

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LARISSA MOREIRA PINHO

USO DO GNSS NA AVIAÇÃO CIVIL:  
AVALIAÇÃO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE PROCESSAMENTO NAS  
FASES DE NAVEGAÇÃO, APROXIMAÇÃO E POUSO DAS AERONAVES

CURITIBA

2021

LARISSA MOREIRA PINHO

USO DO GNSS NA AVIAÇÃO CIVIL:  
AVALIAÇÃO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE PROCESSAMENTO NAS  
FASES DE NAVEGAÇÃO, APROXIMAÇÃO E POUSO DAS AERONAVES

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sergio de Oliveira Junior.

Coorientadora: Profa. Dra. Cláudia Pereira Krueger.

CURITIBA

2021

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

LARISSA MOREIRA PINHO

### **USO DO GNSS NA AVIAÇÃO CIVIL: AVALIAÇÃO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE PROCESSAMENTO NAS FASES DE NAVEGAÇÃO, APROXIMAÇÃO E POUSO DAS AERONAVES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

---

Prof. Dr. Paulo Sergio de Oliveira Junior  
Orientador – Departamento Geomática, UFPR

---

Prof(a). Dra. Cláudia Pereira Krueger  
Co-orientadora - Departamento Geomática, UFPR

---

Prof. Dr. Vinícius Amadeu Stuani Pereira, UTFPR

---

Eng. Lucas dos Santos Bezerra, UFPR

Cidade, 23 de dezembro de 2021.

Dedico este projeto final ao meu marido Conrado, sem seu apoio esta jornada não seria possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pela saúde e disposição a mim proporcionada, possibilitando o término dessa graduação.

Agradeço aos meus pais, por todo amor, carinho e paciência, nunca mediram esforços para que eu chegasse até aqui, me inspiram a ser uma pessoa e profissional melhor a cada dia.

Agradeço as minhas irmãs, e a minha sogra, sempre presente e disposta a me auxiliar no que estava ao seu alcance.

Agradeço ao meu marido Conrado, pela parceria e companheirismo, foram dias e noites despendidas em função de estudos e pesquisas, sempre disposto a contribuir e me auxiliar.

Agradeço aos meus professores, mestres e doutores, pelos inúmeros ensinamentos, e dedicação em compartilhar o conhecimento.

Aos meus queridos orientadores, Prof. Dr. Paulo e Prof. Dra. Cláudia, por terem aceitado me acompanhar neste projeto.

Agradeço aos colegas de faculdade, e principalmente aos meus amigos Giovane, Priscila e July, presentes desde o primeiro semestre da graduação, foram inúmeras madrugadas, choros e alegrias compartilhadas, que nossa amizade permanece consolidada também em nossa vida profissional.

Ao prof. João Francisco Galera Monico da UNESP por ter disponibilizado dados do voo que foram utilizados neste projeto e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia: Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea - "INCT GNSS - NavAer".

*“Só o conhecimento destrói o medo e afasta o pânico. O conhecimento é único material necessário para construir teu barco. Depois basta a coragem para levantar âncoras, a força moral para continuar remando, e a inteligência para determinar qual o melhor curso a seguir na tua missão de desbravar os mares do mundo”.*

*Fernando Conrado*

## RESUMO

O uso de novas tecnologias na aviação civil é visto com prudência, sendo o fator primordial a segurança da navegação aérea, com a finalidade de atender as especificações expressas em termos de acurácia, integridade, disponibilidade e continuidade. Neste projeto final é feita uma revisão bibliográfica, destacando a linha do tempo da inserção do GNSS (*Global Navigation Satellite System*) na navegação aérea e a implementação do PBN (*Performance Based Navigation*). Conceito diretamente associado à utilização do GNSS que permite o atendimento dos requisitos de performance associados a todas as fases de voo (rota, área de controle terminal e aproximação para pouso). Entre as melhorias nas fases de aproximação e pouso, destaca-se os novos procedimentos como o RNAV, BARO-V-NAV e RNP-AR, em algumas localidades, possibilitando mínimos que chegam a 250 pés, baseados, somente, no GPS L1. Utilizando dados GNSS obtidos em voo, foram realizadas diversas estratégias de processamento no software RTKLIB visando analisar precisão e acurácia do posicionamento da aeronave. As estratégias de processamento foram baseadas nos fatores críticos atuais para navegação aérea, a utilização da frequência GPS L1, e o erro de refração ionosférica. A utilização de sistemas de aproximação e pouso com precisão utilizando GNSS, tais como o GBAS (*Ground Based Augmentation System*), ainda está em fase de testes em regiões de baixa latitude como o Brasil. A correção dos efeitos de primeira ordem da ionosfera, é possível através da combinação linear *iono-free*. Portanto, foi avaliada uma alternativa para mitigação do efeito ionosférico baseada em correções externas, tais como o modelo de correção da ionosfera IONEX TEC do IGS. Os resultados encontrados demonstram que em regiões de baixa latitude, o modelo ionosférico IONEX TEC não se mostrou tão efetivo quanto a correção *iono-free*. Dentro os processamentos realizados, em termos de análise comparativa entre as soluções dos métodos DGPS e relativo cinemático. As diferenças entre as duas soluções de posicionamento tiveram na componente vertical a que apresenta maior discrepância em termos de RMSE, da ordem de 0,87 m. Em planimetria os resultados indicam coerência entre as duas soluções que produz um RMSE da ordem de aproximadamente 35 cm.

Palavras-chave: Aviação, GNSS, Navegação Baseada em Performance, GBAS.

## ABSTRACT

The use of new technologies in civil aviation is handled prudently due to the safety of air navigation and the requirements of accuracy, integrity, availability and continuity. This final project carries out a literature review highlighting the timeline of the insertion of GNSS in air navigation and the implementation of the PBN; a concept directly associated with the use of GNSS that allows the fulfillment of the performance requirements associated with all phases of flight (route, terminal control area and landing approach). Among the improvements in the approach and landing phases, new procedures such as RNAV, BARO-V-NAV and RNP-AR stand out in some locations, enabling minima that reach 250 feet, based only on the GPS L1. Using GNSS data obtained in flight, several processing strategies were carried out in the RTKLIB software in order to analyze the precision and accuracy of the aircraft's positioning. The processing strategies were based on the current critical factors for air navigation, the use of the GPS L1 frequency, and the ionospheric refraction error. The use of precision approach and landing systems using GNSS, such as the GBAS (Ground Based Augmentation System), is still being tested in low-latitude regions such as Brazil. Correction of the first order effects of the ionosphere is possible through the linear combination iono-free. Therefore, an alternative for ionospheric effect mitigation based on external corrections, such as the IGS IONEX TEC ionosphere correction model, was evaluated. The results found show that in low latitude regions, the ionospheric model IONEX TEC was not as effective as the iono-free correction. Within the processing performed, in terms of comparative analysis between the solutions of DGPS and relative kinematic methods. The differences between the two positioning solutions had in the vertical component the one with the greatest discrepancy in terms of RMSE, in the order of 0.87 m. In planimetry the results indicate coherence between the two solutions which produces an RMSE of approximately 35 cm.

Keywords: Aviation, GNSS, *Performance based navigation*, GBAS.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DOC 9750 - GANP (4 níveis).....	27
FIGURA 2 - ÁREA DE RESPONSABILIDADE DO ATM NACIONAL.....	29
FIGURA 3 - EMPREENDIMENTOS SIRIUS BRASIL .....	30
FIGURA 4 - ESTAÇÃO MISTA VOR/DME (Aeroporto de Congonhas).....	32
FIGURA 5 - CARTA IAC/VOR/SBCT .....	33
FIGURA 6 - ANTENA NDB.....	34
FIGURA 7 - LOCALIZER E GLIDESLOP .....	35
FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DE AEROPORTO COM ILS .....	35
FIGURA 9 - MARCADORES DO PROCEDIMENTO ILS .....	36
FIGURA 10 - APROXIMAÇÃO AEROPORTO SANTOS DUMONT – RIO DE JANEIRO.....	36
FIGURA 11 - AUXÍLIO A NAVEGAÇÃO (MDE) .....	37
FIGURA 12 - AUXÍLIO A NAVEGAÇÃO (NDB).....	38
FIGURA 13 - AUXÍLIO A NAVEGAÇÃO (VOR) .....	38
FIGURA 14 - AERONAVE PHENOM 100EV EQUIPADA COM SISTEMA GPS .....	40
FIGURA 15 - CARTA SID RNAV/ANRET 1A/SBCT.....	42
FIGURA 16 - CARTA SID RNAV(RNP)/SBRJ.....	43
FIGURA 17 - ROTAS CONVENCIONAIS, RNAV e RNP .....	45
FIGURA 18 - TIPOS DE WAYPOINTS .....	46
FIGURA 19 - WAYPOINTS.....	46
FIGURA 20 - TRÁFEGO AÉREO MUNDIAL EM TEMPO REAL .....	50
FIGURA 21 - RAIM.....	53
FIGURA 22 - AERONAVE EQUIPADA COM SISTEMA SBAS.....	53
FIGURA 23 - PREVISÃO RAIM .....	54
FIGURA 24 - ARQUITETURA SBAS .....	55
FIGURA 25 - SISTEMAS SBAS .....	56
FIGURA 26 - ÁREA DE COBERTURA SBAS GAGAN .....	56
FIGURA 27 - PRECISÃO NA FASE DE POUSO UTILIZANDO SISTEMAS DE AUMENTO .....	57
FIGURA 28 - COMPARAÇÃO DE PRECISÃO COM O SBAS.....	58
FIGURA 29 - ARQUITETURA GBAS .....	59
FIGURA 30 - ESTAÇÕES GBAS .....	61

FIGURA 31 - EXEMPLO DE AEROPORTOS COM OPERAÇÃO GLS .....	62
FIGURA 32 - IONOSFERA.....	64
FIGURA 33 - REGIÕES DA IONOSFERA .....	66
FIGURA 34 - EXPLOSÕES SOLARES.....	66
FIGURA 35 - EQUADOR MAGNÉTICO.....	67
FIGURA 36 - ARQUITETURA DGPS.....	69
FIGURA 37 - CROQUI DE LOCALIZAÇÃO .....	72
FIGURA 38 - ESTAÇÃO RBMC NAS PRÓXIMIDADES DO VOO .....	74
FIGURA 39 - CONFIGURAÇÕES GNSS PLANNING (SÃO PAULO).....	76
FIGURA 40 - INFORMAÇÕES IONOSFERA (BAIXA LATITUDE).....	76
FIGURA 41 - CONFIGURAÇÕES GNSS PLANNING (NEW JERSEY) .....	77
FIGURA 42 - CONFIGURAÇÕES GNSS PLANNING (MÉDIA LATITUDE).....	77
FIGURA 43 - ÍNDICE KP E F10.7 .....	78
FIGURA 44 - SKYPLOT .....	80
FIGURA 45 - TRAJETÓRIA DOS SATÉLITES .....	80
FIGURA 46 - DOP .....	81
FIGURA 47 - NÚMERO DE SATÉLITES VÁLIDOS PARA O POSICIONAMENTO (DGPS_1).....	83
FIGURA 48 - POSIÇÃO EM CADA COMPONENTE DAS COORDENADAS (DGPS_1).....	83
FIGURA 49 - ACELERAÇÃO (DGPS_1).....	84
FIGURA 50 - VELOCIDADE (DGPS_1) .....	84
FIGURA 51 - ANÁLISE DA QUALIDADE DAS OBSERVÁVEIS EM TERMOS DE SNR E MULTICAMINHO PARA A FREQUÊNCIA L1 .....	85
FIGURA 52 - ANÁLISE DA QUALIDADE DAS OBSERVÁVEIS EM TERMOS DE SNR E MULTICAMINHO PARA A FREQUÊNCIA L2 .....	85
FIGURA 53 - DISCREPÂNCIAS NAS COMPONENTES DAS COORDENADAS ENTRE DGPS_2 E RELATIVO_13.....	92
FIGURA 54 - DISCREPÂNCIAS NAS COMPONENTES EM TERMOS DE VELOCIDADE .....	93
FIGURA 55 - DISCREPÂNCIAS NAS COMPONENTES EM TERMOS ACELERAÇÃO.....	94
FIGURA 56 - DISCREPÂNCIAS NAS COORDENADAS ENTRE PPP_8 E RELATIVO_13 .....	95

FIGURA 57 - DISCREPÂNCIAS NAS COMPONENTES EM TERMOS DE VELOCIDADE .....	96
FIGURA 58 - DISCREPÂNCIAS NAS COMPONENTES EM TERMOS DE ACELERAÇÃO.....	96
FIGURA 59 - DIFERENÇAS NAS COORDENADAS ENTRE RELATIVO_9 e DGPS_3.....	97

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CATEGORIAS ILS.....	37
TABELA 2 - ÁREAS DE APLICAÇÃO E PRECISÕES LATERAIS ASSOCIADAS AOS PROCEDIMENTOS PBN.....	44
TABELA 3 - FONTE E EFEITOS DOS ERROS ENVOLVIDOS NO GNSS.....	63
TABELA 4 - ESTIMATIVA DE PRECISÃO PARA POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO (PPP) .....	70
TABELA 5 - ESTIMATIVA DE PRECISÃO PARA POSICIONAMENTO GNSS RELATIVO .....	70
TABELA 6 - PRODUTOS IGS .....	73
TABELA 7 - COORDENADAS GEODÉSICAS SPJA.....	73
TABELA 8 - PROCESSAMENTOS REALIZADOS.....	75
TABELA 9 - ARQUIVOS DE ENTRADA PROCESSAMENTO DGPS.....	79
TABELA 10 - CONFIGURAÇÕES DOS PROCESSAMENTOS 1, 2 E 3.....	82
TABELA 11 - MÉDIAS DAS PRECISÕES INTERNAS (DESVIO PADRÃO FORMAL) ENCONTRADAS NOS PROCESSAMENTOS 1,2 E 3 .....	82
TABELA 12 - MÉDIA DAS PRECISÕES INTERNAS DAS COMPONENTES DAS COORDENADAS NO PERÍODO DE INICIALIZAÇÃO DO RECEPTOR GPS .....	86
TABELA 13 - CONFIGURAÇÕES DOS PROCESSAMENTOS 4, 5, 6 E 7.....	87
TABELA 14 - MÉDIAS DAS PRECISÕES INTERNAS (DESVIO PADRÃO FORMAL) ENCONTRADAS NOS PROCESSAMENTOS PPP 4, 5, 6 E 7 .....	87
TABELA 15 - CONFIGURAÇÕES DOS PROCESSAMENTOS 8, 10 E 11.....	88
TABELA 16 - MÉDIAS DAS PRECISÕES INTERNAS ENCONTRADAS (DESVIO PADRÃO FORMAL) NOS PROCESSAMENTOS RELATIVO 8, 10 E 11 .....	88
TABELA 17 - CONFIGURAÇÕES DOS PROCESSAMENTOS 09, 12 e 15 .....	89
TABELA 18 - MÉDIAS DAS PRECISÕES INTERNAS ENCONTRADAS (DESVIO PADRÃO FORMAL) NOS PROCESSAMENTOS RELATIVO 9, 12 e 15.....	89
TABELA 19 - CONFIGURAÇÕES DO PROCESSAMENTO 13 e 14.....	90

TABELA 20 - MÉDIAS DAS PRECISÕES INTERNAS ENCONTRADAS (DESVIO PADRÃO FORMAL) NOS PROCESSAMENTOS RELATIVO 13 E 14 .....	90
TABELA 21 - RATIO E SOLUÇÃO DE AMBIGUIDADES .....	91
TABELA 22 - MÉDIAS DAS PRECISÕES INTERNAS ENCONTRADAS NOS PROCESSAMENTOS PELO MÉTODO RELATIVO .....	91
TABELA 23 - CONFIGURAÇÕES DOS PROCESSAMENTOS PARA AS ESTRATÉGIAS 2 E 13.....	92
TABELA 24 - ANÁLISE DOS MÉTODOS DGPS E RELATIVO .....	93
TABELA 25 - CONFIGURAÇÕES DOS PROCESSAMENTOS DAS ESTRATÉGIAS 8 E 15, PPP E RELATIVO CINEMÁTICO .....	94
TABELA 26 - ANÁLISE DOS MÉTODOS PPP E RELATIVO .....	95
TABELA 27 - ANÁLISE DA ACURÁCIA NAS COORDENADAS E/N/U .....	97

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABAS	- <i>Aircraft Based Augmentation System</i>
ANAC	- Agência Nacional de Aviação Civil
ASBU	- <i>Aviation System Block Upgrade</i>
ATM	- <i>Air Traffic Management</i>
ATS	- <i>Air Traffic Service</i>
CNS/ATM	- <i>Communications, Navigation, Surveillance Systems – Air Traffic Management)</i>
COMAER	- Comando da Aeronáutica
DME	- <i>Distance Measuring Equipment</i>
EMBRAER	- Empresa Brasileira de Aeronáutica
FAA	- <i>Federal Aviation Administration</i>
FANS	- <i>Future Air Navigation System</i>
ICAO	- <i>International Civil Aviation Organization</i>
IGS	- <i>International GNSS Service</i>
ILS	- <i>Instrument Landing System</i>
INS	- <i>Inertial Navigation System</i>
IONEX	- <i>IONosphere EXchange</i>
IS	- Instrução Suplementar
DECEA	- Departamento de Controle do Espaço Aéreo
GANP	- <i>Global Air Navigation Plan</i>
GBAS	- <i>Ground Based Augmentation System</i>
GNSS	- <i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
PBN	- <i>Performance Based Navigation</i>
PIRG	- <i>Planning and Implementation Regional Groups</i>
RBAC	- Regulamento Brasileiro da Aviação Civil
RBMC	- Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo GNSS
RNAV	- <i>Air navigation</i>
RNP	- <i>Required Navigation Performance</i>
SA	- <i>Selective Availability</i>
SARPS	- <i>Standards and Recommended Practices</i>
SBAS	- <i>Satellite Based Augmentation System</i>

SID - *Standard Instrument Departure*  
SISCEAB - *Sistema de Controle do Espaço Aéreo*  
TEC - *Total Electron Contents*  
VOR - *VHF Omnidirectional Radio range*  
WAAS - *Wide Area Augmentation System*  
WGS - *World Geodetic System*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	21
1.2 OBJETIVOS .....	22
1.3 METODOLOGIA.....	23
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>24</b>
2.1 SISTEMA GLOBAL DE NAVEGAÇÃO AÉREA – CONCEITO OPERACIONAL ATM GLOBAL .....	24
2.2 EVOLUÇÃO DO SISCEAB (SISTEMA DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO).....	27
2.3 NAVEGAÇÃO AÉREA .....	31
2.3.1 Auxílios a navegação convencional por rádio .....	31
2.3.2 PBN – Navegação baseada em performance .....	39
2.4 GNSS ( <i>GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM</i> ).....	47
2.5 ADS-B ( <i>AUTOMATIC DEPENDENT SURVEILLANCE-BROADCAST</i> ) .....	49
2.6 SISTEMAS DE AUMENTO .....	51
2.6.1 ABAS ( <i>Aircraft Based Augmentation System</i> ) .....	51
2.6.2 SBAS ( <i>Satellite-Based Augmentation System</i> ) .....	54
2.6.3 GBAS ( <i>Ground Based Augmentation System</i> ) .....	58
2.6.3.1 GBAS - Aeroporto do Galeão Rio de Janeiro .....	61
2.7 ERROS SISTEMÁTICOS ENVOLVIDOS NAS OBSERVÁVEIS GNSS.....	62
2.7.1 Refração Ionosférica .....	64
2.7.1.1 Índice Kp.....	67
2.7.1.2 F10.7 .....	68
2.8 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO GNSS .....	68
2.8.1 DGPS ( <i>Differential GPS</i> ) .....	68
2.8.2 PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) .....	69
2.8.3 Posicionamento Relativo .....	70
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>71</b>
3.1 MATERIAIS .....	71
3.1.1 Dados GNSS do voo teste .....	71
3.1.2 Produtos IGS.....	72
3.1.3 Produtos RMBC .....	73



3.2 METODOLOGIA.....	74
3.3 INFORMAÇÕES DA IONOSFERA NA DATA DO LEVANTAMENTO.....	75
<b>4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>79</b>
4.1 MÉTODO DE POSICIONAMENTO DGPS.....	81
4.1.1 Estratégia DGPS 1, 2, 3.....	82
4.2 MÉTODO DE POSICIONAMENTO PPP.....	86
4.2.1 Estratégia PPP 4, 5, 6 e 7.....	86
4.3 MÉTODO DE POSICIONAMENTO RELATIVO CINEMÁTICO.....	87
4.3.1 Estratégias Relativo 8, 10 e 11.....	88
4.3.2 Estratégias Relativo 9, 12 e 15.....	89
4.3.3 Estratégia Relativo 13 e 14.....	90
4.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DGPS E RELATIVO.....	91
4.5 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE POSICIONAMENTO PPP E RELATIVO.....	94
4.6 ANÁLISE DA ACURÁCIA ENTRE OS MÉTODOS DGPS E RELATIVO.....	97
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>98</b>
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	99
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>100</b>
<b>APÊNDICE 1 – RESULTADO DOS PROCESSAMENTOS.....</b>	<b>104</b>
<b>ANEXO 1 – RBMC SPJA JABOTICABAL.....</b>	<b>105</b>
<b>ANEXO 2 – KEWR / 00285GLS4L.....</b>	<b>107</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de navegação embarcados nas aeronaves fazem a determinação de posição e direção. Inicialmente a navegação aérea era baseada em regras visuais, utilizando referências terrestres presentes nas cartas aeronáuticas, como rios, estradas, igrejas e poucos instrumentos na cabine, entre eles o altímetro, velocímetro e bússola, com a limitação da meteorologia. Com o avanço das tecnologias foram incorporados os sistemas de comunicação, onde a aeronave se comunica com estações terrestres através de ondas de rádio, por exemplo o VOR (*VHF Omnidirectional Range Radio*) e MDE (*Measuring Distance Equipment*) que fornecem a posição radial e distância. Nesse momento a aviação passa a adotar regras de voos por instrumentos, ou seja, o piloto passa a se concentrar nos instrumentos presentes da cabine da aeronave, podendo voar entre nuvens por exemplo. Por este motivo, as condições meteorológicas passam a ser uma limitação menor nas tomadas de decisão para levantar voo. Essas estações terrestres mencionadas fazem parte dos auxílios a navegação convencionais por rádio utilizadas até hoje pelas aeronaves em escala mundial. Durante as fases de aproximação e pouso, os procedimentos adotados utilizando esses instrumentos, são ditos, aproximações de não precisão. Novamente para contornar as condições meteorológicas, as aproximações em aeroportos de grande tráfego aéreo, são adotados os sistemas ILS (*Instrument Landing System*), sistema de pouso por instrumentos radionavegação, com equipamentos instalados em solo, e a bordo das aeronaves, fornecendo orientações de navegação vertical, lateral e longitudinal, durante aproximações de precisão. Essas aproximações são classificadas em diferentes categorias, baseadas em dois fatores, altura de decisão e contato visual com a pista. As Categorias são CAT I, CAT II, CAT IIIA, CAT IIIB, CAT IIIC, sendo a última considerado 00, altura de decisão 0 e 0 contato visual com a pista, a aeronave realiza o pouso com precisão utilizando os computadores a bordo, nessa fase o piloto atua monitorando os equipamentos de bordo (ICAO, 2021f).

Ainda na década de 80, com a alta demanda de crescimento do setor aéreo, a ICAO (*International Civil Aviation Organization*) estabeleceu o comitê denominado FANS (*Future Air Navigation System*), onde o Brasil fazia parte. A este comitê foi confiada a tarefa de estudar, identificar, analisar e avaliar novas tecnologias e iniciativas que pudessem gerar soluções e recomendações para o desenvolvimento progressivo e coordenado (DECEA, 2021a). Também nessa época houve o

desenvolvimento do NAVSTAR-GPS, concebido primariamente como um sistema de navegação, foi declarado operacional em 1995, onde o objetivo original era a determinação instantânea de posição, velocidade e tempo de um usuário, independentemente das condições atmosféricas, em um referencial global e homogêneo (MONICO, 2008). Com o desenvolvimento de novas tecnologias e o uso de satélites e sistemas automatizados a bordo, em 1991, a ICAO desenvolveu o Conceito CNS/ATM (*Communications, Navigations, Surveillance Systems / Air Traffic Management*) que concebia a evolução de navegação aérea, a partir da tecnologia existente à época. Em 2003, esta visão foi consolidada, pela 11ª Conferência de Navegação Aérea, com o Conceito Operacional ATM Global. Em 2005 a ICAO publicou o Doc. 9854 AN/458 “Conceito Operacional ATM Global”, fornecendo a visão e a orientação para a transição do ambiente de controle de tráfego aéreo para um sistema de gerenciamento do tráfego aéreo baseado em performance, integrado e colaborativo (DECEA, 2021b).

O CONOPS (Concepção Operacional ATM Nacional) e o PIMP (Plano de Implementação ATM Nacional) são os documentos do Comando da Aeronáutica do Brasil que possuem definições e orientações gerais quanto ao plano estratégico nacional, chamado de Sirius Brasil. O DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) é a organização responsável por esta implementação que visa consolidar o Conceito Operacional ATM Global da ICAO em território brasileiro (DECEA, 2021b).

Dessa maneira o DECEA tem investido na ampliação da rede de auxílios e na implementação de novas tecnologias que permitam um maior aproveitamento da capacidade de navegação embarcada nas aeronaves, sendo o GNSS (*Global Navigation Satellite System*) o elemento chave na migração de sistemas de navegação por rádio, com estações terrestres, para sistemas de navegação por satélite, possibilitando a navegação baseada em performance. Para tal alguns critérios foram estabelecidos visando a segurança da navegação aérea, e devem atender as especificações expressas em termos de acurácia, integridade, disponibilidade e continuidade. A PBN (*Performance Based Navigation*), engloba dois métodos de navegação, o RNAV (*Air Navigation*) e o RNP (*Required Navigation Performance*), estes dois métodos utilizam a navegação baseada em satélites. Tal navegação proporciona rotas mais diretas com auxílio dos *waypoints*, pontos geográficos onde a aeronave deve bloquear ou iniciar a curva antes do ponto, definidos conforme regras estabelecidas pelo DECEA. O PBN está presente nas fases de rota das aeronaves,

aproximação e pouso, porém sendo considerados pousos de não precisão. Diferentes das categorias estabelecidas pelo ILS, considerando fatores de altura de decisão e contato visual com a pista, o PBN é estabelecido por aéreas de aplicação (rota, área terminal e aproximações) e precisão lateral da navegação, variando de 10 mn até 0 mn para aproximações APV/BARO-VNAV. (DECEA, 2021a).

O sistema ILS, é um sistema de precisão que possibilita pousos com condições meteorológicas críticas, porém possui alto valor de aquisição e manutenção, não sendo uma realidade em muitos aeroportos do Brasil. Como exemplo o Aeroporto Afonso Pena localizado em São José dos Pinhais, possui o sistema ILS CAT IIIA disponível em somente uma das pistas. O GBAS (*Ground Based Aumentation System*) é o sistema de aumento baseado em estações terrestres que possibilitam o pouso de precisão utilizando o GNSS. A transmissão do GBAS inclui parâmetros de integridade que permitem aos aviônicos GBAS computar limites de erro vertical e lateral em sua posição GPS calculada. Esse limite é comumente conhecido como nível de proteção. Os valores de integridade da transmissão são definidos de forma que a probabilidade do erro real ser maior do que o nível de proteção calculado seja menor que 1 em 10 milhões. Os limites de alerta são definidos nos padrões ICAO e são baseados na quantidade de erro permitida para uma determinada operação. (FAA,2021c). A operação chamada de GLS (*GBAS Landing System*) veem sendo executada de maneira regular em alguns aeroportos da Alemanha e Estados Unidos, como o Aeroporto Internacional de Newark em New Jersey. O mesmo equipamento instalado em Newark, estação *Honeywell SLS-4000 SmartPath*, foi adquirido e instalado também no Aeroporto Internacional Tom Jobim (Galeão) no Rio de Janeiro, para permitir a avaliação do comportamento de uma estação já certificada, para uso em ambiente de latitudes médias. O comportamento da ionosfera em latitudes médias é mais estável e, por isso, o uso do GBAS é mais consolidado nestas regiões. Já na região equatorial, a ionosfera sofre com maiores perturbações e, por isso, o equipamento GBAS do aeroporto do Galeão ainda não foi certificado.

Essencialmente, as constelações de satélites para provimento de informação de posicionamento global não foram desenvolvidas com o intuito de satisfazer os requisitos da navegação por instrumentos. Os sistemas de aumento tais como GBAS e SBAS foram desenvolvidos para realizar o monitoramento da integridade (envio de avisos quando o sistema de navegação falhar) a fim de garantir segurança de voo. As observáveis GNSS estão sujeitas a erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. As

fontes desses erros são provenientes dos satélites, propagação do sinal provocadas pela refração da troposfera, ionosfera, multicaminho, erros envolvidos com receptores, antenas entres outros. No entanto, esses erros podem ser modelados e suavizados através de modelos de correção.

Após contextualizada a transição que a aviação caminha, dos auxílios convencionais para o atual posicionamento GNSS, este Trabalho de Conclusão de Curso, tem como objetivo investigar diferentes estratégias de processamento de dados GNSS, obtidos em voo por meio do software RTKLib, a fim de analisar a precisão e acurácia das trajetórias descritas pela aeronave com diferentes tipos de posicionamentos.

No Brasil o INCT (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia), possui um programa de pesquisa voltado a Navegação Aérea denominado de INCT GNSS-NavAer de tecnologia GNSS no suporte à navegação aérea. Trata-se de um projeto de seis anos, com início em janeiro de 2017, coordenado pela UNESP de Presidente Prudente conta com diversas instituições que colaboram com o projeto e desenvolvimento da navegação aérea em todo o Brasil. Diversos estudos tem sido publicados a respeito do GBAS e refração ionosférica em baixas latitudes, utilizados como pesquisa para este projeto, em especial o artigo *Real Time PPP Applied to Airplane Flight Tests*, de Monico et al. (2018). Os dados do voo utilizados para este artigo são os mesmos empregados nesse projeto final, cedidos gentilmente pela UNESP.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O uso de novas tecnologias como o GNSS na navegação área possibilitam rotas diretas, com menor custo e menor impacto ambiental, otimizando o tempo de voo. O fator primordial da navegação aérea é a segurança de voo, através de acordos e cooperação internacional uma série de padrões são estabelecidos, inúmeros testes e estudos são realizados e devem atender as especificações expressas em termos de acurácia, integridade, confiabilidade e disponibilidade, antes de qualquer aprovação pelas autoridades competentes. Este trabalho de conclusão de curso traz uma análise dos resultados obtidos, através de dados coletados em voo, com diferentes estratégias de processamento, corroborando com estudos para que tais fatores sejam alcançados podendo ainda contribuir com o GBAS. Esse último, é uma realidade cada

vez mais presente em nível mundial e possibilita o posicionamento por satélite em apoio a demais sistemas, tais como o sistema ILS operante nos principais aeroportos do país, porém, vale ressaltar o alto custo de instalação e manutenção do sistema ILS, o qual precisa ser instalado em cada cabeceira. Já o GBAS tem uma cobertura de 20 mn sobre todas as cabeceiras do aeroporto instalado e proximidades. Tendo em vista o contínuo crescimento do tráfego aéreo, o Brasil por meio do ICEA (Instituto de Controle do Espaço Aéreo) tem solicitado esforços com pesquisas e estudos que corroborem para a certificação do GBAS de aeroportos com grande volume de tráfego aéreo entre outros empreendimentos selecionados para a evolução do ATM Nacional descritos no documento PCA 351-3 – Plano de Implementação ATM Nacional.

## 1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo analisar o uso do GNSS na navegação aérea para contribuir com análises de precisão e acurácia nas fases de aproximação, navegação e pouso, a partir de dados coletados em voo, em região de baixa latitude.

Objetivos específicos:

- Contextualizar os auxílios à navegação convencionais e à transição para a navegação baseada por satélites.
- Caracterizar os sistemas de navegação na aproximação de precisão e não precisão, ILS, GLS/GBAS, PBN (RNAV/RNP).
- Apresentar os erros embutidos na recepção dos sinais de satélites.
- Descrever o erro da ionosfera em média e baixa latitude.
- Investigar diferentes estratégias de processamento de dados GNSS obtidos em voo por meio do software RTKLib.
- Analisar precisão e acurácia das trajetórias descritas pela aeronave com diferentes tipos de processamento.

### 1.3 METODOLOGIA

Coletar referências bibliográficas em organizações mundiais como a ICAO e IGS e em âmbito nacional ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) e DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) relevantes ao contexto de navegação aérea, posicionamento global e erros sistemáticos existentes nos posicionamentos GNSS. Além de dissertações, teses e artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais.

Realizar processamento de dados GNSS em software de código aberto RTKLIB, coletados em voo com aeronave da Embraer nas proximidades do Aeródromo Gavião Peixoto - SP, utilizando diferentes configurações de processamento simulando condições de tempo real e pós processadas, durante as fases de aproximação, navegação e pouso das aeronaves.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesse capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o uso do Sistema de Navegação Global por Satélites (GNSS) na navegação aérea, sobre o Conceito Operacional ATM Global da ICAO e a PBN, conceito este que está diretamente associado à utilização do GNSS na aviação e permite atendimento dos requisitos de performance associados a todas as fases de voo (rota, área de controle terminal e aproximação para pouso) por meio da combinação de sistemas de navegação por satélite, sistemas situados no solo e instalados a bordo das aeronaves.

### 2.1 SISTEMA GLOBAL DE NAVEGAÇÃO AÉREA – CONCEITO OPERACIONAL ATM GLOBAL

Em 1944 um importante marco foi estabelecido durante a Convenção sobre a Aviação Civil Internacional, hoje conhecida como Convenção de Chicago. A Convenção contou com a presença de 54 nações a fim de promover cooperação, criar e preservar a amizade e o entendimento entre as nações e povos do mundo, este acordo estabeleceu os princípios fundamentais que permitem o transporte aéreo internacional e levou a criação da ICAO (ICAO, 2021a). Possibilitando o desenvolvimento de princípios e técnicas de navegação aérea internacional, bem como, a organização e o progresso dos transportes aéreos, de modo a favorecer a segurança, a eficiência, a economia e o desenvolvimento do setor. A função principal da ICAO é manter uma burocracia administrativa e especializada apoiando interações diplomáticas e pesquisa de novas políticas de transporte aéreo e inovações de padronização, conforme direcionado e endossado pelos governos por meio da Assembleia ou Conselho da ICAO (ICAO, 2021a).

A ICAO aprova normas e práticas recomendadas para a aviação civil internacional. Os SARPS (*Standards and Recommended Practices*) e PANS (*Procedures for Air Navigation*) são os elementos básicos que complementam os 18 anexos da Convenção de Chicago. Os Anexos e PANS contém aproximadamente 12.000 SARPS, que são constantemente mantidos e evoluídos para dar suporte ao desenvolvimento e inovação do setor aéreo (IFATCA, 2021).

Hoje a ICAO conta 194 países signatários (ICAO, 2021a), sendo o Brasil um dos membros fundadores e integra atualmente o Grupo I do Conselho da



Organização, sendo um dos maiores mercados de aviação civil no mundo, e exercendo papel de liderança nas discussões no âmbito da ICAO, justificada pela relevância da aviação civil internacional, bem como, pelo forte vínculo simbólico com à história da aviação (BRASIL, 2021).

Ainda na década dos anos 80, o Conselho da ICAO, tendo constatado o crescimento da aviação civil internacional, como também, o surgimento de novas tecnologias, compreendeu a necessidade de análise e avaliação dos procedimentos e sistemas em uso. Se entendeu que a forma existente de prover os serviços de tráfego aéreo, ATS (*Air Traffic Service*) e a estrutura do sistema de navegação aérea, em geral, estariam limitando o crescimento da aviação e inibindo a implementação de melhorias na segurança, eficiência e regularidade das operações aéreas (DECEA, 2021a).

Em 1983, foi instituído um comitê denominado FANS (*Future Air Navigation System*), ao qual foi confiada a tarefa de estudar, identificar, analisar e avaliar novas tecnologias e iniciativas que pudessem gerar soluções e recomendações para um desenvolvimento progressivo e coordenado. Cinco anos depois, o primeiro comitê FANS apresentou a concepção dos “Sistemas de Comunicações, Navegação e Vigilância” – CNS.

Com o desenvolvimento de novas tecnologias e o uso de satélites e sistemas automatizados de bordo, em 1991, a ICAO desenvolveu o Conceito CNS/ATM (*Communications, Navigation, Surveillance Systems / Air Traffic Management*) que concebia a evolução da navegação aérea, a partir da tecnologia existente à época. As etapas de transição para o Conceito CNS/ATM foram estabelecidas, em 1998, no Plano Global de Navegação Aérea para os Sistemas CNS/ATM (ICAO, 2021g).

Posteriormente, verificou-se que o Conceito CNS/ATM não poderia servir de guia para a evolução da navegação aérea, pois estava fundamentado em tecnologias que tendiam a ficar desatualizadas com o progresso da ciência. Dessa maneira, buscou-se um conceito de navegação aérea que permitisse a evolução em escala mundial, de forma interoperável e transparente ao usuário, baseado em requisitos operacionais, independentes de qualquer tecnologia específica. Com ele, poderiam ser desenvolvidas ferramentas e processos gerenciais para atender às expectativas dos usuários dos serviços da navegação. Esta visão foi consolidada em 2003, pela 11ª Conferência de Navegação Aérea, com o Conceito Operacional ATM Global. Em 2005 a ICAO publicou o Doc. 9854 AN/458 “Conceito Operacional ATM Global”,

fornecendo a visão e a orientação para a transição do ambiente de controle de tráfego aéreo para um sistema de gerenciamento do tráfego aéreo baseado em performance, integrado e colaborativo, que indica o seguinte:

- A ICAO, os Estados e os PIRG (*Planning and Implementation of Regional Group*) deverão considerar o Conceito Operacional ATM Global como um marco mundial comum para guiar a implantação dos Sistemas ATM;
- Os Estados, com o apoio dos demais membros da Comunidade ATM, deverão empreender processos que estejam de acordo com os componentes do Conceito Operacional ATM Global, indicados na sequência:
  - Organização e gerenciamento do espaço aéreo;
  - Operações de aeródromos;
  - Balanceamento de demanda e capacidade;
  - Sincronização do tráfego;
  - Gestão de conflitos;
  - Operações dos usuários do espaço aéreo; e
  - Gerenciamento de prestação de serviços ATM.

A aplicação desse Conceito, em conjunto com o Doc 9882 “Manual sobre Requisitos do Sistema ATM” e o Doc 9883 “Manual sobre Performance Global do Sistema de Navegação Aérea”, ensejou alterações marcantes na forma tradicional de prover os serviços de navegação aérea, enfatizando a importância da infraestrutura de Comunicações, Navegação e Vigilância e de um completo e confiável fluxo de informações, além da necessidade de aplicar conhecimentos relativos aos fatores humanos (DECEA, 2021a, p.18).

O Doc 9750, inicialmente denominado Plano Global de Navegação Aérea para os Sistemas CNS/ATM, está em sua sexta edição sendo a última publicada online no portal <https://www4.icao.int/ganportal/>. O Plano Global de Navegação Aérea ou em inglês GANP (*Global Air Navigation Plan*) é o documento estratégico de navegação aérea mais importante da ICAO, conforme indicado em seu portal. O GANP representa uma estratégia contínua de 15 anos, metodologia que aproveita as tecnologias existentes e antecipa desenvolvimentos futuros com base no Estado/indústria, e em concordância com os objetivos operacionais (ICAO, 2021e). As atualizações dos blocos são organizadas a cada 6 anos iniciando em 2013 e estendendo-se até 2031 ou além. O conteúdo está organizado em 4 níveis conforme FIGURA 1.

FIGURA 1 - DOC 9750 - GANP (4 níveis)



FONTE: ICAO, GANP (2021b)

## 2.2 EVOLUÇÃO DO SISCEAB (SISTEMA DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO)

O Brasil, signatário da ICAO e membro do Conselho desde sua fundação, tem trabalhado continuamente no aperfeiçoamento no Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB). A participação do país no Comitê FANS, nos painéis e nos grupos de trabalho mundiais e regionais permitiu que ele desenvolvesse planejamentos alinhados aos conceitos acordados nos fóruns da ICAO. Como resultado desse processo, o COMAER (Comando da Aeronáutica) publicou a DCA 351-1 “Política da Aeronáutica para o Controle do Espaço Aéreo”, em 2010, a DCA 351-2 “Concepção Operacional ATM Nacional”, em 2011, e o PCA 351-3 “Plano de Implementação ATM Nacional”, em 2012.

Segundo o DECEA esses documentos contribuíram significativamente para a manutenção de um sistema de navegação aérea nacional seguro e eficiente, alinhado aos preceitos de interoperabilidade mundial e preparado continuamente para atender às necessidades dos usuários do espaço aéreo sob a responsabilidade do Brasil.

Em março de 2021 o COMAER publicou a reedição da Concepção, DCA 351-1 e do PCA 351-1, em conjunto com o novo PCA 11-368 “Plano Geral de Controle do Espaço Aéreo”, que tem o objetivo de propiciar diretrizes atualizadas.

A evolução do SISCEAB, em direção ao Conceito Operacional ATM Global da ICAO, é estabelecida por meio do Programa Sirius. Os Empreendimentos e Projetos do Programa consideram a metodologia de evolução por blocos do sistema de aviação, ASBU (*Aviation System Block Upgrad*), preconizada no Doc 9750 - GANP, as

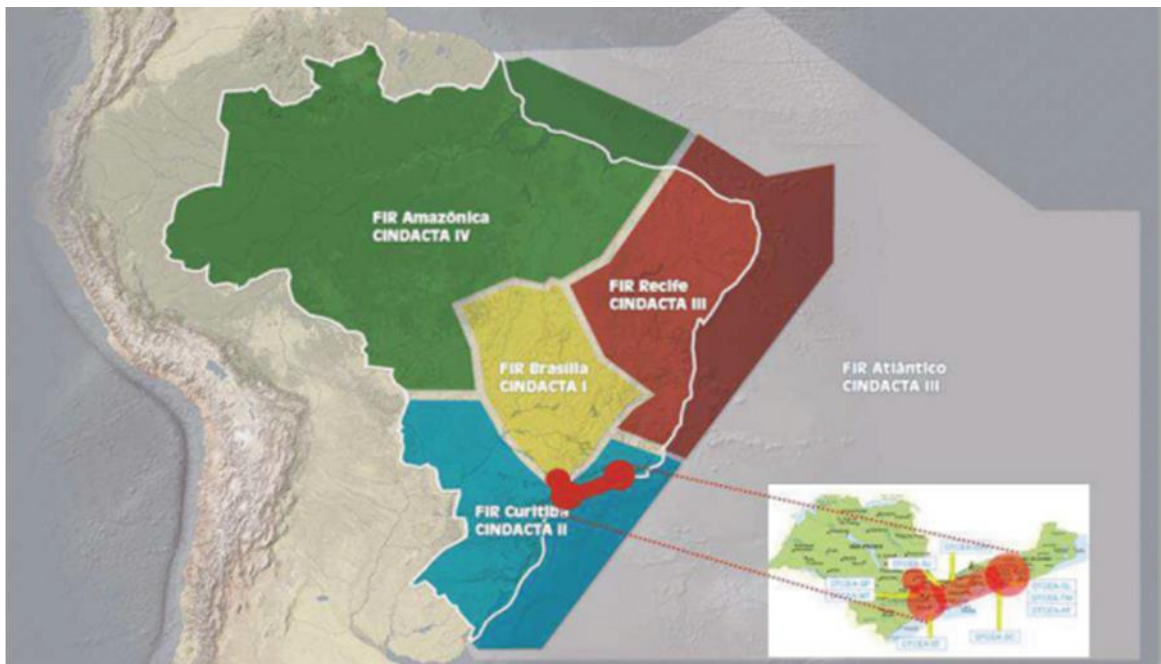
prioridades estabelecidas em colaboração com a Comunidade ATM, os planejamentos desenvolvidos no âmbito do Grupo Regional de Planejamento e Implementação do Caribe e América do Sul da ICAO, assim como a disponibilidade de recursos financeiros e humanos.

O Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) é a organização responsável por todo o espaço aéreo sob responsabilidade do Brasil, este espaço estende-se além de suas fronteiras, cobrindo uma área total de 22 milhões de km<sup>2</sup>, sobre terra e mar, acordados em tratados internacionais. Subordinado ao Comando da Aeronáutica, como mencionado na ICA 100-40, o DECEA possui na sua estrutura Órgãos Regionais que desenvolvem atividades na Circulação Aérea Geral (CAG) e na Circulação Operacional Militar (COM), coordenando ações de gerenciamento e controle do espaço aéreo e de navegação aérea nas suas áreas de jurisdição (DECEA, 2021c).

Os órgãos regionais do DECEA são os CINDACTA I, II, III e IV e o SRPV-SP, com suas áreas de jurisdição definidas, como ilustrado na FIGURA 2. Eles atuam sobre subdivisões de espaço aéreo denominadas regiões de informação de voo, ou FIR (*Flight Information Region*), conforme nomenclatura oficial. No Brasil, há cinco FIRs, sobre as quais operam quatro CINDACTAs:

- CINDACTA I (Brasília-DF), responsável pela FIR Brasília, que abrange a região central do Brasil.
- CINDACTA II (Curitiba-PR), responsável pela FIR Curitiba, que abrange o Sul e parte do centro-sul brasileiro.
- CINDACTA III (Recife-PE), responsável pelas FIR Recife e Atlântico, que abrangem o Nordeste e área sobrejacente ao Atlântico.
- CINDACTA IV (Manaus-AM), responsável pela FIR Manaus, que se estende sobre grande parte da região amazônica.

FIGURA 2 - ÁREA DE RESPONSABILIDADE DO ATM NACIONAL



FONTE: ICA 100-40, COMAER (2020)

Ainda como descrito no portal <https://www.decea.mil.br/>, o DECEA possui uma rede operacional que contempla: 5 centros de controle de área (ACC), 42 controles de aproximação (APP), 59 torres de controle de aeródromo, 79 destacamentos de controle do espaço aéreo, 90 estações de telecomunicações aeronáuticas, 75 Estações Prestadoras de Serviços de Telecomunicações e de Tráfego Aéreo, 170 radares, 50 Sistemas de Pouso por Instrumentos, dentre outros auxílios à navegação aérea, cobrindo toda a extensão territorial (DECEA, 2021d).

Conduzido pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo, o Programa Sirius busca a evolução e o aperfeiçoamento do gerenciamento do tráfego aéreo brasileiro, fundamentado em recomendações internacionais e possui como base normativa as seguintes diretrizes, a CONOPS – Concepção Operacional ATM Nacional DCA 351-2 e o PIMP – Plano de Implementação ATM Nacional (PCA 351-3).

A CONOPS, segundo o DECEA, é a base conceitual do documento que possui definições e orientações gerais do Programa Estratégico Sirius Brasil, foi emitido pelo Comando da Aeronáutica em 2011 com reedição em março de 2021. Apresenta opções tecnológicas e operacionais para as demandas do tráfego aéreo brasileiro a curto e longo prazo. A reedição discorre ainda sobre as necessidades nacionais, tais como: integração dos Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas

(RPAS), Evolução por Blocos do Sistema de Aviação, operação *gate-to-gate* das aeronaves e implantações tecnológicas no Sistema ATM Nacional (DECEA, 2021b).

O PIMP é o documento que consolida a visão preconizada na Concepção Operacional ATM Nacional em um plano de ação baseado em performance, que permite ao DECEA, definir em conjunto com todos os demais usuários do espaço aéreo, os empreendimentos que serão estabelecidos para a evolução do Sistema ATM Nacional. Este plano, segundo o documento, visa atender às necessidades nacionais e assegurar que essa evolução seja harmônica e integrada aos planejamentos da ICAO, assim como aprimorar a participação dos usuários quanto à definição dos benefícios a serem atingidos e a melhor relação entre estes benefícios esperados e o custo dos investimentos a serem despendidos. Desse modo, o Plano de Implementação ATM Nacional representa, no âmbito do SISCEAB, os projetos e atividades requeridos para a consolidação do Conceito Operacional ATM Global no Brasil.

O Programa Sirius reúne um conjunto de empreendimentos agrupados em diferentes áreas, tal como apresentado na sequência.

FIGURA 3 - EMPREENDIMENTOS SIRIUS BRASIL

Segurança Operacional	
Gerenciamento de Tráfego Aéreo	
Comunicação, Navegação e Vigilância	
Meteorologia Aeronáutica	
Gerenciamento de Informações Aeronáuticas	
Busca e Salvamento	
Recursos Humanos e Desempenho	

FONTE: DECEA (2021e)

Mais informações a respeito do Programa Sirius Brasil, inclusive a base normativa utilizada como referência podem ser acessadas no site <https://www.decea.gov.br/sirius/>.

## 2.3 NAVEGAÇÃO AÉREA

A navegação aérea é o método de navegação que permite a operação de uma aeronave em qualquer curso desejado dentro da área de abrangência dos sinais de um auxílio à navegação ou dentro das limitações da capacidade do sistema de navegação de bordo (ANAC, 2021a). Sistemas e dispositivos que dão suporte à navegação aérea estão distribuídos ao longo de toda a extensão do território nacional e atualmente vêm se somando aos modernos recursos que propiciam à navegação orientada por sistemas de bordo e satélites, como por exemplo a PBN (DECEA, 2021h).

### 2.3.1 Auxílios a navegação convencional por rádio

A rede de auxílios convencionais é composta dos seguintes equipamentos:

- VOR (*VHF Ommidirectional Range Radio*).

Auxílio que provê a orientação básica para navegação em rota, terminal e aproximação de não precisão, utiliza ondas de rádio na faixa de alta frequência, VHF (Very High Frequency). O princípio de funcionamento do VOR prevê que uma estação terrestre emita dois sinais referenciados em direções magnéticas: um sinal variável para varredura de 360 graus; e outro sinal de referência omnidirecional. Os sinais são comparados pelo receptor da aeronave e uma diferença de fase entre eles é medida, fornecendo uma posição radial precisa da aeronave (SILVA, 2020).

- MDE (*Measuring Distance Equipment*).

Auxílio que fornece informações de distância e também provê suporte à navegação baseada em performance (PBN), utilizando como, por exemplo, o conceito VOR/DME como especificação de navegação RNAV (*Air navigation*) (ANAC, 2021b). RNAV é especificação de navegação aérea que permite a operação da aeronave em uma trajetória específica baseado em auxílios de terra, constelação de satélites ou equipamentos inerciais embarcados, mais detalhes no item 2.3.2 – Navegação baseada em performance.

FIGURA 4 - ESTAÇÃO MISTA VOR/DME (Aeroporto de Congonhas)

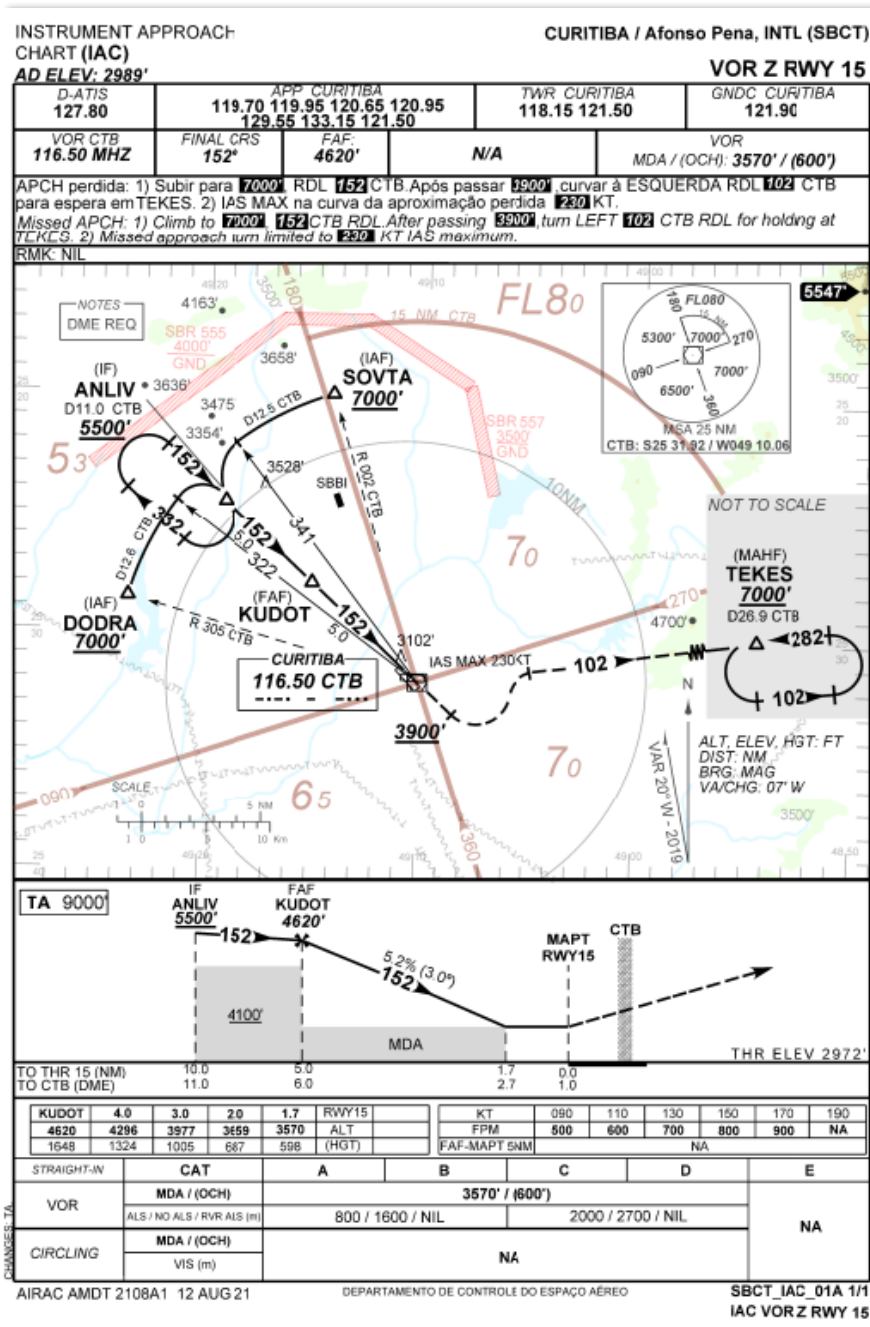


FONTE: A autora (2021)

A FIGURA 5, IAC (*Instrument Approach Chart*) elaborada pelo DECEA, mostra por exemplo, uma aproximação convencional de não precisão baseada em VOR/DME para o Aeroporto Afonso Pena localizado em Curitiba/PR. Nesse tipo de procedimento, o piloto deve sintonizar no equipamento rádio da aeronave, a frequência do VOR/DME em questão, em seguida terá demonstrado em seus equipamentos de navegação a sua posição e distância em relação ao VOR/DME, direcionando assim a aeronave até o pouso.



FIGURA 5 - CARTA IAC/VOR/SBCT



FONTE: DECEA, AISWEB (2021g)

- NDB (Non Directional Beacon).

Estações de transmissão não direcionais utilizadas como complemento dos VOR/DME ou como auxílio à aproximação de não precisão. O NDB teve sua descontinuidade solicitada pela ICAO e está em fase de desativação no Brasil, de acordo com planejamento definido pelo DECEA.

FIGURA 6 - ANTENA NDB



FONTE: Wikipédia (2021)

- ILS (Instrument Landing System)

Sistema de pouso por instrumentos radionavegação que fornece orientações de navegação vertical, lateral e longitudinal, durante uma aproximação de precisão. O princípio de funcionamento do ILS consiste na emissão de ondas eletromagnéticas de alta frequência (VHF), a partir de infraestrutura instalada no aeroporto, que auxiliam a aeronave a se alinhar ao centro longitudinal da pista, bem como indicar um caminho de descida até o pouso (SILVA, 2020), infraestrutura requerida para operações ILS:

Em solo:

- ✓ *Localizer*: Navegação lateral (*lateral flight path*), emite sinais responsáveis por direcionar a aeronave ao centro da pista, opera em VHF, é instalado na cabeceira oposta à qual deseja guiar o pouso.

- ✓ *Glide slope*: Navegação vertical (*vertical flight path*), indicam a trajetória de descida da aeronave, opera em UHF.

- ✓ *Marker Beacons*: Antenas posicionadas estrategicamente para servirem de verificação aos pilotos durante o procedimento ILS, operam em VHF.

- ✓ MDE: Distância do equipamento.

- ✓ VASIS (*Visual Approach Slope Indicator*) e PAPI (*Precision Approach Path Indicator*): Conjunto de luzes instaladas nas laterais das pistas.

FIGURA 7 - LOCALIZER E GLIDESLOP

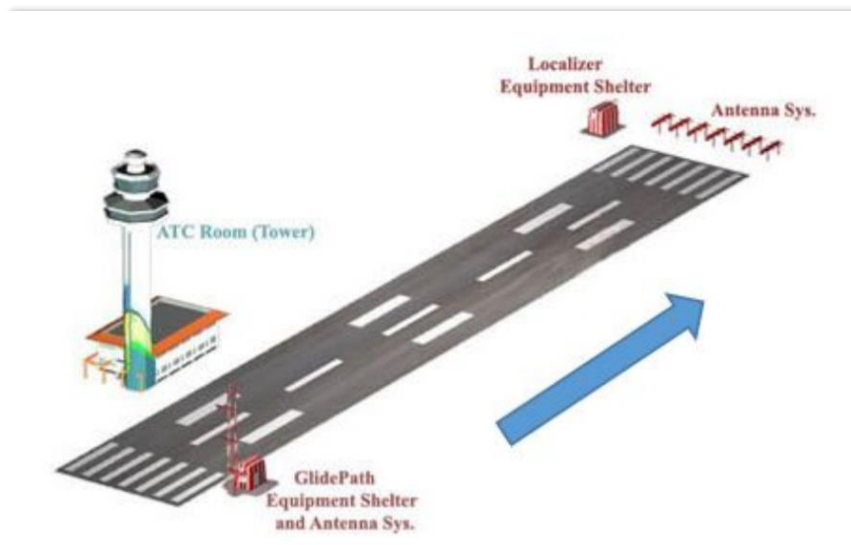


FONTE: HENRIQUE e CESARINO (2021)

Na aeronave:

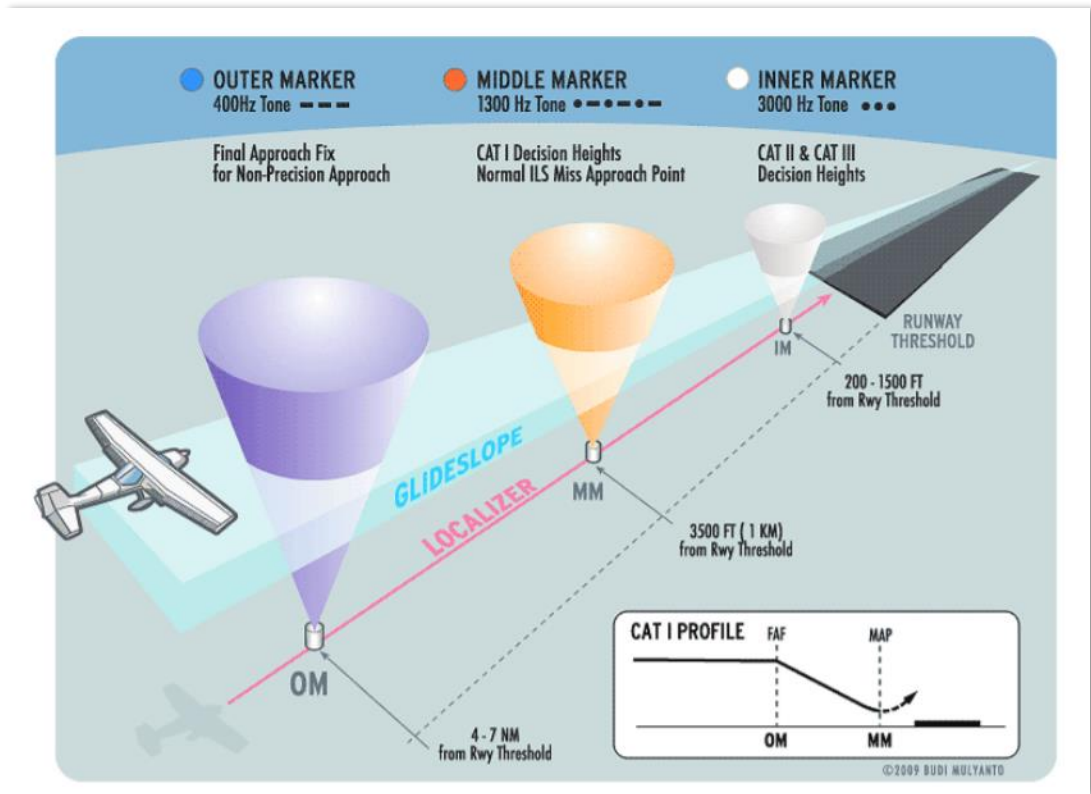
- ✓ VHF – RX recepção de sinal de ILS.
- ✓ Radio Altimetro.
- ✓ Indicador de *path deviation* lateral e vertical.

FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DE AEROPORTO COM ILS



FONTE: BIDINOTTO e CESARINO (2021)

FIGURA 9 - MARCADORES DO PROCEDIMENTO ILS



FONTE: BIDINOTTO e CESARINO (2021)

Henrique e Cesarino (2021), observam que operações com ILS requer certas condições de terreno que favoreçam a irradiação e interceptação dos sinais, por exemplo, casos como o Aeroporto Santos Dumont no Rio de Janeiro, localizado em região montanhosa, o uso do sistema ILS fica inviabilizado.

FIGURA 10 - APROXIMAÇÃO AEROPORTO SANTOS DUMONT – RIO DE JANEIRO



FONTE: A autora (2021)

As aproximações ILS são classificadas em diferentes categorias, ou CAT's, o que diferencia essencialmente as categorias são dois fatores: a *Decision Height*, ou altura de decisão, que é quando o piloto deve assumir o controle e pousar o avião, e a RVR (*Runway Visual Range*), que é quando o piloto estabelece contato visual com a pista, segundo os autores HENRIQUE e CESARINO (2021). A TABELA 1 explicita os diferentes valores entre as categorias.

TABELA 1 - CATEGORIAS ILS

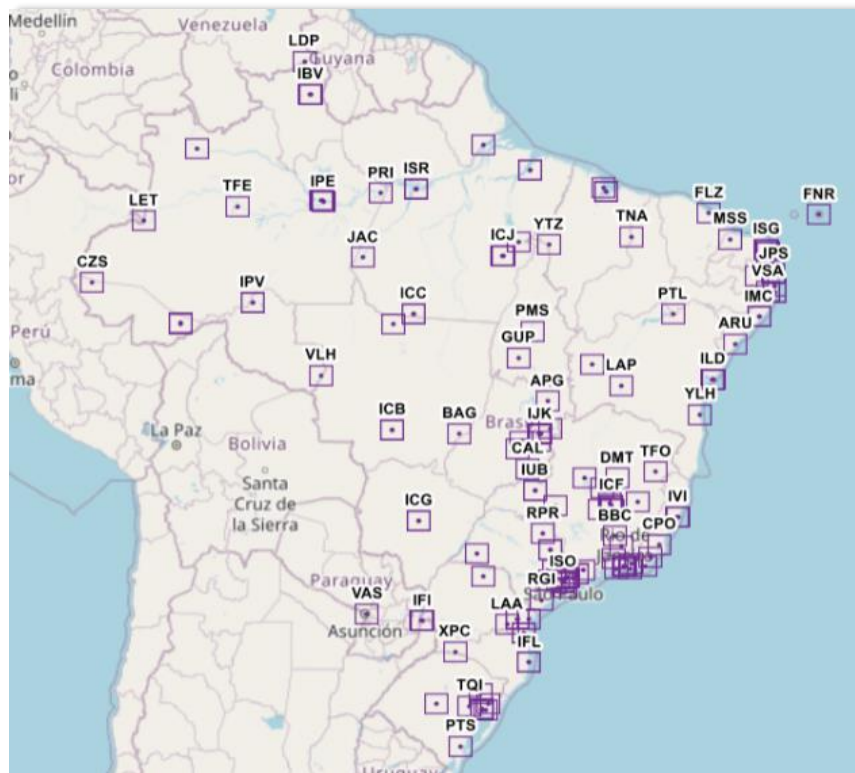
<b>Categoria</b>	<b>Altura de decisão</b>	<b>RVR</b>
CAT I	200 ft	1800 ft
CAT II	100 a 200 ft	1200 ft
CAT III A	50 a 100 ft	700 ft
CAT III B	Menos de 50 ft	150 ft
CAT III C	0	0

1 ft = 0,3048 metros

FONTE: Adaptado ICAO (2021c).

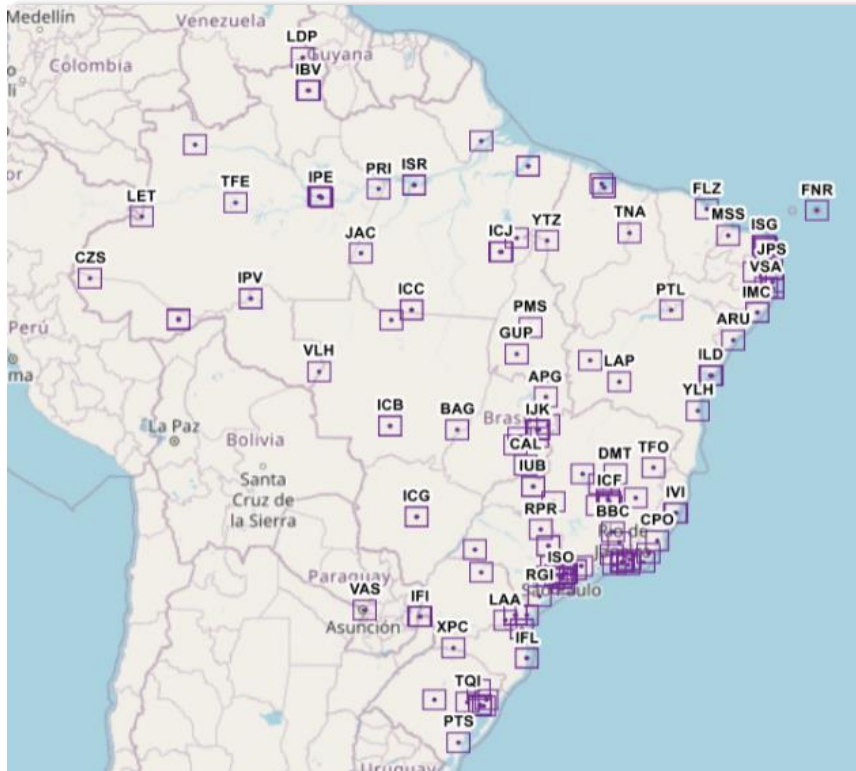
Com auxílio da plataforma online GEOAISWEB disponibilizada pelo DECEA no endereço <https://geoaisweb.decea.mil.br/#>, pode-se observar a distribuição espacial dos auxílios a navegação convencionais, distribuídos no Brasil.

FIGURA 11 - AUXÍLIO A NAVEGAÇÃO (MDE)



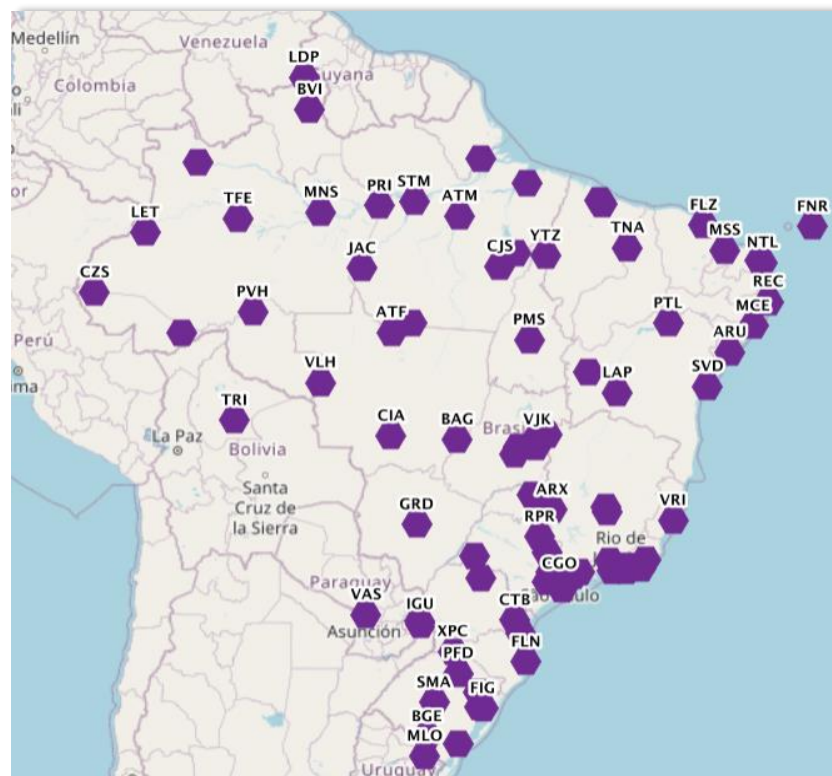
FONTE: DECEA (disponível em: <https://geoaisweb.decea.mil.br/#>)

FIGURA 12 - AUXÍLIO A NAVEGAÇÃO (NDB)



FONTE: DECEA (disponível em: <https://geoaisweb.decea.mil.br/#>)

FIGURA 13 - AUXÍLIO A NAVEGAÇÃO (VOR)



FONTE: DECEA (disponível em: <https://geoaisweb.decea.mil.br/#>)

Todos os auxílios a navegação citados nesse trabalho são aferidos e inspecionados periodicamente pelo GEIV (Grupo Especial de Inspeção de Voo) do DECEA, baseado no Rio de Janeiro, que realiza inspeções assegurando a operacionalidade desses equipamentos.

### 2.3.2 PBN – Navegação baseada em performance

Para atender às necessidades dos usuários e acompanhando a evolução tecnológica desenvolvida no âmbito da ICAO, especialmente as relativas à navegação baseada em performance, o Brasil por meio do DECEA tem investido na ampliação da rede de auxílios e na implantação de novas tecnologias que permitam um maior aproveitamento da capacidade de navegação embarcada nas aeronaves.

O GNSS é o elemento chave na migração da utilização de sistemas de navegação por rádio, com fixos terrestres, para sistemas de navegação por satélite. Os sistemas de navegação das aeronaves mais recentes têm capacidade de posicionamento global preciso e confiável, necessitando do apoio de uma infraestrutura resultante da combinação adequada das informações de navegação do GNSS, dos sistemas de navegação autônomos embarcados e dos auxílios à navegação convencionais terrestres (DECEA, 2021b, p.44).

FIGURA 14 - AERONAVE PHENOM 100EV EQUIPADA COM SISTEMA GPS



FONTE: EMBRAER (2021)

O conceito de PBN conforme descrito no Doc. 9613/ICAO, veio a introduzir critérios baseados em desempenho para os sistemas de navegação expressos em termos de acurácia, integridade, disponibilidade, continuidade e funcionalidade, em substituição aos conceitos anteriores cujos critérios eram baseados em tecnologias específicas (auxílios rádio navegação convencionais de não precisão como VOR e NDB, sendo que este último teve a sua descontinuidade solicitada pela ICAO). Na sequência são apresentadas algumas definições conforme Anexo 10 – Telecomunicações Aeronáuticas da ICAO que definem o conceito do PBN:

- Acurácia: O erro de posição GNSS é a diferença entre a posição estimada e a posição atual. Para uma posição estimada em um local específico, a probabilidade deve ser de pelo menos 95% de que o erro de posição esteja dentro da precisão requerida.
- Integridade: Uma medida da confiança que pode ser depositada na correção das informações fornecidas pelo sistema total. Integridade inclui a capacidade de um sistema fornecer avisos oportunos e válidos ao usuário. Os alertas são enviados no caso de falhas que impeçam a



utilização do sistema de navegação para a operação de voo pretendida. (ICAO, 2021c, p.86).

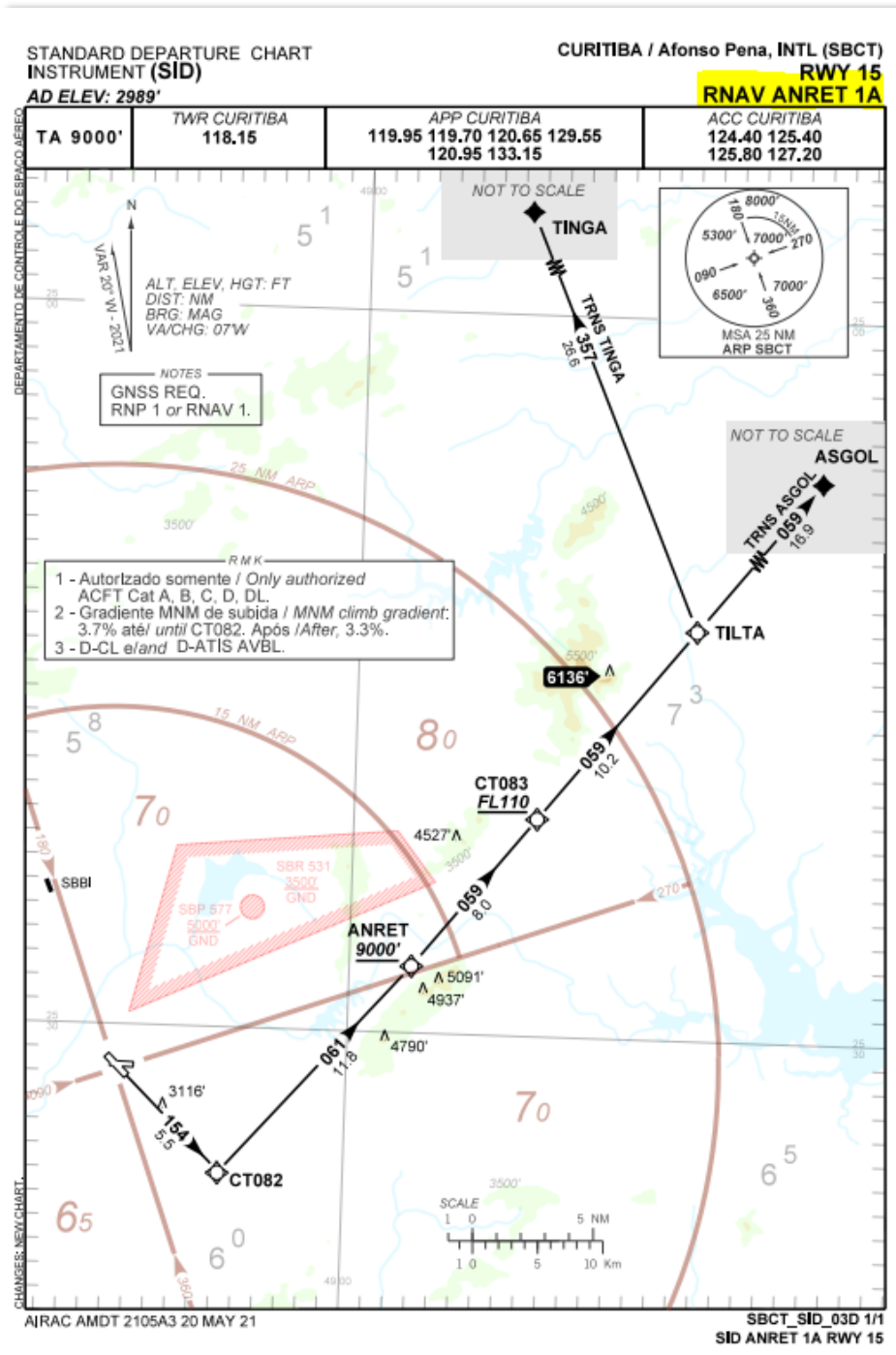
- Continuidade: A Continuidade de serviço de um sistema é a capacidade desse sistema funcionar sem interrupções não programadas durante a operação pretendida, (ICAO, 2006, p.403).
- Disponibilidade: A disponibilidade do GNSS é caracterizada pela porcentagem de tempo que o sistema deve ser usado para navegação durante a qual informações de navegação confiáveis são apresentadas à tripulação, piloto automático ou outro sistema que gerencia o voo da aeronave (ICAO, 2021c, p.406).

Segundo a Instrução Suplementar IS nº 91-001 da ANAC, o conceito PBN representa um esforço da ICAO em harmonizar os métodos de navegação aérea e engloba os métodos de navegação RNAV (*Air Navigation*) e RNP (*Required Navigation Performance*), métodos estes que utilizam a navegação baseada em satélites.

O RNAV e RNP são métodos de navegação similares, que se diferenciam basicamente pela existência, na navegação RNP, de um sistema de monitoramento e alerta aos pilotos da integridade da informação de posicionamento da aeronave, que não se faz necessário na navegação RNAV.

O RNAV (*Air navigation*) é a especificação de navegação aérea que permite a operação da aeronave em uma trajetória específica baseada em auxílios de terra (NDB, VOR e ILS), constelação de satélites (GNSS) ou equipamentos inerciais embarcados (INS - *Inertial Navigation System*). A capacidade RNAV pode ser alcançada com uma ou com a combinação dessas tecnologias. Esta especificação não inclui a obrigatoriedade da aeronave possuir sistema de monitoramento e alerta de desvios da rota. Para tal navegação existem cartas específicas e são designadas pelos prefixos RNAV, conforme carta de saída RNAV demonstrada na FIGURA 15.

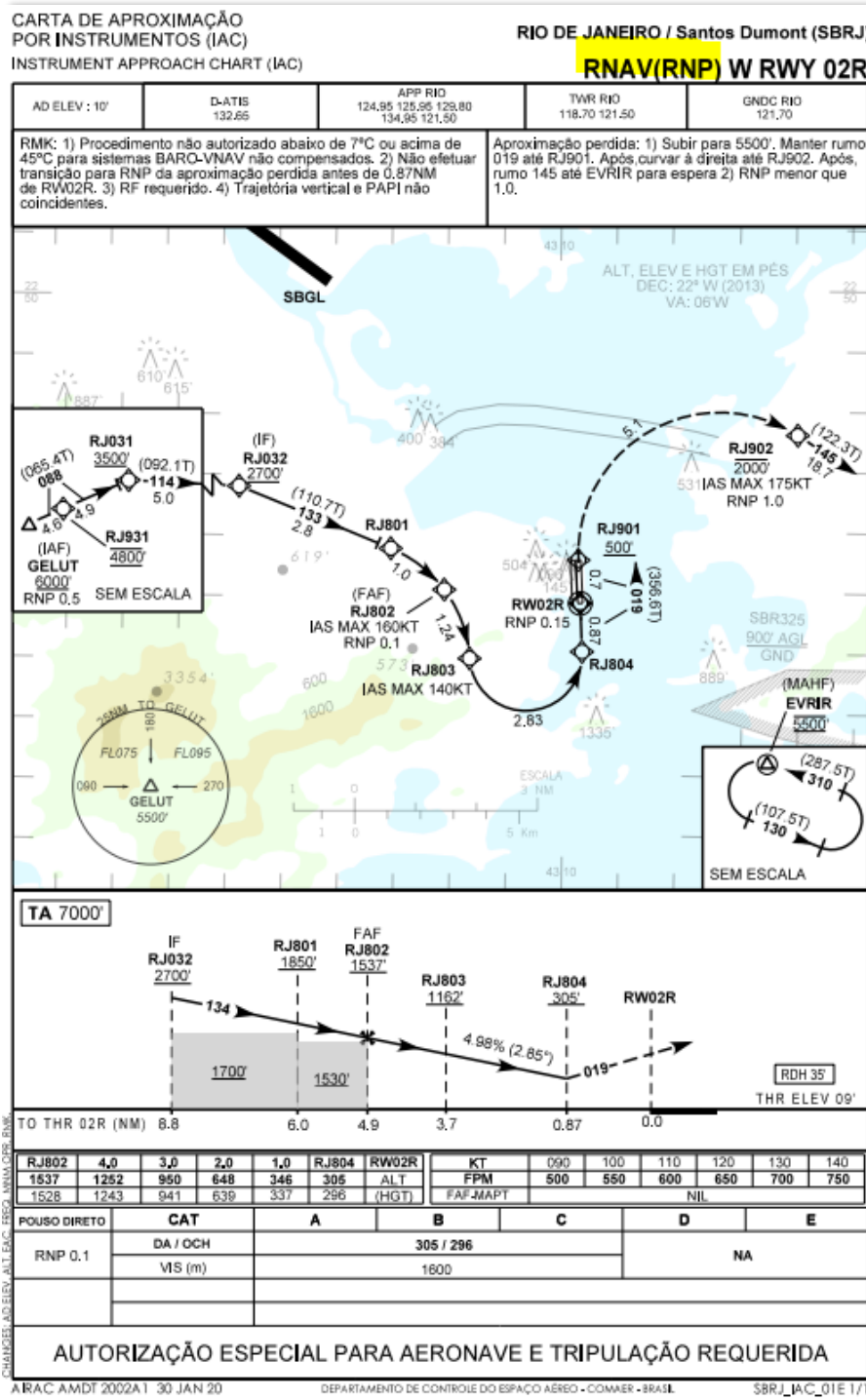
FIGURA 15 - CARTA SID RNAV/ANRET 1A/SBCT



FONTE: DECEA, AISWEB (2021g)

O RNP (*Required Navigation Performance*) é a especificação de navegação baseada em um sistema de navegação de área que inclui a obrigatoriedade da aeronave possuir sistema de monitoramento e alerta de desvios da rota. Tais rotas são designadas pelos prefixos RNP, FIGURA 16.

FIGURA 16 - CARTA SID RNAV(RNP)/SBRJ



FONTE: DECEA, AISWEB (2021g)

A ANAC é a autoridade responsável pela aprovação das operações de voo no espaço aéreo brasileiro, incluindo aquelas que possuam requisitos de navegação baseados em desempenho. Esta agência deve assegurar que tanto as aeronaves quanto os operadores que pretendam realizar tais operações estejam devidamente

capacitados à plena execução de todos os procedimentos relacionados às operações PBN solicitadas, antes de emitir as respectivas autorizações (ANAC, 2021b).

Uma aprovação operacional permite que o operador realize procedimentos PBN, de acordo com critérios adotados ao redor do globo, dentro de um conceito de espaço aéreo por área de operação. A TABELA 2 relaciona os procedimentos PBN, com suas respectivas precisões e áreas de atuação.

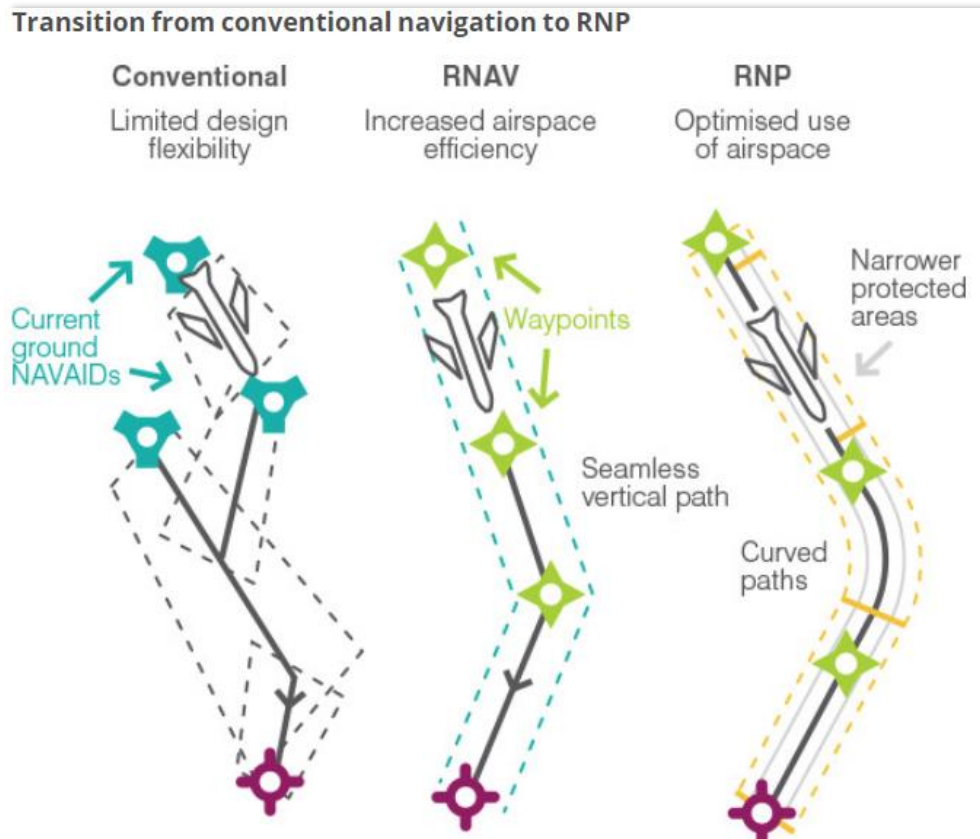
TABELA 2 - ÁREAS DE APLICAÇÃO E PRECISÕES LATERAIS ASSOCIADAS AOS PROCEDIMENTOS PBN

<b>Designação da Operação</b>	<b>Acurácia Lateral da Navegação</b>	<b>Área de Aplicação</b>
RNAV 10 (RNP 10)	10 mn	Em rota – Oceânica / Remota
RNAV 5	5 mn	Em rota – Continental
RNAV 1 e 2	1 e 2 mn	Em rota – Continental / Área Terminal
RNP 4	4 mn	Em rota – Oceânica / Remota
RNP 1	1 mn	Área Terminal
RNP 2	2 mn	Em rota – Oceânica / Remota / Continental
RNP APCH	0,3 mn	Aproximação
RNP AR APCH	0,5 – 0,1 mn	
APV/BARO-VNAV	-	

FONTE: IS nº 91-001E ANAC (2021b)

Na FIGURA 17 é possível comparar as rotas convencionais em relação as rotas RNAV e RNP.

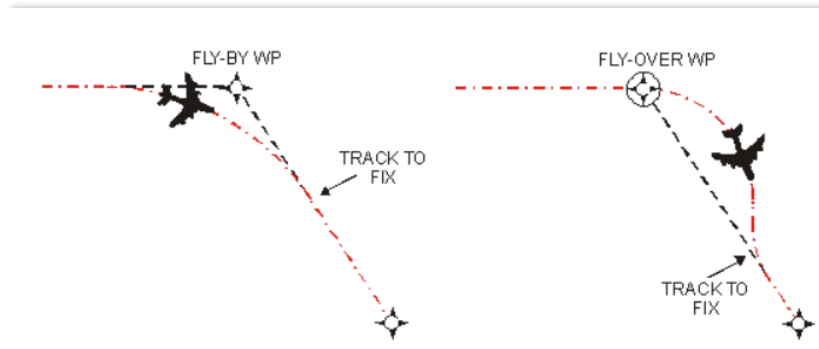
FIGURA 17 - ROTAS CONVENCIONAIS, RNAV e RNP



FONTE: CASA (2021)

De acordo com a ANAC, *waypoint* é um local geográfico usado para definir uma rota de navegação de área ou a trajetória de uma aeronave que emprega a navegação de área. Os *waypoints* são identificados como *fly-by*, neste tipo de *waypoint* a aeronave deve iniciar a curva para estabilizar no próximo curso antes de atingir o *waypoint*, que separa os dois segmentos, e os *waypoints* do tipo *fly-over*, a aeronave deve passar sobre – bloquear – o *waypoint* e só então iniciar a curva (FAA, 2021a).

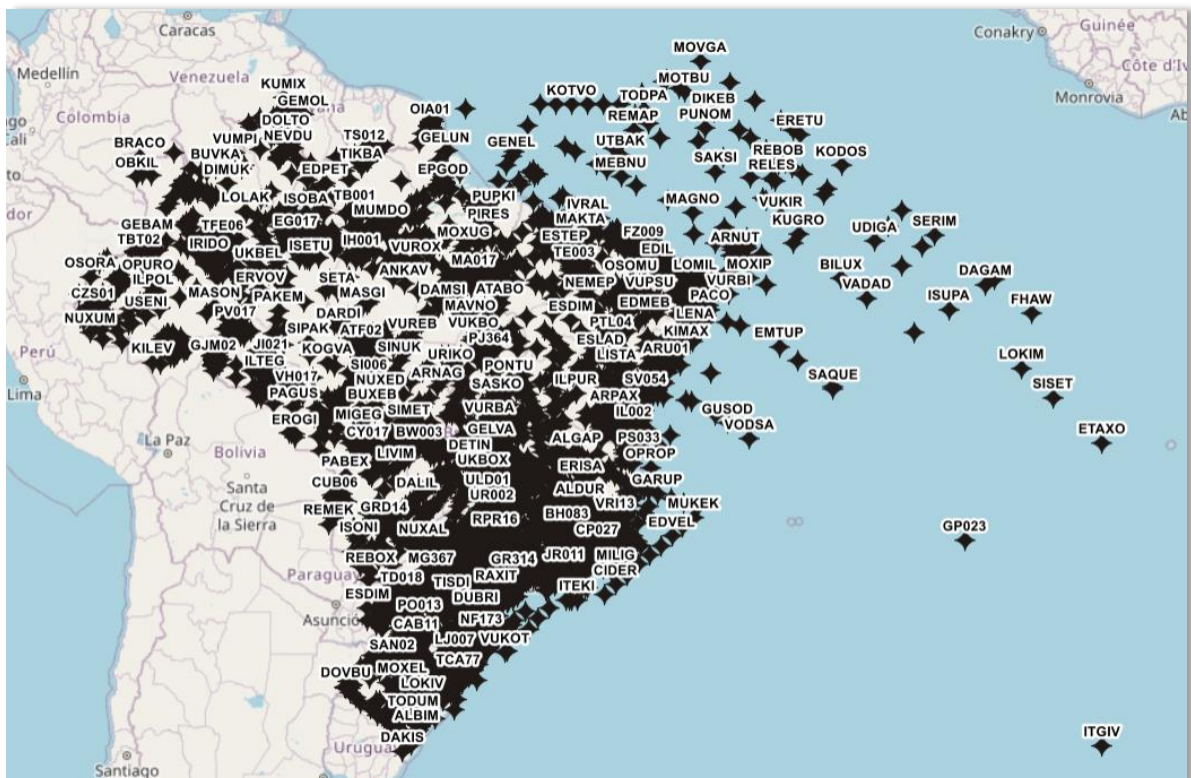
FIGURA 18 - TIPOS DE WAYPOINTS



FONTE: FAA (2021a)

Diferente da navegação ou rotas convencionais, a navegação baseada em performance proporciona rotas mais diretas utilizando como auxílio à navegação, os *waypoints*, como demonstrada na FIGURA 17. Na FIGURA 19 pode-se verificar a distribuição espacial dos *waypoints* sob jurisdição brasileira.

FIGURA 19 - WAYPOINTS

FONTE: DECEA (disponível em: <https://geoaisweb.decea.mil.br/#>)

## 2.4 GNSS (*GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM*)

O GNSS provê as principais informações para o atendimento dos requisitos de desempenho preconizados pela Navegação Baseada em Performance (PBN), sendo considerada a maior infraestrutura de suporte à navegação aérea.

A navegação por GNSS é fundamentada em constelações de satélites. Atualmente, encontram-se em funcionamento o Sistema Global de Posicionamento (GPS), dos Estados Unidos da América; o Sistema Global de Navegação por Satélite (GLONASS), da Rússia; o GALILEO, da União Europeia, e o COMPASS/Beidou, da China, porém para a navegação aérea, são aprovadas atualmente as constelações GPS e GLONASS. Ambos os sistemas foram oferecidos a ICAO como um meio de apoiar o desenvolvimento da navegação aérea (Eurocontrol, 2021a).

Conforme Monico (2008) as observáveis básicas do GNSS, ou seja, os sinais emitidos pelos satélites e recebidos pelos receptores dos usuários, que permitem determinar posição, velocidade e tempo podem ser identificados como: a pseudodistância a partir do código e, a fase da onda portadora ou diferença de fase da onda portadora, além de outras observáveis como o sinal ruído SNR (*Signal-Noise Ratio*).

Para superar as limitações inerentes dos sistemas GPS e GLONASS e atender aos requisitos de desempenho para todas as fases do voo, ambos requerem vários graus de aumento. Os aumentos em geral são classificados em três grandes categorias: baseados em aeronaves ABAS (*Aircraft Based Augmentation System*), baseados em satélites SBAS (*Satellite Based Augmentation System*), e baseados em estações terrestres, GRAS (*Ground-based Regional Augmentation System*) e GBAS (*Ground Based Augmentation System*). Os sistemas geram correções (ver item 2.7 – Erros Sistemáticos envolvidos nas observáveis) que melhoram a qualidade das soluções obtidas a partir dos sinais GNSS. Tais elementos visam minimizar as limitações de acurácia, integridade, disponibilidade e continuidade das informações provenientes das constelações básicas de satélites, permitindo operações de navegação mais precisas, incluindo aproximações de precisão (GPS, 2021a).

O NAVSTAR-GPS (*Navigation System with Time and Ranging - Global Positioning System*), ou somente GPS, iniciou seu desenvolvimento em 1973 e foi declarado totalmente operacional em 1995. O GPS foi concebido primariamente como um sistema de navegação militar, logo o objetivo original era a determinação

instantânea de posição, velocidade e tempo de um usuário, independentemente das condições atmosféricas, em um referencial global e homogêneo, com base em medidas de distâncias (MONICO, 2008). Essas distâncias são chamadas de pseudodistâncias, em razão do não sincronismo dos relógios dos usuários e dos satélites, requerendo que no mínimo quatro satélites estejam disponíveis para a realização de medidas simultâneas. Para posicionamento de melhor qualidade, além das pseudodistâncias, faz-se também o uso das medidas de fase de batimento da onda portadora, as quais permitem obter posições com alto nível de acurácia, embora haja algumas dificuldades adicionais, pois se trata de medidas ambíguas.

A principal tarefa dos satélites GPS consiste em enviar sinais com informações de navegação e identificação, os quais são decodificados pelos receptores GPS. Os osciladores a bordo dos satélites, um cristal de referência do PLL (*Phase Lock Loops*), altamente estáveis, são abrigados em uma câmara térmica para não haver oscilações de temperatura e deriva de frequência, geram uma frequência fundamental de 10,23 MHz, a partir da qual resultam os sinais transmitidos pelos satélites GPS.

Cada GPS transmite dois sinais para os propósitos de posicionamento:

- Sinal L1, baseado na portadora com frequência 1575,42 MHz. Modulados na portadora L1 estão os códigos pseudoaleatórios (PRN) C/A e o Y que se referem ao código P criptografado, além das mensagens de navegação. Os códigos PRN usados em cada satélite são únicos e qualquer par deles apresenta baixa correlação, permitindo que todos os satélites compartilhem da mesma frequência.
- Sinal L2, baseado na portadora com frequência 1227,60 MHz. A portadora L2 é modulada pelo código Y e pela mensagem de navegação.

Os satélites de última geração, GPS Block II-F e GPS III, carregam uma terceira onda portadora.

- L5 (centrada em 1176,45 MHz) que está na faixa protegida aeronáutica, mas não atingirá a capacidade operacional total até aproximadamente 2023 (Eurocontrol, 2021b).

Importante ressaltar que os receptores certificados IFR a bordo de aeronaves operam atualmente na frequência L1.

Quando foram disponibilizados aos usuários civis acesso a GPS L1 em 1983, os militares queriam garantir que um usuário civil não tivesse o mesmo nível de precisão que os usuários militares. Dessa forma, houve uma degradação intencional



dos sinais de GPS implementados por razões de segurança chamada de disponibilidade seletiva, SA (*Selective Availability*). SA foi a razão principal para o desenvolvimento de sistemas de aumento baseados em satélite e terrestres (SBAS e GBAS). O SA foi desativado no ano 2000, com avaliações periódicas e permaneceu desativado. Os satélites GPS III não contam mais com a possibilidade de reativação da SA, tornando permanente a decisão tomada no ano 2000 (GPS, 2021b).

O GLONASS (*Global Navigational Satellite System*) foi iniciado em meados dos anos 1970. O primeiro satélite GLONASS, COSMOS 1413, foi lançado em 1982 juntamente com mais dois outros.

A estrutura do sinal de rádio do GLONASS é baseada na transmissão de duas bandas por meio das portadoras L1 (1602,00 MHz) e L2 (1246,00), moduladas por dois códigos binários e pela mensagem de navegação (Bezerra, 2021, pág. 23). Da mesma forma onde todos os satélites GPS transmitem em uma única frequência e cada sinal de satélite é diferenciado por código CDMA (*Code Divisional Multiple Access*), os satélites GLONASS têm sua própria frequência dedicada e seus sinais são diferenciados por frequência FDMA (*Frequency Divisional Multiple Access*). Atualmente os satélites GLONASS mais modernos estão incorporando a CDMA em conjunto com a FDMA (Eurocontrol, 2021b).

## 2.5 ADS-B (*AUTOMATIC DEPENDENT SURVEILLANCE-BROADCAST*)

O ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance – Broadcast*) é uma tecnologia de vigilância avançada que combina uma fonte de posicionamento da aeronave, da aviônica e de uma infraestrutura de solo para criar uma interface de vigilância precisa entre a aeronave e o ATC. ADS – B é uma tecnologia de vigilância baseada em desempenho que é mais precisa do que o radar e consiste em dois serviços diferentes: ADS – B Out e ADS – B In (FAA, 2021d).

O sistema viabiliza às aeronaves a transmissão de informações como: posição, altitude, velocidade, identificação, radial, destino, origem, razão de subida ou descida entre outros. Por meio da frequência empregada pelo equipamento *transponder* da aeronave, esses dados são difundidos de uma a duas vezes por segundo, e enviados automaticamente para o centro de controle. Essa tecnologia vem sendo estudada como substituição aos radares. O sistema de vigilância, por meio do ADS-B, já se encontra em operação no Brasil em Macaé, região marítima onde estão

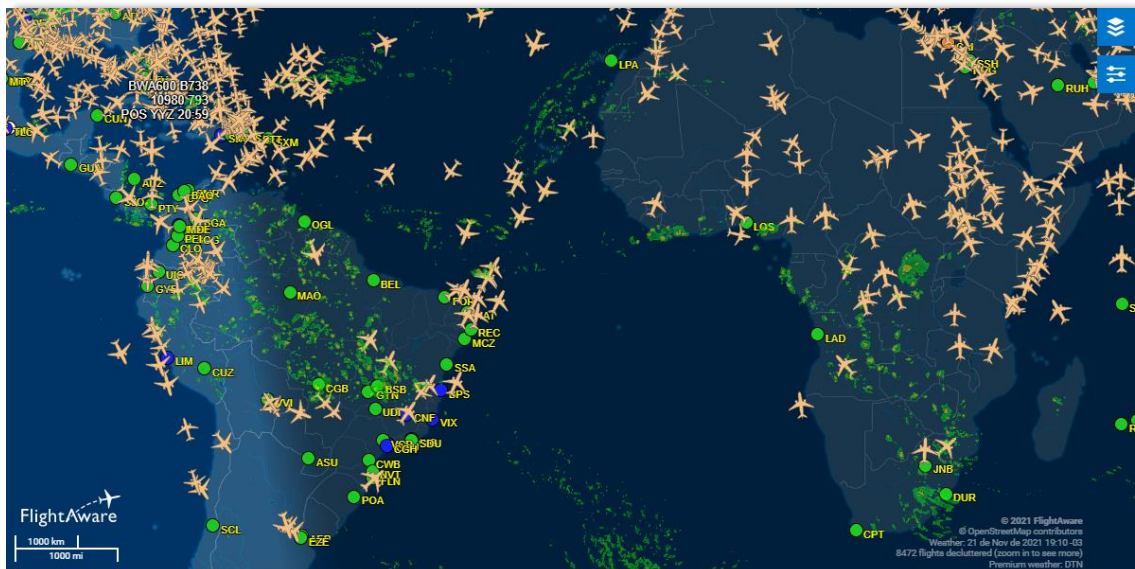
localizadas inúmeras plataformas de petróleo e gás, coberto pelo programa Sirius Brasil, que visa prover o serviço de vigilância de tráfego aéreo em baixa altitude em áreas oceânicas fora da cobertura radar (DECEA, 2021f).

Outra aplicação que veem sendo estudada no que tange a vigilância de superfície dos aeroportos, é o monitoramento de tráfego nas *taxiway* e pistas de decolagem, colaborando para a segurança das operações.

Nos Estados Unidos o uso do sensor ADS-B nas aeronaves tem caráter obrigatório desde 1 de janeiro de 2020, conforme documento da FAA AC No: 90-114B de 30/12/2019. Para aéreas oceânicas, onde não existe cobertura radar, é obrigatório do uso do ADB-C (FAA, 2021d).

Os famosos aplicativos *Flightradar24* e *Flightaware* entre outros, utilizam as informações de dados abertos enviadas pelas aeronaves via ADS-B e disponibilizam mapas de rastreo dos voos ao vivo em suas plataformas. O receptor ADB-S é disponibilizado pelas empresas aos seus usuários, ou pode ser comprado pelo usuário que tem interesse, permitindo uma cobertura a nível global. Segundo informações da empresa um receptor tem alcance de até 400 km, e quanto maior a cobertura melhor são os cálculos realizados pelos algoritmos.

FIGURA 20 - TRÁFEGO AÉREO MUNDIAL EM TEMPO REAL



FONTE: *FlightAware* (disponível em: <https://pt.flightaware.com/>)

## 2.6 SISTEMAS DE AUMENTO

### 2.6.1 ABAS (*Aircraft Based Augmentation System*)

Essencialmente, as constelações de satélites para provimento de informação de posicionamento global não foram desenvolvidas com o intuito de satisfazer os estritos requisitos da navegação por instrumentos IFR (ANAC, 2021b). Dessa maneira, os sistemas ABAS (*Aircraft Based Augmentation System*), aviônicos embarcados na aeronave, melhoram e/ou integram a informação proveniente da constelação de satélites com outras informações disponíveis a bordo da aeronave, tais como os sistemas de navegação inercial, de forma a aprimorar o desempenho do sistema GNSS (ANAC, 2021b).

O sistema ABAS mais empregado é denominado RAIM (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring System*) (ANAC, 2021b). Ele é um sistema de monitoramento da integridade do sinal de posicionamento proveniente das constelações de satélites GNSS. A determinação da integridade do sinal de posicionamento é obtida por meio de verificações de consistência das informações provenientes de medições redundantes dos sinais dos satélites (pseudodistância e fase da onda portadora). Existem dois eventos distintos que podem resultar em um alerta de RAIM. O primeiro ocorre quando não é possível obter o sinal de um número suficiente de satélites em geometria adequada. Nestas condições, é possível que a informação de posição continue sendo estimada com precisão, porém, a função de verificação de integridade do receptor é perdida. O segundo evento ocorre quando o receptor detecta um satélite com perdas de sinal (ou seja, a recepção do sinal de um ou mais satélites não está ocorrendo de maneira adequada) sendo que, nestes casos, um alerta resulta em perda da capacidade de navegação GNSS (ANAC, 2021b).

Os algoritmos de RAIM requerem um mínimo de cinco satélites visíveis ao receptor para realizar a detecção de falha e, consecutivamente, detectar a presença de erros excessivos da informação de posicionamento para uma determinada fase de voo (ANAC, 2021b).

Para operações baseadas em áreas oceânicas ou áreas continentais remotas, as aeronaves aprovadas para uso do GNSS como meio primário de navegação deve, não só possuir a capacidade de detectar um satélite com perdas de recepção de sinal (como por exemplo, por meio do RAIM), como também devem possuir a capacidade

de determinar qual o satélite apresenta perdas de sinal e excluir as informações por ele fornecidas do cálculo para a determinação da solução de posicionamento. Ou seja, os receptores GNSS das referidas aeronaves devem ser capazes de realizar o FDE (*Fault Detection and Exclusion*), detectar satélites com perdas de sinal e automaticamente excluí-lo do cálculo da solução de posição.

Os algoritmos FDE demandam um mínimo de seis satélites não apenas para detectar a presença de um satélite com perdas de sinal, mas também para excluí-lo do cálculo de posicionamento, de forma que a solução de navegação possa ser realizada de forma contínua (ANAC, 2021b).

Os softwares de predição da disponibilidade de RAIM ou FDE não garantem o serviço dos sistemas GNSS. Contudo, constituem ferramentas utilizadas para avaliar a capacidade esperada de se atingir o desempenho de navegação requerido. Em decorrência de falhas inesperadas dos elementos do sistema GNSS, a capacidade de navegação por satélite pode ser perdida ou degradada durante o voo, situação que demandaria a reversão para meios alternativos de navegação. Deste modo, quando o GNSS constituir o meio primário de navegação, a predição de disponibilidade da função RAIM deverá ser verificada para cada rota prevista, segmentos de rota e procedimentos terminais (decolagens, chegadas ou aproximações), incluindo aeródromos de alternativa, para as seguintes situações:

- Qualquer satélite estiver programado para estar fora de serviço; ou
- Dois ou mais satélites estiverem programados para estar fora de serviço,

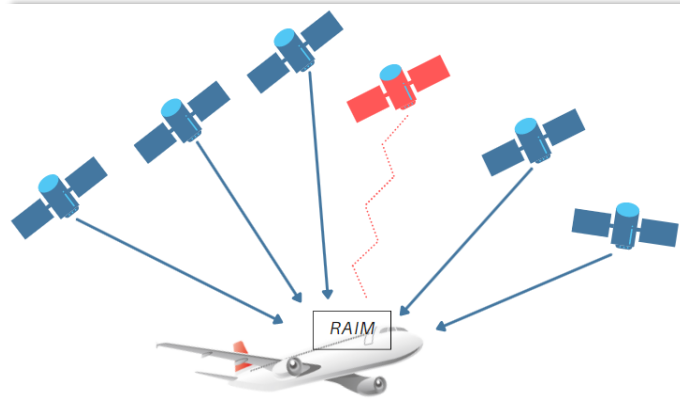
para os sistemas RNAV que incluam a informação de altitude barométrica.

A ANAC estabelece que a predição da funcionalidade FDE deve ser realizada durante o pré-voo para operações previstas em áreas oceânicas ou remotas (RNAV 10 ou RNP 4) em que o GNSS constitui o meio primário de navegação. A predição de disponibilidade das funções RAIM e FDE deve considerar os mais recentes NOTAMs expedidos para a constelação de satélites GNSS, e a disponibilidade pode ser conferida por meio de um programa de previsão instalado na aeronave ou um programa executado fora da aeronave (este último deve utilizar os mesmos algoritmos daqueles embarcados na aeronave, quando aplicável, ou algoritmos que forneçam resultados mais conservativos).

Embora o sistema GNSS, como um todo, tenha evoluído para ser utilizado como meio primário de navegação, alguns sistemas embarcados, por suas

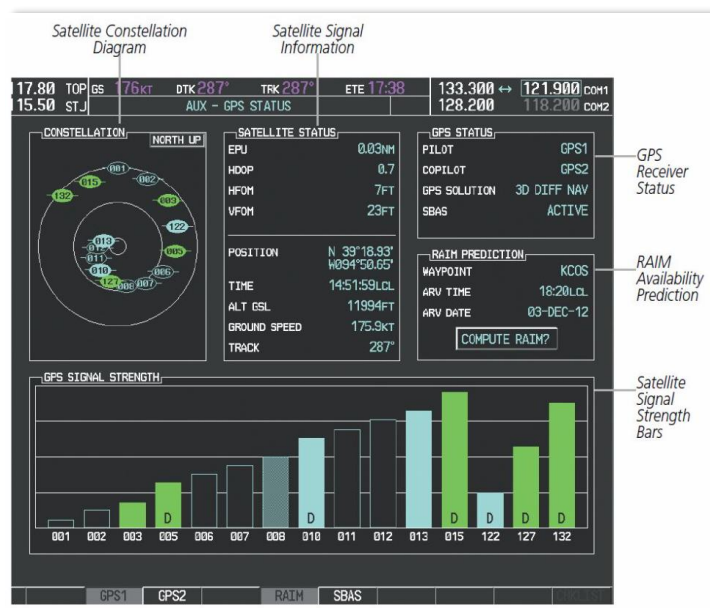
características de fabricação ou instalação, são limitados para serem utilizados apenas como meios suplementares de navegação.

FIGURA 21 - RAIM



FONTE: A autora (2021)

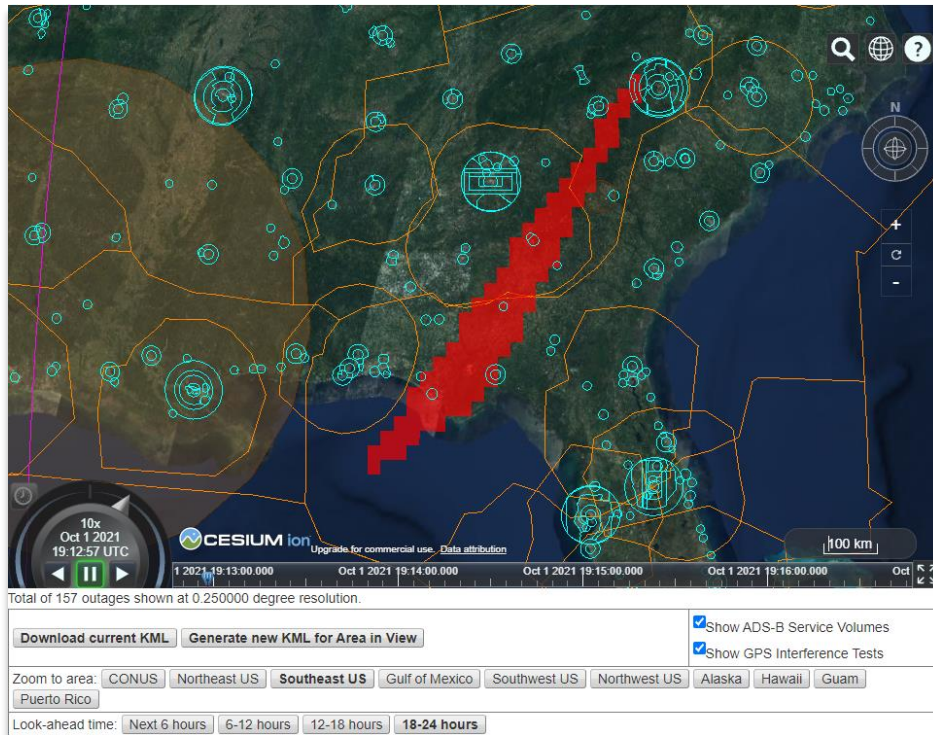
FIGURA 22 - AERONAVE EQUIPADA COM SISTEMA ABAS



FONTE: SENECAV (disponível em: <https://www.senecav.uk/pbn-training/principles-of-gps/>)

O site da FAA (<https://sapt.faa.gov/raim-start.php>), oferece uma ferramenta de exibição de grade resumo que pode ser usada para visualizar graficamente as previsões de interrupções do RAIM, conforme FIGURA 23.

FIGURA 23 - PREVISÃO RAIM

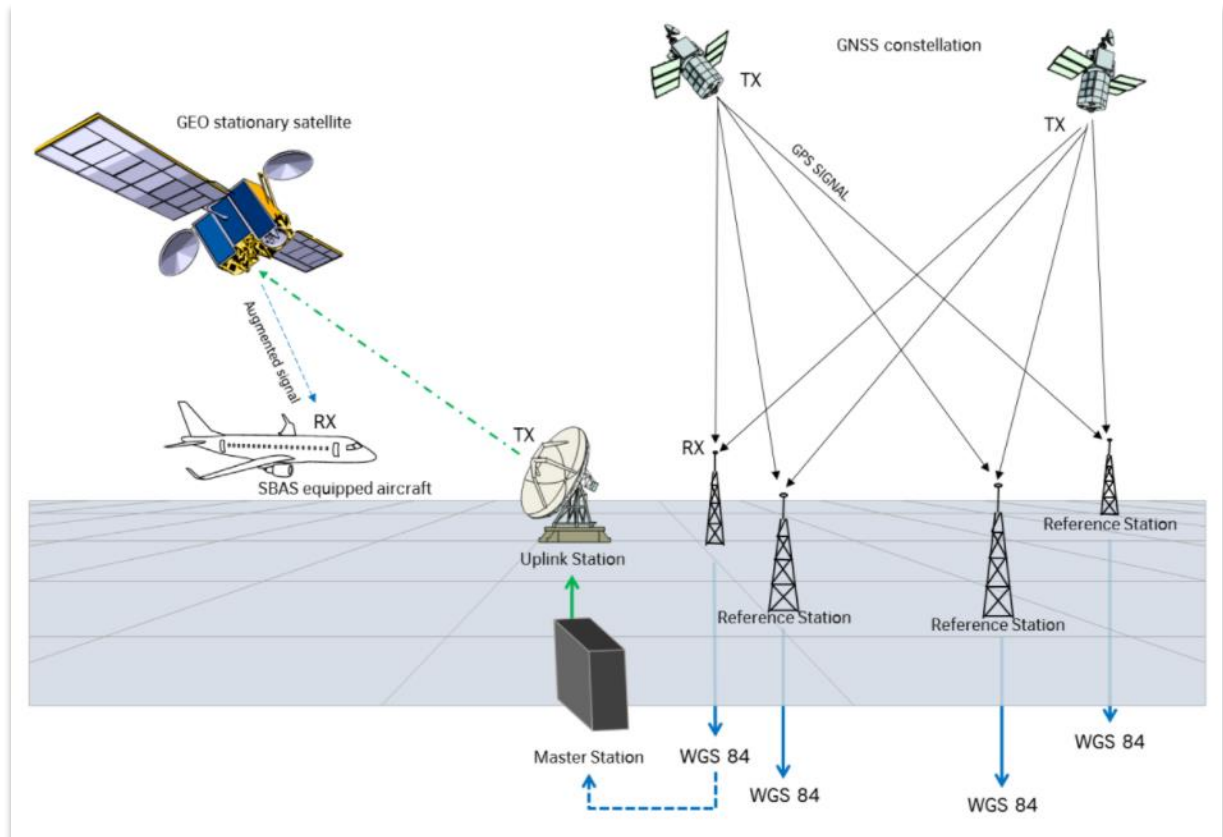


FONTE: FAA (disponível em: <https://sapt.faa.gov/outages.php?outageType=129001450&outageResolution=0.5>)

### 2.6.2 SBAS (*Satellite-Based Augmentation System*)

De acordo com o manual PBN da ICAO, SBAS é um amplo sistema de aumento de cobertura em que o usuário recebe informações de aumento de um transmissor baseado em satélite (ICAO, 2021c, p.26). O SBAS melhora a precisão e confiabilidade das informações GNSS corrigindo erros de medição de sinal e fornecendo informações sobre a acurácia, integridade, continuidade e disponibilidade de seus sinais (EUASPA, 2021).

FIGURA 24 - ARQUITETURA SBAS



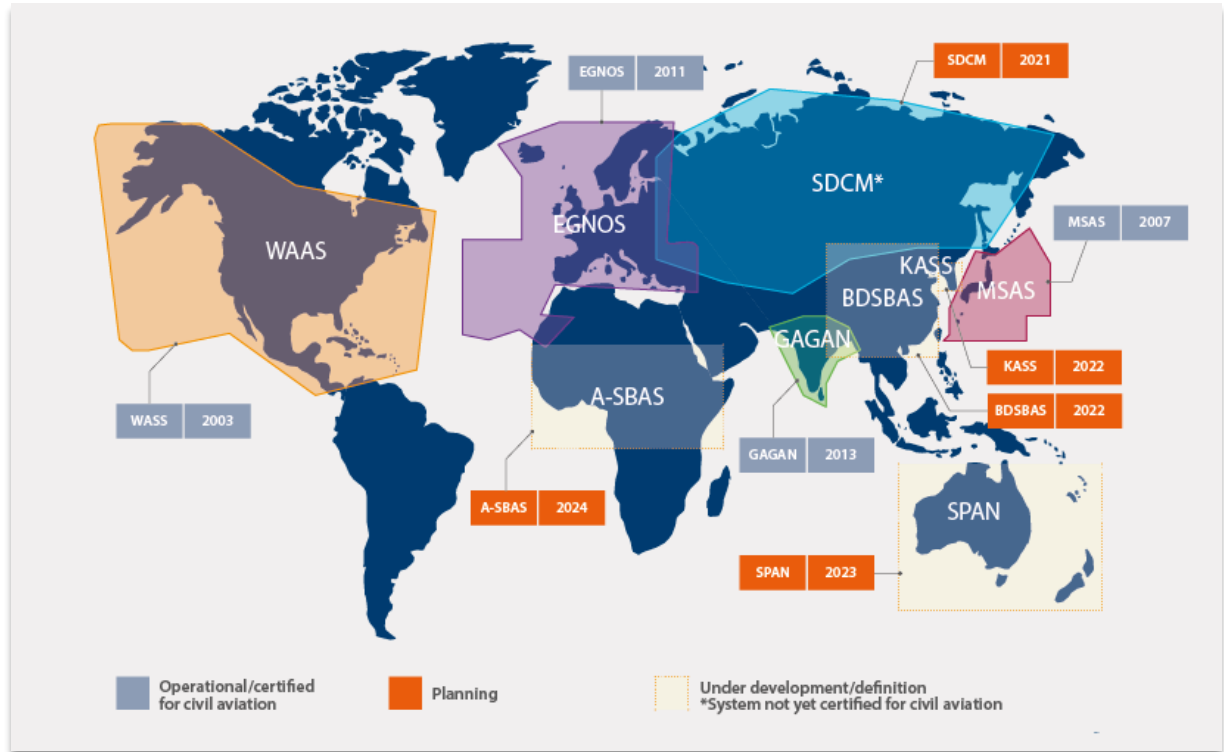
FONTE: GIOVANINI (2021)

O SBAS usa medições GNSS feitas por estações de referência localizadas com precisão e implantadas em um continente inteiro como no caso do WAAS e EGNOS (FIGURA 25), ou em vários continentes como no caso do GAGAN (*GPS Aided GEO Augmented Navigation*) conforme FIGURA 26. Todos os erros GNSS medidos são transferidos para um centro de computação central, onde as correções diferenciais e mensagens de integridade são calculadas. Esses cálculos são então transmitidos pela área coberta usando satélites geoestacionários que servem como um aumento, ou sobreposição, para a mensagem GNSS original. As correções são transmitidas também para fora da área de cobertura, porém neste caso, não terá a melhora esperada, a área que recebe as informações depende do satélite geoestacionário empregado, mas as correções podem não ser úteis para usuários fora da área onde ficam as estações terrestres. (EUASPA, 2021).

Vários países implementaram seus próprios Sistema de Aumento baseado em satélite. Por exemplo, nos Estados Unidos, o WAAS em operação desde 2003, operado pela FAA, apoia a navegação de aeronaves na América do Norte, na Europa,

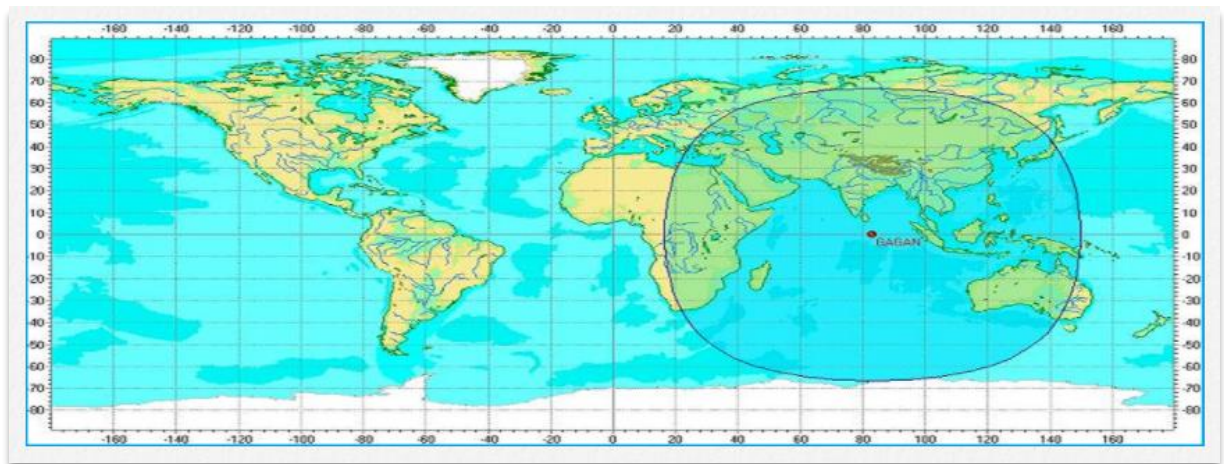
o EGNOS cobrindo a maior parte da União Europeia, juntamente com alguns países e regiões vizinhas conforme FIGURA 25.

FIGURA 25 - SISTEMAS SBAS



FONTE: EUSPA (2021)

FIGURA 26 - ÁREA DE COBERTURA SBAS GAGAN



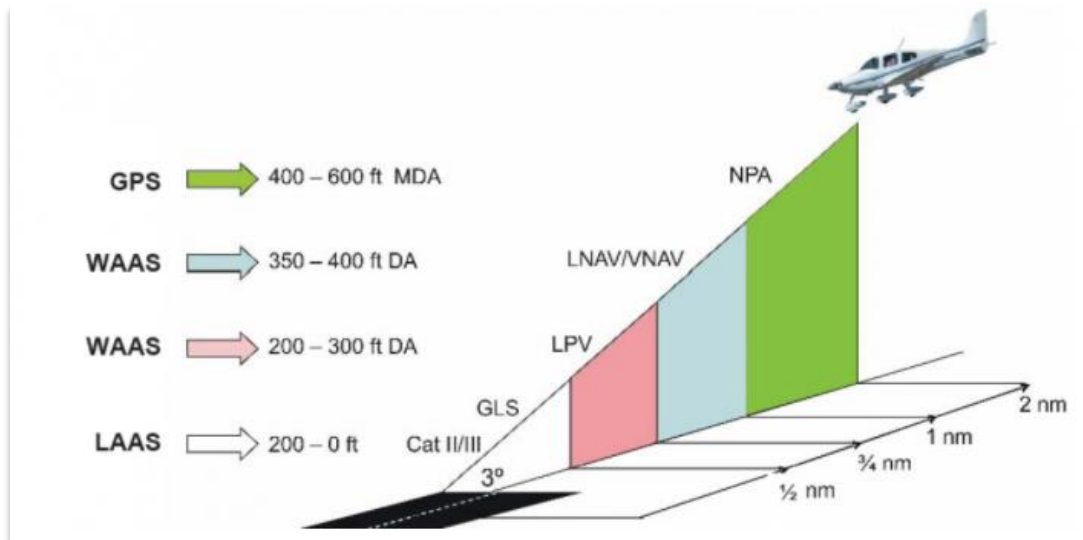
FONTE: GAGAN (2021)

O WAAS é um sistema de navegação extremamente preciso desenvolvido para a aviação civil, aumenta o sinal GPS L1 fornecendo melhor precisão e integridade. Antes do WAAS, o NAS (*National Airspace System*) não tinha o potencial de fornecer navegação horizontal e vertical para operações de aproximação para todos os



usuários em todos os locais da área de cobertura. WAAS fornece serviços para todas as classes de aeronaves em todas as fases do voo (FIGURA 27), incluindo navegação em rota, partidas e chegadas de aeroportos. Isso inclui aproximações de pouso guiadas verticalmente em condições meteorológicas por instrumentos em todos os locais qualificados em todo o NAS (FAA, 2021b).

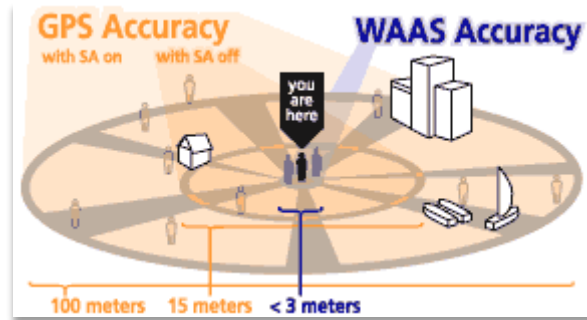
FIGURA 27 - PRECISÃO NA FASE DE POUSO UTILIZANDO SISTEMAS DE AUMENTO



FONTE: (disponível em: <https://www.ainonline.com/aviation-news/business-aviation/2017-05-22/universals-lpv-payback-calculator-helps-support-avionics-upgrades>)

A arquitetura do WAAS consiste em várias estações de referência terrestres posicionadas nos EUA que monitoram dados de satélite GPS. Duas estações mestres, localizadas em cada costa, coletam dados das estações de referência e criam uma mensagem de correção de GPS. Esta correção leva em conta a órbita do satélite GPS e a deriva do relógio mais atrasos de sinal causados pela atmosfera e ionosfera. A mensagem diferencial corrigida é então transmitida por um dos dois satélites geoestacionários, ou satélites com uma posição fixa no equador. A informação é compatível com a estrutura básica do sinal GPS, o que significa que qualquer receptor GPS habilitado para WAAS pode ler o sinal (GARMIN, 2021).

FIGURA 28 - COMPARAÇÃO DE PRECISÃO COM O SBAS



FONTE: GARMIN (2021)

Conforme FIGURA 28, pode-se comparar a precisão inicialmente disponibilizada pela constelação GPS que estava sujeita a degradação de precisão de acordo com o programa de disponibilidade seletiva SA imposto pelo governo americano de 100 metros, 15 metros sem o SA, 3-5 metros utilizando GPS diferencial (DGPS) e menor que 3 metros com WAAS (GARMIN, 2021).

### 2.6.3 GBAS (*Ground Based Augmentation System*)

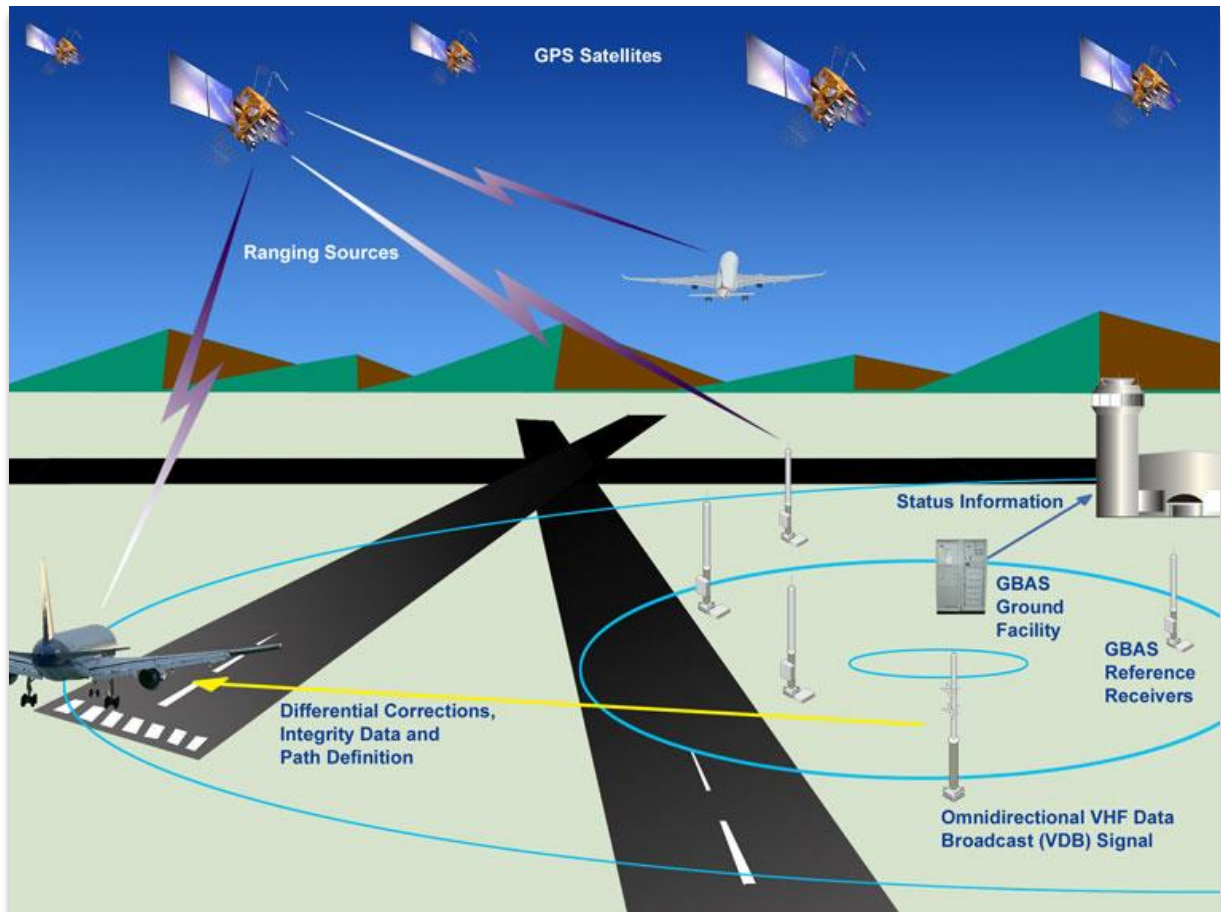
O GBAS é um sistema de aumento baseado em estações terrestres, que possibilita aproximação e pouso de precisão, projetado para atender a aproximações nas Categorias I, II e III, apoiado por correções diferenciais dos sinais GPS em tempo real, buscando atender todas as categorias de aproximação, incluindo as de precisão, saídas guiadas, aproximação perdida e operações de superfície dentro de sua cobertura operacional. O GBAS tem como objetivo propiciar as condições necessárias para a aplicação de especificação de navegação com exatidão inferior a 0,3 nm conforme especificado na TABELA 2, nas operações em TMA, permitindo a redução dos mínimos de separação entre aeronaves e entre aeronave e obstáculos (DECEA, 2021b).

Considerado uma alternativa para os sistemas de pouso tradicionais como o ILS, que possui alto custo de instalação e cobre somente uma das cabeceiras do aeroporto, o GBAS tem uma cobertura de 20 milhas náuticas (aproximadamente 40 km), sendo capaz de realizar aproximações em curvas, sem a necessidade de alinhamento ao centro da pista.

Apesar de diversos estudos a respeito da sistemas GBAS em nível mundial, atualmente poucos aeroportos possuem essa operação homologada, a maioria

concentrada em região de média latitude, com grandes restrições para aeroportos de baixas latitudes devido aos fenômenos ionosféricos como no caso do Brasil (DECEA, 2021b).

FIGURA 29 - ARQUITETURA GBAS



FONTE: FAA (2021c)

Uma instalação terrestre GBAS normalmente tem três ou mais antenas GPS, um sistema de processamento central e um transmissor VDB (*VHF Data Broadcast*), todos localizados, normalmente, dentro do aeroporto. O equipamento aerotransportado GBAS consiste em uma antena GPS, uma antena de frequência muito alta (VHF) e equipamento de processamento associado. A bordo da aeronave, a aviação GBAS dentro da tecnologia MMR (*Multi Mode Receiver*) permite a implementação simultânea de GPS, GBAS e ILS usando antenas e hardware comuns. O GBAS usa o link de rádio VHF para fornecer às aeronaves correções de GPS, integridade e informações do caminho de abordagem (FAA, 2021c).

A transmissão do GBAS inclui parâmetros de integridade que permitem aos aviônicos GBAS computar limites de erro vertical e lateral em sua posição GPS

calculada. Esse limite é comumente conhecido como nível de proteção. Os valores de integridade da transmissão são definidos de forma que a probabilidade do erro real ser maior do que o nível de proteção calculado seja menor que 1 em 10 milhões. A aviônica compara esses limites verticais e laterais calculados a um conjunto correspondente de níveis de alerta. Se qualquer um dos níveis de proteção computados for maior do que os limite de alerta correspondentes, a aviônica determina que a precisão de posicionamento da aeronave não é adequada para a operação. Os limites de alerta são definidos nos padrões ICAO e são baseados na quantidade de erro permitida para uma determinada operação. (FAA,2021c).

Entre os benefícios potenciais do sistema GBAS, cita-se (ICAO, 2014):

- Teto inferior e mínimos de visibilidade para abordagens diretas;
- Melhor orientação de decolagem em condições de baixa visibilidade;
- Teto melhorado e mínimos de visibilidade para abordagens complexas;
- Aumento da capacidade de abordagens paralelas bem espaçadas;
- Descrição qualitativa de vários benefícios potenciais de eficiência, incluindo variáveis *glideslopes*, orientação de aproximação perdida e navegação de superfície;
- Elimina restrições de capacidade devido a áreas críticas de ILS;
- Ativação de tecnologia para serviços de navegação de área terminal de alta precisão (trajetórias dinâmicas em 4 dimensões);
- Suporta limites de pouso compensados para aeroportos de alta densidade, ajudando a implementar procedimentos de prevenção de turbulência de esteira relativos às chegadas;
- Fornece a capacidade de usar abordagens de descida contínua (CDAs) e abordagens segmentadas em curva em condições de visibilidade extremamente baixa.

Os sistemas de pouso por GBAS são chamados de GLS (*GBAS Landing System*). Os primeiros sistemas de aeronaves já estão disponíveis e os Estados Unidos a Alemanha e a Rússia qualificaram os primeiros sistemas de solo para apoiar a abordagem de precisão CAT-I (FLYGLS, 2021).

Diversas agências governamentais, indústrias e universidades trabalham no desenvolvimento do GBAS, receptores de aeronaves e sobre a implementação operacional do sistema, com concentração maior no hemisfério Norte, conforme mapa

divulgado em [www.flygls.net](http://www.flygls.net). Este site foi criado para apoiar o Grupo de Trabalho Internacional GBAS.

FIGURA 30 - ESTAÇÕES GBAS



FONTE: FLYGLS (disponível em: [www.flygls.net](http://www.flygls.net))

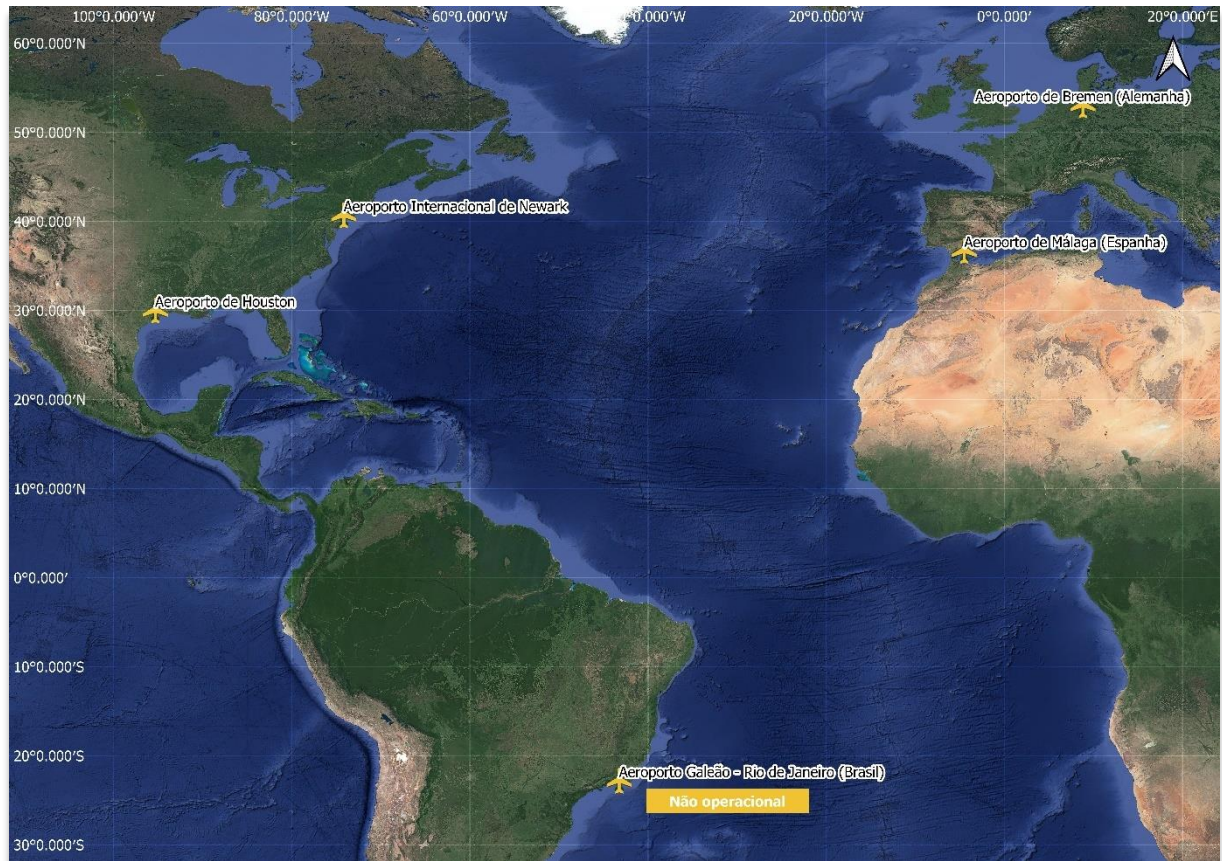
### 2.6.3.1 GBAS - Aeroporto do Galeão Rio de Janeiro

No Brasil, por meio DECEA em cooperação com a FAA, esforços têm sido empregados na avaliação do uso de Sistema GBAS no espaço aéreo brasileiro (ICAO, 2021d).

Inicialmente, um protótipo GBAS da FAA foi instalado no Aeroporto Internacional do Galeão (SBGL), o que permitiu estudos iniciais quanto às capacidades do sistema. O comportamento de uma estação GBAS no Rio de Janeiro é de grande interesse, visto que é localizada em região de baixa latitude, sujeita a intensa atividade ionosférica com a ocorrência de fenômenos como gradientes graves, bolhas de plasma e cintilação (ICAO, 2021d).

Em julho de 2011, uma estação Honeywell SLS-4000 SmartPath foi adquirida e instalada em SBGL, estação esta já certificada pela FAA para uso em ambiente de latitude médias, visando permitir a avaliação do comportamento quando sujeita às características da ionosfera, perto do geomagnético equador durante o período de atividade solar máxima, como o caso do Brasil. Esse mesmo equipamento SLS-4000 está operando em maneira regular em aeroportos como Bremen (Alemanha), Newark (EUA), Houston (EUA) e Málaga (Espanha), localizados em latitude médias (ICAO, 2021d).

FIGURA 31 - EXEMPLO DE AEROPORTOS COM OPERAÇÃO GLS



FONTE: A autora (2021)

Conforme divulgado no Relatório do GREPECAS em 2014, a instabilidade no funcionamento da estação mostrou que o modelo utilizado para latitudes médias não se aplicava totalmente às regiões de latitudes baixas e novos parâmetros de acordo com os dados recolhidos devem ser inseridos (ICAO, 2014). Desde então, o ICEA vem trabalhando em pesquisas referente ao modelo ionosférico, a fim de que os níveis de precisão estabelecidos pelo ICAO sejam cumpridos para que as operações GLS sejam possíveis no Brasil, dado os benefícios do sistema.

## 2.7 ERROS SISTEMÁTICOS ENVOLVIDOS NAS OBSERVÁVEIS GNSS

As observáveis básicas do GNSS que permitem determinar posição, velocidade e tempo podem ser identificadas como pseudodistância a partir do código, e fase da onda portadora ou diferença de fase da onda portadora (MONICO, 2008). Essas observáveis como outras observáveis envolvidas nos processos de medidas, estão sujeitas a erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Os erros sistemáticos

podem ser parametrizados (modelados), reduzidos e até eliminados por técnicas apropriadas de observações. (GEMAE; MACHADO; WANDRESEN, 2015). Na TABELA 3 pode ser observado os principais erros sistemáticos no GNSS.

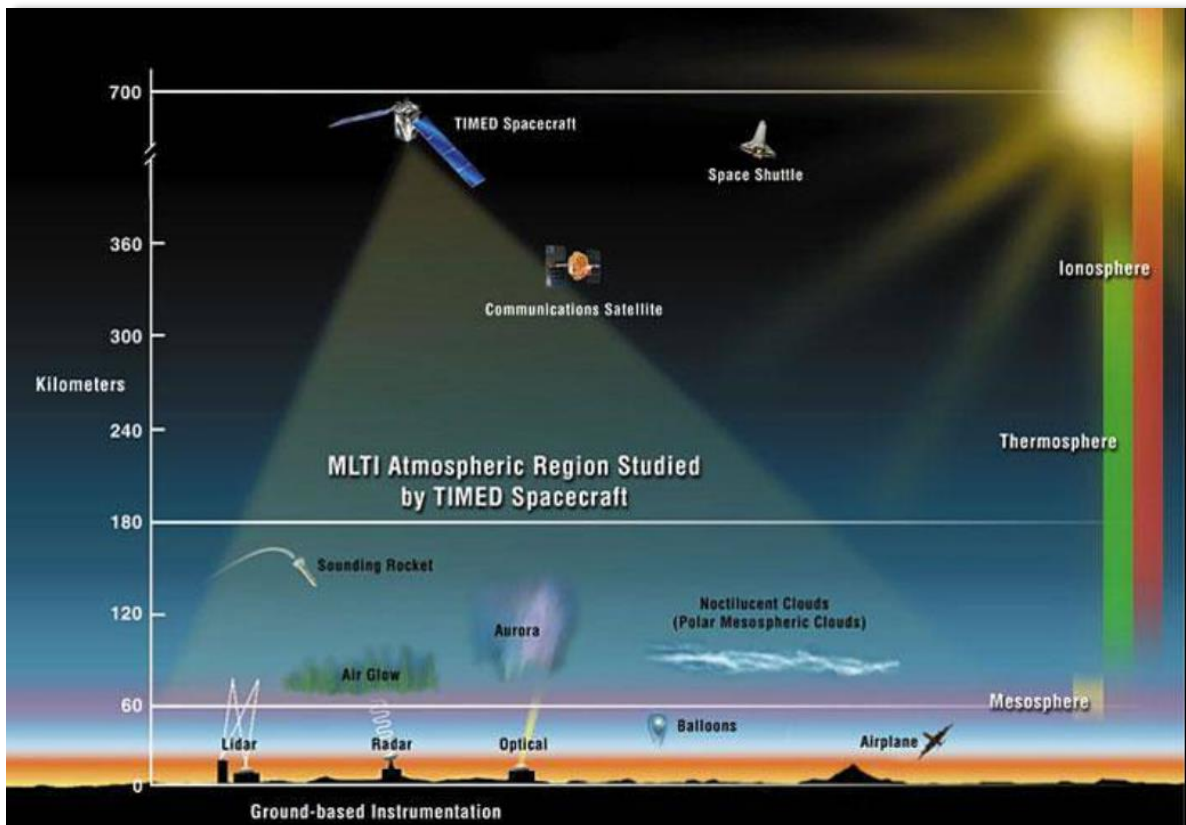
TABELA 3 - FONTE E EFEITOS DOS ERROS ENVOLVIDOS NO GNSS

Fontes	Erros
Satélite	Erro de órbita Erro do relógio Relatividade Atraso entre duas portadoras no hardware do satélite Centro de fase da antena do satélite Fase <i>wind-up</i>
Propagação do sinal	Refração troposférica Refração ionosférica Perdas de ciclos Multicaminho ou sinais refletidos Rotação da Terra
Receptor/Antena	Erro do relógio Erro entre os canais Centro de fase da antena do receptor Atraso entre as duas portadoras no hardware do receptor Fase <i>wind-up</i>
Estação – (alguns erros são, na realidade, efeitos geodinâmicos que devem ser corrigidos.)	Erro nas coordenadas Multicaminho ou sinais refletidos Marés terrestres Movimento do polo Carga oceânica Pressão atmosférica

FONTE: MONICO (2008)

Segundo (MONICO, 2008) o meio no qual ocorre a propagação do sinal consiste, essencialmente, da troposfera e da ionosfera (FIGURA 32), cada uma com características bem distintas. A troposfera estende-se da superfície terrestre até aproximadamente 50 km e comporta-se para frequência abaixo de 30 GHz, como um meio não dispersivo, isto é, a refração é independente da frequência do sinal transmitido, dependendo apenas das propriedades termodinâmicas do ar. A ionosfera é um meio dispersivo, a refração depende da frequência. Dessa forma, a fase da portadora e a modulação sobre ela serão afetadas de diferentes formas. Enquanto a portadora sofre um avanço, a modulação através do código sofre um retardo. A ionosfera abrange aproximadamente a região de 50 até 1.000 km acima da superfície terrestre. Conforme visto anteriormente a implantação do sistema GBAS no Brasil e no mundo tem como um dos grandes complicadores a refração ionosférica, principalmente em regiões de baixa latitude, portanto nesse trabalho será dado mais enfoque nesse erro que afeta os posicionamentos GNSS.

FIGURA 32 - IONOSFERA



FONTE: NASA (disponível em: <https://www.nasa.gov/topics/solarsystem/sunearthsystem/timed-science.html>)

### 2.7.1 Refração Ionosférica

Os sinais provenientes dos satélites sofrem erros relacionados à propagação de sinais, e conforme a camada, diferentes tipos de influência podem ocorrer. A camada da Ionosfera é um meio dispersivo, dessa forma a refração depende da frequência, enquanto a onda portadora sofre um avanço o código que esta modulado na onda sofre um retardo (MONICO, 2008, pg. 196).

A eliminação dos efeitos da refração ionosférica de primeira ordem é possível empregando a combinação linear entre observáveis de duas frequências diferentes, denominada de *iono-free* (IBGE, 2021). Porém, atualmente para uso da navegação aérea é permitido somente a utilização da fase de onda portadora L1. O Brasil tem sido pioneiro nos estudos relativos ao impacto dos fenômenos ionosféricos nos sinais de navegação do GNSS em regiões equatoriais, especialmente os relacionados ao GBAS.

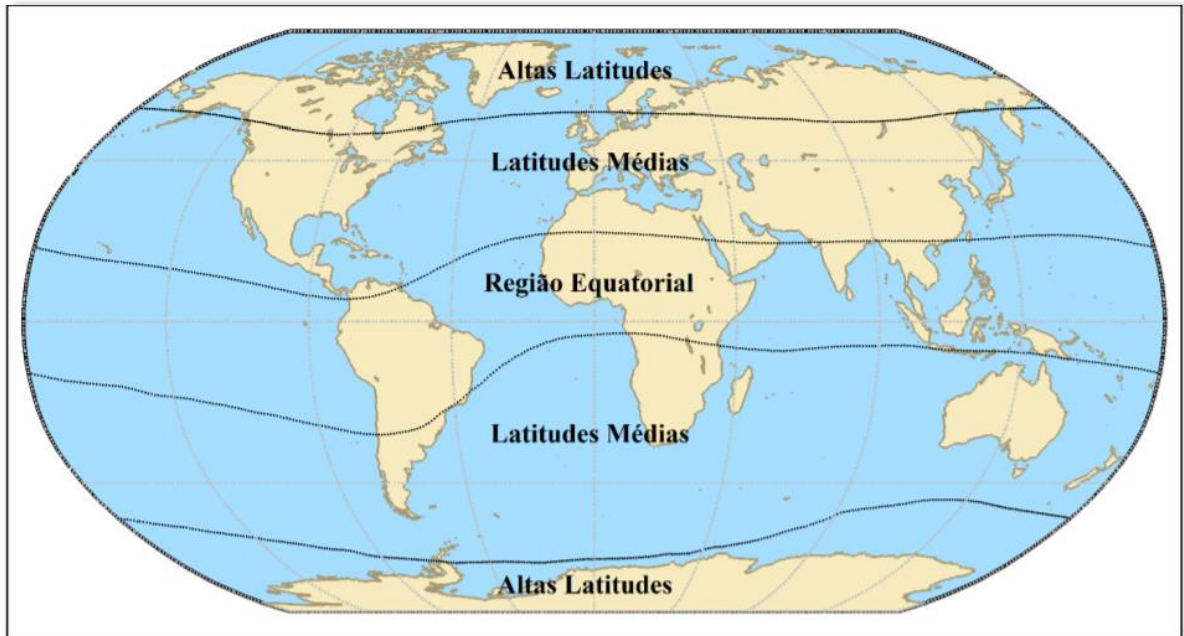


A refração ionosférica, depende da frequência e, conseqüentemente, do índice de refração. Esse efeito é proporcional ao número de elétrons presentes ao longo do caminho percorrido entre o satélite e o receptor, chamado de TEC (*Total Electron Contents*) (MONICO, 2008, pg. 208). O TEC sofre variações temporais e espaciais, em função da radiação solar, da localização geográfica em que está situado o receptor na superfície terrestre, bem como do campo geomagnético. Há outras irregularidades e anomalias que podem influenciar no comportamento do TEC, tais como a anomalia equatorial e a cintilação ionosférica que podem até fazer com que o receptor perca a sintonia com o satélite (MONICO, 2008).

As variações temporais compreendem as variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos de aproximadamente 11 anos, associados as ocorrências de manchas solares, sendo o aumento de ionização proporcional ao número de manchas. As variações diurnas são ocasionadas sobretudo por causa da radiação solar, e as sazonais que variam conforme as estações do ano, em razão da mudança do ângulo Zenital do Sol e da intensidade do fluxo de ionização, sendo maiores no equinócio e menores no solstício (MONICO, 2008).

As regiões equatoriais são caracterizadas por um alto nível de densidade de elétrons e as de latitudes médias são consideradas relativamente livres das anomalias ionosféricas. Boa parte do território brasileiro situa-se na faixa de baixas latitudes (FIGURA 33), conhecida como Equador Geomagnético (FIGURA 35). Nessa região as tempestades solares geram um impacto mais significativo, tendo em vista a maior incidência das cintilações ionosféricas. A cintilação causa enfraquecimento no sinal recebido pelos receptores GNSS. Além disso, a ionosfera nessa região também é influenciada por irregularidade do *spread* equatorial ou “Bolhas de Plasma”. Essa irregularidade caracteriza-se pelo deslocamento de “bolhas” de baixa ionização ou baixo número de TEC, no sentido oeste-leste, com velocidades que podem variar em torno dos 100 m/s. Como resultado, esses distúrbios causam atrasos no tempo de propagação do sinal, gerando erro no cálculo da posição (DECEA, 2021a).

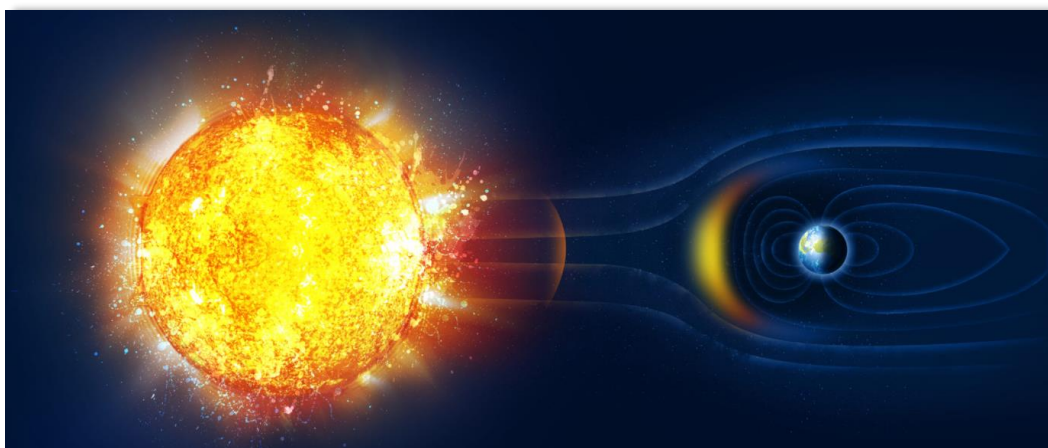
FIGURA 33 - REGIÕES DA IONOSFERA



FONTE: SETTI JUNIOR (2019)

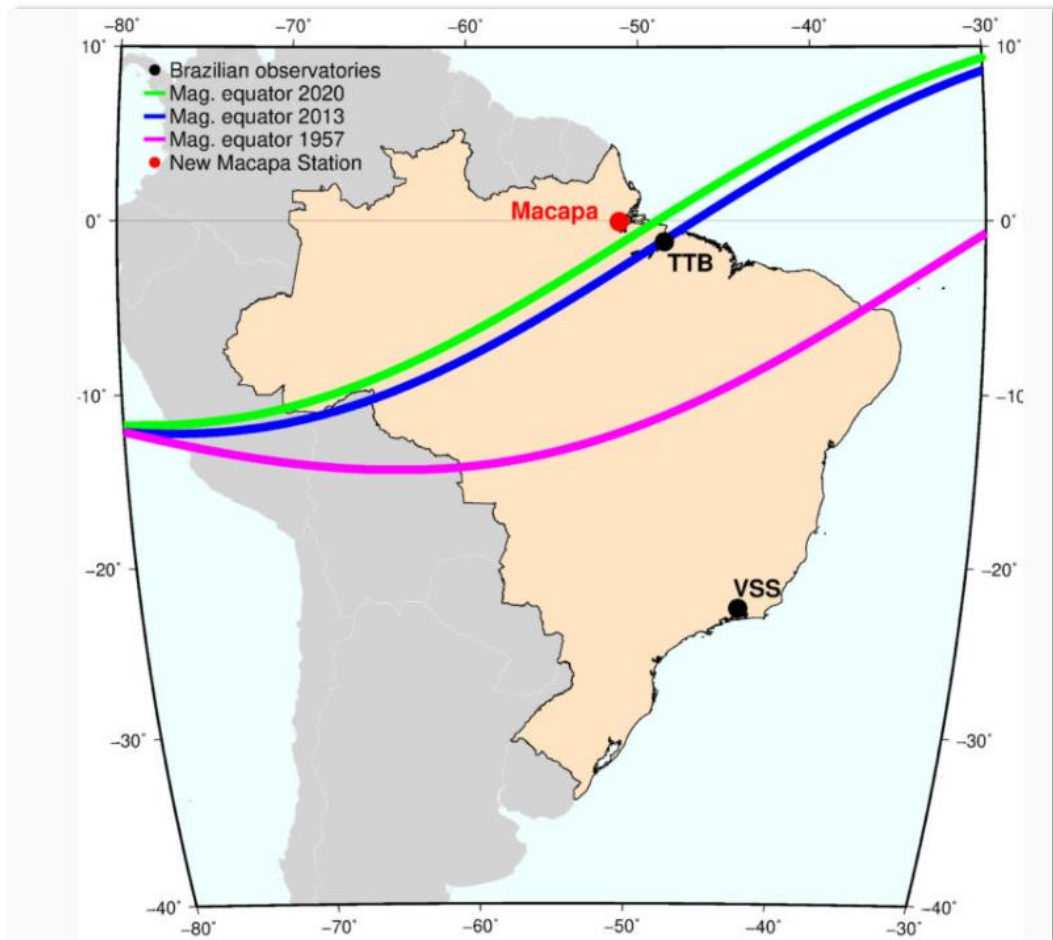
Com relação ao campo geomagnético da Terra, este exerce grande influência na variação da densidade de elétrons na ionosfera. Após eventos solares, como explosões solares (FIGURA 34), as linhas de força do campo geomagnético podem ser comprimidas de forma significativa, o que caracteriza as tempestades geomagnéticas, que afetam o comportamento da ionosfera. Na sequência são apresentados dois índices utilizados com frequência visando a avaliação de perturbação do campo magnético da Terra pelo vento ( $K_p$ ) e da atividade solar (F10.7).

FIGURA 34 - EXPLOSÕES SOLARES



FONTE: Observatório Nacional (2021)

FIGURA 35 - EQUADOR MAGNÉTICO



FONTE: Observatório Nacional (2021)

### 2.7.1.1 Índice Kp

O índice Kp descreve a perturbação do campo magnético da Terra causada pelo vento solar. Quanto maior a velocidade de propagação do vento, maior é a turbulência. O índice varia de 0, para baixa atividade, a 9, o que significa que uma intensa tempestade geomagnética está em andamento, mais informações podem ser acessadas no site do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) em: <https://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>.

### 2.7.1.2 F10.7

O fluxo de rádio solar a 10,7 cm (2800 MHz), segundo dados do NOAA disponíveis no site: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radio-emissions>, é um excelente indicador da atividade solar. Frequentemente chamado de índice F10.7, é um dos registros mais antigos da atividade solar. As emissões de rádio F10.7 têm origem alta na cromosfera e baixa na coroa da atmosfera solar. O F10.7 se correlaciona bem com o número de manchas solares, bem como com uma série de registros de ultravioleta (UV) e irradiância solar visível. O F10.7 foi medido de forma consistente no Canadá desde 1947, primeiro em Ottawa, Ontário; e depois no *Penticton Radio Observatory* em *British Columbia*, Canadá. Ao contrário de muitos índices solares, o fluxo de rádio F10.7 pode ser facilmente medido de forma confiável no dia a dia da superfície da Terra, em todos os tipos de clima (NOAA, 2021).

## 2.8 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO GNSS

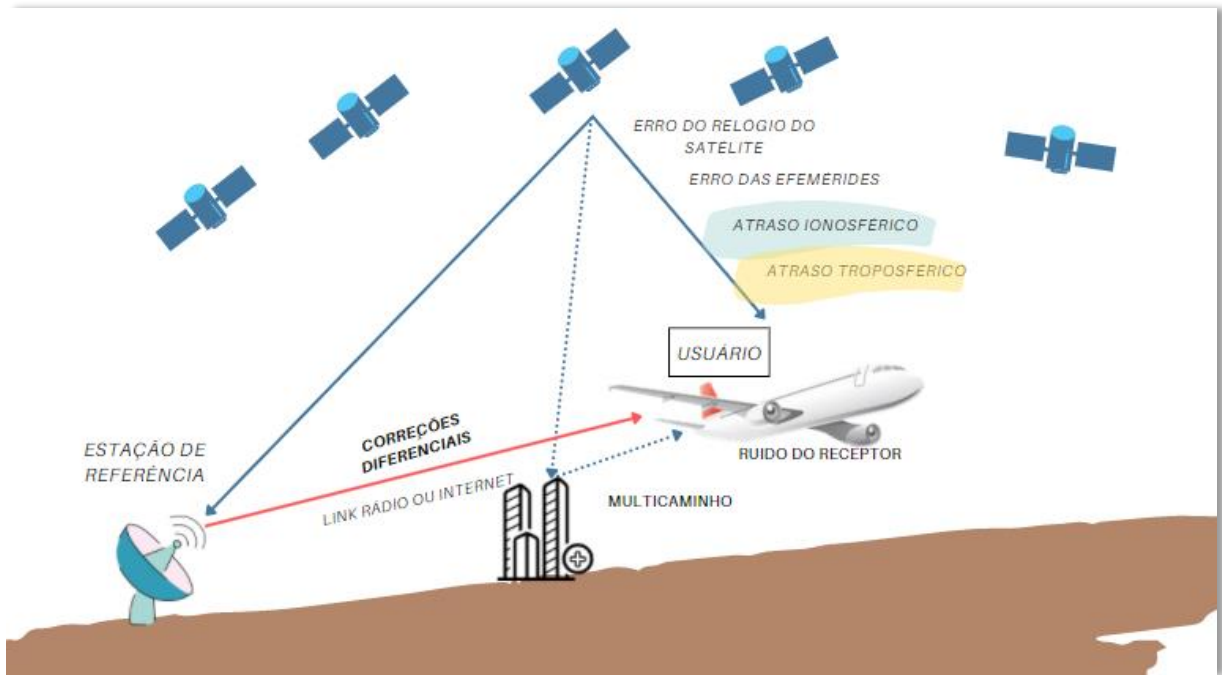
Posicionamento diz respeito a determinação da posição de objetos com relação a um referencial específico, sendo classificado em posicionamento absoluto ou por ponto, quando as coordenadas estão associadas diretamente ao geocentro, e relativo, no caso em que as coordenadas são determinadas com relação a um referencial materializado por um ou mais vértices com coordenadas conhecidas. (MONICO, 2008).

São diversos os métodos adotados para posicionamento GNSS, aqui será abordado de maneira breve os métodos DGPS, PPP, Relativo, os quais são utilizados neste trabalho.

### 2.8.1 DGPS (*Differential GPS*)

O método DGPS (FIGURA 36) é muito empregado na navegação aérea e marítima, foi desenvolvido em razão da necessidade de reduzir os efeitos da disponibilidade seletiva imposta ao GPS no modo absoluto. Tal técnica possibilita a melhora da acurácia. (MONICO, 2008, p.300).

FIGURA 36 - ARQUITETURA DGPS



FONTE: A autora (2021)

### 2.8.2 PPP (Posicionamento por Ponto Preciso)

Sobre o método de Posicionamento por Ponto Preciso segundo o documento Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro do IBGE:

Considera apenas as observações coletadas individualmente por um equipamento para o qual se quer determinar sua posição, além das informações dos satélites (efemérides) em um determinado instante ou época. Pode ser realizado apenas com observações do código C/A, sendo neste caso utilizado pela maioria dos receptores de navegação para posicionamento em tempo real, obtendo-se soluções de precisão métrica, ou utilizando as observações de código e fase das portadoras, associadas a produtos de órbita precisa e modelos atmosféricos, permitindo a realização de um Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), obtendo-se soluções de precisão centimétrica.

Na TABELA 4, indica o tempo de observação necessário para se atingir certa precisão PPP empregando a onda portadora L1 ou a combinação linear L3.

TABELA 4 - ESTIMATIVA DE PRECISÃO PARA POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO (PPP)

Tempo de Observação	Precisão L1			Precisão L3		
	Latitude	Longitude	Altitude	Latitude	Longitude	Altitude
1 h	10 cm	20 cm	20 cm	2 cm	4 cm	4 cm
2 h	5 cm	12 cm	12 cm	1 cm	2 cm	2 cm
4 h	3 cm	7 cm	8 cm	5 cm	1 cm	2 cm
6 h	3 cm	6 cm	7 cm	5 cm	1 cm	1 cm

FONTE: Adaptado IBGE (2021)

### 2.8.3 Posicionamento Relativo

O documento do IBGE Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos define o posicionamento relativo da seguinte forma:

Este método leva em consideração ao menos dois receptores coletando dados simultaneamente dos mesmos satélites. Um dos receptores fica posicionado sobre uma estação com coordenadas conhecidas, denominada de estação de referência ou base, sendo as coordenadas das demais estações calculadas a partir desta. O processo de diferenciação entre as observações simultâneas permite reduzir os erros inerentes às observações, uma vez que quanto menor for a distância entre os receptores (linha de base), mais similares serão os erros, permitindo determinação de coordenadas com precisão centimétrica (IBGE, 2021 p. 21).

Os erros e efeitos apresentados na TABELA 3 e que não são eliminados no processo de diferenciação, são reduzidos através de modelos matemáticos e/ou atmosféricos ou ainda pela combinação entre as observáveis (IBGE, 2021 p. 21), como por exemplo a combinação linear entre observáveis de duas frequências diferentes, denominada de *iono-free* (livre da ionosfera).

A TABELA 5 apresentada na sequência, expressa o tempo de observação recomendado conforme a distância da linha de base, a precisão estimada e o equipamento que deve ser empregado.

TABELA 5 - ESTIMATIVA DE PRECISÃO PARA POSICIONAMENTO GNSS RELATIVO

Linha de Base	Tempo de Observação	Equipamento Utilizado	Precisão
00 – 05 Km	05 – 10 min	L1 ou L1/L2	5 – 10 mm + 1ppm
05 – 10 Km	10 – 15 min	L1 ou L1/L2	5 – 10 mm + 1ppm
10 – 20 Km	10 – 30 min	L1 ou L1/L2	5 – 10 mm + 1ppm
20 – 50 Km	02 – 03 h	L1/L2	5 mm + 1ppm
50 – 100 Km	Mínimo: 03 h	L1/L2	5 mm + 1ppm
> 100 Km	Mínimo: 04 h	L1/L2	5 mm + 1ppm

FONTE: Adaptado IBGE (2021)

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Nesse capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

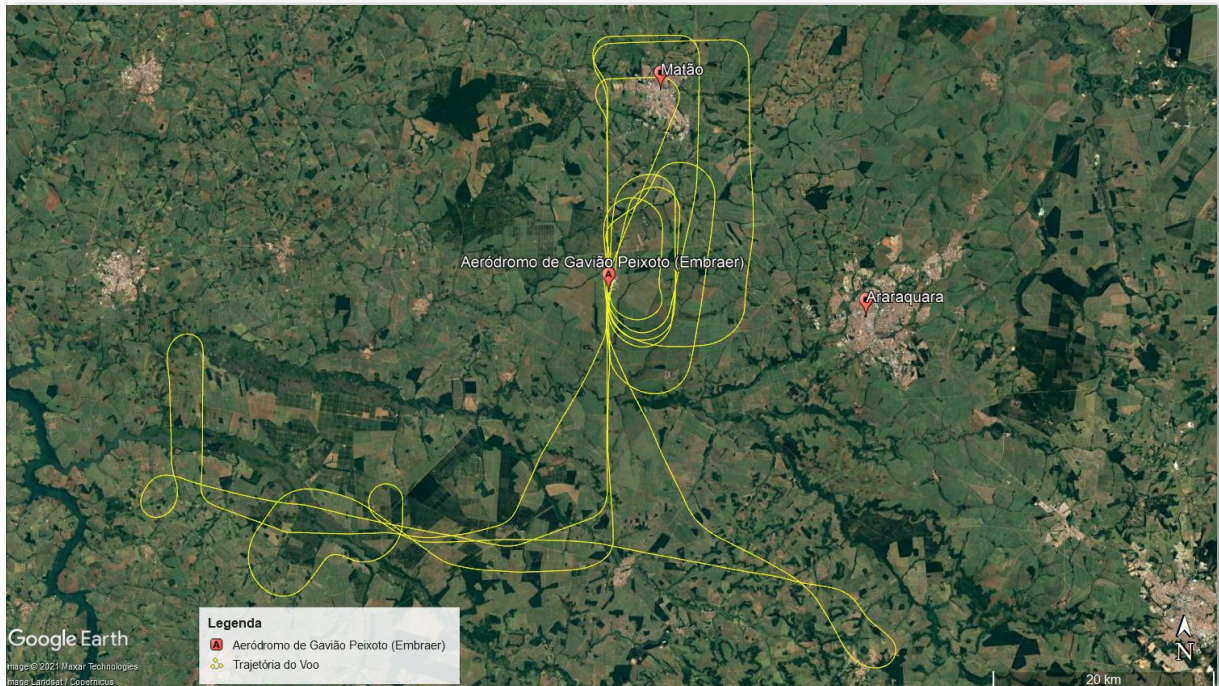
#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Dados GNSS do voo teste

Foi disponibilizado pela UNESP arquivo em formato RINEX 2, contendo dados de observação do voo teste, realizado nas proximidades do aeródromo Gavião Peixoto, conhecido como Aeroporto da Embraer, localizado no município de Gavião Peixoto, estado de São Paulo. O voo foi efetuado com a aeronave modelo Legacy fabricante Embraer.

- Arquivo RINEX 2: mvoo1520.17o.
- Data: 01 de junho de 2017.
- DOY (*Day Of Year*): 152.
- Início das observações: 11:35:37 - Final das observações: 16:24:48.
- Tempo das observações: 4 horas e 49 minutos.
- Intervalo da gravação dos dados: 1 segundo.
- Decolagem: 14:11:18.
- Pouso: 16:10:55.
- Tempo das observações em voo: 1 horas e 59 minutos.
- Aeronave Legacy / Embraer.
- Decolagem e Pouso: Aeródromo de Gavião Peixoto (ICAO: SBGP).
- Receptor GNSS TRIMBLE NETR8 e antena TRM59800.00.

FIGURA 37 - CROQUI DE LOCALIZAÇÃO



FONTE: A autora (2021)

O arquivo RINEX 2 (*Receiver Independent Exchange Format*) é um formato de dados GNSS universal, nele é possível verificar as informações disponibilizados pelos satélites, os arquivos com terminação (o) referem-se a dados de observação.

### 3.1.2 Produtos IGS

Como visto anteriormente as observáveis GNSS estão sujeitas a erros sistemáticos, causando distorções e atrasos, estes erros podem ser melhorados com os produtos disponibilizados pelo IGS, que fornece arquivos de correções referente a efemérides transmitidas, efemérides precisas, correção para os DCBs (*Differential Code Biases*), correção do relógio, entre outros, possibilitando assim trabalhar com o conceito SSR (*State Space Representation*). O método de posicionamento PPP é fundamentado nesse conceito, os erros sistemáticos são decorrelacionados e modelados de forma isolada.

Uma das fontes de erros que envolve o GNSS é a propagação dos sinais na camada da ionosfera. O IGS disponibiliza também o arquivo chamado IONEX (*IONosphere EXchange*), o qual contém valores de VTEC (*Vertical TEC*).



Os arquivos mencionados são disponibilizados no seguinte endereço eletrônico <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/>.

TABELA 6 - PRODUTOS IGS

PRODUTO	NOME DO ARQUIVO / FORMATO	DESCRIÇÃO
GPS Final Orbits (IGS)	igs19514.sp3	Efemérides precisas GPS
GLONASS Final Orbits (CDDIS)	igl19514.sp3	Efemérides precisas GLONASS
BRDC GPS Broadcast Orbits (BRDC)	brdc1520.17n	Efemérides transmitidas
IGSCB Clock file 30s (IGS)	igs19514.clk_30s	Correção do relógio com maior taxa de amostragem (30s)
P1C1 DCB	P1C11706.DCB	Correção para os DCBs ( <i>Differential Code Biases</i> ) dos satélites
P1P2 DCB	P1P21706.DCB	
ERP	igs19517.erp	Correções referente aos parâmetros de rotação da Terra, ERP ( <i>Earth Rotation Parameters</i> )
IONEX	igsg1520.17i	Modelo de correção da ionosfera
Correções das Antena	igs14.atx	Modelagem das variações de centro de fase da antena e dos satélites.

FONTE: A autora (2021)

### 3.1.3 Produtos RMBC

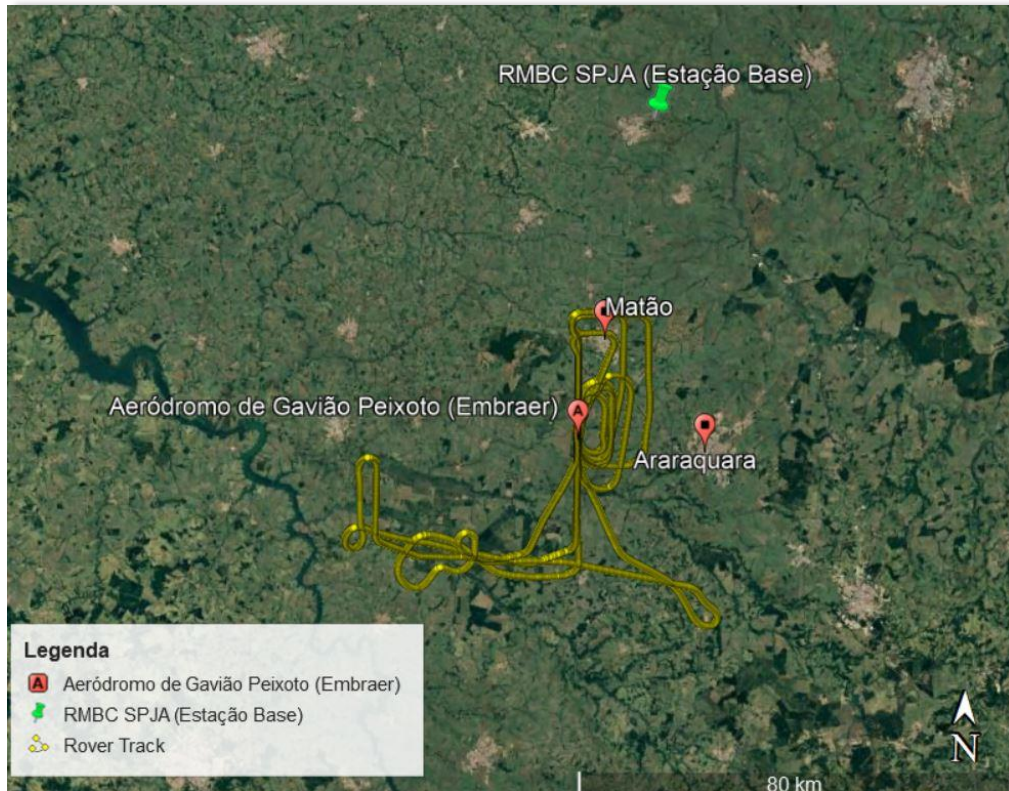
A estação RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo GNSS) utilizada como estação base foi a SPJA localizada em Jaboticabal – SP, próximo a trajetória percorrida pela aeronave. Os dados de observação do receptor são disponibilizados no site do IBGE em formato RINEX com intervalo de gravação dos dados de 15 segundos. A linha de base é de aproximadamente 60 km da estação RBMC até o Aeródromo Gavião Peixoto, local de decolagem e pouso da aeronave, chegando a 96 km conforme trajetória descrita (FIGURA 38).

TABELA 7 - COORDENADAS GEODÉSICAS SPJA

<b>Latitude</b>	- 21° 14' 27,86387"	<b>Sigma</b>	0,002 m
<b>Longitude</b>	- 48° 17' 12,13032"	<b>Sigma</b>	0,002 m
<b>Altitude Elipsoidal</b>	570,199 m	<b>Sigma</b>	0,002 m

FONTE: Descritivo SPJA IBGE (2021)

FIGURA 38 - ESTAÇÃO RBMC NAS PRÓXIMIDADES DO VOO



FONTE: A autora (2021)

### 3.2 METODOLOGIA

Utilizando o software RTKLIB v.2.4.3 b33, foram realizados processamentos conforme descritos na TABELA 8, os resultados obtidos e análises são apresentados no Capítulo 4. As estratégias de processamento foram baseadas nos fatores críticos atuais para navegação aérea, conforme descrito nesse trabalho. A frequência utilizada nos receptores das aeronaves é a L1, única disponível no momento, dessa maneira não é possível realizar a correção de primeira ordem da ionosfera, possível através de combinação linear por receptores de dupla frequência. Portanto, foi avaliada uma alternativa para mitigação do efeito ionosférico baseada em correções externas, tais como o modelo de correção da ionosfera IONEX TEC da IGS. Outros processamentos foram realizados a fim de investigar os efeitos da ionosfera, utilizando também a dupla frequência (L1+L2), combinação *iono-free*, bem como a correção da ionosfera (OFF). Destaca-se que, por razões de segurança, a utilização da portadora L2 não é autorizada pela ICAO, já que o sistema GPS não garante a integridade do sinal nessa portadora para fins de navegação.

Também foram testados diversos métodos de posicionamento, conforme indicado na primeira coluna da TABELA 8.

TABELA 8 - PROCESSAMENTOS REALIZADOS

Método de Posicionamento	Estratégia de processamento	Frequência / Filtro	Correção da ionosfera
DGPS	DGPS_1	L1+L2 / Forward	IONEX TEC
DGPS	DGPS_2	L1 / Forward	IONEX TEC
DGPS	DGPS_3	L1 / Forward	Sem correção (off)
PPP	PPP_4	L1+L2 / Forward	IONEX TEC
PPP	PPP_5	L1+L2 / Forward	Iono-free LC
PPP	PPP_6	L1+L2 / Combined	Iono-free LC
PPP	PPP_7	L1 / Forward	IONEX TEC
RELATIVO	Relativo_8	L1+L2 / Forward	Estimate TEC
RELATIVO	Relativo_9	L1+L2 / Combined	Sem correção (off)
RELATIVO	Relativo_10	L1+L2 / Forward	Sem correção (off)
RELATIVO	Relativo_11	L1+L2 / Forward	IONEX TEC
RELATIVO	Relativo_12	L1+L2 / Combined	IONEX TEC
RELATIVO	Relativo_13	L1 / Forward	IONEX TEC
RELATIVO	Relativo_14	L1 / Forward	Sem correção (off)
RELATIVO	Relativo_15	L1+L2 / Combined	Iono-free LC

FONTE: A autora (2021)

### 3.3 INFORMAÇÕES DA IONOSFERA NA DATA DO LEVANTAMENTO

As informações referentes a ionosfera na data do voo foram consultadas no GNSS Planning, disponíveis no seguinte endereço eletrônico <https://www.gnssplanning.com/#/charts>.

O erro devido à refração ionosférica, depende da frequência e consequentemente do índice de refração, sendo diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC) presentes ao longo da trajetória percorrida pelo sinal na ionosfera, e varia no tempo e no espaço.

No gráfico disponibilizado no site da ferramenta GNSS Planning (FIGURA 39), pode-se verificar que o valor do TEC começa a aumentar a partir das 10 horas da manhã e somente as 20 horas começa a decrescer. O nível de cintilação permanece baixo sem muitas variações no decorrer do período.

FIGURA 39 - CONFIGURAÇÕES GNSS PLANNING (SÃO PAULO)

Settings

Latitude: S 21° 36' 4.2778"

Longitude: W 48° 21' 13.9085"

Height: 500 m

Elevation cutoff: 10

Day: 01/06/2017 Today

Start time: 00:00 UTC +00:00

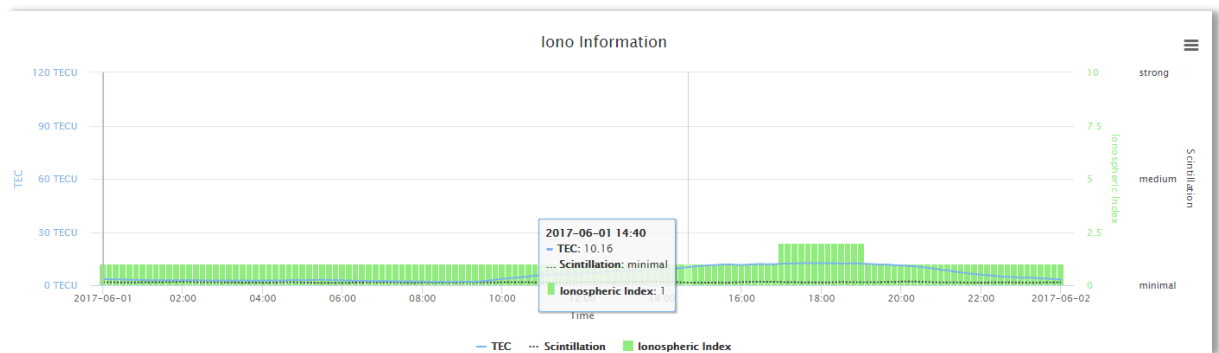
Period [hours]: 24

Time zone: (UTC) Coordinated Universal Time

Apply

FONTE: GNSS Planning online (2021)

FIGURA 40 - INFORMAÇÕES IONOSFERA (BAIXA LATITUDE)



FONTE: GNSS Planning online (2021)

Sabe-se que a ionosfera apresenta comportamentos distintos em regiões de médias e baixas latitudes. A título de comparação, foi realizada análise no mesmo dia na região de New Jersey nos Estados Unidos nas proximidades do Aeroporto Internacional de Newark. Este aeroporto tem operado GBAS em base regular, cujas cartas de aproximação denominadas GLS podem ser consultadas no site da FAA autoridade competente referente a aviação civil do país, disponibilizada no Anexo 2 no final desse trabalho.

FIGURA 41 - CONFIGURAÇÕES GNSS PLANNING (NEW JERSEY)

Settings

Latitude: N 40° 41' 4.2778"

Longitude: W 74° 10' 13.9085"

Height: 500 m

Elevation cutoff: 10

Day: 01/06/2017 Today

Start time: 00:00 UTC +00:00

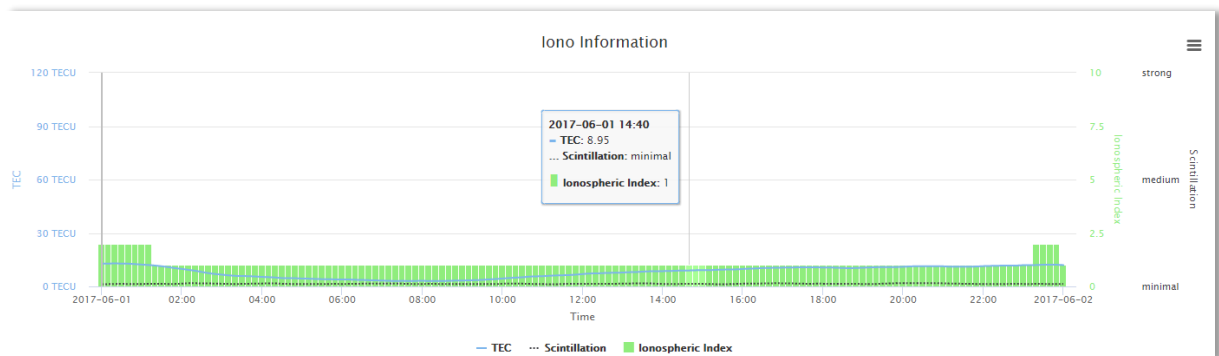
Period [hours]: 24

Time zone: (UTC) Coordinated Universal Time

Apply

FONTE: GNSS Planning online (2021)

FIGURA 42 - CONFIGURAÇÕES GNSS PLANNING (MÉDIA LATITUDE)

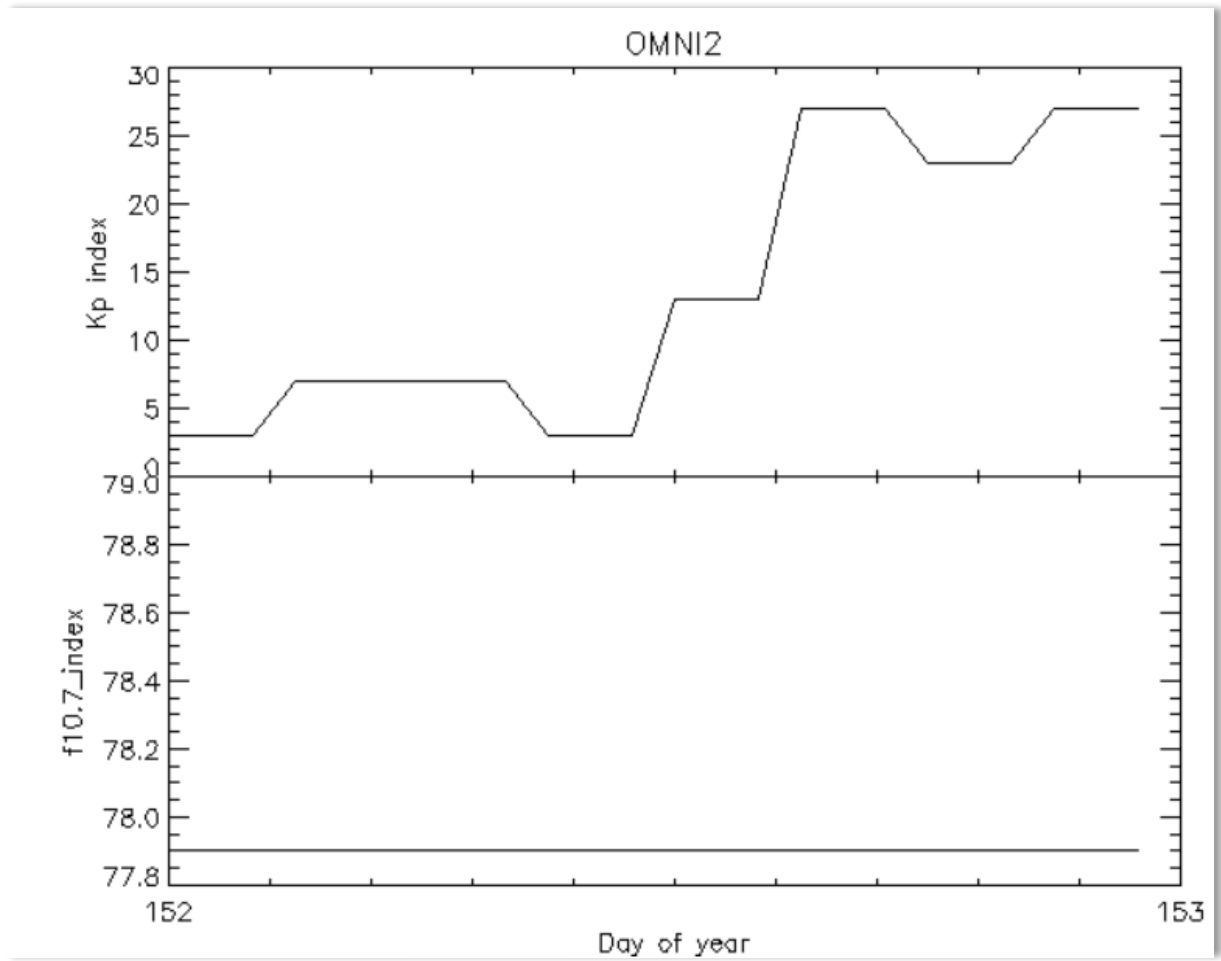


FONTE: GNSS Planning online (2021)

Analisando os gráficos da FIGURA 40 e FIGURA 42, verifica-se que o comportamento do TEC, no horário do voo, janela das 14:00 as 19:00 (UTC) se mantém semelhante. Os valores de TEC às 14:40 (11:40 local) são de 10,16 TECU na região de São Paulo, (latitude 21S) e 8,95 TECU na região de New Jersey (latitude 40N). Nota-se nas FIGURA 40 e FIGURA 42 a unidade do TEC foi dado em TECU, sendo  $1\text{TECU} = 10^{16}$  elétrons/m<sup>2</sup>.

Foram analisados também os Índice Kp e F10.7 conforme mencionado no item 2.7.1, na data do voo através do site <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/cgi/nx1.cgi>, conforme FIGURA 43.

FIGURA 43 - ÍNDICE KP E F10.7



FONTE: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/cgi/nx1.cgi>

#### 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A partir dos dados GNSS coletados durante o voo da aeronave, com decolagem e pouso no Aeródromo Gavião Peixoto – SP, foram realizados processamentos no software de código aberto RTKLIB simulando diferentes métodos de posicionamento, cujo objetivo é verificar a precisão e acurácia alcançadas. Os arquivos de entrada utilizados são apresentados na tabela indicada na sequência.

TABELA 9 - ARQUIVOS DE ENTRADA PROCESSAMENTO DGPS

Arquivos de entrada	Arquivo	Fonte
Arquivo observação GNSS (voo)	mvoo1520.17o	Prof. Monico / UNESP
Arquivo observação GNSS (base)	spja1521.17o	IBGE/RBMC <sup>1</sup>
Efemérides transmitidas	brdc1520.17n	IGS <sup>2</sup>
Efemérides precisas GPS	igs19514.sp3	IGS
Correção do relógio com taxa de amostragem de 30s	igs19514.clk_30s	IGS
Modelo da Ionosfera	igsg1520.17i	IGS <sup>3</sup>
Correções das Antena	igs14.atx	IGS

FONTE: A autora (2021)

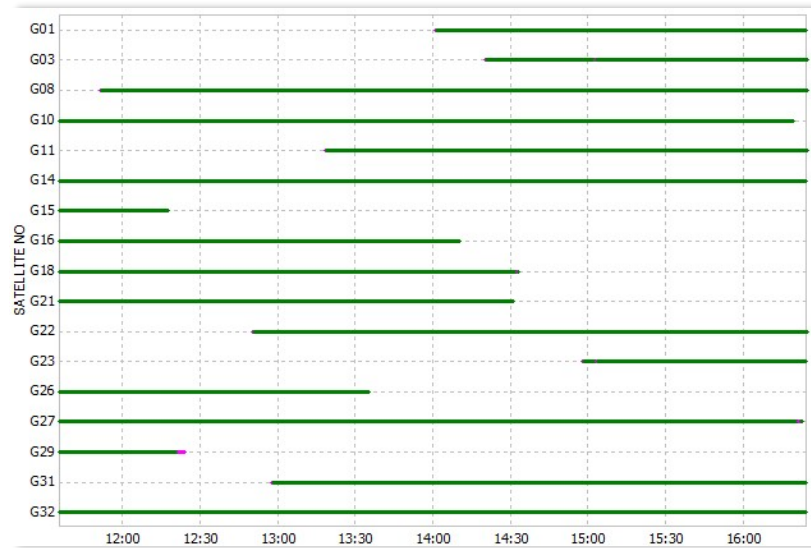
Por meio do arquivo mvoo1520.17o, que contém os dados brutos GNSS coletados, no módulo RTKPLOT do RTKLIB foi gerada a FIGURA 44, observa-se os satélites que foram rastreados na janela de observação indicada na seção 3.1.1 (11h 35min 37s às 16h 24min 48s), e a disposição destes satélites no espaço com as devidas órbitas descrita pode ser verificada na FIGURA 45. Nota-se que não há interrupção de sinais, exceto para o satélite G29. Durante este período de observação contou-se com a recepção de sinais de 17 satélites GPS.

<sup>1</sup> Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>

<sup>2</sup> Disponível em: <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products>

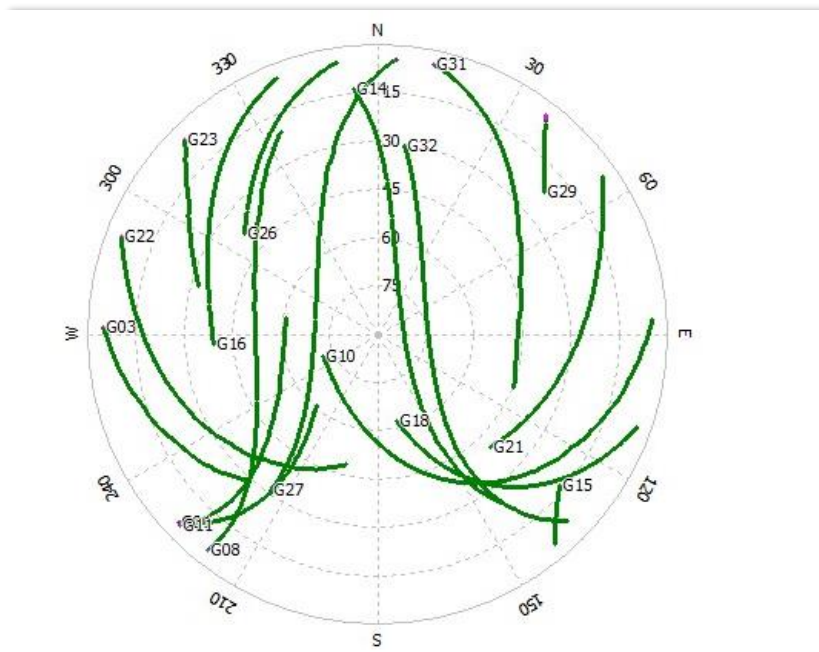
<sup>3</sup> Disponível em: <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/ionex/>

FIGURA 44 - SKYPLOT



FONTE: A autora (2021)

FIGURA 45 - TRAJETÓRIA DOS SATÉLITES

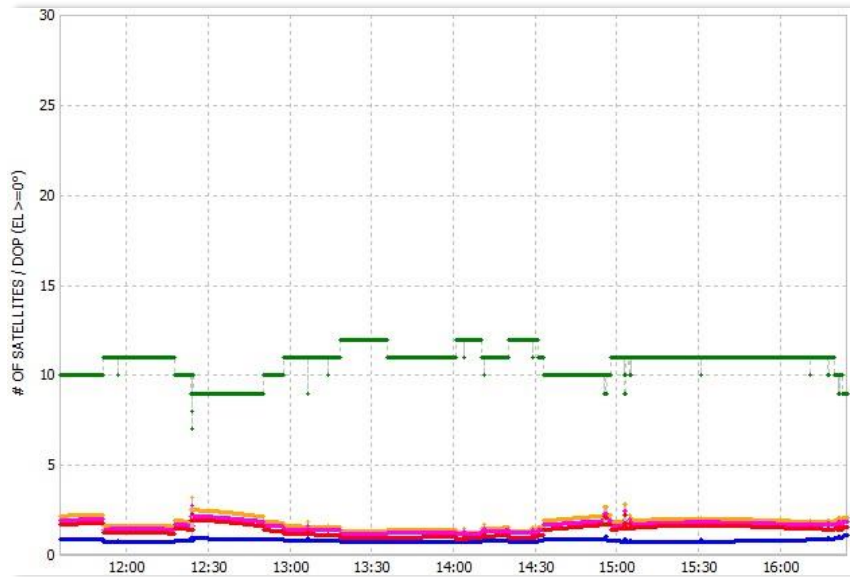


FONTE: A autora (2021)

A FIGURA 46 apresenta o valor do DOP (*Dilution of Precision*) estando abaixo de 5 sem grandes variações e de acordo com o que as normas preconizam, ou seja, inferior a 6. Percebe-se que as elevações no DOP ocorrem com a redução no número de satélites observados naquele instante de tempo.



FIGURA 46 - DOP



FONTE: A autora (2021)

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos com os processamentos realizados no software RTKLIB sendo separados por método de posicionamento empregado conforme TABELA 8 – Processamentos realizados.

No Apêndice 1, encontra-se a tabela completa, contendo a média das precisões internas (desvio padrão formal) das componentes E, N e U, calculada em todos os processamentos e o valor do RMSE. A média dos processamentos foram calculadas após o período de inicialização do receptor GNSS (período entre 11h35min37seg – 14h11min18seg), ou seja, entre a decolagem e pouso da aeronave conforme item 3.1.1, utilizando aproximadamente 8.009 épocas.

#### 4.1 MÉTODO DE POSICIONAMENTO DGPS

Nesta seção são apresentadas as estratégias de processamento baseadas no método DGPS, bem como os principais resultados atingidos. Foi utilizada como base a estação RBMC SPJA, utilizando as coordenadas conhecidas conforme TABELA 7.

#### 4.1.1 Estratégia DGPS 1, 2, 3

Na TABELA 10 encontra-se as configurações do processamento, e na TABELA 11 as médias das precisões internas (desvio padrão formal) das componentes E, N e U das coordenadas. Esses valores consideram somente resultados após o período de inicialização, a partir do momento em que a aeronave inicia a decolagem.

TABELA 10 - CONFIGURAÇÕES DOS PROCESSAMENTOS 1, 2 E 3

	Estratégia 1	Estratégia 2	Estratégia 3
Método de posicionamento	DGPS	DGPS	DGPS
<b>Frequência / Filtro</b>	<b>L1+L2 / Forward</b>	<b>L1 / Forward</b>	<b>L1 / Forward</b>
Máscara de elevação (graus)	10	10	10
<b>Correção da ionosfera</b>	<b>IONEX TEC</b>	<b>IONEX TEC</b>	<b>Sem correção</b>
Correção da troposfera	Estimate ZTD	Estimate ZTD	Estimate ZTD
Correção órbita dos satélites	Efemérides precisas	Efemérides precisas	Efemérides precisas

FONTE: A autora (2021)

TABELA 11 - MÉDIAS DAS PRECISÕES INTERNAS (DESVIO PADRÃO FORMAL) ENCONTRADAS NOS PROCESSAMENTOS 1,2 E 3

Estratégia	Média sdn (m)	Média sde (m)	Média sdu (m)	RMSE (m)
<b>DGPS_1</b>	<b>0,043</b>	<b>1,244</b>	<b>1,203</b>	<b>1,784</b>
DGPS_2	1,250	0,556	1,688	2,173
DGPS_3	0,611	0,556	1,669	1,862

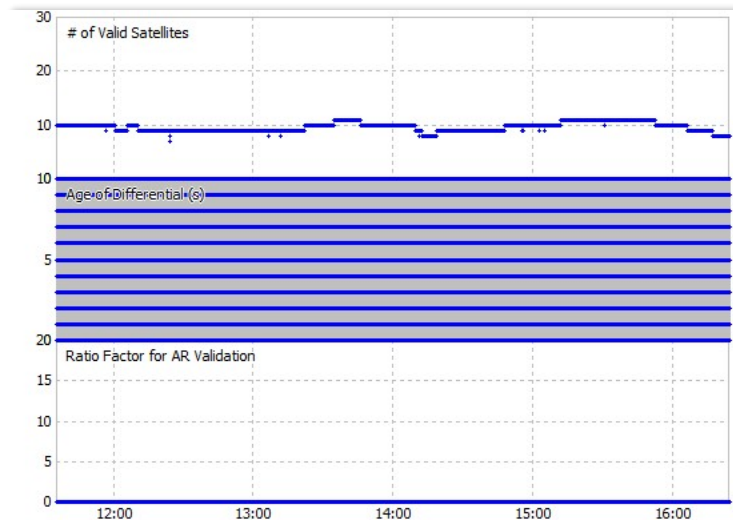
FONTE: A autora (2021)

Analisando os resultados indicados na TABELA 10, observa-se que a melhor solução utilizando o posicionamento DGPS, foi empregando a dupla frequência L1 e L2. Os processamentos 2 e 3 utilizando somente a frequência L1 são discrepantes entre si. Verifica-se na precisão interna, uma piora na diferença para componente N quando foi introduzido o modelo de correção da ionosfera (IONEX TEC).

Os gráficos gerados com os resultados das três estratégias de processamento indicados na TABELA 11 se mantiveram visualmente bastante semelhantes, nesse sentido, à título de exemplo, serão apresentados os gráficos resultantes do processamento DGPS\_1.

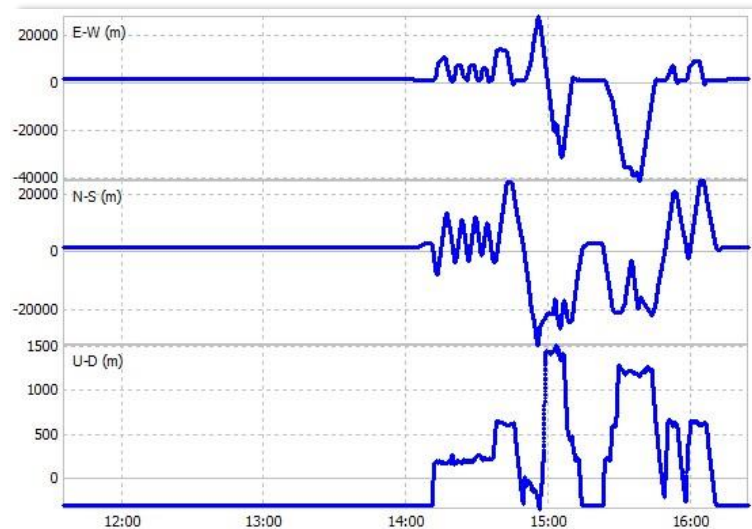
A FIGURA 47 apresenta o número de satélites disponíveis no momento em que os dados foram rastreados, com uma média de 9 satélites em todo o período de rastreo. A FIGURA 48 mostra os valores absolutos das componentes das coordenadas E, N e U, as quais variam consideravelmente após a decolagem da aeronave indicando as bruscas manobras realizadas neste voo teste.

FIGURA 47 - NÚMERO DE SATÉLITES VÁLIDOS PARA O POSICIONAMENTO (DGPS\_1)



FONTE: A autora (2021)

FIGURA 48 - POSIÇÃO EM CADA COMPONENTE DAS COORDENADAS (DGPS\_1)

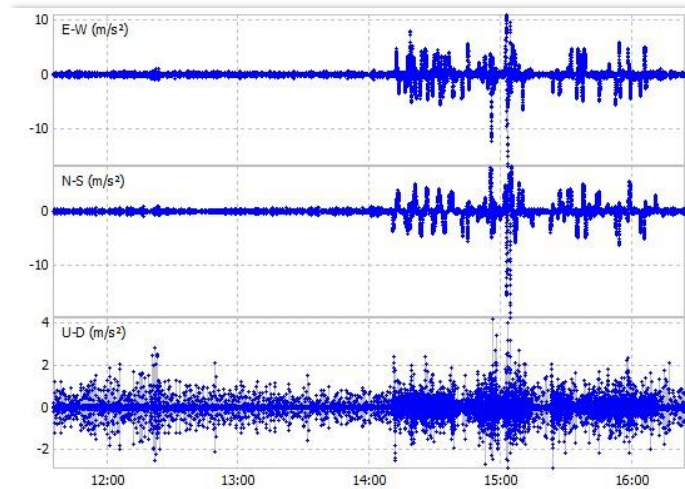


FONTE: A autora (2021)

As FIGURA 49 e FIGURA 50, referem-se, respectivamente, à aceleração e velocidade nas componentes das coordenadas da antena do receptor instalada na aeronave. Observa-se variações significativas na componente vertical (Up) desde o início das observações, porém mais intensas após a decolagem. As acelerações

detectadas em Up antes da decolagem se devem, possivelmente, aos erros posicionais mais significativos para a componente altimétrica. Por outro lado, nas componentes planimétricas (E e N) a aceleração é detectada com bastante clareza partir do momento que a aeronave decola até seu pouso, intervalo compreendido entre 14h15 e 16h15 (seção 3.1.1).

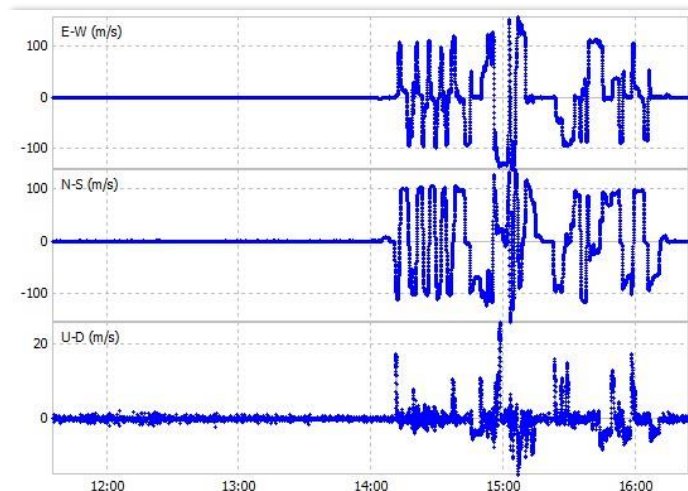
FIGURA 49 - ACELERAÇÃO (DGPS\_1)



FONTE: A autora (2021)

Na FIGURA 50, referente a velocidade nas componentes posicionais. Nesse caso, observa-se com clareza o período de inicialização, momento em que a aeronave permanece em solo, logo após sua decolagem, onde ocorre grande variação, o pouso e a estabilização na velocidade das componentes das coordenadas.

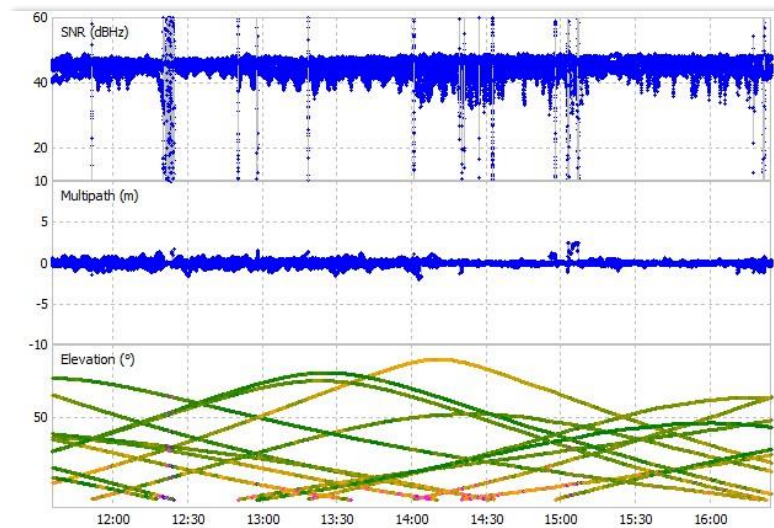
FIGURA 50 - VELOCIDADE (DGPS\_1)



FONTE: A autora (2021)

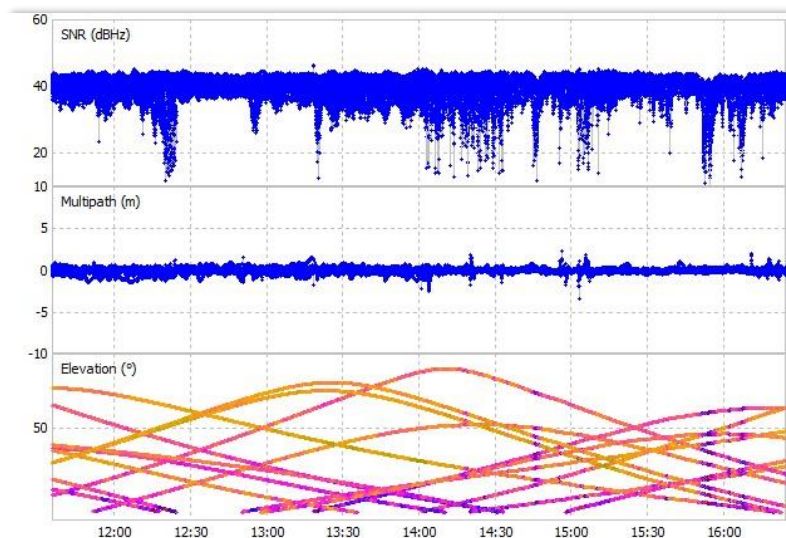
Também foram conduzidas análises acerca da razão sinal/ruído (SNR) e observou-se que as observáveis da frequência L2 apresentaram-se mais ruidosas que as observáveis na frequência L1. Isso ocorre principalmente em momentos nos quais os satélites são observados em baixos ângulos de elevação, mais próximos ao horizonte. Também percebe-se, visualmente, uma elevação no multicaminho em alguns instantes (por exemplo: cerca das 15 horas) para a onda portadora L2.

FIGURA 51 - ANÁLISE DA QUALIDADE DAS OBSERVÁVEIS EM TERMOS DE SNR E MULTICAMINHO PARA A FREQUÊNCIA L1



FONTE: A autora (2021)

FIGURA 52 - ANÁLISE DA QUALIDADE DAS OBSERVÁVEIS EM TERMOS DE SNR E MULTICAMINHO PARA A FREQUÊNCIA L2



FONTE: A autora (2021)

Com relação ao período de cold-start, é interessante observar que o tempo dedicado à inicialização do receptor, está de acordo com as recomendações do IBGE para linhas de base de 40 km a 100 km. Haja vista que houve um período de observações de 2 horas e 35 minutos antes do momento em que aeronave começa a ter variação acentuada de altitude caracterizando sua decolagem. Esse período de inicialização favorece os testes que envolvem o posicionamento diferencial com possíveis linhas de base longas, tais como DGPS e Relativo. Nesses métodos a linha de base da estação referência da RBMC situada em Jaboticabal está a uma distância de, aproximadamente, 60 km do aeroporto da Embraer (seção 3.1.1). Dessa forma, também foram avaliados os valores da precisão para cada uma das componentes das coordenadas durante o período de inicialização. A TABELA 12 apresenta os valores da média da precisão interna na estratégia 1 (DGPS, L1/L2), onde observa-se maior variação na coordenada vertical (Up) 1,057 m entre o início e o fim do período de inicialização (período compreendido entre o início das observações, até o início da decolagem da aeronave, com 9.344 épocas), obtendo um RMSE de 1,228 m.

TABELA 12 - MÉDIA DAS PRECISÕES INTERNAS DAS COMPONENTES DAS COORDENADAS NO PERÍODO DE INICIALIZAÇÃO DO RECEPTOR GPS

Data	Hora	Média sdn (m)	Média sde (m)	Média sdu (m)	RMSE (m)
01/06/2017	11:35:37 - 14:11:19	0,435	0,448	1,057	1,228

FONTE: A autora (2021)

## 4.2 MÉTODO DE POSICIONAMENTO PPP

Nesta seção são apresentadas as estratégias de processamento baseadas no método de PPP, bem como os principais resultados alcançados.

### 4.2.1 Estratégia PPP 4, 5, 6 e 7

A TABELA 13 apresenta as configurações de processamento das estratégias 4 a 7.

TABELA 13 - CONFIGURAÇÕES DOS PROCESSAMENTOS 4, 5, 6 E 7

	Estratégia 4	Estratégia 5	Estratégia 6	Estratégia 7
Método de posicionamento	PPP Cinemático	PPP Cinemático	PPP Cinemático	PPP Cinemático
Frequência / Filtro	L1+L2 / Forward	L1+L2 / Forward	L1+L2 / Combined	L1 / Forward
Máscara de elevação (graus)	10	10	10	10
Correção da ionosfera	IONEX TEC	iono-free LC	iono-free LC	IONEX TEC
Correção da troposfera	Estimate ZTD	Estimate ZTD	Estimate ZTD	Estimate ZTD
Correção da órbita dos satélites	Efemérides precisas	Efemérides precisas	Efemérides precisas	Efemérides precisas
Solução das ambiguidades	Off	Off	Off	Off

FONTE: A autora (2021)

A TABELA 14 apresenta os valores das médias das precisões internas encontradas para os processamentos das estratégias 4 a 7. É possível observar que a melhor precisão interna do processamento no PPP, foi alcançada com a estratégia PPP\_6. Essa estratégia utiliza-se da dupla frequência e filtragem combinada (Forward+Backward), com correção *iono-free LC* para a refração ionosférica.

TABELA 14 - MÉDIAS DAS PRECISÕES INTERNAS (DESVIO PADRÃO FORMAL) ENCONTRADAS NOS PROCESSAMENTOS PPP 4, 5, 6 E 7

Estratégia	Média sdn (m)	Média sde (m)	Média sdu (m)	RMSE (m)
PPP_4	0,346	0,234	0,689	0,805
PPP_5	0,065	0,070	0,155	0,182
<b>PPP_6</b>	<b>0,033</b>	<b>0,038</b>	<b>0,079</b>	<b>0,903</b>
PPP_7	0,324	0,260	0,777	0,881

FONTE: A autora (2021)

#### 4.3 MÉTODO DE POSICIONAMENTO RELATIVO CINEMÁTICO

Para realizar a análise dos dados do método relativo, os processamentos foram agrupados em três itens 4.3.1 utilizando dupla frequência L1+L2 e filtro *forward*. A filtragem *forward* faz com que os dados de observação sejam processados do início para o fim – mantendo condições de processamento próximas a realidade do que se faz em tempo real; item 4.3.2 utilizando dupla frequência L1+L2 e filtro *combined*, permitindo o processamento combinado do início para o fim, e do fim para o início; e por último o item 4.3.3 utilizando somente a frequência L1 e filtro modo *forward*. De

modo geral a solução *combined* geralmente é aquela que provoca uma suavização dos resultados, melhorando a precisão posicional.

#### 4.3.1 Estratégias Relativo 8, 10 e 11

Na TABELA 15 são apresentadas as configurações do processamento, variando somente o tipo de correção aplicada para os efeitos da ionosfera. A TABELA 16 apresenta as médias das precisões internas (desvios formais) alcançadas no processamento após o período de inicialização.

TABELA 15 - CONFIGURAÇÕES DOS PROCESSAMENTOS 8, 10 E 11

	Estratégia 8	Estratégia 10	Estratégia 11
Método de posicionamento	Relativo Cinemático	Relativo Cinemático	Relativo Cinemático
<b>Frequência / Filtro</b>	<b>L1+L2 / Forward</b>	<b>L1+L2 / Forward</b>	<b>L1+L2 / Forward</b>
Máscara de elevação (graus)	10	10	10
<b>Correção da ionosfera</b>	<b>Estimate TEC</b>	<b>Sem correção</b>	<b>IONEX TEC</b>
Correção da troposfera	Estimate ZTD	Estimate ZTD	Estimate ZTD
Correção da órbita dos satélites	Efemérides precisas	Efemérides precisas	Efemérides precisas
Solução das ambiguidades	Contínuo	Contínuo	Contínuo

FONTE: A autora (2021)

TABELA 16 - MÉDIAS DAS PRECISÕES INTERNAS ENCONTRADAS (DESVIO PADRÃO FORMAL) NOS PROCESSAMENTOS RELATIVO 8, 10 E 11

Estratégia	Média sdn (m)	Média sde (m)	Média sdu (m)	RMSE (m)
Relativo_8	0,040	0,046	0,097	0,115
<b>Relativo_10</b>	<b>0,024</b>	<b>0,024</b>	<b>0,060</b>	<b>0,069</b>
Relativo_11	0,028	0,028	0,128	0,134

FONTE: A autora (2021)

Dentre os processamentos apresentadas na TABELA 16 a melhor precisão interna obtida foi o Relativo\_10, onde nenhuma correção para a ionosfera foi aplicada. Quando a correção IONEX, disponibilizada pelo IGS, foi aplicada a média das precisões internas apresentaram valores superiores. Tais resultados corroboram com a indicação de que a correção ionosférica modelada globalmente para médias altitudes não estão suficientes para esse tipo de aplicação na região do Brasil. Especialmente para baixas latitudes localizadas próximas ao equador. Além dos



modelos globais apresentarem qualidade incapaz de representar a variabilidade das condições ionosféricas brasileiras, sabe-se também que há má distribuição global das estações utilizadas na geração desses modelos.

#### 4.3.2 Estratégias Relativo 9, 12 e 15

Nos processamentos Relativo 9,12 e 15 foram utilizadas dupla frequência, variando-se somente a correção ionosférica, e o filtro *combined*, conforme configurações apresentadas na TABELA 17.

TABELA 17 - CONFIGURAÇÕES DOS PROCESSAMENTOS 09, 12 e 15

	Estratégia 9	Estratégia 12	Estratégia 15
Método de posicionamento	Relativo Cinemático	Relativo Cinemático	Relativo Cinemático
<b>Frequência / Filtro</b>	<b>L1+L2 / Combined</b>	<b>L1+L2 / Combined</b>	<b>L1+L2 / Combined</b>
Máscara de elevação (graus)	10	10	10
<b>Correção da ionosfera</b>	<b>Sem correção</b>	<b>IONEX TEC</b>	<b>Iono-free LC</b>
Correção da troposfera	Estimate ZTD	Estimate ZTD	Estimate ZTD
Correção da órbita dos satélites	Efemérides precisas	Efemérides precisas	Efemérides precisas
Solução das ambiguidades	Contínuo	Contínuo	Contínuo

FONTE: A autora (2021)

A TABELA 18 apresenta os valores das precisões internas encontradas para as componentes das coordenadas (E, N e U), nas três estratégias mostradas na TABELA 17. Os melhores resultados foram alcançados com a estratégia RELATIVO\_9, utilizando-se a dupla frequência e filtragem *combined*, sem aplicar correções para a refração ionosférica.

TABELA 18 - MÉDIAS DAS PRECISÕES INTERNAS ENCONTRADAS (DESVIO PADRÃO FORMAL) NOS PROCESSAMENTOS RELATIVO 9, 12 e 15

Estratégia	Média sdn (m)	Média sde (m)	Média sdu (m)	RMSE (m)
<b>Relativo_9</b>	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>	<b>0,032</b>	<b>0,036</b>
Relativo_12	0,016	0,019	0,078	0,081
Relativo_15	0,027	0,031	0,064	0,076

FONTE: A autora (2021)

#### 4.3.3 Estratégia Relativo 13 e 14

Nos processamentos Relativo 13 e 14 foi utilizada a frequência L1, sendo que no primeiro com correção ionosférica do modelo IONEX TEC, e o segundo sem aplicar nenhum tipo de correção, conforme configurações apresentadas na TABELA 19. A TABELA 20 traz os resultados, de modo análogo ao apresentado para os métodos precedentes.

TABELA 19 - CONFIGURAÇÕES DO PROCESSAMENTO 13 e 14

	Estratégia 13	Estratégia 14
Método de posicionamento	Relativo Cinemático	Relativo Cinemático
<b>Frequência / Filtro</b>	<b>L1 / Forward</b>	<b>L1 / Forward</b>
Máscara de elevação (graus)	10	10
<b>Correção da ionosfera</b>	<b>IONEX TEC</b>	<b>Sem correção</b>
Correção da troposfera	Estimate ZTD	Estimate ZTD
Correção da órbita dos satélites	Efemérides precisas	Efemérides precisas
Solução das ambiguidades	Continuo	Continuo

FONTE: A autora (2021)

TABELA 20 - MÉDIAS DAS PRECISÕES INTERNAS ENCONTRADAS (DESVIO PADRÃO FORMAL) NOS PROCESSAMENTOS RELATIVO 13 E 14

Estratégia	Média sdn (m)	Média sde (m)	Média sdu (m)	RMSE (m)
Relativo_13	0,018	0,020	0,060	0,067
<b>Relativo_14</b>	<b>0,017</b>	<b>0,020</b>	<b>0,044</b>	<b>0,052</b>

FONTE: A autora (2021)

Analisando-se a TABELA 20, o processamento Relativo\_14 foi o método de posicionamento que obteve a melhor média para a precisão interna de processamento utilizando as configurações apresentadas na TABELA 19, sem aplicar qualquer correção para a ionosfera.

Atentando-se ao valor do RATIO, os maiores valores foram observados no Relativo\_14, obtendo-se valores de 48,8 com solução de ambiguidade fixa. Analisando-se a solução obtida com o processamento, em geral, verifica-se que quando a solução da ambiguidade é fixa são encontradas médias de precisões internas milimétricas conforme TABELA 21.

TABELA 21 - RATIO E SOLUÇÃO DE AMBIGUIDADES

Hora	Solução	Ratio	Média sde (m)	Média sde (m)	Média sdu (m)
12:50:08	Fixa	48,8	0,009	0,011	0,025
12:50:09	Fixa	48,8	0,010	0,011	0,027
12:50:10	Fixa	48,8	0,011	0,013	0,029
12:50:11	Fixa	48,8	0,011	0,013	0,031
12:50:12	Fixa	48,8	0,012	0,014	0,034
12:50:13	Fixa	48,8	0,013	0,015	0,036
12:50:14	Fixa	48,8	0,014	0,016	0,038

FONTE: A autora (2021)

Observando-se todos os processamentos realizados no método relativo (TABELA 22), o que obteve melhor precisão interna foi o RELATIVO\_9 alcançando um erro médio quadrático (RMSE) de 0,036 m. Dessa forma, as soluções posicionais obtidas com esta estratégia serão utilizadas como referência para avaliar a acurácia, conforme análises realizadas no item 4.6 Análise da Acurácia.

TABELA 22 - MÉDIAS DAS PRECISÕES INTERNAS ENCONTRADAS NOS PROCESSAMENTOS PELO MÉTODO RELATIVO

Estratégia	Média sdn (m)	Média sde (m)	Média sdu (m)	RMSE (m)	Frequência / Solução	Correção Ionosfera
Relativo_8	0,040	0,046	0,097	0,115	L1+L2/ Forward	Estimate TEC
<b>Relativo_9</b>	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>	<b>0,032</b>	<b>0,036</b>	<b>L1+L2/Combined</b>	<b>Sem correção (off)</b>
Relativo_10	0,024	0,024	0,060	0,069	L1+L2 / Forward	Sem correção (off)
Relativo_11	0,028	0,028	0,128	0,134	L1+L2 / Forward	IONEX TEC
Relativo_12	0,016	0,016	0,077	0,081	L1+L2 / Combined	IONEX TEC
Relativo_13	0,018	0,020	0,061	0,067	L1 / Forward	IONEX TEC
Relativo_14	0,017	0,020	0,044	0,052	L1 / Forward	Sem correção (off)
Relativo_15	0,027	0,031	0,064	0,076	L1+L2 / Combined	Iono-free LC

FONTE: A autora (2021)

#### 4.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DGPS E RELATIVO

Nesta seção compara-se os métodos de posicionamento, tempo real (DGPS) e Relativo. É válido ressaltar que no método DGPS procurou-se manter proximidade com as condições do posicionamento em tempo real, o que não é o caso da solução de posicionamento do método relativo.

Também é importante lembrar que as estratégias procuraram considerar alguns dos padrões estabelecidos atualmente para o uso de GNSS nas aeronaves

(apenas L1) e utilizando as mesmas configurações de processamento conforme indicado na TABELA 23.

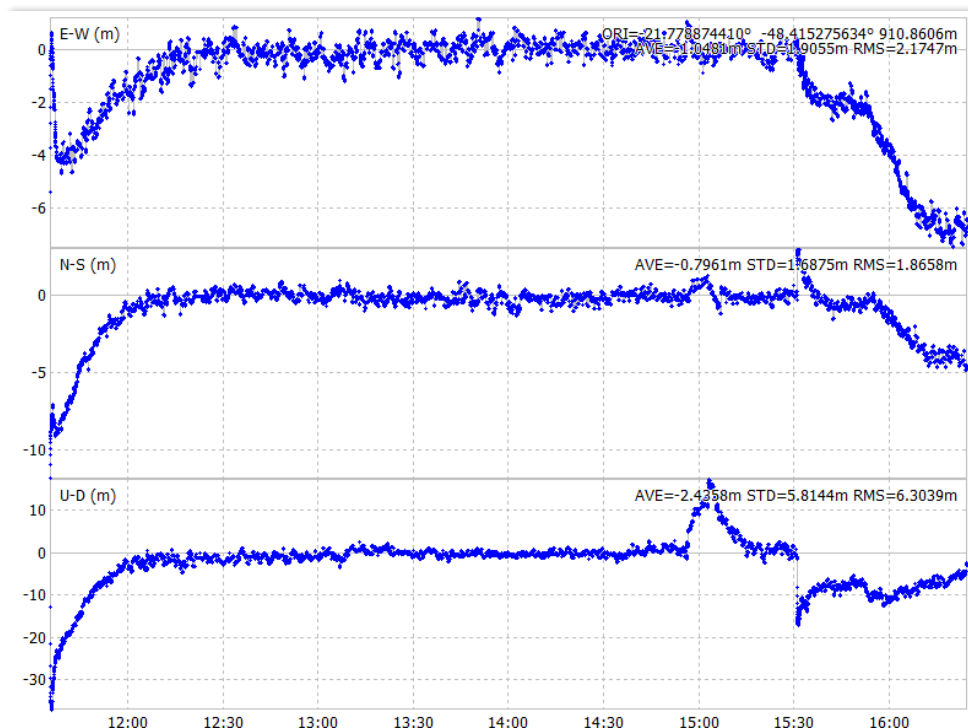
TABELA 23 - CONFIGURAÇÕES DOS PROCESSAMENTOS PARA AS ESTRATÉGIAS 2 E 13

	Estratégia 2	Estratégia 13
Método de posicionamento	DGPS	Relativo cinemático
<b>Frequência / Filtro</b>	<b>L1 / Forward</b>	<b>L1 / Forward</b>
Máscara de elevação (graus)	10	10
<b>Correção da ionosfera</b>	<b>IONEX TEC</b>	<b>IONEX TEC</b>
Correção da troposfera	Estimate ZTD	Estimate ZTD
Correção da órbita dos satélites	Efemérides precisas	Efemérides precisas
Solução das ambiguidades	-	Continuo

FONTE: A autora (2021)

A FIGURA 48 traz as discrepâncias entre as soluções DGPS\_2 e Relativo\_13 para as componentes das coordenadas da antena do receptor instalado na aeronave FIGURA 53. Observa-se que as diferenças foram mais significativas na vertical (Up), com maiores discrepâncias nos instantes iniciais e posteriormente após as 15 horas, obtendo um RMSE de 6,304 m na coordenada vertical conforme TABELA 24.

FIGURA 53 - DISCREPÂNCIAS NAS COMPONENTES DAS COORDENADAS ENTRE DGPS\_2 E RELATIVO\_13



FONTE: A autora (2021)

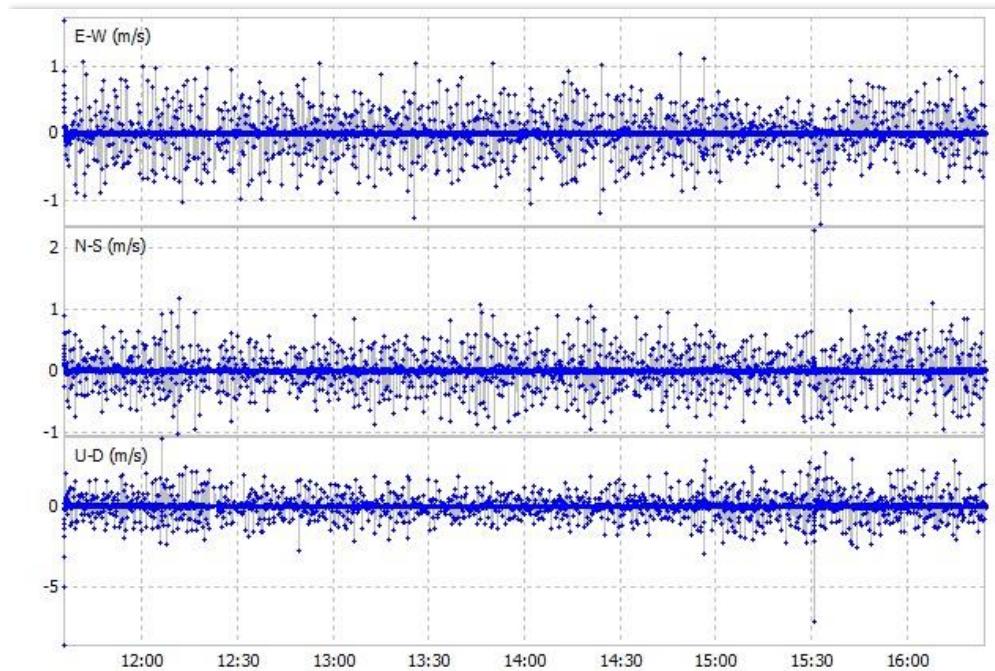
TABELA 24 - ANÁLISE DOS MÉTODOS DGPS E RELATIVO

	Média (m)	Desvio Padrão (m)	RMSE (m)
Coordenada E	1,048	1,906	2,175
Coordenada N	0,796	1,688	1,866
Coordenada U vertical (Up)	2,436	5,814	6,304

FONTE: A autora (2021)

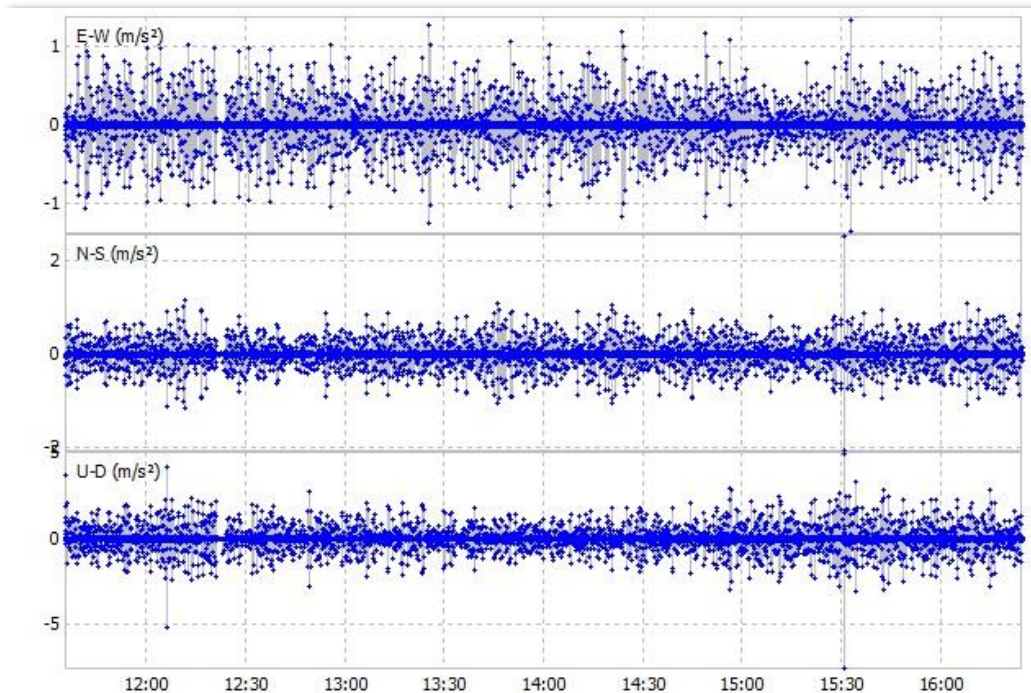
As FIGURA 54 e FIGURA 55, na sequência, apresentam as discrepâncias nas componentes E, N e Up, em termos de velocidade e aceleração constante, respectivamente. Observa-se que as diferenças em termos de velocidades possuem amplitude de aproximadamente 1 m/s para as componentes E e N, com alguns saltos em determinados instantes. Para a componente altimétrica as variações atingem amplitudes maiores, porém a escala gráfica não favorece a comparação visual direta com os resultados observados nas componentes planimétricas.

FIGURA 54 - DISCREPÂNCIAS NAS COMPONENTES EM TERMOS DE VELOCIDADE



FONTE: A autora (2021)

FIGURA 55 - DISCREPÂNCIAS NAS COMPONENTES EM TERMOS ACELERAÇÃO



FONTE: A autora (2021)

#### 4.5 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE POSICIONAMENTO PPP E RELATIVO

A análise a seguir traz a comparação entre os resultados de dois métodos de posicionamento com configurações de estratégias voltadas ao pós-processamento, PPP e (Relativo). Entretanto, com vistas a analisar as condições do posicionamento da aeronave simulando-se condições de tempo real, considerou-se as estratégias apresentadas na Tabela 23.

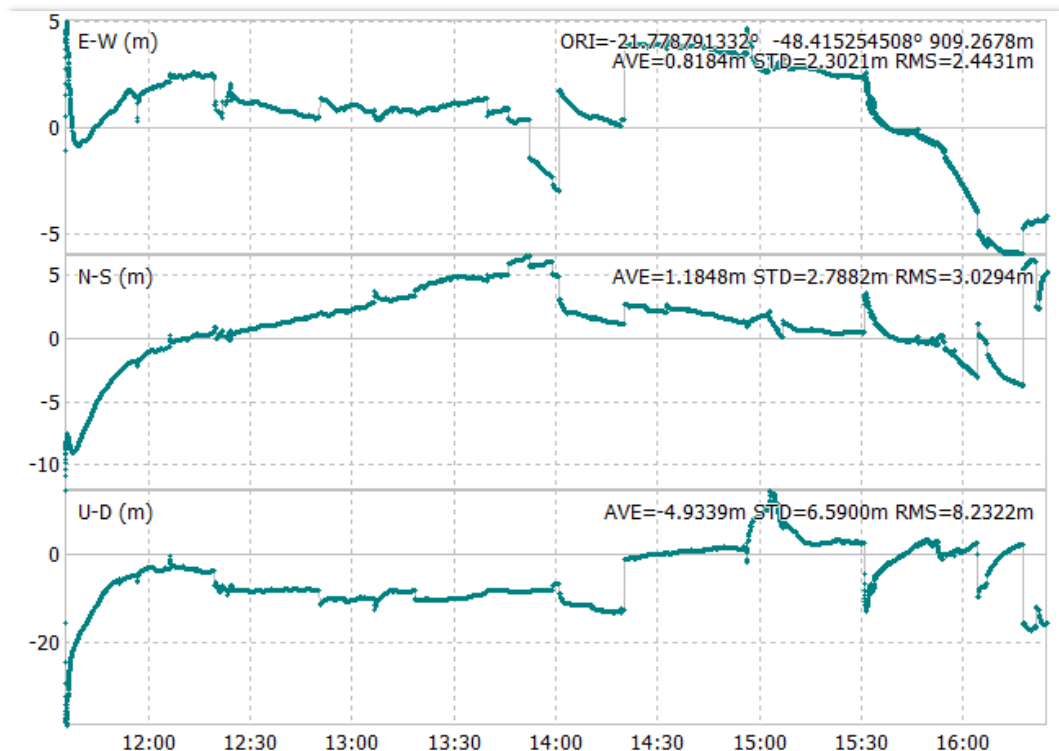
TABELA 25 - CONFIGURAÇÕES DOS PROCESSAMENTOS DAS ESTRATÉGIAS 8 E 15, PPP E RELATIVO CINEMÁTICO

	Estratégia 8	Estratégia 13
Método de posicionamento	PPP	Relativo cinemático
<b>Frequência / Filtro</b>	<b>L1 / Forward</b>	<b>L1 / Forward</b>
Máscara de elevação (graus)	10	10
<b>Correção da ionosfera</b>	<b>IONEX TEC</b>	<b>IONEX TEC</b>
Correção da troposfera	Estimate ZTD	Estimate ZTD
Correção da órbita dos satélites	Efemérides precisas	Efemérides precisas
Solução das ambiguidades	Contínuo	Contínuo

FONTE: A autora (2021)

Comparando-se as coordenadas obtidas pelos dois métodos (FIGURA 56), nota-se diferenças menores em comparação com aquelas observadas na FIGURA 53 (condições de tempo real x pós processado). Porém, também há diferenças mais significativas na coordenada vertical (Up), observado na TABELA 26.

FIGURA 56 - DISCREPÂNCIAS NAS COORDENADAS ENTRE PPP\_8 E RELATIVO\_13



FONTE: A autora (2021)

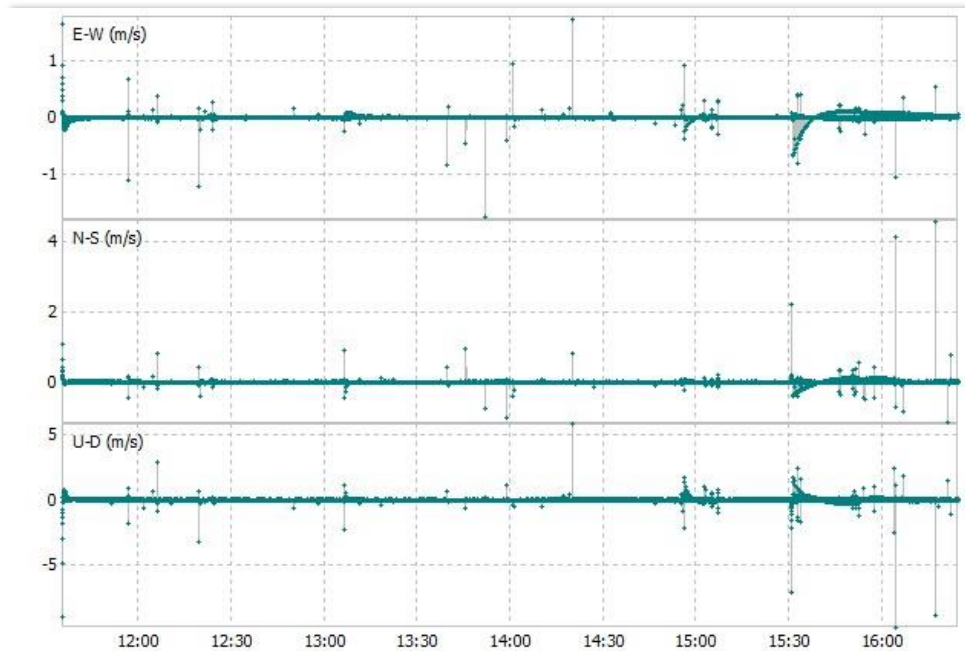
TABELA 26 - ANÁLISE DOS MÉTODOS PPP E RELATIVO

	Média (m)	Desvio Padrão (m)	RMSE (m)
Coordenada E	0,818	2,302	2,443
Coordenada N	1,185	2,788	3,029
Coordenada U vertical (Up)	4,934	6,590	8,232

FONTE: A autora (2021)

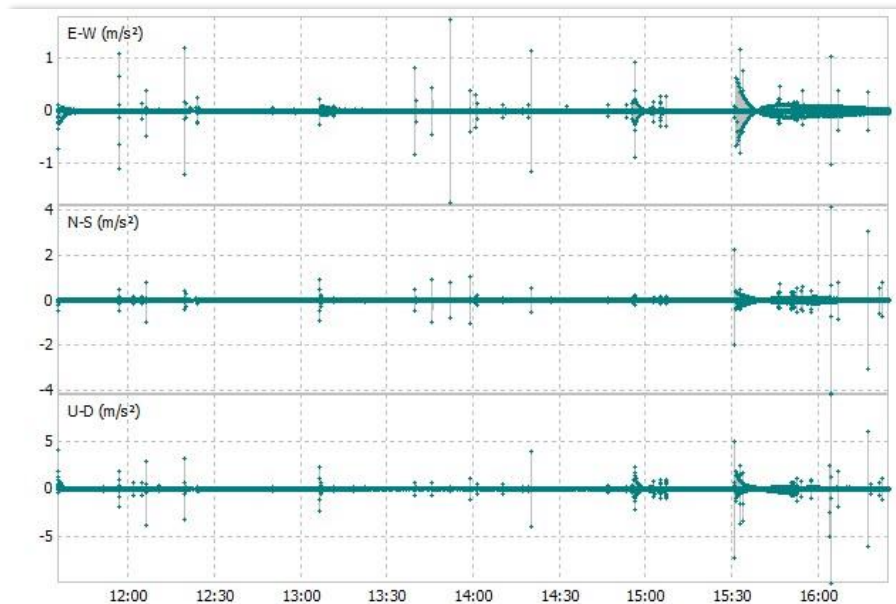
As diferenças apresentadas na velocidade e aceleração são apresentadas nas FIGURA 57 e FIGURA 58. Nesse caso também é possível observar diferenças inferiores aquelas encontradas nos resultados equivalentes das FIGURA 54 e FIGURA 55.

FIGURA 57 - DISCREPÂNCIAS NAS COMPONENTES EM TERMOS DE VELOCIDADE



FONTE: A autora (2021)

FIGURA 58 - DISCREPÂNCIAS NAS COMPONENTES EM TERMOS DE ACELERAÇÃO



FONTE: A autora (2021)



#### 4.6 ANÁLISE DA ACURÁCIA ENTRE OS MÉTODOS DGPS E RELATIVO

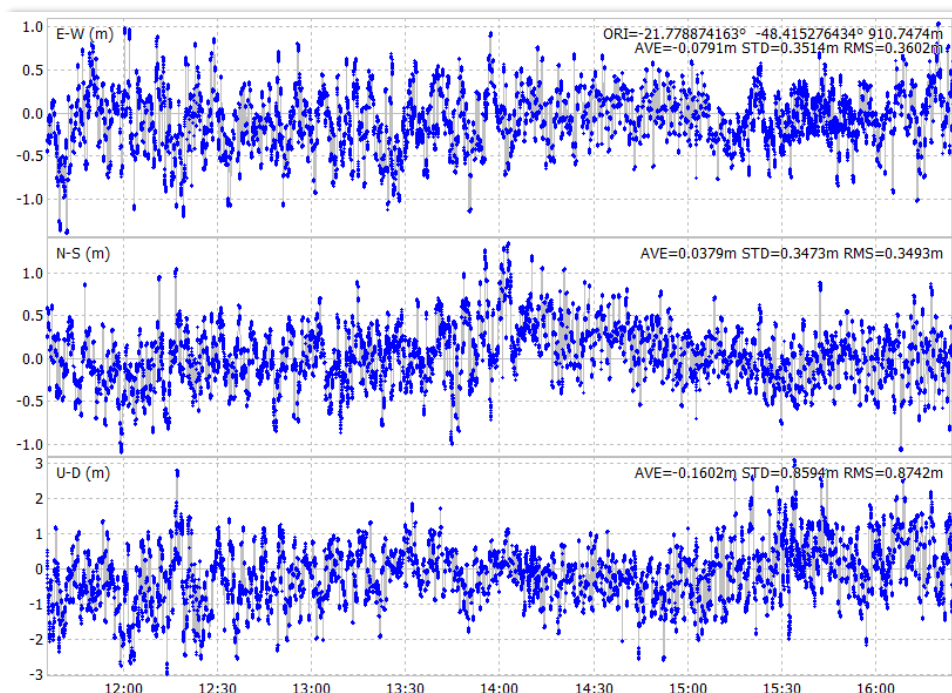
Para analisar a acurácia, foi considerado como valor verdadeiro, o método com melhor precisão interna de processamento, sendo a estratégia RELATIVO\_9 (TABELA 22), utilizando as configurações, L1+L2 / *Combined* sem correção da ionosfera, comparando-se com o posicionamento DGPS\_3, processamento simulando-se condições de tempo real. As diferenças entre as duas soluções de posicionamento podem ser analisadas na FIGURA 59 e na TABELA 27, sendo a componente vertical a que apresenta maior discrepância em termos de RMSE de 0,87 m. Em planimetria os resultados indicam coerência entre as duas soluções que produz um RMSE da ordem de aproximadamente 35 cm. É importante observar que mesmo o DGPS sendo um método baseado nas medidas de código suavizado, este apresentou resultados estatisticamente próximos do posicionamento relativo com solução das ambiguidades nas medidas de fase.

TABELA 27 - ANÁLISE DA ACURÁCIA NAS COORDENADAS E/N/U

	Média (m)	Desvio Padrão (m)	RMSE (m)
Coordenada E	-0,079	0,351	0,360
Coordenada N	0,038	0,347	0,349
Coordenada U vertical (up)	0,160	0,860	0,874

FONTE: A autora (2021)

FIGURA 59 - DIFERENÇAS NAS COORDENADAS ENTRE RELATIVO\_9 e DGPS\_3



FONTE: A autora (2021)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Documento DCA 351-2 do DECEA, cita estudo que o emprego no Brasil do SBAS e do GBAS na configuração GPS de frequência simples L1 (1575,42MHz), única disponível no momento, não apresenta uma relação custo/benefício favorável pelas restrições apresentadas. Para contornar essa situação, procedimentos RNAV, BARO-V-NAV e RNP-AR permitem, em algumas localidades, mínimos que chegam a 250 pés, baseados, somente, no GPS L1, sem utilizar os sistemas de aumento em solo (DECEA, 2021b).

O Aeroporto Santos Dumont, no Rio de Janeiro foi o primeiro aeroporto no Brasil, com aprovação para operar RNP-AR, realizando aproximação ao aeródromo utilizando satélites, tal aproximação só é permitida para aeronaves homologadas com tripulação treinada para tal procedimento. Porém geram uma grande economia a longo prazo, pois em condições meteorológicas desfavoráveis, as aeronaves são obrigadas a realizar órbitas, aguardando condições favoráveis de pouso, ou iniciar a rota para o aeroporto de alternativa, gerando prejuízos para companhia aérea e usuários do sistema em geral. Recentemente em setembro de 2021, o DECEA aprovou procedimentos RNP APCH nos aeroportos de Ilhéus (BA), Salvador (BA) e Angra dos Reis (RJ). O posicionamento GNSS está contribuindo cada vez mais para a segurança da navegação aérea do Brasil.

O presente trabalho de conclusão de curso teve como objetivo analisar o uso do GNSS na navegação aérea, e contribuir com análises de precisão e acurácia nas fases de aproximação, navegação e pouso, a partir de dados coletados em voo, em região de baixa latitude. Foram realizados diversos testes com configurações de processamento de dados GNSS, algumas das quais próximas das condições do posicionamento em tempo real.

Houve certo enfoque nas correções ionosféricas e nos desafios que os efeitos desta camada representam para os usuários GNSS. Destaca-se em termos de análise comparativa entre as soluções dos métodos DGPS e relativo cinemático. As diferenças entre as duas soluções de posicionamento tiveram na componente vertical a que apresenta maior discrepância em termos de RMSE, da ordem de 0,87 m. Em planimetria os resultados indicam coerência entre as duas soluções que produz um RMSE da ordem de aproximadamente 35 cm. É importante observar que mesmo o DGPS sendo um método baseado nas medidas de código suavizado, este apresentou

resultados estatisticamente próximos do posicionamento relativo cinemático com solução das ambiguidades nas medidas de fase.

Nos processamentos realizados com a portadora L2, neste trabalho não houve degradação quanto a posição. Em contrapartida, a observável L2 apresentou mais ruídos. Dentre os processamentos realizados, a melhor precisão interna foi atingida onde nenhuma correção para a ionosfera foi aplicada. Tais resultados corroboram com a indicação de que a correção ionosférica modelada globalmente para médias altitudes não estão suficientes para esse tipo de aplicação na região do Brasil. Especialmente para baixas latitudes localizadas próximas ao equador. Além dos modelos globais apresentarem qualidade incapaz de representar a variabilidade das condições ionosféricas brasileiras, sabe-se também que há má distribuição global das estações utilizadas na geração desses modelos.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar estudos utilizando dados de voos atuais, de uma aeronave com trajetória de decolagem e pouso no Aeroporto Internacional Afonso Pena (SBCT), ou Aeroporto do Bacacheri (SBBI), devido à proximidade dos dois aeródromos.

Realizar estudo e coleta de dados por meio de RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*) simulando condições de aproximação e pouso, no Campus - Centro Politécnico da UFPR, utilizando a estação RBMC e mais 3 estações terrestres para simulações de um projeto GBAS, em latitude geomagnética baixa próxima do Aeroporto Internacional Afonso Pena, ou outros aeroportos de interesse para instalação de GBAS.

## REFERÊNCIAS

ANAC. RBAC 01 Emd 08, **Definições, regras de redação e unidade de medida para uso nos normativos da ANAC.** Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-012021>>. Acesso em: 22 out 2021a.

ANAC. **IS 91-001E Aprovação operacional de navegação baseada em desempenho (PBN)** Ano 2017. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/iac-e-is/is/is-91-001>>. Acesso em: 20 out 2021b.

BRASIL, Ministério das Relações Exteriores. **O Brasil e a OACI.** Disponível em: <<https://www.gov.br/mre/pt-br/assuntos/politica-externa-comercial-e-economica/organizacoes-economicas-internacionais/o-brasil-e-a-oaci>>. Acesso em: 23 out. 2021.

CASA (Civil Aviation Safety Authority / Australian Government). **What it PBN.** Disponível em: <<https://www.casa.gov.au/book-page/chapter-6-performance-based-navigation>>. Acesso em: 23 out. 2021.

DECEA. **PCA 351-3 Plano de Implementação ATM Nacional.** Disponível em: <<https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/pca-351-3>>. Acesso em: 18 out. 2021a.

DECEA. **DCA 351-2 Conceção Operacional ATM Nacional.** Disponível em: <<https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/dca-351-2>>. Acesso em 18 out. 2021b.

DECEA. **ICA 100-40 Aeronaves não tripuladas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro.** Disponível em: <<https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/ica-100-40>>. Acesso em: 02 nov. 2021c.

DECEA. **O DECEA.** Disponível em: <<https://www.decea.mil.br/?i=quem-somos&p=o-decea>>. Acesso em 23 out. 2021d.

DECEA. **SIRIUS BRASIL.** Disponível em: <<https://sirius.decea.mil.br/>>. Acesso: 23 out. 2021e.

DECEA. **ADS-B.** Disponível em: <[https://www.decea.mil.br/?i=midia-e-informacao&p=pg\\_noticia&materia=artigo-decea-ads-b-satelital](https://www.decea.mil.br/?i=midia-e-informacao&p=pg_noticia&materia=artigo-decea-ads-b-satelital)>. Acesso em: 01 dez. 2021f.

DECEA. **AISWEB.** Disponível em: <<https://aisweb.decea.mil.br/>>. Acesso em 10 out. 2021g.

DECEA. **Meios de navegação aérea.** Disponível em: <<https://www.decea.mil.br/?i=atividades&p=meios-de-navegacao-aerea>>. Acesso em: 16 out 2021h.

EMBRAER. **Phenom-100EV-Eletronic**. Disponível em: <<https://daflwcl3bnxyt.cloudfront.net/m/3a842ea7b98838a4/original/Phenom-100EV-eletronic.pdf>>. Acesso em: 23 out. 2021.

Eurocontrol. **GNSS Elements**. Disponível em: <<https://pbnportal.eu/epbn/main/Overview-of-PBN/PBN-Concept---Unpacked/PBN-Infrastructure/Space-based/GNSS-Elements.html>>. Acesso em: 27 out 2021a.

Eurocontrol. **CORE Constellations**. Disponível em: <<https://pbnportal.eu/epbn/main/Overview-of-PBN/PBN-Concept---Unpacked/PBN-Infrastructure/Space-based/Core-Constellations.html>>. Acesso em: 27 out. 2021b.

EUSPA. **What is SBAS**. Disponível em: <<https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-sbas>>. Acesso em: 21 nov. 2021.

FAA. **Civil Utilization of Area Navigation (RNAV) departure Procedures**. Disponível em: <<https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Order/8260.44A%20Incl%20Chg%201-2.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2021a.

FAA. **Satellite Navigation – Wide Area Augmentation System WASS**. Disponível em: <[https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/techops/navservices/gnss/waas](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/waas)>. Acesso em: 20 nov. 2021b.

FAA. **Satellite Navigation – GBAS**. Disponível em: <[https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/techops/navservices/gnss/laas/howitworks/](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/laas/howitworks/)>. Acesso em: 21 nov. 2021c.

FAA. **ADS-B**. Disponível em: <<https://www.faa.gov/nextgen/programs/adsb/pilot/>>. Acesso em: 02 dez. 2021d.

FLYGLS. Disponível em: <<https://www.flygls.net>>. Acesso em: 30 nov. 2021.

GARMIN. **About GPS**. Disponível em: <<https://www8.garmin.com/aboutGPS/waas.html>>. Acesso em: 23 nov. 2021.

GAGAN (GPS Aided Geo Augmented Navigation). Disponível em: <<https://gagan.aai.aero/gagan/>>. Acesso em: 16 nov. 2021.

GIOVANINI, A. **Sistemas SBAS**. Disponível em: <<https://www.adenilsongiovanini.com.br/blog/sbas-o-que-e-e-para-que-serve/>>. Acesso em: 16 nov. 2021.

GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. 2. ed. Curitiba: Editora UFPR, 2015.

GPS. **Augmentation System.** Disponível em: <<https://www.gps.gov/systems/augmentations/>>. Acesso em: 21 nov. 2021a.

GPS. **Selective Availability.** Disponível em: <<https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/sa/>>. Acesso em: 30 out. 2021b.

BIDINOTTO, Jorge Henrique; CESARINO, Yuri. **Princípios de Avionica e Navegação Capítulo 3-Pouso por Instrumentos.** 2017. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5770572/mod\\_resource/content/0/3%20Pouso%20por%20Instrumento.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5770572/mod_resource/content/0/3%20Pouso%20por%20Instrumento.pdf)>. Acesso em: 23 out. 2021.

IBGE. **Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos Associados ao Sistema Geodésico Brasileiro.** Disponível em: <[https://geoftp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/normas/normas\\_levantamentos\\_geodesicos.pdf](https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/normas_levantamentos_geodesicos.pdf)>. Acesso em: 18 nov. 2021.

ICAO. **About ICAO.** Disponível em: <<https://www.icao.int/about-icao/Pages/default.aspx>>. Acesso em: 23 out. 2021a.

ICAO. **Multilayer Structure of the GANP.** Disponível em: <<https://www4.icao.int/ganpportal/>>. Acesso em: 23 out. 2021b.

ICAO. **DOC 9613 Performance-based Navigation (PBN) Manual.** Disponível em: <<https://www.icao.int/sam/documents/2009/samig3/pbn%20manual%20-%20doc%209613%20final%205%2010%2008%20with%20bookmarks1.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2021c.

ICAO. Seventeenth Meeting of the CAR/SAM Regional Planning and Implementation Group. Disponível em <<https://www.icao.int/SAM/Pages/GREPECAS17.aspx>>. Acesso em: 30 nov. 2021d.

ICAO. **Manual Sobre Performance Global do Sistema de Navegação Aérea: Doc. 9883.** 2021e.

ICAO. **Doc. 9750 – GANP Global Air Navigation.** Disponível em: <<https://www.icao.int/publications/Pages/Publication.aspx?docnum=9750>>. Acesso em: 23 out 2021f.

ICAO. **Doc. 9854 AN/458 – Global Air Traffic Management Operational Concept.** Disponível em: <[https://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/9854\\_cons\\_en\[1\].pdf](https://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/9854_cons_en[1].pdf)>. Acesso em 20 out. 2021g.

IFATCA. **Standards and Recommended Practices (SARPs).** Disponível em: <<https://www.ifatca.org/about-ifatca/icao-activities/making-standards-and-recommended-practices-sarps/making-sarps-how-does-it-work/>>. Acesso em: 30 nov 2021.

MONICO, J. F. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP. 2008.

Observatório nacional. **Observatórios magnéticos**. Disponível em: <<https://observatoriosmagneticos.com/obsermagneticos/>>. Acesso em: 30 out. 2021

Setti Junior, Paulo de Tarso. **Posicionamento por Ponto multi-GNSS: análise dos sistemas, sinais e modelos ionosféricos**, Presidente Prudente, 2019.

Silva, Weverton da Costa. **GBAS: fundamentos, simulações e análises de disponibilidade em função do Sigma VIG**. Presidente Prudente, 2020.

Wikipédia. **Rádio farol não direcional**. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Radiofarol\\_n%C3%A3o\\_direcional](https://pt.wikipedia.org/wiki/Radiofarol_n%C3%A3o_direcional)>. Acesso: em 18 out 2021.

### APÊNDICE 1 – RESULTADO DOS PROCESSAMENTOS

Estratégia de processamento	Posicionamento	Média sdn(m)	Média sde(m)	Média sdu(m)	RMSE (m)	Frequência / Solução	Correção Ionosfera
1	DGPS_1	0,433	1,244	1,203	1,784	L1+L2 / Forward	IONEX TEC
2	DGPS_2	1,251	0,556	1,688	2,173	L1 / Forward	IONEX TEC
3	DGPS_3	0,611	0,556	1,669	1,862	L1 / Forward	Sem correção (off)
4	PPP_4	0,346	0,234	0,688	0,805	L1+L2 / Forward	IONEX TEC
5	PPP_5	0,065	0,070	0,155	0,182	L1+L2 / Forward	Iono-free LC
6	PPP_6	0,033	0,038	0,079	0,093	L1+L2 / Combined	Iono-free LC
7	PPP_7	0,324	0,260	0,777	0,881	L1 / Forward	IONEX TEC
8	Relativo_8	0,040	0,046	0,097	0,115	L1+L2 / Forward	Estimate TEC
9	Relativo_9	0,012	0,012	0,032	0,036	L1+L2 / Combined	Sem correção (off)
10	Relativo_10	0,024	0,024	0,060	0,069	L1+L2 / Forward	Sem correção (off)
11	Relativo_11	0,028	0,028	0,128	0,134	L1+L2 / Forward	IONEX TEC
12	Relativo_12	0,016	0,016	0,077	0,081	L1+L2 / Combined	IONEX TEC
13	Relativo_13	0,018	0,020	0,061	0,067	L1 / Forward	IONEX TEC
14	Relativo_14	0,017	0,020	0,044	0,051	L1 / Forward	Sem correção (off)
15	Relativo_15	0,027	0,031	0,065	0,076	L1+L2 / Combined	Iono-free LC



## ANEXO 1 – RBMC SPJA JABOTICABAL



**RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**  
**Relatório de Informação de Estação**  
**SPJA - Jaboticabal**

### 0. Formulário

Preparado por: Centro de Controle Eng. Kátia Duarte Pereira - RBMC  
 Data: 02/10/2010  
 Atualização: 22/03/2017 - Atualização de Firmware

### 1. Identificação da estação GPS

Nome da Estação: JABOTICABAL  
 Ident. da Estação: SPJA  
 Código SAT: [99539](#)  
 Código Internacional: 41686M001

### 2. Informação sobre a localização

Cidade: Jaboticabal  
 Estado: São Paulo

Informações Adicionais: Pilar cilíndrico de concreto medindo 2,91 m de altura com diâmetro de 0,30 m sobre uma base quadrangular de 1,20 m x 1,20 m. Possui no topo um dispositivo de centragem forçada. Em terreno situado ao lado do prédio do Laboratório de Instrumentação, dentro do Campus da UNESP, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Na Via de Acesso Professor Paulo Donato Castellane s/n - Jaboticabal/SP.

### 3. Coordenadas oficiais

3.1. SIRGAS2000 (Época 2000.4)

Coordenadas Geodésicas			
Latitude:	- 21° 14' 27,86387"	Sigma:	0,002 m
Longitude:	- 48° 17' 12,13032"	Sigma:	0,002 m
Alt. Elip.:	570,199 m	Sigma:	0,009 m
Coordenadas Cartesianas			
X:	3.957.806,6961 m	Sigma:	0,006 m
Y:	-4.440.069,7850 m	Sigma:	0,006 m
Z:	-2.296.499,8742 m	Sigma:	0,003 m
Coordenadas Planas (UTM)			
UTM (N):	7.648.754,712 m		
UTM (E):	781.612,637 m		
MC:	-51		

### 4. Informações do equipamento GNSS

#### 4.1. Receptor

- 4.1.1 Tipo do Receptor - TRIMBLE NETR9  
 Número de Série - 5429R49135  
 Versão do Firmware - 5.22 (Principal)  
 Atualização do Firmware - 22/03/2017 às 20:50 UTC
- 4.1.2 Tipo do Receptor - TRIMBLE NETR9  
 Número de Série - 5429R49135  
 Versão do Firmware - 5.20 (Principal)  
 Atualização do Firmware - 04/01/2017 às 18:04 UTC
- 4.1.3 Tipo do Receptor - TRIMBLE NETR9  
 Número de Série - 5429R49135  
 Versão do Firmware - 5.03 (Principal)  
 Data de Instalação - 26/10/2016 às 10:10 UTC



**RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**  
**Relatório de Informação de Estação**  
**SPJA - Jaboticabal**

4.1.4 Tipo do Receptor - TRIMBLE NETR8  
 Número de Série - 4918K35119  
 Versão do Firmware - 4.17 (Principal)  
 Data de Instalação - 17/12/2015 às 10:55 UTC  
 Data de Remoção - 26/10/2016 às 10:00 UTC

4.1.5 Tipo do Receptor - TRIMBLE NETR8  
 Número de Série - 4912K34568  
 Versão do Firmware - 4.41 (Principal)  
 Data de Instalação - 20/03/2014 às 13:30 UTC  
 Data de Remoção - 17/12/2015 às 10:45 UTC

4.1.6 Tipo do Receptor - TRIMBLE NETR8  
 Número de Série - 4918K35119  
 Versão do Firmware - 4.17 (Principal)  
 Data de Instalação - 02/10/2010 às 12:43 UTC  
 Data de Remoção - 20/03/2014 às 10:30 UTC

#### 4.2. Antena

4.2.1 Tipo de Antena - GNSS CHOKE RING (TRM59800.00)  
 URL imagem - <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadImage?name=TRM59800.00%2BNONE.gif>  
 Número de Série - 5406354933  
 Altura da Antena (m) - 0,0080 (distância vertical do topo do dispositivo de centragem forçada à base da antena)  
 Data de Instalação - 26/10/2016 às 10:10 UTC

4.2.2 Tipo de Antena - GNSS CHOKE RING (TRM59800.00)  
 URL imagem - <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadImage?name=TRM59800.00%2BNONE.gif>  
 Número de Série - 4923353203  
 Altura da Antena (m) - 0,0080 (distância vertical do topo do dispositivo de centragem forçada à base da antena)  
 Data de Instalação - 02/10/2010 às 12:43 UTC  
 Data de Remoção - 26/10/2016 às 10:00 UTC

## 5. Informações Complementares

### 5.1. Para informações técnicas contatar:

Nome: IBGE/DGC/Coordenação de Geodésia  
 Endereço: Av. República do Chile, 500 - 4º andar, Centro - Rio de Janeiro. CEP - 20031-170  
 Telefone: (21) 2142-4935  
 Home Page: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)

### 5.2. Para informações sobre comercialização e aquisição de dados contatar:

Nome: Centro de Documentação e Disseminação de Informações - CDDI/IBGE  
 Endereço: Rua General Canabarro, 706, CEP 20271-201, Rio de Janeiro, RJ  
 Telefone: 0800-721-8181  
 Contato: [ibge@ibge.gov.br](mailto:ibge@ibge.gov.br)

ANEXO 2 – KEWR / 00285GLS4L

