

Jorge Henrique Bidinotto  
Marcus Vinicius Pereira de Moraes

**Princípios de Aviônica e Navegação**  
**Capítulo 6 - Navegação via Satélite**

**São Carlos**  
**Dezembro de 2017**



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Satélite Transit-1A . . . . .	5
Figura 2 – Presidente Vladimir Putin com um dispositivo de navegação veicular baseado em GLONASS . . . . .	6
Figura 3 – Órbitas dos satélites que compoem o GPS . . . . .	6
Figura 4 – Exemplo típico (GNS 480) de receptor e display GPS . . . . .	7
Figura 5 – Órbitas dos satélites que compoem o GPS . . . . .	7
Figura 6 – Estações de controle GPS . . . . .	8
Figura 7 – Exemplos do segmento de usuário . . . . .	8
Figura 8 – Localizações das antenas em uma aeronave . . . . .	9
Figura 9 – Exemplo de um ponto na terra com visibilidade de sete satélites . . . . .	9
Figura 10 – Interação entre segmentos . . . . .	9
Figura 11 – Desvio dos relógios atômicos . . . . .	10
Figura 12 – Exemplo de erro na propagação de sinal . . . . .	11
Figura 13 – Posição ideal dos satélites . . . . .	11
Figura 14 – Programa de Lançamento do GLONASS . . . . .	13
Figura 15 – Órbitas dos satélites do GLONASS . . . . .	13
Figura 16 – Equações das frequências de cada satélite do GLONASS . . . . .	14
Figura 17 – Exemplos de aparelhos que operam o sinal GLONASS . . . . .	14
Figura 18 – Lançamento do satélite GIOVE-A em 2005 . . . . .	15
Figura 19 – Representação das órbitas dos satélites do Galileo . . . . .	15
Figura 20 – Infraestrutura da operação em solo . . . . .	16
Figura 21 – Cobertura do sistema BeiDou 1 . . . . .	16
Figura 22 – Cobertura do sistema em 2012 . . . . .	17
Figura 23 – Exemplo de órbita em média altitude . . . . .	17
Figura 24 – Órbita dos satélites que já estão operacionais . . . . .	18
Figura 25 – Comparação entre órbitas de satélites dos sistemas globais de navegação via satélite . . . . .	18
Figura 26 – Comparação entre a quantidade de satélites enviados ao longo dos anos por cada sistema global de navegação via satélite . . . . .	18
Figura 27 – Órbitas dos satélites do NAVIC . . . . .	19
Figura 28 – Cobertura regional do NAVIC . . . . .	19
Figura 29 – Arquitetura do NAVIC . . . . .	20
Figura 30 – Órbita dos satélites do QZSS . . . . .	20
Figura 31 – Regiões de atuação dos sistemas de acréscimo . . . . .	21
Figura 32 – Região de cobertura do WAAS . . . . .	21
Figura 33 – Rede de estações em solo do WAAS . . . . .	22
Figura 34 – Aumento de performance oferecido pelo WAAS . . . . .	22
Figura 35 – Área de cobertura do EGNOS . . . . .	23
Figura 36 – Estações em solo do EGNOS . . . . .	23
Figura 37 – Estações em solo do GAGAN . . . . .	24
Figura 38 – Exemplo de antena fixada ao solo . . . . .	25
Figura 39 – Esquema de funcionamento do sistema DGPS . . . . .	26
Figura 40 – Esquema de funcionamento do sistema LAAS . . . . .	26
Figura 41 – Representação do passo a passo do LAAS . . . . .	27



# Sumário

<b>1</b>	<b>Navegação por satélite</b>	<b>5</b>
1.1	Conceito geral	5
1.2	Introdução	5
1.3	<i>Global Positioning System (GPS)</i>	6
1.4	Princípio de Funcionamento	9
1.5	Erros	10
1.6	GPS Como Ferramenta de Navegação	11
1.7	Outros Sistemas de Navegação via Satélite	12
1.8	Sistemas de Acréscimo	21
1.9	Sistemas de Aumento Local de Precisão	24
	<b>Referências</b>	<b>29</b>



# 1 Navegação por satélite

## 1.1 Conceito geral

Em termos gerais, tem-se como Sistemas de Navegação por Satélite sistemas cujo estabelecimento da posição geo-espacial dá-se pelo uso de satélites artificiais. Tais sistemas possibilitam que receptores localizados sobre a superfície terrestre determinem sua localização através da comparação dos sinais dos satélites, adquirindo assim sua posição em um sistema de referência espacial desejado. A precisão da localização está diretamente relacionada com o tipo de técnica de posicionamento utilizada. Aos sistemas de navegação por satélite que possuem capacidade de determinar o posicionamento em qualquer ponto da superfície terrestre, dá-se o nome de Sistema de Navegação Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System - GNSS*).

Os Sistemas de Navegação por Satélite foram inicialmente desenvolvidos com fins militares, mas com o tempo observou-se o surgimento da necessidade de posicionamento para usos civis tais como agricultura de precisão e sistemas de transportes, o que levou ao surgimento de aplicações específicas neste sentido.

Atualmente, tem-se diferentes Sistemas de Navegação por Satélite, sendo o mais antigo e mais conhecido o sistema GPS (*Global Positioning System*). Desenvolvido pelos Estados Unidos durante os anos 70, o GPS permaneceu por anos como único recurso para o fornecimento de posições geográficas ao redor do globo terrestre.

## 1.2 Introdução

As primeiras ideias sobre satélites surgiram ao longo do século XVII com as teorias de gravitação elaboradas por Isaac Newton. Nos anos que seguiram, a ficção científica seguiu abordando o tema até que o mesmo foi visto como uma real possibilidade e utilidade por cientistas, o que em 1957 permitiu que os soviéticos após diversos estudos e testes lançassem o primeiro satélite artificial, chamado de Sputnik 1.

Em um primeiro momento, a determinação da órbita destes satélites era realizada tendo-se como base o Efeito Doppler. Esta ideia permitiu a criação do sistema TRANSIT, que utilizava tal efeito para determinar a posição de embarcações em alto mar.



Figura 1 – Satélite Transit-1A

Este sistema foi utilizado de 1964 a 1993 e era composto por 8 satélites com altitudes de 1.100km, sendo incapaz de cobrir toda a extensão do globo terrestre e possuindo uma precisão de 3 a 10 metros. Sua melhoria teve como resultado o sistema NAVSTAR GPS, cujos lançamento dos satélites em órbita foi iniciado em 1978. Mais tarde, em 1982, a Rússia começou a colocar em órbita os satélites de seu sistema GNSS conhecido como GLONASS, processo que foi concluído. Atualmente, é um dos dois únicos sistemas GNSS completamente operacionais ao lado do sistema estadunidense NAVSTAR GPS.



Figura 2 – Presidente Vladimir Putin com um dispositivo de navegação veicular baseado em GLONASS

### 1.3 Global Positioning System (GPS)

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) é composto por um conjunto de pelo menos 24 satélites em órbitas de 20.180km, distribuídos em seis órbitas com uma inclinação de  $55^\circ$  em relação à linha do Equador. Cada plano possui 4-5 satélites com diferentes fases a fim de minimizar interrupções.

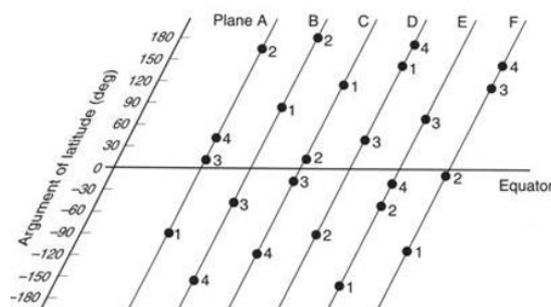


Figura 3 – Órbitas dos satélites que compoem o GPS

O funcionamento do GPS depende de três diferentes segmentos: segmento espacial, segmento de controle e segmento de usuário.

#### Segmento Espacial

O segmento espacial é composto por pelo menos 24 satélites que, conforme mencionado anteriormente, dividem-se em 6 planos orbitais com altitudes de 20.180km e inclinações de  $55^\circ$  em relação à linha do Equador. Estes satélites são arranjados de forma



Figura 4 – Exemplo típico (GNS 480) de receptor e display GPS



Figura 5 – Órbitas dos satélites que compoem o GPS

que um mínimo de quatro satélites estejam sempre visíveis de qualquer ponto da superfície terrestre.

Ao longo da história, foram enviadas 6 gerações de satélites com órbitas de 11h57min e diferentes por suas tecnologias (logo, suas precisões). Esses satélites transmitem, simultaneamente, sinais que possibilitam a identificação de cada um deles e de sua posição no espaço, bem como a contagem do tempo.

Cada satélite é equipado com dois ou três relógios atômicos de precisão e estabilidade extremamente elevadas cujas indicações são utilizadas para as medições das posições na superfície terrestre.

Os satélites enviam, simultaneamente, um sinal de frequência 1.575,42 MHz (L1) e outro de frequência 1.227,6 MHz (L2). Ambos transmitem o código de precisão (P) utilizado para fins militares mas apenas o sinal L1 transmite o código C/A (*coarse/acquisition*). Os sinais L3, L4 e L5 estão atualmente em desenvolvimento e serão responsáveis pela transmissão de outros tipos de informações no futuro.

Cada satélite envia de maneira unidirecional e contínua para a Terra sinais de 5 subframes com duração de 6 segundos. Deste modo, o sinal de cada satélite se repete a cada 30 segundos. O sinal C/A é composto por cinco subframes: horário, Efeméride 1 (Posição do Satélite), Efeméride 2, outros dados (identidade do satélite, mensagem de pane, correções devido à ionosfera, entre outros) e situação de todos os satélites da constelação.

## Segmento de Controle

O segmento de controle, por sua vez, é composto por cinco estações militares responsáveis pelo monitoramento das informações enviadas pelos satélites. Cada um deles é avaliado, no mínimo, três vezes ao dia.

Tais estações são equipadas com receptores de sinal, relógios atômicos e transmissores que possibilitam o envio de informações aos satélites. Ao receber o sinal do satélite, cada estação realiza a comparação com o relógio atômico em solo, executa as correções referentes à ionosfera e troposfera e, em seguida, as envia de volta aos satélites. As estações são também capazes de realizar a previsão de trajetória dos satélites nas próximas 24 horas.

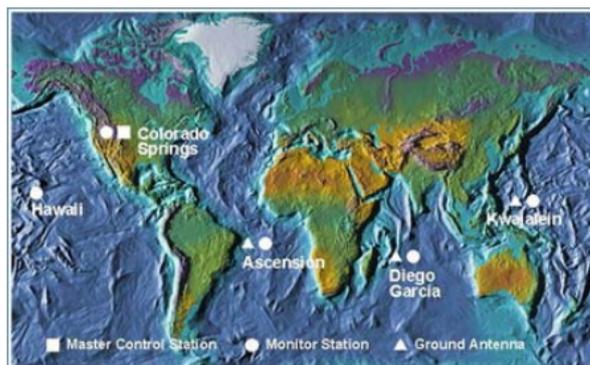


Figura 6 – Estações de controle GPS

Em termos de segurança, apenas o departamento de defesa é capaz de interferir no sinal dos satélites. Além disso, o governo americano tem todas as condições de "sujar" o sinal dos satélites e fazer com que apenas veículos devidamente autorizados consigam realizar a codificação do sinal. No ano 2000, pressão internacional fez com que fosse assinado um tratado no qual o governo americano se comprometesse a não fazê-lo.

## Segmento de Usuário

O segmento de usuário refere-se a tudo que diz respeito à comunidade usuária, civil e militar. São os equipamentos receptores de GPS que recebem os sinais dos satélites e usam as informações transmitidas para calcular a sua posição tridimensional (longitude, latitude e altitude), bem como para acessar a dimensão tempo. Como exemplos, podem ser citados os aparelhos de GPS presentes em aeronaves (antenas), automóveis, smartphones e outros instrumentos portáteis.



Figura 7 – Exemplos do segmento de usuário

Estes equipamentos receptores são compostos por um relógio com precisão inferior ao atômico responsável pela comparação entre os sinais de satélite recebidos. Tais sinais

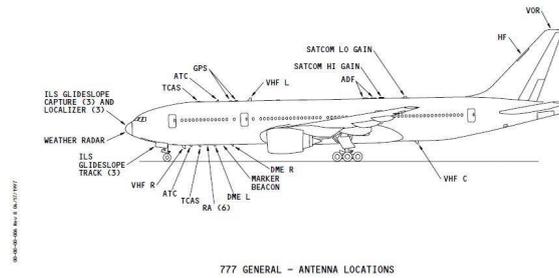


Figura 8 – Localizações das antenas em uma aeronave

carregam informações como qual satélite os enviou, assim como suas posições e horário de saída. O receptor enxerga cada sinal como uma equação de espaço.

A determinação da posição instantânea depende de quatro parâmetros: latitude, longitude, altitude e horário. Desta forma, é necessário que sejam recebidos, no mínimo, quatro sinais de quatro satélites diferentes. Quanto mais sinais são recebidos, mais precisa é a determinação da posição.

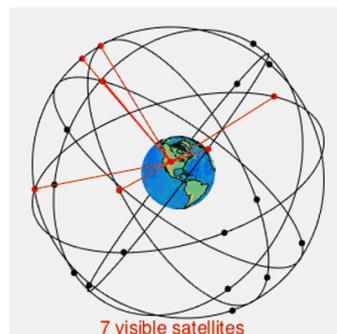


Figura 9 – Exemplo de um ponto na terra com visibilidade de sete satélites

## 1.4 Princípio de Funcionamento

A interação entre os três segmentos descritos na seção anterior é mostrado na figura a seguir:

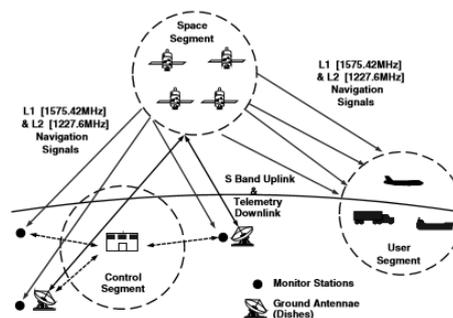


Figura 10 – Interação entre segmentos

Um posicionamento bidimensional exige um mínimo de três satélites, enquanto o tridimensional, por sua vez, exige quatro. Conforme mencionado na seção anterior, os

receptores de GPS traduzem o sinal enviado por cada satélite para uma equação de espaço que é utilizada no momento de determinação da posição global. Além disso, é necessária a correção dos desvios dos relógios para que a posição seja determinada corretamente.

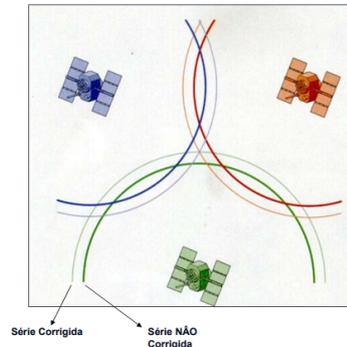


Figura 11 – Desvio dos relógios atômicos

Sistemas de navegação por satélite não são influenciados por condições climáticas e fornecem uma cobertura global de navegação que cumpre todos os requisitos civis para navegação em espaços aéreos oceânicos e algumas áreas remotas.

O status de cada satélite do sistema de GPS é transmitido como parte da informação enviada pelo mesmo. Adicionalmente, essa informação é também disponibilizada pelo serviço informação de navegação da Guarda Costeira dos Estados Unidos através do telefone (703) 313-5907 ou do site [www.navcen.uscg.gov](http://www.navcen.uscg.gov).

## 1.5 Erros

Durante o processo de determinação da posição global, há três possíveis fontes de erros: o satélite, o receptor ou a comunicação entre eles.

### Satélite

O satélite possui como função exclusiva a marcação da hora e a transmissão desta informação. Apesar de possuir entre dois e três relógios atômicos (além da estação em solo responsável pelo monitoramento desses relógios), é possível que o satélite cometa algum erro de transmissão de horário.

Neste caso, é emitido um NANU (Notice Advisory for Navstar Users) que irá indicar o problema, geralmente divulgado na internet e rapidamente espalhado.

Existem também as possibilidades de erros de órbita e de relatividade (campo gravitacional e velocidade diferentes). Para estas situações, o método de correção envolve o uso de efemérides precisas e de posicionamento relativo.

### Propagação de Sinal

A propagação de sinal entre satélite e receptor pode ser impactada por fatores como refrações troposféricas e ionosféricas (variação da densidade dos meios onde o sinal se propaga), tempestades solares, perdas de ciclo (obstrução do sinal por construções, pontes, árvores, entre outros), multicaminhamento (reflexão do sinal em superfícies vizinhas) e

interferência (a frequência do sinal enviado é comum a outros sistemas de navegação aeronáutica).

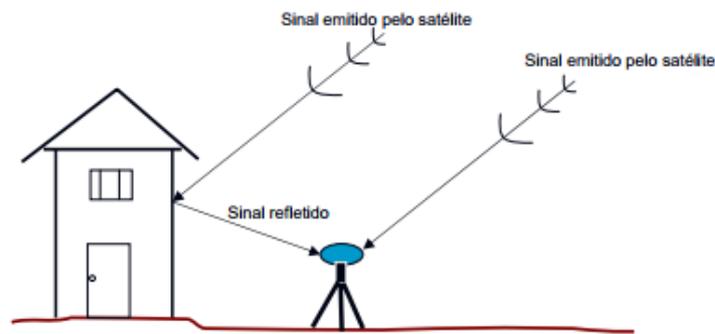


Figura 12 – Exemplo de erro na propagação de sinal

Uma possível saída é a instalação de antenas em locais distantes de superfícies que possam refletir o sinal.

## Receptor

No caso do receptor, o problema mais óbvio é a própria pane do aparelho. Além disso, quando o aparelho é desligado e ligado em uma localização diferente, em um primeiro momento ele tentará conectar-se com os satélites aos quais estava conectado anteriormente, o que pode gerar um atraso na determinação da localização.

Outra possível fonte de erros é a posição relativa dos satélites em relação ao receptor. o posicionamento ideal dos satélites em termos de melhor precisão na determinação ocorre quando tem-se três deles formando um triângulo equilátero com todos  $5^\circ$  acima do horizonte e o quarto exatamente acima do receptor.

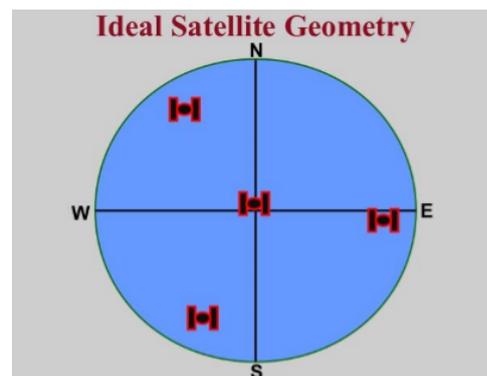


Figura 13 – Posição ideal dos satélites

## 1.6 GPS Como Ferramenta de Navegação

Apesar das boas características e bom desempenho do GPS, este ainda não é autorizado como instrumento primário de navegação por falhar em alguns requisitos de certificação como acurácia, integridade, continuidade e disponibilidade.

No futuro, os atuais estudos de aperfeiçoamento do GPS permitirão que estes requisitos sejam cumpridos e seu uso como instrumento primário de navegação seja possível.

## Acurácia

Atualmente, o GPS cumpre todos os requisitos de acurácia com exceção daquela referente à distância vertical em aproximações CAT I. A correção desta falha se dá por meio da correção diferencial de GPS, também conhecida como DGPS e futuramente abordada com mais detalhes neste estudo.

## Integridade

O não cumprimento dos requisitos de integridade pelo GPS dá-se pelo fato de que é exigido dos sistemas da aeronave, em caso de degradação (pane ou perda de precisão, por exemplo), que a tripulação seja informada da perda de integridade do sistema e sua inativação automática.

Como atualmente o GPS é incapaz de ficar automaticamente inativo nestes casos ou ignorar o sinal de um satélite com informações de procedência duvidosa, o requisito de integridade não é cumprido.

Sistemas mais tecnologicamente desenvolvidos como o EGNOS e melhoramentos do GPS como DPGS e WAAS permitirão que, no futuro, este requisito seja cumprido.

## Continuidade

Os requisitos de continuidade exigem que os sistemas da aeronave estejam disponíveis em todas as fases do voo e, em caso de pane, seja automaticamente substituído por um sistema equivalente.

Tempestades solares fazem com que o sinal do GPS seja temporariamente perdido sem que haja um mecanismo que identifique esta falha e o substitua por outro sistema de navegação, o que impossibilita que o GPS atualmente cumpra tal requisito.

## Disponibilidade

Estes requisitos exigem que o sistema da aeronave esteja disponível sempre que o usuário necessite. Atualmente, o GPS é incapaz de cumprir esses requisitos devido aos mesmos motivos pelos quais não cumpre os de continuidade.

Futuramente, acredita-se que inovações tecnológicas como o LAAS permitirão tanto o cumprimento dos requisitos de continuidade quanto os de disponibilidade.

## 1.7 Outros Sistemas de Navegação via Satélite

Apesar de o GPS ser o Sistema de Navegação via Satélite mais popular atualmente, existem outros cinco sistemas de navegação via satélite cuja cobertura pode ser tanto regional quanto global, a saber: GLONASS, Galileo, BeiDou, NAVIC e QZSS.

### GLONASS

O GLONASS (*Global Navigation Satellite System*) é um sistema de navegação via satélite russo cujo desenvolvimento iniciou-se em 1982, entrando efetivamente em operação em 1985.

O projeto inicialmente contava com uma previsão de 24 satélites em operação, porém no ano de 2000 existiam apenas 10 satélites em órbita. A partir de 2004 observou-se uma recuperação do sistema, que atualmente conta com 29 satélites em órbita, dos quais 24 são operacionais.

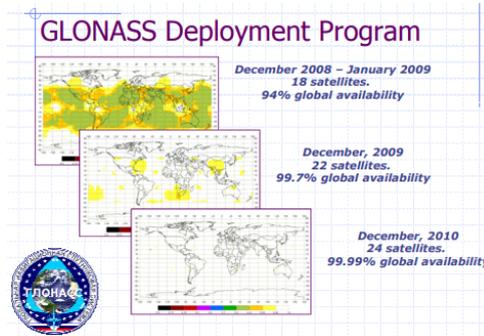


Figura 14 – Programa de Lançamento do GLONASS

A primeira geração de satélites lançados encontra-se completamente desativada - os atuais satélites em operação são da terceira geração. Nos dias de hoje, duas novas gerações encontram-se em fase de desenvolvimento com previsão de lançamento para 2018.

Os satélites distribuem-se em três órbitas de 19.100km de altitude com duração de 11h15min e uma inclinação de  $64,8^\circ$  em relação à linha do Equador.

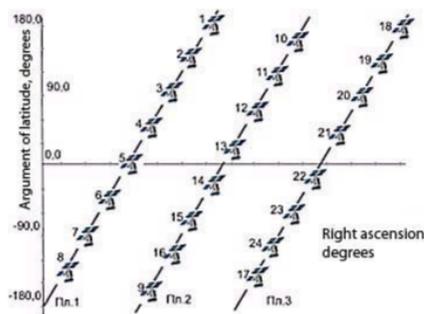


Figura 15 – Órbitas dos satélites do GLONASS

O GLONASS, assim como o GPS, divide-se em três segmentos (espacial, usuário e controle), o que faz com que os dois sistemas funcionem de maneira muito semelhante. A precisão garantida pelo GLONASS (4 a 7 metros) é ligeiramente inferior àquela garantida pelo GPS (2 a 8 metros). Seus satélites, assim como o GPS, transmitem dois códigos PRN: C/A (*Coarse/Acquisition*) e P (*Precision code*), também chamados de SP (*Standard Precision*) e HP (*High Precision*), respectivamente. O sinal HP é reservado para fins militares.

Tais códigos são transmitidos em duas frequências portadoras chamadas de L1 e L2. Enquanto a frequência L1 transmite o sinal de C/A e P, a L2 transmite apenas o sinal P, em quadratura de fase com o sinal de C/A e com uma largura de banda dez vezes maior. Deste modo, o código C/A possui frequência de 0.511 MHz e o código P possui frequência de 5.11 MHz, fator que pode tornar a acuracidade das pseudodistâncias do GLONASS menor que as do GPS.

A transmissão dos sinais de cada satélite ocorre em uma frequência própria gerada a partir de um intervalo distinto de uma frequência central de canais: enquanto L1 situa-se

na banda entre 1597-1617 MHz, a L2 situa-se entre 1240-1260 MHz, onde o espaçamento entre os canais em L1 é de 0,5625 MHz e entre os canais de L2 é de 0,4375 MHz. Desta forma, as frequências de cada satélite (em MHz) podem ser representadas pelas expressões mostradas abaixo, onde  $n$  representa o número do satélite.

$$L1 = 1602 + 0,5625 * n$$

$$L2 = 1246 + 0,4375 * n$$

Figura 16 – Equações das frequências de cada satélite do GLONASS

O mesmo código PRN é transmitido por todos os satélites, o que faz com que a diferenciação entre eles ocorra pela frequência do sinal enviado, além de um número sequencial e um número baseado na série Cosmos.

Atualmente, existem seis estações em solo GLONASS, das quais cinco localizam-se na região da ex-URSS e uma no Brasil.

É importante observar que o sistema GLONASS não possui uma política de técnicas de segurança visando degradar a acurácia dos sinais. A única distinção mantida é aquela entre os sinais de alta precisão (destinado aos usuários autorizados) e os de precisão padrão (destinados aos usuários não autorizados). Em termos práticos, isso significa que ainda que o sinal de alta precisão não seja encriptado ou degradado, o Ministério de Defesa da Rússia não o avaliza oficialmente para usos não autorizados.

Existe um apoio significativo por parte tanto dos Estados Unidos quanto da Rússia para que haja uma interoperacionalidade entre o GPS e o GLONASS. O segmento de usuário do GLONASS é bastante semelhante ao do GPS - existem alguns aparelhos terrestres capazes de operar os dois sinais, porém nenhum com aplicações na aviação civil.



Figura 17 – Exemplos de aparelhos que operam o sinal GLONASS

## Galileo

Atualmente em desenvolvimento, o Galileo é um sistema de navegação por satélite desenvolvido pela União Européia. O projeto iniciou-se em 1999 e, inicialmente, contaria com apoio financeiro de toda a União Europeia, mas restrições financeiras fizeram com que o programa fosse quase desativado. O projeto foi desde o início concebido como um projeto civil, opondo-se ao GPS americano, ao GLONASS russo e ao Compass chinês, todos de origem militar. O governo americano é abertamente contrário ao projeto.

A motivação primária do projeto veio do fato da possibilidade de os Estados Unidos bloquearem ou limitarem o uso do GPS, criando a necessidade de que a Europa tivesse seu próprio sistema de navegação via satélite.

Anos mais tarde o programa foi retomado e em 2011 foram lançados os primeiros satélites. Preve-se que o sistema esteja em pleno funcionamento em 2019, estando com

todos os satélites em órbita em 2020. São previstos 30 satélites (cerca de 27 operacionais e 3 reservas - o número não é preciso visto que o sistema ainda não se encontra completamente operacional). Seu princípio de funcionamento assemelha-se ao do GPS, com algumas funcionalidades extras.

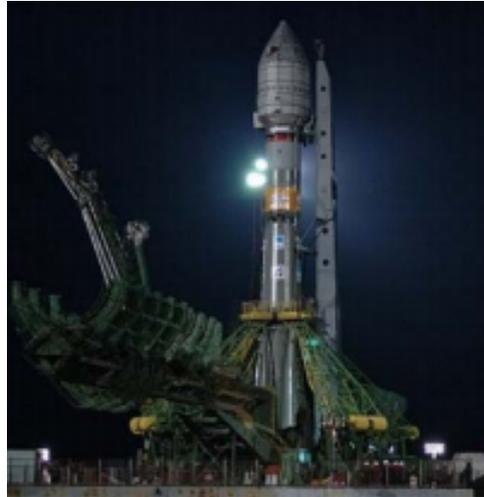


Figura 18 – Lançamento do satélite GIOVE-A em 2005

Os satélites distribuem-se em três órbitas com uma altitude de 23.222km, duração de 14h05min e inclinação de  $56^\circ$  em relação à linha do Equador. Tal geometria torna a cobertura mais efetiva.

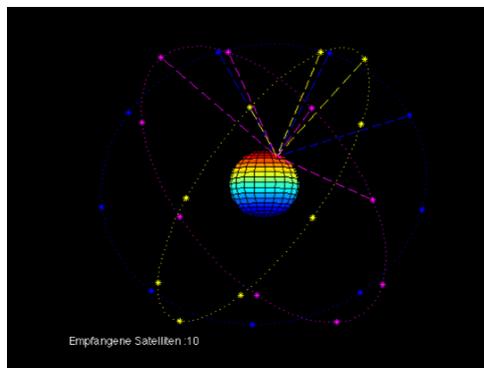


Figura 19 – Representação das órbitas dos satélites do Galileo

Uma vez que o projeto esteja finalizado e em operação, prevê-se que cada satélite envie até dez sinais em faixas de frequência de 1.164-1.215 GHz, 1.260-1.300 GHz e 1.559-1.592 GHz. Tais sinais serão responsáveis pelo fornecimento de várias informações, como por exemplo:

- Um sistema de navegação gratuito que será semelhante ao GPS e terá uma precisão de 1 metro;
- Um sistema de navegação codificado (que será pago) e terá uma precisão de 1cm;
- Uma navegação segura para serviços que não tenham tolerância para erros;
- Uma navegação governamental que será codificada e exclusiva para órgãos governamentais;

- Serviços de busca e salvamento;
- Troca de informação;

O projeto, conforme mencionado anteriormente, é financiado pela União Europeia, porém o responsável pelo seu gerenciamento é a Agência Espacial Europeia (ESA).



Figura 20 – Infraestrutura da operação em solo

## BeiDou

O BeiDou, também conhecido como COMPASS, é um sistema de navegação via satélite chinês ainda em processo de desenvolvimento. Os primeiros modelos do projeto (um total de quatro satélites) estão disponíveis desde 2003, com funcionalidades semelhantes às do GPS. Por serem geoestacionários, apenas três equações de espaço eram necessárias na determinação da posição do usuário. Este primeiro sistema recebia o nome de BeiDou 1 e foi descontinuado em 2012.

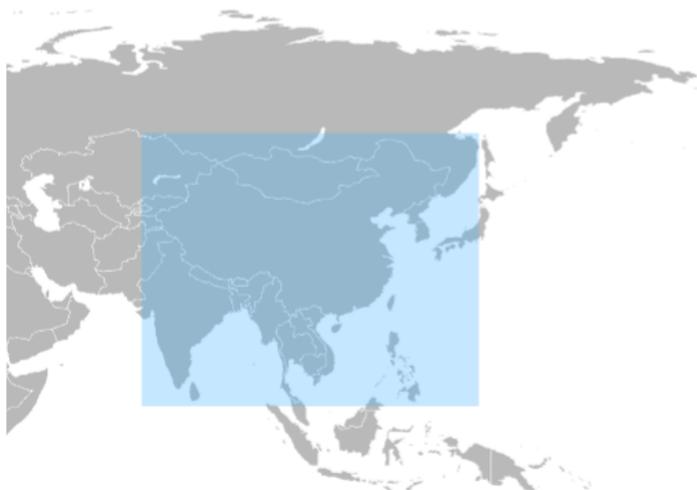


Figura 21 – Cobertura do sistema BeiDou 1

O sistema final com disponibilidade global (chamado de BeiDou 2 e posteriormente de COMPASS) tem previsão de lançamento para 2020 e contará com 35 satélites organizados da seguinte maneira:

- Cinco satélites geoestacionários;



Figura 22 – Cobertura do sistema em 2012

- Vinte e sete satélites em órbitas de média altitude;
- Três satélites em órbitas geossíncronas com inclinação de  $55^\circ$  em relação à linha do Equador.

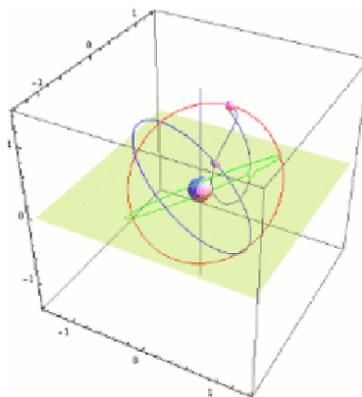


Figura 23 – Exemplo de órbita em média altitude

Quando finalizado, prevê-se para o sistema um funcionamento em duas frequências:

- Civil, de sinal aberto e precisão de 10 metros;
- Militar, de sinal codificado e precisão de 10cm.

Considerando-se os sistemas globais de navegação via satélite apresentados até então - GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou - podem ser realizadas comparações referentes às órbitas e quantidades de satélites enviados ao longos dos anos.

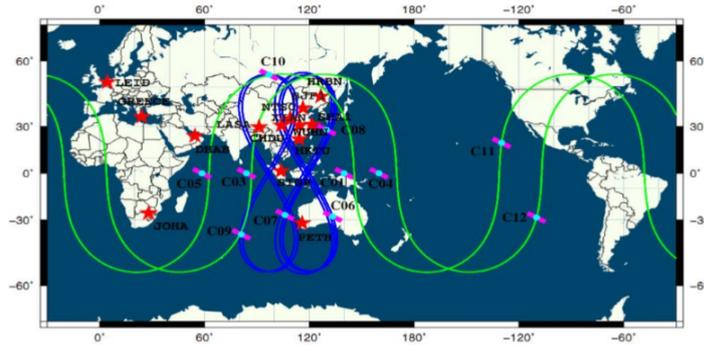


Figura 24 – Órbita dos satélites que já estão operacionais



Figura 25 – Comparação entre órbitas de satélites dos sistemas globais de navegação via satélite

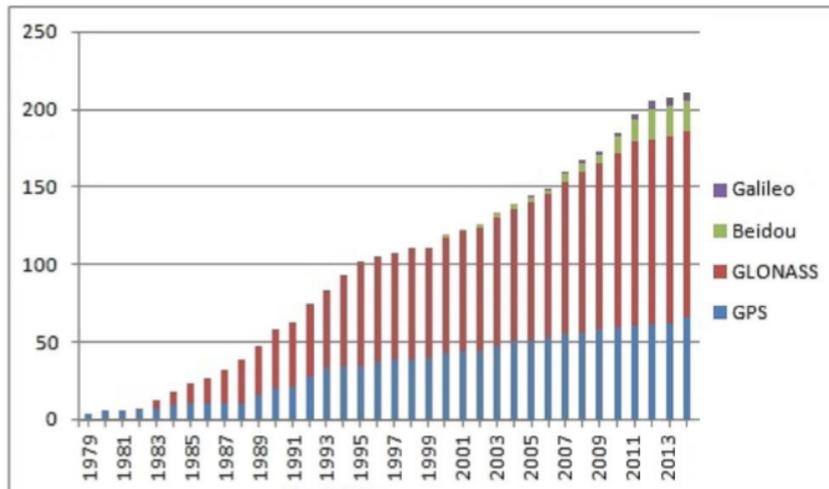


Figura 26 – Comparação entre a quantidade de satélites enviados ao longo dos anos por cada sistema global de navegação via satélite

## NAVIC

O NAVIC (Navigation with Indian Constellation) é um sistema regional de navegação via satélite indiano. Inicialmente chamado de IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System), teve seu primeiro satélite lançado em 2013 e atualmente conta com 7 satélites, dos quais 3 são geoestacionários e 4 encontram-se em órbitas elípticas.



Figura 27 – Órbitas dos satélites do NAVIC

Este sistema funciona de maneira análoga aos demais sistemas de navegação via satélite e, assim como o BeiDou, trabalha com duas frequências, a saber:

- Civil, de sinal aberto e precisão de 10 metros;
- Militar, de sinal codificado e precisão de 10cm.

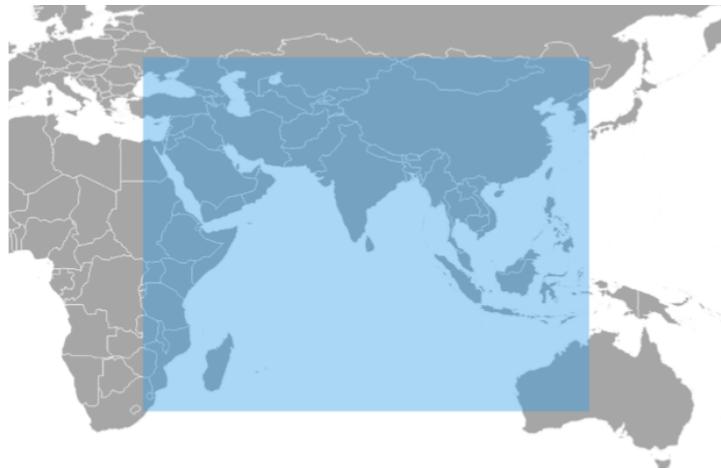


Figura 28 – Cobertura regional do NAVIC

## QZSS

O QZSS (Quase-Zenith Satellite System) é um sistema regional de navegação via satélite japonês. O sistema foi autorizado pelo governo japonês em 2002 e teve seu primeiro satélite lançado em 2010.

Inicialmente, o sistema era previsto para três satélites em órbita elíptica sobre a região do Japão e foi motivado pela necessidade, já que o relevo acidentado do Japão fazia com que muitas regiões do país não fossem adequadamente contempladas pelo GPS. Assim, o QZSS trabalha em conjunto com o GPS, tornando maior o número de satélites ao alcance do usuário.

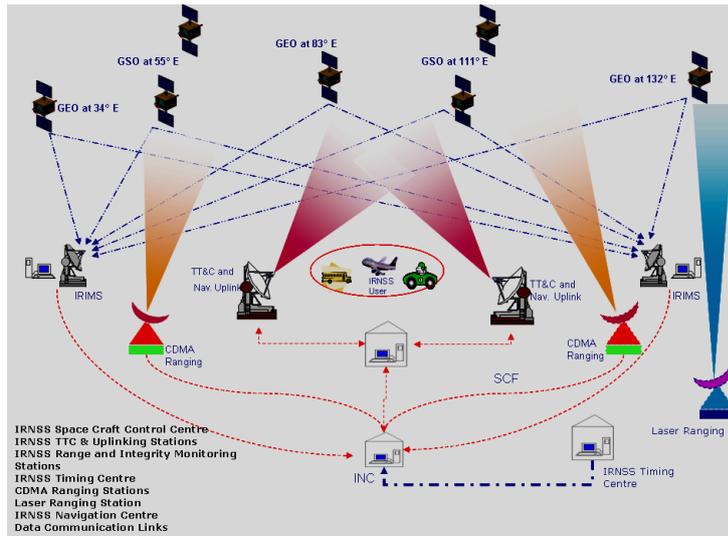


Figura 29 – Arquitetura do NAVIC



Figura 30 – Órbita dos satélites do QZSS

No ano de 2013 foi anunciado o aumento do sistema para quatro satélites, com previsão de funcionalidade completa para 2018. O QZSS trata-se de um sistema para uso civil e, quando finalizado, terá uma precisão entre 1cm e 1m.

## 1.8 Sistemas de Acréscimo

Os sistemas de acréscimo são sistemas cuja principal função é atuar em conjunto com os sistemas de navegação via satélite a fim de obter-se uma melhora na acurácia, integridade e disponibilidade de tais sistemas.

Atualmente, existem quatro sistemas de acréscimo em fase de operação ou implantação e um em fase de pesquisa. Suas regiões de atuação são mostradas na figura a seguir:

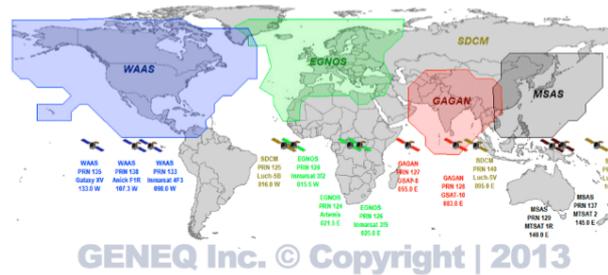


Figura 31 – Regiões de atuação dos sistemas de acréscimo

### WAAS

O WAAS (Wide Area Augmentations System) é um sistema de acréscimo cuja principal função é permitir que a aeronave possa contar com o GPS em todas as fases do voo, inclusive aproximações de precisão em aeroportos dentro de sua área de cobertura.

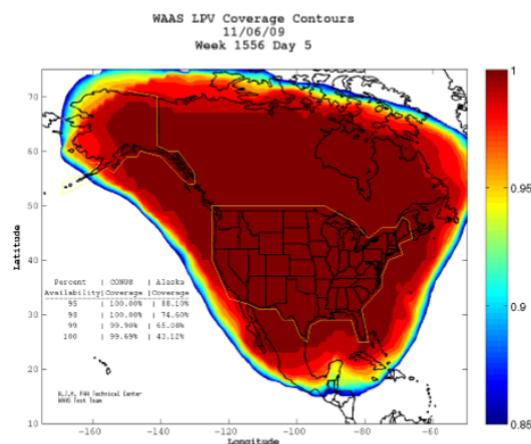


Figura 32 – Região de cobertura do WAAS

O sistema é composto por uma rede de estações em solo, satélites geoestacionários e receptores de GPS que suportem também os sinais de WAAS. Estas estações possuem coordenadas geográficas extremamente bem definidas e o funcionamento do sistema ocorre respeitando os seguintes passos:

- Os aparelhos receptores captam os sinais de GPS e calculam o erro ao qual a indicação daquele satélite está sujeita;
- Os erros calculados em cada estação para cada satélite são enviados à uma estação central;

- Os receptores captam o valor do erro de cada satélite em cada região e fazem o cálculo da posição aplicando a correção do erro;
- Tal processo repete-se continuamente a cada cinco segundos, aproximadamente.

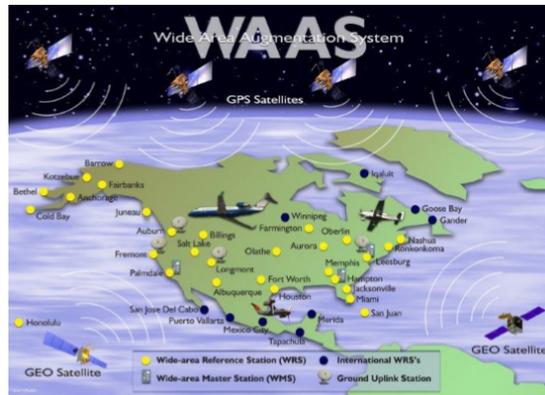


Figura 33 – Rede de estações em solo do WAAS

Esse sistema praticamente torna nulos os problemas de acurácia, integridade e disponibilidade do GPS. Em termos de acurária, o sistema tem um erro típico de 1m (lateral) e 1,5m (vertical), precisão suficiente para aproximações CAT I. No campo de integridade, o sistema possibilita que mensagens de falha sejam enviadas ao usuário em no máximo 6,2 segundos, tempo suficiente para a certificação do sistema. Já em termos de disponibilidade, os requisitos aeronáuticos obrigam o sistema a estar disponível 99 por cento do tempo e, visto que o sistema WASS mostra-se indisponível por, em média, 5 minutos por ano, tal requisito é facilmente cumprido.

Apesar de o sistema WAAs já ser operacional, ainda espera-se um tempo até que exista a confiabilidade no mesmo como ferramenta primária de navegação. Uma vez que essa confiança seja adquirida, o auxílio do WAAS permitirá que aeronaves naveguem e façam aproximações em rampas baseadas no sinal do GPS.

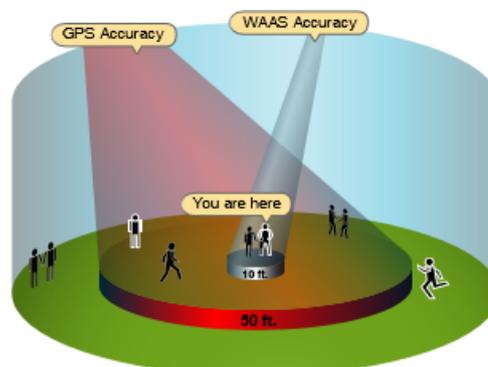


Figura 34 – Aumento de performance oferecido pelo WAAS

## EGNOS

O EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) ou Sistema Europeu Complementar Geoestacionário é um sistema complementar europeu criado para



O sistema encontra-se atualmente em fase de implementação, porém está operacional desde 2013, contando com três satélites geoestacionários e quinze estações em solo distribuídas pelo território indiano.

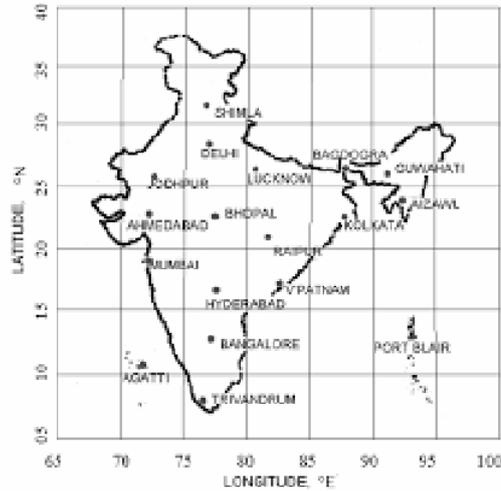


Figura 37 – Estações em solo do GAGAN

## MSAS

O MSAS (MTSAT Satellite Augmentation System) é um sistema de acréscimo japonês que conta com o auxílio de dois satélites geoestacionários enviados pela empresa MTSAT.

Seu funcionamento é análogo aos sistemas de acréscimo anteriormente citados e atualmente possui oito estações de solo, das quais seis encontram-se no Japão, uma na Austrália e uma no Hawaii.

## SDCM

O SDCM (System of Differential Correction and Monitoring) é um sistema de acréscimo russo cuja operação está ligada ao GLONASS, e não ao GPS.

O início de sua atuação experimental está previsto para 2018, quando terá vinte e três estações em solo, das quais dezenove encontrarão-se na Rússia, três na Antártida e uma em Brasília.

Seu funcionamento é análogo aos sistemas de acréscimo anteriormente citados.

## 1.9 Sistemas de Aumento Local de Precisão

Os sistemas de aumento local de precisão diferem dos sistemas de acréscimo por operarem de maneira local.

Como principais exemplos de sistemas de aumento local de precisão, podemos citar o DGPS e o LAAS.

## DGPS

O DGPS (Differential GPS) é um sistema de aumento local de precisão cuja base consiste em uma estação fixa temporária. Possui atuação local (um aeroporto, por exemplo) e pode ser considerado uma evolução do GPS, pois é responsável por uma melhoria significativa na precisão da localização.

O sistema funciona seguindo os passos listados abaixo:

- Em solo, é fixada uma antena de GPS em uma posição cujas coordenadas são bem definidas;
- Durante toda a operação, esta antena capta sinais enviados por satélites, realiza o cálculo do erro e o armazena ao longo do tempo em um arquivo;
- Finalizada a operação, o arquivo da posição da aeronave disponibilizado pelo GPS e o arquivo de erro disponibilizado pela antena são processados juntos, levando-se em consideração o erro da posição da aeronave;
- Ao final do pós-processamento, a trajetória da aeronave é determinada com uma precisão de 10cm.



Figura 38 – Exemplo de antena fixada ao solo

Uma limitação deste sistema consiste no fato de seu uso ser possível apenas em casos onde a necessidade dos dados é após o voo, e não durante, já que a correção não é feita em tempo real. No ramo aeronáutico, este serviço pode ser realizado apenas por companhias devidamente autorizadas, como a Z-12 ou a Omnistar.

## LAAS

O LAAS (Local Area Augmentation System) é um sistema em desenvolvimento no qual um aeroporto teria um sistema de DGPS e o sinal de erro fornecido por tal sistema seria enviado à uma estação central.

A estação central, por sua vez, poderia enviar via Data Link (sinal UHF) este erro para as aeronaves que estivessem em aproximação. Isto permitiria que os sistemas de navegação da aeronave fizessem as correções em tempo real, e não após o voo como é o caso do sistema DGPS funcionando isoladamente.

Neste caso, cada aeroporto deveria possuir seu próprio sistema.

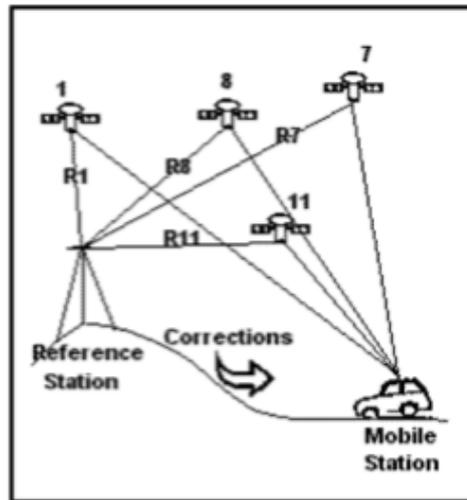


Figura 39 – Esquema de funcionamento do sistema DGPS

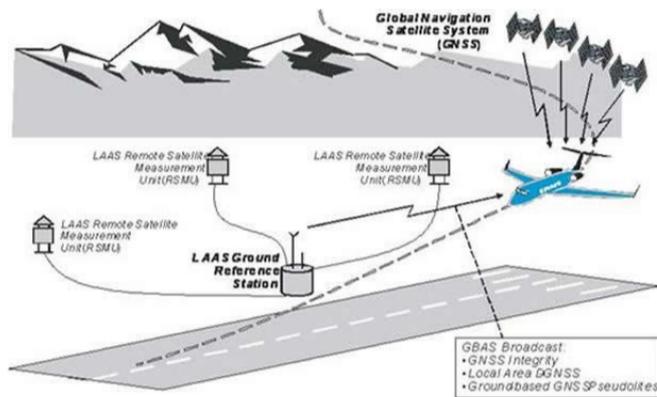


Figura 40 – Esquema de funcionamento do sistema LAAS

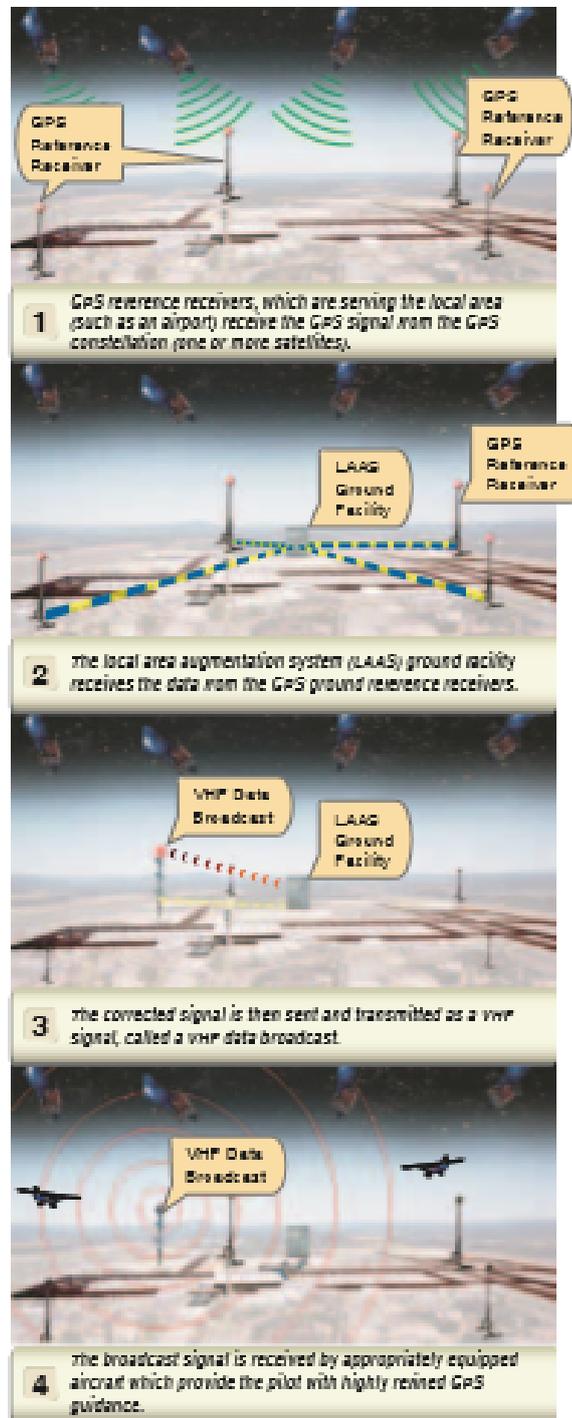


Figura 41 – Representação do passo a passo do LAAS



# Referências

1. *Advanced Avionics Handbook*. U.S. Department of Transportation - Federal Aviation Administration, 2009.
2. *Instrument Flying Handbook*. U.S. Department of Transportation - Federal Aviation Administration, 2012.
3. Oliveira, J.C. *Conceitos básicos sobre posicionamento por satélites artificiais*. INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2011.
4. Vaz, J. A. ; Pissardini, R. S. ; Fonseca Junior, E. S. *Comparação da cobertura e acurácia entre os sistemas GLONASS e GPS obtidas de uma estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo*. Revista Brasileira de Cartografia, 2013.
5. Nievinski, F. G. *Posicionamento por GPS para Geofísica*. Universidade de São Paulo, 2012.
6. *Satellite Navigation - GPS - Control Segment* . U.S. Department of Transportation - Federal Aviation Administration, 2014.
7. Moir, Ian, Allan Seabridge, and Malcolm Jukes. *Civil avionics systems*. John Wiley and Sons, 2013.
8. Moir, Ian, Allan G. Seabridge, and Malcolm Jukes. *Military avionics systems*. John Wiley and Sons, 2006.
9. Collin, R. E. *Tipos de Antenas*. McGraw-Hill, 1985.
10. Carvalho, J. L B. *Antennas and radiowave propagation*. IESB – Instituto de Educação Superior de Brasília, 2010.