

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

Leticia Gatti Friolani (IC) e Sergio Vicente Denser Pamboukian (Orientador)

Apoio: PIBIC CNPq

RESUMO

O Geolocal é um sistema de navegação brasileiro independente de GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que consiste em, no mínimo, 4 bases no solo e uma repetidora no espaço sustentada por uma plataforma. A disposição desses componentes influencia a confiabilidade e acurácia dos dados fornecidos pelo sistema, sendo calculado o valor do PDOP (*Positioning Dilution Of Precision*) para avaliar se a topologia utilizada é favorável ou não. Este trabalho de Iniciação Científica teve como objetivo determinar as melhores geometrias de acordo com os menores coeficientes de PDOP, definir o local e a plataforma para a repetidora a ser utilizada nos testes em campo. Foram criados três softwares em MATLAB, para a obtenção dos resultados necessários. A partir da análise desses dados, foi possível identificar o comportamento do PDOP de acordo com a variação da posição da repetidora em um gráfico de superfície, determinar o espaçamento e raio de cobertura ideais para a altitude de cada plataforma e indicar, como possível experimento em campo, uma simulação no Campus Alphaville da Universidade Presbiteriana Mackenzie, na qual foi obtido um valor de PDOP de 1,99 com 5 bases distribuídas na forma aproximada de um quadrado e uma das bases no centro, perpendicular à repetidora, sendo utilizado como plataforma um drone à altitude de 108m do solo.

Palavras-chave: Geolocal. Sistema de Navegação. PDOP (*Positioning Dilution of Precision*)

ABSTRACT

Geolocal is a Brazilian navigation system independent of GNSS (Global Navigation Satellite System) that consists in at least 4 bases on the ground and a repeater in space supported by a platform. The arrangement of these components influences the reliability and accuracy of the data provided by the system, making it important to calculate the PDOP value (Positioning Dilution Of Precision) to assess whether the topology used is favorable or not. This Scientific Initiation work aimed to determine the best geometries according to the lowest PDOP coefficients, to define the location and the platform for the repeater to be used in the field tests. To obtain the results, three softwares in MATLAB was created, and from the analysis of these data, it was possible to identify the PDOP behavior according to the variation of the repeater position on a surface graph, determine the ideal spacing and coverage radius for the altitude of each platform and indicate, as a possible field experiment, a simulation at the Alphaville Campus of Universidade Presbiteriana Mackenzie, in which a PDOP value of 1.99 was

obtained with 5 bases distributed in the approximate shape of a square and one of the bases in the center, perpendicular to the repeater, being used as a platform a drone at an altitude of 108m from the ground.

Keywords: Geolocal. Navigation System. PDOP (Positioning Dilution of Precision)

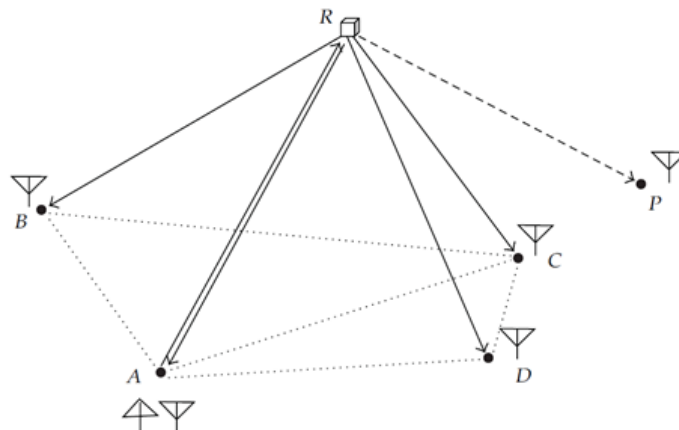
1 INTRODUÇÃO

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 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)

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, a fim de que o sinal não seja afetado por relevos ou construções, que causam imprecisões nos dados obtidos (MACHO, 2018).

O sistema Geolocal vem sendo estudado desde 1997 e conta com seus conceitos e simulações de algoritmos finalizados, além de patentes já concedidas. O projeto atual está 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 ocorrendo nos anos de 2019 e 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, a distribuição das bases, a altitude da repetidora e sua possível plataforma, de modo que sejam obtidas as melhores combinações e geometrias, viabilizando a fase de testes, Fase 2, e 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.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

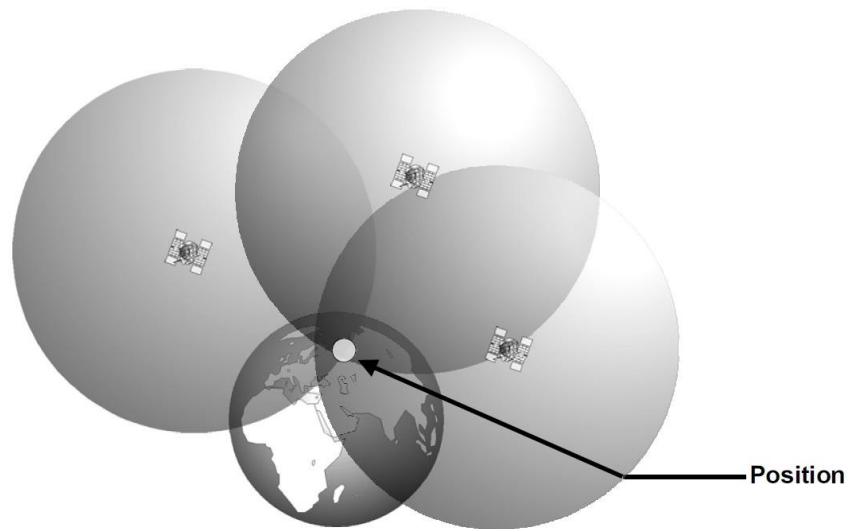
Esta seção tem como base os estudos realizados sobre o sistema Geolocal e outros tópicos determinantes para o cumprimento dos objetivos apresentados.

2.1 GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM)

O GNSS teve seu início na década de 1970 com a invenção do GPS, *Global Positioning System*, 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 promove cobertura global e é amplamente utilizado (JEFFREY, 2015).

Outros sistemas GNSS que podem ser citados são: o GLONASS, criado pela Rússia, com uma cobertura global; o Galileo, da União Europeia, também com cobertura global; o BeiDou, da China, que fornece cobertura local e o QZSS, desenvolvido pelo Japão que fornece cobertura para o próprio país e para a região da Ásia e Oceania (JEFFREY, 2015).

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 trilateração¹ 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.

2.1 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).

O modelo mínimo 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. 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

¹ A trilateração permite a determinação da posição de um objeto através das distâncias entre ele e outros 3 pontos.

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 trilateração. 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 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, ou seja, as incertezas do sistema, devem ser calculadas e consideradas nos algoritmos utilizados (KAUFMANN et al, 2012).

A plataforma da repetidora deve ser escolhida com base nas normas que regem o espaço aéreo da região e de acordo com a geometria do sistema a fim de obter um valor de PDOP baixo, deve-se levar em conta o raio de cobertura, altitude da repetidora e um ângulo de visada entre cada base e a repetidora não inferior a 15° para evitar interferências do relevo e outros elementos do local. 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).

2.2 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 que 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 cativo). É proibida a operação de balões a menos de 500 pés abaixo da base de qualquer nuvem, a mais de 500 pés acima da superfície da Terra, no caso de a visibilidade horizontal ser menor que 4.500 metros ou a uma distância que comprometa a operação de qualquer aeródromo. Exceção ocorre quando a operação ocorrer abaixo do topo de uma estrutura cuja distância até o balão não seja superior a 75m (operação protegida). Operação executada a mais de 150 pés acima da superfície da Terra deve ser notificada ao Serviço Regional de Aviação Civil (SERAC) com jurisdição sobre a área. A notificação deve ser feita pelo operador do balão até 24h antes do evento, apresentando ao SERAC com jurisdição sobre a área o nome e endereço dos proprietários e operadores do balão, tamanho do balão, localização do evento, altura acima da superfície em que o balão será operado, data, hora e duração do evento (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.

Por sua vez, os 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 à satélites maiores.

2.3 PDOP (*POSITION DILUTION OF PRECISION*)

Sabe-se que, para garantir a confiabilidade e acurácia dos dados obtidos, é necessário considerar as incertezas do sistema, e uma delas é gerada pela topologia do sistema, ou seja, pela distribuição das bases e posições da repetidora e do alvo.

O PDOP, resultado da combinação do HDOP (*Horizontal Dilution of Precision*) e do VDOP (*Vertical Dilution of Precision*), é um coeficiente cujo valor está relacionado à geometria do sistema e nos possibilita avaliar a acurácia dos dados gerados, sendo utilizado para determinar o desvio padrão do erro cometido na determinação da posição da repetidora. Este desvio padrão pode ser obtido multiplicando-se o valor do PDOP pelo desvio padrão do erro das medidas de distâncias entre cada base e a repetidora (LANGLEY, 1999). Dessa forma, quanto menor o valor do PDOP maior a acurácia dos dados, sendo ideal um PDOP de valor igual a 1. Para as aplicações desejadas são considerados aceitáveis os valores até 4.

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 vetor das distâncias entre cada base e a repetidora, e a última coluna é utilizada para o cálculo do fator de diluição de tempo.

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

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.

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

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.

$$PDOP = \sqrt{P_{0,0} + P_{1,1} + P_{2,2}} \quad (4)$$

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

3 METODOLOGIA

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

Os estudos foram iniciados com simulações com 4 bases e 1 repetidora, cujas coordenadas, Longitude, Latitude e Altitude (LLA), foram obtidas através do software de geoprocessamento QuantumGIS (QGIS) da Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Esses dados foram utilizados para calcular o PDOP da simulação através de um código em linguagem de programação MATLAB, da MathWorks.

Com o intuito de automatizar as simulações e facilitar a análise dos dados obtidos, foi criado um software que varia apenas a posição da repetidora dentro de uma região pré-

estabelecida e calcula o valor do PDOP para cada posição, apresentando o valor mínimo encontrado e gerando um gráfico de superfície no qual pode-se identificar a área de voo aproveitável, ou seja, a região em que a repetidora deverá permanecer para que os valores de PDOP sejam iguais ou menores que 4. O código foi criado para simulações com 4 bases, mas é facilmente modificado para simulações com uma maior quantidade de bases.

Os dados de entrada são as coordenadas das 4 bases fixas e das Longitudes, Latitudes e Altitudes mínimas e máximas, que delimitam a região da simulação. As coordenadas são obtidas através do QGIS, em LLA, no sistema de referência de coordenadas WGS 84 (EPSG: 4326) e convertidas para o sistema ECEF para o cálculo do PDOP e dos ângulos de visada entre as bases e a repetidora durante a execução do algoritmo.

A posição da repetidora é variada através de 3 laços de repetição, um para cada eixo ordenado, a fim de que se possa analisar todas as posições possíveis considerando um passo pré-estipulado (Δx para longitude, Δy para latitude e Δz para altitude). Para cada posição da repetidora, o software calcula o PDOP e o ângulo de elevação entre as bases, fazendo um teste para que os ângulos não sejam menores que 15° e o PDOP seja o menor para cada vertical de coordenadas (x, y) . As posições da repetidora e seus valores de PDOP são gravados em 4 matrizes (Latitude, Longitude, Altitude e PDOP) para que esses dados possam ser utilizados na plotagem do gráfico de superfície. O software ainda realiza uma comparação para identificar o menor valor de PDOP da região de estudo e a respectiva posição da repetidora.

Os resultados são apresentados na forma de uma lista com os valores de PDOP aceitáveis, as respectivas posições da repetidora, os ângulos de visada (em graus) e o menor valor de PDOP encontrado na simulação.

Por último, o software constrói um gráfico de superfície com a utilização das 4 matrizes ditas anteriormente. Em seus eixos x , y e z estão a Longitude, Latitude e Altitude, respectivamente, sendo o valor do PDOP da coordenada representado por uma escala de cores. O algoritmo simplificado desse software pode ser visto no Algoritmo 1.

A partir do Algoritmo 1, foi possível determinar a melhor posição da repetidora e sua área de voo aproveitável para uma determinada distribuição de bases. Porém, esta simulação não fornece informações suficientes para identificar em quais posições as bases deveriam estar e nem sua quantidade para que o PDOP fosse aceitável, restando ainda diversas combinações possíveis. Para filtrar ainda mais os dados e poder definir a melhor distribuição de bases foi necessário a criação de outro software que testasse todas as combinações de bases para cobrir uma área diretamente relacionada com a altitude da repetidora (Algoritmo 2).

Algoritmo 1 – Região de voo da repetidora de acordo com o valor do PDOP

```

Início
  Obter as coordenadas das bases e limites da região de estudo (LLA)
  Converter as coordenadas para ECEF
  PMIN = 10000000 {Atribuir um valor inicial alto à variável PMIN (PDOP mínimo)}
  Para Latitude (x) variando da mínima até a máxima com passo especificado
    Para Longitude (y) variando da mínima até a máxima com passo especificado
      P1 = 10000000 {Atribuir um valor inicial alto à variável P1 (PDOP mínimo em (x,y))}
      Para Altitude (z) variando da mínima até a máxima com passo especificado
        Re = [x, y, z] {Posição da repetidora a ser analisada nesta iteração}
        Converter as coordenadas de Re para ECEF
        Calcular o PDOP (P)
        Calcular os ângulos de visada entre cada base e a repetidora (ERA, ERB, ERC, ERD)
        Se (os ângulos forem maiores ou iguais a 15°
          e o valor do PDOP (P) for menor do que o anterior (P1))
          Atribuir o valor do PDOP (P) à variável P1 {Armazenar o novo PDOP mínimo para (x,y)}
          ERA1 = ERA; ERB1 = ERB; ERC1 = ERC e ERD1 = ERD {Armazenar ângulos do menor PDOP}
          z1 = z {Armazenar altitude do menor PDOP}
        Fim-se
      Se (P1 < PMIN)
        {Armazenar dados referentes ao PDOP mínimo da região estudada}
        PMIN = P1 {Atualizar PDOP mínimo da região estudada}
        R2 = [x, y, z1] {Armazenar posição da repetidora}
        ERA2 = ERA1; ERB2 = ERB1; ERC2 = ERC1 e ERD2 = ERD1 {Armazenar ângulos}
      Fim-se
    Armazenar as coordenadas de Re nas matrizes Latitude, Longitude e Altitude
    Armazenar P1 na matriz PDOP
    Se (P1 < 4)
      R1 = [x, y, z1];
      Mostrar R1, P1, ERA1, ERB1, ERC1 e ERD1 {Mostrar informações da posição (x,y)}
    Fim-se
  Fim-para
  Fim-para
  Fim-para
  Mostrar R2, PMIN, ERA2, ERB2, ERC2 e ERD2 {Mostrar informações da área analisada}
  Mostrar o gráfico de superfície gerado pelas matrizes Latitude, Longitude, Altitude e PDOP
Fim

```

Fonte: Elaborado pela autora

Algoritmo 2 – PDOP e distribuição das bases de acordo com o espaçamento

```

Início
  Obter as coordenadas da repetidora (em metros)
  Obter os espaçamentos inicial e final entre bases (em metros)
  Para espaçamento variando do mínimo até o máximo com o passo especificado
    Calcular o raio de cobertura
    Calcular o número de bases (n)
    Calcular as coordenadas das bases e atribuir um número para cada uma
    Para c variando de 4 a n com passo 1
      Combinar as bases de c em c
      Calcular a quantidade de combinações geradas (t)
      P1 = 10000000 {Atribuir um valor inicial à variável P1 (PDOP) para comparação}
      Para j variando de 1 até t com passo 1
        Calcular o PDOP (P)
        Criar o vetor vb com a lista de bases usadas na combinação atual
        Se (P < P1) {se o PDOP atual é menor que o mínimo, ele passa a ser o mínimo}
          P1 = P {PDOP mínimo}
          j1 = j {Combinação que gerou PDOP mínimo}
          vb1 = vb {Bases usadas na combinação que gerou PDOP mínimo}
        Fim-se
      Fim-para
    Exibir espaçamento, c, vb1 e P1
  Fim-para
  Fim-para
  Fim

```

Fonte: Elaborado pela autora

No Algoritmo 2, os dados de entrada são a posição da repetidora e os espaçamentos mínimo e máximo para a simulação. O raio de cobertura é definido pela altitude da repetidora e pelo ângulo de visada de 15° entre a repetidora e as bases.

As bases são distribuídas dentro da área determinada pelo raio de cobertura de acordo com um espaçamento que é variado por um laço de repetição em um intervalo e passo pré-definidos. As bases são distribuídas seguindo uma numeração no sentido da esquerda para a direita e de baixo para cima e de forma que a base central seja disposta perpendicularmente à posição fixa da repetidora, já que os menores valores de PDOP são encontrados nas situações em que a repetidora está próxima à perpendicular de uma das bases (FRIOLANI et al, 2019). As coordenadas dessas bases são gravadas em uma matriz e, após a determinação da quantidade total de bases, “n”, elas são combinadas de “c” em “c”, com “c” iniciando em 4 até seu número total, ou seja, se o valor total de bases for igual a 21, teremos todas as combinações das 21 bases de 4 em 4 bases, de 5 em 5 bases, e assim por diante até a quantidade total, no caso, 21 bases.

O software seleciona a combinação que resultou em um menor valor de PDOP para cada espaçamento, sendo retornados o número que identifica cada base da simulação e o valor do PDOP. A partir desses dados é possível identificar, segundo a quantidade de bases, a melhor geometria para a disposição das bases no solo.

A simulação do Algoritmo 2 apresenta a melhor situação, mas não leva em conta que a plataforma da repetidora pode estar em movimento, variando sua posição. Um espaçamento não pode ser considerado ideal apenas por apresentar um bom PDOP no melhor caso, com a repetidora situada perpendicularmente à uma das bases, mas deve resultar em um valor de PDOP aceitável também no caso crítico, em que a repetidora se encontra no ponto mais afastado da perpendicular de qualquer base.

Algoritmo 3 – PDOP e distribuição das bases de acordo com a variação da posição da repetidora

```

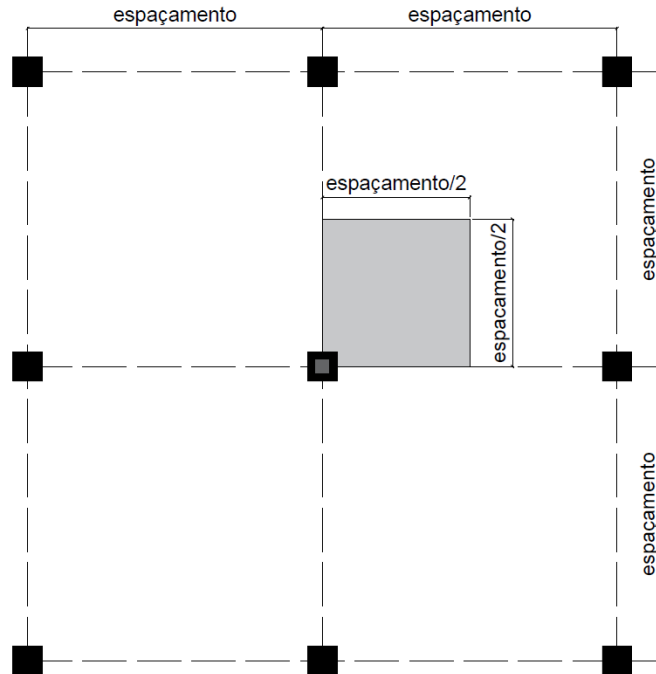
Início
  Obter as coordenadas iniciais da repetidora (x inicial, y inicial e altitude, em metros)
  Obter a distância entre bases (espaçamento, em metros)
  Calcular o raio de cobertura
  Calcular o número de bases (n)
  Calcular as coordenadas das bases e atribuir um número para cada uma
  Para x variando de x inicial até espaçamento/2 com passo espaçamento/10
    Para y variando de y inicial até espaçamento/2 com passo espaçamento/10
      Para c variando de 4 a n com passo 1
        Combinar as bases de c em c
        Calcular a quantidade de combinações geradas (t)
        P1 = 10000000 {Atribuir um valor inicial à variável P1 (PDOP) para comparação}
        Para j variando de 1 até t com passo 1
          Calcular o PDOP (P)
          Criar o vetor vb com a lista de bases usadas na combinação atual
          Se (P < P1) {se o PDOP atual é menor que o mínimo, ele passa a ser o mínimo}
            P1 = P {PDOP mínimo}
            j1 = j {Combinação que gerou PDOP mínimo}
            vb1 = vb {Bases usadas na combinação que gerou PDOP mínimo}
          Fim-se
        Fim-para
      Exibir espaçamento, posição da repetidora, c, vb1 e P1
    Fim-para
  Fim-para
Fim

```

Fonte: Elaborado pela autora

Por este motivo, o Algoritmo 3 faz o cálculo do PDOP e a seleção da melhor combinação, como no Algoritmo 2, porém, o espaçamento é fixo e o que varia é a posição da repetidora. Para o cálculo do raio de cobertura e disposição das bases, adota-se uma posição inicial da repetidora e, após essa etapa, suas coordenadas variam ao longo dos eixos x e y em um passo de $\text{espaçamento}/10$, mantendo a altitude constante, de acordo com a Figura 3 (retângulo cinza claro).

Figura 3 – Variação da posição da repetidora em uma quadrícula



Fonte: Elaborado pela autora

Como resultado tem-se o valor do PDOP referente à cada posição da repetidora e as bases da melhor combinação selecionada pelo software.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

Na simulação com o Algoritmo 2, os dados empregados foram a altitude da repetidora de 120 metros, os espaçamentos mínimo e máximo de 150m e 400m, respectivamente e o passo de 25m. Como resultado, para todos os espaçamentos e quantidades de bases simuladas, o PDOP das disposições das bases selecionadas foram aceitáveis, ou seja, não maiores que 4, como mostra a Tabela 1.

Utilizando os mesmos espaçamentos e combinações da simulação anterior, no Algoritmo 3, as coordenadas iniciais da repetidora, foram (0, 0, 120), em metros, variando sua posição até $(\text{espaçamento}/2, \text{espaçamento}/2, 120)$, que seria o pior caso, tendo como passo o $\text{espaçamento}/10$ nos eixos x e y, mantendo uma altitude constante.

Tabela 1 – PDOP de cada espaçamento entre as bases para repetidora a 120m de altitude

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

Fonte: Elaborado pela autora

O maior espaçamento para a altitude de 120m que resultou em um PDOP aceitável na posição crítica da repetidora e com a menor quantidade de bases necessária, 4 bases, foi 225m, com o PDOP igual a 3,97, porém, por ser muito próximo a 4, o melhor espaçamento escolhido foi o de 200m, que resultou em um PDOP máximo de 2,89, como mostra a Tabela 2. Sendo assim, para o espaçamento de 200m e altitude de 120m tem-se um raio de cobertura de 447,85m, resultando em um PDOP de 1,98, para 4 bases, 1,83 para 5 bases e 1,37 para o total de 21 bases.

Tabela 2 – Melhores e piores valores de PDOP para cada espaçamento com a repetidora a 120m de altitude

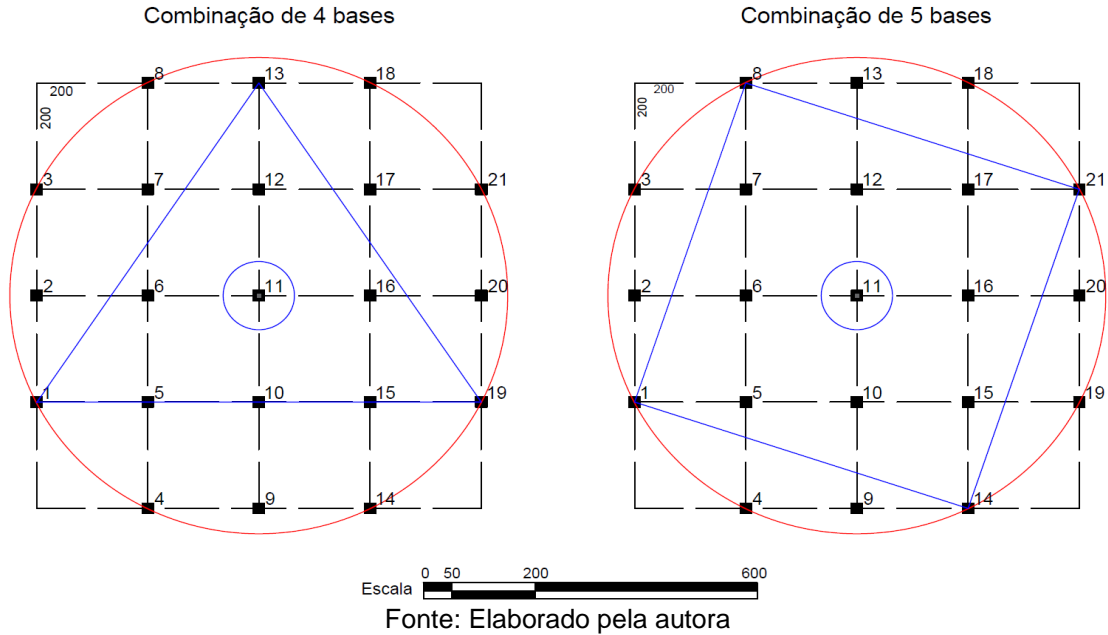
Espaçamento (m)	Melhores valores de PDOP na simulação			Piores valores de PDOP na simulação		
	Quantidade de bases	Posição da repetidora	PDOP	Quantidade de bases	Posição da repetidora	PDOP
150	25	(0, 0, 120)	1.30	4	(75, 75, 120)	2.50
175	21	(0, 0, 120)	1,39	4	(87.5, 87.5, 120)	2.83
200	21	(0, 0, 120)	1.37	4	(100, 100, 120)	2.89
225	9	(0, 0, 120)	1.89	4	(112.5, 112.5, 120)	3.97
250	9	(0, 0, 120)	1.81	4	(125, 125, 120)	4.10
275	9	(0, 0, 120)	1.75	4	(137.5, 137.5, 120)	4.26
300	9	(0, 0, 120)	1.70	4	(150, 150, 120)	4.44
325	5	(0, 0, 120)	2.02	4	(162.5, 163.5, 120)	5.85
350	5	(0, 0, 120)	1.96	4	(175, 175, 120)	6.04
375	5	(0, 0, 120)	1.92	4	(187.5, 187.5, 120)	6.23
400	5	(0, 0, 120)	1.88	4	(200, 200, 120)	6.45

Fonte: Elaborado pela autora

Ainda considerando a altitude de 120m e o espaçamento de 200m podemos analisar a combinação de bases selecionada pelo software. Tem-se na Figura 4 a disposição ideal

para 4 e 5 bases destacada em azul e a área de cobertura delimitada pelo círculo em vermelho.

Figura 4 – Combinação de 4 e 5 bases e área de cobertura



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

Dada a proporcionalidade do sistema (PAMBOUKIAN, 2020), os espaçamentos ideais e raios de cobertura para as demais plataformas estão listadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Espaçamento e altitude ideais para cada plataforma da repetidora

Plataforma da repetidora	Altitude (m)	Espaçamento (m)	Raio de cobertura (m)
Drone ou RPA	120,00	200,00	447,85
Balão cativo	500,00	833,33	1.866,03
CubeSat	600.000,00	1.000.000,00	2.239.230,48
Satélite	20.000.000,00	-	Superior ao raio do planeta
Satélite Geoestacionário	36.000.000,00	-	Superior ao raio do planeta

Fonte: Elaborado pela autora

Ressalta-se que, a partir de uma altitude de, aproximadamente, 2Km, deve ser levado em conta a curvatura da Terra, além de outros fatores, necessitando cálculos mais

específicos, o que faz com que os valores a partir da altitude de CubeSats sejam meras estimativas.

O Algoritmo 1 foi aplicado a um estudo de caso no Campus Alphaville da Universidade Presbiteriana Mackenzie, situado no município de Barueri, com o objetivo de determinar as posições de cada componente do sistema (bases e repetidora) e validar o local para os testes de campo na Fase 2 do projeto. As bases foram distribuídas a partir da geometria ideal para 5 bases indicada no último estudo e suas coordenadas estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Coordenadas das bases

Bases	Coordenadas
A	[-23.48132, -46.83129, 790]
B	[-23.48371, -46.82661, 815]
C	[-23.48579, -46.83397, 760]
D	[-23.48818, -46.82933, 767]
E	[-23.48475, -46.83031, 792]

Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 5 é possível observar a disposição das bases e a região de estudo da simulação, correspondente ao retângulo branco na imagem, delimitada latitudes -23.48980 e -23.47946 e longitudes -46.83791 e -46.82322, com altitudes entre 763m e 2000m.

Figura 5 – Simulação no Campus Alphaville: área de estudo e distribuição das bases

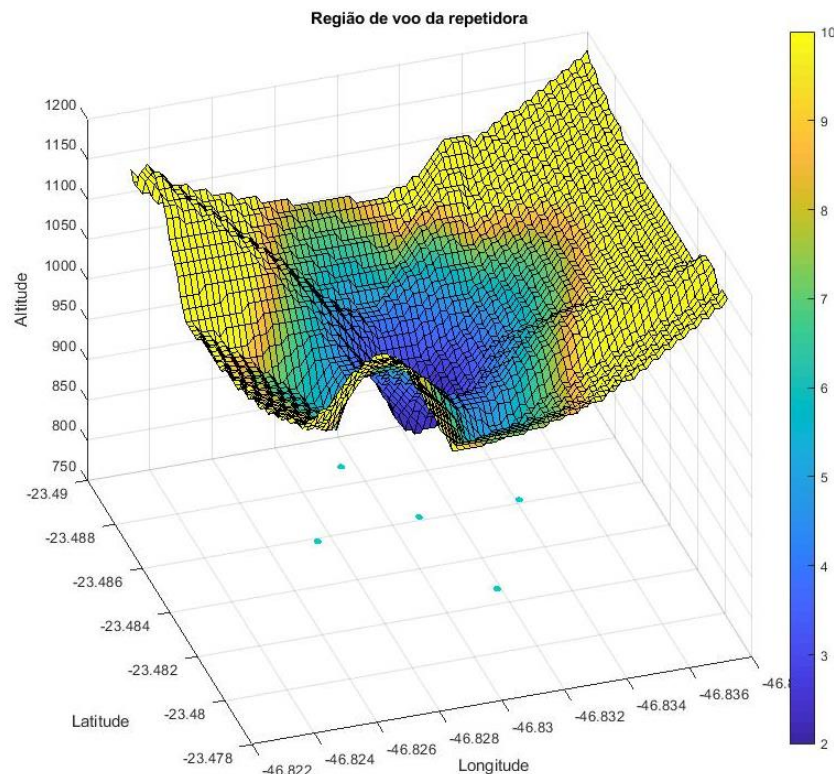


Fonte: Elaborado pela autora

A simulação resultou em um PDOP mínimo de 1,99 com a repetidora na posição (-23.48, -46.83, 923.00). O gráfico de superfície gerado (Figura 6) apresenta, em azul escuro, as regiões de voo da repetidora que apresentam menores valores de PDOP, também pode-

se observar, juntamente com as coordenadas da Base E e a repetidora, que, como esperado, a melhor posição da repetidora foi praticamente na perpendicular da Base E.

Figura 6 – Gráfico de superfície da região de voo da repetidora



Fonte: Elaborado pela autora

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que, com a utilização dos softwares desenvolvidos, foi possível determinar as melhores geometrias para um dado número de bases, a partir da altura da repetidora, e analisar a região de voo aproveitável para a plataforma, de modo que apenas sejam gerados valores aceitáveis de PDOP.

Quanto ao estudo de caso do Campus Alphaville da Universidade Presbiteriana Mackenzie, é válido ressaltar que, o valor do PDOP não foi o mesmo obtido na simulação do algoritmo 2 para 5 bases devido às irregularidades da geometria, como a ausência de equidistância e a diferença de altitude entre as bases.

Ainda sobre o estudo de caso, dada a altitude da repetidora de 108m, em relação à altitude da base mais alta, a plataforma indicada para a realização dos testes é o drone ou RPA, cuja altura máxima é de 120m a partir do ponto de decolagem. A topologia apresentada resulta em um PDOP de 1,99, sendo aceitável às aplicações do sistema Geolocal e de viável execução durante a fase de testes.

Sugere-se como trabalhos futuros a análise do comportamento do PDOP nas situações em que a repetidora está nos limites de sua área de cobertura, bem como um estudo

para a determinação do valor do PDOP, área de cobertura e espaçamento entre as bases para altitudes da repetidora acima de 2Km, nas quais torna-se necessário considerar a curvatura da Terra através de coordenadas esféricas.

6 REFERÊNCIAS

- 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.
- FRIOLANI, L.G.; FULLER, F.A.G.; PAMBOUKIAN; S.V.D. **Análise gráfica do PDOP no sistema Geolocal**. BTSym19 - Brazilian Technology Symposium. Campinas, 2019.
- JEFFREY C. **An Introduction to GNSS: GPS, GLONASS, Galileo and other Global Navigation Satellite Systems**. 2 ed. Canadá: Novatel Inc. 2015.
- 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. **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_Application_s.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2019.
- 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. **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.

LANGLEY, R. D. **Dilution of Precision.** GPS WORLD. 1999.

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.** Proposta de Projeto de Pesquisa submetida ao MackPesquisa. Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie – CRAAM e Laboratório de Geotecnologias – LABGEO. 2018.

PAMBOUKIAN, S. V. D. **Implementação das Funções Básicas do Geolocal: um Sistema de Navegação Brasileiro Independente de GNSS.** Relatório de Projeto de Pesquisa enviado ao MackPesquisa. Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie – CRAAM e Laboratório de Geotecnologias – LABGEO. 2020.

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.

Contatos: friolani.leticia@gmail.com e sergio.pamboukian@mackenzie.br