

Utilização de um Modelo de Risco Ionosférico temporal para certificação de GBAS no Aeroporto Internacional de Belém/PA

RESUMO

Maria Luiza Castro Garcia
mluizacastrog@gmail.com
Universidade de São Paulo. São Paulo.
São Paulo. Brasil.

Com a evolução da era da informação e a intensificação da globalização, observa-se um significativo avanço e transformação no campo tecnológico, onde o emprego rotineiro de sistemas de satélites emerge como marco. Este estudo concentrou-se no uso de um Modelo de Risco Ionosférico Temporal específico destinado a apoiar a certificação de um GBAS. A pesquisa foi conduzida no Aeroporto Internacional de Belém/Val-de-Cans Júlio Cezar Ribeiro, utilizando o software Ion_Index. A partir da elaboração do Modelo de Risco Ionosférico foi obtido o Índice de Irregularidades ROTI para os anos entre 2012 e 2024. Este modelo permitiu identificar potenciais janelas de restrições ao uso do GBAS com base nos horários de ocorrência e nas estações do ano. Tanto na relação Gradiente Ionosférico e Elevação quanto na relação Gradiente e Tempo Universal foi utilizado o método CONUS. Em ambas as relações o Inverno apresentou condições mais estáveis para navegação, enquanto o Verão demonstrou maior instabilidade ionosférica. Com base nos resultados obtidos e nos gráficos apresentados neste estudo, foi possível concluir que a certificação do sistema GBAS para o Aeroporto de Belém é viável.

PALAVRAS-CHAVE: GBAS; Navegação Aérea; Segurança; Modelo de Risco Ionosférico.

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios das grandes navegações até o período pós-guerra, a humanidade tem persistentemente buscado aperfeiçoar seus sistemas de orientação. Com o advento dos satélites artificiais, juntamente com o avanço tecnológico e a consequente globalização, a determinação precisa das coordenadas geográficas se tornou uma necessidade crucial. Este desenvolvimento tem servido como um catalisador significativo para estratégias políticas e econômicas, abrindo novos horizontes que anteriormente eram impensáveis.

Atualmente, os sistemas de navegação e posicionamento baseados em satélites artificiais oferecem resultados de alta velocidade, desempenhando um papel fundamental em diversas aplicações acadêmicas e industriais, principalmente na aviação.

Nesta esfera, a sigla CNS/ATM, que significa Communication, Navigation, and Surveillance/Air Traffic Management se destaca como o conjunto de tecnologias adotado desde o ano de 1991 para o Sistema Integrado de Comunicações, Navegação, Vigilância e Gerenciamento de Tráfego aéreo. Esse sistema é fundamentado em tecnologias digitais, incluindo sistemas terrestres e satelitais, além de níveis avançados de automação, necessários para proporcionar uma gestão eficaz, segura e harmonizada do tráfego aéreo global. Ele utiliza as mais recentes tecnologias disponíveis para aumentar tanto a segurança quanto a capacidade do sistema de transporte aéreo (DECEA, 2021).

A integração de sistemas de aumento ao Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) emerge como uma estratégia eficaz para aprimorar os serviços de posicionamento durante as fases críticas de pouso das aeronaves. Segundo Krueger (2020), os avanços contínuos no posicionamento GNSS em tempo real são cruciais para delinearem as futuras perspectivas desse sistema. De acordo com a Eurocontrol (2023), o GNSS é projetado para se tornar o principal recurso de Navegação Baseada em Performance (Performance Based Navigation - PBN) até 2030.

Apesar das vantagens oferecidas pelo sistema de posicionamento atual, ele ainda não atende completamente às exigências rigorosas da indústria da aviação. Para suprir essas demandas, é essencial a implementação de sistemas de aumento como o Satellite-Based Augmentation System (SBAS) e o Ground-Based Augmentation System (GBAS). Enquanto o SBAS utiliza satélites geoestacionários para aumentar o desempenho e a área de cobertura do posicionamento, o GBAS emprega infraestruturas terrestres com o mesmo propósito (KRUEGER, 2020).

A segurança das operações aeroportuárias está intrinsecamente ligada à precisão dos sistemas de navegação. Diante desse cenário, a correção precisa dos erros ionosféricos é crucial para garantir a correta orientação das aeronaves durante procedimentos críticos, como poucos que exigem alta precisão. A falta de um entendimento detalhado dos gradientes ionosféricos pode resultar em desvios indesejados e potencialmente perigosos, comprometendo a segurança das operações aéreas. Assim, o aprofundamento no estudo dos fenômenos ionosféricos não apenas contribui para a melhoria das tecnologias de navegação, mas também desempenha um papel fundamental na manutenção da segurança

operacional nos aeroportos, justificando a necessidade de contínua pesquisa e desenvolvimento nesta área.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas Globais de Navegação Por Satélite - GNSS

O avanço contínuo das tecnologias tem gerado uma demanda crescente por dados espaciais acurados, impulsionando o desenvolvimento de uma nova geração de Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS). Estes sistemas são projetados para proporcionar precisão na determinação de posição em qualquer ponto da Terra, independentemente das condições meteorológicas. Vários países estabeleceram suas próprias constelações GNSS para garantir essa capacidade fundamental. Entre elas, destacam-se o Sistema de Navegação por Satélite BeiDou (BeiDou Navigation Satellite System - BDS) da China, o Sistema Global de Navegação por Satélite Galileo (Galileo Navigation Satellite System - Galileo) da União Europeia, o (GLObal NAVigation Satellite System - GLONASS) da Rússia, e o Sistema de Posicionamento Global (Global Positioning System - GPS) dos Estados Unidos (IGS, 2022).

Há também os sistemas regionais de navegação, sendo possível citar: Índia - Sistema de Navegação por Satélite Regional Indiano/NavIC (Indian Regional Navigation Satellite System- IRNSS/NavIC); Japão - Sistema de Satélite Quase-Zenith (Japanese Quasi-Zenith Satellite System - QZSS); Coreia do Sul - Sistema de Posicionamento Regional da Coreia do Sul (Regional South Korean Positioning System - KPS) (IGS, 2022)..

Entre os sistemas de aumento é possível dividi-los nas categorias: Sistema de Aumento de Desempenho Baseado em Satélite (Satellite-Based Augmentation System - SBAS), Sistema de Aumento Baseado em Aeronave (Aircraft-Based Augmentation System - ABAS), Sistema Regional de Aprimoramento Baseado em Terra (GRAS) e Sistema de Aumento de Desempenho Baseado em Terra (Ground-Based Augmentation System - GBAS) (ICAO, 2018).

2.2 Sistemas de Aumento

Apesar das vantagens oferecidas pelo sistema de posicionamento atual, ele ainda não atende completamente às exigências rigorosas da indústria da aviação. Para suprir essas demandas, é essencial a implementação de sistemas de aumento como o Satellite-Based Augmentation System (SBAS) e o Ground-Based Augmentation System (GBAS). Enquanto o SBAS utiliza satélites geoestacionários para aumentar o desempenho e a área de cobertura do posicionamento, o GBAS emprega infraestruturas terrestres com o mesmo propósito (KRUEGER, 2020). Especificamente, esses sistemas visam proporcionar maior precisão, integridade e disponibilidade dos sinais de navegação, essenciais para garantir a segurança e eficiência das operações aéreas (FAA, 2022).

Os Sistemas de Aumento projetados para aprimorar suas capacidades operacionais são classificados em quatro categorias (FAA, 2021).

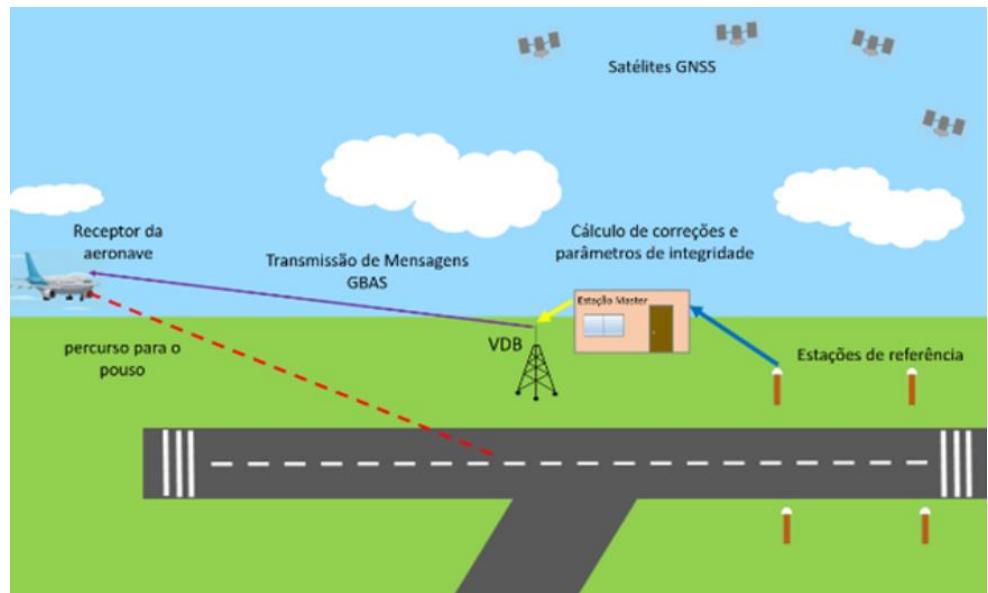
- O Sistema Regional de Aprimoramento Baseado em Terra (GRAS) dedica-se a otimizar a precisão da navegação por satélite em áreas geograficamente delimitadas.
- O ABAS emprega dispositivos instalados nas próprias aeronaves para corrigir os sinais GNSS.
- O SBAS utiliza uma constelação adicional de satélites para transmitir correções de sinal e melhorar a precisão global do sistema.
- O GBAS utiliza estações terrestres estrategicamente distribuídas para fornecer correções precisas em locais específicos, como aeroportos, proporcionando suporte crítico para operações de navegação aérea avançada e de alta precisão.

2.2.1 Ground Based Augmentation System - GBAS

O GBAS foi concebido para aplicações de precisão na aviação, inicialmente adaptado para operações de CAT-I, mas com vistas à ampliação para as categorias CAT-II e CAT-III.

No contexto das operações aeronáuticas de alta precisão, aeronaves equipadas com receptores GNSS dependem da recepção de dados corrigidos transmitidos por meio de VHF partir de estações GBAS situadas em proximidade das pistas dos aeroportos. Esta prática, ilustrada de maneira gráfica na Figura 1.

Figura 1: Arquitetura de um GBAS.



Fonte: Galera (2022).

Este sistema envolve o uso de uma antena VDB (VHF Data Broadcast), projetada especificamente para facilitar a disseminação eficiente de informações cruciais, como correções precisas de posicionamento e parâmetros de integridade. Essas informações são essenciais para assegurar a precisão e a confiabilidade da navegação por satélite das aeronaves equipadas com receptores GNSS (PEREIRA, 2018).

A correção da posição é determinada por um conjunto de estações de referência, equipadas com receptores de frequência (L1), instalados em coordenadas conhecidas. Este arranjo contribui significativamente para a redução de erros sistemáticos, garantindo a precisão necessária para operações CAT-I. É importante observar que o GBAS utiliza exclusivamente operadoras L1, compatíveis apenas com as constelações GPS e GLONASS, conforme certificado pela ICAO, que proíbe o uso da portadora L2 (ICAO, 2013).

O subsistema terrestre do GBAS é projetado para oferecer serviços de aproximação de precisão e posicionamento, sendo capaz de fornecer orientação durante o segmento de aproximação final. Além disso, o GBAS fornece dados de posição que suportam operações RNAV na área terminal. A estação terrestre do aeroporto transmite localmente correções pertinentes, parâmetros de integridade e informações de aproximação para aeronaves na faixa de frequência entre 108,000 MHz e 117,975 MHz (ICAO, 2005), utilizando seu processador.

As adaptações nas infraestruturas do GBAS são frequentemente implementadas para viabilizar múltiplas trajetórias de aproximação em um único aeroporto. O GBAS consiste em dispositivos eletrônicos instalados em diversas edificações aeroportuárias, além de antenas capazes de transmitir dados e captar sinais de satélites. A localização das antenas, embora não esteja diretamente relacionada à configuração das pistas, requer uma análise criteriosa para garantir sua eficácia (ICAO, 2005).

Adicionalmente, o GBAS representa uma alternativa inovadora ao ILS, utilizado convencionalmente para procedimentos de pouso de precisão e aproximação. Um sistema GBAS único pode fornecer suporte operacional a diversas pistas dentro do mesmo aeroporto, inclusive possibilitando a realização de manobras de aproximação em curva, o que dispensa a necessidade de alinhamento com o eixo central da pista no início dos procedimentos operacionais. Em contraste, o ILS exige que a aeronave esteja rigorosamente alinhada com o centro da pista e requer infraestrutura específica em cada extremidade para suportar os procedimentos de aproximação e pouso (PULLEN, 2017).

No contexto do subsistema embarcado na aeronave, destaca-se a importância crítica do receptor GNSS, responsável por receber e decodificar os sinais provenientes dos satélites GNSS, além de quaisquer correções necessárias para garantir a precisão e segurança das operações de navegação aérea.

2.3 Dinâmica e Risco Ionosférico

As ondas eletromagnéticas são capazes de se propagar através de um meio específico em frequências próximas às utilizadas pelo GNSS. A atmosfera terrestre, devido às suas propriedades físicas e químicas, pode ser subdividida em duas camadas principais que influenciam a propagação dessas ondas: A troposfera (até 50 quilômetros de altura), caracterizada pela sua composição predominantemente neutra em termos elétricos, permite a propagação eficiente e não dispersiva das ondas eletromagnéticas; e a ionosfera (de 50 quilômetros até aproximadamente 1.000 km de altura) que representa uma região ionizada da atmosfera superior, onde a radiação ultravioleta solar ioniza moléculas gasosas, resultando na formação de elétrons livres. Esses elétrons livres afetam significativamente a

propagação das ondas eletromagnéticas devido às suas propriedades dispersivas (MENDONÇA, 2013).

A presença de condições ionosféricas perturbadas e eventos climáticos espaciais adversos pode gerar um ambiente desfavorável para operações do SBAS e do GBAS. Segundo Mendonça (2013), perturbações na ionosfera podem introduzir erros significativos nos sinais recebidos, comprometendo a confiabilidade das informações de posicionamento. Para Zhao (2021) as cintilações ionosféricas induzidas por bolhas de plasma equatorial (EPB's) representam uma fonte significativa de erro sistemático nos sistemas GNSS, especialmente em latitudes equatoriais e baixas. Essas cintilações são responsáveis por variações de curto período nos sinais recebidos, afetando adversamente sistemas de alta tecnologia que dependem de posicionamento preciso, como navegação aérea e terrestre. As flutuações diurnas na ionosfera são provocadas por alterações localizadas que ocorrem ao longo do ciclo solar diário, sendo que tais variações tendem a reduzir-se durante o período noturno devido ao processo de recombinação e recaptura de elétrons e íons (MCNAMARA, 1991; CAMARGO, 1999).

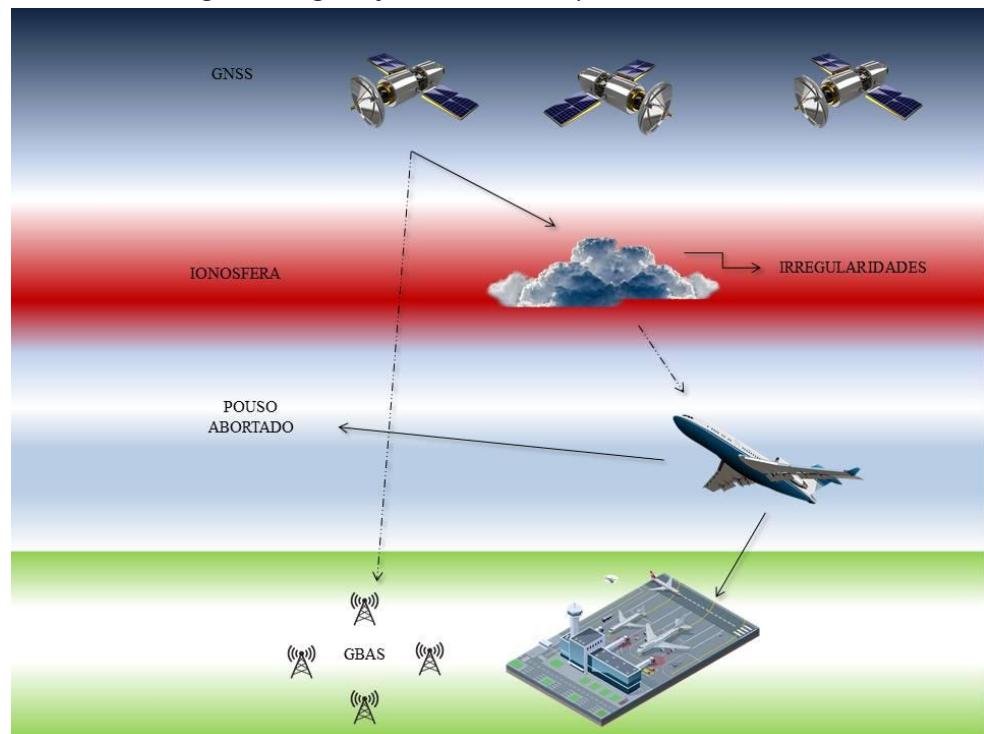
As EPB's têm o potencial de provocar flutuações abruptas na amplitude e na fase dos sinais de rádio ao atravessarem a ionosfera, ocasionando cintilações ionosféricas que, por sua vez, podem resultar em interrupções na comunicação via satélite.

Segundo McNamara (1991), a densidade eletrônica na ionosfera varia sazonalmente devido às mudanças na declinação solar e à intensidade do fluxo de ionização. No hemisfério sul, os picos máximos de densidade eletrônica ocorrem aproximadamente durante os equinócios, nos meses de março, abril, setembro e outubro e no solstício de verão, enquanto os valores mínimos são observados no solstício de inverno (MATSUOKA, 2007; MONICO, 2008).

A funcionalidade de navegação GNSS pode ser comprometida quando vários satélites se tornam temporariamente indisponíveis para o cálculo de posicionamento, devido ao desvanecimento do sinal induzido pelas cintilações ionosféricas.

A Figura 2 reitera o conceito e a necessidade do GBAS, demonstrando sua capacidade de fornecer correções de alta precisão aos sinais provenientes de satélites. Este sistema é essencial para garantir a segurança e a eficiência operacional dos aeroportos, especialmente durante operações de aproximação e pouso em condições de visibilidade reduzida.

Figura 2: Degradão do sinal e a disponibilidade do GBAS.



Fonte: Autora (2023).

Para atender aos exigentes requisitos de desempenho de navegação estabelecidos pela ICAO, é imperativo aplicar critérios rigorosos para mitigar a variabilidade dos erros ionosféricos entre a aeronave e as estações de referência (DATTA BARUA et al., 2010). Este controle estratégico é essencial para assegurar a integridade e a precisão dos dados de posicionamento fornecidos pelo sistema GBAS durante as operações aéreas, reforçando a confiabilidade e a eficácia do sistema em contextos aeronáuticos.

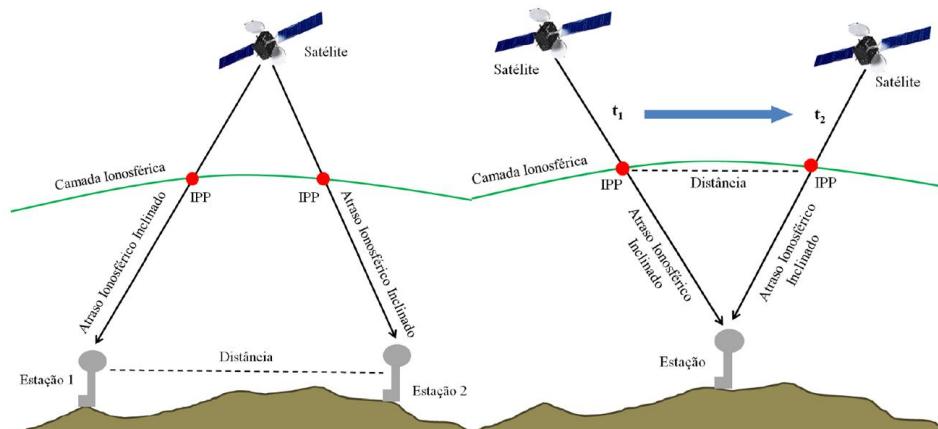
2.4 Certificação, Segurança e Gradiente Ionosférico

Segundo Pereira (2018), pesquisadores da Universidade de Stanford desenvolveram um sofisticado modelo de avaliação de risco ionosférico com o propósito de mensurar a máxima correlação espacial observada entre o atraso na transmissão de sinais de um satélite para uma estação de referência e o atraso do mesmo sinal quando recebido pelo receptor instalado em uma aeronave. Essa métrica é formalmente conhecida como gradiente ionosférico, conforme descrito por Datta-Barua et al. (2010). Gradientes ionosféricos referem-se às variações na densidade de elétrons na ionosfera. E podem causar erros na posição estimada pelo GPS, o que é crítico para a aviação, especialmente durante as aproximações e pousos. Essas variações podem ser espaciais ou temporais. Conhecer os gradientes ionosféricos permite prever e corrigir esses possíveis erros, aumentando a precisão e integridade dos dados de posicionamento e, consequentemente, a segurança dos voos.

Estes Gradientes ionosféricos podem ser calculados por dois métodos principais: station-pair e time-step. O método station-pair compara variações na densidade de elétrons entre pares de estações terrestres utilizando sinais de

satélites específicos, enquanto o método time-step analisa variações temporais em sinais recebidos por uma única estação ao longo do tempo a partir de múltiplos satélites (LEE et al., 2007).

Figura 3: Determinação do gradiente ionosférico pelo Station-Pair Method x time-Step method.



Fonte: Pereira (2018).

O cálculo do gradiente ionosférico (g) envolve a análise das variações nos atrasos ionosféricos medidos em dois instantes distintos, t_1 e t_2 . O atraso ionosférico ($I(t)$) é a contribuição do tempo de propagação de um sinal de rádio devido à presença de elétrons na ionosfera.

Em um primeiro momento, são medidos os atrasos ionosféricos no instante t_1 e t_2 , resultando em $I(t_1)$ e $I(t_2)$, respectivamente. A diferença entre esses dois valores é calculada como:

$$\Delta I = |I(t_2) - I(t_1)| \quad (1)$$

Para calcular o gradiente, é necessário conhecer a distância entre os pontos de interseção com a ionosfera (IPP) correspondentes a t_1 e t_2 . Esses pontos de interseção são as posições na ionosfera onde o sinal do satélite atravessa a camada ionosférica.

A distância entre esses dois pontos de interseção é denotada por D_{IPP} .

O gradiente ionosférico é então determinado pela razão entre a diferença absoluta dos atrasos e a distância entre os IPP:

$$g = \frac{\Delta I}{D_{IPP}} \quad (2)$$

Onde:

ΔI é a variação absoluta do atraso ionosférico entre t_1 e t_2 .

D_{IPP} é a distância entre os pontos de interseção ionosféricos para t_1 e t_2 .

Esse cálculo fornece uma medida quantitativa da variação espacial do atraso ionosférico ao longo da trajetória do sinal, essencial para caracterizar as flutuações na densidade de elétrons e avaliar o impacto nas medições de navegação e comunicação por satélite (Pereira, 2018). O gradiente ionosférico é normalmente expresso em mm/km.

O modelo referido, designado como CONUS Threat Model, empregou dados GNSS obtidos ao longo de vários anos a partir da rede CORS (Continuously Operating Reference Stations) para a estimativa dos gradientes ionosféricos, considerando uma gama de cenários distintos de atividade ionosférica. O modelo é fundamentado em uma frente ionosférica que se propaga a uma velocidade horizontal predefinida, gerando gradientes de erro ionosférico (IEG) (MAYER et al., 2009). Os limites dos parâmetros são obtidos a partir do processamento de um conjunto de dados que inclui dias com alta e baixa variabilidade na densidade eletrônica da camada ionosférica. Os limites e variações dos parâmetros do modelo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Limites e variações dos parâmetros do CONUS Threat Model.

Parâmetro	Limite ou Variação do Parâmetro	
Gradiente Ionosférico Máximo	Elev. < 15°	375 mm/km
	15° < Elev. < 65°	375 + 50*(Elev. – 15°)/50 mm/km
	Elev. > 65°	425 mm/km
Velocidade da Frente Ionosférica	0 – 750 m/s	
Extensão da Frente Ionosférica	25 – 200 km	
Valor Máximo de Atraso Ionosférico	50 m	

Fonte: Datta-Barua et al. (2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No Brasil, os resultados preliminares dos esforços para estabelecer um modelo de ameaça ionosférica específico para a região foram documentados em publicações de Lee et al. (2015) e Yoon et al. (2017a). Esses estudos pioneiros forneceram uma base teórica e empírica fundamental para a caracterização das irregularidades ionosféricas que afetam os sistemas de navegação por satélite, abordando especificamente os desafios apresentados pela intensa atividade ionosférica nas baixas latitudes.

Para a análise detalhada dos gradientes ionosféricos, foi realizada uma comparação simultânea entre três representações gráficas em cada uma das datas especificadas. As representações incluíram: o gráfico que exibe os atrasos ionosféricos inclinados nas estações, o gráfico que mostra as elevações dos satélites observados em cada estação, e o gráfico que ilustra os gradientes ionosféricos.

Cada modelo gráfico foi projetado para capturar a dinâmica dos gradientes ionosféricos ao longo das diferentes estações do ano. Os resultados obtidos foram organizados em uma série de gráficos, os quais proporcionam uma visualização detalhada da relação entre os gradientes ionosféricos observados e os ângulos de

elevação dos satélites para cada data selecionada durante o período de estudo. Esses gráficos permitem uma análise abrangente das variações dos gradientes ionosféricos em função das mudanças sazonais e dos parâmetros de observação dos satélites.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

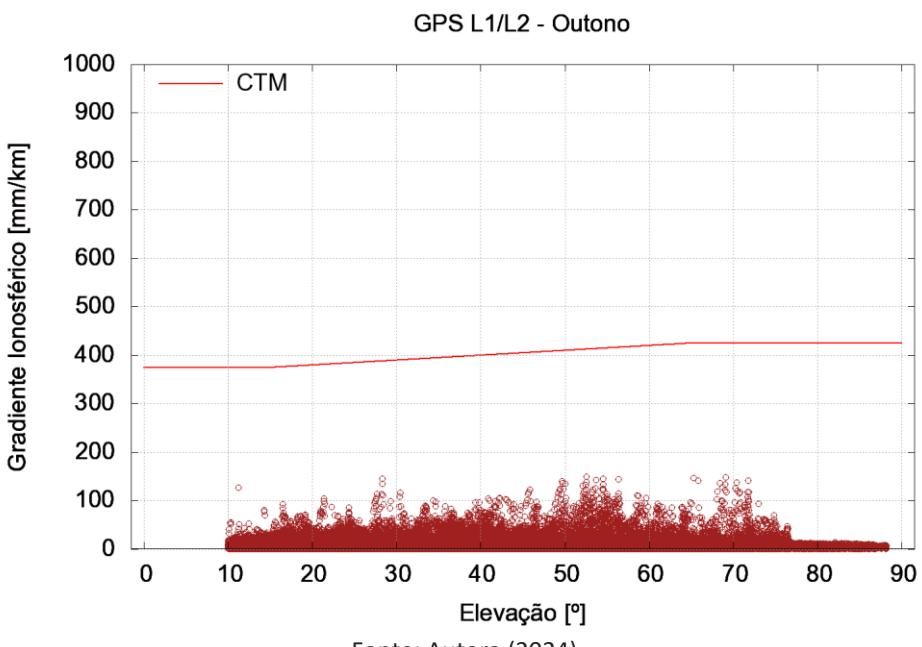
4.1 Gradiente Ionosférico x Elevação

A elevação corresponde ao ângulo formado entre a linha de visão do receptor GNSS e o horizonte, sendo que ângulos de elevação mais elevados indicam um percurso mais curto do sinal através da ionosfera. A Figura 34 ilustra a distribuição dos gradientes em função do ângulo de elevação do satélite, destacando, em vermelho, o limite do modelo de ameaça ionosférica CONUS, utilizado como referência.

a) Outono

No gráfico referente ao Outono (Figura 4), os dados observacionais revelam uma dispersão significativa do gradiente ionosférico em baixas elevações (0º a 20º). Essa dispersão indica uma alta variabilidade nas condições ionosféricas, caracterizada por flutuações na densidade de elétrons. Notou-se que, em elevações mais baixas, os valores do gradiente ionosférico alcançam até aproximadamente 150 mm/km, com alguns pontos outliers atingindo valores acima de 200 mm/km. A linha de referência do método CONUS, situada em torno de 400 mm/km, se mantém relativamente estável ao longo de todas as elevações.

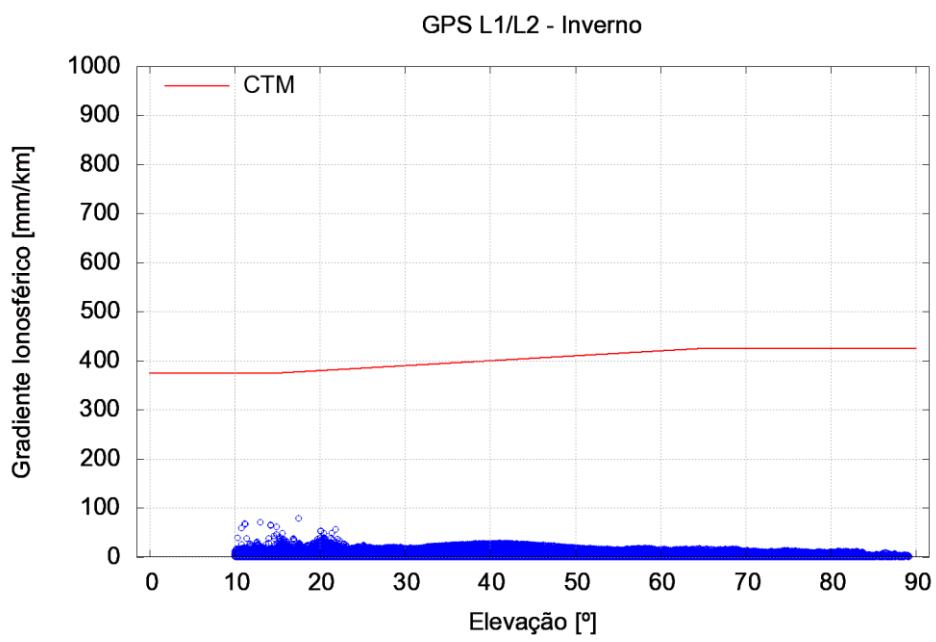
Figura 4: Resultado de Gradiente Ionosférico com relação a Elevação no Outono



b) Inverno

A análise dos dados ionosféricos obtidos durante o período de Inverno evidencia uma estabilidade pronunciada nos gradientes ionosféricos, refletida na menor dispersão dos pontos de dados ao redor da linha de referência estabelecida pelo modelo de ameaça ionosférica CONUS, conforme mostra a figura 5. Observa-se uma aglomeração predominante de pontos em elevações inferiores a 30°, majoritariamente situados abaixo de 100 mm/km, o que sugere uma redução significativa na variação dos gradientes ionosféricos nesse período. Esse comportamento implica que, no Inverno, a ionosfera manifesta menor incidência de perturbações e uma maior uniformidade na distribuição da densidade eletrônica, resultando em gradientes menos acentuados. Tal padrão é consistente com o entendimento de que a atividade solar reduzida e as condições atmosféricas mais estáveis típicas do Inverno minimizam os efeitos perturbadores na ionosfera. A linha de referência do método CONUS, representada em vermelho, mantém-se em torno de 400 mm/km, e a proximidade dos dados observacionais a esta linha aponta para uma baixa variabilidade sazonal e espacial. Esses achados sugerem que o ambiente ionosférico durante o Inverno é mais previsível, favorecendo a navegação precisa assistida por GBAS, dado o menor grau de variabilidade dos gradientes ionosféricos nesse período.

Figura 5: Resultado de Gradiente Ionosférico com relação a Elevação no Inverno



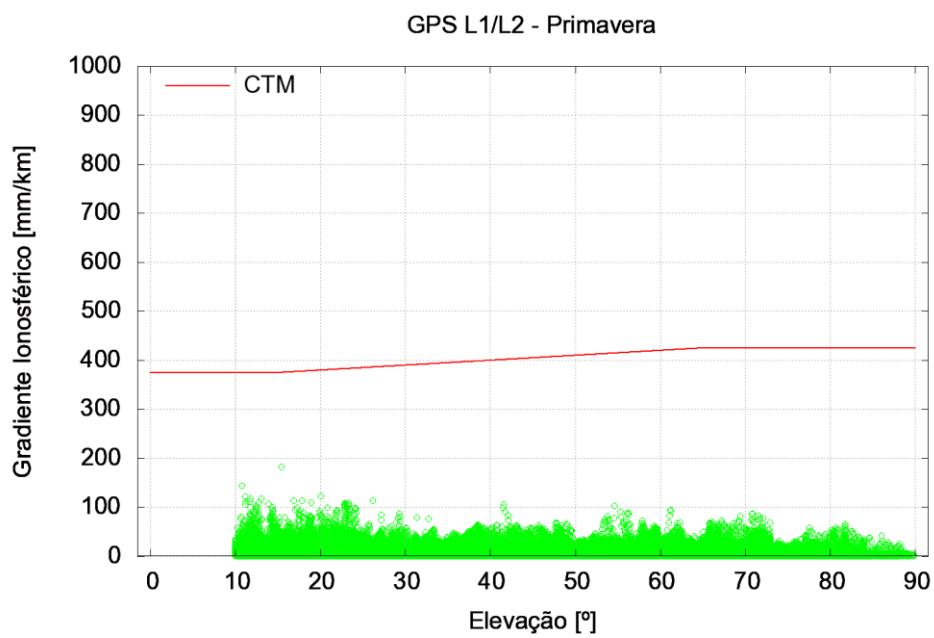
Fonte: Autora (2024).

c) Primavera

No período da Primavera (Figura 6), verificou-se uma variabilidade moderada nos gradientes ionosféricos, refletida por uma dispersão significativa dos dados em elevações baixas (0° a 30°). Nessa faixa, os pontos de dados distribuem-se até aproximadamente 100 mm/km, com alguns outliers excedendo esse limite e atingindo valores próximos de 150 mm/km. Essa dispersão evidencia que, embora a ionosfera apresente um grau de estabilidade superior ao registrado no Verão, ainda persistem flutuações substanciais que podem impactar negativamente a precisão dos sistemas de navegação por satélite. A linha de referência do modelo

de ameaça ionosférica CONUS mantém-se estável em torno de 400 mm/km, independentemente das variações de elevação. Contudo, a disposição dos dados observacionais sugere que a densidade eletrônica e os gradientes ionosféricos continuam a ser moderadamente influenciados por fenômenos sazonais, como o aumento da atividade solar característico da Primavera. Tais condições indicam que, embora a Primavera ofereça um ambiente ionosférico relativamente mais estável em comparação com o Verão, a presença de variações significativas nos gradientes ionosféricos requer considerações adicionais para manter a precisão operacional dos sistemas GBAS, dado o potencial impacto dessas flutuações na confiabilidade da navegação por satélite.

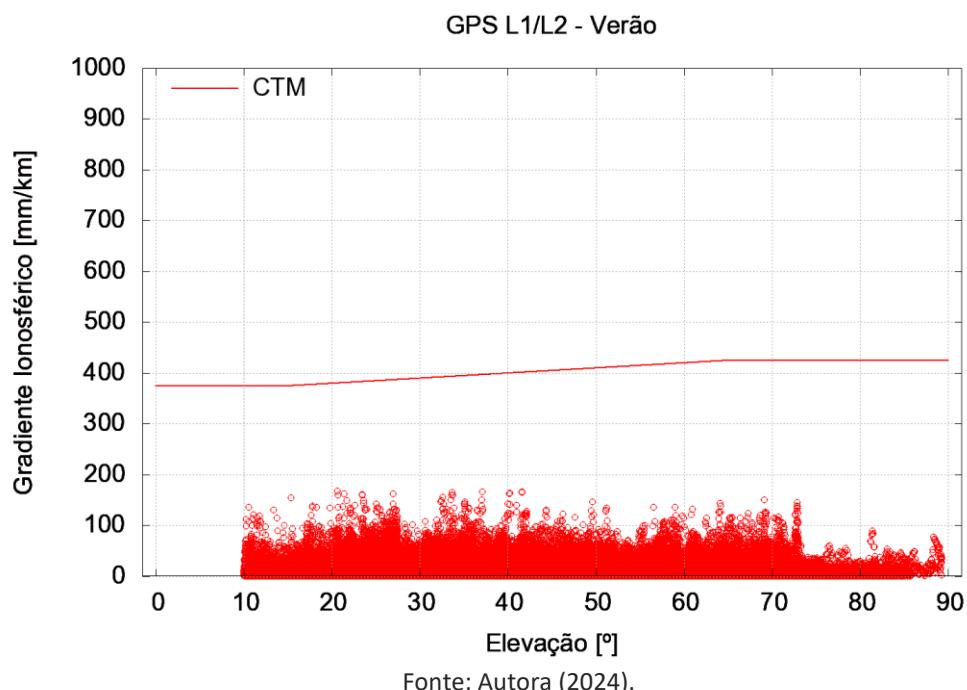
Figura 6: Resultado de Gradiente Ionosférico com relação a Elevação na Primavera



d) Verão

O Verão (Figura 7) apresenta maior dispersão nos dados de gradiente ionosférico entre todas as estações. Observa-se que, em elevações baixas e médias (0° a 50°), os pontos de dados se espalham significativamente, alcançando valores de gradiente superiores a 200 mm/km e, em alguns casos, se aproximando de 300 mm/km ou mais. Essa dispersão reflete uma alta variabilidade no comportamento da ionosfera durante o Verão, com maiores flutuações na densidade eletrônica, o que pode ser atribuído à intensificação da atividade solar e a outros fenômenos atmosféricos sazonais, como tempestades geomagnéticas e anomalias ionosféricas equatoriais. A linha de referência do método CONUS, embora se mantenha em torno de 400 mm/km, claramente não captura totalmente a alta variabilidade observada nos dados de Verão.

Figura 7: Resultado de Gradiente Ionosférico com relação a Elevação no Verão



Fonte: Autora (2024).

4.2 Gradiente Ionosférico x Tempo Universal

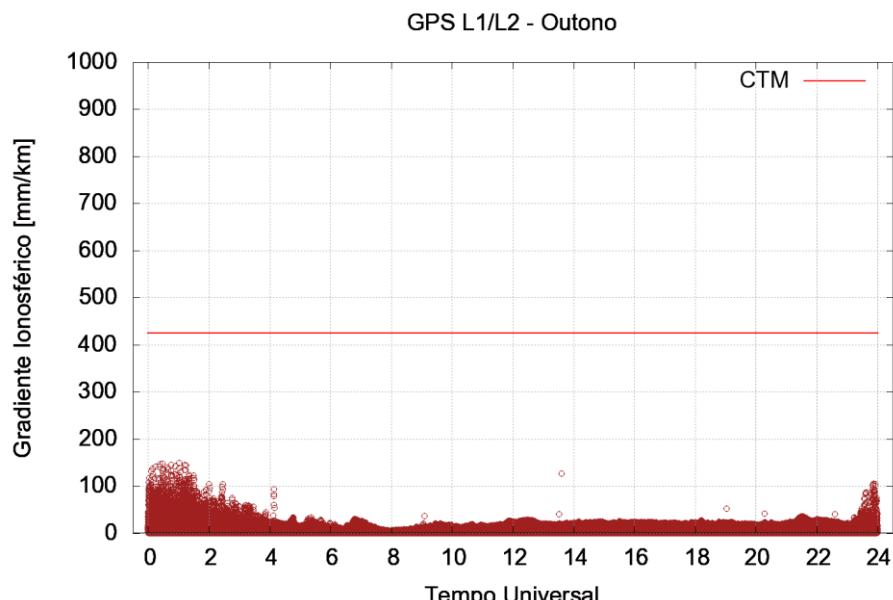
Segundo Astafyeva, Zakharenkova e Förster (2021), o Tempo Universal (UT) é a base de tempo usada globalmente para coordenar atividades em diferentes fusos horários, e a ionosfera é altamente dependente do ciclo diurno, sendo influenciada pela radiação solar.

No gráfico relativo ao outono, foi observado que os gradientes ionosféricos se concentraram predominantemente na faixa de 0 a 100 mm/km, com maior densidade de ocorrências entre 00h e 04h Tempo Universal. Durante este período, verificou-se uma maior variabilidade, sugerindo a ocorrência de perturbações ionosféricas devido à transição entre o dia e a noite. A dispersão dos valores diminui após as 04h UT, estabilizando em níveis baixos de gradiente até aproximadamente 22h UT, momento em que se nota um novo aumento. Este comportamento pode ser explicado pela ocorrência da Anomalia Equatorial de Ionização (EIA - Equatorial Ionization Anomaly), com intensificação do TEC e aumento dos gradientes ionosféricos ao entardecer.

a) Outono

No gráfico (Figura 8) relativo ao outono, foi observado que os gradientes ionosféricos se concentraram predominantemente na faixa de 0 a 100 mm/km, com maior densidade de ocorrências entre 00h e 04h Tempo Universal (UT). Durante este período, verificou-se uma maior variabilidade, sugerindo a ocorrência de perturbações ionosféricas devido à transição entre o dia e a noite. A dispersão dos valores diminui após as 04:00 UT, estabilizando em níveis baixos de gradiente até aproximadamente 22h UT, momento em que se nota um novo aumento. Este comportamento pode ser explicado pela ocorrência da EIA, com intensificação do TEC e aumento dos gradientes ionosféricos ao entardecer.

Figura 8: Resultado de Gradiente Ionosférico com relação ao Tempo Universal no Outono

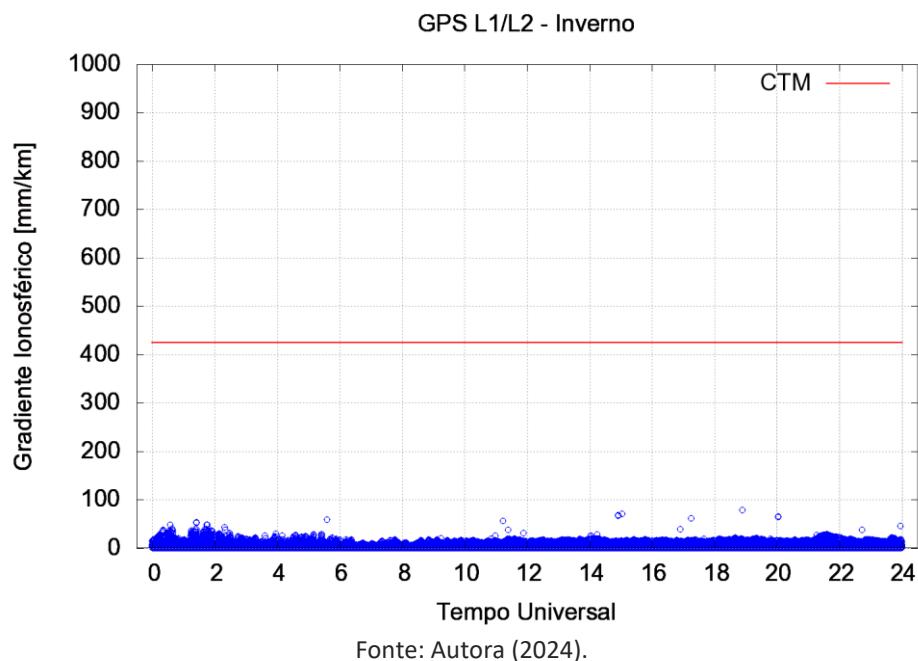


Fonte: Autora (2024).

b) Inverno

Para o inverno (Figura 9), os dados apresentam uma baixa variabilidade de gradientes ionosféricos, com valores mantidos majoritariamente abaixo de 100 mm/km ao longo de todo o período de 24 horas. A linha de referência de CTM permanece constante em 400 mm/km, sem ultrapassagens significativas, indicando que o inverno é uma estação de menor atividade ionosférica. Esta condição sugere uma ionosfera mais estável, com menores gradientes e, portanto, reduzido impacto na performance do GBAS. A estabilidade observada pode estar associada à menor incidência de radiação solar e à ausência de eventos de atividade geomagnética significativa que possam perturbar o TEC e, consequentemente, os gradientes ionosféricos.

Figura 9: Resultado de Gradiente Ionosférico com relação ao Tempo Universal no Inverno

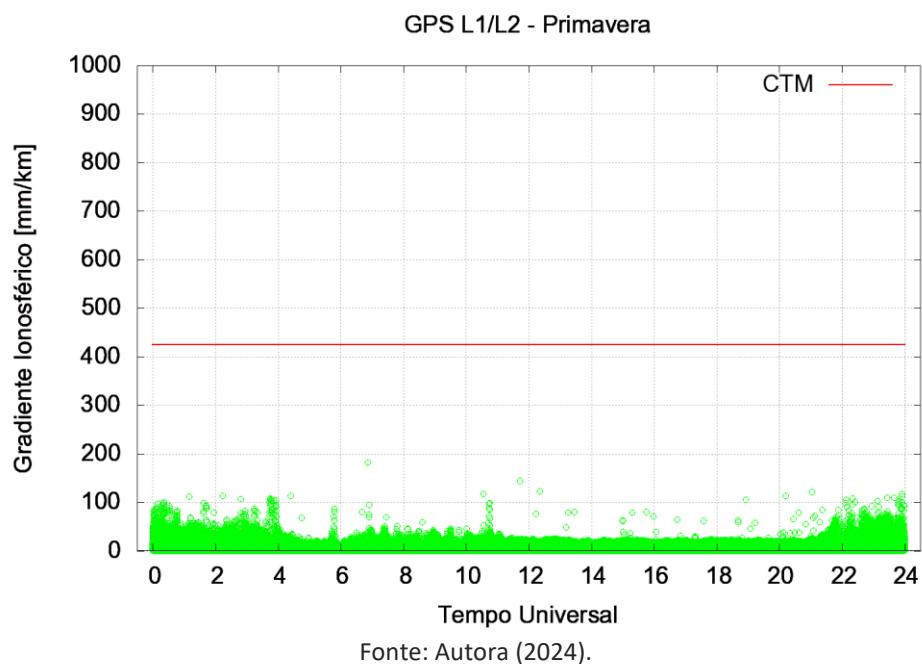


Fonte: Autora (2024).

c) Primavera

Na análise da primavera (Figura 10), é evidente uma maior dispersão dos dados quando comparado ao inverno, com uma concentração significativa de gradientes ionosféricos abaixo de 100 mm/km, mas com períodos de maior variabilidade entre 04h e 06h UT, e novamente após as 22h UT. Esta distribuição indica um aumento na atividade ionosférica, possivelmente devido ao início da intensificação da radiação solar que ocorre ao longo do dia, afetando a densidade de plasma na ionosfera. A variabilidade dos gradientes ionosféricos é também influenciada por dinâmicas de circulação atmosférica que afetam o transporte de plasma e podem contribuir para anomalias locais no TEC.

Figura 10: Resultado de Gradiente Ionosférico com relação ao Tempo Universal na Primavera

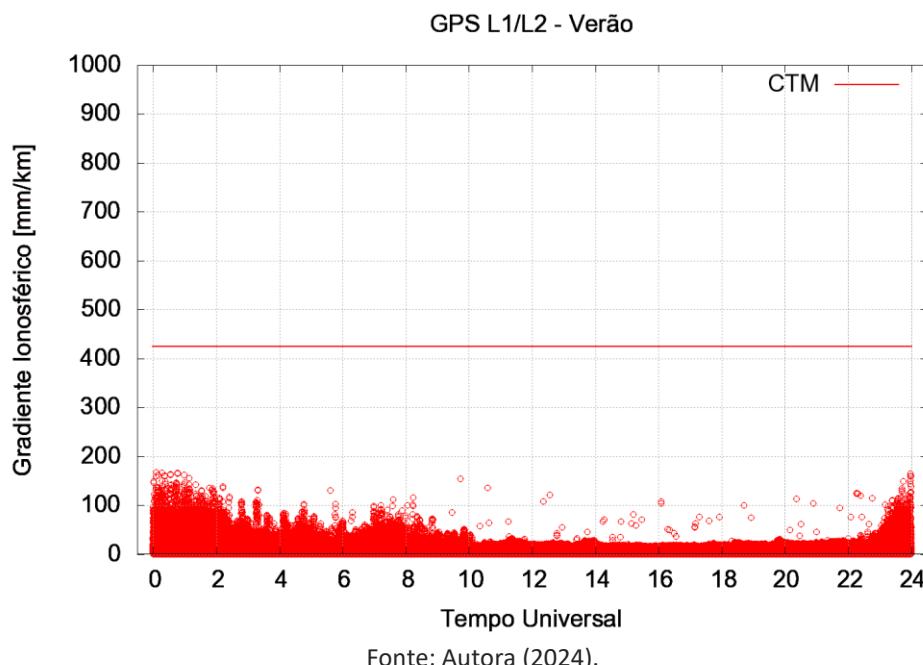


Fonte: Autora (2024).

d) Verão

O gráfico referente ao verão (Figura 11) demonstra uma atividade ionosférica mais pronunciada, com gradientes ionosféricos dispersos em uma faixa que atinge até 200 mm/km durante os períodos iniciais (00h às 04h UT) e finais (20h às 24h UT) do dia. Este comportamento reflete a intensificação dos efeitos da radiação solar máxima durante o solstício de verão, associado a uma maior incidência de irregularidades ionosféricas e bolhas de plasma que podem afetar a estabilidade dos sinais de navegação. A alta densidade de pontos e a distribuição mais ampla de valores indicam um risco elevado para operações de navegação aérea, exigindo um ajuste fino dos modelos de correção ionosférica para manter a integridade e precisão do GBAS.

Figura 11: Resultado de Gradiente Ionosférico com relação ao Tempo Universal no Verão.



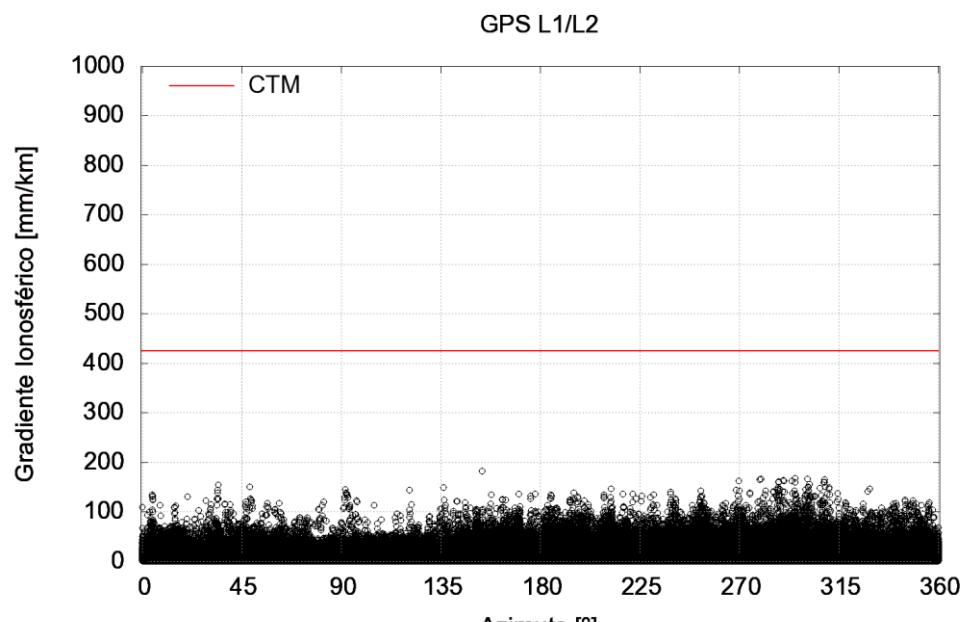
Fonte: Autora (2024).

4.3 Gradiente Ionosférico x Azimute

Conforme definido por Misra e Enge (2011), o azimute representa a direção horizontal em graus, medido a partir do Norte Geográfico, variando de 0° a 360° , sendo uma medida fundamental para a análise da variação dos gradientes ionosféricos conforme a direção de propagação do sinal.

No gráfico referente ao Gradiente Ionosférico em Função do Azimute (Figura 12), é evidente que os gradientes ionosféricos mantêm-se predominantemente abaixo de 100 mm/km, independentemente da direção (azimute) considerada. Essa distribuição indica uma ausência de variabilidade significativa dos gradientes ionosféricos em diferentes direções, sugerindo uma ionosfera relativamente homogênea ou a ausência de fenômenos ionosféricos que criem anisotropias ou direcionalidades específicas. Para o GBAS, a constância dos gradientes em diferentes direções implica que o sistema não enfrentará riscos adicionais devido à orientação do sinal. A ausência de gradientes elevados em direções específicas aumenta a confiabilidade do sistema de navegação, já que o desempenho será previsível em todas as direções de operação.

Figura 12: Gradiente Ionosférico em Função do Azimute



Fonte: Autora (2024).

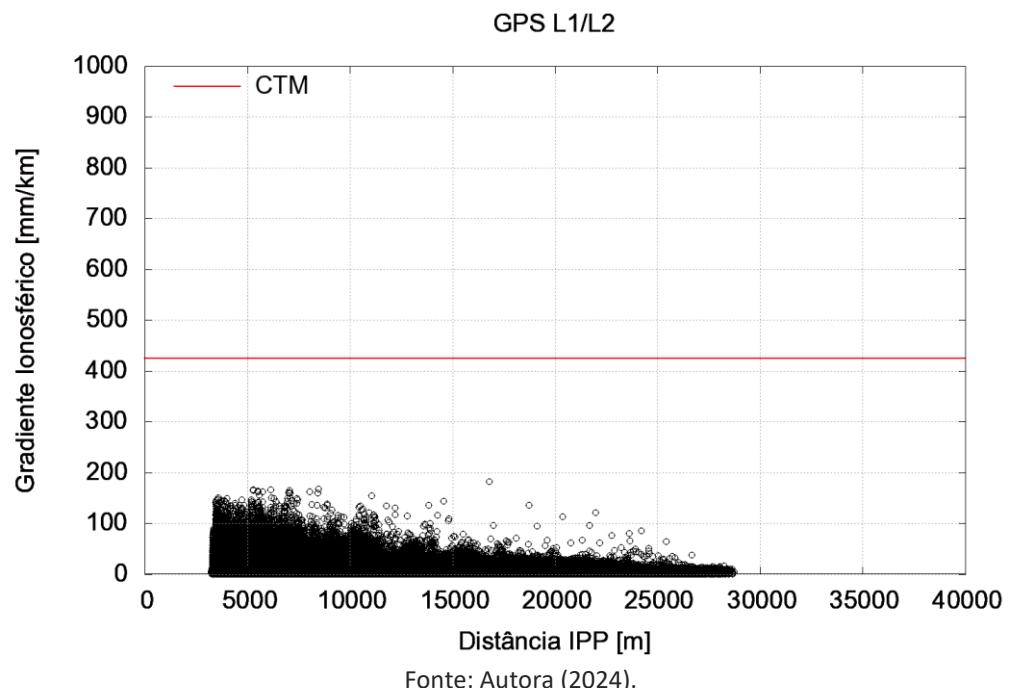
4.4 Gradiente Ionosférico x Distância IPP (Ionospheric Pierce Point):

De acordo com Leick, Rapoport e Tatarnikov (2015), o ponto de perfuração ionosférica (IPP) representa o ponto de intersecção entre a linha de visão de um satélite e um receptor no solo com a ionosfera, sendo a distância IPP uma medida que pode variar consideravelmente conforme a posição do receptor.

No gráfico referente ao Gradiente Ionosférico em Função da Distância IPP (Figura 13) mostra uma maior densidade de gradientes elevados próximos ao receptor, que diminui conforme a distância IPP aumenta. Isso sugere que a variabilidade ionosférica tem um impacto mais significativo em curtas distâncias. A queda nos gradientes com o aumento da distância também pode indicar que perturbações ionosféricas locais não se estendem muito além do IPP imediato.

Para o GBAS, essa relação é relevante porque gradientes elevados em curtas distâncias podem indicar um risco aumentado de erros para receptores posicionados próximos ao IPP. Entretanto, à medida que a distância IPP aumenta, o risco de erro ionosférico diminui, sugerindo que a maior vulnerabilidade ao erro ocorre em distâncias mais curtas, onde a ionosfera é mais perturbada.

Figura 13: Gradiente Ionosférico em Função da Distância IPP (Ionospheric Pierce Point):



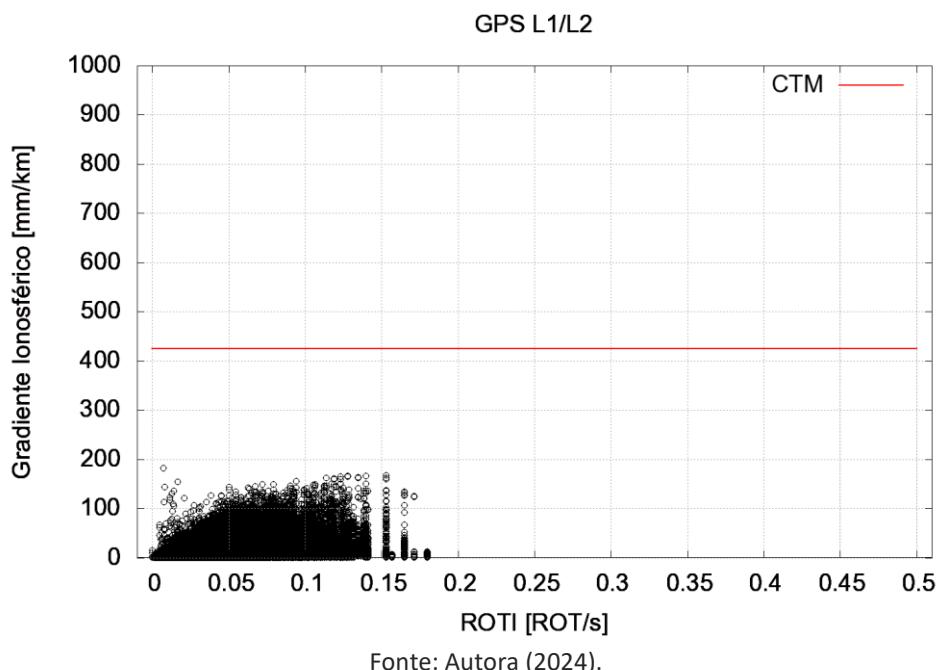
4.5 Gradiente Ionosférico x ROTI (Rate of TEC Index):

O ROTI (Rate of Total Electron Content Index) mede a variabilidade da densidade de elétrons na ionosfera ao longo do tempo, indicando flutuações que podem comprometer a precisão do sinal GNSS. Valores mais elevados de ROTI sugerem maior instabilidade ionosférica (CHERNIAK, ZAKHARENKOVA, e REDMON, 2018).

O gráfico do Gradiente Ionosférico em Função do ROTI (Figura 14) mostra que a maioria dos gradientes ionosféricos está concentrada em valores baixos de ROTI (abaixo de 0,1 ROT/s). Isso significa que, em condições de baixa variabilidade ionosférica, os gradientes permanecem baixos, reduzindo o risco de interferência no sinal GNSS. Poucos valores de gradiente são observados para ROTI acima de 0,15 ROT/s, sugerindo que eventos de alta variabilidade são raros ou não geram gradientes significativos na área de estudo.

A baixa concentração de gradientes em altas taxas de ROTI indica que o ambiente ionosférico estável reduz o risco de degradação do sinal. Contudo, em situações onde o ROTI é alto, mesmo que raras, pode haver um potencial para interferência, justificando o monitoramento contínuo das condições ionosféricas.

Figura 14: Gradiente Ionosférico em Função do ROTI



Fonte: Autora (2024).

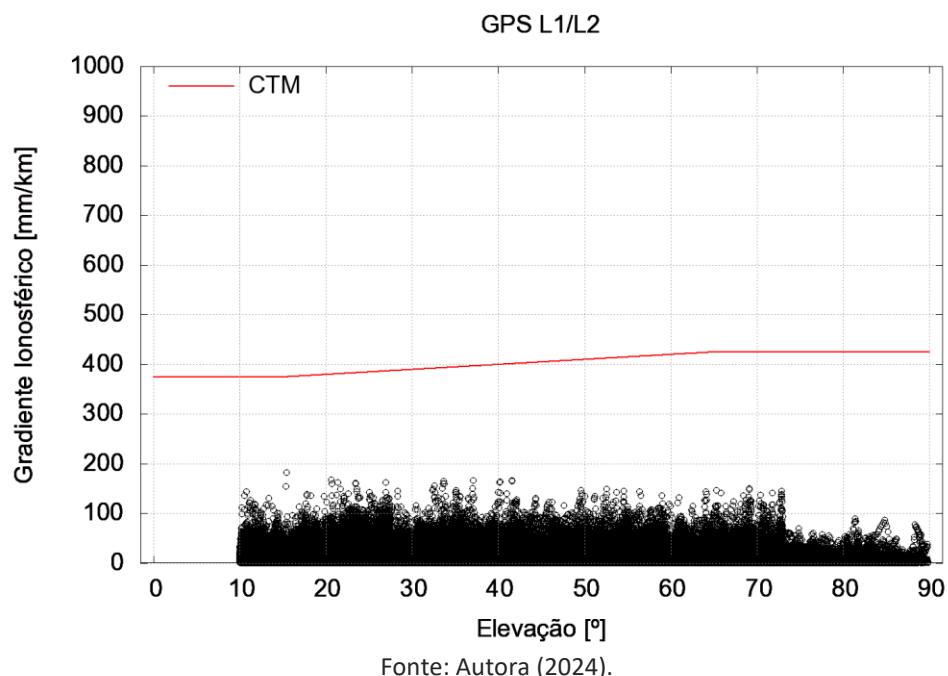
4.6 Gradiente Ionosférico x Elevação:

Segundo Zhu, Morton e van Graas (2021), os gradientes ionosféricos variam de forma significativa com a elevação dos sinais, afetando diretamente a precisão e a disponibilidade dos sistemas de navegação GBAS.

O gráfico do Gradiente Ionosférico em Função da Elevação (Figura 15) revela que os gradientes ionosféricos se mantêm relativamente baixos e estáveis para a maioria das elevações, com uma leve tendência de aumento à medida que a elevação se aproxima de 90°. Isso é consistente com o fato de que, em maiores elevações, o caminho do sinal pela ionosfera é menor, reduzindo o impacto de gradientes elevados.

Para o GBAS, a relação entre elevação e gradiente sugere que o risco ionosférico é minimizado para satélites com ângulos de elevação altos. No entanto, em baixas elevações, onde o sinal passa por uma porção maior da ionosfera, há um potencial maior de erro, justificando o uso de modelos de correção ionosférica baseados na elevação.

Figura 15: Gradiente Ionosférico em Função da Elevação

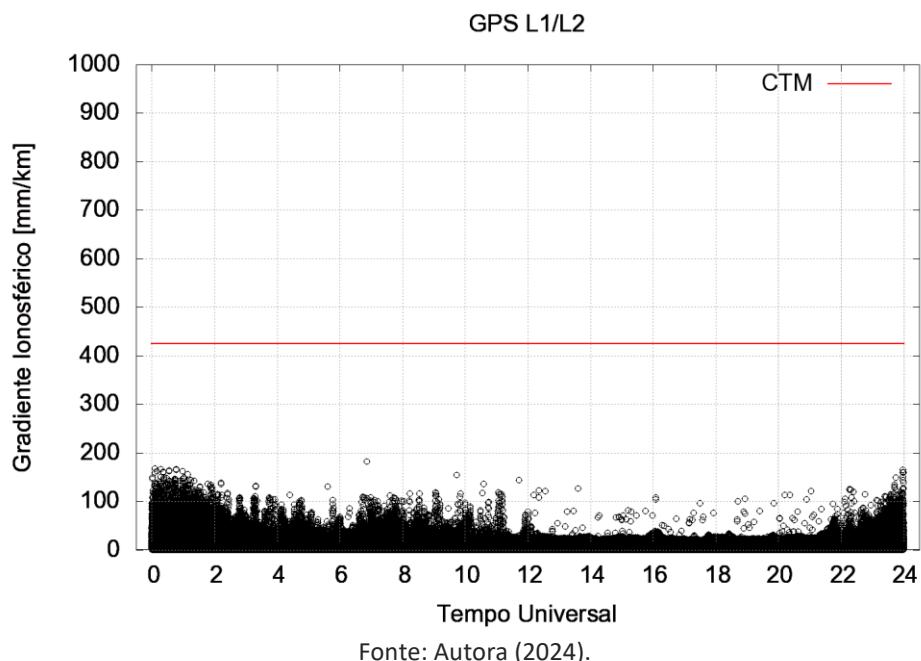


4.7 Gradiente Ionosférico x Tempo Universal (UT):

O gráfico do Gradiente Ionosférico em Função do Tempo Universal (Figura 16) mostra uma distribuição dos gradientes ionosféricos ao longo do dia, com uma densidade maior de valores baixos durante as horas diurnas e alguns picos de gradientes durante a noite, especialmente próximo ao final do dia. Este padrão pode ser associado às variações diurnas da densidade de elétrons na ionosfera, que aumentam durante o dia devido à ionização solar e diminuem à noite.

Para o GBAS, é crucial entender a variabilidade temporal dos gradientes ionosféricos. Durante o dia, quando a ionosfera é mais ativa, pode-se esperar maior estabilidade em termos de gradientes menores, enquanto à noite, a redução da ionização pode levar a maiores flutuações e, portanto, a um risco ligeiramente aumentado de erro ionosférico.

Figura 16: Gradiente Ionosférico em Função do Tempo Universal



Fonte: Autora (2024).

5 CONCLUSÃO

O presente estudo promoveu um aprofundamento significativo no entendimento das capacidades e limitações dos sistemas SBAS e GBAS aplicados à aviação geral, com um enfoque especial nas condições operacionais no Aeroporto Internacional de Val de Cans, Belém - Júlio Cezar Ribeiro. A análise mostrou que, apesar de serem tecnologias complementares, cada sistema apresenta características únicas que impactam diretamente na segurança e na eficiência das operações aéreas.

O presente trabalho destacou que o GBAS, embora ofereça a vantagem de uma instalação única por aeroporto, demonstrou algumas limitações em sua implementação inicial no Brasil, como observado no Aeroporto do Rio de Janeiro entre 2011 e 2014. Durante esses testes, o sistema apresentou falhas críticas que indicam a necessidade de revisões técnicas rigorosas antes de uma adoção em larga escala. Ao contrário do estudo realizado sobre o Aeroporto Internacional de Recife (SBRF) que indicou que devido à sua proximidade com o equador magnético e aos efeitos da Anomalia Ionosférica Equatorial (AIE), os gradientes estimados atenderam ao limite do CONUS Threat Model durante todo o ano, exceto no verão, entre 21h e 24h TU (18h e 21h no horário local). E neste caso, recomendou-se o uso do GBAS nessa região durante todo o ano, com exceção desse intervalo de horário no verão.

Com base nos resultados obtidos e nos gráficos apresentados neste estudo, é possível concluir que a certificação do sistema GBAS para o Aeroporto de Belém é viável. Os gráficos demonstraram que o GBAS pode operar com precisão e confiabilidade sob as condições ionosféricas específicas da região, atendendo aos requisitos estabelecidos pelas normas internacionais da ICAO e FAA. Além disso, o GBAS apresenta vantagens econômicas em relação ao sistema ILS tradicional e pode ser ajustado para as condições locais de Belém, além de apresentar uma

economia de aproximadamente 35% nos custos totais de instalação e manutenção.

A adoção de estratégias como o desenvolvimento de modelos de risco ionosférico locais e de um manual técnico específico reforça sua capacidade de obter a certificação necessária, tornando-se uma opção eficaz e segura para melhorar a infraestrutura de navegação aérea do aeroporto de Belém.

Um dos principais desafios identificados foi a influência das condições ionosféricas sobre a precisão e confiabilidade dos sistemas de navegação. O estudo revelou que diferentes estações do ano e atividades solares afetam de maneira distinta os gradientes ionosféricos. Durante o verão, verificou-se a maior dispersão nos dados de gradientes ionosféricos, com valores que excedem 200 mm/km em elevações baixas e médias, o que evidencia a necessidade de modelos de correção ionosférica mais dinâmicos e específicos para esta estação. No inverno, os gradientes se mostraram mais estáveis e concentrados abaixo de 100 mm/km, indicando menor atividade ionosférica e, portanto, menor risco de interferência nos sinais. A primavera e o outono apresentaram características intermediárias, com dispersões moderadas e variações dependentes da hora do dia e da elevação dos satélites.

A partir das evidências obtidas, conclui-se que a adoção de sistemas como o GBAS, aliado a um planejamento estratégico que contemple as variações ionosféricas e a realidade operacional de cada aeroporto, é fundamental para aumentar a segurança e eficiência das operações de voo. A resiliência do sistema de navegação aérea deve ser continuamente aprimorada com a incorporação de novas tecnologias, o monitoramento constante das condições espaciais e atmosféricas e o desenvolvimento de procedimentos operacionais adaptativos.

Ionospheric Temporal Risk Model utilization for GBAS certification at Belém International Airport/PA

ABSTRACT

With the evolution of the information age and the intensification of globalization, there has been a significant advancement and transformation in the technological field, where the routine use of satellite systems emerges as a milestone. This study focused on the use of a specific Ionospheric Temporal Risk Model aimed at supporting the certification of a GBAS. The research was conducted at the Belém/Val-de-Cans Júlio Cezar Ribeiro International Airport, using the Ion_Index software. From the development of the Ionospheric Risk Model, the ROTI Irregularity Index was obtained for the years between 2012 and 2024. This model allowed for the identification of potential restriction windows for the use of GBAS based on the time of occurrence and seasons of the year. The CONUS method was used both in the Ionospheric Gradient and Elevation relationship and in the Gradient and Universal Time relationship. In both relationships, winter presented more stable conditions for navigation, while summer showed greater ionospheric instability. Based on the results obtained and the graphs presented in this study, it was possible to conclude that the certification of the GBAS system for Belém Airport is feasible.

KEYWORDS: GBAS; Air Navigation; Safety; Ionospheric Risk Model.

REFERÊNCIAS

CAMARGO, Paulo O. de; MONICO, J. F. G.; GALERA, M. M. Estudo das perturbações ionosféricas na navegação aérea. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 125-140, 1999.

DATTA-BARUA, S.; LEE, J.; ENGE, P.; KEE, C.; BREEN, P.; REBELLO, R. Ionospheric threat model for the conterminous United States. **Journal of Navigation**, Cambridge, v. 63, n. 1, p. 7-25, 2010. DOI: 10.1017/S0373463309990250.

DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Manual de operações de CNS/ATM**. Rio de Janeiro: DECEA, 2021. Disponível em: <http://www.decea.gov.br>. Acesso em: 15 set. 2024.

EUROCONTROL. GNSS performance based navigation. **Eurocontrol Document**, Bruxelas, 2023. Disponível em: <https://www.eurocontrol.int/>. Acesso em: 18 set. 2024.

FAA – Federal Aviation Administration. Ground based augmentation system – CAT II/III operations. Washington, D.C.: FAA, 2022. Disponível em: <https://www.faa.gov/>. Acesso em: 15 set. 2024.

GALERA, F. Arquitetura de um sistema GBAS: um estudo de caso. **Revista de Engenharia Aeroespacial**, São José dos Campos, v. 12, n. 2, p. 50-67, 2022.

ICAO – International Civil Aviation Organization. **GNSS manual (Doc 9849)**. 3. ed. Montreal: ICAO, 2018. Disponível em: <https://www.icao.int/>. Acesso em: 20 set. 2024.

ICAO – International Civil Aviation Organization. Standards and recommended practices for GNSS. Montreal: ICAO, 2005. Disponível em: <https://www.icao.int/>. Acesso em: 18 set. 2024.

KRUEGER, C. Advances in GNSS positioning systems for aviation. **Journal of Aerospace Engineering**, Chicago, v. 45, n. 4, p. 401-415, 2020.

LEE, J.; PARK, C.; ENGE, P.; DATTA-BARUA, S.; JUNG, H. Development of an ionospheric threat model for Brazil. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, New York, v. 51, n. 2, p. 124-136, 2015. DOI: 10.1109/TAES.2015.7117595.

MAYER, C.; PULLEN, S.; ZHAO, Y.; ENGEBRETSON, A.; ENGLE, P. Ionospheric threat model development for GNSS-based systems. **IEEE Aerospace Conference**, Big Sky, MT, p. 1-8, 2009. DOI: 10.1109/AERO.2009.4839468.

MCNAMARA, L. F. **The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding**. Malabar: Krieger Publishing Company, 1991. 560 p.

MENDONÇA, F. Perturbações ionosféricas e navegação aérea. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MISRA, P.; ENGE, P. **Global positioning system: signals, measurements, and performance**. 2. ed. Cambridge: Ganga-Jamuna Press, 2011. 842 p.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora da Unesp, 2008. 298 p.

PEREIRA, J. Modelagem do gradiente ionosférico para certificação GBAS. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Aeroespacial) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

PULLEN, S.; GAO, G.; ENGEBRETSON, A.; WALTER, T.; ENGLE, P. GNSS augmentation for precision approaches: a study of current systems. **Journal of Navigation**, Cambridge, v. 69, n. 2, p. 125-145, 2017. DOI: 10.1017/S0373463316000452.

ZHAO, Y.; CHEN, J.; WU, Y. Plasma bubble effects on GNSS systems in equatorial regions. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, New York, v. 212, n. 3, p. 25-35, 2021. DOI: 10.1016/j.jastp.2021.105412.

Recebido: 02 nov. 2025.

Aprovado: 09 dez. 2025.

DOI: 10.3895/rbpd.v14n2.19237

Como citar: GARCIA M.L. C. Utilização de um Modelo de Risco Ionosférico temporal para certificação de GBAS no Aeroporto Internacional de Belém/PA. **R. Bras. Planej. Desenv.** Curitiba, v. 15, n. 01, p. 49-74, jan./abr. 2026. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbpd>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Maria Luiza Castro Garcia

R. da Reitoria, 374 - Butantã, São Paulo - SP

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

