Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Exposicarta
6 a 9 de novembro de 2017, SBC, Rio de Janeiro - RJ, p. 43-50

GNSS NO SUPORTE À NAVEGAÇÃO AÉREA: O PRIMEIRO INCT NA ÁREA DE GEODÉSIA NO BRASIL

[1]Monico, J.F.M.; [2]Shimabukuro, M.H.; [3]Camargo, P.O.; [4]Pereira, V.A.S.

[1]UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA *Email*: galera@fct.unesp.br
[2]UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA *Email*: miltonhs@fct.unesp.br
[3]UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA *Email*: paulo@fct.unesp.br
[4]UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA *Email*: vi_stuani@hotmail.com

Comissão II - Geodésia, Astronomia, Topografia e Agrimensura

RESUMO

Neste trabalho objetiva-se apresentar à comunidade da Sociedade Brasileira de Cartografia e Sensoriamento Remoto o projeto aprovado dentro da chamada INCT-MCTI/CNPq/CAPES/FAPs 16/2014. Trata-se do primeiro projeto desta natureza aprovado na área de Geodésia no Brasil. O projeto advém de uma parceria de pesquisa entre a UNESP de Pres. Prudente, INPE, IAE e ITA, com suporte do CNPq, CAPES e FAPESP. Trata-se do uso de sistemas de posicionamento por satélites (GNSS) para a navegação aérea, o qual constitui uma tendência mundial na atualidade e será a principal tecnologia a ser adotada no futuro para a determinação de posição das aeronaves em todas as fases do voo. Mas em nossa região, a camada ionosférica apresenta comportamentos distintos em função da localização, da hora do dia, do período do ano e do ciclo de atividade solar, cujo período é de onze anos. A ionosfera sobre o território brasileiro, em especial nas regiões de ocorrência da anomalia da ionização equatorial, apresenta características singulares com relação ao restante do planeta, pela concentração de fenômenos e anomalias que ali ocorrem, fazendo com que o desempenho de sistemas de posicionamento por satélite na região seja pior quando comparado a regiões como os Estados Unidos e a Europa, por exemplo. Por esta razão, a aplicação de tecnologias baseada em GNSS na aviação sobre o território brasileiro exige uma avaliação profunda dos efeitos da ionosfera. Estudos nesse sentido revestem-se de grande importância em razão dos criteriosos requisitos de segurança envolvidos na aviação, por envolver risco de vidas humanas. Diante deste cenário, a proposta de criação deste INCT (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia) visa realizar uma análise detalhada dos modelos de decorrelação de erros devido à ionosfera (modelo de risco). Detalhes dos projeto e resultados preliminares serão apresentados.

Palavras chave: GNSS, Modelo de Risco Ionosférico, Ionosfera.

ABSTRACT

In this work we aim to present to the Brazilian Community of Cartography and Remote Sensing the project approved in the context of the call INCT-MCTI/CNPq/CAPES/FAPs 16/2014. This is the first project of this kind approved in the field of Geodesy in Brasil. Its results from a partnership among UNESP from Presidente Prudente, INPE, IAE and ITA, with support from CNPq, CAPES and FAPESP. It is related with the use of satellite positioning system (GNSS) for air navigation, which is a wordwide tendency nowadays and may be the main technology to be used in the future in order to provide the aircraft position at any phase of flight. However, in our region (equatorial one), the ionosphere presents distinct behavior as function of the local, time of the day, year season and solar cycle, whose period is of 11 years. In the Brazilian region, mainly in that of the equatorial anomaly, the ionosphere presents singular characterisitics with respect to the other regions of the word, due to the concentration of phenomenum and anomalies that occurs there, making the satellite positioning quality worst than the other regions of the word, like USA and Europe, for example. In such way, the GNSS application for aviation in the Brazilian territory requires a deeply assessment of the ionospheric effects. Investigation of this nature is of great importance due to the criterious requirement related with safety of live involed in the avistion. Considering suh scenario, the proposed INCT (National Institute of Science and Technology) aims to carry out a detailed analysis of the decorrelation errors models due to the ionosphere (treath model). Details and preliminary results will be presentd.

Keywords: GNSS, Ionospheric Treaht Model, Ionosphere.

1 – INTRODUÇÃO

O uso de sistemas de posicionamento por satélites para a navegação aérea constitui uma tendência mundial e será a principal tecnologia a ser adotada no futuro para a determinação de posição das aeronaves em todas as fases do voo. O uso de GNSS (*Global Navigation Satellite System*) consiste na tecnologia básica no Plano Global de Navegação Aérea (GANP) descrito no Doc 9750-NA/963 da Organização de Aviação Civil Internacional (OACI).

Em Blanch *et al*. (2012) é possível encontrar uma série de desafios a serem considerados e superados para que o uso de GNSS seja totalmente adotado na aviação e cada vez menos dependente de outros equipamentos instalados no solo, com a consequente diminuição dos custos e do tempo de manutenção dos sistemas que apoiam o voo, bem como, a otimização das rotas aéreas. Uma das dificuldades existentes e citada pelos referidos autores para o uso da tecnologia GNSS em aplicações que exigem elevada acurácia e alto índice de integridade diz respeito aos fenômenos vinculados com o clima espacial, onde a camada ionosférica compõe o principal agente causador de erros, sobretudo na região equatorial e de baixas latitudes, como é o caso do território brasileiro.

Os mesmos autores (BLANCH et al., 2012) fazem uma projeção do uso de GNSS na aviação mundial para o ano de 2025 e afirmam que há atualmente um grande aumento na navegação por satélite, de modo que até 2020 haverá uma quantidade de satélites de posicionamento operando superior a três vezes a constelação atual e distribuindo sinais para uso civil em pelo menos duas frequências distintas. Tal fato permitirá desenvolver algoritmos dentro dessas novas perspectivas. Parcialmente isto já é uma realidade.

Os sistemas de aumento apresentam destaque dentre as possibilidades de uso do GNSS nas fases do voo, que consistem no uso da técnica de GNSS diferencial (MONICO, 2008) a fim de melhorar a acurácia do posicionamento em qualquer fase do voo, sobretudo na mais crítica delas: o pouso. O GNSS é afetado por várias fontes de erros, as quais devem ser adequadamente tratadas para se alcançar a acurácia desejada (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

É de conhecimento geral da comunidade científica e tecnológica da área que a camada ionosférica é atualmente a maior fonte de erros para os sistemas de posicionamento por satélite, afetando diretamente as medidas de distâncias e de fase da onda portadora entre a antena receptora e o satélite, provocando erros no posicionamento, sobretudo na componente vertical, considerada mais crítica para a aviação.

O território brasileiro concentra um conjunto de fenômenos e anomalias na camada ionosférica que caracterizam o Brasil como um ambiente singular com relação ao restante do planeta no que diz respeito a essa problemática. Dentre os fenômenos que ocorrem na ionosfera brasileira, citam-se: Anomalia da Ionização Equatorial (AIE), Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS), e ocorrência de bolhas de plasma (irregularidades ionosféricas) que causam cintilação nos sinais GNSS. Dentre os fenômenos citados, destaca-se o efeito da cintilação nos sinais GNSS que podem introduzir altos valores de erro posicional ou ainda tornar indisponível uma quantidade de satélites de modo que o sistema seja inoperável. Várias aplicações sofrem sobremaneira desta problemática, principalmente aquelas que envolvem risco de vida, como é a navegação aérea.

A fim de que seja possível a adoção de medidas mitigadoras do risco à segurança da navegação aérea causado pelos fenômenos citados, há a necessidade de uma compreensão profunda dos processos físicos envolvidos e o seu consequente efeito no posicionamento com GNSS.

Com o devido conhecimento dos fenômenos em questão, bem como uma base de dados adequada, há a possibilidade de geração de produtos que informem, em tempo real, as condições da ionosfera (PEREIRA; CAMARGO, 2016 e 2017) e o risco oferecido para a integridade de sistemas que fazem uso de tecnologia GNSS (PEREIRA, 2017). Com a evolução do conhecimento, vislumbra-se ainda a possibilidade de se efetuar previsões das condições ionosféricas com aplicação na aviação. Neste sentido, alguns trabalhos foram realizados no Brasil, mas com aplicações em áreas sem grande risco, como é a Agricultura de Precisão e o posicionamento geodésico e topográfico, dentro de um projeto temático da FAPESP denominado GNSS-SP.

Neste sentido, tendo em vista a chamada INCT-MCTI/CNPq/CAPES/FAPs 16/2014 e considerando dentro da mesma a área estratégica denominada "Controle e Gerenciamento do Tráfego Aéreo", foi submetida a proposta denominada "Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea", o qual foi aprovado, permitindo então a criação do INCT denominado GNSS-NavAer. A equipe do projeto é formada por pesquisadores da UNESP de Pres. Prudente, INPE, IAE, ITA e PUC-Rio, com suporte do CNPq, CAPES e FAPESP. Neste trabalho objetiva-se apresentar alguns detalhes e conceitos envolvidos no projeto e as investigações que serão realizadas, incluindo resultados preliminares.

2 – CONCEITOS BÁSICOS

As autoridades brasileiras vinculadas com o espaço aéreo vislumbraram em 2001 que o uso do GNSS tal como vinha sendo utilizado em outras regiões, na forma de SBAS (*Satellite-Based Augmentation System*) não seria adequado ao Brasil, optando pela adoção do GBAS (*Ground-Based Augmentation System*). Mas até o momento, nenhum GBAS se encontra operacional no Brasil. Esforços estão sendo direcionados para que o GBAS instalado no aeroporto internacional Tom Jobim (Galeão) no Rio de Janeiro/RJ tenha sua certificação realizada para breve.

O GBAS foi concebido para ser utilizado nas aproximações de precisão, em princípio para categoria I (CAT-I), com pretensão de atingir as categorias II e III,

mais precisas, a exemplo do tradicional ILS (*Instrument Land System*). O sistema GBAS possui algumas vantagens sobre o ILS do ponto de vista econômico e de desempenho que, a priori, tornam essa tecnologia atraente para o provedor do serviço de navegação aérea.

No sistema GBAS as aproximações de precisão são realizadas por aeronaves equipadas com receptores do sistema GPS apenas, fazendo uso de mensagens, transmitidas via VHF a partir de uma estação de referência em solo, contendo fatores de correção e procedimentos de pouso. Essas correções de posição são calculadas utilizando-se um conjunto receptores GPS de uma frequência (L1), com as respectivas posições no solo conhecida, e servem para redução do erro do GPS e a consequente garantia da precisão requerida nos serviços de pouso de precisão categoria I. Destaca-se que o sistema faz uso somente da frequência L1 porque, por razões de segurança, a frequência L2 não é autorizada pela OACI para uso na navegação aérea, pelo fato de que os criadores do sistema GPS não garantiam a integridade do sinal nesta frequência para este fim (ICAO, 2013).

O fato de se utilizar apenas uma frequência do GPS impossibilita o usuário de calcular o erro introduzido pela ionosfera. Entretanto, a modernização do sistema GPS com o lançamento do bloco IIF de satélites, será disponível uma nova frequência para uso civil, chamada de L5 (1176,45 MHz). De acordo com Circiu *et al.* (2014), Jan (2010), Suzuki *et al.* (2010) e Ene (2009), a utilização das frequências L1 e L5 no GBAS poderá melhorar consideravelmente a correção dos efeitos da ionosfera. Tang *et al.* (2009) relatam alguns testes realizados com processamento de posição a partir de dupla frequência com L1 e L2, enquanto a frequência L5 não é totalmente disponibilizada. Os resultados mostraram melhora no posicionamento, mas com um maior índice de ruído no sinal por ocasião da frequência L2.

No momento, o uso de duas frequências no posicionamento com GPS não é viável, pois o GBAS trabalha somente com a frequência L1. Deste modo, a principal função do GBAS é a de transmitir correções diferencias de pseudodistância (por meio de mensagens denominadas Tipo 1). De posse de tais correções, o sistema também transmite parâmetros de integridade (mensagens Tipo 2) e trajetórias de aproximação (Tipo 4). A Figura 1 ilustra, de maneira simplificada, a dinâmica de funcionamento do sistema.

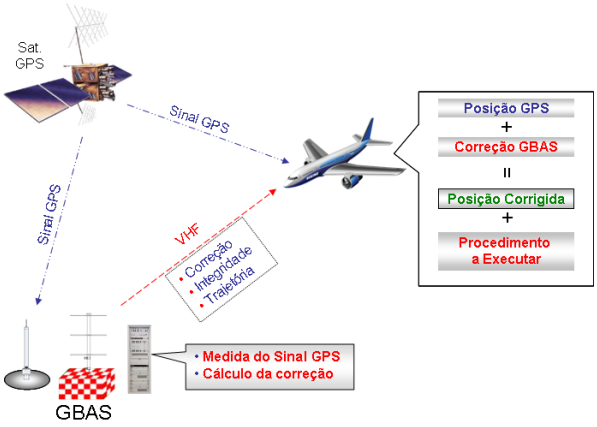

Figura 1 – Elementos que atuam no funcionamento do sistema GBAS.

A informação de correção é obtida a partir do conhecimento prévio da posição da antena de referência e da posição do satélite. De posse destas duas informações, calcula-se a distância prevista, em um dado instante, entre o satélite e a antena do receptor. Para o instante em questão, a distância predita é comparada com a pseudodistância medida e a diferença entre as duas é transmitida pelo sistema às aeronaves para que a correção seja efetuada na pseudodistância de cada satélite e um novo cálculo de posição seja efetuado. A correção transmitida sofre uma variação no tempo, que é medida instantaneamente pelo sistema de modo a possibilitar uma predição da correção, alguns segundos antes de a mesma ser transmitida. Destaca-se que o cálculo da correção é efetuado para cada um dos satélites avistados pelas antenas de referência. Detalhes podem ser obtidos em Xie (2004), Lee (2005) e Monico (2008).

Paralelamente as correções, o GBAS ainda calcula e transmite parâmetros de integridade, os quais permitem determinar, a bordo da aeronave, indicadores da acurácia do posicionamento, como o HPL (*Horizontal Protection Level*) e o VPL (*Vertical Protection Level*). Dentre os dois níveis de proteção, o VPL é considerado o mais crítico para o pouso de aeronaves, devido a componente vertical do posicionamento pelo GPS ser a mais atingida pelos erros sistemáticos. De modo a conduzir um voo seguro, a aeronave de ser alertada em tempo real se o erro posicional excede um determinado limite de alerta, tanto na componente vertical, designado pela sigla VAL (*Vertical Alert Limit*), quanto na componente horizontal, dado por HAL (*Horizontal Alert Limit*). Assim, para a segurança de voo, os valores de VPL/HPL devem ser inferiores aos valores de VAL/HAL (Figura 2); caso sejam superiores e a aeronave não for informada em um determinado tempo, há o risco eminente de acidente aéreo (DATTA-BARUA, 2008; LEE, 2005).

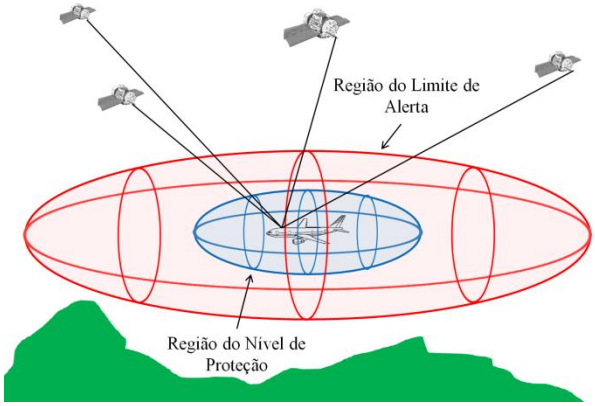

Figura 2 – Regiões do nível de proteção e do limite de alerta na navegação de aeronaves.
Fonte: Adaptado de Lee (2005).

Por fim, o GBAS também transmite a mensagem Tipo 4, que contém informações a cerca do procedimento de pouso que a aeronave deve executar. Esta mensagem pode apresentar um ou mais conjunto de dados com diversos procedimentos que dão suporte a mais de uma pista de pouso e, inclusive, para mais de um aeroporto. O GBAS pode fornecer guiagem para até 49 operações de aproximação de precisão ao mesmo tempo.

Para que o GBAS atenda os requisitos de desempenho de navegação estabelecidos OACI (em termos de acurácia, integridade, continuidade e disponibilidade), limites devem ser impostos na variação dos erros ionosféricos entre a aeronave que se aproxima e as estações de referência, de modo a minimizar a perda de disponibilidade (DATTA-BARUA *et al.*, 2002).

Com o intuito de estimar estes limites, a configuração do GBAS que deve ser modelada é aquela em que as estações de referência e o receptor da aeronave rastreiem os mesmos satélites, cujos sinais sejam submetidos a atrasos devido à ionosfera. No entanto, estes tempos de atrasos não são iguais por ocasião das linhas de visada serem diferentes. Em contrapartida, na medida em que a aeronave se aproxima das estações de referência, a diferença entre os erros ionosféricos tende a ser mínimo (DATTA-BARUA *et al.*, 2002). Dada à problemática, pesquisadores da Universidade de Stanford/EUA desenvolveram um modelo de risco ionosférico a fim de estimar a máxima decorrelação espacial existente entre o atraso (erro) proporcionado a um satélite por uma estação de referência e o atraso que acomete a aeronave. Tal estimativa, denominada de gradiente ionosférico, deve considerar uma determinada distância limite máxima, de modo a representar a pior situação e definir os limites de erro tolerado para a estimativa da qualidade do posicionamento da aeronave nas fases de aproximação e pouso (DATTA-BARUA et al., 2010).

Salienta-se que um modelo de risco ionosférico é único e exclusivo para a região dos dados GNSS utilizados em seu desenvolvimento. Desta forma, para cada estação GBAS instalada em um determinado aeroporto, é necessário que se desenvolva e analise o seu próprio modelo de risco.

No Brasil, o DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) é órgão responsável pelo controle das atividades relacionadas ao espaço aéreo. Em 2011 o departamento adquiriu uma estação GBAS modelo SLS-4000 da empresa Honeywell/EUA, a qual foi instalada no aeroporto do Galeão no Rio de Janeiro/RJ (Figuras 3 e 4), com o intuito de avaliar a qualidade do serviço no âmbito brasileiro. Entretanto, ressalva-se que o equipamento está certificado para operação somente nos Estados Unidos, Alemanha e parte da Austrália.

Figura 3 – Localização da estação GBAS e das quatro estações de referência no aeroporto do Galeão no Rio de Janeiro/RJ.
Fonte: Pereira (2016).

Figura 4 – Antena de uma das estações de referência do GBAS instalada no aeroporto do Galeão no Rio de Janeiro/RJ.
Fonte: Pereira (2016).

Assim, o desenvolvimento de um modelo de risco ionosférico brasileiro para GBAS torna-se uma necessidade e uma realidade, sobretudo no que diz respeito à modelagem e mitigação dos efeitos ionosféricos característicos da região.

2.1 Modelo de Risco Ionosférico

Em um modelo de risco as irregularidades ionosféricas e a AIE são modeladas como uma "frente ionosférica", que se desloca com uma determinada velocidade horizontal, de modo a produzir gradientes de erro ionosférico (MAYER *et al.*, 2009). A representação de uma frente é ilustrada na Figura 5, sendo os parâmetros de um modelo de risco dado por: gradiente ionosférico (g), velocidade (Viono) e extensão da frente ionosférica (Wiono) e valor máximo de atraso ionosférico ou de TEC (*Total Electron Content*).

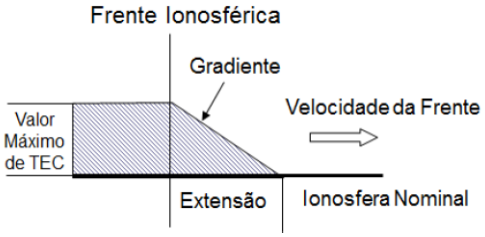

Figura 5 – Frente ionosférica.
Fonte: Adaptado de Mayer *et al.* (2009).

Os limites destes parâmetros são determinados através do processamento de um conjunto de dados que contemplam dias em que há perturbações na densidade de elétrons. Ressalva-se que não há variação temporal e sazonal para os valores obtidos.

A metodologia (Figura 6) e as equações para a determinação dos parâmetros de um modelo de risco pode ser encontrada em Datta-Barua *et al.* (2010), Kim *et al.* (2015), Srinivas *et al.* (2014) e Mayer *et al.* (2009).

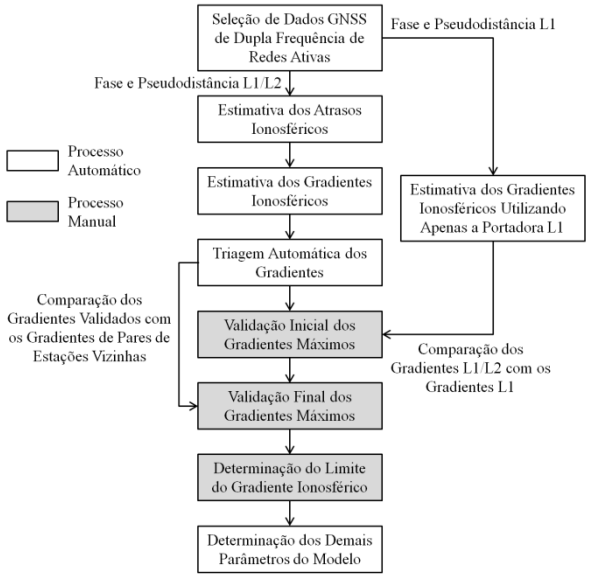

Figura 6 – Metodologia para a determinação dos parâmetros de um modelo de risco ionosférico.
Fonte: Adaptado de Datta-Barua *et al.* (2010) e Kim *et al.* (2015).

Dando atenção ao gradiente ionosférico, o mesmo pode ser determinado a partir de dois métodos: *station-pair method* e *time-step method* (LEE *et al.*, 2007), sendo o primeiro o mais utilizado.

O *station-pair method* trata cada par de estações de uma rede de monitoramento contínuo como uma estação GBAS e um receptor de uma aeronave (LEE *et al.*, 2007). Os pares são configurados de forma que as estações de um par rastreiem o mesmo satélite concomitantemente, conforme representa a Figura 7.

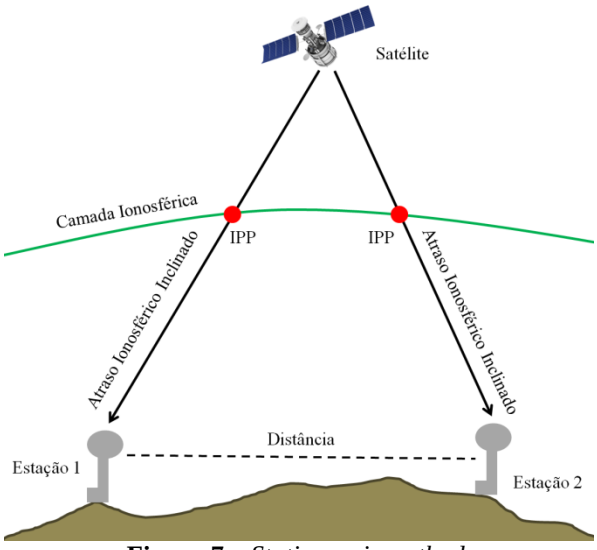

Figura 7 – *Station-pair method*.
Fonte: Adaptado de Lee *et al*. (2007).

Para um determinado instante, a estimativa do gradiente ionosférico inclinado para um dado satélite (g^s) se dá pela razão entre o módulo da diferença dos atrasos ionosféricos inclinados das duas estações pela distância de separação entre as estações (SRINIVAS *et al.*, 2014):

$$g^s = \frac{\left| I^s_{r1} - I^s_{r2} \right|}{D_{r1r2}} \qquad (1)$$

onde: I^s_{r1} e I^s_{r2} são os atrasos ionosféricos inclinados referentes às estações 1 e 2 e ao satélite s.

3 – INVESTIGAÇÕES A SEREM REALIZADAS E OBJETIVOS DO PROJETO

As linhas de pesquisa envolvidas no INCT se encontram distribuídas da seguinte forma:
- Posicionamento e Navegação pelo GNSS;
- Navegação aérea utilizando a fusão GNSS inercial;
- Monitoramento da Ionosfera utilizando o GNSS e outros sensores;
- Modelamento Estatístico da Cintilação Ionosférica;
- Análise dos efeitos da ionosfera equatorial e de baixas latitudes na navegação aérea; e
- Otimização da construção de receptores GNSS.

De certa forma, as quatro primeiras já são atendidas nos programas de pós-graduação em que os participantes estão envolvidos. A quarta e quinta se colocam como a contribuição principal deste Instituto, mas que apresentam sinergia com as demais.

A missão do INCT GNSS NavAer é formar recursos humanos, realizar pesquisas e transferir

conhecimento para a sociedade, na área de monitoramento da atmosfera, em especial com os aspectos relacionados aos efeitos do TEC e da cintilação ionosférica no sinal GNSS, visando aplicá-lo na navegação aérea com confiabilidade e segurança, dentro do território brasileiro. Como objetivos específicos destacam:

- Aquisição, instalação, testes e consolidação da rede e sistema de armazenamento e distribuição dos dados;
- Formação de Mestres e Doutores e Especialistas para dar suporte às demandas da navegação aérea frente aos desafios impostos na região brasileira devido ao comportamento da ionosfera;
- Pesquisar a dinâmica da ionosfera sobre o território brasileiro, sobretudo do efeito do TEC e da cintilação ionosférica, característicos de regiões de baixas latitudes;
- Análise dos efeitos da ionosfera equatorial e de baixas latitudes na operação do GBAS;
- Modelamento estatístico da cintilação ionosférica;
- Desenvolvimento de um modelo de risco ionosférico adequado para operação do GBAS no espaço aéreo brasileiro;
- Desenvolvimento de novas técnicas de posicionamento por GNSS na navegação aérea usando os novos sinais;
- Melhorar o desempenho dos receptores GNSS em ambiente com cintilação ionosférica na região da anomalia da ionização equatorial;
- Aprimorar a metodologia da fusão do GNSS com sensores inerciais para navegação aérea sob condições especiais da ionosfera de baixas latitudes;
- Prover a transferência de conhecimento para o setor público, via o suporte à tomada de decisão das autoridades do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro;
- Promover a difusão de conhecimento para o público em geral sobre o uso do GNSS no dia a dia da sociedade, desde as mais simples até aqueles com maiores exigências, a exemplo de pouso e decolagem na navegação aérea; e
- Internacionalização da pesquisa através de Doutorado Sanduiche no exterior, participação em congressos nacionais e internacionais, publicação em periódicos de alta relevância indexados.

4 – RESULTADOS PRELIMINARES

Muito embora esse projeto de pesquisa tenha se iniciado recentemente, alguns resultados já foram alcançados. Pereira, Monico e Camargo (2017) apresentam o procedimento geral para o desenvolvimento de modelo de risco ionosférico para GBAS e principais modelos existentes. Ainda em Pereira (2017) há estudos sobre o desenvolvimento e avaliação geral de modelo de risco ionosférico para GBAS no Brasil no contexto do GNSS. Como resultado preliminar proporcionou um estudo das irregularidades ionosféricas no Brasil durante os ciclos solares 23 e 24 (Figuras 8 e 9), a determinação dos parâmetros do modelo de risco ionosférico geral para o Brasil (Figura 10) e locais-temporais para alguns aeroportos internacionais brasileiros (Figura 11), bem como, investigações e análises do emprego da portadora L5 do GPS e dos sinais GLONASS e Galileo no desenvolvimento de modelos de risco.

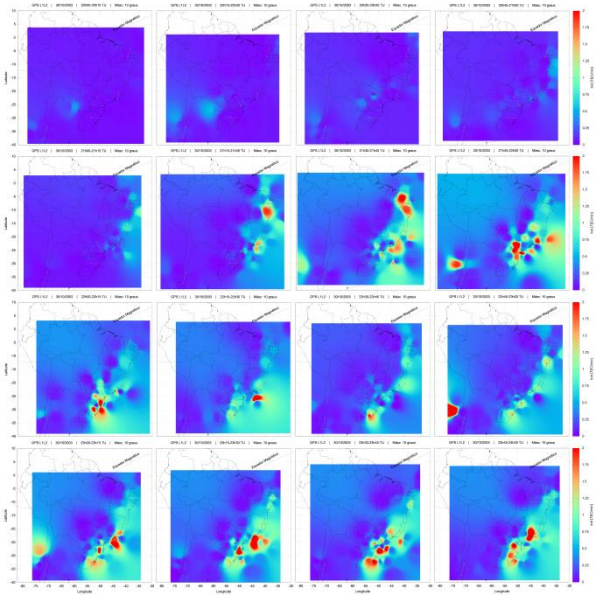

Figura 8 – Mapas do índice I_{ROT}, período 20-24h TU, do dia 30/10/2003 (ciclo solar 23).
Fonte: Pereira (2017).

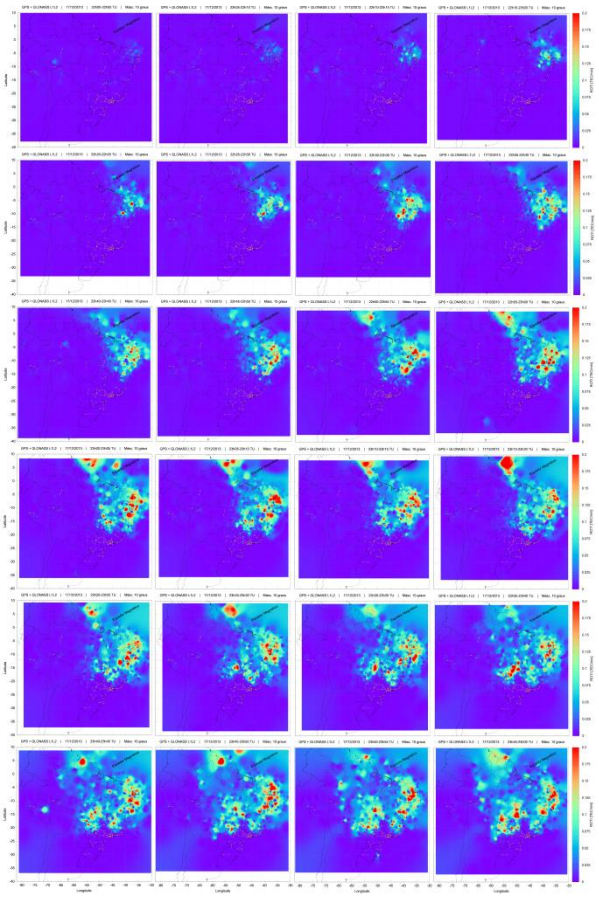

Figura 9 – Mapas do índice ROTI, período 22-24h TU, do dia 17/12/2013 (ciclo solar 24).

Fonte: Pereira (2017).

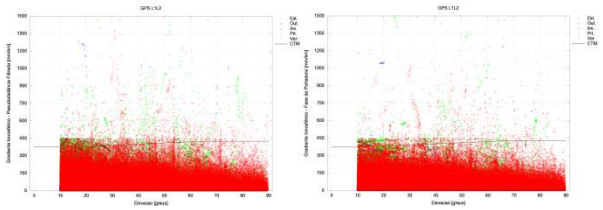

Figura 10 – Gradientes ionosféricos preliminares em função da elevação dos satélites GPS L1L2 (modelo de risco geral para o Brasil).
Fonte: Pereira (2017).

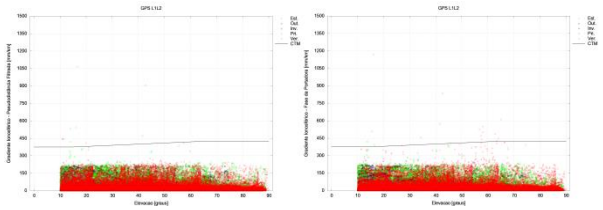

Figura 11 – Gradientes ionosféricos preliminares em função da elevação dos satélites GPS L1L2 (modelo de risco local-temporal para o aeroporto internacional de Brasília/DF).
Fonte: Pereira (2017).

Foram iniciadas também tratativas para a expansão da rede de monitoramento da cintilação ionosférica no Brasil, atualmente com 12 estações (http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br), onde mais 10 receptores estão sendo adquiridos.

Dentro do contexto de divulgação das tecnologias envolvidas no INCT, uma pagína na web encontra-se em desenvolvimento, a qual será disponibilizada opofrtunamente.

5 – COMENTÁRIOS FINAIS

Vale ressaltar o potencial tecnológico que se espera advir do projeto, alguns deles relatados a seguir. Considerando que os aeroportos brasileiros ainda não estão equipados com GBAS, instrumento a ser usado no futuro, percebe-se o grande potencial e a necessidade da pesquisa e do desenvolvimento no tema. A pontencialidade de aplicação dos resultados para toda a região equatorial, onde o Brasil poderá desempenhar papel de líder nesta área. Os resultados podem ser extensivos para outras áreas, tais como a Agricultura de Precisão, Geodésia, navegação marítima e fluvial.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq (Processo 465648/2014-2) e a FAPESP (Processos 2017/01550-0 e 2015/20522-7) pelo fomento à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLANCH, J.; WALTER, T.; ENGE, P. Satellite Navigation for Aviation in 2025. **Proceedings of the IEEE**. V.100, p.1821-1830, 2012.

CIRCIU, M. S.; FELUX, M.; REMI, P.; YI, L.; BELABBAS, B. PULLEN, S. Evaluation of dual frequency GBAS performance using flight data. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL TECHNICAL MEETINGS OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 2014. **Electronic proceedings**… ITM2014, 2014.

DATTA-BARUA, S. **Ionospheric threats to the integrity of airborne GPS users**. 2008. 144 p. Dissertation (PhD in Philosophy) – Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, USA.

DATTA-BARUA, S.; LEE, J.; PULLEN, S.; LUO, M.; ENE, A.; QIU, D.; ZHANG, G.; ENGE, P. Ionospheric threat parameterization for local area Global-Positioning-System-Based aircraft landing systems. **Journal of Aircraft**, v. 47, n. 4, p. 1141-1151, 2010. doi:10.2514/1.46719

DATTA-BARUA, S.; WALTER, T.; PULLEN, S.; LUO, M.; BLANCH, J.; ENGE, P. Using WAAS ionospheric data to estimate LAAS short baseline gradients. In: NATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 2002, San Diego. **Electronic proceedings…**San Diego, Jan. 2002. p. 523-530.

ENE, A. **Utilization of modernized Global Navigation Satellite Systems for aircraft-based navigation integrity**. 2009. 220 p. Dissertation (PhD in Philosophy) – Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, USA.

ICAO (International Civil Aviation Organization). Doc 9848: **Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual. 2 Ed. ICAO**: Montreal, Canada, (ISBN 978-92-9249-200-7), 2013.

JAN, S. S. Vertical guidance performance analysis of the L1-L5 dual-frequency GPS/WASS user avionics sensor. **Sensors**, v. 10, p. 2609-2625, 2010. doi:10.3390/s100402609

KIM, M.; CHOI, Y.; JUN, H. S.; LEE, J. GBAS ionospheric threat model assessment for category I operation in the Korean region. **GPS Solutions**, v. 19, n. 3, 2015. doi:10.1007/s10291-014-0404-6

LEE, J. **GPS-Based aircraft landing systems with enhanced performance: beyond accuracy**. 146 p. Dissertation PhD Thesis – Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University Stanford, 2005.

LEE, J.; PULLEN, S.; DATTA-BARUA, S.; ENGE, P. Assessment of ionosphere spatial decorrelation for Global Positioning System-Based aircraft landing systems. **Journal of Aircraft**, v. 44, n. 5, p. 1662-1669, 2007. doi:10.2514/1.28199

MAYER, C.; BELABBAS, B.; JAKOWSKI, N.; MEURER, M.; DUNKEL, W. Ionosphere threat space model assessment for GBAS. In: ION/GNSS, 2009, Savannah. **Electronic proceedinds…** Savannah: ION/GNSS, 2009. p. 1091-1099.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2. ed. Editora UNESP: São Paulo, 476p. (ISBN 978-85-7139-788-0), 2008.

PEREIRA, L. M. **O estado da arte do uso do GNSS na aviação civil e os desafios futuros**. 2016. Disponível em: <http://docplayer.com.br/14388757-O-estado-da-arte-do-uso-do-gnss-na-aviacao-civil-e-os-desafios-futuros.html>. Acesso em: 15 dez. 2016.

PEREIRA, V. A. S. **Modelo de risco ionosférico para GBAS no Brasil no contexto do GNSS**. 2017. Tese (Doutorado) – FCT/UNESP, Presidente Prudente (em andamento).

PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. Programa científico para o monitoramento em tempo real ou pós-processado das irregularidades ionosféricas e cintilação dos sinais GNSS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 2, p. 282-302, 2016. doi: 10.1590/S1982-21702016000200016

PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. Brazilian active GNSS networks as systems for monitoring the ionosphere. **GPS Solutions**, v. 21, n. 3, 2017. doi: 10.1007/s10291-016-0589-y

PEREIRA, V. A. S.; MONICO, J. F. G.; CAMARGO, P. O. Procedimento geral para o desenvolvimento de modelo de risco ionosférico para GBAS e principais modelos existentes. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA & II JORNADAS LUSÓFONAS – CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA, 2017, Presidente Prudente. **Anais eletrônicos...** Presidente Prudente: Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP, 24-26 jul. 2017. p. 563-570.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. 2 Ed. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 589 p., 2003.

SRINIVAS, V. S.; SARMA, A. D.; REDDY, A. S.; REDDY, D. K. Investigation of the effect of ionospheric gradients on GPS signals in the context of LASS. **Progress In Electromagnetics Research B**, v. 57, p.191-205, 2014.

SUZUKI, K.; PULLEN, S.; ENGE, P.; ONO, T. Evaluation of dual-frequency GBAS performance using data from public receivers networks. In: 23RD INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 2010, Portland. **Electronic proceedings…**Portland: ION/GNSS, Sep. 2010. p. 2592-2602.

TANG, H.; WALTER, T.; BLANCH, J.; ENGE, P.; CHAIN, F. C. Flight test data validation do dual-frequency GPS measurement error characteristics. In: ION/GNSS, 2009, Savannah. **Electronic proceedinds…**Savannah: ION/GNSS, 2009. p. 1637-1644.

XIE, G. **Optimal on-airport monitoring of the integrity of GPS-based landing systems**. 2004. 194 p. Dissertation PhD Thesis – Department of Electrical Engineering, Stanford University. Stanford. 2004.