PDOP, relacionado à geometria do sistema. Quanto mais baixo o PDOP, mais precisa é a localização obtida. O valor ideal é próximo de 1.

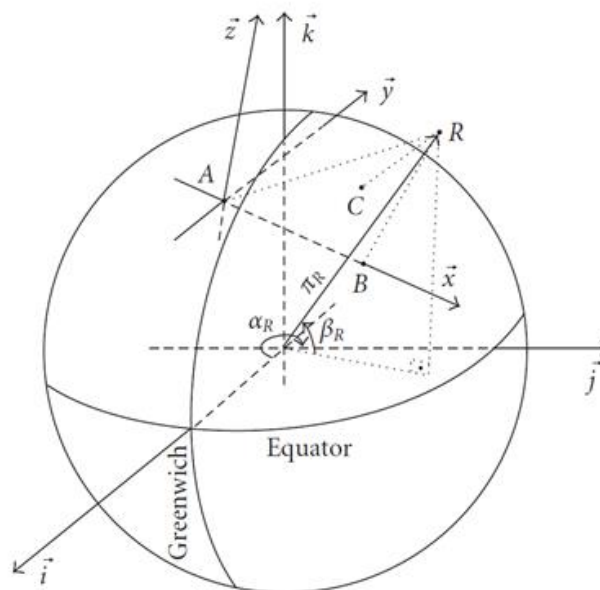
2.2. Projeto Geolocal

O sistema Geolocal foi proposto pelo Prof. Dr. Pierre Kaufmann e teve seus estudos iniciados em 1997 na Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie. O Geolocal já conta com 3 patentes (KAUFMANN, 1997; KAUFMANN, 2003; KAUFMANN; KAUFMANN, 2012) reconhecidas em diversos países e um registro de software (PAMBOUKIAN, 2012). O sistema é considerado inédito por ter suas estações principais em posições fixas no solo, o que facilita sua manutenção e a torna menos dispendiosa, além de aumentar a acurácia no posicionamento (PAMBOUKIAN, 2018).

O principal objetivo do Geolocal é ser utilizado como um *backup* para sistemas GNSS, além disso, um sistema de navegação brasileiro garante a continuidade do sinal e assegura sua utilização em aplicações como navegação, defesa e telecomunicações, de extrema importância para a soberania do país, já que os sistemas utilizados atualmente não têm garantia de continuidade ou gratuidade de seus serviços (PAMBOUKIAN, 2018).

Inicialmente o sistema foi idealizado com 3 bases fixas no solo com posições conhecidas e relógios sincronizados acoplados, além de um transmissor de sinal em uma das bases (base de controle) e uma repetidora no espaço, remetendo a um “GPS invertido”, como mostra a Figura 3.

Figura 3: Representação gráfica do modelo inicial do sistema Geolocal com 3 bases A, B e C fixas no solo e uma repetidora R no espaço



Fonte: Kaufmann, Moraes, Kuga, Beraldo, Marins e Kaufmann (2006)

O modelo mínimo atual é composto por 4 bases fixas no solo, 1 repetidora no espaço e 1 alvo em terra (conforme a Figura 1), que devem estar sincronizados no tempo. Uma base foi

adicionada para determinar o atraso do sinal na repetidora e no meio atmosférico, o que só é possível com, pelo menos, 3 conjuntos de 3 bases (MACHO, 2018).

As posições das bases (A, B, C e D) são conhecidas, porém, as posições da repetidora (R) e do alvo (P) não são, dessa forma, a base de controle, por exemplo, a base A, envia um sinal à repetidora e essa o retransmite às bases, inclusive à base de controle, e ao alvo. Determinados os intervalos de tempo que o sinal leva para chegar em cada base, são calculadas as distâncias entre cada base e a repetidora que tem sua posição encontrada por triangulação. A posição do alvo é determinada por diferentes medições de tempo em diferentes posições da repetidora ou através de 4 repetidoras.

A acurácia do sistema depende de sua geometria e também das medidas de tempo, de forma que o menor atraso do sinal pode resultar em uma imprecisão de metros. Para isso, a velocidade da propagação do sinal, os atrasos provenientes dos instrumentos, cabos e conectores utilizados no hardware dos equipamentos tanto na recepção do sinal, quanto em sua transmissão devem ser calculados e considerados nos algoritmos utilizados (KAUFMANN et al, 2012).

A plataforma da repetidora deve ser escolhida de acordo com a distribuição das bases no solo a fim de obter um valor de PDOP baixo, mantendo um ângulo não inferior a 15° entre cada base e a repetidora para evitar interferências do relevo e outros elementos do local, e de acordo com as normas que regem o espaço aéreo da região. A repetidora pode ser acoplada à um drone, balão estratosférico, avião ou até satélite. O uso de CubeSats em órbitas terrestres baixas já foi considerado em um estudo anterior gerando resultados animadores através de simulações computacionais (PAMBOUKIAN et al, 2016).

2.3. Normas que regem o espaço aéreo

A repetidora é acoplada em uma plataforma (drone, balão estratosférico, avião ou satélite) de acordo com a geometria do sistema, porém, para a realização dos testes em campo, é necessário o estudo das normas que regem o uso do espaço aéreo para verificar as condições do voo exigidas para cada tipo de plataforma e local escolhido.

Para a fase inicial de testes foi cogitado o uso de um drone como plataforma. Drones são RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*), portanto são aeronaves não tripuladas controladas remotamente por uma interface, como controle remoto, computador, telefone móvel e outros (MARINHO, 2015).

Os RPAS não podem sobrevoar áreas de segurança ou infraestruturas críticas, alguns exemplos são: presídios e instalações militares, ou usinas termelétricas e estações de distribuição de

energia, ou seja, os testes do sistema Geolocal, se realizados com a operação de drones, não poderão ser feitos perto desses tipos de áreas. Além disso, a projeção vertical do RPA não pode estar a menos de 30m de construções, veículos, animais, etc. e de concentração de pessoas que não estejam associadas à operação (DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AEREO, 2019).

Os drones são divididos em classes de acordo com seu peso máximo de decolagem. Pertencem à Classe 1 drones com peso máximo de decolagem acima de 150Kg, esses devem ser submetidos à um processo de certificação, registrados no Registro Aeronáutico Brasileiro e identificados com sua nacionalidade e matrícula. Na Classe 2 estão os drones com peso máximo de decolagem acima de 25Kg e abaixo ou igual a 150 Kg, que necessitam aprovação de projeto e também devem ser registrados no Registro Aeronáutico Brasileiro e identificados com sua nacionalidade e matrícula. Por último, a Classe 3 é composta por drones com peso máximo de decolagem abaixo ou igual a 25Kg, que, se operados além da linha de visada visual (BVLOS - *Beyond Visual Line-Of-Sight*) ou acima de 400 pés (aproximadamente 120m), deverão ter um projeto aprovado pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e registrados e identificados como os drones das Classes 1 e 2. Caso operem em altitude igual ou inferior a 400 pés acima da linha do solo e em linha de visada visual (VLOS - *Visual Line-Of-Sight*), não precisarão de projeto autorizado, somente precisarão ser cadastrados na ANAC por meio do Sistema de Aeronaves não Tripuladas (SISANT). Ainda na classe 3, drones com até 250g não precisam ser cadastrados (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, 2017).

Para realizar uma operação de voo é necessário fazer um cadastro no sistema de Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARPAS) e solicitar a autorização do uso do espaço aéreo. Deverão ser informados alguns dados sobre a operação, como o modelo do drone, a data e horário do voo, o local de decolagem e área a ser sobrevoada, devem ser anexadas a homologação do RPA concedida pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e demais documentos e autorizações necessárias previstas pela ANAC de acordo com o modelo do drone e operação pretendida. (DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AEREO, 2019).

Além dos drones, outra plataforma que poderá ser utilizada nos testes é o balão estratosférico, balão livre. Para que o voo esteja de acordo com as regulamentações exigidas, sua operação deve ser autorizada pelo Serviço Regional de Aviação Civil (SERAC) com jurisdição sobre a área. O balão não deve ser operado no caso de a visibilidade horizontal ser menor do que 8km em uma altitude abaixo de 60.000 pés, bem como se durante os primeiros 1.000 pés da subida existirem áreas densamente povoadas de cidade, vila ou vilarejo ou grupo de pessoas reunidas não associadas à operação do balão. Outro caso que impossibilita o voo é se o impacto do balão,

incluindo sua carga, contra o solo pode gerar riscos a pessoas e propriedades não associadas à operação (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, 1994).

Para a operação com balão é necessário informar alguns dados, como a identificação do balão, data e hora estimada do lançamento, a localização do sítio de lançamento, a altitude de cruzeiro, a trajetória prevista, o tempo estimado para atingir a altitude de cruzeiro, a duração total prevista para o voo, entre outros. O operador deve informar a posição do balão a cada, no mínimo, duas horas e uma hora antes do início da descida. O mesmo deve informar ao órgão de controle de tráfego aéreo mais próximo a atual posição geográfica, a altitude, o tempo estimado para a atingir a altitude de 60.000 pés (caso esteja acima dessa altitude), a trajetória em voo estável e o horário e local estimado de impacto com a superfície da Terra (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, 1994).

O uso de aviões comerciais como plataforma para a repetidora também é cogitado, porém, os voos serão independentes do sistema Geolocal e seguirão suas rotas sem alterações. Desta forma, já estarão de acordo com as normas do uso do espaço aéreo, sendo necessário somente tratar com as empresas de aviação sobre acoplar a repetidora às aeronaves.

Satélites artificiais são dispositivos construídos e projetados para operar na órbita terrestre para a realização de missões, sejam elas monitoramento, telecomunicação, navegação, estudos científicos, entre outros. A partir da missão que deve ser desempenhada, são determinados seu tempo de vida, tipo de órbita, funcionalidade, tamanho, e demais características (AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA, 2018).

O sistema geolocal poderá utilizar Nanosatélites em testes futuros (CubeSat), são “pequenos satélites” que têm ciclo de vida reduzido e custo mais acessível se comparado á satélites maiores.

2.4. PDOP (*Position Dilution of Precision*)

Com o intuito de obter medidas mais precisas, a geometria do sistema, ou seja, a distribuição das bases e posições da repetidora e do alvo, deve ser estudada. Para avaliar e determinar as melhores geometrias e resultados é calculado o PDOP (*Position Dilution of Precision*, que é a combinação do HDOP (*Horizontal Dilution of Precision*) e do VDOP (*Vertical Dilution of Precision*).

O cálculo a seguir, ilustrado por Dana (1996), emprega o sistema de coordenadas ECEF (*Earth Centered, Earth Fixed*) e considera modelos com 4 bases (A, B, C e D) e 1 repetidora (R), que é o caso do Sistema Geolocal. Os dados de entrada são as coordenadas x, y e z das bases (Ax, Ay, Az, Bx, By, Bz, Cx, Cy, Cz, Dx, Dy e Dz) e as coordenadas da repetidora (Rx, Ry, Rz). As

distâncias entre as bases e a repetidora (AR, BR, CR e DR) podem ser determinadas utilizando o conjunto de Equações 1.

$$\begin{aligned}
 AR &= \sqrt{(Ax - Rx)^2 + (Ay - Ry)^2 + (Az - Rz)^2} \\
 BR &= \sqrt{(Bx - Rx)^2 + (By - Ry)^2 + (Bz - Rz)^2} \\
 CR &= \sqrt{(Cx - Rx)^2 + (Cy - Ry)^2 + (Cz - Rz)^2} \\
 DR &= \sqrt{(Dx - Rx)^2 + (Dy - Ry)^2 + (Dz - Rz)^2}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Após a determinação das distâncias os valores são empregados na matriz A, Equação 2. Suas 3 primeiras colunas correspondem às componentes x, y e z do versor das distâncias entre cada base e a repetidora, e a última coluna é utilizada para o cálculo do fator de diluição de tempo.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{Ax - Rx}{AR} & \frac{Ay - Ry}{AR} & \frac{Az - Rz}{AR} & -1 \\ \frac{Bx - Rx}{BR} & \frac{By - Ry}{BR} & \frac{Bz - Rz}{BR} & -1 \\ \frac{Cx - Rx}{CR} & \frac{Cy - Ry}{CR} & \frac{Cz - Rz}{CR} & -1 \\ \frac{Dx - Rx}{DR} & \frac{Dy - Ry}{DR} & \frac{Dz - Rz}{DR} & -1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

O próximo passo é o cálculo da matriz P, Equação 3, definida como a matriz inversa da matriz transposta de A multiplicada pela própria matriz A.

$$P = (A^t \cdot A)^{-1} \tag{3}$$

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

Finalmente, o valor do PDOP é determinado utilizando 3 elementos da matriz P, como mostra a Equação 4.

$$PDOP = \sqrt{P_{0,0} + P_{1,1} + P_{2,2}} \tag{4}$$

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

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

As equações apresentadas podem ser programadas em MATLAB podendo gerar, além do cálculo do PDOP, imagens com a posição dos elementos do sistema para melhor interpretação dos dados e eventuais modificações das localizações dos componentes.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este projeto de pesquisa será desenvolvido no Laboratório de Geotecnologias (LABGEO) da Escola de Engenharia, localizado no Prédio 4 do Campus Higienópolis da Universidade Presbiteriana Mackenzie, onde estarão disponíveis os recursos necessários ao desenvolvimento do trabalho, como computadores, softwares de geoprocessamento e outros.

3.1. Revisão da literatura

A revisão da literatura será realizada abrangendo os estudos sobre o sistema Geolocal, os sistemas de GNSS, cálculo e valor do PDOP e as normas que regem o uso do espaço aéreo.

3.2. Análise das normas que regem o uso do espaço aéreo

Serão analisadas as normas que regem o uso do espaço aéreo para a operação de drones, balões livres e satélites por meio da consulta às normas disponibilizadas pela ANAC pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e outras entidades, a fim de realizar os testes e a operação do sistema Geolocal de acordo com as regulamentações exigidas.

3.3. Identificação e análise de possíveis áreas para testes

Serão selecionados os locais para os testes analisando o relevo, através de curvas de nível, a área e elementos pertencentes ao local, por meio imagens de satélite tratadas em um software de geoprocessamento.

3.4. Estudo da geometria do sistema

Após a análise dos locais para os testes, as bases serão distribuídas no terreno em várias configurações. Sabendo as posições das bases em cada modelo e mantendo ângulos entre as

bases e a repetidora não inferiores a 15°, serão estipuladas algumas altitudes da repetidora em relação ao solo, os modelos com melhores geometrias poderão ser definidos nas simulações em MATLAB.

3.5. Simulações em MATLAB

As simulações terão como objetivo o cálculo do PDOP, valor que possibilitará a análise da precisão admitida pela geometria do sistema. Os dados de entrada do programa serão as posições das 4 bases e da repetidora.

Também serão possíveis simulações para encontrar a posição da repetidora a partir das posições das bases e a produção de imagens para melhor visualização da geometria do modelo em simulação.

3.6. Determinação das possíveis plataformas para carregar a repetidora

A definição das possíveis plataformas para a repetidora será realizada com base nos resultados dos tópicos anteriores, ou seja, a partir da identificação das áreas para os testes, bem como o estudo do relevo, a análise das normas que regem o uso do espaço aéreo e a altitude da repetidora em relação ao solo dada a geometria do sistema e os valores de PDOP.

3.7. Análise dos resultados

Após a conclusão das etapas anteriores, serão analisados os resultados das simulações e as possíveis plataformas já definidas para que as melhores combinações sejam selecionadas e testadas em campo. Os modelos escolhidos deverão ter apresentado baixo valor de PDOP e as plataformas precisarão ser adequadas ao local e altitudes necessárias definidas no estudo da geometria do sistema.

4. CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

Atividade	Meses											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Revisão da literatura	x	x	x	x								
Estudo das normas que regem o uso do espaço aéreo		x	x									
Identificação e análise das áreas para os testes			x	x	x							
Estudo da geometria do sistema					x	x	x					
Simulações em MATLAB					x	x	x	x				
Determinação das possíveis plataformas							x	x				
Análise dos resultados							x	x	x	x		
Produção de artigo para Congresso										x	x	
Finalização e entrega do artigo												x

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB). Satélites. abr. 2018. Disponível em: <<http://www.aeb.gov.br/programa-espacial-brasileiro/satelites/>>. Acesso em: 21 mar. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Regras da ANAC para uso de drones entram em vigor**, Brasília, maio 2017. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/noticias/2017/regras-da-anac-para-uso-de-drones-entram-em-vigor/release_drone.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Regulamento Brasileiro de Homologação Aeronáutica (RBHA) nº 101, Portaria nº 626 /DGAC, de 19 de dezembro de 1994. Disponível em:<https://www.apolo11.com/lab/balao_legislacao.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2019.

BOGOVIC, A. **Use of Global Positioning System as Time Reference in Astrophysics Experiments and its Accuracy**. Diploma Thesis. University of Nova Gorica, School of Applied Sciences. 2013.

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.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AEREO (DECEA). **Drone**. Disponível em:

<<https://www.decea.gov.br/drone/>>. Acesso em: 08 mar. 2019.

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

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

KAUFMANN, P. **Sistema e processo de posicionamento geográfico e navegação**. Brasil, Patente de Invenção PI-9101270-8, 1997.

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. Disponível em:

<https://www.mackenzie.br/fileadmin/OLD/62/ARQUIVOS/PUBLIC/user_upload/_imported/fileadmin/LABGEO/Trabalhos/Pierre/3._A_New_Independent_GPS-Free_System_for_Geo-Referencing_from_Space.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2019.

KAUFMANN, P.; KAUFMANN, P. L.; PAMBOUKIAN, S. V. D., MORAES, R. V. **Signal Transceiver Transit Times and Propagation Delay Corrections for Ranging and Georeferencing Applications**. *Hindawi Publishing Corporation*. 2012. Disponível em:

<https://www.mackenzie.br/fileadmin/ARQUIVOS/Public/1-mackenzie/universidade/laboratorios/labgeo/2018/Geolocal/2._Signal_Transceiver_Transit_Times_and_Propagation_Delay_Corrections_for_Ranging_and_Georeferencing_Applications.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2019.

KAUFMANN, P.; KAUFMANN, P.L. **Process and System to Determine Temporal Changes in Retransmission and Propagation of Signals Used to Measure Distances, Synchronize Actuators and Georeference Applications**. Patent of Invention PI03003968-4, Filed in Brazil on 19 March 2012, International PCT, Application Filed on 17 April 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. Disponível em:

<https://www.mackenzie.br/fileadmin/OLD/62/ARQUIVOS/PUBLIC/user_upload/_imported/fileadmin/LABGEO/Trabalhos/Pierre/1._Nonrecursive_algorithm_for_remote_geolocation_using_ranging_measurements.pdf >. Acesso em: 12 mar. 2019.

MACHO, E. P. **Implantação de um Sistema Brasileiro de Georreferenciamento Independente de Outros Sistemas de Navegação por Satélite: O Geolocal**. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais da Universidade Presbiteriana Mackenzie. 2018. Disponível em:

<https://www.mackenzie.br/fileadmin/OLD/62/ARQUIVOS/PUBLIC/user_upload/_imported/fileadmin/LABGEO/Trabalhos/2017/D_-_IMPLANTACAO_DE_UM_SISTEMA_BRASILEIRO_DE_GEOREFERENCIAMENTO_INDEPENDENTE_DE_OUTROS_SISTEMAS_DE_NAVEGACAO_POR_SATELITE_-_O_GEOLOCAL.pdf >. Acesso em: 12 mar. 2019.

MARINHO, D. **Voos de RPAS (drones). Entenda a nova legislação do DECEA!**.

Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Nov. 2015. Disponível em:

<https://www.decea.gov.br/?i=midia-e-informacao&p=pg_noticia&materia=voos-de-rpas-drones-entenda-a-nova-legislacao-do-decea >. Acesso em: 08 mar. 2019.

PAMBOUKIAN, S. V. D. **Implementação das Funções Básicas do Geolocal: um Sistema de Navegação Brasileiro Independente de GNSS**. Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie – CRAAM e Laboratório de Geotecnologias – LABGEO. 2018.

PAMBOUKIAN, S. V. D. **Novo processo de georreferenciamento: determinação de posição de transponder remoto e aplicações no posicionamento de alvos e disseminação de tempos**. Software registrado no Brasil, INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial, BR5120130006163, registro em 07/03/2012.

PAMBOUKIAN, S. V. D.; KAUFMANN, P.; MORAES, R. V.; KAUFMANN, P. L. GNSS-Free Geo-Referencing System Using Multiple LEO Cube- Sat Formation. In: IAA LATIN AMERICAN CUBESAT WORKSHOP, 2., 2016, Florianópolis. Disponível em:

<https://www.mackenzie.br/fileadmin/ARQUIVOS/Public/1-mackenzie/universidade/laboratorios/labgeo/2018/Geolocal/7._GNSS-Free_Geo-Referencing_System_Using_Multiple_LEO_Cubesat_Formation.pdf >. Acesso em: 21 mar. 2019.