

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE

**CENTRO DE RÁDIO ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA MACKENZIE – CRAAM
LABORATÓRIO DE GEOTECNOLOGIAS – LABGEO**

PROJETO GEOLOCAL

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

**SÃO PAULO
2018**

RESUMO

Conhecer o posicionamento geográfico, atualmente, faz parte de nosso cotidiano através de celulares e outros dispositivos geolocalizadores. Entretanto, há outras aplicações que vão além de nosso uso pessoal: a navegação de aeronaves e embarcações, a correta posição de estações de prospecção de petróleo, topografia e agricultura automatizada, isto sem mencionar aplicações militares. Estes exemplos ilustram a importância atual desta tecnologia e nos fazem refletir sobre a relação entre o sistema de geolocalização e a soberania de uma Nação. Atualmente alguns países (ou continentes) possuem seus próprios sistemas baseados em satélites (GNSS – *Global Network Satellite System*, termo genérico): GPS americano, GLONASS russo, BEIDOU chinês, GALILEO europeu (para citar os mais abrangentes). No Brasil, apesar da nossa extensão, não temos um sistema próprio, mas há a iniciativa do Geolocal, do Prof. Dr. Pierre Kaufmann e do Instituto Presbiteriano Mackenzie, através do Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie (CRAAM), que propõe uma forma inédita de geolocalização versátil e independente de outros sistemas de navegação, fundamentada em estações-base em terra e repetidoras em pontos elevados (torres, balões, aviões, satélites). O atual desenvolvimento desta pesquisa já demonstrou, através de diversos trabalhos, sua viabilidade teórica. Este projeto propõe estudar as questões necessárias para se projetar e construir o hardware e software a serem utilizados para uma prova de conceito prática.

Palavras chave: Geolocal. GNSS. Sistemas de navegação. Sincronismo remoto de relógios. Georreferenciamento. Rádio definido por software.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	4
1.1 Justificativa da pesquisa.....	5
1.2 Integração entre a Universidade Presbiteriana Mackenzie e outras instituições ...	6
1.3 O sistema Geolocal – Estado da arte	7
1.3.1 Sistema, processo e algoritmo do Geolocal	9
1.3.2 Simulações	15
2 OBJETIVOS	19
3 METODOLOGIA	21
3.1 Estudo da topologia do sistema	21
3.2 Planejamento dos testes de campo	22
3.3 Definição das frequências utilizadas pelo sistema	22
3.4 Desenvolvimento dos algoritmos de processamento	22
3.5 Estudo das referências de tempo	23
3.6 Desenvolvimento dos protótipos das estações	23
4 CONTRIBUIÇÕES IMEDIATAS E/OU FUTURAS PARA A SOCIEDADE	25
5 INFRAESTRUTURA INSTITUCIONAL	26
5.1 Equipe	26
5.1.1 Pesquisador Líder	26
5.1.2 Pesquisador Professor do Mackenzie (PPI ou PPP)	26
5.1.3 Pesquisador Aluno do Mackenzie	26
5.1.4 Pesquisador Voluntário	27
5.2 Laboratórios e infraestrutura	27
5.2.1 Laboratório de TV Digital.....	27
5.2.2 Laboratório de Geotecnologias (LABGEO)	27
5.2.3 Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie (CRAAM)	27
REFERÊNCIAS	28
APÊNDICE A – FASES DE DESENVOLVIMENTO DO GEOLOCAL	30
FASE 1 – Pesquisa Aplicada.....	30
FASE 2 - EXPERIMENTOS EM CAMPO	30
FASE 3 - NAVEGAÇÃO DA PLATAFORMA DA REPETIDORA.....	31
FASE 4 - GEOLOCALIZAÇÃO DE ALVOS EM SOLO.....	31
APÊNDICE B – CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	32

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, diversos sistemas críticos e essenciais como defesa, finanças e telecomunicações dependem de geoposicionamento de alvos e sincronismo de relógios. Na grande maioria das vezes, tais serviços são fornecidos por sistemas de navegação por satélite (GNSS - *Global Navigation Satellite System*). O sistema de navegação mais conhecido é o *Global Positioning System* (GPS) desenvolvido pelos Estados Unidos da América. Outros países também possuem seus próprios sistemas de navegação: o russo GLONASS (*Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), o europeu Galileo, o chinês BeiDou-2, antes conhecido como Compass, o japonês QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) e o indiano NAVIC (*Navigation Indian Constellation*), entre outros.

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

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

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

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

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

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

1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

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

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

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

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

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

- Setor das Finanças que precisa hoje em dia registrar transações com altíssima resolução temporal de um milionésimo de segundo;

- Setor Agrícola na busca por agricultura extensiva e de precisão;
- Aplicações militares;
- Telecomunicações, que precisam de repetidoras sincronizadas;
- Setor Automotivo que num futuro próximo utilizará transporte individual e coletivo autônomos e sem motorista;
- Exploração energética e plataformas objetivando perfurações de precisão;
- Setor Aeronáutico, na busca das melhores rotas comerciais otimizando a capacidade do espaço aéreo;
- Setor Aeroespacial no o controle de órbitas de satélites;
- Distribuição de Energia, linhas de transmissão que precisam de instalações com o tempo sincronizado.

A continuidade do desenvolvimento do sistema Geolocal necessita de diversos estudos, tanto teóricos quanto práticos. O projeto não teve, até agora, a necessidade de fomento por trabalhar exclusivamente com modelagem matemática e simulações computacionais. Para os próximos trabalhos, entretanto, um aporte de capital se faz necessário para o custeio de diversas despesas como equipamento de laboratório para elaboração de protótipos e bolsas para alunos de graduação e pós-graduação. Isso está melhor detalhado na Metodologia deste projeto.

1.2 INTEGRAÇÃO ENTRE A UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE E OUTRAS INSTITUIÇÕES

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

- Pedro Levit Kaufmann do ICT/UNIFESP (Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de São Paulo);
- Rodolpho Vilhena de Moraes do ICT/UNIFESP (Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de São Paulo);
- Emília Correia do MCT/INPE (Ministério da Ciência e Tecnologia / Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais);
- Joaquim Eduardo Rezende Costa do EMBRACE/INPE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial / Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais);
- Marcelo Bender Perotoni da UFABC (Universidade Federal do ABC);

- Carlos Augusto Morales Rodriguez do IAG/USP (Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo);
- além de diversos setores da Universidade Presbiteriana Mackenzie: CRAAM (Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie), PPGCAGE (Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais), LABGEO (Laboratório de Geotecnologias) e TV Digital.

Este assunto tem sido alvo de pesquisas do grupo “Geotecnologias”, cadastrado no diretório de pesquisa do CNPq e certificado pela Universidade Presbiteriana Mackenzie, na linha de pesquisa “Sistemas de Posicionamento Geográfico”. Acesso: <http://dgp.cnpq.br/dgp/espelhogrupo/3436700306426550>.

O projeto “Novo Sistema de Georreferenciamento”, que pesquisa o Geolocal, está cadastrado como projeto de pesquisa no currículo Lattes do líder deste projeto desde 2012.

1.3 O SISTEMA GEOLOCAL – ESTADO DA ARTE

O Geolocal pode ser visto como um “GPS invertido” e baseia-se na determinação dos tempos de propagação e de atrasos de sinais entre um transceptor e receptores, localizados na Terra, e uma repetidora no espaço, como ilustra a Figura 1.

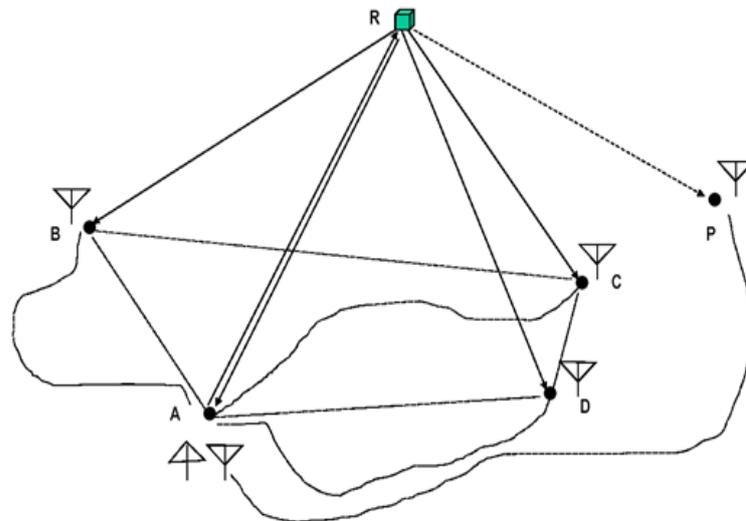


Figura 1 - Representação do sistema Geolocal com quatro bases fixas A, B, C e D, uma repetidora no espaço R e um alvo em terra P (KAUFMANN et al, 2014, p. 3).

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

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

Para entender o funcionamento do Geolocal são necessários alguns conhecimentos básicos de propagação de sinais. Distâncias, por exemplo, podem ser determinadas através do eco de um sinal transmitido em um meio de propagação de velocidade conhecida, como ilustrado na Figura 2.

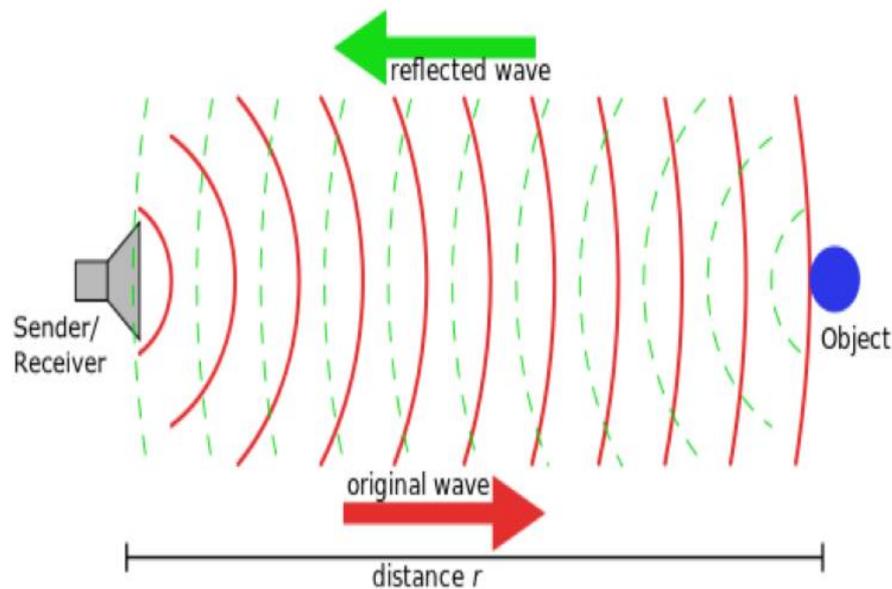


Figura 2 - Medida de distâncias através da reflexão de ondas (ALTAMIRANO, 2016).

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

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

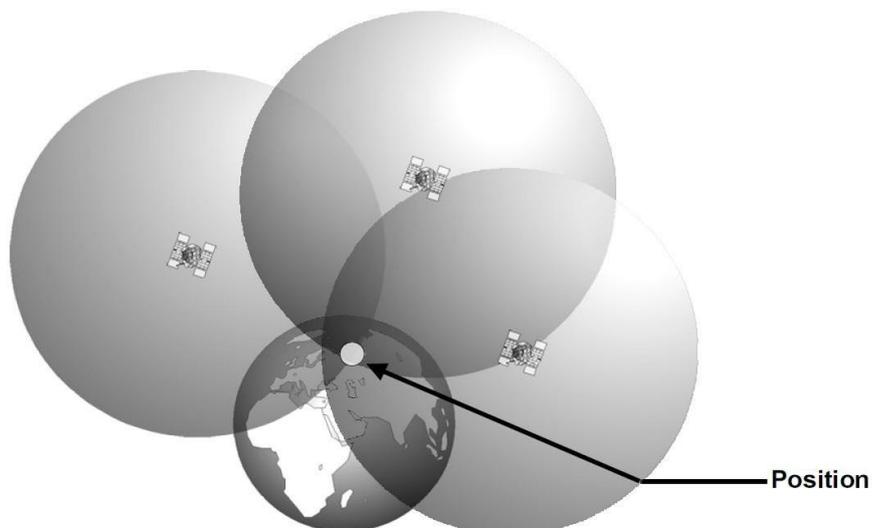


Figura 3 - Localização de alvos remotos (BOGOVIC, 2013).

Como vimos, a distância entre um alvo (receptor) e um emissor pode ser calculada através do tempo de propagação do sinal. Desta forma, o alvo deve estar localizado sobre a superfície de uma esfera imaginária que tem como centro o emissor e como raio a distância entre o emissor e o alvo. Para cada emissor teremos uma esfera sobre a qual deve estar localizado o alvo. A intersecção de duas esferas gera um círculo sobre o qual deve estar localizado o alvo. A intersecção deste círculo com uma terceira esfera produz dois pontos onde pode estar o alvo. A intersecção de uma quarta esfera (que pode ser a própria superfície terrestre) indica qual destes dois pontos é a verdadeira localização do alvo.

Este é o princípio utilizado pela maioria dos atuais sistemas de navegação por satélite e também pelo Geolocal.

1.3.1 Sistema, processo e algoritmo do Geolocal

Utilizando os conceitos anteriores, fica claro que é possível no Geolocal localizar uma repetidora (R) a partir da triangulação em relação às quatro bases fixas em terra (A, B, C e D) como visto na Figura 1. Da mesma forma, um alvo (P) em terra (ou no espaço) pode ser localizado através da triangulação de sinais recebidos por quatro repetidoras (R_1 , R_2 , R_3 e R_4) ou por uma mesma repetidora em quatro instantes distintos, como mostra a Figura 4.

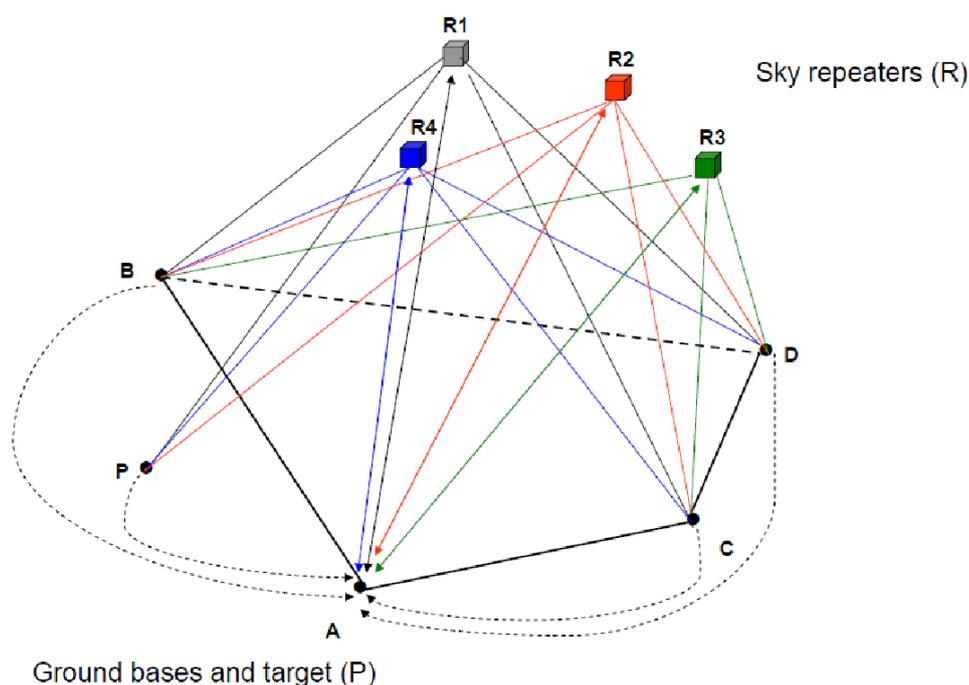


Figura 4 - Representação do sistema Geolocal com quatro bases fixas (A, B, C e D), quatro repetidoras no espaço (R1, R2, R3 e R4) e um alvo (P) em terra (PAMBOUKIAN et al., 2016).

Neste sistema, um sinal codificado é transmitido pela base A, retransmitido pelas repetidoras no espaço (R1, R2, R3, R4) e recebido pelas quatro bases de referência (A, B, C, D) e pelo alvo (P), produzindo cinco medidas de *ranging* para cada repetidora, que permitem calcular as distâncias AR, BR, CR, DR e PR em relação a cada repetidora. As diferenças de tempo dos relógios medidas nas bases e no alvo são enviadas, por algum meio, para um centro de processamento, que pode ser a base A (linhas tracejadas na Figura 4).

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

- tempo de trânsito nos equipamentos, antenas, cabos e conectores dos módulos de transmissão e recepção (estes atrasos podem ser medidos/calculados);
- tempo de trânsito nos equipamentos, antenas, cabos e conectores da repetidora (este atraso não tem como ser medido em alguns tipos de repetidora);

- variação da velocidade de propagação no meio (*path delay*) (este atraso pode ser estimado por modelos).

Esses atrasos são de fundamental importância considerando que 10 nanossegundos correspondem a um erro de medição de 3 metros.

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

$$d = c \cdot \frac{\tau_{atm}}{\text{sen } Z}$$

onde:

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

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

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

Onde:

- **TEC** é o conteúdo eletrônico total (elétrons/m²);
- **f** é a frequência de transmissão (MHz).

S é o fator de inclinação para os respectivos ângulos de elevação *E* em que a repetidora é observada pelas bases e pelo alvo (KLOBUCHAR, 1987; OTSUKA *et al.*, 2002):

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

Onde:

- **R** é o raio da Terra;
- **h** é a altitude de referência da ionosfera.

S varia de 1 a 2.5 para ângulos de elevação de 90 a 15 graus.

No sistema Geolocal representado na Figura 4, as distâncias podem ser determinadas pelas seguintes equações:

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

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

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

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

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

onde:

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

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

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

Conhecidas:

- δAt – delay de transmissão na base A;
- $\delta Ar, \delta Br, \delta Cr, \delta Dr$ e δPr – delay de recepção nas bases e no alvo;
- $\Delta tA, \Delta tB, \Delta tC, \Delta tD$ e ΔtP – diferença de tempo nas bases e no alvo.

Desconhecidas:

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

Desta forma, o algoritmo para solução destas equações deve ser iterativo e trabalhar com a minimização de erros. O fluxograma completo é exibido na Figura 5 e o algoritmo pode ser resumido em:

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

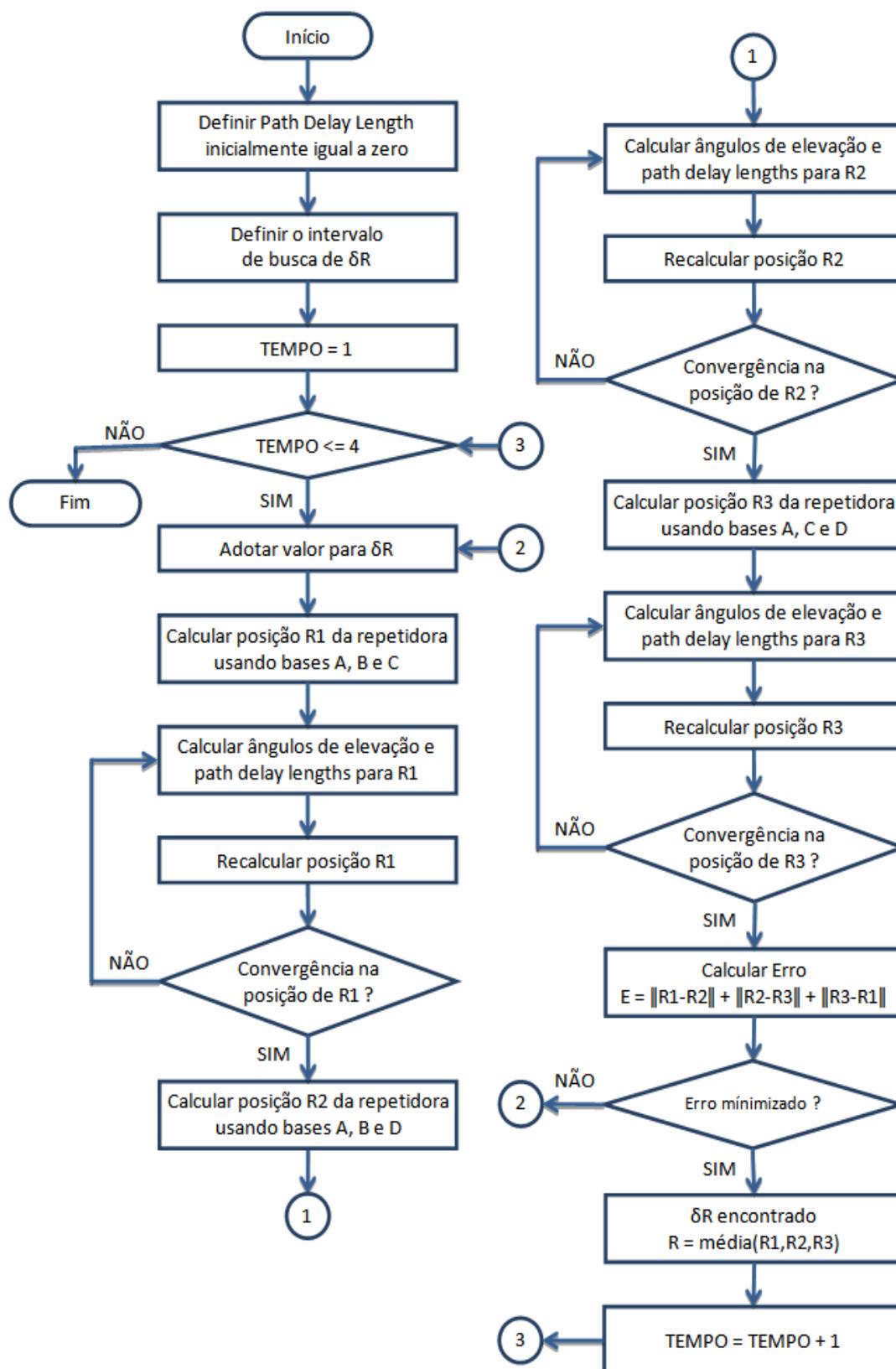


Figura 5 - Fluxograma para o cálculo do tempo de trânsito na repetidora, *path delays* e posição da repetidora (KAUFMANN et al., 2012).

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

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

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

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

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

1.3.2 Simulações

Com o objetivo de demonstrar o algoritmo e o desempenho do sistema Geolocal, foram desenvolvidas diversas simulações computacionais em MATLAB.

A Figura 6 ilustra a geometria do sistema em um dos muitos cenários estudados, com quatro bases localizadas nas cidades de São Paulo, Itú, Campinas e Bragança Paulista, uma repetidora voando sobre Jundiaí em trajetória circular a uma altitude aproximada de 6km e um alvo em Atibaia.

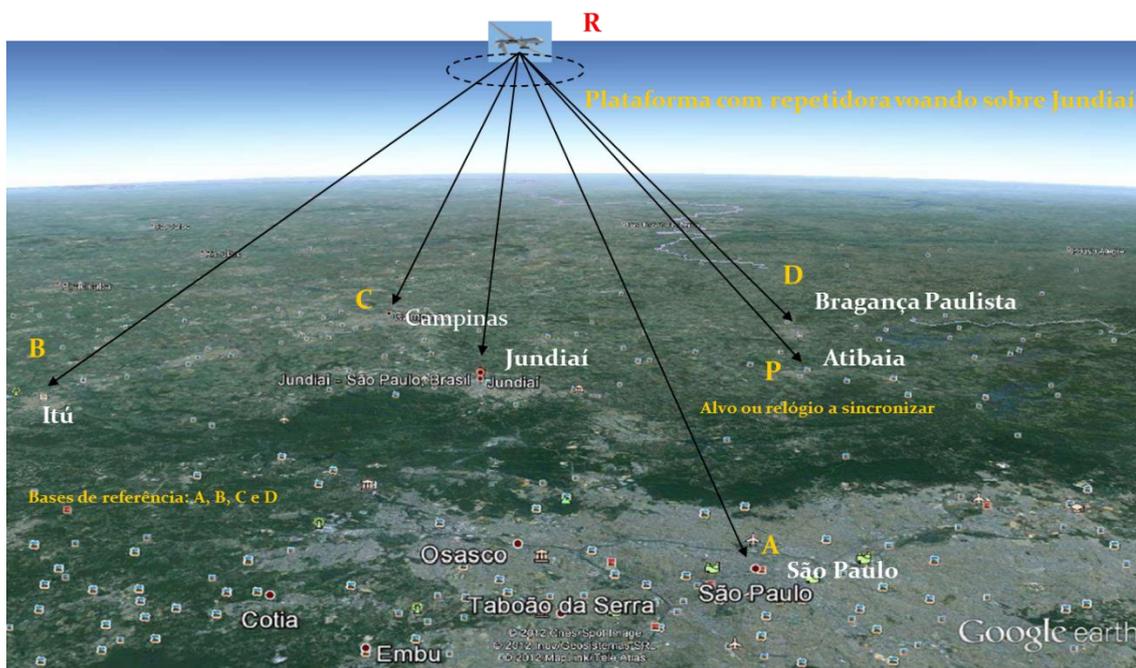


Figura 6 - Cenário da simulação (KAUFMANN et al., 2014).

A Tabela 1 mostra as coordenadas de cada base, repetidora e alvo.

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

Localização das Bases e do Alvo

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

Localização da Repetidora

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

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

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

Localização da repetidora			
Cidade – Posição	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Jundiaí – Posição 1	-23° 11' 10.99999999973079"	-46° 53' 03.00000000022578"	5761.0000008372590
Jundiaí – Posição 2	-23° 11' 10.99999999990985"	-46° 59' 03.00000000035880"	6000.0000002672896
Jundiaí – Posição 3	-23° 15' 11.00000000065677"	-46° 53' 03.00000000022578"	6200.0000010607764
Jundiaí – Posição 4	-23° 15' 11.00000000052887"	-46° 59' 03.00000000110060"	6800.0000007525086

Localização do Alvo			
Cidade	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Atibaia	-23° 07' 00.99999999971089"	-46° 33' 00.99999999755028"	803.00000067241490

Na prática, podem ocorrer algumas incertezas relacionadas a erros no sincronismo de relógios ou falha na determinação dos atrasos, entre outras coisas. Desta forma, foram inseridos na simulação incertezas nos tempos de propagação com Distribuição Normal e Desvio Padrão $\pm 0,5$ ns. As Figuras 7, 8 e 9 ilustram os resultados obtidos em 1000 simulações com atrasos gerados de forma aleatória.

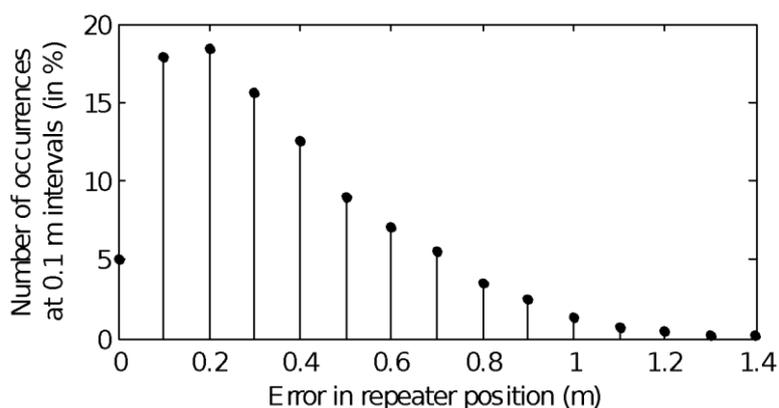


Figura 7 - Erro no posicionamento da repetidora (KAUFMANN et al., 2012).

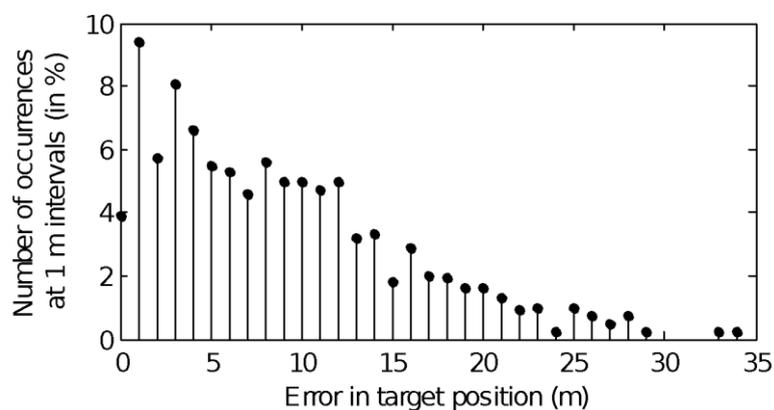


Figura 8 - Erro no posicionamento do alvo (KAUFMANN et al., 2012).

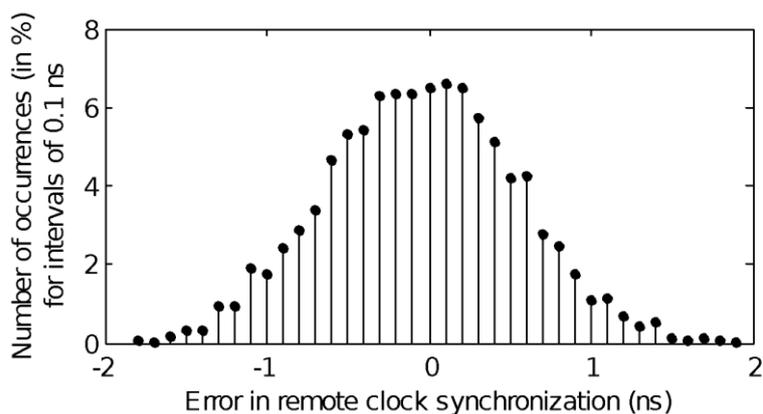


Figura 9 - Erro no sincronismo de relógio (KAUFMANN et al., 2012).

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

2 OBJETIVOS

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

Por ser extenso em abrangência e tempo, a implementação do Geolocal foi dividida em 4 fases (relacionadas no Apêndice A para referência), onde este projeto corresponde à **Fase 1**. As demais fases serão desenvolvidas em projetos futuros que poderão ser submetidos ao MackPesquisa ou a outras agências de fomento.

O objetivo deste projeto consiste nos preparativos necessários para a realização do primeiro experimento em campo e prova de conceito, realizado na Fase 2. Envolve diversas atividades teóricas e práticas que correrão em paralelo como o estudo dos locais de teste, a quantidade de estações necessárias, as frequências utilizadas pelos equipamentos e a construção dos protótipos.

Alguns destes estudos já estão em andamento por alunos de mestrado e doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais.

Objetivos desenvolvidos em atividades teóricas:

- definir as características e funções dos elementos do Geolocal: bases, repetidoras e centros de controle operacional;
- estudar a topologia do sistema: quantidade de bases e repetidoras, área de cobertura, altura da plataforma que carrega a repetidora; geometria do sistema, etc.;
- planejar testes em campo para as demais fases do projeto;
- estudar os modelos que estimam os atrasos no meio de propagação, verificando qual proporciona melhor acurácia para o sistema;
- definir as frequências de transmissão que serão utilizadas;
- avaliar os possíveis modelos de antenas, identificando os prós e contras de cada modelo analisado;
- estimar a acurácia do sistema em diversas configurações, levando em conta a altitude da repetidora e os modelos de estimativa de atrasos (*delays*) na propagação do sinal;

- identificar a influência das diferentes camadas da atmosfera na propagação de sinais em diferentes frequências.

Objetivos desenvolvidos em atividades práticas:

- criar mecanismos que possam determinar os tempos de propagação com a acurácia desejada (inferiores a 10^{-9} s);
- definir os dados que serão codificados no sinal propagado e o protocolo de transmissão;
- definir como implementar fisicamente os modelos que estimam os atrasos no meio de propagação;
- definir o funcionamento de uma ou mais centrais de controle que irão gerenciar todo o sistema;
- criar protótipos das estações e realizar testes realísticos.

Ao concluir esta fase, teremos:

- as definições e especificações técnicas do sistema;
- as especificações dos testes de campo;
- hardware e software das estações testados em bancada.

Devido à complexidade e longa duração das atividades a serem desenvolvidas para atingir os objetivos deste projeto, seria de extrema importância que o mesmo:

- tivesse a duração de 24 (vinte e quatro) meses, ao invés de 12 (doze) meses, que é a duração padrão dos projetos MackPesquisa;
- contasse com 5 bolsas para alunos de graduação e de pós-graduação, ao invés de 3, que é a quantidade padrão dos projetos MackPesquisa.

O cronograma correspondente às atividades a serem desenvolvidas durante os 24 meses está no Apêndice B.

3 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos, foram estabelecidas seis atividades ou frentes de trabalho, cada uma com seu coordenador e respectiva equipe. Os trabalhos em alguns momentos estarão relacionados ou correrão em paralelo.

É importante salientar que a sexta atividade (desenvolvimento dos protótipos das estações) congrega todas as demais e é onde se concentra a maior demanda de verba neste projeto por necessitar de instrumentação e equipamentos de laboratório para este fim.

3.1 ESTUDO DA TOPOLOGIA DO SISTEMA

O sistema Geolocal, em sua configuração básica, possui quatro bases e uma repetidora. Porém, para que seja possível a cobertura de uma grande extensão territorial, torna-se necessária a formação de uma rede com grande quantidade de bases e repetidoras. A partir de alguns fatores, como altura da repetidora e área de cobertura, podemos estimar a quantidade de bases e repetidoras necessárias, bem como a distância média entre as mesmas. A redundância de bases e repetidoras deve proporcionar uma melhor acurácia ao sistema. Estes estudos precisam ser realizados e comprovados por simulações computacionais.

Uma vez que esta rede de bases e repetidoras estiver estabelecida serão necessários critérios de seleção para definir quais bases devem ser utilizadas para a localização de uma repetidora e quais repetidoras devem ser utilizadas para a localização de um alvo. Dependendo da geometria do sistema, algumas bases e repetidoras podem encontrar-se em posições desfavoráveis, prejudicando a acurácia do sistema. Neste sentido, devem ser observados alguns fatores como a diluição de precisão (PDOP - *Position Dilution Of Precision*), o ângulo de elevação entre bases e repetidoras, o não alinhamento de bases e repetidoras, entre outros. Tais fatores devem ser estudados, com o apoio de simulações computacionais, para definir um critério de seleção de bases e repetidoras.

Os estudos referentes à topologia do sistema Geolocal serão realizados através de proposições matemáticas apoiadas por simulações computacionais realizadas em MATLAB. Os algoritmos ora existentes podem sofrer melhorias ao longo dos trabalhos.

3.2 PLANEJAMENTO DOS TESTES DE CAMPO

Trata-se do estudo e definição dos possíveis locais para a realização dos testes de campo que ocorrerão nas demais fases do projeto. Entre as possibilidades para um primeiro teste está um drone como repetidora, voando a uma altitude baixa (120 m) e bases distribuídas em uma área de fácil acesso.

Serão analisados os relevos das áreas escolhidas identificando (e georreferenciando) os locais das estações, que deverão guardar linha de visada entre elas. Também serão realizados os estudos das normas que regem o uso de espaço aéreo, as possíveis plataformas para a repetidora e os limites de altitude.

Algumas opções são o Campus Mackenzie Alphaville (750.000 m²), a colônia de férias do Mackenzie em Campos do Jordão (1,5 milhão m²), o terreno onde está localizado o rádio observatório de Atibaia, o terreno do IPM no Cabuçú (26.000 m²) ou outros.

O Geolocal necessita também de um estudo das possíveis plataformas que poderiam carregar a repetidora. Estas plataformas podem ser, por exemplo, drones, aeronaves, balões, nanossatélites, entre outras. Cada plataforma tem suas vantagens e desvantagens que precisam ser discutidas (autonomia de voo, altitude da órbita, propagação de sinal etc.). Inclui o estudo de normas para o uso do espaço aéreo, verificando quais as altitudes disponíveis para a localização da repetidora.

3.3 DEFINIÇÃO DAS FREQUÊNCIAS UTILIZADAS PELO SISTEMA

Estudar as frequências de rádio e seus modelos de propagação em diferentes meios, avaliar as faixas de frequência disponíveis e relacionar quais as melhores opções para o sistema. Definir quais frequências serão utilizadas preparando as especificações para projeto das antenas e a solicitação de uso para a ANATEL. Este estudo será realizado de forma teórica e apoiado em simulações computacionais.

3.4 DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS DE PROCESSAMENTO

Modelar e desenvolver em C++, MATLAB ou Python os algoritmos para PDOP, cálculo de distância, geolocalização, sincronização da referência de tempo. Verificar como pode ser feita a integração com os algoritmos desenvolvidos para o SDR (*Software Defined Radio*) (subseção 3.6).

3.5 ESTUDO DAS REFERÊNCIAS DE TEMPO

Pesquisar os diversos dispositivos de referência de tempo (relógio atômico, cristais controlados ou não, GPSDO e outros), suas características e custos. Dimensionar o erro que os índices de precisão e estabilidade de cada um teriam nas medições de distância. Definir os dispositivos que serão utilizados em cada fase. Esta é uma pesquisa teórica.

3.6 DESENVOLVIMENTO DOS PROTÓTIPOS DAS ESTAÇÕES

Para os primeiros testes práticos é necessário o desenvolvimento dos protótipos das estações de base, repetidora e alvo, seus circuitos, antenas, fornecimento de energia, software e operacionalização.

Levando em consideração a abrangência da primeira fase, os estudos e as discussões até o momento identificaram três tipos diferentes de equipamentos:

- a estação transmissora-receptora das bases;
- a estação transmissora-receptora da central de controle, ligada a um computador;
- a estação receptora do alvo.

O estudo do hardware da repetidora será desenvolvido em fase posterior.

Para efeito de desenvolvimento optou-se pela tecnologia SDR (*Software Defined Radio*, rádio definido por software). Essencialmente é um equipamento de rádio com a etapa de radiofrequência analógica, um conversor A/D que recebe este sinal analógico e o digitaliza enviando para um sistema computadorizado que, através de algoritmos, realiza diversos processamentos como sintonia, filtragem e decodificação até que o sinal transmitido possa ser utilizado quer em computações, quer ouvido em alto-falantes. A transmissão é semelhante, em ordem inversa.

Durante esta fase de projeto esta tecnologia de virtualização tem a vantagem de permitir alterações de projeto meramente reprogramando o software aproveitando o mesmo hardware. Isso vale, inclusive, para eventuais alterações da frequência a ser utilizada (objeto de outra frente de pesquisa) ou mesmo da modulação do sinal à sua portadora. Outra vantagem é permitir a comparação entre bases de tempo desde

cristais simples, cristais controlados por temperatura e até relógios atômicos de rubídio e césio, atividade descrita na subseção 3.5.

Há vários modelos de hardware no mercado. O escolhido é o B210 da Ettus/NI, que atende às seguintes especificações de projeto:

- duas frequências ou canais simultâneos: necessário para experimentos quando se inclui a ionosfera. Neste caso usa-se duas frequências para transmitir o mesmo sinal e a diferença é aplicada aos modelos de propagação;
- *full duplex* (transmite e recebe ao mesmo tempo): à exceção o alvo, todas as demais estações combinam a função de transmitir o sinal de geolocalização com a de receber informações, comandos e atualizações da Central de Operações;
- opera em frequências até 6 GHz: embora a frequência ainda não tenha sido definida, ela deve se situar na faixa L (entre 1 e 2 GHz), já usada para esse fim por outros sistemas de GNSS;
- permite a utilização de diferentes bases de tempo ou *clock* estável e disciplinado externamente como, por exemplo, um relógio atômico ou um GPSDO.

Para o desenvolvimento desta atividade inicialmente será realizada uma revisão da literatura sobre o funcionamento do GNSS (*Global Navigation Satellite System*), SDR, GRC (*GNU Radio Companion*) e PDS (Processamento Digital de Sinais). Em laboratório, o sinal de RF será captado por antenas de GPS e digitalizado pelo SDR. Simulações computacionais para demodulação do sinal GPS no GRC serão realizadas a partir deste sinal, com o objetivo de avaliar o desempenho dos algoritmos de PDS do GPS desenvolvidos para recepção e transmissão.

Após a validação dos algoritmos de PDS do GPS, ajustes no código e protocolos serão realizados para compatibilização dos algoritmos e requisitos do Geolocal definidos nas atividades anteriores.

Testes em laboratório serão realizados com três kits de SDR emulando as estações (Base, Alvo e Central) e validando as implementações realizadas para futuros testes de campo.

4 CONTRIBUIÇÕES IMEDIATAS E/OU FUTURAS PARA A SOCIEDADE

Como foi discutido anteriormente, os sistemas de geoposicionamento por satélite (GNSS) são essenciais para:

- o posicionamento geográfico-espacial (navegação, topografia, pesquisas geológicas);
- o sincronismo da base de tempo universal (telecomunicações, aplicações científicas, processamento de dados).

Os sistemas GNSS disponíveis hoje (GPS e GLONASS, por exemplo) são de propriedade de países específicos e sua disponibilidade ou gratuidade não é garantida, o que pode comprometer a soberania de nosso país, especialmente em aplicações críticas como a defesa e as telecomunicações.

Desta forma, o Geolocal se apresenta como um sistema de geoposicionamento alternativo e independente dos demais sistemas GNSS, funcionando como um backup destes, substituindo-os na sua ausência ou quando a região não tiver sinal.

O Geolocal possui algumas vantagens em relação ao demais sistemas GNSS:

- pelo fato de poder utilizar diversos tipos de repetidora (drones, balões, etc.), o Geolocal pode ser instalado para cobertura de pequenas áreas como, por exemplo, uma fazenda para auxiliar na agricultura de precisão e controlar implementos agrícolas;
- dependendo da altitude da repetidora, o sistema Geolocal pode utilizar de propagação sub-ionosférica proporcionando uma melhor acurácia do Geolocal em relação aos sistemas GNSS existentes.

Por fim, diversos setores podem ser beneficiados: finanças, agrícola, militar, telecomunicações, automotivo, aeronáutico, aeroespacial e distribuição de energia, entre outros.

5 INFRAESTRUTURA INSTITUCIONAL

5.1 EQUIPE

5.1.1 Pesquisador Líder

- Sergio Vicente Denser Pamboukian, DRT 1082436, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/4714240398706670>

5.1.2 Pesquisador Professor do Mackenzie (PPI ou PPP)

- Magda Aparecida Salgueiro Duro, DRT 1096998, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/9333405451291669>
- Cristiano Akamine, DRT 1102424, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/0394598624993168>
- Edson Tafeli Carneiro dos Santos, DRT 1110690, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/0161192178607515>
- Carlos Guillermo Gimenez de Castro, DRT 1109288, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/5735720962238368>
- Jean Pierre Raulin, DRT 1110054, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/7285541024719915>
- Adriana Benetti Marques Valio, DRT 1109262, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/1041565102315246>
- Marcos Stefanelli Vieira, DRT 1127637, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/7586109476484841>

5.1.3 Pesquisador Aluno do Mackenzie

- Eduardo Perez Macho, TIA 71703683, Mestrado PPGCAGE, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/4922731980929616>
- Ricardo Seriacopi Rabaça, TIA 71801499, Doutorado PPGEEC, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/4655443426079175>
- Celso da Silva Diniz, TIA 71705066, Mestrado PPGEEC, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/5248830011250520>
- Francisco Alberto Gori Fuller, TIA 71851331, Mestrado PPGCAGE, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/1805506141930441>
- Felipe Politi Hodish, TIA 31604013, Graduação Engenharia Civil, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/2427604306384375>

5.1.4 Pesquisador Voluntário

- Pedro Levit Kaufmann, Pesquisador ICT/UNIFESP, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/8727534264118677>
- Rodolpho Vilhena de Moraes, Pesquisador ICT/UNIFESP, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/7740917144757410>
- Emilia Correia, Pesquisadora INPE, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/1272123236892781>
- Marcelo Bender Perotoni, Pesquisador UFABC, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/6536009557203935>
- Carlos Augusto Morales Rodriguez, Pesquisador IAG/USP, Lattes:
<http://lattes.cnpq.br/6712549631586434>
- Amauri Shossei Kudaka, Engenheiro Pleno CRAAM, DRT 1080893, Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1401682210791286>
- Guilherme Julio Alaia, Pesquisador CRAAM, Bolsista Fapesp n°2018/12416-0, Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6008616694482288>
- Joaquim Eduardo Rezende Costa, Pesquisador EMBRACE/INPE, Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7275059047419031>

5.2 LABORATÓRIOS E INFRAESTRUTURA

5.2.1 Laboratório de TV Digital

O Laboratório de TV Digital será utilizado para o desenvolvimento de hardware e software das estações, repetidoras e centro de controle.

5.2.2 Laboratório de Geotecnologias (LABGEO)

Os recursos disponíveis no Laboratório de Geotecnologias (LABGEO) serão utilizados no geoprocessamento dos testes de campo.

5.2.3 Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie (CRAAM)

A integração das atividades do projeto será realizada utilizando recursos e espaço físico do Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie (CRAAM).

REFERÊNCIAS

ALTAMIRANO, M. **Measure Distance with a Sonar Sensor on an Arduino**. 2016. Disponível em: <https://www.allaboutcircuits.com/projects/measure-distance-with-a-sonar-sensor-on-an-arduino/>. Acesso em: 22 maio 2018.

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.

HONMA, M.; TAMURA, Y.; REID, M.J. **Tropospheric Delay Calibrations for VERA**. Publications of the Astronomical Society of Japan, 60, 2008, 951-960. <http://dx.doi.org/10.1093/pasj/60.5.951>

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems**. Recommendation ITU-R P.531.4., 1-15, 1997.

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

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

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

KAUFMANN, P., KAUFMANN, P.L., PAMBOUKIAN, S.V.D.; VILHENA DE MORAES, R. **Signal Transceiver Transit Times and Propagation Delay Corrections for Ranging and Geo-Referencing Applications**. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 1-15. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/595823>.

KAUFMANN, P.; KAUFMANN, P.L.; PAMBOUKIAN, S.V.D.; VILHENA DE MORAES, R. **A New Independent GPS-Free System for Geo-Referencing from Space**. Positioning, 5, 37-45, 2014.

KLOBUCHAR, J.A. **Ionospheric time delay algorithm for single frequency GPS users**. IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems, AES-23, 325-331, 1987.

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.

OTSUKA, Y., OGAWA, T., SAITO, A. TSUGAWA, T., FUKAO, S., MIYASAKI, **A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan**, Earth Planets Space, 54, 63-70, 2002.

PAMBOUKIAN, S.V.D.; KAUFMANN, P.; VILHENA DE MORAES, R; KAUFMANN, P.L. **GNSS-Free Geo-Referencing System Using Multiple LEO CubeSat Formation**. 2nd IAA Latin American CubeSat Workshop (LACW2016). Florianopolis, 2016.

APÊNDICE A – FASES DE DESENVOLVIMENTO DO GEOLOCAL

FASE 1 – PESQUISA APLICADA

Consiste nos preparativos necessários para a realização do primeiro experimento em campo e prova de conceito, realizado na Fase 2. Envolve diversas atividades que correrão em paralelo como o estudo dos locais de teste, a quantidade de estações necessárias, as frequências utilizadas pelos equipamentos e a construção dos protótipos. Serão 6 atividades, cada uma com seu pesquisador responsável:

- estudo da topologia do sistema (Sergio Vicente Denser Pamboukian);
- planejamento dos testes de campo (Magda Aparecida Salgueiro Duro);
- definição das frequências utilizadas pelo sistema (Jean Pierre Raulin);
- desenvolvimento dos algoritmos de processamento (Sergio Vicente Denser Pamboukian);
- estudo das referências de tempo (Sergio Vicente Denser Pamboukian);
- desenvolvimento dos protótipos das estações (Cristiano Akamine).

FASE 2 - EXPERIMENTOS EM CAMPO

Usando a instrumentação desenvolvida na Fase 1, planeja-se diversos experimentos fundamentais para a prova de conceito do projeto:

- estabelecer comunicação entre as estações;
- realizar de forma remota o sincronismo de relógios entre as bases de forma automática e coordenado pela central de controle;
- sincronizar as bases de tempo das estações em função da base referenciada da central de operações;
- usando duas bases fixas, definir a posição geográfica (no plano) de uma terceira (estação-alvo);
- comparar as medições obtidas com medições realizadas por GNSS ou Estação Total;
- identificar interferências de sinal (obstáculos e reflexões).

Nesta fase também serão feitas as melhorias necessárias nos algoritmos do sistema a partir dos resultados obtidos nos experimentos.

FASE 3 - NAVEGAÇÃO DA PLATAFORMA DA REPETIDORA.

Nesta fase, quatro estações serão dispostas em pontos distantes e um receptor será acoplado em diferentes dispositivos aéreos (drone, balões meteorológicos e estratosféricos, aviões e eventualmente satélites) com o objetivo de calcular sua posição, velocidade e direção em situações variadas:

- em um ponto elevado;
- embarcado em drone;
- embarcado em balão meteorológico contido por cabo;
- embarcado em balão meteorológico livre (com recuperação do *payload*).

Outro objetivo importante nesta fase é validar os algoritmos de PDOP e os modelos de atraso de propagação nos meios.

Os dados serão transmitidos para a central de operações em terra e comparados com dados semelhantes obtidos através de GNSS.

Cinco equipamentos serão necessários na configuração:

- 1 base fixa + central de operações;
- 3 bases remotas fixas;
- 1 estação alvo, móvel.

FASE 4 - GEOLOCALIZAÇÃO DE ALVOS EM SOLO

Serão três bases remotas, uma base + central de operações, quatro estações aéreas ou repetidoras e uma estação alvo, totalizando nove equipamentos. Nesta fase o objetivo é realizar a prova de conceito do sistema completo através de experimentos:

- geoposicionamento das 4 repetidoras (aéreas);
- geoposicionamento do alvo a partir das repetidoras.

