



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro Alexandre Gomes da Silva Pereira

**Revisão da literatura aprofundada e atual
sobre o Sistema Global de Navegação por
Satélite (GNSS)**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia de Telecomunicações e
Informática

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor **António Fernando Macedo Ribeiro**

Professor Doutor **Agostinho Gil Teixeira Lopes**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro Alexandre Gomes da Silva Pereira

**Revisão da literatura aprofundada e atual
sobre o Sistema Global de Navegação por
Satélite (GNSS)**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia de Telecomunicações e
Informática

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor **António Fernando Macedo Ribeiro**

Professor Doutor **Agostinho Gil Teixeira Lopes**

DECLARAÇÃO

Nome: Pedro Alexandre Gomes da Silva Pereira

Título da dissertação: Levantamento bibliográfico científico exaustivo sobre GNSS

Orientador/a/es:

Professor Doutor António Fernando Macedo Ribeiro

Professor Doutor Agostinho Gil Teixeira Lopes

Ano de conclusão: 2023

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

[seleccionar uma das 3 opções e apagar as restantes]

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação representa o fim de um capítulo muito importante e um marco pessoal.

Como tal, gostaria de agradecer a todos que tornaram isso possível.

Primeiramente, quero agradecer ao Professor Doutor Agostinho Gil Teixeira Lopes e ao Professor Doutor António Fernando Macedo Ribeiro por todo o apoio e acompanhamento do trabalho realizado e pela disponibilidade que mostraram.

Obrigado à minha família e amigos por todo o apoio prestado, incentivos e palavras proferidas em momentos mais difíceis.

Gostaria de agradecer aos meus pais e à minha namorada por todo o apoio e força que me deram ao longo do meu percurso académico e em todos os outros momentos. Sem vocês nada seria possível.

Por último dedico esta dissertação aos meus avós e ao Rui que, tenho a certeza, me acompanharam sempre.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração da presente tese. Confirmando que em todo o trabalho conducente à sua elaboração não recorri à prática de plágio ou a qualquer forma de falsificação de resultados.

Universidade do Minho, 26 de Maio de 2023

Nome completo: Pedro Alexandre Gomes da Silva Pereira

Assinatura: _____

Assinado por: **PEDRO ALEXANDRE GOMES DA
SILVA PEREIRA**
Num. de Identificação: 14302279
Data: 2023.05.26 13:08:20+01'00'

RESUMO

A navegação por satélite deu o seu primeiro passo com o lançamento do primeiro satélite artificial Sputnik em 1957. Esse primeiro passo abriu uma porta importantíssima para muitas outras invenções e descobertas científicas e permitiu uma evolução tecnológica exponencial. Um sistema global de navegação por satélite refere-se a uma constelação de satélites que fornecem sinais do espaço. Estes sinais permitem o cálculo de dados de posicionamento e cronometragem para recetores *Global Navigation Satellite System*. Os recetores utilizam estes dados para determinar a localização. Por definição, o GNSS fornece uma cobertura global. Derivam-se destes sistemas diversas aplicações desde métodos de transporte, estações espaciais, aviação, transportes marítimos, ferroviários e rodoviários.

Esta dissertação tem como objetivo realizar um levantamento bibliográfico aprofundado e atual sobre GNSS afim de compilar, num único documento, informações sobre este tipo de sistemas para melhor compreensão destes.

Para tal, foi efetuado um estudo sobre as primeiras formas de navegação por satélite, seguido da demonstração das tecnologias dos principais sistemas GNSS atualmente e terminando com uma visão e previsão futura para estes e o impacto que têm e poderão vir a ter.

No fim desta dissertação, é esperado obter um repositório de informação organizada e pertinente sobre GNSS.

Palavras-chave: GNSS, satélite, telecomunicações

ABSTRACT

Satellite navigation took its first step with the launch of the first artificial satellite Sputnik in 1957. This first step opened a very important door for many other inventions and scientific discoveries and enabled an exponential technological evolution. A global navigation satellite system refers to a constellation of satellites that provide signals from space that transmit positioning and timing data to GNSS receivers. The receivers use this data to determine location. By definition, GNSS provides global coverage. A variety of applications are derived from these systems ranging from transportation methods, space stations, aviation, maritime, rail and road transportation.

This dissertation aims to carry out an exhaustive bibliographical survey about GNSS in order to compile, in a single document, information about this type of system for a better understanding of them.

To do this, a study will be done on the first forms of satellite navigation, followed by a demonstration of the technologies of the main GNSS systems today and ending with a vision and future forecast for these and the impact they have and may have.

At the end of this dissertation, the goal is to obtain a repository of organized and relevant information about GNSS.

Keywords: GNSS, satellites, telecommunications

ÍNDICE

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Lista de Figuras.....	xv
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xviii
1.1 Enquadramento e motivação.....	21
1.2 Objetivos.....	23
1.3 Estrutura da Dissertação.....	23
2. Revisão Bibliográfica.....	25
2.1 Fundamentação Teórica.....	25
2.1.1 Navegação por satélite.....	25
2.1.2 Pseudo-distância.....	32
2.1.3 Satélites.....	33
2.1.5 Segmento Espacial.....	35
2.1.6 Segmento de Controlo.....	36
2.1.7 Segmento de Utilizador.....	37
2.1.8 Sinais.....	39
2.1.9 Recetor GNSS.....	41
2.1.10 Efeito Doppler.....	42
2.1.11 Fontes de Erro.....	43
2.1.12 Mensagem de Navegação.....	48
2.2 Estado da Arte.....	49
3. Sistemas GNSS.....	55
3.1 Primeiras formas de geolocalização.....	55
3.2 GPS.....	59
3.2.1 Segmento espacial.....	62
3.2.2 Segmento de controlo.....	62
3.2.3 Segmento de utilizador.....	63

3.2.4	Sinal GPS	63
3.2.5	Mensagem de navegação GPS	65
3.3	GLONASS.....	66
3.3.1	Segmento Espacial	67
3.3.2	Segmento de controlo.....	68
3.3.3	Segmento de utilizador	69
3.3.4	Sinal GLONASS	69
3.3.5	Mensagem de Navegação GLONASS.....	70
3.4	Galileo	73
3.4.1	Segmento Espacial	74
3.4.2	Segmento de Controlo	74
3.4.3	Sinal Galileo	76
3.4.4	Mensagem de Navegação Galileo.....	78
3.5	BeiDou.....	79
3.5.1	Segmento Espacial	80
3.5.2	Segmento de Controlo	81
3.5.3	Sinais BeiDou	81
3.6	QZSS	83
3.6.1	Segmento Espacial	83
3.6.2	Segmento de Controlo	84
3.6.3	Segmento de utilizador	86
3.6.4	Sinal QZSS	86
3.7	IRNSS.....	87
3.7.1	Segmento Espacial	87
3.7.2	Segmento de controlo.....	88
3.7.3	Segmento de utilizador	89
3.7.4	Sinais IRNSS	89
4.	GNSS no futuro.....	92
4.1	Multi-GNSS.....	92

4.1.1	Serviço Baseado na Localização (LBS)	93
4.1.2	Estrada	94
4.1.3	Aviação	96
4.1.4	Caminhos de Ferro	97
4.1.5	Marítimo.....	98
4.1.6	Agricultura.....	99
4.1.7	Vigilância.....	101
5.	Conclusões.....	102
	Bibliografia	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenvolvimento de tecnologias relacionadas com navegação por satélite [121]	22
Figura 2 - Princípio da Trilateração [9]	26
Figura 3 - Efeito Multipath [11]	29
Figura 4 - Pseudo-distância [19].....	32
Figura 5 - Sistema GNSS [24]	35
Figura 6 - Localização das Estações de Monitorização dos principais sistemas GNSS [30]	37
Figura 7 - Segmento de Controlo GNSS (adaptada de [35]).....	38
Figura 8 - Efeito Doppler [124].....	42
Figura 9 - Efeito Sagnac [124]	44
Figura 10 - Disponibilidade de satélites num cenário normal - [44]	46
Figura 11 - Disponibilidade de satélites quando é introduzido jamming [44].....	47
Figura 12 - Diluição de precisão [48]	48
Figura 13 - Mensagem navegação GPS [50].....	49
Figura 14 - Principais sistemas GNSS [125].....	50
Figura 15 - Precisão dos sistemas iniciais de navegação por satélite [3]	51
Figura 16 - Pólos Norte e Sul celestiais	55
Figura 17 - Sextante	56
Figura 18 - Cronómetro desenvolvido por John Harrison [126]	57
Figura 19 - Método de navegação e localização Dead Reckoning [124]	58
Figura 20 - Satélite GPS.....	59
Figura 21 - Melhoria da precisão do posicionamento após a desativação do Acesso Seletivo (SA) em 2 de maio de 2000 [127]	60
Figura 22 - Código P [128]	64
Figura 23 - Código C/A [128]	64
Figura 24 - Modulação em Fase da Informação transportada nas ondas portadoras.....	65
Figura 25 - Exemplo de Modulação em Fase da Informação transportada nas ondas portadoras	65
Figura 26 - Segmento de Controlo GLONASS [74]	68
Figura 27 - Satélite Galileo [131].....	74

Figura 28 - Segmento de controlo Galileo [132].....	76
Figura 29 - Bandas de frequência Galileo [133].....	76
Figura 30 - Cobertura do sistema BeiDou.....	80
Figura 31 - Órbita dos satélites QZSS [135].....	84
Figura 32 - Segmento de Controlo QZSS [135].....	85
Figura 33 - Segmento Espacial IRNSS [137].....	88
Figura 34 - Sinais GNSS [116]	91
Figura 35 - Percentagem e número de dispositivos GNSS vendidos desde 2013 [121].....	94
Figura 36 - Aumento das expedições e conseqüente utilização de dispositivos GNSS no mercado mundial [121].....	95
Figura 37 - Evolução prevista até ao ano de 2025 relativamente à contribuição de dispositivos GNSS na área da aviação [121].....	97
Figura 38 - Evolução relativamente às vendas de dispositivos GNSS aplicados na área ferroviária [121]	98
Figura 39 - Evolução das receitas relativamente a dispositivos GNSS na área naval [121]	99
Figura 40 - Evolução e fonte de rendimento de dispositivos GNSS na área da agricultura [121].....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percentagem de utilização de componentes GNSS nas principais áreas de aplicação GNSS [121].....	23
Tabela 2 - Tipos de satélites GNSS.....	34
Tabela 3 - Sinais GNSS.....	40
Tabela 4 - Erros em sistemas de navegação [9]	52
Tabela 5 - Diferenças entre sistemas GPS e GLONASS [51].....	53
Tabela 6 - Características da mensagem de navegação GPS (adaptado de [69])	66
Tabela 7 - Sinais GLONASS [129]	70
Tabela 8 - Mensagem de navegação GLONASS [130].....	72
Tabela 9 - Sinais e modulações Galileo [129]	77
Tabela 10 - Dados de navegação Galileo [129].....	78
Tabela 11 - Sinais e características BeiDou [134].....	82
Tabela 12 - Banda de frequências dos sinais QZSS [136].....	87
Tabela 13 - Comparação sistemas GNSS	91

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
LEO	Low Earth Orbit
MEO	Middle Earth Orbit
GEO	Geostationary orbit
BPSK	Binary Phase Shift Keying
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
LOS	Line of Sight
IGS	International GNSS Service
DGNSS	Differential GNSS
LAGNSS	Local Area GNSS
WAGNSS	Wide Area GNSS
PVT	Position, Velocity and Time
IoT	Internet of Things
PRN	Pseudo Random Noise
ECEF	Earth Centered Earth Fixed
SA	Selective Availability
DOP	Dilution Of Precision
DGPS	Differential GPS
SAR	Synthetic Aperture Radar
RDF	Radio Direction Finding
DOA	Direction Of Arrival
CDMA	Code Division Multiple Access
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FOC	Full Operational Capability
BOC	Binary Offset Carrier
MBOC	Multiplexed Binary Offset Carrier

CSK Code Shift Keying
LBS Location Based Services

Introdução

Neste capítulo são apresentados o enquadramento e as motivações associados à revisão aprofundada da literatura sobre o Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS). De seguida, são mencionados os principais objetivos traçados e, por último, é feita uma descrição da estrutura de todos os capítulos presentes nesta dissertação.

1.1 Enquadramento e motivação

Atualmente, os telefones modernos são inúmeras vezes mais poderosos do que os primeiros computadores [1]. Com o advento deste tipo de dispositivos, quando apareceram os primeiros telemóveis e muitos outros aparelhos, estes desbloquearam novas aplicações e meios de utilização destes recursos. Os aparelhos de bolso não estão agora reduzidos apenas a computadores do tamanho de uma palma da mão, mas sim ferramentas que permitem ao utilizador, com um dedo, controlar áreas inteiras da sua vida: comunicação, entretenimento, viagens, procura de informação entre muitas outras coisas. Agora que quase todos têm um recetor GPS (Global Positioning System) no bolso, muitos serviços têm a oportunidade de melhorar as nossas vidas.

Sistemas de navegação por satélite são sistemas que estabelecem o posicionamento geo-espacial autónomo através do uso de satélites artificiais. Estes sistemas permitem que recetores sobre a superfície terrestre possam determinar uma localização em comparação com os sinais dos satélites, adquirindo a posição com recurso a um sistema de referência espacial conveniente. A precisão da localização será dada conforme o tipo de técnica de posicionamento utilizada. Quando um sistema de navegação por satélite possui a capacidade de oferecer posicionamento em qualquer ponto da superfície terrestre, adota-se a nomenclatura de Sistema Global de Navegação por Satélite (Global Navigation Satellite System - GNSS). Devido à importância deste tipo de satélites, o dia a dia do ser humano e ações do quotidiano apresentam um aumento de qualidade comparando com tempos em que esta tecnologia não existia ou era só utilizada para fins militares. Por esse motivo, vai ser efetuada uma revisão bibliográfica sobre este tema.

Devido ao crescente desenvolvimento de tecnologias relacionadas com navegação por satélite (Figura 1) e ao impacto destas no quotidiano, torna-se fundamental a compreensão destas, não só para efeitos de cultura geral, mas também para melhor compreender o que nos rodeia e de que forma somos afetados pela existência destes sistemas.

Por causa da importância e desenvolvimento dos sistemas GNSS nos últimos anos (Figura 1) surge a necessidade de melhor compreender estes sistemas para ser possível, de certo modo, prever o seu desenvolvimento e as suas aplicações futuras. Por ser uma tecnologia relativamente recente, estes sistemas passam despercebidos à população geral e as suas aplicações e atualizações futuras não representam um tópico recorrente de conversa, apesar da contribuição relevante que estes sistemas de navegação por satélite têm no mundo atual.

Esta dissertação tem como objetivo apresentar uma compilação aprofundada de informações sobre sistemas GNSS para melhor dar a conhecer estes sistemas e a sua contribuição. Para além disso, também irá ser dado um papel relevante às evoluções futuras destes sistemas e o que poderá surgir nos próximos anos no que toca a GNSS.

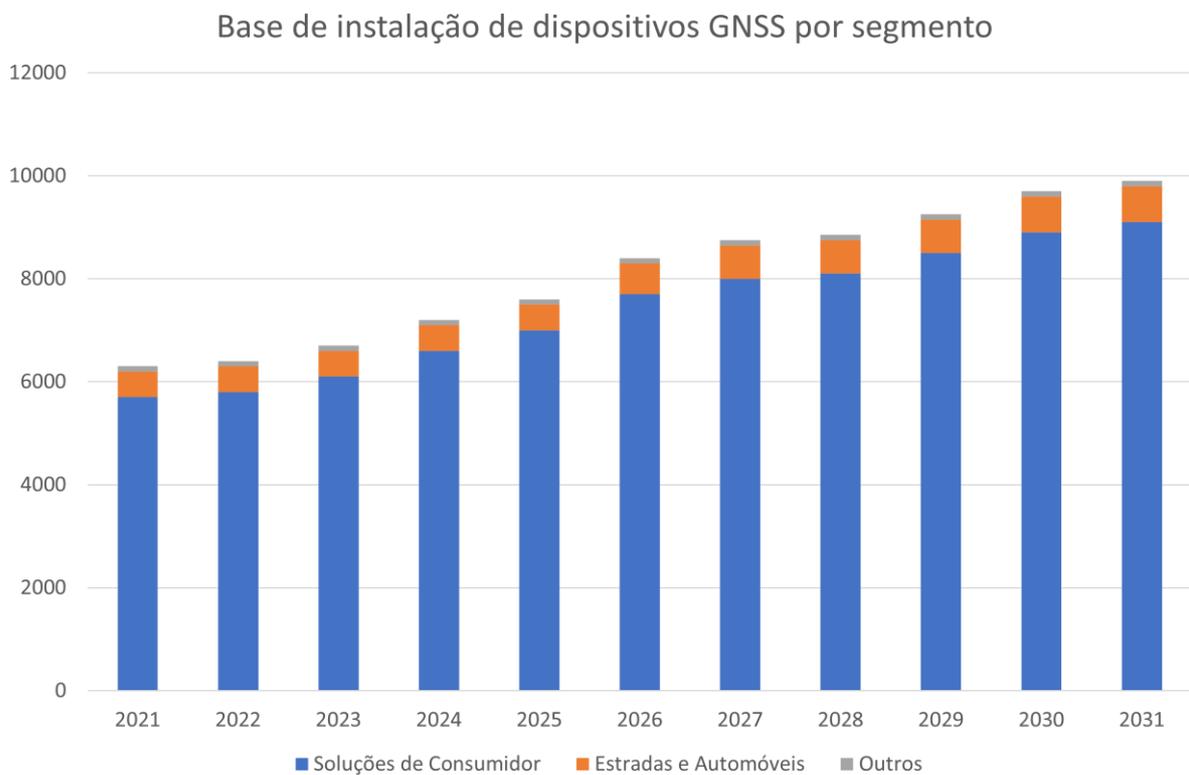


Figura 1 - Desenvolvimento de tecnologias relacionadas com navegação por satélite [121]

Como demonstrado na Tabela 1 através da percentagem de utilização de componentes GNSS nas principais áreas de aplicação GNSS, esta tecnologia apresenta um papel relevante no quotidiano em diversas áreas de aplicação. As soluções atuais para sistemas de navegação por satélite ocupam um papel fundamental a todos os níveis e têm aplicações em quase todas as áreas.

Assim, o objetivo desta dissertação passa por dar a conhecer estas tecnologias e estes sistemas e provar que, embora estes sejam fundamentais para todos, não significa que não possam ser melhorados.

Tabela 1 - Percentagem de utilização de componentes GNSS nas principais áreas de aplicação GNSS [121]

Percentagem de mercado por área de aplicação em componentes e recetores GNSS em 2019			
Área	Europa	América do Norte	Rússia + Ásia
Soluções Consumidor	7%	45%	47%
Estrada e Automóveis	53%	25%	22%
Aviação	17%	81%	2%
Carris	14%	15%	71%
Marítima	47%	27%	26%
Espacial	65%	19%	17%
Agricultura	20%	47%	33%
Geomática	35%	31%	33%
Emergência	33%	39%	13%
Drones	10%	42%	48%
Infraestruturas Críticas	36%	50%	12%

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é realizar uma revisão bibliográfica aprofundada sobre a área de GNSS. Primeiramente, irão ser expostos os conceitos fundamentais necessários para a compreensão deste tema e depois irá ser feito um levantamento de informação sobre esta tecnologia no passado, analisando as soluções predecessoras do GNSS e onde tecnologicamente tudo começou (primeiras formas de geo-localização).

Seguidamente, vão ser expostas em detalhe as soluções atuais relativamente a estas tecnologias e os seus métodos de funcionamento.

Finalmente, irão ser analisadas e discutidas as propostas que englobam o futuro desta tecnologia e alguns exemplos de possíveis aplicações.

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente documento encontra-se dividido em 6 capítulos, sendo eles apresentados pela ordem em que se encontram. O capítulo um desta dissertação é constituído por material introdutório. Este enquadra o tema ao leitor expondo a motivação e os objetivos que se pretendem alcançar.

O Capítulo 2 expõe os fundamentos teóricos que sustentam esta dissertação, assim como uma visão geral do estado da arte, onde se encontram resumidos alguns estudos pertinentes à compreensão deste presente.

O capítulo 3 representa o corpo da dissertação. Nele são apresentados em pormenor os principais quatro sistemas GNSS e dois sistemas regionais em desenvolvimento, desde a sua criação ao seu estado atual, bem como um segmento de comparação dos principais sistemas anteriormente mencionados, em que serão expostos e comparados conceitos tais como número de satélites de cada constelação, métodos de acesso utilizados, área de cobertura abrangida, sinais de cada sistema e as suas características e outros aspetos.

O capítulo 4 será relativo ao futuro do GNSS e algumas soluções apresentadas na literatura para as principais áreas de utilização de tecnologias GNSS.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões retiradas desta dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O seguinte capítulo encontra-se dividido em 2 subcapítulos. No primeiro, fundamentação teórica, são apresentados os conceitos relevantes no contexto da dissertação. No segundo, o estado da arte, são apresentados os principais trabalhos relacionados com o tema da dissertação a estudar, aprofundando o que foi desenvolvido por estes, e como se tornam uma referência para o presente.

2.1 Fundamentação Teórica

Neste capítulo, irão ser fundamentados e expostos todos os conceitos teóricos necessários para a melhor compreensão do funcionamento de um sistema GNSS bem como de toda a informação presente nesta dissertação.

2.1.1 Navegação por satélite

A navegação por satélite recorre a um sistema GNSS para determinar:

- Posição;
- Tempo;
- Velocidade e direção com que se obtém os valores anteriores;

A determinação das variáveis posição, tempo e velocidade é possível devido a um conjunto de conceitos fundamentais [2], sendo estes:

- Trilateração: O princípio de determinar a posição de um recetor através da medição do atraso temporal dos sinais de múltiplos satélites.
- Mecânica da órbita: O estudo do movimento dos satélites em órbita, incluindo as leis de Kepler, perturbações orbitais, e a dinâmica da atitude dos satélites.
- Estrutura dos sinais: A conceção dos sinais GNSS, incluindo modulação, códigos de correção de erros, e códigos de alcance.
- *Multipath*: O efeito dos sinais refletidos nas medições dos recetores GNSS, incluindo as técnicas de mitigação.
- Filtro de Kalman: O método matemático para combinar medições de múltiplas fontes para estimar um estado, tal como a posição e velocidade de um recetor.

- GNSS diferencial: A técnica de utilizar estações de referência adicionais para melhorar a precisão das medições GNSS, eliminando erros comuns tanto ao receptor como à estação de referência.
- Constelações GNSS: A concepção, implantação e gestão de constelações de satélites GNSS, incluindo a arquitetura do sistema, componentes de satélite e segmento terrestre, e algoritmos de navegação por satélite.

Trilateração

O conceito de determinação da posição num sistema GNSS assenta-se na trilateração. A trilateração determina a localização de pontos através das distâncias medidas usando triângulos, círculos ou esferas tendo aplicações práticas em topografia e navegação [3]. No campo da geometria bidimensional, se um ponto se encontra em dois círculos, o círculo centra-se e os dois raios fornecem dois locais possíveis desse ponto. Se um ponto se encontra nas superfícies de três círculos, os centros e os raios dos círculos fornecem uma localização única do ponto, como mostrado na Figura 2. Esta apresenta três pontos localizados no meio de cada circunferência, P1, P2, e P3, as suas coordenadas x,y e os raios de três esferas, r1, r2, e r3. As intersecções das superfícies do círculo indicam a localização do ponto.

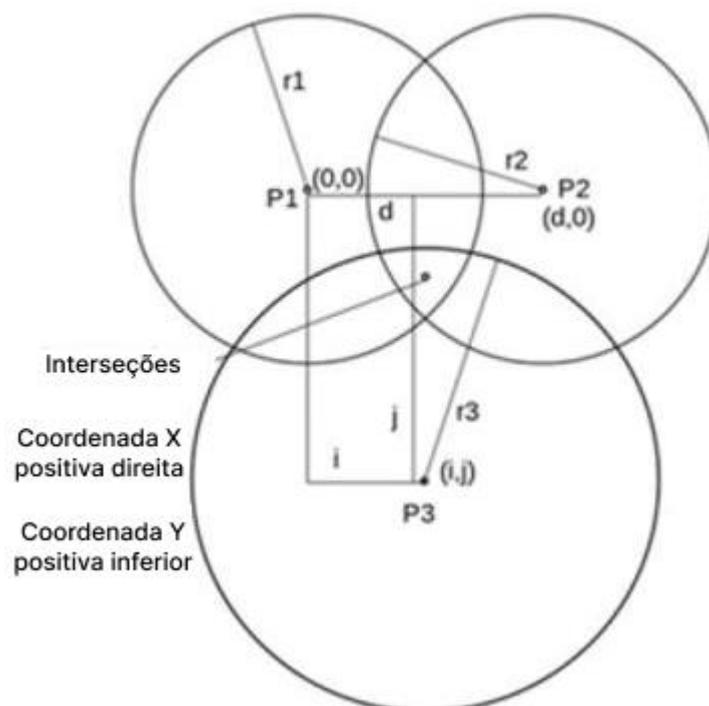


Figura 2 - Princípio da Trilateração [9]

Mecânica de órbita

Os satélites podem ser colocados em diversos tipos de órbitas, sendo estas órbitas LEO, MEO, GEO ou elípticas. A sua altitude, área de cobertura e propriedades orbitais diferem dependendo do tipo de órbita [4].

O tipo de órbita LEO (*Low Earth Orbit*) é localizada a uma altitude de aproximadamente 160 a 2.000 quilômetros. Os satélites em órbita LEO têm um período orbital de cerca de 90 minutos e são utilizados para uma variedade de aplicações tais como observação da Terra, comunicação e investigação científica [5]. Oferecem uma cobertura global e têm uma latência mais curta do que as órbitas MEO e GEO.

A órbita MEO (*Middle Earth Orbit*) refere-se a objetos que orbitam o planeta entre 2.000 e 36.000 quilômetros acima da superfície. Estes são utilizados para sistemas de navegação como GPS, GLONASS, e Galileo, têm uma duração orbital de cerca de 12 horas. São mais precisos do que os satélites em órbita LEO e proporcionam uma forte cobertura para latitudes médias.

As órbitas GEO (*Geostationary Earth Orbit*) encontram-se a uma altitude de aproximadamente 36.000 quilômetros. Os satélites GEO têm um período orbital de 24 horas e permanecem fixos em relação a um ponto da superfície terrestre. São utilizados principalmente para serviços de comunicação e difusão, tais como televisão e rádio e oferecem uma vasta área de cobertura. No entanto, têm uma latência mais longa e uma precisão inferior à dos satélites nas órbitas MEO e LEO [6].

As órbitas elípticas são outro tipo de órbita que pode ser utilizada por satélites. Neste tipo de órbita, o satélite percorre a Terra numa trajetória de formato oval, sendo este tipo de órbita útil, por exemplo, para os satélites de comunicação que cobrem uma região específica da Terra. Devido ao formato elíptico da órbita percorrida, estes passam mais tempo sobre essa região do que passariam numa órbita circular.

A principal desvantagem das órbitas elípticas é que podem ser mais difíceis de manter do que as órbitas circulares devido à distância entre o satélite e a Terra variar.

A mecânica orbital é um ramo da mecânica celeste que trata do movimento de objetos no espaço, incluindo satélites em órbita à volta da Terra. Na navegação por satélite, a mecânica da órbita desempenha um papel crítico na determinação da posição e comportamento dos satélites, bem como a precisão dos sinais. A órbita de um satélite é influenciada por vários fatores, incluindo a gravidade, arrasto atmosférico, pressão da radiação solar, perturbações no corpo, efeitos da maré na Terra e relatividade geral, além de manobras propulsivas do satélite [7].

O objetivo da determinação da órbita é obter uma órbita precisa que tenha em consideração o ambiente dinâmico em que o movimento ocorre, incluindo todas as forças relevantes que afetam o movimento do satélite. Através deste processo, uma órbita preliminar é estimada utilizando um número mínimo de

observações. Esta estimativa fornece as condições iniciais para a integração numérica das equações diferenciais não lineares do movimento, a fim de obter uma órbita de referência. Um procedimento de correção diferencial é então utilizado para corrigir iterativamente a órbita de referência e refinar a solução final da órbita [7]

Estruturas dos Sinais

A navegação por satélite apresenta dois métodos, sendo estes classificados em passivos e ativos, bem como em sentido único (uplink - terra para o espaço; downlink - espaço para a terra)[8]. Os sistemas ativos exigem que o utilizador emita sinais. Os satélites emitem sinais modulados que incluem o tempo de transmissão para derivar as distâncias, bem como os parâmetros de modelação para calcular as posições dos satélites.

A estrutura dos sinais na navegação por satélite refere-se ao formato e organização dos sinais transmitidos pelos satélites dos sistemas GNSS. A estrutura do sinal é concebida para fornecer informação de posicionamento, velocidade e cronometragem aos recetores GNSS, assegurando simultaneamente que os sinais possam ser recebidos e processados com precisão pelos recetores.

A estrutura do sinal dos satélites GNSS consiste numa série de pseudocódigos, mensagens de navegação e técnicas de modulação que são utilizadas para codificar e transmitir a informação de navegação.

Os pseudocódigos aleatórios são um código pseudoaleatório único atribuído a cada satélite e utilizado para identificar a fonte do sinal. O recetor utiliza o código para determinar o alcance (distância) até ao satélite.

A mensagem de navegação contém os dados da efeméride do satélite, correções do relógio e outras informações necessárias para os cálculos de posicionamento [9]. Abaixo estão representadas quatro equações que permitem determinar a localização do(s) recetor(es), em que as incógnitas R , o conjunto de variáveis P , Q e S e D são, respetivamente, a distância do recetor ao(s) satélite(s), as coordenadas do(s) satélite(s) e a diferença do tempo do relógio do satélite e do recetor multiplicado pela constante de velocidade da luz.

$$R_1^2 = (P - P_1) + (Q - Q_1) + (S - S_1) + D^2 \quad (1)$$

$$R_2^2 = (P - P_2) + (Q - Q_2) + (S - S_2) + D^2 \quad (2)$$

$$R_3^2 = (P - P_3) + (Q - Q_3) + (S - S_3) + D^2 \quad (3)$$

$$R_4^2 = (P - P_4) + (Q - Q_4) + (S - S_4) + D^2 \quad (4)$$

Os sinais são modulados para criar uma onda portadora que pode ser transmitida através da atmosfera e recebida pelo recetor GNSS. A técnica de modulação utilizada depende do sistema GNSS específico, mas as técnicas comuns incluem BPSK e QPSK.

Multipath

O *multipath* é um problema comum na navegação por satélite que ocorre quando um sinal de navegação é refletido por estruturas no solo ou na atmosfera antes de chegar ao recetor. A reflexão ou difração do sinal devido a diferentes efeitos eletromagnéticos resulta no sinal tomar múltiplos caminhos para alcançar o recetor (Figura 3), fazendo com que este chegue com um certo atraso, fase e diferença de amplitude em relação à componente LOS (*Line of Sight*) o que pode causar erros significativos na solução de navegação [10].

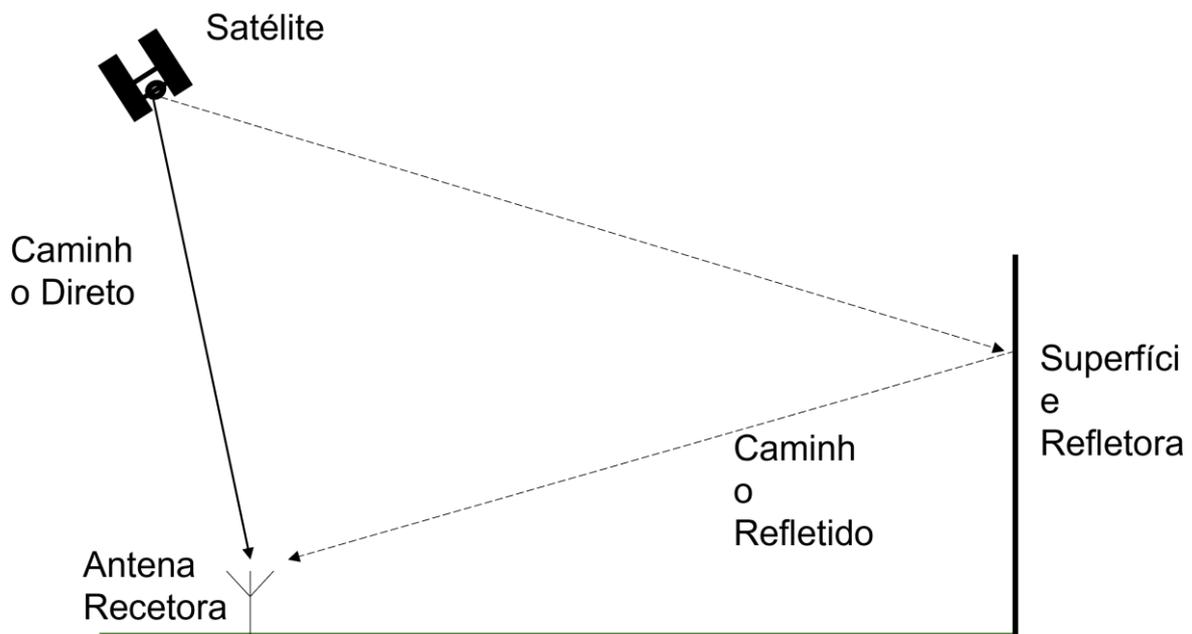


Figura 3 - Efeito Multipath [11]

Na Figura 3, o recetor irá receber ambos os sinais. O caminho do sinal refletido depende da superfície refletora e da posição do satélite. Como o satélite se move com o tempo, o efeito *multipath* é também uma variável do tempo. Para determinar a posição, os recetores fazem medições da pseudodistância utilizando códigos transmitidos pelos satélites [11].

Filtro de Kalman

A filtragem de Kalman é uma técnica matemática que é normalmente utilizada na navegação por satélite para melhorar a precisão da solução de navegação. É um tipo de algoritmo de estimativa recursiva que utiliza uma combinação de medições e modelos matemáticos para estimar o estado de um sistema ao longo do tempo [12]. Este método de filtragem combina o output de, por exemplo, um recetor GNSS para estimar a posição, velocidade, aceleração, altitude, entre outros, mesmo que estas variáveis apresentem erros.

O filtro de Kalman apresenta dois tipos de variáveis [12]:

- *Estimated State Vector* – esta variável inclui as variáveis de interesse, ou seja, o que se pretende determinar (posição, velocidade, etc), as variáveis de perturbação, ou seja, variáveis sem valor intrínseco aparente, mas necessárias para o processo de estimação (por exemplo a Disponibilidade Seletiva do GPS) e as variáveis de estado do filtro de Kalman;
- *Covariance Matrix* - é utilizada para representar a incerteza ou erro associado à estimativa do estado do sistema. É uma matriz quadrada que contém as variâncias e covariâncias das variáveis de estado e fornece informação sobre a magnitude relativa e correlação dos erros na estimativa do estado.

Com o recurso a estas variáveis, o filtro de Kalman faz iterações de previsão, onde o estado do recetor é estimado com base no seu estado atual e um modelo do seu movimento. Esta iteração é sucedida por um passo de correlação onde a estimativa é refinada através dos dados medidos. Todo este processo é repetido iterativamente ao longo do tempo de forma a produzir uma estimativa do estado atual do recetor cada vez mais precisa [13].

Desta forma, vários erros tais como imprecisões de relógio, atrasos do sinal na atmosfera e efeitos do *multipath* são mitigados, contribuindo para uma solução de navegação mais fiável.

GNSS diferencial

O GNSS diferencial (DGNSS) é um método para melhorar a precisão das soluções de navegação por satélite, utilizando uma estação de referência para além do recetor GNSS. A estação de referência mede os sinais GNSS e calcula a informação de correção com base nas diferenças entre as suas medições e os sinais esperados. Esta informação de correção é então transmitida ao recetor GNSS, que a utiliza para melhorar a precisão da sua solução de navegação [12].

Na DGNSS, um recetor GNSS, chamado estação de referência, é utilizado para fazer medições de posição altamente precisas. As medições da estação de referência são então transmitidas para os outros recetores GNSS da rede (estações de roving). As estações de roving utilizam as medições da estação da referência para corrigir as suas próprias soluções GNSS e para calcular soluções de posição mais precisas [14].

Existem vários tipos de DGNSS, tais como o Local-Area Differential GNSS (LAGNSS) e o Wide-Area Differential GNSS (WAGNSS). O LAGNSS é caracterizado por receber dados atuais de pseudodistância e, possivelmente, correções de fase da onda portadora de um recetor localizado na linha de visão do satélite, enquanto que o WAGNSS caracteriza-se pelo recetor receber correções de uma rede de estações distribuídas numa área alargada.

Constelações GNSS

As constelações GNSS são constelações de satélites que orbitam a Terra e transmitem sinais que podem ser utilizados para navegação, posicionamento e cronometragem [15]. Existem várias constelações GNSS em funcionamento, incluindo o Sistema de Posicionamento Global (GPS) operado pelos Estados Unidos, o sistema GLONASS operado pela Rússia, o sistema Galileo operado pela União Europeia e o sistema BeiDou operado pela China.

Cada constelação GNSS é concebida para fornecer uma cobertura global, com um número suficiente de satélites em órbita para fornecer sinais contínuos aos utilizadores em terra. Os satélites de uma constelação GNSS são colocados em órbitas específicas, tais como circulares ou elípticas, para assegurar uma cobertura ótima e disponibilidade de sinais. Os sinais transmitidos pelos satélites são concebidos para permitir aos recetores GNSS no solo determinar as suas posições, velocidades, e tempos com elevada precisão.

O Serviço GNSS Internacional (IGS) é uma organização global que fornece apoio e liderança para a utilização de Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS), tais como GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou [16]. O IGS foi criado em 1996 e é um esforço de cooperação entre mais de 100 organizações de mais de 50 países. Os objetivos principais da IGS são fornecer dados, produtos e serviços GNSS de alta qualidade para apoiar várias aplicações, tais como posicionamento geodésico, investigação científica, e navegação, promover o desenvolvimento e utilização de tecnologia e aplicações GNSS, estabelecer e manter uma rede global de estações de localização GNSS para monitorizar sinais GNSS e para produzir produtos GNSS precisos e fiáveis e colaborar com outras organizações internacionais, tais como a

Associação Internacional de Geodesia e o Serviço Internacional de Sistemas de Rotação e Referência da Terra, para coordenar e normalizar as atividades e produtos GNSS [17].

2.1.2 Pseudo-distância

A distância entre emissor e recetor é calculada multiplicando o intervalo de tempo de percurso do sinal pela constante velocidade da luz no vácuo ($c=300.000 \text{ km/s}$). Porém, este valor de distância só seria real se os relógios do emissor e do recetor estiverem sincronizados. No caso dos relógios do emissor e do recetor não estão sincronizados o intervalo de tempo medido não será o intervalo de tempo exato e, por isso, não corresponde à distância real (geométrica).

Devido ao facto de ser perturbada por diferentes tipos de erros, a distância calculada não é tratada como real, mas sim como pseudo-distância (Figura 4).

A resolução do problema da dessincronização dos relógios passa por equipar o recetor com um relógio mais preciso (solução mais dispendiosa) de modo a evitar atrasos de recessão do sinal ou utilizar um segundo emissor sincronizado com o primeiro. Esta solução consiste em o recetor registar o instante de chegada dos sinais emitidos pelos respetivos emissores, calculando assim os intervalos de tempo do percurso realizado pelos sinais. Tendo em conta o erro do relógio do recetor, são calculadas as pseudo-distâncias para cada emissor e através da subtração das pseudo-distâncias obtém-se a distância real [18]

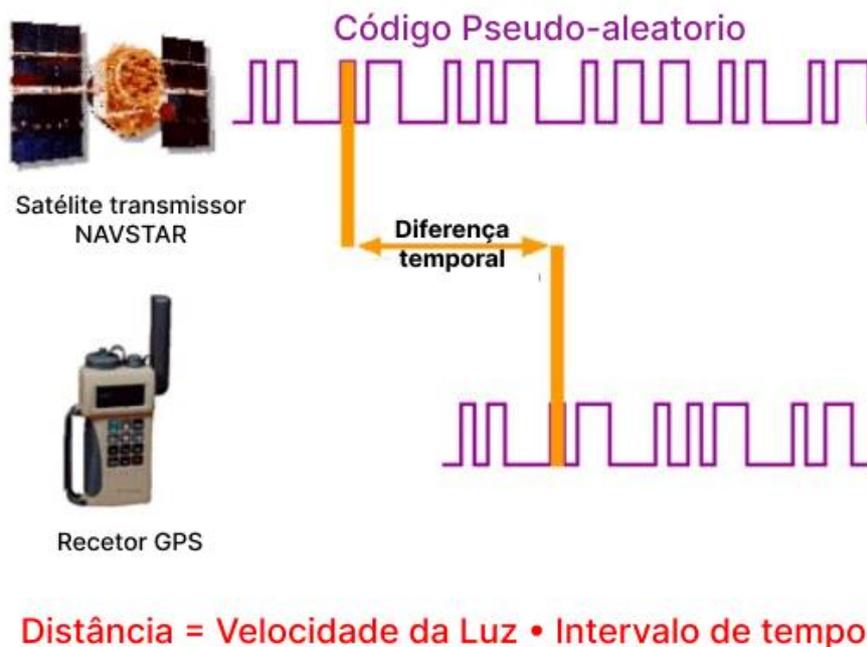


Figura 4 - Pseudo-distância [19]

2.1.3 Satélites

Os satélites GNSS são uma componente essencial da infraestrutura GNSS que permite aos utilizadores determinar a sua posição, velocidade e tempo (PVT – Position, Velocity and Time). Estes satélites transmitem sinais que transportam dados de navegação e informação precisa de tempo que podem ser processados pelos recetores para calcular a solução PVT. Os satélites GNSS são posicionados em órbitas terrestres médias (MEO) a uma altitude de aproximadamente 20.000 km acima da superfície terrestre [20].

Há várias constelações de satélites GNSS que fornecem cobertura global, incluindo o Sistema de Posicionamento Global dos Estados Unidos (NAVSTAR GPS), o Sistema Global de Navegação por Satélite da Federação Russa (GLONASS), o Galileo da União Europeia, o Sistema de Navegação por Satélite BeiDou da China (BDS) e o Sistema Regional de Navegação por Satélite da Índia (IRNSS). Os sistemas mais recentes como Galileo e BeiDou têm um maior número de satélites e um melhor desempenho, enquanto que os sistemas mais antigos como GPS e GLONASS têm sido amplamente utilizados durante décadas, tornando-os os mais populares no mercado [21].

Cada satélite GNSS está equipado com relógios atômicos que fornecem informações de cronometragem precisas aos recetores terrestres. Estes relógios são essenciais para determinar a hora de transmissão do sinal e o PVT do recetor. Cada satélite também tem um transmissor de sinais na banda rádio que transmite sinais nas frequências L1 e L2 (ondas portadoras de 1575,42 MHz de frequência e 19 cm de comprimento de onda e 1227,60 MHz de frequência e 24 cm de comprimento de onda, respetivamente, que transportam dados através de modulação), painéis solares, bateria para a geração de energia e motores para efetuar as manobras para colocar o satélite na órbita pretendida. Os dados de navegação transmitidos pelos satélites incluem informação sobre efemérides de satélite, que é utilizada para determinar a posição e velocidade do satélite num dado momento. Além disso, os dados de navegação contêm parâmetros tais como a polarização do relógio do satélite, a saúde do satélite e dados do almanaque que são necessários para calcular a solução PVT [22].

Os satélites GNSS são sistemas complexos que requerem investimentos significativos em termos de tecnologia, engenharia e infraestruturas. Os satélites devem ser concebidos e construídos para operar num ambiente espacial agressivo e manter informações precisas sobre a órbita e o relógio para uma navegação precisa. Além disso, os operadores de satélites GNSS devem monitorizar e manter continuamente as suas constelações de satélites para assegurar o seu bom funcionamento e integridade. Globalmente, os satélites GNSS são uma componente crítica da infraestrutura GNSS e apresentam-se

em vários tipos (Tabela 2), permitindo uma vasta gama de aplicações em vários sectores, incluindo transporte, levantamento, cartografia e agricultura de precisão [23].

Tabela 2 - Tipos de satélites GNSS

Tipo de Satélite	Descrição	Exemplos
Órbita Média Terrestre	Operam a uma altitude de cerca de 20,000km	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
Órbita Geossíncrona	Mantêm-se numa posição fixa acima do equador da Terra	SBAS, QZSS
Órbita Terrestre Baixa	Operam a uma altitude de cerca de 2000km	IRNSS, NavIC
Órbita Polar	Orbitam os polos da Terra	GLONASS-K, BeiDou-2

2.1.4 Arquitetura GNSS

Um GNSS consiste em três sistemas (Figura 5):

- Segmento espacial – constituído pelos satélites;
- Segmento de controlo – responsável pelo correto funcionamento do sistema e utiliza medições recolhidas pelas estações de monitorização para prever o comportamento da órbita e do relógio de cada satélite. Os dados de previsão são transmitidos aos satélites para transmissão de volta aos utilizadores.
- Segmento de utilizador – que inclui os recetores GNSS que fornecem posicionamento, velocidade e timing preciso aos utilizadores;

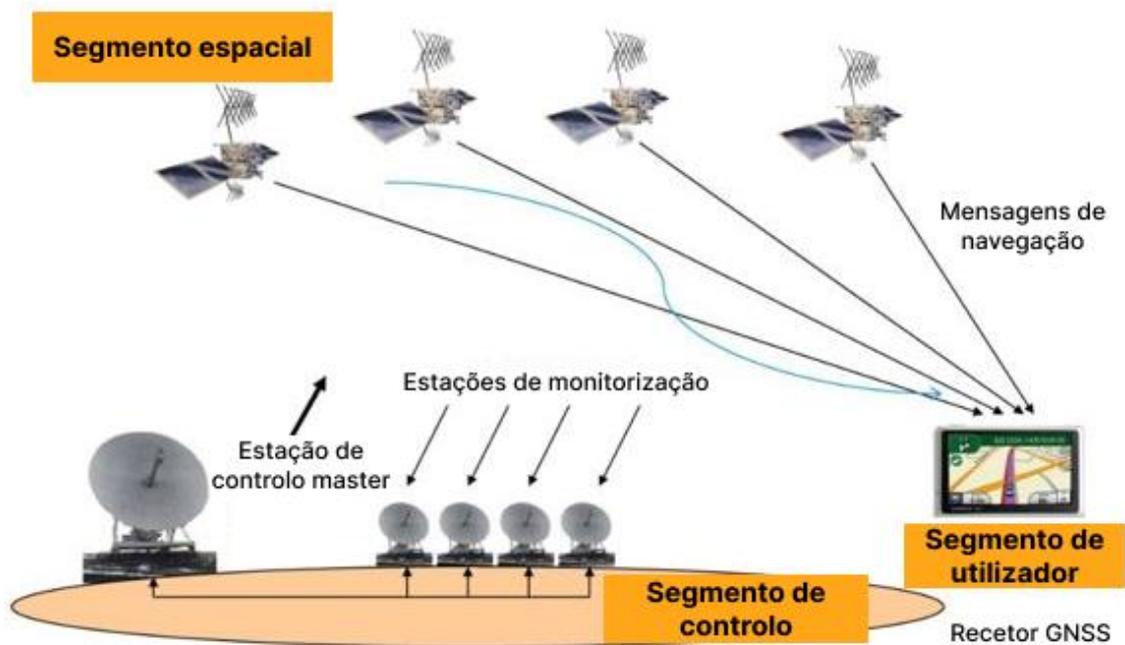


Figura 5 - Sistema GNSS [24]

2.1.5 Segmento Espacial

O Segmento Espacial GNSS é um componente essencial que desempenha um papel na prestação de serviços de navegação e posicionamento aos utilizadores de todo o mundo. Este segmento consiste numa constelação de satélites em órbita em torno da Terra, transmitindo sinais que são recebidos pelos recetores GNSS em terra. As principais funções do segmento espacial são a geração e transmissão de código e sinais de fase de onda portadora, armazenar e difundir a mensagem de navegação carregado pelo segmento de controlo. Estas transmissões são controladas por relógios atómicos altamente estáveis a bordo dos satélites [25].

A conceção e operação do segmento espacial GNSS é crucial para a precisão, fiabilidade, e cobertura global dos sistemas GNSS. O número e disposição dos satélites na constelação, a altitude e inclinação das suas órbitas e as características dos seus sinais são fatores importantes que determinam o desempenho do segmento espacial GNSS [26].

Um dos principais desafios na conceção e operação do segmento espacial GNSS é assegurar que os sinais transmitidos pelos satélites sejam de qualidade e precisão suficientes para satisfazer as necessidades das várias aplicações GNSS, incluindo navegação, posicionamento e cronometragem. Os

sinais transmitidos pelos satélites GNSS devem ser robustos e fiáveis, e devem ser resistentes a interferências, encravamentos, e outras fontes de degradação.

Outro importante desafio no segmento espacial GNSS é assegurar a manutenção e sustentabilidade da constelação de satélites. Isto requer a monitorização e controlo contínuos dos satélites, e a substituição atempada dos satélites que tenham chegado ao fim da sua vida operacional.

2.1.6 Segmento de Controlo

O segmento de controlo consiste numa rede de centros de controlo em terra, estações de monitorização, e instalações de *uplink* (Figura 6). Estas instalações são responsáveis por manter informações precisas e atualizadas sobre a localização, velocidade e trajetória de cada satélite da constelação GNSS [27].

Este componente assegura o bom funcionamento do sistema como um todo. O segmento de controlo é responsável pela gestão e monitorização dos satélites em órbita, assegurando que estes operam dentro dos parâmetros especificados e transmitem sinais de navegação precisos. É também responsável pela realização de atividades regulares de manutenção, tais como o carregamento de atualizações de software e a realização de ajustamentos nas órbitas dos satélites, bem como a resolução de anomalias em caso de quaisquer eventos inesperados.

Posteriormente, as informações recolhidas são utilizadas para controlar a posição, velocidade e tempo dos satélites, bem como para realizar atividades regulares de manutenção e resolver quaisquer anomalias.

Uma das principais funções do segmento de controlo é efetuar a determinação da órbita, o que implica calcular a localização precisa de cada satélite no espaço. Isto é feito através do rastreio dos sinais transmitidos pelos satélites e da análise das deslocações Doppler nos sinais, bem como através da análise de dados de outras fontes [28]. Os dados de determinação da órbita são então utilizados para efetuar a previsão da órbita, o que envolve a previsão da posição, velocidade e tempo futuros dos satélites.

Para além da determinação da órbita, o segmento de controlo também executa a sincronização de relógio, o que implica sincronizar os relógios em cada satélite com um relógio mestre ultra-preciso no solo. Isto é fundamental para assegurar que os sinais de navegação transmitidos pelos satélites são precisos e podem ser utilizados pelos recetores GNSS para determinar a sua própria posição e velocidade [29].

O segmento de controlo desempenha também um papel fundamental na monitorização da saúde e do desempenho do sistema GNSS. Isto inclui a monitorização do desempenho dos satélites e das suas

cargas úteis, bem como o rastreamento e a comunicação de quaisquer anomalias ou falhas. Em caso de falha, o segmento de controle é responsável pela identificação e resolução do problema, por exemplo pode carregar um *patch* de software, ajustando as órbitas dos satélites.

Em conclusão, o segmento de controle de um GNSS é um componente crítico que desempenha um papel fundamental para assegurar o bom funcionamento do sistema, sendo as suas funções basilares:

- controlar e manter o estado e a configuração dos satélites;
- prever a evolução da efeméride e do relógio satélite;
- manter a escala de tempo GNSS correspondente (através de relógios atômicos);
- atualizar as mensagens de navegação para todos os satélites;

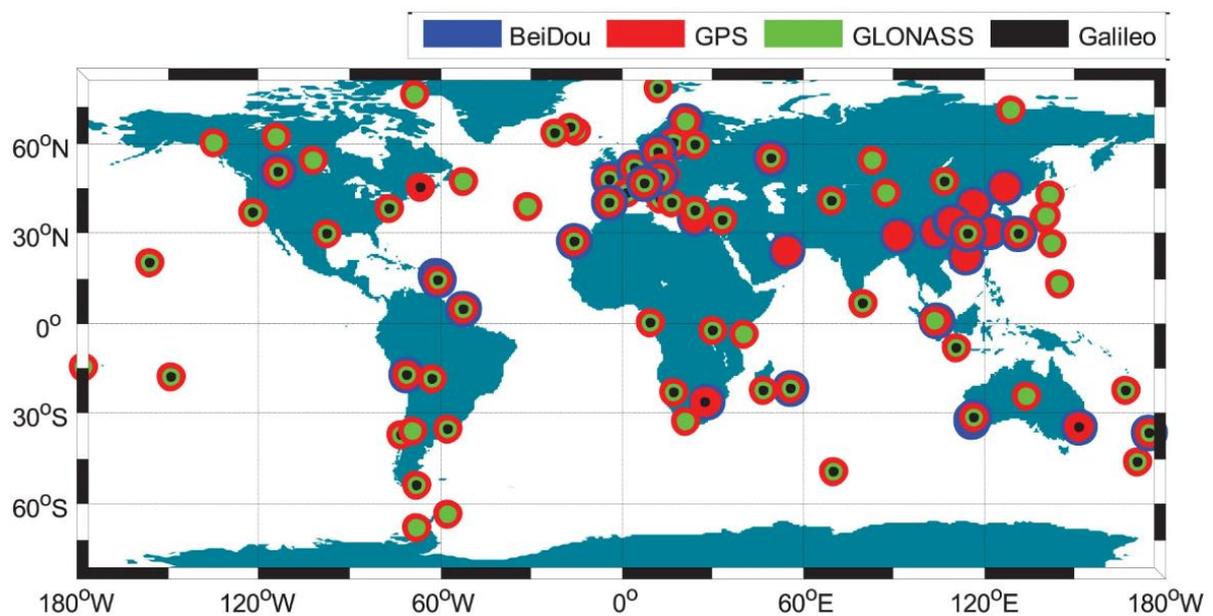


Figura 6 - Localização das Estações de Monitorização dos principais sistemas GNSS [30]

2.1.7 Segmento de Utilizador

O avanço da tecnologia de semicondutores cresceu exponencialmente nos últimos dez anos, o que permitiu a diminuição em tamanho de componentes, a disponibilidade de maiores capacidades de processamento e a redução do custo dos aparelhos eletrónicos que utilizamos diariamente. A capacidade de fornecer localização e timing preciso tornou-se um componente crucial da nossa sociedade moderna nesta nova era de pequenos dispositivos eletrónicos omnipresentes com poderosas capacidades de processamento [31], [32].

Os automóveis modernos e os telemóveis mais recentes são duas instâncias que se aplicam, na medida em que ambos têm módulos de posicionamento que podem proporcionar a localização do utilizador. Com a introdução das comunicações 5G/6G [32], a condução autónoma [33], a Internet das Coisas (IoT) [34], e as cidades inteligentes, prevê-se que a informação sobre posicionamento e tempo tenha um maior impacto no futuro.

O segmento do utilizador é composto por recetores GNSS. A sua função principal é receber sinais GNSS, determinar pseudo-distâncias (e outros observáveis) e resolver as equações de navegação a fim de obter as coordenadas e fornecer um tempo muito preciso.

Os elementos básicos de um recetor GNSS (Figura 7) genérico são: uma antena com pré-amplificação, uma secção de radiofrequência, um microprocessador, um oscilador de precisão intermédia, uma fonte de alimentação, alguma memória para dados armazenamento e uma interface com o utilizador.

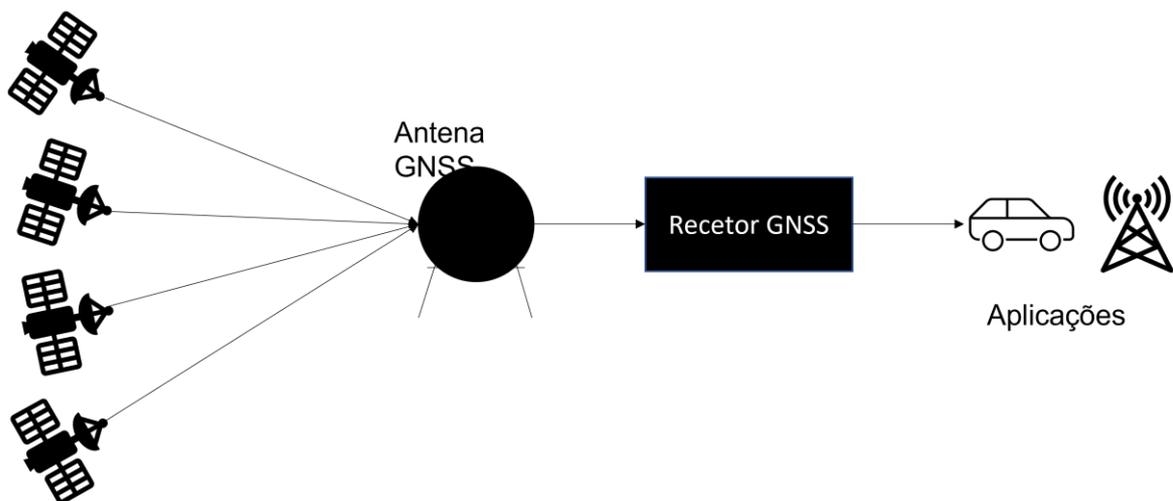


Figura 7 - Segmento de Controlo GNSS (adaptada de [35])

Se o relógio do recetor estiver sincronizado com os relógios de três satélites, a receção simultânea de 3 sinais é suficiente para obter a localização de um utilizador. Por outro lado, se ocorrer uma dessincronização do relógio do recetor em relação aos relógios dos satélites, a medição dos intervalos de tempo do percurso dos sinais será incorreta, o que levaria a um cálculo errado das distâncias e, conseqüentemente, a uma posição incorreta [36]. Deste modo torna-se necessário um quarto satélite. É fundamental que os relógios de todos os satélites estejam sincronizados de modo a existir uma referência temporal comum. Assim, os relógios não se auto corrigem, tendo este ajuste de ser efetuado

pelo recetor. Para esse efeito, as estações terrestres monitorizam os erros nos satélites e transmitem aos mesmos a informação necessária para a correção de possíveis erros.

Os satélites enviam, periodicamente, uma mensagem de navegação para as estações terrestres sendo que esta contém:

- Tempo de relógio do satélite;
- Informação orbital;
- Dados orbitais de toda a constelação;
- Informações sobre o estado do satélite;

2.1.8 Sinais

Relativamente à transmissão de dados num sistema de navegação por satélites, esta é feita utilizando envio e receção de sinais.

O principal objetivo dos sinais GNSS é fornecer um conjunto de medidas precisas ao recetor enquanto, ao mesmo tempo, fornece também os dados necessários para o recetor determinar a sua posição. Estes sinais são constituídos por códigos, dados e ondas portadoras.

Para se obter uma boa receção de dados no recetor, é importante escolher a frequência da portadora corretamente de modo ao sinal ser bem transmitido pela atmosfera e ser recebido independentemente das condições de visibilidade [37]. Para a comunicação com os recetores são utilizados códigos modulados em duas ondas portadoras L1 e L2. Tanto a frequência das ondas portadoras como a frequência utilizada em estações de monitorização e para fins militares são derivadas da frequência fundamental de 10,23MHz. Na transmissão dos sinais entre os satélites e o(s) recetor(es), estes sofrem atrasos na ionosfera e depois na troposfera. Ter duas frequências sincronizadas e transmitidas pelo mesmo satélite mitiga o atraso na ionosfera, realçando assim a utilidade de transmitir sinais em diversas frequências.

Para além de ser relevante escolher a frequência da onda portadora adequada, os sinais precisam de ter potência e largura de banda suficiente para se obter intervalos de medidas satisfatórios.

Em suma, a necessidade de transmitir dados de forma correta e precisa é a força motriz por detrás do desenvolvimento e criação dos sinais GNSS.

Na Tabela 3 abaixo são apresentadas as características dos sinais dos principais sistemas GNSS, nomeadamente GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou onde é possível identificar a frequência, largura de banda, modulação, tipo de código e precisão de cada sistema.

Tabela 3 - Sinais GNSS

Sinal	Gama Frequências (MHz)	Largura de Banda (MHz)	Modulação	Código	Precisão (m)
GPS L1 C/A	1575,42	2	Binary Phase Shift	C/A	5-10
GPS L1 P(Y)	1575,42	2	Binary Phase Shift	Preciso	0,1-1
GPS L2C	1227,60	20	Binary Phase Shift	C/A	5-10
GPS L2 P(Y)	1227,60	20	Binary Phase Shift	Preciso	0,1-1
GPS LS	1176,45	24	Binary Phase Shift	Preciso	0,1-1
GLONASS G1	1602,00 1615,50	24,3	Frequency Division	C/A	2-4
GLONASS G2	1246,00 1254,50	17,8	Frequency Division	Preciso	2-4
Galileo E1	1575,42	2	Composite	Aberto	1-2
Galileo E5a	1176,45	20	Composite	Comercial	0,1-0,2
Galileo E5b	1207,14	20	Composite	Emergência	0,1-0,2
BeiDou B1	1561,098	15	Binary Phase Shift	C/A	5-10
BeiDou B1C	1575,42	2	Binary Phase Shift	Aberto	1-2
BeiDou B2	1207,14	20	Binary Phase Shift	Preciso	0,1-1
BeiDou B2a	1176,45	10	Binary Phase Shift	Militar	0,1-1

Códigos

Os códigos são uma componente fundamental dos sistemas GNSS e servem como meio de identificação de um satélite em particular e do tempo do seu sinal. Os códigos utilizados no GNSS são únicos para cada satélite e são concebidos para permitir aos recetores medir com precisão a diferença de tempo entre a transmissão do sinal e a sua receção [38].

Os dois tipos de códigos utilizados no GNSS são o código Coarse/Acquisition (C/A) e o código Precise (P) [39]. O código C/A é utilizado pelo público e é transmitido na frequência L1, enquanto o código P é utilizado pelas agências militares e autorizadas, e é transmitido tanto na frequência L1 como na L2.

O código C/A é um código binário com uma taxa de chipping de 1,023 MHz, que é multiplicado por um código de ruído pseudo-aleatória (PRN) para criar uma sequência única para cada satélite. O código PRN é uma sequência de 1023 bits com um período de 1 milissegundo, e é utilizado para modular o sinal

portador. O código C/A é difundido continuamente, e é utilizado para aplicações de posicionamento e cronometragem.

O código P, por outro lado, é um código muito mais longo, com uma taxa de chipping de 10,23 MHz, e é também multiplicado por um código PRN para criar uma sequência única para cada satélite. O código PRN para o código P é mais longo do que o código C/A, com uma duração de 267 dias, e é reiniciado todos os dias. O código P é também difundido continuamente, e proporciona maior precisão e segurança aos utilizadores autorizados.

Além dos códigos C/A e P, existem também outros códigos utilizados no GNSS, tais como o código L2C, que é utilizado para fins civis na frequência L2, e o código L5, que é utilizado para aplicações de segurança da vida na frequência L5. Estes códigos proporcionam benefícios adicionais e maior precisão para aplicações específicas [40].

Globalmente, os códigos são um aspeto crítico do GNSS, e são utilizados para identificar satélites individuais e fornecer informação precisa de tempo. As características únicas de cada código permitem um posicionamento e navegação fiáveis e precisos, tornando o GNSS uma tecnologia essencial numa vasta gama de aplicações.

2.1.9 Recetor GNSS

O primeiro objetivo de um recetor GNSS é recolher sinal suficiente emitido pelos satélites [41]. As antenas são concebidas para receber todos os sinais dentro da banda relevante de frequências. Cabe ao recetor distinguir a informação que interessa do ruído. Através de uma pré-amplificação na antena, o sinal antes de ser enviado através de um cabo para o interior do recetor é estimulado.

Após os sinais serem captados pela antena, estes são direcionados para um circuito eletrónico chamado canal que reconhece os sinais de diferentes satélites. Um recetor com um único canal lê o sinal de cada satélite sucessivamente, até receber os sinais de todos os satélites disponíveis. Um recetor com mais de um canal é mais rápido, pois os dados são processados simultaneamente.

Aplicando os conceitos de pseudo-distância, códigos e ondas portadoras, o recetor determina a pseudo-distância com código através da geração de uma réplica do sinal emitido pelo satélite, que é comparada com o sinal recebido de tal forma que a translação em tempo que é necessário aplicar à réplica para se verificar uma coincidência traduz o intervalo de tempo de percurso do sinal. Este, multiplicado pela velocidade de propagação da onda, fornece a distância ao satélite [42].

2.1.10 Efeito Doppler

O Efeito Doppler presente na Figura 8 é o desvio na frequência de emissão dos satélites devido ao movimento relativo entre o emissor e o recetor. À medida que o satélite se move, o alcance entre o recetor e o satélite muda. Essa mudança constante reflete-se num movimento contínuo da fase do sinal que entra no recetor. O desvio Doppler tem amplas aplicações no processamento do sinal, pois pode ser utilizado para discriminar entre os sinais de vários satélites GPS, determinar ambiguidades inteiras no levantamento cinemático, ajuda na deteção de atrasos de ciclo e observável para posicionamento autónomo de pontos[43]. Contudo, a aplicação mais importante dos dados Doppler é a determinação da taxa de alcance entre um recetor e um satélite. A taxa de alcance é um termo utilizado para ilustrar a taxa a que o alcance entre um satélite e um recetor muda durante um determinado período de tempo. Para além disso, a medição acumulada dos ciclos das frequências recebidas, em que mais ciclos recebidos significa que a frequência está a aumentar, o que indica que o satélite se está a aproximar do recetor, permite o cálculo da posição do recetor.

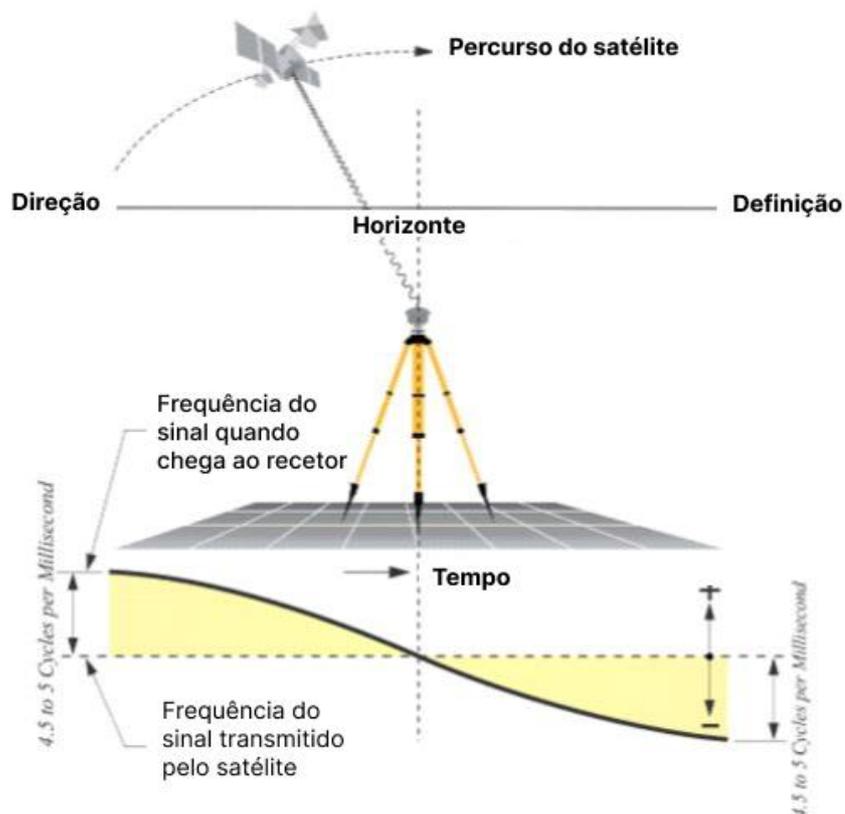


Figura 8 - Efeito Doppler [124]

2.1.11 Fontes de Erro

Como seria de esperar quando se trata de comunicações, estas são suscetíveis a erros. No caso de comunicações entre satélites e recetores, as fontes de erro têm origem nos satélites, nas antenas, no recetor e no meio de propagação.

Os sinais GNSS têm uma potência muito baixa e por isso são propensos a várias fontes de ruído e erros [44].

Erros de propagação de sinal combinam erros atmosféricos, erros *multipath* e o efeito relativo entre o movimento do satélite e do recetor. Os parâmetros de órbita do satélite necessários para calcular a posição e velocidade do satélite são estimados no segmento de controlo. Estes parâmetros são enviados para satélites GNS. O último tipo de erro GNSS refere-se a erros intencionais, sendo estes deliberados e prejudiciais tais como *jamming* e *spoofing*.

Erros relacionados com o relógio

Os recetores geram medições baseadas principalmente no tempo de medição [45]. De facto, o tempo é central aos sistemas GNSS, ou seja, os satélites GNSS estão equipados com sistemas muito precisos. Apesar da sua precisão, os relógios de satélite ainda se afastam ligeiramente do tempo GNSS. Por razões de acessibilidade e tamanho, os relógios recetores são normalmente muito mais baratos, mas, conseqüentemente, afastam-se rapidamente do tempo GNSS. Este facto traduz-se em erros de alcance nas medições do recetor.

Os recetores GNSS estão equipados com relógios de cristal baratos, que têm baixa precisão em comparação com os relógios de satélite [46]. Como resultado, o erro do relógio do recetor é muito maior do que o do relógio de satélite GNSS. Uma das formas de resolver este problema seria utilizar relógios externos precisos, geralmente de césio ou rubídio, que têm um desempenho superior, porém, estes são muito caros. Outra solução seria remover este erro através da diferenciação entre satélites ou da estimativa do erro como um parâmetro desconhecido adicional no processo de estimativa da posição. Esta última solução destina-se a tornar os preços dos recetores acessíveis [12]. Adicionando o enviesamento do relógio recetor ao conjunto de parâmetros desconhecidos, para além de três parâmetros de posição, é estabelecida a limitação de um mínimo de quatro satélites visíveis, em vez de três, para obter uma solução do recetor.

Erros de propagação de sinal

Durante o tempo de propagação do sinal, a Terra continua o seu movimento de rotação causando uma mudança relativa entre os locais de satélite e recetor na hora de transmissão do sinal e na hora de

recepção do sinal. Caso esta distância relativa, conhecida como o efeito Sagnac, não for contabilizada, esta causará um erro extra na distância medida.

O efeito Sagnac é um erro relativista causado pela rotação da Terra durante o tempo de propagação do sinal entre o satélite e o recetor [2]. Os parâmetros efemérides obtidos a partir da mensagem de navegação fornecem informações sobre a posição do satélite expressa no quadro ECEF (Earth-centered Earth-fixed) no tempo de transmissão do sinal. Contudo, durante o tempo de trânsito do sinal, a Terra teria rodado (Figura 9) e, conseqüentemente, também a referência ECEF. Conseqüentemente, é necessária uma correção para expressar a posição do satélite na referência ECEF na hora de recepção do sinal em vez da hora de transmissão [12].

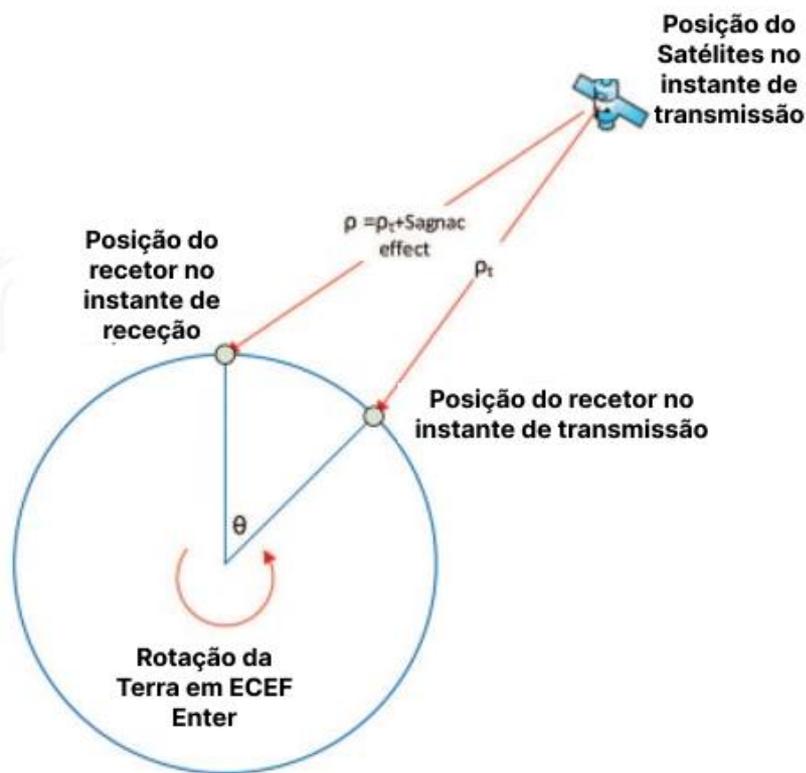


Figura 9 - Efeito Sagnac [124]

O sinal GNSS percorre primeiro o espaço durante bastante tempo, mantendo todas as suas propriedades iniciais, sobretudo a sua velocidade constante. No entanto, o sinal será perturbado em altitudes mais baixas devido a impactos da ionosfera e da troposfera [44].

O sinal GNSS pode chegar ao recetor diretamente ou por um ou mais reflexos do meio envolvente durante a última etapa da viagem do sinal. Este impacto tem o potencial de reduzir significativamente a qualidade do sinal.

Erros de sistema

Com base nos dados da mensagem de navegação conhecida como efeméride de satélite, os recetores determinam a posição do satélite. No segmento de controlo, estas características da efeméride são calculadas antes de serem transferidas para os satélites. De duas em duas horas, os satélites atualizam os dados da efeméride. No entanto, esta informação é aproximada utilizando uma curva adequada para prever a órbita do satélite, o que introduz imprecisões residuais em relação à própria órbita [12]. O erro de raiz quadrado médio (Root Mean Square) introduzido por esta fonte de erro é de aproximadamente 2 metros [38]. Se forem conhecidos ajustes locais ou globais da rede para a posição do satélite, este erro pode ser reduzido. Estes ajustes são utilizados para aumentar a precisão das correções da efeméride.

Fontes de erro intencionais

Algumas fontes de erro GNSS são deliberadas, ou seja, impostas pelo fornecedor do serviço ou um ataque ao sistema tais como disponibilidade seletiva, *jamming* e *spoofing*.

De todos os sistemas GNSS, a disponibilidade seletiva está exclusivamente ligada ao sistema GPS. Em nome da segurança nacional, o governo dos EUA reduziu deliberadamente o desempenho do GPS através da disponibilidade seletiva (SA). Os ajustes do relógio de satélite da efeméride de transmissão foram propositadamente reduzidos para baixar a precisão do GPS para uso civil [47]. Contudo, os EUA deixariam de impor a disponibilidade seletiva a 2 de maio de 2000, quando esta função foi removida. Além disso, o governo dos EUA já não pode empregar o SA porque a próxima geração de satélites GPS (GPS III) carece desta característica.

A transmissão deliberada de sinais de radiofrequência (RF) para impedir que os recetores GNSS próximos rastreiem os sinais GNSS resulta em interferência intencional, muitas vezes referida como *jamming* [2]. As alterações da frequência do sinal (medida em Hertz (Hz)) e uma redução da potência do sinal (medida em decibéis (dB)) são os efeitos diretos mais comuns. Devido a estes efeitos, os cálculos de posição, velocidade e tempo podem sofrer graves imprecisões ou mesmo congelamento total, levando a um problema de negação de serviço. Não é necessário conhecimento especializado ou equipamento elaborado para bloquear um sinal GNSS [44].

A Figura 10 mostra a visibilidade de vários satélites num cenário de simulação a céu aberto. A Figura 11, por outro lado, mostra a descontinuidade na disponibilidade do satélite para o mesmo cenário, mas quando um sinal de interferência é inserido.

O processo de produção de um sinal GNSS falso que parece genuíno para um recetor GNSS é conhecido como *spoofing* do sinal GNSS. Como a falsificação do sinal é mais difícil de detetar do que o *jamming* do sinal, este fenómeno é mais perigoso [44]. O sinal falsificado pode enganar o recetor, o que tem um impacto na sua solução de navegação. Além disso, não é possível detetar a falsificação utilizando abordagens de correlação, porque o sinal recebido está estatisticamente ligado ao verdadeiro sinal GNSS, ao contrário do que acontece no caso de *jamming* de sinal [36], [44]. Os efeitos prejudiciais da falsificação do sinal no sistema de navegação, particularmente os relativos aos serviços de segurança da vida humana, podem ter grandes repercussões tanto em aplicações militares como civis.

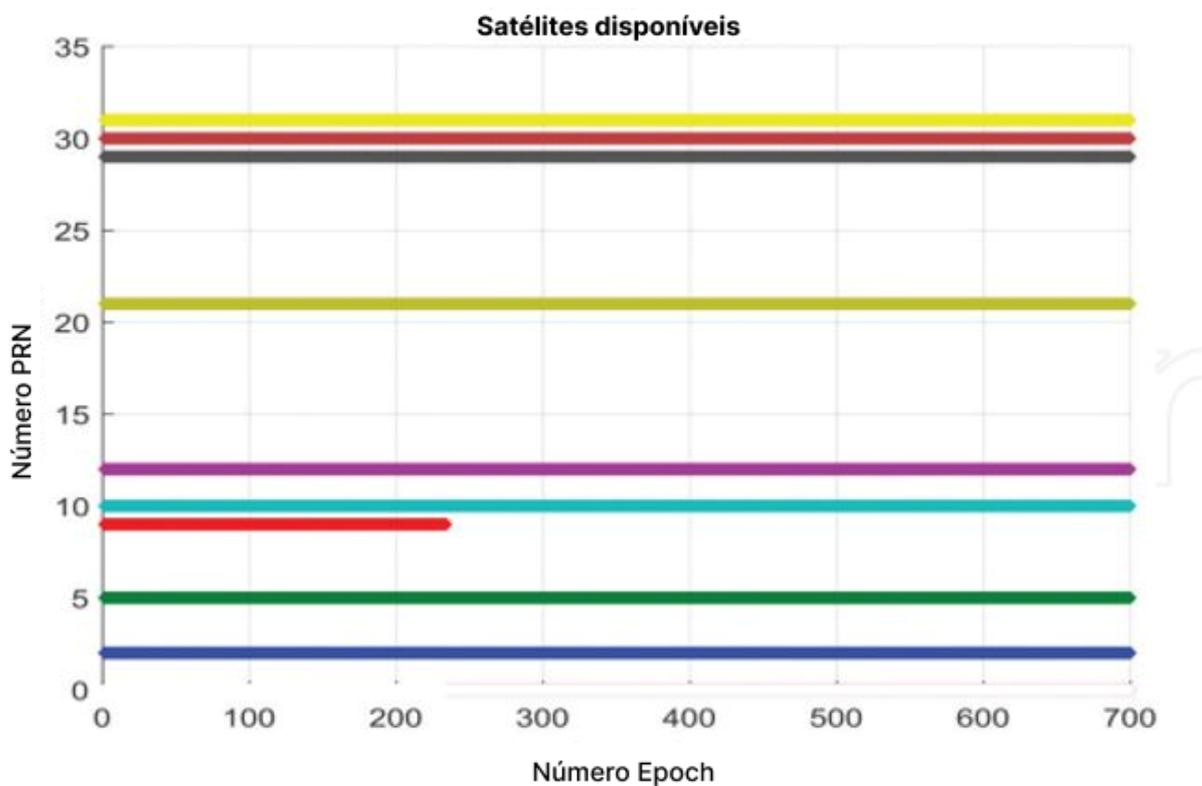


Figura 10 - Disponibilidade de satélites num cenário normal - [44]

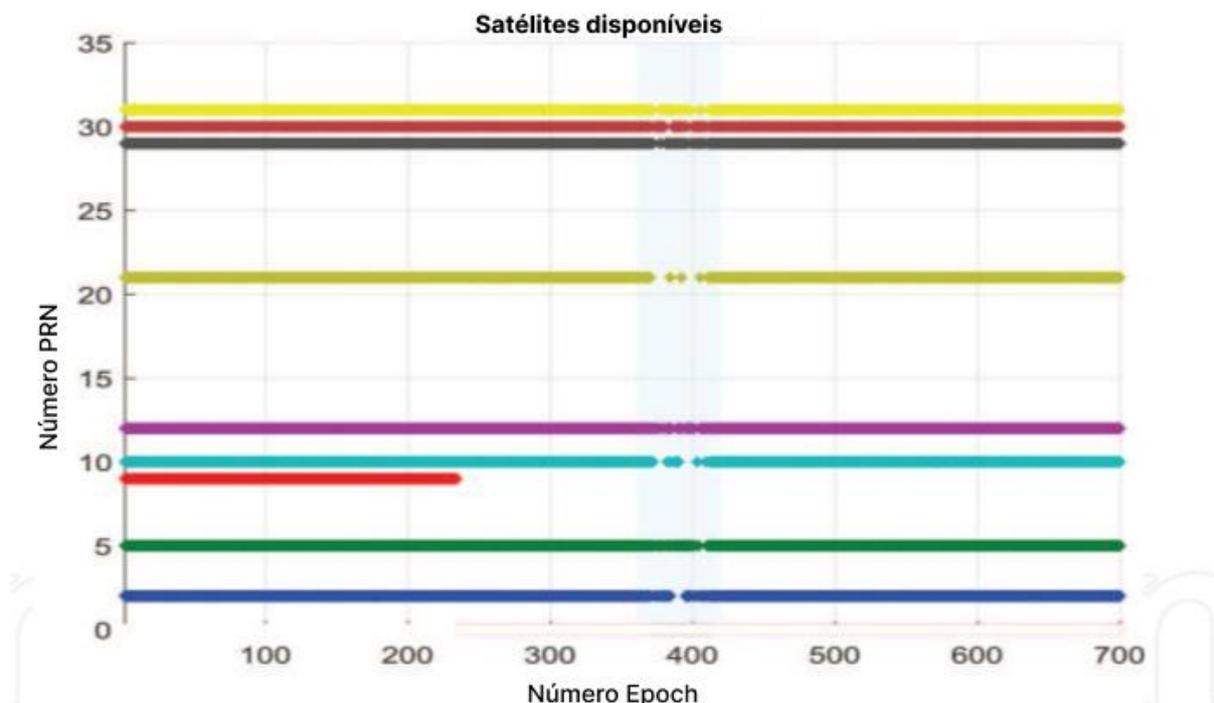


Figura 11 - Disponibilidade de satélites quando é introduzido jamming [44]

Diluição de Precisão

A diluição de precisão (DOP) é um parâmetro que afeta a precisão da localização. Este elemento é influenciado pela geometria dos satélites visíveis, na medida em que uma melhor geometria resulta num DOP mais baixo e, portanto, numa melhor solução de posição. O DOP é visualmente representado na Figura 12. A Figura 13(a) representa um cenário ideal em que os sinais de dois satélites formariam círculos de intersecção no ponto recetor, embora tal nunca seja o caso devido a falhas do GNSS. A Figura 13(b) ilustra uma situação do mundo real em que a incerteza de medição resulta em alguma ambiguidade nos raios do circuito virtual. A área dos potenciais pontos recetores é definida pela região de intersecção.

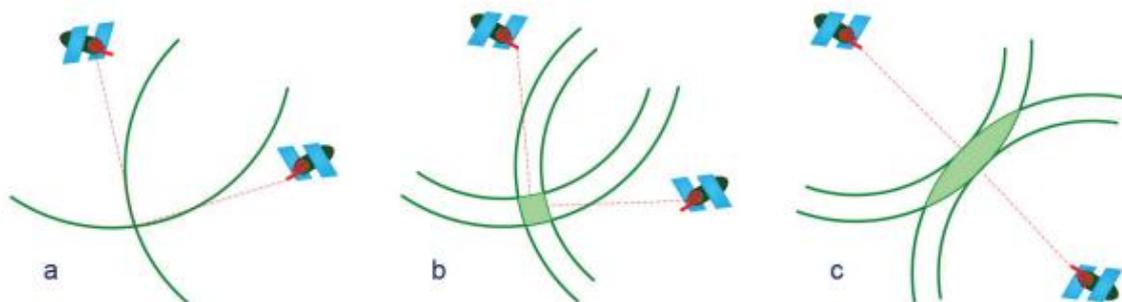


Figura 12 - Diluição de precisão [48]

2.1.12 Mensagem de Navegação

A mensagem de navegação modulada contém a localização do satélite (dados da efeméride), tempo de transmissão e outras informações que podem ser utilizadas para calcular o tempo e posição do dispositivo do utilizador [49].

Utilizando a mensagem de navegação GPS exposta na Figura 13 como exemplo, esta continua a ser um dos pilares em que se baseia o GPS. Esta mensagem de navegação é transmitida a uma baixa frequência de 50 Hz tanto nas portadoras GPS L1 como nas L2. Transporta informações sobre a localização dos satélites GPS chamadas efemérides e dados utilizados tanto nas conversões de tempo como nos offsets chamados correções de relógio [50]. Tanto os satélites de GPS como os recetores têm relógios a bordo. Também comunica o estado dos satélites em órbita e informações sobre a ionosfera. Inclui dados denominados almanaques que fornecem ao recetor GPS informação suficiente das efemérides para calcular as coordenadas de todos os satélites da constelação com uma precisão aproximada de um par de quilómetros.

A totalidade da mensagem de Navegação contém 25 *frames*. Cada *frame* tem 1500 bits de comprimento e encontra-se dividido em cinco subframes. Cada subframe contém 10 palavras e cada palavra é composta por 30 bits. Por conseguinte, toda a mensagem de Navegação contém 37.500 bits e a uma taxa de 50 bits por segundo leva 12 minutos e 30 segundos a transmitir e a receber num início completamente frio [50].

Na Figura 14, nos cinco subframes da Mensagem de Navegação, a sigla TLM significa telemetria, a sigla HOW significa "*handover word*" (palavra de entrega). Na figura também é possível ver no subframe 1 um a correção do relógio e saúde do satélite GPS. Os subframes dois e três são dedicados à efeméride, enquanto que os subframe quatro e cinco vê-se a ionosfera e depois os números de satélite PRN (*Pseudo*

Random Noise) e o almanaque. Os números PRN 25 a 32 no subframe número quatro significam que os almanques do satélite do número 25 ao número 32 se encontram encontram-se nesse subframe.

1	Telemetria	Palavra de Entrega - HOW	Correção de clock, GPS e estado de satélite
2	Telemetria	Palavra de Entrega - HOW	Efeméride
3	Telemetria	Palavra de Entrega - HOW	Efeméride
4	Telemetria	Palavra de Entrega - HOW	Ionosfera, código PRN, almanaque dos satélites 25 a 32
5	Telemetria	Palavra de Entrega - HOW	Código PRN, almanaque dos satélites 1 a 24

Cada palavra – 30 bits
 Cada *subframe* – 10 palavras – 300 bits
 Cada *frame* – 5 *subframes* – 1500 bits
 Mensagem de navegação – 25 *frames* – 37,500 bits

Figura 13 - Mensagem navegação GPS [50]

2.2 Estado da Arte

Um sistema de navegação por satélite é um sistema de satélites que fornece posicionamento geoespacial autônomo com cobertura global [49]. Permite a recetores eletrônicos determinar a localização (longitude, latitude e altitude) com uma taxa de erros de poucos metros utilizando sinais transmitidos ao longo da linha de visão a partir de satélites. Os recetores calculam o tempo preciso bem como a posição sendo que esta pode ser usada como referência para experiências científicas. Um sistema de navegação por satélite com cobertura global pode ser designado por sistema global de navegação por satélite ou GNSS. No ano de 2011, apenas o Sistema de Posicionamento Global NAVSTAR dos Estados Unidos (GPS) e o sistema russo GLONASS eram considerados GNSSs totalmente operacionais a nível mundial. A China apresentava-se em vias de expandir o seu sistema regional de navegação Beidou para o sistema global de navegação por COMPASS até ao ano de 2020. O sistema da União Europeia, Galileo, era um GNSS em fase de implantação, previsto para estar totalmente operacional no fim de 2020. Vários países,

incluindo França, Japão e a Índia estão no processo de desenvolvimento de sistemas de navegação regional.

A cobertura global para cada sistema é geralmente alcançada por uma constelação de satélites de cerca de 20 a 30 satélites de órbita média (MEO) distribuídos entre vários planos orbitais. Os sistemas reais variam, mas utilizam orbitas com períodos de cerca de doze horas (a uma altitude de cerca de 20.000 quilômetros).

O sistema GNSS incorpora os sistemas GPS, GLONASS, Galileo, Beidou (Figura 14) e outros sistemas regionais como parte da norma e permite a utilização intercambiável destes serviços de localização, proporcionando um conjunto de vantagens e funcionalidades para os recetores.



Figura 14 - Principais sistemas GNSS [125]

Foram selecionados diversos estudos que possuíam em comum tanto o objetivo como a metodologia de trabalho utilizada com a dissertação presente.

O estudo desenvolvido por Sharat et al.[9], baseia-se nos princípios da navegação por satélite e nas fontes de erros relativas ao posicionamento e tem como principal objetivo ajudar o leitor a compreender os conceitos basilares da navegação por satélite e como posicionamento preciso pode ser alcançado. Os autores apresentam soluções predecessoras da navegação por satélite, nomeadamente navegação através do Sol e de padrões de estrelas. Posteriormente é mencionada a evolução da navegação por satélites através das soluções iniciais e o seu nível de precisão, soluções estas representadas na Figura 15.

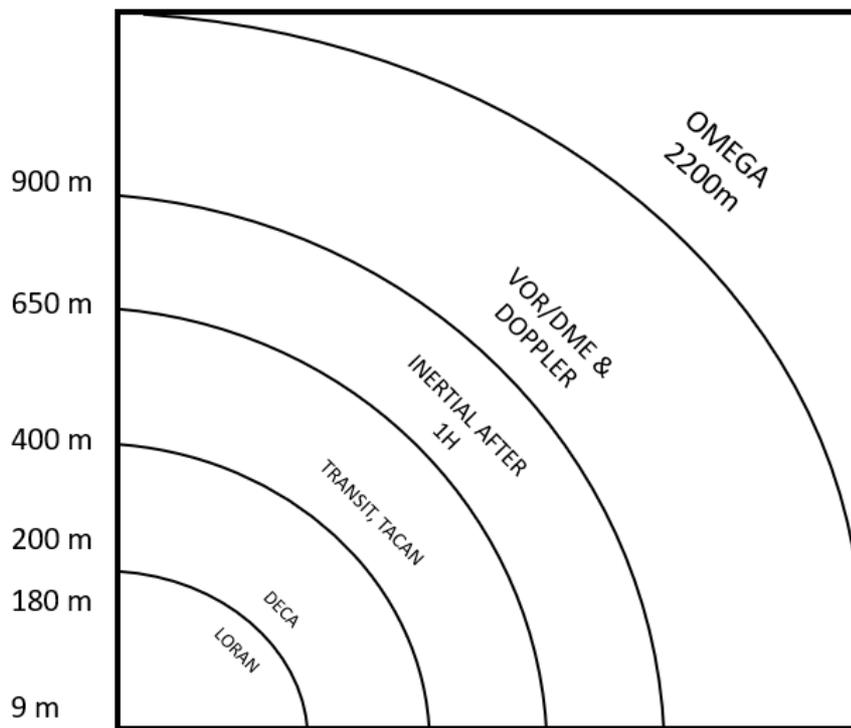


Figura 15 - Precisão dos sistemas iniciais de navegação por satélite [3]

Neste trabalho são expostos os conceitos fundamentais da navegação baseada em satélites, tais como os conceitos de trilateração, determinação da localização do receptor, mensagem de navegação, sistemas de referência, técnicas de observação e, finalmente, fontes de erros relativos ao posicionamento. Das fontes de erros de posicionamento são aprofundados os erros de relógio, erros orbitais, atrasos na ionosfera, atrasos na troposfera, ruído gerado pelo receptor e *multipath*.

Para finalizar é demonstrada na Tabela 4 como a distância que cada fonte de erro contribui para a imprecisão do sistema.

Tabela 4 - Erros em sistemas de navegação [9]

Fonte	Alcance de erro
Clock de satélite e recetor	0 - 3,5m
Erros de órbita	0-5m
Atrasos de Ionosfera	0-30m
Campo magnético terrestre	Alguns cm
Atrasos de troposfera	0-0,5m
Ruído gerado pelo recetor	0-0,3m
Erros de <i>multipath</i>	0-1,5m

Wolfgang Lechner e Stefan Baumann [51] fornecem um resumo dos desenvolvimentos da navegação por satélite através de uma visão abrangente e atualizada dos vários sistemas GNSS em uso ou em desenvolvimento no ano da escrita do artigo. Os autores fornecem informações sobre a arquitetura GNSS e dos seus componentes-chave, incluindo o segmento espacial, o segmento de controlo e o segmento do utilizador, bem como um pouco de factos históricos e as razões principais que levaram ao desenvolvimento de sistemas GNSS e a necessidade de aumentar a sua precisão e fiabilidade. Discutem também os vários sinais GNSS e as suas características, bem como os erros e técnicas de mitigação associados, como por exemplo, relativamente aos erros, são mencionados a posição geométrica dos satélites, erros de relógio, erros de efemérides, condição da troposfera e ionosfera, imprecisões nos recetores e efeitos *multipath*.

Relativamente às técnicas de mitigação dos erros referidos, o uso de *Differential GNSS* (DGNSS) é proposto, explicado e analisado. É explicado que a letra D presente na sigla DGNSS ou DGPS representa *Differential data correction* e que esta técnica consiste em emitir dados correccionais a partir de um sistema de referência numa posição conhecida para os recetores próximos do sistema.

As aplicações das técnicas DGNSS e DGPS são demonstradas através de exemplos práticos desta tecnologia na área da agricultura, nomeadamente através de *precision farming* em que precisão ao nível do centímetro é necessária para aplicações de direção de maquinaria pesada.

Além disso, os autores aprofundam as características de desempenho dos principais sistemas GNSS, incluindo GPS, GLONASS maioritariamente, mas também dos sistemas Galileo e BeiDou. Analisam as suas respetivas vantagens e desvantagens e comparam as suas capacidades em termos de precisão de posicionamento, fiabilidade e disponibilidade através da Tabela 5. Discutem também o impacto do GNSS em várias indústrias, incluindo a topografia, agricultura, veículos autónomos e como a tecnologia está a ser integrada em novas aplicações.

O artigo conclui que as atividades de desenvolvimento em curso no GNSS irão melhorar a utilização da navegação por satélite em agricultura e discute sobre as tendências futuras da tecnologia GNSS e o seu potencial de crescimento. Os autores fornecem informações sobre o desenvolvimento de novos sistemas GNSS e a integração do GNSS com outras tecnologias como os Sistemas de Navegação Inercial (INS) e a Realidade Aumentada (RA). Examinam também o potencial do GNSS para enfrentar desafios globais, tais como as alterações climáticas e a gestão de catástrofes.

Tabela 5 - Diferenças entre sistemas GPS e GLONASS [51]

Características	GPS	GLONASS
Número de satélites	21+3	21+3
Número de planos orbitais	6	3
Inclinação de órbita	55,0	64,8
Altitude de órbita	20,180km	19,100km
Período de órbita	11h58min	11h16min
Repetição de controlo terrestre	1 atraso sideral	8 atrasos siderais
Sistema geodético	WGS 84	PZ 90
Sistema de correção de tempo	UTC (USNO)	UTC (SU)
Método de divisão de satélites	Divisão por código	Divisão por frequência
Frequência L1	1575,42MHz	1602 + n x 0,5625MHz
Frequência L2	1227,60MHz	1246 + n x 0,4375MHz
Número de elementos de código	1023	511
Frequência de código	C/A = 1,023MHz P = 10,230MHz	C/A = 0,511MHz P = 5,110MHz

A deteção remota utilizando sinais de Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) tornou-se um campo de investigação em rápido crescimento nos últimos anos. Os sinais GNSS, tais como GPS e Galileo, podem ser utilizados para detetar vários parâmetros ambientais, tais como precipitação, vapor de água atmosférico e altura da superfície do mar. A principal vantagem da deteção remota GNSS é que pode fornecer cobertura global com alta resolução temporal e espacial, tornando-a uma ferramenta valiosa para uma vasta gama de aplicações, incluindo previsão meteorológica, investigação climática, e monitorização de catástrofes naturais.

[52] fornecem uma visão abrangente do Estado da Arte atual na deteção remota GNSS. Discutem primeiro os princípios básicos da deteção remota GNSS e os vários parâmetros ambientais que podem ser detetados utilizando sinais GNSS. Os autores analisam depois o estado atual da deteção remota

GNSS nomeadamente deteção atmosférica, oceânica, na criosfera e em terra incluindo as principais realizações, desafios, e limitações do respetivo campo.

Ao nível do uso de aplicações GNSS na atmosfera, é mencionada a técnica de sondagem atmosférica, incluindo a deteção de vapor de água precipitável na troposfera, conteúdo de eletrões ionosféricos totais e informação de perfil atmosférico (pressão, temperatura, humidade, tropopausa e densidade de eletrões ionosféricos).

Relativamente a aplicações no oceano, os sinais GNSS refletidos pela superfície do oceano podem ser utilizados para fazer medições altimétricas da altura da superfície do mar sendo a precisão atingível um tópico ativo de investigação. Exemplos de aplicações na área da Criosfera e em terra são a medição da espessura da neve e do gelo a partir os sinais GNSS refletidos e o uso de sinais GNSS para medir a humidade do solo, constante dielétrica, rugosidade superficial, e possível cobertura vegetativa, respetivamente.

Uma das principais realizações da teledeteção GNSS é o desenvolvimento de técnicas avançadas de processamento que podem extrair com precisão a informação ambiental dos sinais GNSS. Estas técnicas incluem correção de atrasos de fase, modelação atmosférica, e tomografia. Os autores salientam o importante papel que estas técnicas têm desempenhado na melhoria da precisão e fiabilidade da teledeteção GNSS.

Apesar dos avanços significativos na deteção remota GNSS, os autores também identificam vários desafios e limitações que precisam de ser abordados para melhorar ainda mais as capacidades do campo. Estes incluem a necessidade de modelos atmosféricos mais precisos e sofisticados, o desenvolvimento de novas técnicas para a correção de percursos múltiplos e interferências e a necessidade de estudos de validação mais detalhados para avaliar a precisão dos produtos de teledeteção GNSS.

Os autores também fornecem uma discussão sobre as futuras direções da teledeteção GNSS. Destacam o potencial da teledeteção GNSS para desempenhar um papel fundamental na abordagem de alguns dos principais desafios ambientais do nosso tempo, tais como as alterações climáticas e os desastres naturais. Os autores discutem também o potencial de integração da deteção remota GNSS com outras técnicas de deteção remota, tais como o Radar de Abertura Sintética (SAR) e a Deteção Ótica à Distância, para proporcionar uma compreensão mais abrangente do ambiente.

3. SISTEMAS GNSS

Neste capítulo, são apresentados em pormenor os principais quatro sistemas GNSS e dois sistemas regionais em desenvolvimento, desde a sua criação ao seu estado atual. Para além disso, é apresentado um subcapítulo sobre as primeiras formas de geolocalização, sendo estas as predecessoras da navegação por satélite.

3.1 Primeiras formas de geolocalização

Desde muito cedo na história da civilização, a humanidade sempre teve necessidade de explorar e, por isso, a necessidade de navegar e caminhar por território desconhecido. Era bastante difícil para os viajantes e exploradores identificarem a sua posição em relação à Terra sendo que o principal problema era determinar uma referência e um esquema de coordenadas que permitisse à população orientar-se numa forma esférica como a Terra.

A partir dessa necessidade, as estrelas polares tornaram-se um ponto de referência celestial para a navegação [53], que mais tarde se tornou no norte celestial e o extremo oposto tornou-se no sul celestial (Figura 16). Em geral, é definido como um método de navegação baseado nas posições de corpos celestes como o sol, a lua, os planetas e as estrelas.

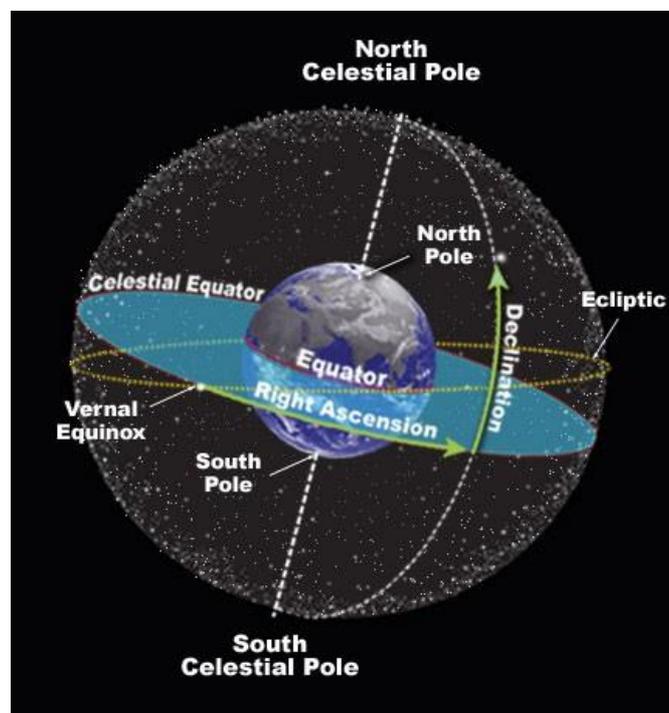


Figura 16 - Pólos Norte e Sul celestiais

A geolocalização, ou o processo de determinação da localização de um objecto na superfície da Terra, tem uma longa história anterior às tecnologias modernas como o GNSS.

Um dos primeiros métodos conhecidos de geolocalização, como mencionado acima, foi a utilização da navegação celestial, que envolvia a utilização da posição do Sol, da Lua, e das estrelas para determinar a sua localização [54]. Este método era utilizado por antigos marinheiros e exploradores, que utilizavam corpos celestes como ponto de referência para navegar nos oceanos. Outro método precoce de geolocalização foi a utilização de mapas topográficos e marcos terrestres. Os viajantes utilizavam estes mapas para determinar a sua localização com base nos pontos de referência e características circundantes. O uso do sextante (demonstrado na Figura 17) viria a revelar-se precioso na medida em que permitia a determinação da latitude. O aparelho mede a inclinação de qualquer corpo celestial em relação ao horizonte e a inclinação medida era convertida, por sua vez, num valor de latitude.

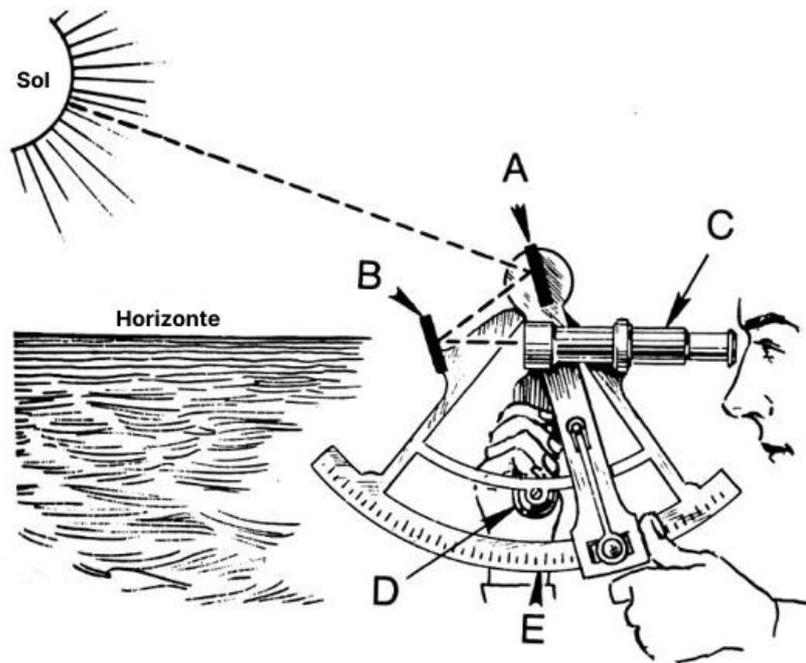


Figura 17 - Sextante

A longitude, por outro lado, continuaria a ser um mistério até que John Harrison, um relojoeiro inglês, concebeu um cronómetro preciso para medir a diferença entre o tempo local e Greenwich (a cidade de Greenwich está localizada em longitude zero) [55]. A primeira iteração do cronómetro desenvolvido por Harrison trabalhava sobre o princípio da mudança do tempo à medida que os navios se movem longitudinalmente. A cada 15 graus, move-se para leste ou oeste e o relógio avança ou retrocede uma hora respetivamente, permitindo utilizar o céu e um relógio para calcular o quanto se moveram. A questão era que o cronómetro perdia tempo com a humidade e os movimentos dos navios.

Os relógios de Harrison (Figura 18) foram revolucionários na sua capacidade de permitir que os navios determinassem a sua longitude no mar. Este desenvolvimento reduziu drasticamente o risco de os navios e as suas tripulações, juntamente com as cargas se perderem no mar.

Com o desenvolvimento de tecnologias mais avançadas, tais como o desenvolvimento do telégrafo no século XIX e da rádio no século XX, tornou-se possível determinar a sua localização utilizando a triangulação. Isto implicava medir a distância a um ponto fixo, como uma torre de rádio, utilizando o tempo necessário para que um sinal fosse transmitido e recebido.

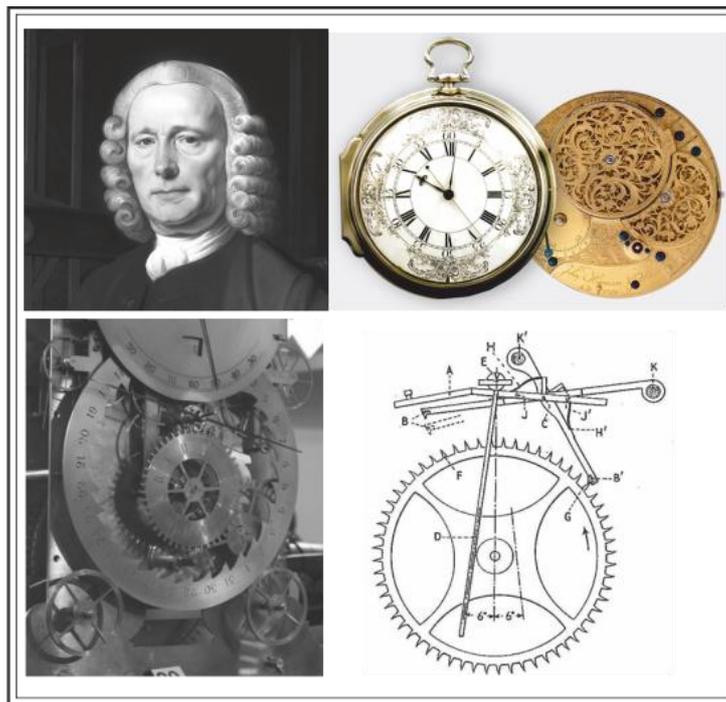


Figura 18 - Cronómetro desenvolvido por John Harrison [126]

Outra forma de navegação utilizada era o chamado *dead reckoning* ou cálculo morto. Este envolve a utilização da velocidade, tempo e direção para estimar a posição de uma pessoa [56]. O cálculo morto foi usado principalmente nos séculos XVII e XVIII em navios à vela, onde os navegadores usariam a velocidade do navio e o tempo decorrido para estimar a distância percorrida. Combinando a distância estimada percorrida com a direção da viagem, os navegadores seriam capazes de estimar a sua posição no mapa.

Um exemplo deste método de navegação e localização encontra-se demonstrado na Figura 19. O navegador traça a sua posição às 9 da manhã, indicada pelo triângulo, e, usando o seu rumo e velocidade, estima a sua própria posição às 9:30 e 10 da manhã.

Contudo, o potencial agravamento das imprecisões no cálculo da distância percorrida é uma questão significativa. Mesmo que a primeira localização fixa seja exata, as posteriores podem ser imprecisas e até piorar com o tempo.

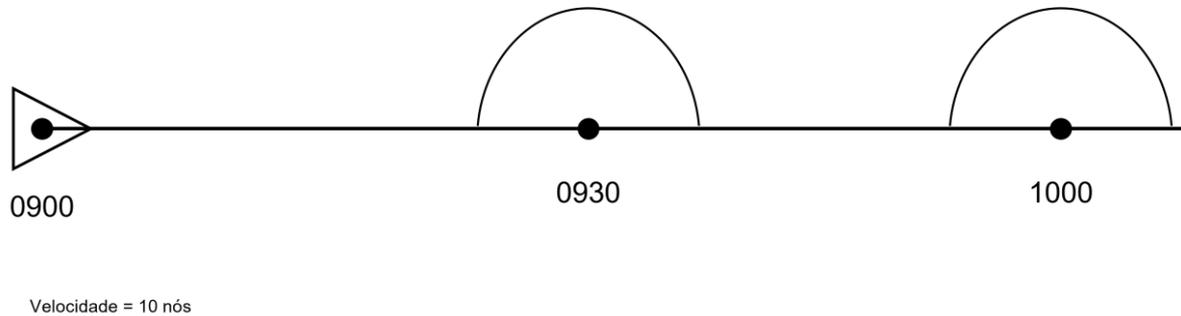


Figura 19 - Método de navegação e localização Dead Reckoning [124]

Posteriormente à descoberta do método dead reckoning, foi descoberto o método de *Radio Direction Finding (RDF)* ou direção de rádio. A descoberta da direção do rádio foi utilizada no início do século XX para determinar a posição de um navio ou de um avião. Esta técnica envolvia medir a direção de chegada (DOA) de um sinal, que é a direção de onde o sinal parece estar a vir [57]. Isto é feito utilizando um conjunto de antenas, que consiste em múltiplas antenas que são colocadas numa geometria específica. Ao medir o sinal em cada antena, a DOA pode ser estimada utilizando técnicas como a formação do feixe ou algoritmos de direção de chegada. Para determinar a localização do transmissor, podem ser combinadas múltiplas medições RDF para triangular a localização do transmissor.

A radiogoniometria foi amplamente utilizada durante a Segunda Guerra Mundial para localizar navios e aviões inimigos. Esta técnica não era muito precisa e exigia um elevado grau de perícia e experiência para ser utilizada.

A navegação por satélite começou com o primeiro satélite artificial, Sputnik I, que a União Soviética lançou em 1957 [58]. Dois físicos americanos conseguiram calcular os parâmetros orbitais do satélite analisando o desvio Doppler dos seus sinais, medidos a partir de uma única estação terrestre numa posição conhecida e aplicando as leis de movimento orbital de Kepler. Frank T. McClure percebeu que o processo inverso podia ser usado para determinar a posição de uma estação terrestre medindo os desvios Doppler num sinal de um satélite numa órbita conhecida. O primeiro sistema baseado neste princípio foi o Transit, que se tornou operacional em 1964 e foi utilizado principalmente pela Marinha dos EUA. Os navios e submarinos teriam de esperar até 100 minutos para que um dos seis de satélites deste sistema fosse detetado, registar durante 10 a 20 minutos o desvio Doppler do sinal recebido e a

mensagem de navegação que transportava e processar estas medições em computadores digitais enormes e primitivos quando comparados pelos padrões atuais. Todo este processo iria produzir a latitude e longitude de um navio ou submarino de movimento lento com a precisão de algumas centenas de metros.

3.2 GPS

GPS (Global Positioning System) é um sistema de navegação por satélite. Tal como maioria das tecnologias com grande impacto no quotidiano da população geral, inicialmente o GPS era, exclusivamente, utilizado para fins militares sendo, posteriormente, integrado para uso civil [59]. A integração em meio civil teve como razão a intercepção hostil do voo KAL 007 ocorrida em 1983, intercepção esta que culminou no abate do avião por caças soviéticos. Este incidente levou a que o presidente dos Estados Unidos da América nesse ano, Ronald Reagan, declarasse que o sistema GPS se tornaria livre para uso civil, uma vez que se concluiu que este incidente poderia ser evitado se tal sistema estivesse disponível para tal. Em 1995, o sistema GPS foi considerado totalmente operacional e era constituído por uma constelação de 24 satélites (exemplo de um satélite demonstrado na Figura 21), satélites estes que foram lançados em blocos entre 1978 e 1985, totalizando 29 lançamentos. De notar que, periodicamente, são lançados mais satélites tendo sido lançados desde 1979 mais de 50 satélites como o da Figura 20.



Figura 20 - Satélite GPS

Cada satélite percorre a Terra por duas vezes por dia a uma altitude média de 20 quilómetros. Em qualquer momento, pelo menos quatro satélites, têm de se encontrar disponíveis a partir de qualquer ponto da Terra. Cada satélite tem, a bordo, um relógio atómico e informações tais como elementos orbitais de movimento e um conjunto de estações de observação terrestres. A razão integração de um quarto satélite provém de ser necessário um relógio atómico sincronizado com o GPS para calcular intervalos a partir de três sinais [60]. No entanto, ao fazer uma medição a partir de um quarto satélite, o recetor evita a necessidade de um relógio atómico. Assim, o recetor utiliza quatro satélites para calcular a latitude, longitude, altitude e tempo. Seguidamente, o recetor calcula a diferença entre as distâncias dos quatro satélites pelo intervalo de tempo entre o instante local e o instante em que os sinais foram enviados. A diferença destas distâncias é chamada pseudo-distância. Até meados do ano 2000 o departamento de defesa dos EUA impunha a chamada "disponibilidade seletiva" que consistia num erro induzido ao sinal, impossibilitando que aparelhos de uso civil operassem com precisão inferior a 90 metros. Porém, o presidente Bill Clinton foi pressionado a assinar uma lei que determinava o fim dessa interferência no sinal do sistema [60], sendo possível observar a diferença de precisão do sistema GPS na Figura 21. Desse modo, entende-se que não há garantias que em tempo de guerra o serviço continue à disposição dos civis e com a atual precisão.

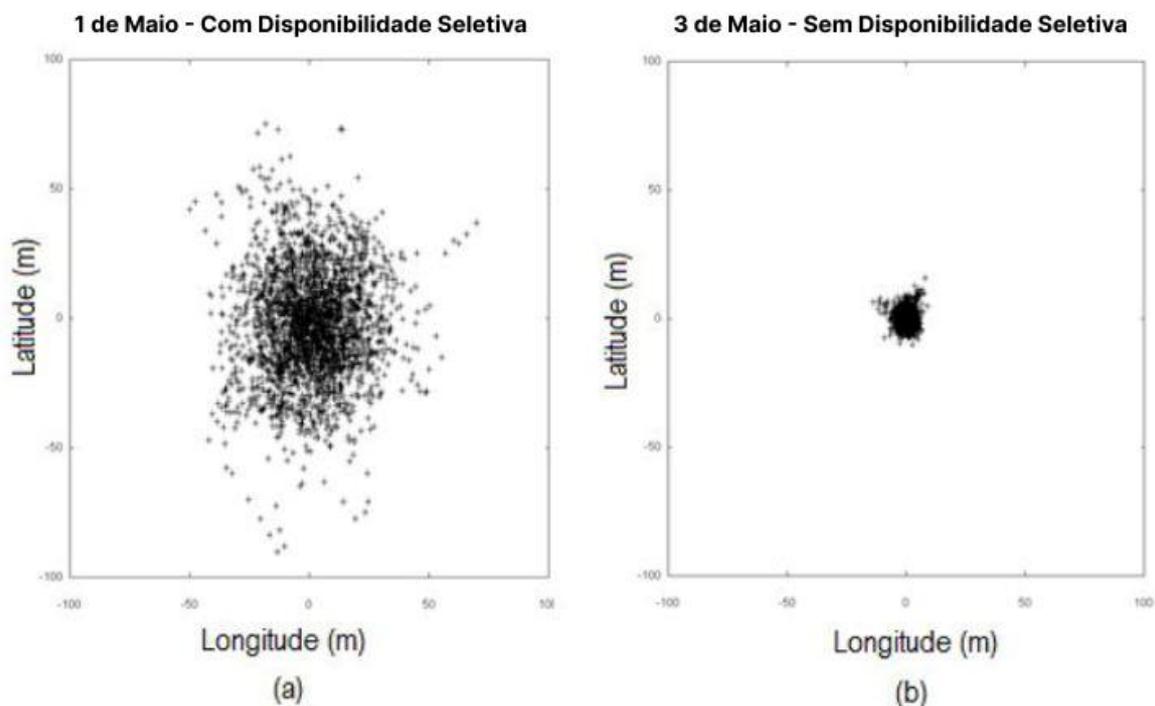


Figura 21 - Melhoria da precisão do posicionamento após a desativação do Acesso Seletivo (SA) em 2 de maio de 2000 [127]

A nível de resumo e de forma a sistematizar cronologicamente os eventos que levaram ao desenvolvimento deste sistema:

- 1973: Decisão de desenvolver um sistema de navegação por satélite;
- 1974-1979: Testar o sistema;
- 1977: Receção de um sinal de uma estação terrestre que simula um satélite do sistema;
- 1978-1985: Lançamento de onze satélites do primeiro grupo (Bloco I);
- 1979: Redução no financiamento do programa e conseqüente decisão de lançar 18 satélites em vez dos previstos 24;
- 1980: Juntamente com a decisão de reduzir a utilização dos satélites Vela para um sistema de rastreio de explosão nuclear, foi decidido atribuir estas funções aos satélites GPS. Lançamento dos primeiros satélites equipados com sensores de deteção de explosões nucleares;
- 1980-1982: Redução adicional do financiamento do programa;
- 1983: Após a morte de um avião de uma companhia aérea coreana abatido sobre o território da URSS, foi tomada a decisão de aplicar o sistema GPS a aplicações civis;
- 1988: Decisão de implantar uma constelação orbital de 24 satélites devido a ser constatado que 18 satélites não seriam capazes de assegurar o bom funcionamento do sistema;
- 1989: Ativação dos satélites do segundo grupo;
- 1990-1991: Encerramento temporário da Disponibilidade Seletiva;

- 1993: Relatório sobre a disponibilidade inicial do sistema e decisão final sobre a concessão do sinal para utilização gratuita da função pública e de particulares;
- 1995: Disponibilidade total do sistema;
- 2000: Desativação da Disponibilidade Seletiva para utilizadores civis, aumentando assim a precisão de 100 para 20 metros;
- 2004: Assinatura de uma declaração conjunta para assegurar a complementaridade e a compatibilidade do Galileo e do GPS;
- 2006: Negociações russo-americanas sobre a cooperação para assegurar a complementaridade dos sistemas de navegação espacial GLONASS e GPS;

Atualmente, o GPS é o sistema de navegação mais preciso do mundo. A última geração de satélites GPS utiliza relógios de rubídio que são precisos até ± 5 partes em 10¹¹. Estes relógios são sincronizados por relógios de césio ainda mais precisos baseados em terra.

3.2.1 Segmento espacial

A constelação de satélites GPS que transmite os sinais necessários para a localização e cronometragem é denominada segmento espacial. Cerca de 30 satélites GPS ativos (e um atualmente em manutenção) estão agora em órbita média da Terra, 20.200 km acima da superfície do planeta.

Estes satélites são posicionados em seis órbitas separadas, cada uma com um período de 12 horas e um ângulo de inclinação de 55 graus. Esta configuração garante que existem sempre quatro satélites GPS ou mais visíveis aos utilizadores no solo, o que é o mínimo necessário para a determinação precisa da localização [61].

Relógios atômicos são instalados em cada satélite GPS para fornecer dados de cronometragem precisos. Os dados de posição, velocidade e tempo são calculados pelo sistema de navegação a bordo do satélite e codificados nos sinais que o satélite transmite.

L1 e L2 são as duas frequências distintas que os satélites GPS utilizam para transmitir os seus sinais.

3.2.2 Segmento de controlo

O segmento de controlo GPS é composto por uma rede de Estações de Monitorização (EM), uma Estação Mestre de Controlo (EMC) e as Antenas Terrestres (AT) [62].

A Estação de Controlo Principal, localizada em Colorado Springs, EUA, é o núcleo do segmento de controlo e é responsável pelo funcionamento do sistema e prestação de serviços de comando, controlo e manutenção do segmento espacial.

As Estações de Monitorização estão distribuídas por todo o mundo. Estão equipadas com os padrões de relógio atômico e recetores GPS para recolher, continuamente, dados de GPS para todos os satélites em linha de vista a partir das suas localizações. Os dados recolhidos são enviados para a Estação de Controlo Principal onde estes são processados para estimar as órbitas de satélite (efemérides), erros de relógio e outros parâmetros e para gerar a mensagem de navegação [63].

Os dados provenientes das antenas terrestres são enviados para os satélites via sinais rádio de banda S (2 a 4 GHz). Estes dados presentes dentro da mensagem de navegação incluem informações relativas

às efemérides e informação de correção do relógio, bem como a telemetria de comando da EMC. Cada satélite pode ser receber estes dados até três vezes por dia, ou seja, de oito em oito horas.

3.2.3 Segmento de utilizador

Os recetores e equipamento que as pessoas e organizações utilizam para receber e decifrar sinais GPS para navegação e outras aplicações são referidos como o segmento do utilizador do GPS [64]. Um recetor GPS é um dispositivo que recebe e analisa os sinais emitidos pelos satélites GPS em órbita à volta da Terra.

Os recetores GPS são utilizados para uma variedade de aplicações, incluindo navegação, topografia, cartografia, cronometragem e investigação científica. Em geral, um recetor GPS consiste numa antena para receber os sinais GPS, um recetor para processar os sinais e extrair a informação de cronometragem e localização e um visor ou outro dispositivo de output para apresentar os resultados ao utilizador.

A gama de dispositivos considerados recetores GPS inclui recetores portáteis, sistemas de navegação em smartphones, tecnologia wearable, e sistemas de navegação veicular.

3.2.4 Sinal GPS

Atualmente existem dois serviços disponíveis no sistema GPS [65]:

- SPS - Standard Positioning Service é um serviço aberto, gratuito para utilizadores mundiais, sendo um serviço de frequência única na frequência banda L1;
- PPS - Precise Positioning Service é restrito por técnicas criptográficas a utilizadores militares e autorizados. Dois sinais de navegação são fornecidos em duas bandas diferentes de frequência, L1 e L2; O sistema GPS também fornece dois sinais adicionais nas frequências referidas como L3 (associados com o Sistema de Detecção de Detonações Nucleares) e L4 (para outros fins militares).

Cada satélite GPS emissor é identificado com um código C/A (Coarse Acquisition ou Clear Access) único e um código P (Precision Code). A pequena extensão do código C/A permite ao recetor sincronizar-se com os diversos satélites dos quais está a receber sinais. Estes códigos são geralmente conhecidos como códigos PRN (PseudoRandom Noise) porque se assemelham a sinais semelhantes a ruído.

Porém, os códigos P e C/A não são meios de transmissão de informação. Estes transportam os dados em bruto a partir dos quais os recetores GPS obtêm as suas medições de tempo e distância.

Código P

O código P (Figura 22) é gerado a uma taxa de 10,23 milhões de bits por segundo [66]. É transportado nas ondas portadoras L1 e L2 e é muito longo (2×10^{14} bits). A cada satélite GPS é atribuída uma parte do código P que depois repete a sua parte a cada semana. Esta atribuição de uma semana em particular do código P de 37 semanas a cada satélite ajuda um recetor GPS a distinguir a transmissão de um satélite de outro.

Existe ainda uma versão encriptada do código P chamada código P(Y). Este sistema de segurança foi ativado em janeiro de 1994 com o intuito de evitar a geração de transmissões falsas disfarçadas de código P.

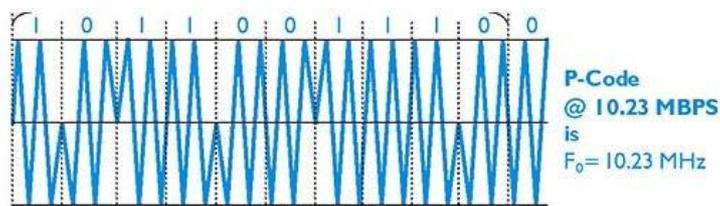


Figura 22 - Código P [128]

Código C/A

O código C/A (Figura 23) é gerado de uma forma 10 vezes mais lenta do que o código P(Y). Cada satélite GPS emite o seu próprio código C/A de 1023 bit completamente único e repete-o a cada milissegundo. O código C/A é difundido apenas na onda portadora L1.

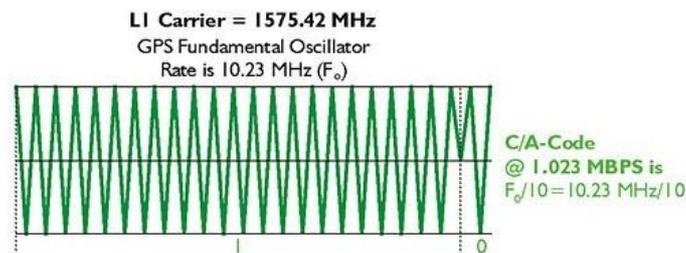


Figura 23 - Código C/A [128]

Nas Figuras 24 e 25 é possível identificar a informação sob a forma de código e a posterior modulação em fase da mesma. Esta informação é transportada nas ondas portadoras.

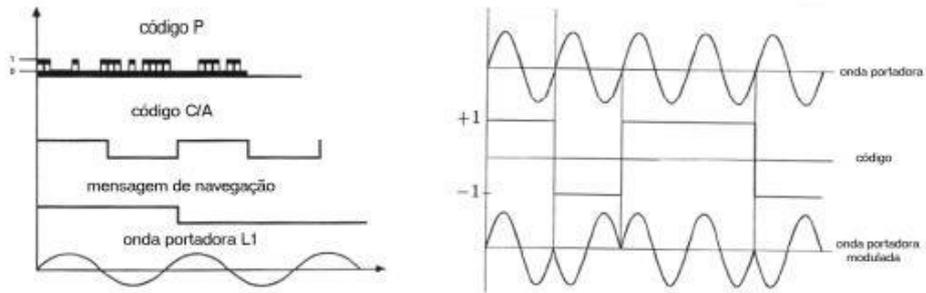


Figura 24 - Modulação em Fase da Informação transportada nas ondas portadoras

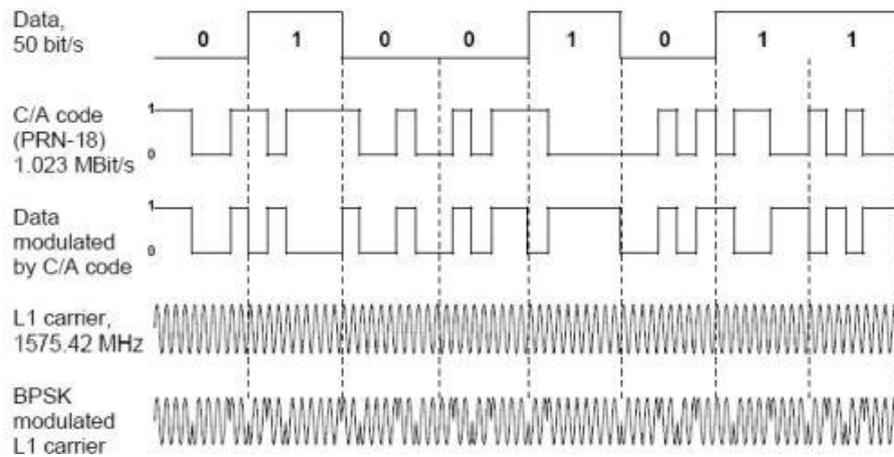


Figura 25 - Exemplo de Modulação em Fase da Informação transportada nas ondas portadoras

3.2.5 Mensagem de navegação GPS

A Mensagem de Navegação é modulada sobre ambas as ondas portadoras a uma taxa de 50 bps. Esta fornece dados sobre as efemérides, desvios do relógio do satélite e estatuto da constelação, entre outras informações.

Em suma, cada satélite GPS emite a informação com uma “assinatura” única, consistindo em códigos pseudo-aleatórios (PRN) [67]. Todos os satélites emitem na mesma frequência, mas com códigos C/A diferentes, sendo a identificação dos satélites e a recuperação da informação efetuados através da correlação sinal réplica [68]. Na Tabela 6 abaixo encontram-se presentes todos os dados relativos a uma mensagem de navegação GPS

Tabela 6 - Características da mensagem de navegação GPS (adaptado de [69])

Characteristic	Description
Message Type	The navigation message consists of five message types: the ephemeris, the almanac, the time, the ionospheric correction, and the health message.
Data Rate	The data rate for the navigation message is 50 bits per second.
Transmission Frequency	The navigation message is transmitted on two carrier frequencies: L1 (1575.42 MHz) and L2 (1227.60 MHz).
Message Length	The length of the navigation message varies depending on the message type. The ephemeris message is 300 bits, the almanac message is 1500 bits, the time message is 20 bits, the ionospheric correction message is 50 bits, and the health message is 25 bits.
Modulation	The navigation message is modulated using a technique called binary phase shift keying (BPSK).
Content	The navigation message contains information about the current time, the position and velocity of each satellite in the constellation, the health status of the satellites, and corrections for ionospheric delay.
Accuracy	The GPS navigation message provides information that enables receivers to calculate their position with an accuracy of about 5 meters (16 feet) in the open sky.

3.3 GLONASS

GLONASS é um sistema de navegação por satélite russo, sendo tal como o mencionado acima sistema GPS um dos sistemas GNSS completamente operacional. Este sistema foi desenvolvido com o intuito de fazer frente e ser uma alternativa ao sistema NAVSTAR GPS desenvolvido pelos Estados Unidos da América e, tal como o seu contraparte, também este foi desenvolvido, inicialmente, para fins militares [69], [70]. No ano de 1976, a agora extinta União Soviética iniciou o desenvolvimento do sistema GLONASS, sendo o primeiro satélite lançado em 1982 e o primeiro teste com quatro satélites realizado em 1984. Tal como o sistema GPS, o número de satélites foi aumentando gradualmente até atingir 10 a 12 satélites, número este que permitiu, em 1993, definir o sistema como operacional, embora não com cobertura global. Após o fim da União Soviética e devido à crise económica advinda da extinção da URSS, os investimentos e financiamento disponíveis para a continuação e progressão do sistema

GLONASS foram bastante reduzidos, levando a um estagnar do projeto [70]. Porém, na década de 2000, a restauração do sistema foi dada como prioridade do atual governo. Após uma reunião do GPS-GLONASS Interoperability and Compatibility Working Group (WG-1) realizada em Dezembro de 2006 em Moscovo, foi anunciado que, no futuro, os satélites GLONASS irão transmitir um CDMA, para além do FDMA. Isto tornaria o GLONASS compatível com os recetores GPS, GALILEO e Compass, que também utilizam o método CDMA. Uma mudança no sistema GLONASS da sua atual técnica FDMA para o formato GPS e Galileo permitiria a um recetor de conceção simples utilizar múltiplos sistemas de satélite simultaneamente.

Ainda na década de 2000, uma nova geração de satélites denominada GLONASS-M foi desenvolvida, tendo esta nova geração de satélites contribuído para a obtenção de um sistema completamente operacional com 24 satélites, possibilitando, assim, cobertura global.

A produção de satélites GLONASS-M terminaria em 2015, sendo os novos satélites GLONASS-K produzidos exclusivamente após o final do último lote dos satélites GLONASS-M.

Atualmente o sistema GLONASS é um sistema totalmente operacional e está disponível para utilizadores em todo o mundo. O sistema está constantemente a ser atualizado e melhorado, com novos satélites a serem lançados regularmente para substituir os mais antigos e para aumentar a capacidade global do sistema. A partir de 2021, a constelação é constituída por 26 satélites, dos quais 23 estão em serviço ativo e 3 em reserva [71]. O sistema é capaz de fornecer uma precisão de posicionamento até 5 metros a céu aberto, embora isto possa variar dependendo de vários fatores, tais como a localização do recetor, o número de satélites visíveis e a presença de obstáculos que podem bloquear o sinal. Além da Rússia, o GLONASS é também utilizado por vários outros países, incluindo a Bielorrússia, Cazaquistão, Arménia e Quirguizistão que adotaram este sistema como o seu sistema de navegação primário ou secundário.

3.3.1 Segmento Espacial

O segmento espacial GLONASS consiste numa constelação de satélites em órbita terrestre média, com uma altitude de cerca de 19.130 km. A constelação atual consiste em 24 satélites, com três satélites suplentes.

Cada satélite da constelação GLONASS tem uma frequência e um código de tempo únicos, permitindo que seja identificado e que os seus sinais sejam processados separadamente por recetores em terra [22], [72]. Os satélites estão dispostos em três planos orbitais, com oito satélites em cada plano [72]. Os planos são separados por aproximadamente 120 graus de longitude, o que assegura que pelo menos quatro satélites sejam visíveis de qualquer ponto da superfície terrestre.

3.3.2 Segmento de controle

Tal como no GPS, o segmento de controle GLONASS [73] demonstrado na Figura 26 monitoriza o estado dos satélites, determina as efemérides e os offsets do relógio do satélite em relação à hora GLONASS e ao Tempo Universal Coordenado (UTC), e, duas vezes por dia, carrega os dados de navegação para os satélites.

O segmento de controle de GLONASS compreende o Centro de Controle de Sistemas (CCS), localizado em Krasnoznamensk (região de Moscovo), a Rede de Estações de Comando e Rastreo, inteiramente localizada dentro território da antiga União Soviética, e o Sincronizador Central (CC-M) e o relógio de sistema em Schelkovo (região de Moscovo) [17]. O CCS coordena todas as funções e operações ao nível do sistema, processa informações das estações de comando e rastreo para determinar o relógio de satélite e os estados de órbita e atualiza a mensagem de navegação para cada satélite.

As estações de comando e rastreo compreendem uma rede principal de cinco Estações de Telemetria, Rastreo e Controle (ETRC) distribuídas pelo território russo.

O Sincronizador Central é responsável pela escala de tempo e está ligado a um sistema de controle de fase que monitoriza o relógio de satélite e sinais.



Figura 26 - Segmento de Controle GLONASS [74]

3.3.3 Segmento de utilizador

O segmento do utilizador de GLONASS é composto por um recetor e uma antena e é responsável pela receção e processamento dos sinais transmitidos pelos satélites GLONASS [75]. A principal função do recetor é determinar a posição, velocidade e tempo do utilizador através do processamento dos sinais GLONASS recebidos. Para executar esta função, o recetor deve primeiro adquirir os sinais GLONASS, segui-los e descodificá-los para extrair a informação necessária para a determinação da posição e do tempo [76].

Para determinar a posição do utilizador, o recetor mede o intervalo de tempo entre o momento em que o sinal foi transmitido pelo satélite e o momento em que foi recebido no recetor. Isto é feito comparando a hora em que o sinal foi transmitido (que está codificado no sinal) com a hora em que foi recebido (que é determinada pelo relógio do recetor). O recetor utiliza então o atraso temporal para calcular a distância entre o satélite e o recetor [77].

Os recetores GLONASS podem utilizar técnicas baseadas em códigos ou em portadoras para determinar o atraso de tempo. As técnicas baseadas em código envolvem a comparação do sinal recebido com uma sequência de código conhecida para determinar o atraso de tempo, enquanto que as técnicas baseadas em portadora envolvem a medição da diferença de fase entre o sinal recebido e um oscilador local.

3.3.4 Sinal GLONASS

Dois serviços estão atualmente disponíveis na Glonass [47]:

- SPS - O Serviço de Posicionamento Padrão (ou Standard Accuracy Signal Service) é um serviço aberto, gratuito para utilizadores de todo o mundo. O sinal de navegação foi inicialmente fornecido apenas na banda de frequência G1, mas desde 2004 os novos satélites Glonass-M também transmitem um segundo sinal civil em G2;
- PPS - O Serviço de Posicionamento Preciso (ou Serviço de Sinal de Alta Precisão) é restrito a utilizadores militares e autorizados. Dois sinais de navegação são fornecidos nas duas bandas de frequência G1 e G2;

Em contraste com os satélites GPS que partilham as mesmas frequências, cada satélite Glonass transmite a uma determinada frequência. Isto determina o número do canal de frequência do satélite e permite que os recetores dos utilizadores identifiquem os satélites (utilizando FDMA - Frequency Division Multiple Access).

Tal como no GPS, o código C/A é inicialmente modulado apenas em G1, enquanto o código militar P é modulado em ambas as frequências portadoras, G1 e G2. Contudo, os novos satélites Glonass-M (a partir de 2004) também transmitem o sinal C/A na banda de frequência G2. Por outro lado, e ao contrário do GPS, no sistema Glonass, as sequências PRN de tais códigos são comuns a todos os satélites, porque o recetor identifica o satélite pela sua frequência (isto aplica-se aos sinais onde a técnica FDMA é utilizada). Para os novos sinais Glonass, os satélites utilizam a mesma frequência e são identificados com diferentes códigos PRN usando o método de acesso CDMA [39]. Na Tabela 7 abaixo encontram-se resumidos os aspetos mais importantes do sinal GLONASS.

Tabela 7 - Sinais GLONASS [129]

Frequência de relógio atómico	$f_0 = 0,511\text{MHz}$
Frequências L1	$9/16(2848 + k) = 1602,000 + 0,5626k$ MHz
Comprimento de onda L1	18,7cm (k=0)
Frequências L1	$7/16(2848 + k) = 1246,000 + 0,4374k$ MHz
Comprimento de onda L1	24,1cm (k=0)
Frequência código P	$10f_0 = 5,11 \text{ Mbps}$
Comprimento de onda código P	58,67m
Período código P	1s
Frequência código C/A	$f_0 = 0,511\text{Mbps}$
Comprimento de onda código C/A	586,7m
Período código C/A	1ms
Frequência mensagem de navegação	50bps
Comprimento de <i>frame</i>	30s (em C/A), 10s (em P)
Comprimento total do <i>frame</i>	2,5min (em C/A), 12min (em P)

3.3.5 Mensagem de Navegação GLONASS

Satélites GLONASS modulam duas mensagens de navegação nos sinais normais C/A e nos sinais P de alta precisão, em que cada mensagem fornece a informação necessária para a obtenção de informações de posicionamento, ou seja, os parâmetros para a computação das coordenadas, os offsets de relógio e outros [78].

A mensagem *standart* C/A é composta por superframes e transmitida continuamente sendo que cada superframe consiste em cinco *frames* de 30 segundos e cada *frame* consiste em 15 *strings* de 2

segundos de duração. O conteúdo da mensagem é dividido em dados imediatos (dados do satélite a transmitir) e dados não imediatos (dados para outros satélites).

Os dados imediatos são repetidos nas primeiras quatro *strings* de cada *frame* e são compostos pelos parâmetros das efemérides, offset do relógio do satélite, estado do satélite e da diferença relativa entre o valor da frequência da portadora e o seu valor nominal. Os dados não-imediatos são difundidos nas *strings* 5 a 15 de cada *frame* (almanaque para 24 satélites). As *frames* I a IV contém o almanaque para 20 satélites (5 por *frame*) e o quinto *frame* contém o almanaque para os restantes 4 satélites.

A estrutura da mensagem de navegação do sinal de alta precisão P não foi publicada oficialmente, ao passo que a estrutura da mensagem de navegação transmitida através de sinais C/A encontra-se abaixo na Tabela 8.

Tabela 8 - Mensagem de navegação GLONASS [130]

Número de frame	Número de string					
1	1	0	Dados imediatos	Kx	MB	
	2	0	Para transmitir	Kx	MB	
	3				MB	
	4	0	Pelo satélite Dados não imediatos (almanaque) para	Kx	MB	
	5				0	MB
	MB
15	0	Cinco satélites	Kx	MB		
2	1	0	Dados imediatos	Kx	MB	
	2	0	Para transmitir	Kx	MB	
	3				MB	
	4	0	Pelo satélite Dados não imediatos (almanaque) para	Kx	MB	
	5				0	MB
	MB
15	0	Cinco satélites	Kx	MB		
3	1	0	Dados imediatos	Kx	MB	
	2	0	Para transmitir	Kx	MB	
	3				MB	
	4	0	Pelo satélite Dados não imediatos (almanaque) para	Kx	MB	
	5				0	MB
	MB
15	0	Cinco satélites	Kx	MB		
4	1	0	Dados imediatos	Kx	MB	
	2	0	Para transmitir	Kx	MB	
	3				MB	
	4	0	Pelo satélite Dados não imediatos (almanaque) para	Kx	MB	
	5				0	MB
	MB
15	0	Cinco satélites	Kx	MB		
5	1	0	Dados imediatos	Kx	MB	
	2	0	Para transmitir	Kx	MB	
	3				MB	
	4	0	Pelo satélite Dados não imediatos (almanaque) para	Kx	MB	
	5				0	MB
	MB
15	0	Cinco satélites	Kx	MB		

3.4 Galileo

Galileo é o sistema de navegação por satélites da União Europeia e, em oposição aos sistemas mencionados cima GPS, GLONASS e BeiDou, não tem origem militar, mas sim origem civil [47], [79]. Em 1999, os três principais agentes da Agência Espacial Europeia (Alemanha, França e Itália) apresentaram e uniram as suas propostas para um sistema de navegação por satélites. Esse sistema viria a ser desenvolvido por uma equipa de engenheiros e cientistas oriundos desses três principais contribuidores e a primeira fase do programa Galileo foi acordada oficialmente em 26 de maio de 2003. Uma das razões apresentadas para o desenvolvimento do Galileo como sistema independente foi que a informação de posição do GPS pode ser significativamente imprecisa pela aplicação deliberada da disponibilidade seletiva universal pelos militares dos EUA [79], [80]. Esta disponibilidade seletiva (função descontinuada em 2000 pelo presidente dos Estados Unidos da América, Bill Clinton) diz que a qualidade do serviço proporcionado pelo sistema GPS pode ser afetada, pois a componente militar apresenta prioridade relativamente ao uso civil. Devido ao GPS ser amplamente utilizado em todo o mundo para aplicações civis, os proponentes do Galileo argumentaram que a infraestrutura civil, incluindo a navegação e aterragem de aeronaves não deveria depender unicamente de um sistema com esta vulnerabilidade.

Por não ter origem militar, o sistema Galileo apresenta vantagens em relação aos outros sistemas. As principais vantagens traduzem-se numa possibilidade deste sistema ser utilizado para transmitir e confirmar pedidos de ajuda em caso emergência, na capacidade de o sistema ser interoperável com os outros sistemas já existentes, permitindo uma maior cobertura de satélites e de garantir disponibilidade universal [80].

O Galileo está atualmente em processo de implementação e ainda não está totalmente operacional. A partir de 2021, o sistema está parcialmente operacional, com 24 dos 30 satélites planeados em órbita e disponíveis para utilização. Espera-se que a plena implementação do sistema esteja concluída até 2026 (fase FOC - Full Operational Capability) [81], altura em que será capaz de fornecer uma cobertura global e precisão de posicionamento de até 1 metro a céu aberto. Para além de ser utilizado para fins civis, o Galileo também se destina a ser utilizado pela UE e pelos seus estados-membros para fins de segurança e defesa.

3.4.1 Segmento Espacial

Os satélites GALILEO enquadram-se na categoria de satélites de média dimensão, pesando cerca de 650 kg em órbita final e produzindo cerca de 1500 watts [82]. A Figura 27 fornece uma ilustração da geometria dos satélites.

Este segmento é composto por uma constelação de 24 satélites operacionais em órbita terrestre média, com 6 satélites adicionais mantidos em reserva em caso de falhas ou outros problemas. A constelação Galileo está dividida em três planos, cada um com 8 satélites, inclinados num ângulo de 56 graus em relação ao equador. Cada satélite viaja numa órbita circular a uma altitude de aproximadamente 23.222 km, com um período orbital de aproximadamente 14 horas [83].

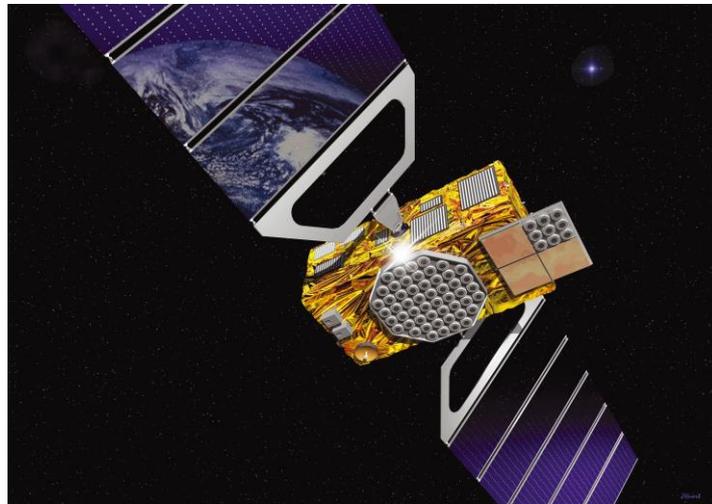


Figura 27 - Satélite Galileo [131]

Para assegurar o bom funcionamento do segmento espacial, os satélites Galileo estão equipados com uma variedade de sistemas e instrumentos, incluindo relógios atômicos, cargas úteis de navegação, equipamento de comunicação e painéis solares para produção de energia [84]. Os satélites também utilizam tecnologias avançadas, tais como as matrizes retrorefletoras de laser e ligações entre satélites para melhorar a precisão e robustez do sistema Galileo.

3.4.2 Segmento de Controlo

O segmento terrestre Galileo (Figura 28) controla toda a constelação de satélites, as instalações do sistema de navegação e dos serviços de divulgação. A fase de FOC (Full Operational Capability) envolve dois Centros de Controlo Terrestre (GCC - Ground Control Centre), cinco estações de Telemetria, Rastreo e Controlo (TTC - Telemetry, Tracking and Control), nove Estações de Ligação de Missão (ULS - Mission

Uplink Stations) e uma rede mundial de Estações de Sensoras Galileo (GSS - Galileo Sensor Stations) [85].

O Segmento de Controlo Terrestre (GCS - Ground Control Segment) é responsável pelo controlo da constelação e gestão dos satélites GALILEO. Fornece a função TTC para toda a constelação de satélites. Os seus elementos funcionais são implantados nos CCTs e nas estações TTC distribuídas globalmente. As estações TTC utilizam antenas de frequência de banda S de 13 metros de diâmetro para proporcionar um intercâmbio seguro de dados entre os centros de controlo e os satélites.

O Segmento de Missão Terrestre (GMS - Ground Mission Segment) é responsável pela determinação e ligação de uplink de dados das mensagens de navegação e integridade necessárias para fornecer o serviço de navegação e transferência de tempo UTC. O GMS inclui uma rede mundial de GSS, recolhendo continuamente dados a serem processados pelo GCC para determinar as mensagens de navegação e de dados de integridade do Galileo.

Cada um dos GSS está equipado com três canais de receção paralelos [86]:

- um para a determinação dos dados da órbita e sincronização do relógio;
- um segundo canal para a determinação da integridade;
- um terceiro canal redundante;

A distribuição geográfica global de tais estações foi seleccionada para assegurar o acesso permanente a qualquer satélite da constelação em qualquer altura.

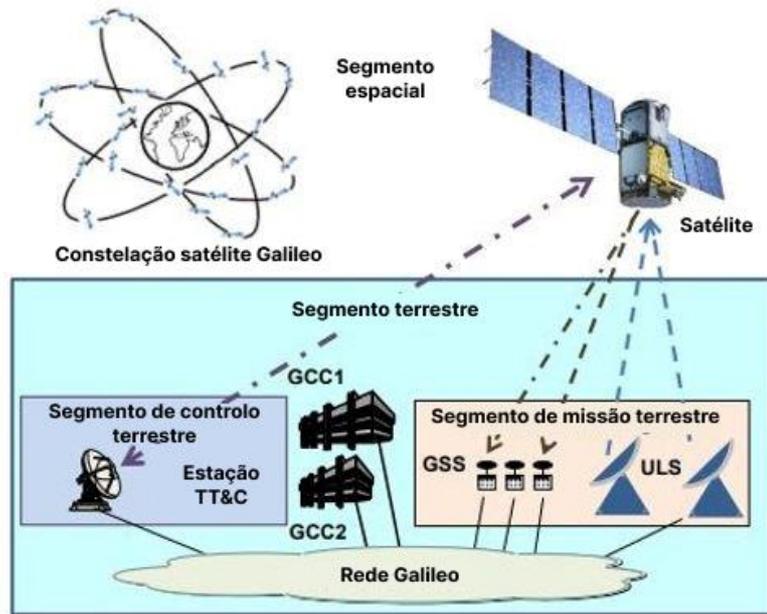


Figura 28 - Segmento de controlo Galileo [132]

3.4.3 Sinal Galileo

Na fase FOC, cada satélite Galileo transmitirá 10 sinais de navegação nas bandas de frequência E1, E6, E5a e E5b e estes encontram-se ilustrados na Figura 29.

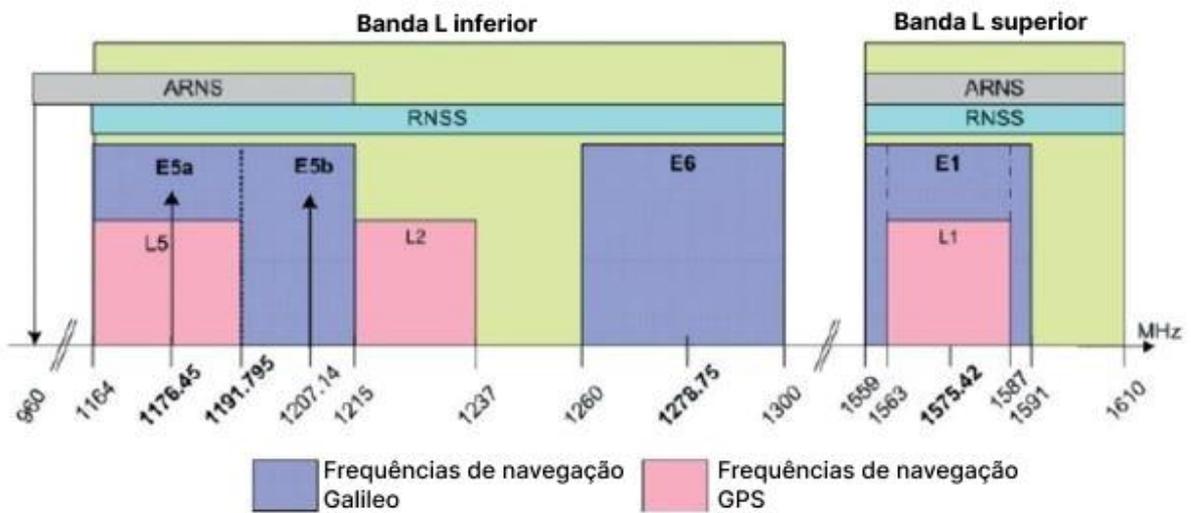


Figura 29 - Bandas de frequência Galileo [133]

Estes sinais foram desenvolvidos para suportar vários serviços baseados nas necessidades dos utilizadores. Os serviços oferecidos por estes sinais são [87]:

- OS - O Serviço Aberto (OS) é gratuito para utilizadores em todo o mundo. São oferecidas até três frequências de sinal separadas. Os recetores de frequência única fornecerão desempenhos semelhantes aos do GPS C/A. Em geral, as aplicações do serviço OS utilizarão uma combinação de sinais Galileo e GPS, o que melhorará o desempenho em ambientes de difícil acesso, tais como áreas urbanas;
- PRS - O Serviço Público Regulamentado (PRS) destina-se às autoridades de segurança (polícia, militares, etc.) que requerem uma elevada continuidade de serviço com acesso controlado. Encontra-se sob controlo governamental. É introduzida uma maior modulação/criptação de sinal para proporcionar robustez contra falsificações. Dois sinais de navegação PRS com códigos e dados encriptados de alcance estão disponíveis;
- CS - O Serviço Comercial (CS) permite o acesso a dois sinais adicionais protegidos por encriptação comercial (dados e mensagens de alcance);
- SAR - Este serviço contribui para o sistema internacional Cospas-Sarsat para Busca e Salvamento (SAR). Um sinal de socorro será transmitido para a o Centro de Coordenação de Salvamento e o Galileo informará os utilizadores que a sua situação foi detetada;
- SoL - O Serviço de Segurança da Vida (SoL) já está disponível para a aviação para Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO);

Tal como no GPS, todos os satélites partilham as mesmas frequências e os sinais são diferenciados pela técnica CDMA.

Um resumo dos sinais, frequências e modulações aplicadas no sistema Galileo é apresentado na Tabela 9 abaixo.

Tabela 9 - Sinais e modulações Galileo [129]

Banda	Frequência Portadora	Canal	Tipo de modulação	Taxa de código (Mbps)	Taxa de dados	Serviços
E1	1575,420	E1-A	BOC	2.5575	N/A	PRS
		E1-B	MBOC		125	OS, CS, SoL
		E1-C			-	
E6	1278,750	E6-A	BOC	5.115	N/A	PRS
		E6-B	BPSK		500	CS
		E6-C			-	
E5a	1176,450	E5a-I	BPSK	10.23	25	OS
		E5a-Q			-	
E5b	1207,140	E5b-I	BPSK	10.23	125	OS,CS, SoL
		E5b-Q				

3.4.4 Mensagem de Navegação Galileo

Os satélites Galileo transmitirão cinco tipos de dados em quatro mensagens de navegação (Tabela 10) [87]:

- Mensagem de Navegação de Acesso Livre (F/NAV);
- Mensagem de Navegação Integral (I/NAV);
- Mensagem de Navegação Comercial (C/NAV);
- Mensagem de Navegação Governamental (G/NAV);

Tabela 10 - Dados de navegação Galileo [129]

Tipo de mensagem	F/NAV	I/NAV		C/NAV	G/NAV	
Serviço	OS	OS/CS/SoL		CS	PRS	
Canais	E5a-I	E1B	E5b-I	E6B	E1A	E6A
Navegação/Posicionamento	X	X	X		X	
Integridade		X	X		X	
Suplementação				X		
Regulação pública					X	
Emergência		X				

A mensagem de navegação completa é transmitida em cada canal de dados como uma sequência de frames [87]. Uma frame compreende um certo número de subframes e uma subframe inclui várias páginas. Esta organização da mensagem de navegação permite que três categorias de dados sejam transmitidas:

- Repetidos a um ritmo rápido (para dados urgentes): página;
- Taxa média (com os dados necessários para um arranque a quente): subframe;
- Velocidade lenta (com os dados necessários para um arranque a frio): frame;

3.5 BeiDou

BeiDou ou Compass é o sistema chinês de navegação global por satélite. A criação deste sistema advém do acesso ao sistema GPS ser negado ao povo chinês pelos Estados Unidos da América devido ao incidente Yinhe, acidente este caracterizado pela suposta carga composta por materiais químicos para aplicações bélicas a bordo de um navio chinês com destino ao Irão [88].

De acordo com a China National Space Administration, o desenvolvimento deste sistema passaria por três fases [89]:

- 2000-2003: sistema experimental de navegação BeiDou constituído por três satélites;
- 2004-2012: sistema de navegação regional BeiDou cobrindo a China e regiões vizinhas;
- 2013-2020: sistema de navegação global BeiDou;

Tal como os outros sistemas mencionados anteriormente, também este sistema começou com uma versão inicial do projeto (versão esta com características insuficientes para ser considerado um sistema de navegação global) chamada BeiDou-1 e era composto por 4 satélites ((três satélites de trabalho e um satélite de reserva) e, por isso, apresentava aplicações limitadas. Ao contrário dos sistemas GPS, GLONASS e Galileo que utilizam satélites de órbita terrestre média, BeiDou-1 utilizou satélites em órbita geoestacionária. Isto significa que o sistema não requer uma grande constelação de satélites, mas também limita a cobertura a áreas na Terra onde os satélites são visíveis [90]. A área de cobertura deste sistema encontra-se representada pela Figura 30.

Posteriormente, a iteração seguinte denominada Compass ou BeiDou-2 apresentou melhorias relativamente à sua versão anterior, não sendo uma extensão desta, mas sim uma substituição total [91]. O novo sistema é uma constelação de 44 satélites, que incluem 7 satélites em órbita geoestacionária para compatibilidade retroativa com BeiDou-1, 10 satélites em órbita inclinada geossíncrona e 27 satélites não geoestacionários, que oferecem uma cobertura completa do globo terrestre. O serviço civil gratuito tem uma precisão de localização de 10 metros, sincroniza relógios com uma precisão de 10 nanossegundos e mede velocidades até 0,2 m/s, ao passo que o serviço militar tem uma precisão de localização de 10 centímetros.

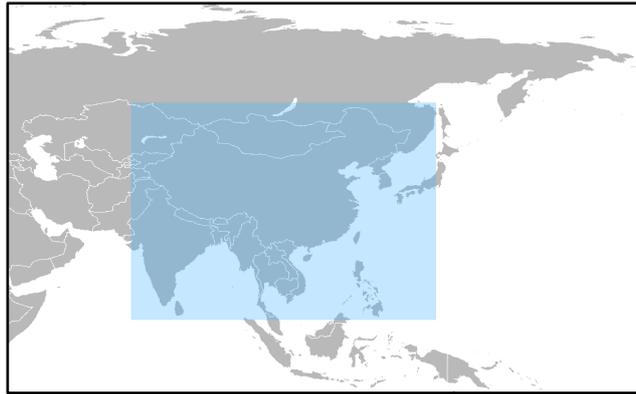


Figura 30 - Cobertura do sistema BeiDou

Em 2015, a China lançou a terceira geração do sistema BeiDou (BeiDou-3) geração esta que oferece cobertura global. O primeiro satélite BDS-3 foi lançado a 30 de março de 2015 e em 23 de junho de 2020 a implantação da constelação BDS-3 foi totalmente concluída após o último satélite ter sido lançado com êxito.

O sistema BeiDou está totalmente operacional e está disponível para utilização por utilizadores em todo o mundo. O sistema é constantemente atualizado e melhorado, com novos satélites a serem lançados regularmente para substituir os mais antigos e para aumentar a capacidade global do sistema [92].

3.5.1 Segmento Espacial

O sistema de navegação por satélite BeiDou (BDS) fornece serviços de posicionamento, navegação e cronometragem [93], [94]. O segmento espacial BDS consiste em dois tipos de satélites: os satélites de órbita média terrestre (MEO) e os satélites de órbita terrestre geoestacionária (GEO) [95].

A constelação MEO consiste em 35 satélites que estão localizados em três órbitas inclinadas com um ângulo de inclinação de 55° . Os satélites MEO orbitam a uma altitude de aproximadamente 21.000 quilômetros, com um período de 12 horas e 57 minutos e são utilizados para fornecer serviços globais de navegação e posicionamento emitindo sinais em duas bandas de frequência: a banda B1 (1561,098 MHz) e a banda B2 (1207,14 MHz).

A constelação GEO é constituída por sete satélites que se encontram em órbita geoestacionária. Os satélites GEO são colocados a uma altitude de aproximadamente 36.000 quilômetros e fornecem cobertura sobre a região da Ásia-Pacífico. Estes são utilizados principalmente para transmitir sinais para o Sistema de Aumento Baseado em Satélites BeiDou (SBAS), que é utilizado para melhorar a precisão e fiabilidade dos sinais BDS.

O segmento espacial BeiDou foi concebido para fornecer uma gama de serviços, incluindo o Serviço Aberto (OS) e o Serviço Público Regulamentado (PRS) [95]. O primeiro é um serviço gratuito que fornece informação de posicionamento, navegação e cronometragem a utilizadores civis e o segundo é um serviço seguro que é reservado a utilizadores autorizados, tais como as agências militares e governamentais.

A última geração de satélites BeiDou, conhecida como a constelação BeiDou-3, consiste em satélites MEO e GEO que utilizam tecnologias avançadas para fornecer serviços de posicionamento, navegação, e cronometragem mais precisos e fiáveis.

3.5.2 Segmento de Controlo

O segmento de controlo BeiDou consiste em três centros de controlo, que são responsáveis pela monitorização e controlo da constelação de satélites. Estes centros de controlo estão localizados nas cidades de Pequim, Kunming e Urumqi na China. São responsáveis pela monitorização da saúde e do estado dos satélites, calculando a órbita dos satélites e as correções do relógio e carregando estas correções para os satélites [96].

O segmento de controlo inclui também uma rede de estações de monitorização, que são responsáveis pela localização dos satélites e pela recolha de dados sobre o seu estado e desempenho. As estações de monitorização estão localizadas na China e noutros países em todo o mundo. Os dados recolhidos por estas estações são transmitidos para os centros de controlo, onde são analisados e utilizados para tomar decisões sobre o funcionamento da constelação de satélites [96].

Para além dos centros de controlo e estações de monitorização, o segmento de controlo BeiDou inclui uma rede de estações de uplink que são responsáveis pela transmissão de dados e comandos aos satélites.

3.5.3 Sinais BeiDou

Sinais BeiDou são transmitidos na banda L em três frequências de rádio, referidas nesta dissertação para melhor compreensão e com o intuito de evitar confusão como as bandas B1, B2 e B3.

O sistema oferece dois serviços [97]:

- Serviço Aberto - O SPS (Standard Accuracy Signal Service) é um serviço aberto e gratuito para todos os utilizadores;

- Serviço Autorizado - Este serviço assegurará uma utilização muito fiável, fornecendo serviços de posicionamento, velocidade e cronometragem mais seguros, bem como um sistema de informação para utilizadores autorizados;

Na Tabela 11 estão representados os sinais B1, B2 e B3 e as respetivas características.

Tabela 11 - Sinais e características BeiDou [134]

Banda	Frequência Portadora	Canal	Tipo de modulação	Taxa de código (Mbps)	Taxa de dados	Serviços
B1	1575,420	E1-A	MBOC	1.023	50	Aberto
		E1-B			-	
		E1-C	BOC	2.046	50	Autorizado
B2	1191,795	B2-a_D	AltBOC	10.23	25	Aberto
		B2-a_P			-	
		B2-b_D			50	
		B2-b_P			-	
B3	1268,52	B3	QPSK	10.23	500	Autorizado
		B3-A_D	BOC	2.5575	50	
		B3-A_P				

Em comparação com as gerações anteriores do BeiDou, os satélites têm vindo a fornecer maior largura de banda e precisão [98]. O sistema melhorou o seu desempenho após completar a sua terceira fase, atingindo uma precisão de 1 m para uso público e 1 cm para uso militar encriptado.

O sistema é um sistema de comunicação bidirecional, que lhe permite identificar a localização dos recetores. Os dispositivos compatíveis com BeiDou podem transmitir dados para os satélites, mesmo em mensagens de texto de até 1.200 caracteres chineses.

GPS, GLONASS (Rússia), e Galileo (U.E.) atuam principalmente como faróis, emitindo sinais captados por milhares de milhões de dispositivos que os utilizam para determinar a sua posição precisa na Terra. Por outro lado, o sistema BeiDou é um sistema de comunicação bidirecional, que é diferente dos outros três sistemas mencionados anteriormente.

Em comparação, o GPS, GLONASS e Galileo apenas enviam sinais de satélites para recetores e não têm qualquer ideia de quem e onde estão os recetores. Embora esta função particular proporcione conveniência em alguns casos, esta pode ser considerada uma falha.

Para além da desvantagem intrínseca da transmissão nos dois sentidos comprometer a precisão e ocupar uma maior largura de banda, esta levanta preocupações de segurança [99]. Por exemplo, o Ministério da Ciência e Tecnologia de Taiwan recomendou que as agências nacionais de defesa

monitorizassem os sinais transmitidos pelo sistema BeiDou, pois este pode seguir os utilizadores através da instalação de malware e da partilha de informação através de sinais de navegação ou de mensagens.

3.6 QZSS

O Sistema de Satélite Quasi-Zenith (QZSS) é um sistema de navegação por satélite desenvolvido pelo governo japonês. O projeto teve início em 2002 e o primeiro satélite foi lançado em 2010. O principal objetivo do QZSS é melhorar a disponibilidade, precisão e fiabilidade do GPS na região da Ásia-Oceânia [100].

O projeto QZSS foi iniciado em resposta à necessidade de um sistema de navegação regional que pudesse fornecer informações de posicionamento e cronometragem mais precisas e fiáveis do que apenas o GPS [101]. O projeto foi liderado pela Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA) e pelo Ministério dos Assuntos Internos e das Comunicações (MIC) do Japão.

3.6.1 Segmento Espacial

O segmento espacial QZSS consiste em cinco satélites em órbita, os quais são conhecidos como satélites Michibiki [102]. O desenvolvimento destes satélites começou em 2002 e o primeiro satélite foi lançado em 2010. Como demonstrado na Figura 31, os satélites Michibiki têm uma configuração orbital única dado que operam numa órbita altamente inclinada e elíptica com um apogeu localizado sobre o Japão, que é conhecida como a órbita quase-zenital, órbita esta localizada entre 32000 e 40000 quilómetros. [103].

O segmento espacial QZSS proporciona muitos benefícios, incluindo uma melhor precisão de posicionamento, disponibilidade e fiabilidade. A órbita inclinada dos satélites de Michibiki permite-lhes passar mais tempo sobre a região Ásia-Pacífico, proporcionando uma melhor cobertura e reduzindo o bloqueio de sinal causado por edifícios e terrenos [104]. Além disso, o sistema QZSS pode melhorar a precisão da informação de posicionamento em áreas urbanas, onde os reflexos de sinal podem causar erros *multipath*.



Figura 31 - Órbita dos satélites QZSS [135]

O sistema QZSS foi concebido para funcionar em conjunto com o GPS e é compatível com os dispositivos habilitados para GPS. Os sinais QZSS são transmitidos nas mesmas frequências que os sinais GPS, e utilizam os mesmos códigos e esquemas de modulação. Isto permite a recepção simultânea de sinais QZSS e GPS, melhorando a precisão e fiabilidade da informação de posicionamento e cronometragem.

3.6.2 Segmento de Controlo

O segmento de controlo do QZSS é responsável pela manutenção da saúde, estado, e precisão do sistema através da monitorização do desempenho dos satélites, ajustando as órbitas dos satélites, e sincronizando os relógios dos satélites [105]. Este é composto por dois elementos principais: a Estação de Controlo Principal (MCS – Main Control Station) e as Estações de Monitorização (MSs – Monitoring Stations).

A MCS é responsável pela gestão da operação global do sistema QZSS, incluindo o controlo das operações dos satélites, determinação da órbita e sincronização dos relógios. A MCS recebe dados de telemetria dos satélites QZSS, executa cálculos de órbita e relógio, gera os comandos necessários para

manter a saúde e precisão do sistema e também é responsável pela geração das mensagens de navegação que são transmitidas pelos satélites QZSS para os utilizadores.

As estações de monitorização são uma rede de estações terrestres que são responsáveis pelo acompanhamento dos satélites QZSS, pela medição dos sinais transmitidos pelos satélites e pela transmissão dos dados para a MCS. As MSs estão distribuídas por toda a região Ásia-Oceânia e estão equipados com equipamento avançado de rastreio e medição para fornecer dados precisos e oportunos ao MCS [106].

O segmento de controlo QZSS representado na Figura 32 foi concebido para fornecer um elevado nível de redundância e tolerância a falhas para assegurar a fiabilidade e disponibilidade do sistema. A MCS está equipada com sistemas de backup para assegurar a continuidade das operações em caso de falha, e as MSs são configuradas numa rede redundante para fornecer múltiplas fontes de dados à MCS.



Figura 32 - Segmento de Controlo QZSS [135]

3.6.3 Segmento de utilizador

O segmento de utilizador QZSS foi concebido para fornecer serviços precisos e fiáveis de posicionamento, navegação e cronometragem aos utilizadores no Japão e na região da Ásia-Oceânia [100]. O segmento de utilizadores inclui uma vasta gama de dispositivos tais como smartphones, sistemas de navegação automóvel, e equipamento agrícola de precisão.

O sistema QZSS fornece várias características únicas que não estão disponíveis noutros sistemas GNSS. Uma das principais características é a utilização de uma órbita geossíncrona altamente inclinada (IGSO) e uma órbita quasezenita (QZO) para melhorar o desempenho do sistema em desfiladeiros urbanos e regiões montanhosas.

3.6.4 Sinal QZSS

Os sinais QZSS representados na figura 29 são transmitidos em duas bandas de frequência, L1 e L5. A banda L1 é utilizada para serviços padrão de posicionamento e cronometragem, enquanto que a banda L5 é utilizada para aplicações críticas de segurança, tais como aviação e navegação marítima. O QZSS também transmite sinais numa frequência única da banda L, denominada LEX, que é utilizada para sistemas de aumento por satélite (SBAS) e outras aplicações de alta precisão [107].

A estrutura de sinais QZSS é baseada na estrutura de sinais GPS e Galileo, com códigos de modulação e difusão semelhantes. Os sinais QZSS são modulados utilizando a modulação BOC (binary offset carrier), que proporciona maior resistência a multipath e interferência em comparação com a modulação tradicional de teclado de mudança de fase binária (BPSK) utilizada no GPS [108].

O QZSS emprega também várias técnicas avançadas de processamento de sinais, tais como correção ionosférica e aumento baseado em satélite, para melhorar a precisão e fiabilidade do posicionamento. Os sinais QZSS são transmitidos com níveis de potência mais elevados em comparação com o GPS, o que permite uma melhor receção de sinal em ambientes urbanos e interiores. Os sinais QZSS (Tabela 12) são compatíveis com os sinais GPS e outros sinais GNSS, permitindo uma integração perfeita com os recetores GNSS existentes. Esta compatibilidade permite também a utilização de multiconstelação e posicionamento multifrequência, o que melhora a precisão e fiabilidade do posicionamento.

Tabela 12 - Banda de frequências dos sinais QZSS [136]

Frequência Sinal	Frequência (MHz)	Componentes de sinal	Método de modulação	Largura de banda (MHz)	Compatibilidade
L1	1575,42	L1 C/A	BPSK	24	GPS L1
		L1C piloto	TMBOC		
		L1C dados	BOC		SBAS
		L1-SAIF	BPSK		
L2	1227,6	L2CM	BPSK	24	GPS L2
		L2CL	BPSK		
L5	1176,45	L5I	BPSK	25	GPS L5
		L5Q	BPSK		
L6 (LEX)	1278,75	L6I	CSK	42	Sinais Experimentais
		L6Q	CSK		

3.7 IRNSS

O Sistema de Navegação por Satélite Regional Indiano (IRNSS), também conhecido como NavIC (Navigation with Indian Constellation) é o sistema de navegação por satélite da Índia. Foi desenvolvido para fornecer serviços de navegação aos utilizadores militares e civis da Índia e para reduzir a dependência do país de sistemas de satélites estrangeiros tais como o GPS.

O desenvolvimento do IRNSS começou em 1999 com a formação do comité da Organização Indiana de Pesquisa Espacial (ISRO) para examinar a viabilidade de um sistema de navegação regional. Em 2006, o projeto foi aprovado e a constelação inicial de sete satélites foi planeada para ser lançada até 2012. No entanto, devido a várias questões técnicas, o primeiro satélite só foi lançado em 2013 e o satélite final foi lançado em 2018, tornando o IRNSS totalmente operacional [109].

3.7.1 Segmento Espacial

O segmento espacial IRNSS consiste em sete satélites em órbita dos quais três satélites encontram-se em órbita geoestacionária e quatro em órbita geossíncrona inclinada [110], órbitas estas exemplificadas na Figura 33.

Os satélites IRNSS estão também equipados com relógios atômicos que fornecem informações de tempo altamente precisas. Os relógios são sincronizados com o Tempo Padrão Indiano (IST) mantido pelo Laboratório Nacional de Física, o que permite aos utilizadores sincronizar os seus relógios com o IST com alta precisão.

O sistema IRNSS foi concebido para ser compatível com outros sistemas globais de navegação por satélite tais como GPS, GLONASS, e Galileo, o que proporciona aos utilizadores uma melhor precisão de posicionamento e fiabilidade.

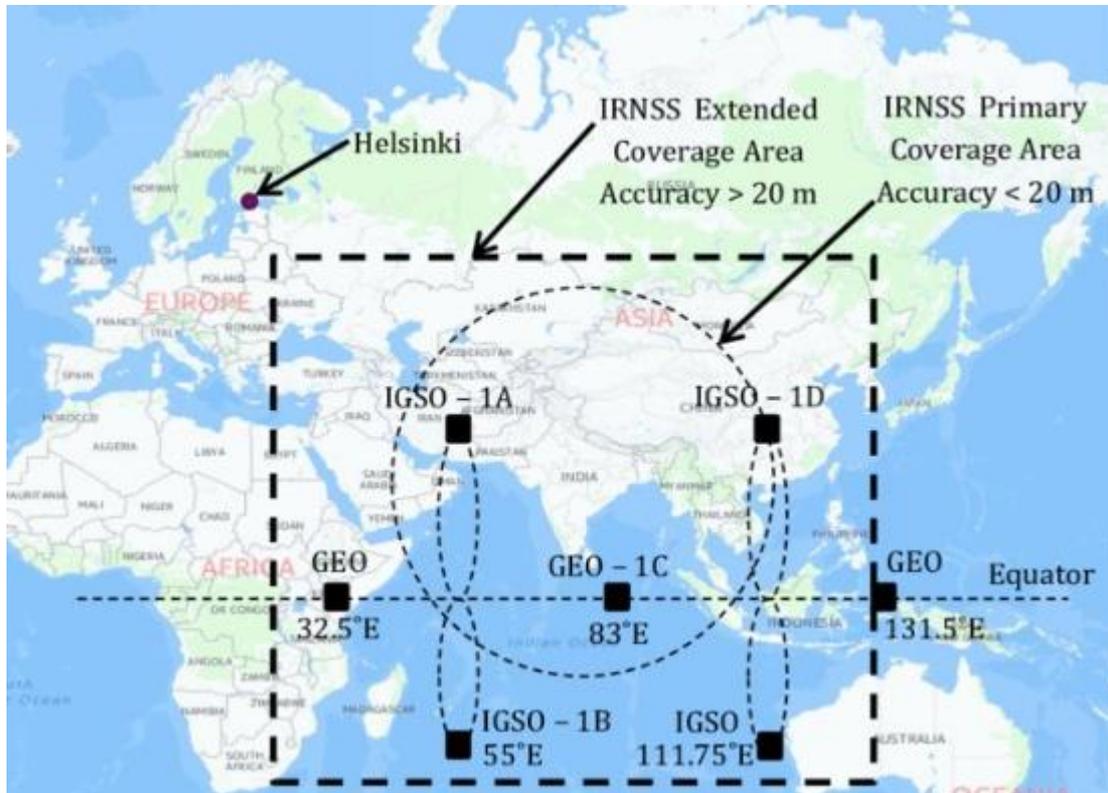


Figura 33 - Segmento Espacial IRNSS [137]

3.7.2 Segmento de controlo

A secção de controlo do Sistema de Navegação por Satélite Regional Indiano (IRNSS) está encarregue de gerir e operar a constelação de satélites. A Master Control Facility (MCF) baseado em Hassan, Karnataka e uma rede de estações de controlo terrestres constituem o segmento de controlo [111].

A MCF, que serve como peça central do segmento de controlo, é responsável pela supervisão de todo o desempenho da constelação de satélites. O estado dos satélites é acompanhado sendo também enviadas diretivas para quaisquer operações necessárias, tais como correções de órbita e alterações para os manter no lugar.

O segmento de controlo compreende também uma série de estações terrestres adicionais. Estas estações terrestres são responsáveis pela localização de satélites, monitorização e sincronização de sinais e envio de mensagens de navegação ao segmento de utilizador. A secção de controlo do IRNSS

foi desenvolvida, concebida e implementada pela Organização de Investigação Espacial Indiana (ISRO) e tem como objetivo garantir o funcionamento eficaz e fiável da constelação.

3.7.3 Segmento de utilizador

O segmento de utilizador do Sistema de Navegação por Satélite Regional Indiano (IRNSS) é o componente que interage diretamente com os utilizadores finais e fornece serviços de navegação e cronometragem. Este compreende uma vasta gama de dispositivos tais como recetores, smartphones e outros equipamentos de navegação que recebem sinais dos satélites IRNSS para determinar a sua posição, velocidade e tempo [112].

Este segmento foi concebido para fornecer vários serviços a diferentes tipos de utilizadores. Estes serviços incluem o Serviço de Posicionamento Padrão (SPS), Serviço Restrito (RS), e Serviço de Precisão (PS). O SPS é um serviço gratuito disponível a todos os utilizadores e fornece precisão de posicionamento de cerca de 10 metros. O RS é um serviço encriptado concebido para utilizadores autorizados, tais como agências governamentais e fornece um nível mais elevado de segurança e precisão. O PS é um serviço de alta precisão destinado a aplicações específicas tais como topografia e investigação científica e fornece uma precisão ao nível dos centímetros [113].

3.7.4 Sinais IRNSS

O sistema IRNSS utiliza dois tipos de sinais: L5 e banda S [114].

O sinal L5 é transmitido a uma frequência de 1176,45 MHz e destina-se a ser utilizado em recetores de dupla frequência. Este sinal é modulado com a mensagem de navegação e inclui um sinal piloto para a aquisição e seguimento do sinal.

O sinal da banda S é transmitido a uma frequência de 2492,028 MHz e destina-se a ser utilizado em recetores de frequência única. Este sinal é também modulado com a mensagem de navegação e inclui, também tal como os sinais de banda L5, um sinal piloto para aquisição de sinal e rastreio [115].

Os sinais IRNSS são transmitidos utilizando a tecnologia CDMA (Code Division Multiple Access). Cada satélite da constelação utiliza um código único para distinguir o seu sinal de outros sinais no sistema. Os códigos são gerados por um gerador de números pseudoaleatórios e são utilizados para modular o sinal. Globalmente, os sinais IRNSS são concebidos para fornecer serviços de posicionamento e navegação precisos e fiáveis aos utilizadores na Índia e nas regiões circundantes. A utilização de múltiplas

frequências e tecnologia CDMA ajuda a mitigar a interferência do sinal e a melhorar a precisão e robustez do sistema.

3.8 Comparação Sistemas GNSS

Neste capítulo, as diferentes soluções tecnológicas apresentadas no capítulo anterior vão ser alvo de comparação relativamente à eficiência, utilização do público em geral, robustez, etc.

Atualmente, existem quatro sistemas GNSS que constituem um sistema totalmente operacional. O Sistema de Posicionamento Global NAVSTAR dos Estados Unidos (GPS) apresenta capacidades totalmente operacionais desde 1995. O GLONASS russo foi restaurado em dezembro de 2011, tendo essa restauração resultado em capacidades operacionais completas. O sistema de posicionamento Galileo da União Europeia é operacional desde 2016. A China iniciou rapidamente o desenvolvimento do seu sistema de navegação global BeiDou, que atingiu capacidades globais de operação total em 2020. Há também o desenvolvimento paralelo de diferentes satélites sistemas de navegação para diferentes países tais como a Índia e o Japão.

Estes sistemas partilham muitas semelhanças na sua arquitetura básica e funcionamento. No entanto, existem algumas diferenças fundamentais entre elas. Uma grande diferença é o número de satélites em cada sistema. O GPS tem actualmente 31 satélites operacionais na sua constelação, enquanto o GLONASS tem 23, o Galileo tem 24 e o BeiDou tem 44. Quanto mais satélites um sistema tiver, melhor será a cobertura e precisão que pode proporcionar.

Outra diferença são os tipos de órbita utilizados por cada sistema. O sistema GPS e o sistema Galileo utilizam órbitas circulares, enquanto que o sistema GLONASS e BeiDou utilizam órbitas elípticas. As órbitas elípticas podem proporcionar uma melhor cobertura em altas latitudes, mas também podem levar a maiores erros de posição devido à alteração da geometria dos satélites.

As frequências utilizadas por cada sistema encontram-se demonstradas na Figura 34 e são também diferentes. O sistema GPS e Galileo utilizam frequências da banda L, enquanto o sistema GLONASS e BeiDou utilizam frequências tanto da banda L como da divisão de frequências duplex (FDD). As frequências FDD podem proporcionar melhor rejeição de interferências e maior capacidade, mas também podem ser mais complexas de implementar.

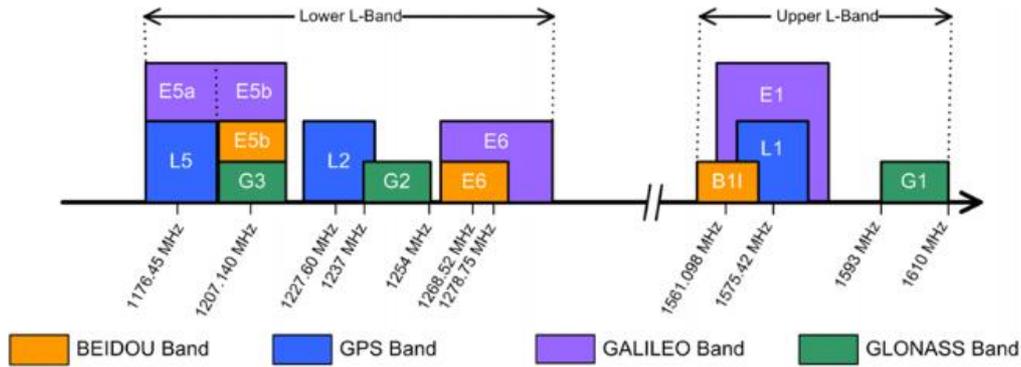


Figura 34 - Sinais GNSS [116]

Finalmente, cada sistema tem o seu próprio conjunto único de códigos de sinal e esquemas de modulação. Estes podem afetar fatores tais como a força do sinal, precisão e resistência à interferência. A Tabela 13 mostra uma comparação entre os sistemas GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou relativamente à sua origem, alcance, altitude, período, número de satélites, frequências, estado, precisão e configuração.

Tabela 13 - Comparação sistemas GNSS

Sistema	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
Origem	Estados Unidos da América	Rússia	União Europeia	China
Alcance	Global	Global	Global	Global
Altitude	20,180 km	19,130 km	23,222 km	21,150 km
Período	11h58min	11h16min	14h05min	12h38min
Satélites	31 satélites operacionais	23 satélites operacionais	24 satélites operacionais	44 satélites operacionais
Plano orbital	6	3	3	3
Inclinação Orbital	55 graus	64,8 graus	56 graus	55 graus
Frequências	1.563–1.587 GHz (L1) 1.215–1.2396 GHz (L2) 1.164–1.189 GHz (L5)	1.593–1.610 GHz (G1) 1.237–1.254 GHz (G2) 1.189–1.214 GHz (G3)	1.559–1.592 GHz (E1) 1.164–1.215 GHz (E5a/b) 1.260–1.300 GHz (E6)	1.561098 GHz (B1) 1.589742 GHz (B1-2) 1.20714 GHz (B2) 1.26852 GHz (B3)
Estado	Operacional	Operacional	Operacional	Operacional
Precisão	0.3–5 m	2–4 m	1 m	3.6 m para uso civil e 0.1 m para uso encriptado
Codificação	CDMA	CDMA e FDMA	CDMA	CDMA

4. GNSS NO FUTURO

Num futuro próximo, o GNSS e outros serviços de localização não só trabalharão em conjunto como o serviço de posicionamento oferecido será ainda mais preciso. Isto permitirá melhores capacidades de mapeamento e navegação em dispositivos que exijam elevada precisão. Com maior precisão e mais sinais, os recetores disponíveis no mercado atual para as massas serão quase ou tão precisos como os atuais dispositivos de alta precisão. Isto poderá abrir indústrias e possibilidades de consumo que ainda nem sequer previmos.

Globalmente, o futuro do GNSS parece brilhante, com uma vasta gama de desenvolvimentos e aplicações interessantes no horizonte. Desde posicionamento de alta precisão e navegação melhorada, a aplicações espaciais e não só, o GNSS continuará a desempenhar um papel vital na nossa vida quotidiana durante os próximos anos.

4.1 Multi-GNSS

Relativamente ao futuro dos GNSS, este passa pelo conceito de multi-GNSS, ou seja, vários sistemas de navegação global por satélite em cooperação.

As vantagens de um sistema multi-GNSS seriam [117]:

- Aumento da qualidade do posicionamento (maior precisão de localização) devido ao maior número de satélites em comparação com posicionamento apenas por GPS;
- Melhor taxa de sucesso de posicionamento através da receção de mais sinais de satélite mesmo em ambientes difíceis (ambientes urbanos, por exemplo) onde o posicionamento apenas por GPS é difícil;
- Melhor robustez contra interferências devido à utilização de diferentes bandas de frequências;

Ao nível das aplicações possíveis com multi-GNSS, as áreas que mais iriam beneficiar seriam a área dos Sistemas de navegação e telemática automóvel (sistemas de navegação/infoentretenimento, eCall, ERA-GLONASS, etc.), área dos Sistemas de Transporte Inteligentes (monitorização de veículos, etc.), Sistemas de Informação Geográfica (trabalhos de construção informatizados, etc.), Serviços baseados na localização (aplicações de Realidade Aumentada, etc.), Aplicações com cronometragem precisa (transferência de tempo, etc.) e Sistemas de gestão de prevenção de catástrofes (monitorização de surtos sísmicos e desabamentos de terras, monitorização de barragens, etc.).

Tendo em conta as áreas de aplicação acima mencionadas, os serviços por elas proporcionados podem ser subdivididos nas seguintes áreas de atuação:

- Serviços Baseados na Localização (LBS);
- Estrada;
- Aviação;
- Caminho de ferro;
- Marítimo;
- Agricultura;
- Vigilância;

4.1.1 Serviço Baseado na Localização (LBS)

As aplicações GNSS são suportadas por várias categorias de dispositivos, principalmente smartphones e tablets, mas também por equipamento específico, como dispositivos de localização, câmaras digitais, computadores portáteis e equipamento de fitness. Estes dispositivos suportam uma multiplicidade de aplicações feitas à medida para satisfazer diferentes condições e necessidades de utilização. Estes dispositivos oferecem vários serviços desde navegação, mapeamento, segurança, desportos, jogos virtuais e redes sociais.

De acordo com a Figura 35 em 2014 somente cerca de 23 por cento de todos os recetores LBS tinha acesso a todos os sistemas GNSS. Com o conceito futuro de multi-GNSS a tendência seria para esse número aumentar, bem como a qualidade dos serviços oferecidos pelos dispositivos utilizados no dia a dia.

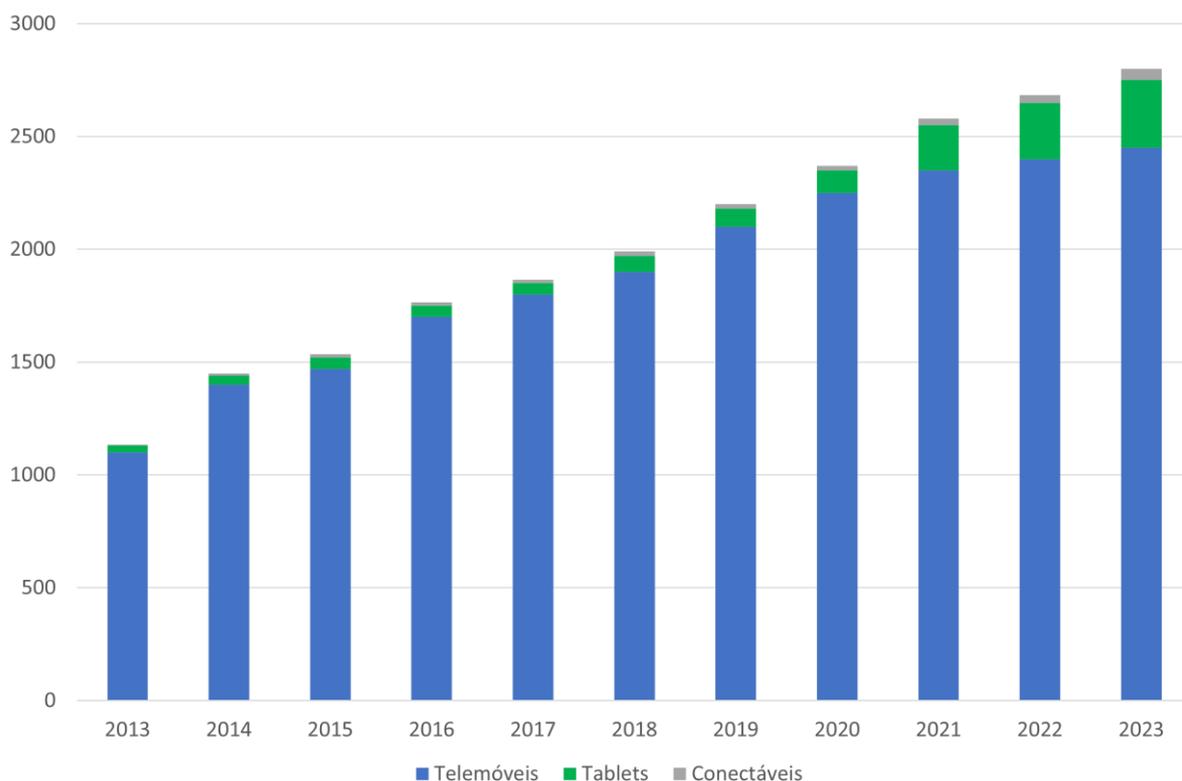


Figura 35 - Percentagem e número de dispositivos GNSS vendidos desde 2013 [121]

4.1.2 Estrada

As aplicações de mobilidade inteligente melhoradas através de multi-GNSS aumentam a eficiência, eficácia e conforto do transporte rodoviário.

A navegação, a aplicação mais difundida, irá proporcionar, indicações mais precisas aos condutores.

Alguns exemplos incluem:

- Serviços de monitorização do tráfego rodoviário por satélite;
- Recolha de dados da localização de veículos e dispositivos móveis, processamento destas informações de tráfego e distribuição aos utilizadores;
- Aplicações para a segurança com um posicionamento preciso e seguro em situações com danos potenciais para os seres humanos ou danos a um sistema e/ou ambiente;
- Rastreamento de mercadorias perigosas pode ser feito transmitindo sinais GNSS baseados em dados de posicionamento sobre os veículos, juntamente com outras informações sobre o estado da carga.
- Tacógrafos digitais melhorados aproveitam o posicionamento GNSS para apoiar as autoridades rodoviárias, registando a posição de um determinado veículo em pontos diferentes durante o dia de trabalho.

- Na tarifação dos utentes das estradas (RUC) os operadores de portagens são apoiados na tarifação com base na utilização efetiva das estradas e na gestão e controlo de congestionamento.

A utilização de dispositivos GNSS está a aumentar a cada ano devido à importância que sistemas GNSS têm, cada vez mais, no dia a dia da população mundial. Na Figura 36, é possível observar o aumento das expedições e consequente utilização de dispositivos GNSS no mercado mundial.

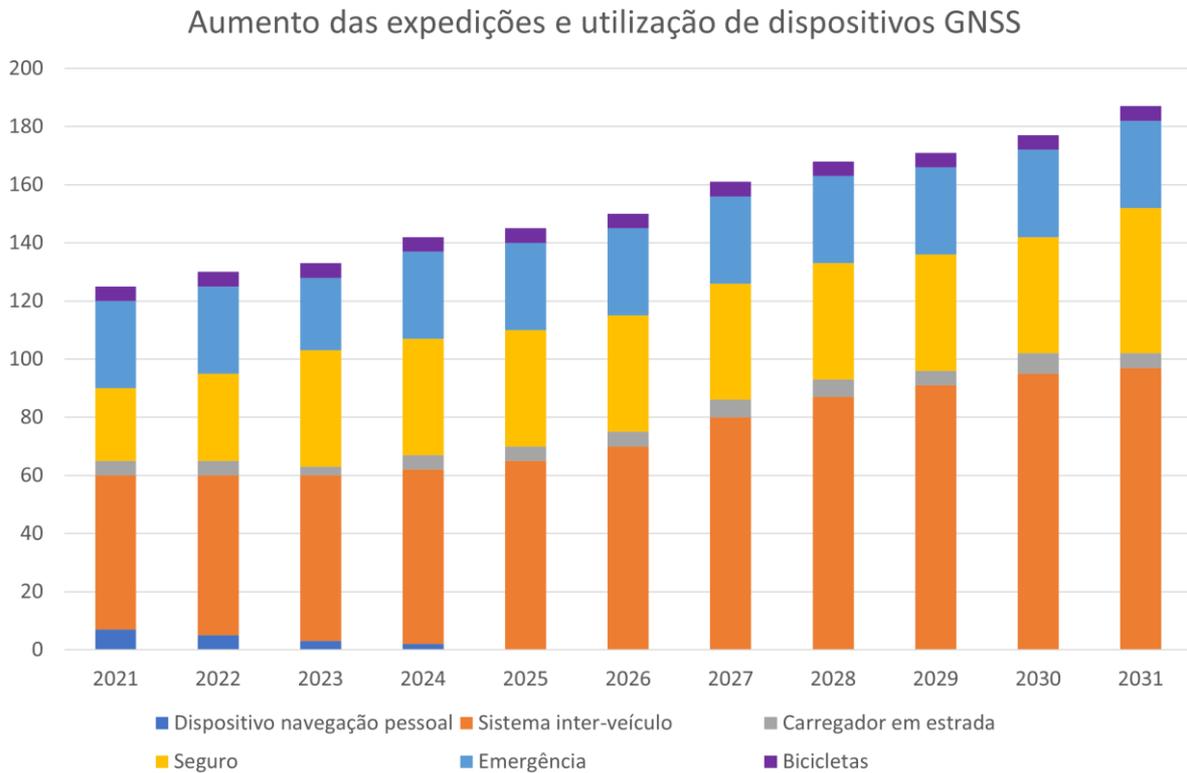


Figura 36 - Aumento das expedições e consequente utilização de dispositivos GNSS no mercado mundial [121]

Condução Autónoma

Os veículos autónomos podem assumir as atividades tradicionalmente desempenhadas pelo condutor, graças à sua capacidade de sentir o ambiente, navegar e, se combinado com soluções de veículos, comunicar com outros veículos e infraestruturas rodoviárias. Amplamente difundido a adoção da condução autónoma pode reduzir os acidentes de viação e melhorar o fluxo de tráfego, uma vez que bem como melhorar o conforto do condutor.

O GNSS desempenha um papel fundamental ao fornecendo inputs relevantes para a navegação integrada, tais como a localização e a velocidade do veículo. Constelações múltiplas, multi-GNSS e técnicas avançadas de deteção fornecidos por computer vision ou LiDAR serão combinados para garantir a robustez do serviço [118].

4.1.3 Aviação

Ao nível da aviação, o conceito da utilização de vários sistemas GNSS simultaneamente irá permitir aos pilotos melhor complementar as suas técnicas de navegação visual através de mapas que mostram a sua posição atual num mapa do espaço aéreo circundante para ajudar a monitorizar o progresso em relação ao seu plano de voo e de alarmes de infração que o podem avisar o se estiver a aproximar-se demasiado de um espaço aéreo restrito [119]. Simultaneamente estão a ser desenvolvidas novas aplicações para melhorar a situação conhecimento da posição de outras aeronaves através da receção de transmissões e traçando-as no mapa em movimento [119], [120].

Os pilotos podem transportar faróis de localização pessoal (PLBs - Personal Location Beacons) para ajudar os serviços de salvamento a localizar a aeronave em emergências. A Figura 37 representa a evolução prevista até ao ano de 2025 relativamente à contribuição de dispositivos GNSS na área da aviação.

GNSS capabilities as a proportion of total civil aviation fleet

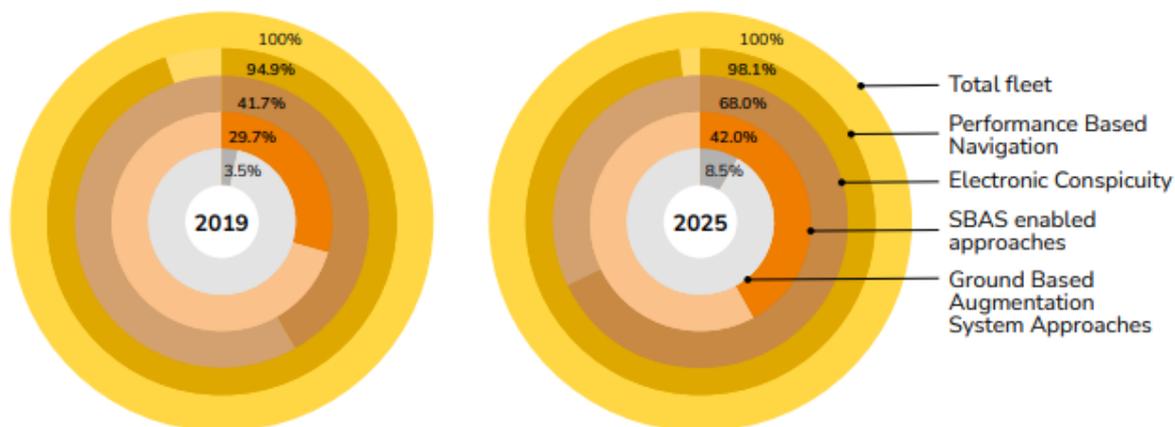


Figura 37 - Evolução prevista até ao ano de 2025 relativamente à contribuição de dispositivos GNSS na área da aviação [121]

4.1.4 Caminhos de Ferro

Nos caminhos de ferro, o multi-GNSS pode ser utilizado para melhorar os Sistemas de Comando e Controlo de Alta Densidade que assistem no comando de comboios e controlo nas linhas principais, principalmente ao Sistema Europeu de Controlo de Comboios (ETCS - European Train Control System) na Europa e em algumas regiões do resto do mundo, bem como o Controlo Positivo de Comboios (PTC - Positive Train Control) na América do Norte [120]. O multi-GNSS também pode ser uma fonte de input adicional.

Outra possível vantagem passa por ser possível mostrar em tempo real a localização de um comboio ao longo do seu percurso aos passageiros a bordo e também fornecer a localização de um comboio, a plataforma e informação online sobre o serviço aos passageiros. Na Figura 38 é possível verificar que é prevista uma evolução relativamente às vendas de dispositivos GNSS aplicados na área ferroviária.

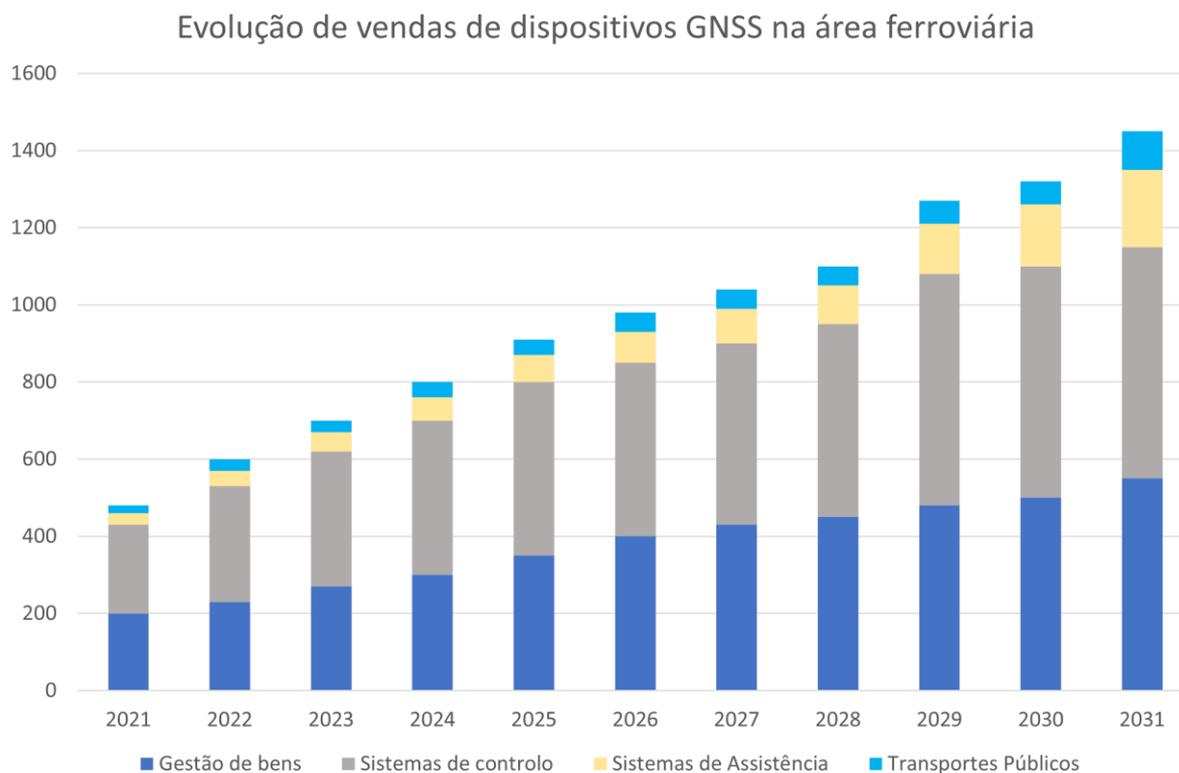


Figura 38 - Evolução relativamente às vendas de dispositivos GNSS aplicados na área ferroviária [121]

4.1.5 Marítimo

Sistemas GNSS para navegação e transporte marítimo são generalizadas em todo o comércio e embarcações de recreio, tanto no estrangeiro como em zonas de elevado tráfego. Em vias navegáveis interiores (rios, canais, lagos e estuários) o GNSS é também utilizado para garantir a segurança da navegação. Todos os navios de passageiros e navios de carga maiores que 500 toneladas de arqueação bruta (300 toneladas para viagens internacionais) são regulados e dependem fortemente do GNSS para a navegação [117].

Ao nível do posicionamento, a manutenção e gestão do tráfego marítimo é feita através de sistemas baseados em GNSS, bem como os dispositivos utilizados em missões de busca e salvamento. As operações portuárias desde a progresso de trânsito, atracação e carga-descarga são monitorizadas através de tecnologias baseadas em GNSS.

O GNSS também é utilizado em Engenharia naval, nomeadamente em atividades de construção marinha (instalação de cabos e oleodutos) e representa uma fonte de receita cada vez mais significativa e com tendência para aumentar de acordo com a Figura 39.

Evolução de receita relativamente a dispositivos GNSS na área naval

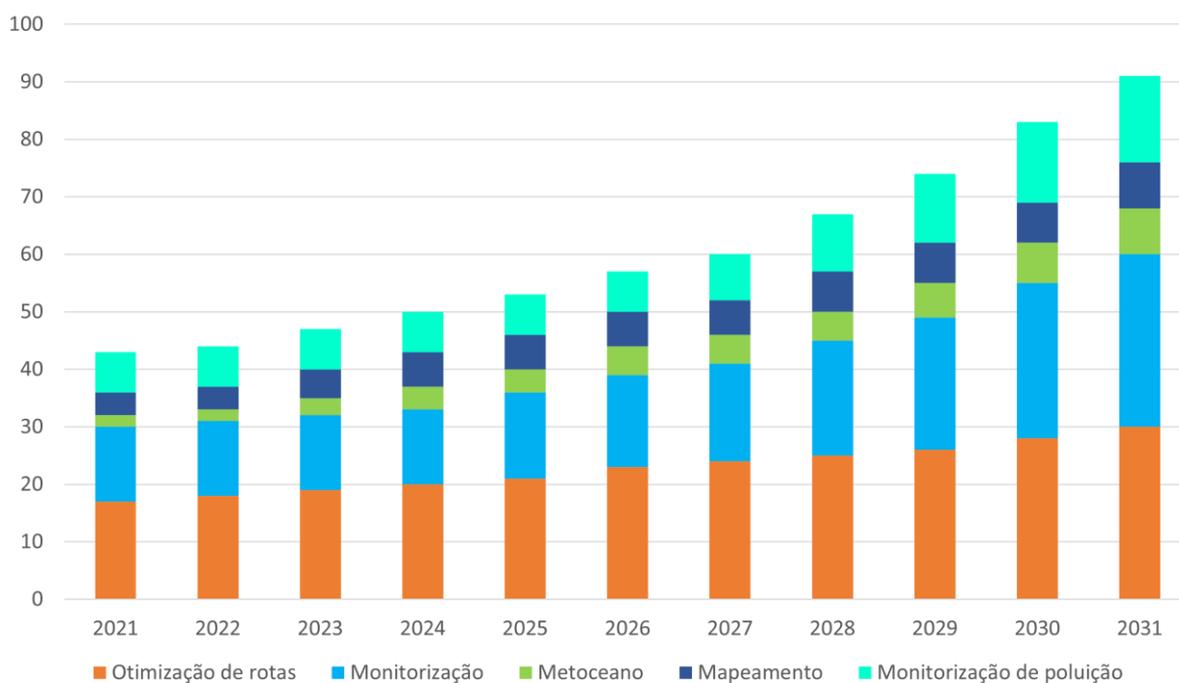


Figura 39 - Evolução das receitas relativamente a dispositivos GNSS na área naval [121]

4.1.6 Agricultura

Relativamente à agricultura, atualmente, sistemas GNSS são utilizados na vertente de agricultura de precisão, ou seja, na aplicação de diferentes tecnologias e soluções para tornar a agricultura mais eficiente, melhorar o rendimento das culturas e reduzir o impacto ambiental [122]. Estas tecnologias têm aplicações tais como:

- Orientação de máquinas agrícolas através de posicionamento GNSS para ajudar os condutores a seguir o caminho ótimo, minimizando assim os riscos de sobreposições;
- Monitorização do rendimento agrícola através da monitorização da colheita específica do local, combinando a saída de um sensor de rendimento com o posicionamento GNSS da ceifeira-debulhadora, por exemplo;
- Monitorização da biomassa permitindo a monitorização específica do local da biomassa num campo agrícola, fornecendo informação atualizada sobre a cultura em desenvolvimento;
- Monitorização do estado do solo permitindo atualizações sobre os níveis de humidade, fertilidade ou doenças do solo para otimizar a sua gestão;

- Rastreo do gado e assistência na colocação de barreiras físicas através de estudo de barreiras virtuais;

Para além disso, logisticamente será possível efetuar com mais qualidade a monitorização da maquinaria agrícola e gestão de cativos em tempo real, utilizar informações provenientes de GNSS para monitorizar a localização e o estado mecânico do equipamento e gerir eficazmente os fluxos de trabalho, aumentar a rastreabilidade geográfica e, conseqüentemente, aumentar a eficácia dos alimentos, animais e rastreabilidade do produto através da utilização de rastreadores em animais e veículos e delimitar os campos agrícolas mais precisamente. A agricultura com auxílio de aplicações GNSS representa uma crescente evolução e fonte de rendimento significativa (Figura 40).

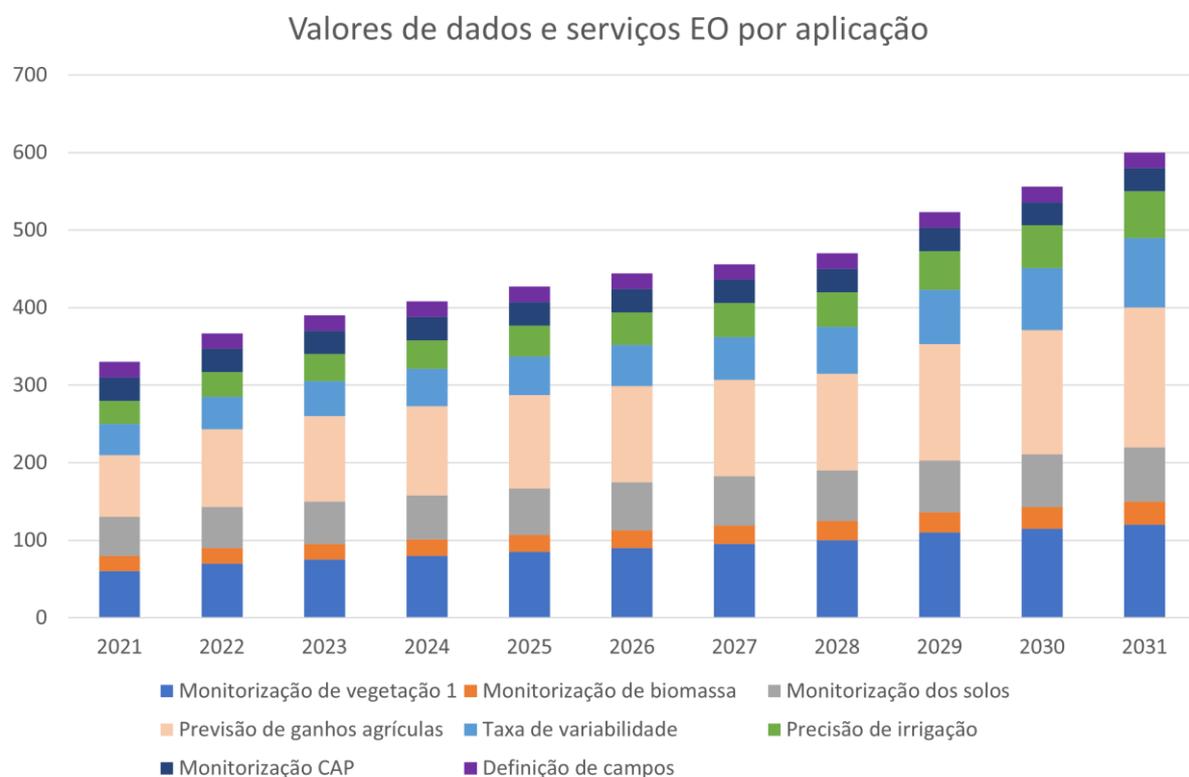


Figura 40 - Evolução e fonte de rendimento de dispositivos GNSS na área da agricultura [121]

4.1.7 Vigilância

Talvez das aplicações mais conhecidas e úteis seriam as aplicações relativas à vigilância [123]. NA área de vigilância do terreno, aplicações com recurso ao multi-GNSS poderiam, mais eficazmente, cobrir as diferentes fases de construção de um projeto de construção ou de engenharia civil, enquanto que o controlo de máquinas automatizam as atividades de construção, usar posicionamento de alta precisão GNSS para controlo de maquinaria, por exemplo, controlar automaticamente as lâminas e os baldes de equipamento de construção utilizando informações fornecidas por desenho digital 3D, mapear com mais precisão pontos específicos de localização de interesse para fins cartográficos, ambientais e de planeamento urbano e também auxiliar no mapeamento de minas e locais de extração de minérios.

De acordo com [68], excelentes dados de posicionamento global, ou seja, um posicionamento GPS excepcional estará disponível para a humanidade quando todos os sistemas GNSS se tornarem completamente operacionais e se as seguintes as condições forem cumpridas:

- Um modelo híbrido de todos os seis sistemas GNSS pode ser criado;
- A constelação de todos os satélites é bem-sucedida com base em a visibilidade do céu regional;
- Os relógios atômicos passivos de maser de hidrogénio são utilizados em cada satélite;

5. CONCLUSÕES

Em conclusão, o GNSS (Global Navigation Satellite System) é um sistema que utiliza uma rede de satélites em órbita da Terra para determinar a localização de um recetor em terra, no ar, ou no mar. Os sistemas GNSS incluem o GPS (Global Positioning System), que é operado pelos Estados Unidos, GLONASS (Global Navigation Satellite System), que é operado pela Rússia, e BeiDou, que é operado pela China.

Ao longo desta dissertação foi feito um levantamento geral e informativo sobre os principais sistemas GNSS, desde os da geolocalização até ao seu método de funcionamento atual. Foi demonstrado que esta tecnologia tem uma vasta gama de aplicações, incluindo navegação, mapeamento, vigilância e serviços baseados na localização. Embora os sistemas GNSS sejam geralmente fiáveis, estes podem ser afetados por fatores tais como condições atmosféricas, interferência de outros sinais e a disponibilidade de satélites. Em geral, a tecnologia GNSS teve um impacto significativo em muitas indústrias e melhorou consideravelmente a precisão e fiabilidade dos serviços.

Tendo em conta a literatura pesquisada, é evidente que será necessária uma combinação de técnicas para mitigar as diferentes vulnerabilidades físicas e lógicas presentes no GNSS [33]. Assim, relativamente a trabalhos futuros na área de GNSS, vários autores acreditam que as seguintes áreas podem ser investigadas mais aprofundadamente para a adicionar novas funcionalidades, serviços e robustez ao GNSS:

- GNSS híbrido - combinando diferentes contramedidas de interferência GNSS, multicaminhos podem ser mitigados;
- Recetores de multi-constelações: Técnicas avançadas de processamento de sinais podem ser adotadas em recetores multi-constelações GNSS. Estas técnicas também podem ser combinadas com outras contramedidas de interferência para melhorar a disponibilidade e precisão da localização;
- Fusão GNSS/INS: A precisão de posicionamento e localização pode ser melhorada através da adoção de métodos avançados de fusão de sensores de dados, especialmente em áreas de cobertura GNSS limitada. É necessário mais trabalho na análise do INS (Inertial Navigation Systems) relativamente a fontes de erro, uma vez que estas afetam o desempenho da estrutura de fusão. A fusão GNSS/INS pode também ser utilizada na deteção de falsificações. No entanto, mais estudos são necessários para reduzir a complexidade destas técnicas;
- Posicionamento cooperativo: Esta técnica pode ser combinada com verificações de consistência na redução dos erros de localização obtidos a partir de recetores GNSS em zonas urbanas;

- Rede de rádio múltipla - tecnologias de acesso multirrádio podem ser adotadas para melhorar a precisão da localização. Com a evolução das comunicações móveis/terrestres, tecnologias tais como WiFi, 5G e algoritmos tais como direção/formação de feixes de antena podem ser adotadas em ambientes urbanos

BIBLIOGRAFIA

- [1] R Richter, R Kurzweil, and ML Schneider, "The Age of Intelligent Machines "Chronology", " 1990. <https://calcuemus.org/lect/si/dlalomzy/mchron.htm> (accessed Feb. 17, 2023).
- [2] E. Kaplan and C. Hegarty, "Understanding GPS Principles and Applications Second Edition," 2006.
- [3] S. C. Bhardwaj, S. Shekhar, A. Vidyarthi, and R. Prakash, "Satellite Navigation and Sources of Errors in Positioning: A Review," in *Proceedings - 2020 International Conference on Advances in Computing, Communication and Materials, ICACCM 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Aug. 2020, pp. 43–50. doi: 10.1109/ICACCM50413.2020.9212941.
- [4] C. Ferrarelli, G. E. Corazza, F. Vatalaro, and C. Caini, "Analysis of LEO, MEO, and GEO Global Mobile Satellite Systems in the Presence of Interference and Fading," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 13, no. 2, pp. 291–300, 1995, doi: 10.1109/49.345873.
- [5] TGR Reid, T Walter, and PK Enge, "Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century," 2020. [https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=PNoPEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1359&dq=+LEO+stands+for+Low+Earth+Orbit+and+is+located+at+an+altitude+of+approximately+160+to+2,000+kilometers+\(100+to+1,200+miles\)+above+the+Earth%27s+surface.+Satellites+in+LEO+orbits+have+an+orbital+period+of+around+90+minutes+and+are+used+for+a+variety+of+applic&ots=p9dSedOFx4&sig=oDm0t6wRtZsYJuOvflWrk-peGmg&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=PNoPEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1359&dq=+LEO+stands+for+Low+Earth+Orbit+and+is+located+at+an+altitude+of+approximately+160+to+2,000+kilometers+(100+to+1,200+miles)+above+the+Earth%27s+surface.+Satellites+in+LEO+orbits+have+an+orbital+period+of+around+90+minutes+and+are+used+for+a+variety+of+applic&ots=p9dSedOFx4&sig=oDm0t6wRtZsYJuOvflWrk-peGmg&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false) (accessed Apr. 10, 2023).
- [6] T. Wanwiwake, "A Microsatellite Based Synthetic Aperture Radar (SAR)," 2011.
- [7] J. R. Vetter, "Fifty Years of Orbit Determination: Development of Modern Astrodynamics Methods," 2007.
- [8] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle, "GNSS - Global Navigation Satellite Systems," 2007.
- [9] S. C. Bhardwaj, S. Shekhar, A. Vidyarthi, and R. Prakash, "Satellite Navigation and Sources of Errors in Positioning: A Review," in *Proceedings - 2020 International Conference on Advances in Computing, Communication and Materials, ICACCM 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Aug. 2020, pp. 43–50. doi: 10.1109/ICACCM50413.2020.9212941.

- [10] M. Smyrniotis, S. Schn, and M. Liso, "Multipath Propagation, Characterization and Modeling in GNSS," *Geodetic Sciences - Observations, Modeling and Applications*, May 2013, doi: 10.5772/54567.
- [11] T. Kos, I. Markezic, and J. Pokrajcic, "Effects of Multipath Reception on GPS Positioning Performance," 2010.
- [12] M. S. Grewal, L. R. (Lawrence R. Weill, and A. P. Andrews, *Global positioning systems, inertial navigation, and integration*. John Wiley, 2001.
- [13] Y. Rossi *et al.*, "Kalman Filter-Based Fusion of Collocated Acceleration, GNSS and Rotation Data for 6C Motion Tracking," *Sensors 2021, Vol. 21, Page 1543*, vol. 21, no. 4, p. 1543, Feb. 2021, doi: 10.3390/S21041543.
- [14] M. Hernández-Pajares, J. M. Juan, J. Sanz, R. Orús, A. García-Rodríguez, and O. L. Colombo, "Wide Area Real Time Kinematics with Galileo and GPS Signals." pp. 2541–2554, Sep. 24, 2004. Accessed: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?jp=p&articleID=5938>
- [15] Z Kassas, M Neinavaie, and N. K. J Khalife, "Enter LEO on the GNSS Stage: Navigation with Starlink Satellites," 2021. [Online]. Available: www.insidegnss.com
- [16] G. Johnston, A. Riddell, and G. Hausler, "The International GNSS Service," *Springer Handbooks*, pp. 967–982, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-42928-1_33/COVER.
- [17] Montenbruck Oliver and Teunissen J.G.Peter, "Handbook of Global Navigation Satellite Systems," 2017.
- [18] "GNSS Posição." 2017.
- [19] Flores Anthony, "NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Interfaces IS-GPS-200," 2021.
- [20] Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews, and Chris G. Bartone, "Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration," 2020. [https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=ppjDDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP26&dq=Global+Navigation+Satellite+System+\(GNSS\)+satellites+are+an+essential+component+of+the+GNSS+infrastructure+that+enables+users+to+determine+their+position,+velocity,+and+time+\(PVT\)&ots=rw-ne4xzh&sig=_75Wx707xm5_gjtf5pxssbDQafQ&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=ppjDDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP26&dq=Global+Navigation+Satellite+System+(GNSS)+satellites+are+an+essential+component+of+the+GNSS+infrastructure+that+enables+users+to+determine+their+position,+velocity,+and+time+(PVT)&ots=rw-ne4xzh&sig=_75Wx707xm5_gjtf5pxssbDQafQ&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false) (accessed Feb. 16, 2023).
- [21] John W. Betz, "Engineering Satellite-Based Navigation and Timing: Global Navigation," 2015. <https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=aOlbCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR15&dq=The+newer+systems+like+Galileo+and+BeiD>

- ou+have+a+higher+number+of+satellites+and+improved+performance,+whereas+the+older+systems+like+GPS+and+GLONASS+have+been+extensively+used+for+decades&ots=BOwiwOfqJj&sig=QEv02gEFwKFAiudLUT6kREP1PuY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed Feb. 16, 2023).
- [22] P. Daly, "Navstar GPS and GLONASS: Global satellite navigation systems," *Electronics and Communication Engineering Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 349–358, Dec. 1993, doi: 10.1049/ECEJ:19930069.
- [23] "The Evolution of Global Positioning System (GPS) Technology on JSTOR." <https://www.jstor.org/stable/40188597> (accessed Feb. 16, 2023).
- [24] Keysight Blogs, "Testing Global Navigation Satellite Systems (GNSS) Receivers," 2022. https://blogs.keysight.com/blogs/tech/rfmw.entry.html/2022/08/23/testing_global_navigation_satellitesystems-gnss-qu0v.html (accessed Jan. 22, 2023).
- [25] G. Ai, H. Shi, H. Wu, Z. Li, and J. Guo, "The principle of the positioning system based on communication satellites," *Science in China, Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, vol. 52, no. 3, pp. 472–488, Mar. 2009, doi: 10.1007/S11433-009-0065-6/METRICS.
- [26] F. Pereira and D. Selva, "Tradespace Analysis of GNSS Space Segment Architectures," *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, vol. 57, no. 1, pp. 155–174, Feb. 2021, doi: 10.1109/TAES.2020.3010666.
- [27] Jr. Louis J. Ippolito, "Satellite Communications Systems Engineering: Atmospheric Effects, Satellite link design and system performance," 2017. https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=sJEmDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR13&dq=The+control+segment+consists+of+a+network+of+ground-based+control+centers,+monitoring+stations,+and+uplink+facilities.+These+facilities+are+responsible+for+maintaining+accurate+and+up-to-date+information+about+the+location,+speed,+and+trajectory+of+each+sa&ots=6Qawo6IWSx&sig=oERTV7M86g2x3ByrtaSBzwCbiyl&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed Feb. 09, 2023).
- [28] H. Guo, M. F. Goodchild, and A. Annoni, "Manual of Digital Earth," 2020.
- [29] S. Dawoud, "GNSS principles and comparison."
- [30] X. Li, X. Zhang, X. Ren, M. Fritsche, J. Wickert, and H. Schuh, "Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou," *Scientific Reports 2015 5:1*, vol. 5, no. 1, pp. 1–14, Feb. 2015, doi: 10.1038/srep08328.

- [31] D. Egea-Roca *et al.*, “GNSS User Technology: State-of-the-Art and Future Trends,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 39939–39968, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3165594.
- [32] M. Z. Chowdhury, Md. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, “6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 957–975, Jul. 2020, doi: 10.1109/OJCOMS.2020.3010270.
- [33] Q. Luo, Y. Cao, J. Liu, and A. Benslimane, “Localization and Navigation in Autonomous Driving: Threats and Countermeasures,” *IEEE Wirel Commun*, vol. 26, no. 4, pp. 38–45, Aug. 2019, doi: 10.1109/MWC.2019.1800533.
- [34] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, Oct. 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2444095.
- [35] Tersus GNSS, “Centimeter Precision Positioning GNSS RTK Technology,” 2014. <https://www.tersus-gnss.com/technology> (accessed Jan. 22, 2023).
- [36] “Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems,” *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-42928-1.
- [37] J. B. Kim, D. S. Park, J. M. Ahn, K. J. Kim, and K. W. Song, “A study of CSS based GNSS spreading modulation technique,” in *APCC 2012 - 18th Asia-Pacific Conference on Communications: “Green and Smart Communications for IT Innovation,”* 2012, pp. 208–209. doi: 10.1109/APCC.2012.6388132.
- [38] P. K. Enge, “The Global Positioning System: Signals, measurements, and performance,” *Int J Wirel Inf Netw*, vol. 1, no. 2, pp. 83–105, Apr. 1994, doi: 10.1007/BF02106512/METRICS.
- [39] C. J. Hegarty, “GNSS signals - An overview,” in *2012 IEEE International Frequency Control Symposium, IFCS 2012, Proceedings*, 2012, pp. 87–93. doi: 10.1109/FCS.2012.6243707.
- [40] M. Tran, “Performance evaluations of the new GPS L5 and L2 Civil (L2C) signals,” *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, vol. 51, no. 3, pp. 199–212, 2004, doi: 10.1002/J.2161-4296.2004.TB00351.X.
- [41] D. N. Aloï, M. Alsliety, and D. M. Akos, “A methodology for the evaluation of a GPS receiver performance in Telematics applications,” *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 56, no. 1, pp. 11–24, Feb. 2007, doi: 10.1109/TIM.2006.887190.
- [42] S. Rosłonec, “Satellite Navigation Systems,” pp. 315–353, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-10631-6_16.

- [43] “Doppler Shift | GEOG 862: GPS and GNSS for Geospatial Professionals.” <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1786> (accessed Jan. 21, 2023).
- [44] M. Karaim, M. Elsheikh, and A. Noureldin, “GNSS Error Sources,” *Multifunctional Operation and Application of GPS*, May 2018, doi: 10.5772/INTECHOPEN.75493.
- [45] K. Borre and D. Akos, “A Software-Defined GPS and Galileo Receiver: Single-Frequency Approach.” pp. 1632–1637, Sep. 16, 2005. Accessed: Feb. 16, 2023. [Online]. Available: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?jp=p&articleID=6361>
- [46] J. Farrell, “Aided navigation: GPS with high rate sensors,” 2008, Accessed: Feb. 16, 2023. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/1594745>
- [47] H. Bernhard Hofmann-Wellenhof and E. W. Lichtenegger, “GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more,” 2008. https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=Np7y43HU_m8C&oi=fnd&pg=PR20&dq=SPF+GLONASS&ots=FguC9_PNb_&sig=7Z1sKixgKuxCsDCoLIiKY9SOUb4&redir_esc=y#v=onepage&q=SPF%20GLONASS&f=false (accessed Jan. 20, 2023).
- [48] A. Noureldin, T. B. Karamat, and J. Georgy, “Inertial Navigation System Modeling,” *Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration*, pp. 167–200, 2013, doi: 10.1007/978-3-642-30466-8_5.
- [49] J. G. Monico, *Posicionamento GNSS*. UNESP, 2008.
- [50] P. Steigenberger, O. Montenbruck, M. Bradke, M. Ramatschi, and U. Hessels, “Evaluation of earth rotation parameters from modernized GNSS navigation messages,” *GPS Solutions*, vol. 26, no. 2, Apr. 2022, doi: 10.1007/s10291-022-01232-4.
- [51] W. Lechner and S. Baumann, “Global navigation satellite systems,” 2000. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/compag
- [52] Shuanggen Jin, G.P. Feng, and S. Gleason, “Remote sensing using GNSS signals - Current status and future directions,” 2011.
- [53] A. Bagheshwa, A. Gul, and R. Y. Osman, “EFMS Project-Report on Global Navigation Satellite Systems (GNSS) Electronic Flight Management Systems,” 2021, Accessed: Jan. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/354209320>
- [54] W. Sakpere, M. Adeyeye-Oshin, and N. B. W. Mlitwa, “A state-of-the-art survey of indoor positioning and navigation systems and technologies,” *South African Computer Journal*, vol. 29, no. 3, pp. 145–197, 2017, doi: 10.18489/SACJ.V29I3.452.

- [55] Betts Jonathan, "Marine Chronometers at Greenwich: A Catalogue of Marine Chronometers at the National Maritime Museum," 2018. [https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=xL9EDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=John+Harrison,+an+English+watchmaker,+designed+an+accurate+chronometer+to+measure+the+difference+between+local+time+and+Greenwich+time+\(the+town+of+Greenwich+is+located+in+longitude+zero&ots=lbAepojeL-&sig=bNhGTyvWV7WsSO10yvQ4wfiR89c&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=xL9EDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=John+Harrison,+an+English+watchmaker,+designed+an+accurate+chronometer+to+measure+the+difference+between+local+time+and+Greenwich+time+(the+town+of+Greenwich+is+located+in+longitude+zero&ots=lbAepojeL-&sig=bNhGTyvWV7WsSO10yvQ4wfiR89c&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false) (accessed Jan. 21, 2023).
- [56] D. Gebre-Egziabher, J. D. Powell, and P. K. Enge, "Design and performance analysis of a low-cost aided dead reckoning navigation system," 2001.
- [57] P. J. D. Gething, "Radio Direction Finding and Superresolution," 1991. https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=ujw-54L-omgC&oi=fnd&pg=PR12&dq=radio+direction+finding&ots=JAR2n-jWdU&sig=WByzqTBTJPH8vZTTvW4hX7V5bQo&redir_esc=y#v=onepage&q=radio%20direction%20finding&f=false (accessed Feb. 20, 2023).
- [58] P. I. Y. Velinov, "Development of advanced space sciences after first artificial satellite. 60-th anniversary of the space age," vol. 29, 2017.
- [59] M. S. Braasch and A. J. van Dierendonck, "GPS receiver architectures and measurements," *Proceedings of the IEEE*, vol. 87, no. 1, pp. 48–64, 1999, doi: 10.1109/5.736341.
- [60] Anthony Lawrence, "Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control," 2001. https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=Sjl1qfyaBWcC&oi=fnd&pg=PR5&dq=U.S.+Department+of+Defense+imposed+so-called+%22selective+availability,%22+which+consisted+of+induced+signal+error,+making+it+impossible+for+civilian+devices+to+operate+with+accuracy+of+less+than+90+meters.+However,+President+Bill+Clinton&ots=gFkFB5_061&sig=USRaLaP7ogS8Fb9D66N390kHkHY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed Jan. 21, 2023).
- [61] F. H. Bauer *et al.*, "The GPS Space Service Volume." pp. 2503–2514, Sep. 29, 2006. Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?jp=p&articleID=6861>
- [62] K. Enge, "The Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance," 1994.
- [63] A. Roulston, N. Talbot, and K. Zhang, "An Evaluation of Various GPS Satellite Ephemerides." pp. 45–54, Sep. 22, 2000. Accessed: Jan. 21, 2023. [Online]. Available: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?jp=p&articleID=1388>

- [64] D. M. Galvin, "History of the GPS Space Segment From Block I to The New Millennium." pp. 1843–1854, Sep. 17, 1999. Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?jp=p&articleID=3339>
- [65] M. Shaw, K. Sandhoo, and D. Turner, "Modernization of the Global Positioning System." pp. 17–30, Nov. 30, 2000. Accessed: Mar. 07, 2023. [Online]. Available: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?jp=p&articleID=14020>
- [66] J. Sanz Subirana, J.M. Juan Zornoza, and M. Hernández-Pajares, "GPS Observables," pp. 37–42, 2007, doi: 10.1007/978-3-540-72715-6_4.
- [67] Ge and Linlin, "Development and Testing of Augmentations of Continuously-Operating GPS Networks to Improve Their Spatial and Temporal Resolution," 2000, doi: 10.26190/unsworks/19956.
- [68] Gunter Seeber, "Satellite Geodesy," 2003.
- [69] P. Daly, "Navstar GPS and GLONASS: Global satellite navigation systems," *Electronics and Communication Engineering Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 349–358, Dec. 1993, doi: 10.1049/ECEJ:19930069.
- [70] R. L. Biradar, "Architecture and Signal Structure of GLONASS," vol. 03, p. 1, 2015, Accessed: Jan. 21, 2023. [Online]. Available: <http://www.ijmr.net.in>
- [71] B. Hendrickx, "The secret payloads of Russia's Glonass navigation satellites," *The Space Review*, Dec. 2022, Accessed: Jan. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.thespacereview.com/article/4502/1>
- [72] S. Revnivykh, A. Bolkunov, A. Serdyukov, and O. Montenbruck, "GLONASS," *Springer Handbooks*, pp. 219–245, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-42928-1_8/COVER.
- [73] Russian Institute of Space Device Engineering, "Interface control document Navigational radiosignal In bands L1, L2 (Edition 5.1)," 2008.
- [74] S. Revnivykh, "GLONASS Ground Control Segment: Orbit, Clock, Time Scale and Geodesy Definition." pp. 3931–3949, Sep. 21, 2012. Accessed: Feb. 16, 2023. [Online]. Available: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?jp=p&articleID=10565>
- [75] N. Dinesh Kumar, N. Revathi, and & N. Deepika, "On-board navigation & data acquisition for high dynamic GPS and GLONASS receiver," 2013.
- [76] M Tamazin, M Karaim, and A Nouredin, "Multifunctional Operation and Application of GPS," 2018. <https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=knqQDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA119&dq=The+receiver%27s+main+function+is+to+d>

etermine+the+user%27s+position,+speed,+and+time+by+processing+the+received+GLONASS+signals.+&ots=N5rmLzyC_y&sig=7NFdH4HQGeSDNhxaxUKNOoFjpcA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed Feb. 20, 2023).

- [77] A. E. Zinoviev, "Using GLONASS in Combined GNSS Receivers: Current Status." pp. 1046–1057, Sep. 16, 2005. Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?jp=p&articleID=6300>
- [78] U. Roßbach, "Positioning and Navigation Using the Russian Satellite System GLONASS," 2001.
- [79] A. El-Rabbany, "Introduction to GPS: The Global Positioning System," 2002.
- [80] F. J. Martinez, C. K. Toh, J. C. Cano, C. T. Calafate, and P. Manzoni, "Emergency services in future intelligent transportation systems based on vehicular communication networks," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 6–20, Jun. 2010, doi: 10.1109/MITS.2010.938166.
- [81] P. Delva *et al.*, "Gravitational Redshift Test Using Eccentric Galileo Satellites," *Phys Rev Lett*, vol. 121, no. 23, Dec. 2018, doi: 10.1103/PHYSREVLTT.121.231101.
- [82] J. Benedicto, S. E. Dinwiddy, G. Gatti, R. Lucas, and M. Lugert, "GALILEO : Satellite System Design and Technology Developments," 2000.
- [83] F. Riedel and O. K. Gülmüs, "Observations and Operational Aspects on the Galileo Attitude and Orbit Control Subsystem-Infra-Red Radiance Variations," 2014, doi: 10.2514/6.2014-1905.
- [84] J. C. Chiarini *et al.*, "The GALILEO Satellite," *21st International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit*, 2003, doi: 10.2514/6.2003-2306.
- [85] Jaume. Sanz Subirana, J. Miguel. Juan Zornoza, and Manuel. Hernández-Pajares, *Fundamentals and algorithms. Vol. 1*. ESA Communications, 2013.
- [86] H. L. Trautenberg, T. Weber, and C. Schh, "GALILEO system overview," *Acta Astronaut*, vol. 55, pp. 643–647, 2004, doi: 10.1016/j.actaastro.2004.05.046.
- [87] Jaume. Sanz Subirana, J. Miguel. Juan Zornoza, and Manuel. Hernández-Pajares, *Fundamentals and algorithms. Vol. 1*. ESA Communications, 2013.
- [88] Shirley A Kan, "U.S.-China Military Contacts: Issues for Congress," 2014. [Online]. Available: www.crs.gov
- [89] CGTN, "Review of the three phases of China's BeiDou navigation system," 2020. <https://news.cgtn.com/news/2020-07-31/Review-of-the-three-phases-of-China-s-BeiDou-navigation-system-SzHseq6k7e/index.html> (accessed Jan. 20, 2023).

- [90] Y. Su, Y. Liu, Y. Zhou, J. Yuan, H. Cao, and J. Shi, "Broadband LEO satellite communications: Architectures and key technologies," *IEEE Wirel Commun*, vol. 26, no. 2, pp. 55–61, Apr. 2019, doi: 10.1109/MWC.2019.1800299.
- [91] Y. Yang, J. Tang, and O. Montenbruck, "Chinese Navigation Satellite Systems," *Springer Handbooks*, pp. 273–304, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-42928-1_10/COVER.
- [92] China Satellite Navigation Office, "Development of the BeiDou Navigation Satellite System," 2019.
- [93] Y. Yang, Y. Mao, and B. Sun, "Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system," *Satellite Navigation*, vol. 1, no. 1, pp. 1–8, Dec. 2020, doi: 10.1186/S43020-019-0006-0/TABLES/3.
- [94] Y. Yang, W. Gao, S. Guo, Y. Mao, and Y. Yang, "Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system," *Navigation*, vol. 66, no. 1, pp. 7–18, Jan. 2019, doi: 10.1002/NAVI.291.
- [95] J. Xie, H. Wang, P. Li, and Y. Meng, "Satellite Navigation Systems and Technologies," 2021, doi: 10.1007/978-981-15-4863-5.
- [96] S. Madry, J. N. Pelton, and S. Camacho-Lara, "Ground systems for satellite application systems for navigation, remote sensing, and meteorology," *Handbook of Satellite Applications*, vol. 2, pp. 1095–1110, Jan. 2013, doi: 10.1007/978-1-4419-7671-0_11/COVER.
- [97] International Committee on Global Navigation Satellite Systems Provider's Forum, "Current and Planned Global and Regional Navigation Satellite Systems and Satellite-based Augmentations Systems," 2010.
- [98] J. W. Betz, "Signal Structures for Satellite-Based Navigation: Past, Present, and Future." pp. 131–137, Apr. 25, 2013. Accessed: Jan. 21, 2023. [Online]. Available: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?jp=p&articleID=10969>
- [99] DAVIS F, "GNSS Interference Threats and Countermeasures," 2015. https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=XlcTBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA7&dq=BeiDou+two-way+transmission+compromises+accuracy+and+takes+up+more+bandwidth,+it+raises+security+concerns&ots=kvLAPkrXY9&sig=QZq9VioS0yvGz5w3WQ-KNxCo&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed Jan. 21, 2023).
- [100] S. Kogure, M. Sawabe, and M. Kishimoto, "Status of QZSS Navigation System in Japan." pp. 2092–2102, Sep. 29, 2006. Accessed: Mar. 02, 2023. [Online]. Available: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?jp=p&articleID=7032>

- [101] Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews, and Chris G. Bartone, "Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration," 2020. https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=ppjDDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP26&dq=The+QZSS+project+was+initiated+in+response+to+the+need+for+a+regional+navigation+system+that+could+provide+more+accurate+and+reliable+positioning+and+timing+information+than+GPS+alone&ots=rw0pe3tld&sig=4uVcetZJtcqWZe-agb4BVGi5i1Y&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed Mar. 02, 2023).
- [102] M. Kishimoto, E. Myojin, S. Kogure, H. Noda, and K. Terada, "QZSS On Orbit Technical Verification Results." pp. 1206–1211, Sep. 23, 2011. Accessed: Mar. 02, 2023. [Online]. Available: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?jp=p&articleID=9678>
- [103] M. Kishimoto, E. Myojin, K. Kawate, M. Miyoshi, S. Kogure, and H. Noda, "Technical Verification Status of Quasi-Zenith Satellite System." pp. 1223–1227, Feb. 01, 2012. Accessed: Mar. 02, 2023. [Online]. Available: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?jp=p&articleID=10016>
- [104] C. Kilic and B. M. Statler, "Quasi Zenith Satellite System Technical Literature Review Report," 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.1049.8645.
- [105] R. B. Langley, P. J. G. Teunissen, and O. Montenbruck, "Introduction to GNSS," *Springer Handbooks*, pp. 3–23, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-42928-1_1/COVER.
- [106] S. Hama *et al.*, "The Status of On-board and Ground Time Management System of QZSS." pp. 458–463, Jan. 30, 2008. Accessed: Mar. 02, 2023. [Online]. Available: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?jp=p&articleID=7706>
- [107] S. Choy, J. Kuckartz, A. G. Dempster, C. Rizos, and M. Higgins, "GNSS satellite-based augmentation systems for Australia," *GPS Solutions*, vol. 21, no. 3, pp. 835–848, Jul. 2017, doi: 10.1007/S10291-016-0569-2/FIGURES/5.
- [108] J.-A. Avila-Rodriguez, S. Wallner, G. W. Hein, B. Eissfeller, M. Irsigler, and J.-L. Issler, "A Vision on New Frequencies, Signals and Concepts for Future GNSS Systems." pp. 517–534, Sep. 28, 2007. Accessed: Mar. 02, 2023. [Online]. Available: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?jp=p&articleID=7550>
- [109] M. Saini, U. Gupta, and M. Tech, "Indian GPS Satellite Navigation System: An Overview," *International Journal of Enhanced Research in Management & Computer Applications*, vol. 3, pp. 32–37, 2014, Accessed: Mar. 02, 2023. [Online]. Available: www.erpublications.com
- [110] S. Sivaraj, U. Swami, R. Babu, and S. C. Rathnakara, "Orbital parameters variations of IRNSS satellites," *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. PartF9, pp. 537–548, 2017, doi: 10.1007/978-981-10-1771-1_57/COVER.

- [111] P. Kale, "Professor Satish Dhawan-A gentle integrator," 2020.
- [112] John W. Betz, "Engineering Satellite-Based Navigation and Timing: Global Navigation," 2015. [https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=aOlbCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR15&dq=The+user+segment+of+the+Indian+Regional+Navigation+Satellite+System+\(IRNSS\)+is+the+component+that+interacts+directly+with+end+users+and+provides+navigation+and+timing+services&ots=BOwjyOftFi&sig=IKJr0BbJeTTpk803o4UWW4kr3Y&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=aOlbCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR15&dq=The+user+segment+of+the+Indian+Regional+Navigation+Satellite+System+(IRNSS)+is+the+component+that+interacts+directly+with+end+users+and+provides+navigation+and+timing+services&ots=BOwjyOftFi&sig=IKJr0BbJeTTpk803o4UWW4kr3Y&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false) (accessed Mar. 02, 2023).
- [113] S. Kogure, A. S. Ganeshan, and O. Montenbruck, "Regional Systems," *Springer Handbooks*, pp. 305–337, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-42928-1_11/COVER.
- [114] S. Thaelert, O. Montenbruck, and M. Meurer, "IRNSS-1A: signal and clock characterization of the Indian regional navigation system," *GPS Solutions*, vol. 18, no. 1, pp. 147–152, Jan. 2014, doi: 10.1007/S10291-013-0351-7/FIGURES/5.
- [115] B. Saikiran and V. Vikram, "KIET IJCE IRNSS Architecture and Applications," 2013.
- [116] V. R. Diez, "Spoofing and jamming over GNSS," 2020. <https://www.incibe-cert.es/en/blog/spoofing-and-jamming-over-gnss> (accessed Mar. 02, 2023).
- [117] Y. Ramawickrama, J. Vijayanga, R. Dharmarathne, and H. Wijesooriya, "The Future of GNSS in the Next Ten years," 2017.
- [118] W. Y. Ochieng, M. Quddus, and R. B. Noland, "Map-Matching in complex urban road networks," 2003. [Online]. Available: <https://dspace.lboro.ac.uk/>
- [119] Myron Kayton and Walter R. Fried, "Avionics Navigation Systems," 1997. https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=1KLTUWLz8jcC&oi=fnd&pg=PR17&dq=Simultaneously+new+applications+are+being+developed+to+improve+situational+awareness+of+the+position+of+other+aircraft+by+receiving+transmissions+and+plotting+them+on+the+moving+map+&ots=6lnK_gnmW0&sig=YchlaQ6qv uAAqozZTE4x-Wb1yJo&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed Jan. 22, 2023).
- [120] S. Roberts, L. Bonenberg, X. Meng, T. Moore, and C. Hill, "Predictive Intelligence for a Rail Traffic Management System," *30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS 2017*, vol. 4, pp. 2117–2125, Sep. 2017, doi: 10.33012/2017.15328.
- [121] European Union Agency for the Space Programme., *EUSPA EO and GNSS Market Report. 2022 / Issue 1. 2022.*

- [122] J. A. Thomasson, C. P. Baillie, D. L. Antille, C. R. Lobsey, and C. L. McCarthy, "Autonomous Technologies in Agricultural Equipment: A Review of the State of the Art," 2019, Accessed: Jan. 22, 2023. [Online]. Available: www.asabe.org.
- [123] S. Wachtl, V. Koch, and L. P. Schmidt, "Global navigation satellite systems in passive surveillance applications," in *2014 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications - Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles, TIWDC/ESAV 2014*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov. 2014, pp. 135–140. doi: 10.1109/TIWDC-ESAV.2014.6945464.
- [124] M. Karaim, M. Elsheikh, and A. Noureldin, "Chapter 4 GNSS Error Sources," 2018.
- [125] everything RF, "What is the Difference Between GNSS and GPS?," 2020. https://www.everythingrf.com/community/what-is-the-difference-between-gnss-and-gps_58 (accessed Apr. 18, 2023).
- [126] Britannica, "John Harrison | British horologist," 2023. <https://www.britannica.com/biography/John-Harrison-British-horologist> (accessed Apr. 10, 2023).
- [127] P. Weiss, "The Global Positioning System (GPS): Creating Satellite Beacons in Space, Engineers Transformed Daily Life on Earth," *Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 290–303, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.ENG.2021.02.001.
- [128] J. Van Sickle, "GPS for Land Surveyors, Fourth Edition," *CRC Press, Taylor & Francis Group*, p. 368, 2015.
- [129] B. Eissfeller, G. Ameres, V. Kropp, and D. Sanroma, "Performance of GPS , GLONASS and Galileo," 2007.
- [130] Russian Institute of Space Device Engineering, "GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM GLONASS INTERFACE CONTROL DOCUMENT Navigational radiosignal In bands L1, L2," 2008.
- [131] J. Huart, "European Space Agency," 2022. <https://www.esa.int/> (accessed Apr. 10, 2023).
- [132] A. Lewandowski, B. Niehoefer, and C. Wietfeld, "Galileo/SAR: Performance aspects and new service capabilities," *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 29, no. 5, pp. 441–460, Sep. 2011, doi: 10.1002/SAT.983.
- [133] "EUROPEAN GNSS (GALILEO) OPEN SERVICE SIGNAL-IN-SPACE INTERFACE CONTROL DOCUMENT," 2021.
- [134] Y. Yang, Y. Xu, J. Li, and C. Yang, "Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: Data analysis based on BDS-3 demonstration system," *Sci China Earth Sci*, vol. 61, no. 5, pp. 614–624, Jan. 2018, doi: 10.1007/s11430-017-9186-9.

- [135] W. Mtg, "Current Status of Quasi-Zenith Satellite System Japan Aerospace Exploration Agency," 2009.
- [136] M. Kishimoto *et al.*, "QZSS System Design and its Performance." pp. 405–410, Jan. 24, 2007. Accessed: Feb. 28, 2023. [Online]. Available: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?jp=p&articleID=7174>
- [137] H. Ye *et al.*, "Analysis of quasi-zenith satellite system signal acquisition and multiplexing characteristics in China area," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 6, Mar. 2020, doi: 10.3390/S20061547.