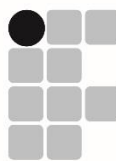


**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA**
Departamento Acadêmico da Construção Civil
Curso Técnico em Agrimensura

CONCEITOS DE POSICIONAMENTO POR SATÉLITES

SÉRIE: TOPOGRAFIA E AGRIMENSURA PARA
CURSOS TÉCNICOS

Prof. Ivandro Klein
Prof. Matheus Pereira Guzatto



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

Florianópolis-SC
2018

Curso Técnico em Agrimensura:

Av. Mauro Ramos, 950, Centro, Florianópolis - Santa Catarina

CEP: 88020-300

Telefone: (48) 3321-6061

<http://agrimensura.florianopolis.ifsc.edu.br>

Reitoria:

Rua 14 de Julho, 150, Coqueiros, Florianópolis - Santa Catarina

CEP: 88075-010

Telefone: (48) 3877-9000 / Fax: (48) 3877-9060

www.ifsc.edu.br

Reprodução total ou parcial dessa obra autorizada pelos autores e pela
instituição para fins educativos e não comerciais.

Catlogação na fonte pelo Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IFSC
Reitoria

K641c

Klein, Ivandro

Conceitos de posicionamento por satélites: topografia e
agrimensura para cursos técnicos [recurso eletrônico] / Ivandro
Klein, Matheus Pereira Guzatto – Florianópolis: IFSC, 2018.

1 Livro digital.

38 p.: il.

Inclui referências.

ISBN 97885XXXXXXX

1. Geodésia. 2. Posicionamento. 3. Sistemas GNSS. I.
Guzatto, Matheus Pereira. II. Título.

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC
Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Câmpus Florianópolis
Catalogado por: Edinei Antonio Moreno CRB 14/1065

SUMÁRIO

1. SISTEMAS GNSS	1
1.1. NAVSTAR-GPS	2
1.1.1. <i>Tipos de receptores</i>	2
1.2. GLONASS	3
1.3. Galileo.....	4
1.4. BeiDou	4
1.5. IRNSS/NAVIC	4
1.6. KPS	5
1.7. QZSS.....	5
1.8. Aumento GNSS	5
1.8.1. SBAS.....	5
1.8.2. GBAS	6
1.9. A-GPS	6
1.10. IPS.....	7
2. OBSERVÁVEIS GNSS.....	8
2.1. Pseudodistância do código.....	9
2.2. Fase da onda portadora	10
2.2.1. <i>Solução das ambiguidades</i>	11
2.3. Outras observáveis GNSS.....	12
2.4. Combinações entre as observáveis GNSS originais	13
3. ÓRBITAS DOS SATÉLITES	15
3.1. Diluição da precisão.....	16
3.2. Efemérides transmitidas e efemérides precisas.....	17
3.3. Formato de arquivos GNSS	19
4. ERROS ENVOLVIDOS NO POSICIONAMENTO GNSS	21
4.1. Erro orbital	22
4.2. Erro do relógio do satélite.....	23
4.3. Efeitos de Relatividade e rotação da Terra	24
4.4. Erro devido à ionosfera.....	25
4.4.1. <i>Anomalias ionosféricas</i>	27
4.5. Erro devido à troposfera	28
4.6. Perdas de ciclo (sinal)	29
4.7. Erro do multicaminho	30
4.8. Erro do relógio do receptor	31
4.9. Centro de fase da antena	32
4.10. Fase wind-up	33
4.11. Atrasos instrumentais do satélite e do receptor e o ruído do receptor.....	34
4.12. Erros na estação GNSS	34
4.13. Comentários gerais sobre os erros no posicionamento GNSS	36
5. REFERÊNCIAS	38

1. SISTEMAS GNSS

GNSS (*Global Navigation Satellite System* – sistema global de navegação por satélite) corresponde aos sistemas de posicionamento e navegação por satélites, desenvolvidos a partir da década de 70 e largamente utilizados por diversos usuários e profissionais desde então. Sistemas GNSS são concebidos para fornecer a posição do usuário com cobertura global e disponibilidade contínua, isto é, independente da localização geográfica no globo terrestre, hora do dia ou condição climática.

O princípio básico de funcionamento do GNSS consiste na obtenção de distâncias por meio dos sinais emitidos pelos satélites e rastreados pelo receptor. Uma vez que informações sobre as posições dos satélites também são transmitidas nos sinais, o receptor calcula a posição do usuário em tempo-real com precisão de alguns metros.

Utilizando mais receptores, métodos e *softwares* adequados e/ou receptores mais sofisticados, o nível de precisão do posicionamento pode atingir poucos milímetros.

O posicionamento GNSS apresenta algumas vantagens em relação a métodos até então convencionais de levantamentos topográficos e geodésicos, como por exemplo:

- 1) Não necessidade de intervisibilidade entre as estações, por exemplo, para efetuar leituras à ré e à vante;
- 2) Maior produtividade no transporte de coordenadas por dezenas ou centenas de quilômetros até o local do levantamento;
- 3) Atualmente, pode fornecer a posição georreferenciada ao nível centimétrico em tempo-real, sem o profissional dispor de uma estação-base conhecida.

Embora largamente aplicado em levantamentos topográficos e geodésicos diversos, o posicionamento GNSS ainda apresenta certas restrições, como por exemplo:

- 1) Degradação da precisão posicional em ambientes com obstruções, enfraquecimento e reflexões dos sinais dos satélites, como ambientes *indoor*, cânions urbanos e naturais e áreas de densa cobertura vegetal;
- 2) Impossibilidade de alta precisão em tempo-real em áreas com obstruções ou ausência de cobertura para a transferência de dados via rádio ou *internet*;
- 3) Impossibilidade de aplicação em projetos altimétricos como obras hídricas, uma vez que os desníveis elipsoidais, isto é, referentes ao elipsoide (obtidos pelo posicionamento GNSS), podem divergir dos desníveis “reais”, isto é,

referentes ao “geóide” ou a superfície de referência adotada para o sistema de altitudes. Detalhes sobre o assunto podem ser encontrados em publicações na área de Geodésia.

1.1. NAVSTAR-GPS

O NAVSTAR-GPS, ou apenas GPS (*Global Positioning System*), é o sistema GNSS dos Estados Unidos da América. Quanto à estrutura do GPS (e dos sistemas GNSS em geral), este se divide em três segmentos: 1) espacial: relativo aos satélites em órbita; 2) controle: relativo às estações terrestres de monitoramento, que realizam a manutenção e garantem o funcionamento do sistema; e 3) usuários ou receptores.

Sobre o segmento espacial, os satélites GPS são constantemente substituídos (modernizados), sendo que o *status* atual da constelação GPS pode ser consultado no seguinte endereço eletrônico: <https://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus>.

Atualmente, os satélites mais modernos pertencem ao bloco II-F do fabricante *Boeing*. Satélites do bloco II-F são os primeiros satélites GPS com a técnica SA (*Selective Availability*) não implementada. A técnica SA insere erros propositalmente nos sinais GPS e atualmente está inativa. Entretanto, a técnica SA pode ser ativada, por exemplo, em períodos de conflito militar, para limitar o uso do GPS aos inimigos.

A próxima geração de satélites GPS corresponde ao bloco IIIA, do fabricante *Lockheed Martin*, com previsão inicial de lançamento do primeiro satélite em 2018.

1.1.1. Tipos de receptores

Os usuários de um sistema GNSS como o GPS podem ser classificados em civis e militares. Entretanto, a classificação dos usuários pode ser feita por meio dos tipos de receptores, o que inclui os receptores, algoritmos e *softwares* utilizados.

Satélites GPS transmitem sinais em até três frequências, denominadas L1, L2 e L5. O sinal rastreado pelo receptor pode ser o sinal original, ou um sinal modulado sobre o sinal original, denominado de “código”. O sinal original fornece maior nível de precisão do que o sinal modulado, entretanto, requer um receptor mais sofisticado.

Receptores de navegação, GPS automotivos e *smartphones* em geral processam somente o sinal modulado (código). Receptores de navegação como os modelos do fabricante *Garmin* fornecem precisão de alguns metros, robustez em campo, autonomia de várias horas, gerenciamento de dados (como importação e exportação de arquivos); funcionalidades como mapas, bússola, câmera fotográfica integrada, dentre outros.

GPS automotivos e *smartphones* em geral também processam o sinal modulado, com diversas funcionalidades e o mesmo nível de precisão posicional de um receptor de navegação. Entretanto, não possuem a mesma robustez e autonomia para trabalhos de campo ou gerenciamento de dados, como resistência a impactos e duração da bateria.

Receptores simples-frequência processam o sinal L1 original ou modulado (código), fornecendo precisão posicional de nível decimétrico ou centimétrico. Atualmente, devido ao desenvolvimento tecnológico, os receptores simples-frequência de finalidade profissional estão em desuso, com o catálogo muito reduzido. Alguns *smartphones* como os modelos *Samsung Galaxy S7* em diante já processam o sinal L1 original ou modulado, podendo ser classificados nesta categoria de receptores GNSS.

Receptores multi-frequência processam dois ou mais sinais originais ou modulados, fornecendo precisão de nível centimétrico ou até mesmo milimétrico. Alguns *smartphones* como o modelo *Xiaomi Mi-8* já possuem chip de dupla-frequência (L1/L5) integrados, sendo o modelo de chip BCM47755 do fabricante *Broadcom*.

Receptores RTK (*Real Time Kinematic*), além de processar os sinais dos satélites, também enviam e/ou recebem dados de outro(s) receptore(s), possibilitando o posicionamento com precisão de nível centimétrico em tempo-real.

Atualmente, em *websites* específicos, é possível adquirir *chip* RTK com custo inferior a 100 dólares. Além disso, fabricantes como a *Eos Positioning System* fornecem receptores RTK multi-frequência compatíveis com aplicativos de *smartphones* por meio de conexão via *bluetooth*.

1.2. GLONASS

O GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikkovaya Sistema*) é o sistema GNSS da Rússia (ex-União Soviética). O GLONASS é atualmente o único sistema GNSS alternativo ao GPS com cobertura global e disponibilidade contínua.

O segmento de usuários do GLONASS é equivalente ao do GPS. Um fato interessante é que o segmento de controle do GLONASS, ao contrário do GPS, possui diversas estações de monitoramento localizadas no Brasil.

Sobre o segmento espacial, o *status* atual da constelação GLONASS pode ser obtido no seguinte endereço eletrônico: <http://glonass-iac.ru/en/GLONASS/>.

Atualmente, a maior parte dos receptores GNSS disponíveis no mercado utiliza os sistemas GPS e GLONASS de forma integrada, fornecendo melhor cobertura e precisão, devido a maior quantidade de satélites disponíveis em relação ao

posicionamento somente GPS ou somente GLONASS. Desde 2011, os *smartphones* em geral também possuem sistema integrado de posicionamento GPS e GLONASS.

1.3. Galileo

O *Galileo* é um sistema GNSS que está sendo desenvolvido pela União Europeia e pela Agência Espacial Europeia. Um diferencial do *Galileo* é a oferta de diversos serviços comerciais (não gratuitos) aos usuários civis interessados, como navegação comercial ou com seguro de vida, busca e resgate e serviços voltados a órgãos públicos.

O sistema completo irá contar com trinta satélites (incluindo seis reservas), sendo que o *status* atual da constelação *Galileo* pode ser obtido no seguinte endereço eletrônico: <http://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information>.

1.4. BeiDou

O *BeiDou Navigation Satellite* ou *Compass* (“bússola”) é o sistema GNSS que está sendo desenvolvido pela China. O sistema é nomeado em referência a constelação Ursa Maior, que é conhecida como *Běidǒu* no idioma chinês.

O *BeiDou* consiste de duas constelações de satélites, uma composta por satélites geoestacionários e em órbita inclinada geossíncrona, formando um RNSS (*Regional Navigation Satellite System* – sistema regional de navegação por satélites) ao redor da China; e outra constelação composta por satélites em órbita média inclinada para cobertura global, similar aos demais sistemas GNSS.

O *status* atual da constelação *BeiDou* (regional e global) pode ser obtido no seguinte endereço eletrônico: http://mgex.igs.org/IGS_MGEX_Status_BDS.php.

1.5. IRNSS/NAVIC

O IRNSS (*Indian Regional Navigation Satellite System*) ou NAVIC (*NAVigation with Indian Constellation*) é o RNSS da Índia. O desenvolvimento do sistema por parte da Índia se deve ao fato do acesso ao GPS, GLONASS e/ou *BeiDou* não estar garantido em tempos de conflitos políticos.

O IRNSS consiste em três satélites em órbita geoestacionária e quatro satélites em órbita geossíncrona inclinada, com os sete satélites possuindo visibilidade permanente na Índia, garantindo assim o posicionamento em qualquer horário do dia.

O *status* atual da constelação IRNSS pode ser obtido no seguinte endereço eletrônico: http://mgex.igs.org/IGS_MGEX_Status_BDS.php.

1.6. KPS

O KPS (*Korean Positioning System*) foi anunciado em 2018 pela Coreia do Sul, sendo que a produção dos satélites deve começar em 2024 e o sistema deve estar plenamente operacional em 2034. O KPS será um RNSS formado por três satélites geoestacionários e quatro satélites em órbita inclinada geossíncrona, em um raio de cerca de 1.000 km ao redor de Seul. O KPS será desenvolvido devido ao fato dos sinais GPS estarem sofrendo interferências propositais na região pela Coreia do Norte.

1.7. QZSS

O QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*) é um sistema de aumento para o GPS, desenvolvido pelo Japão. O QZSS é formado por três satélites em órbitas geossíncronas inclinadas e um satélite geoestacionário. As órbitas geossíncronas inclinadas foram projetadas para que pelo menos um satélite esteja visível sobre o Japão, a uma inclinação de no mínimo 60° em relação ao horizonte.

O objetivo principal do QZSS é aumentar a disponibilidade do GPS em diversos cânions urbanos do Japão, onde apenas os satélites com ângulo de elevação muito alto (“quase zenital”) podem ter o sinal rastreado. O *status* atual do QZSS pode ser obtido no seguinte endereço eletrônico: http://mgex.igs.org/IGS_MGEX_Status_QZSS.php

1.8. Aumento GNSS

Aumento de um sistema GNSS consiste em aprimorar atributos como precisão, confiabilidade e disponibilidade, por meio de informações externas complementares. O aumento GNSS pode fornecer serviços gratuitos ou comerciais aos usuários.

1.8.1. SBAS

Um SBAS (*Satellite-Based Augmentation System* – sistema aumentado baseado em satélites) é um sistema que fornece suporte para uma região do globo terrestre por meio da transmissão de mensagens por satélites, geralmente, geoestacionários.

Estações terrestres de controle realizam o rastreamento dos sinais dos satélites GNSS e determinam correções destes sinais. Estes dados são enviados por antenas terrestres para satélites geoestacionários, que por sua vez, transmitem aos usuários finais, permitindo melhorar a qualidade do posicionamento “quase” em tempo-real.

Atualmente, existem diversos serviços SBAS mantidos por órgãos públicos, em geral gratuitos, como por exemplo, *Wide Area Augmentation System* (WAAS),

European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS), Multi-functional Satellite Augmentation System (MSAS), Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), GPS Aided Geo Augmented Navigation system (GAGAN), GLONASS System for Differential Correction and Monitoring (SDCM), Satellite Navigation Augmentation System (SNAS), Wide Area GPS Enhancement (WAGE); além de diversos SBAS comerciais a nível global mantidos por grupos privados, como os serviços *StarFire navigation system, Starfix, Omnsitar e Terrastar*, dentre outros.

Os SBAS são utilizados tanto para navegação área quanto terrestre e fornecem posicionamento em tempo-real com precisão ao nível sub-métrico. É importante ressaltar que, em função da área de cobertura, o IRNSS e sistemas SBAS como o japonês QZSS, o norte-americano WAAS e o europeu EGNOS são serviços indisponíveis no Brasil, embora os receptores GNSS importados para o mercado nacional possuem disponibilidade gratuita para estes tipos de sinais.

1.8.2. GBAS

O GBAS (*Ground-Based Augmentation System* – sistema aumentado baseado em solo) consiste em um sistema de aumento por meio de antenas terrestres de rádio.

Um sistema GBAS é composto por um ou mais receptores GNSS que rastreiam os sinais dos satélites em determinada região e determinam correções com base nestes dados. Estas correções são enviadas para antenas de rádio terrestres para serem transmitidas aos usuários finais, fornecendo maior precisão do que sistemas SBAS.

Geralmente, um sistema GBAS apoia receptores GNSS dentro de um raio de até 45 km, transmitindo os dados na banda de frequência VHF (*Very High Frequency*). Uma das principais aplicações do GBAS consiste no pouso e decolagem de aeronaves em condições climáticas críticas, devido a maior precisão em relação ao SBAS.

No Brasil, o aeroporto internacional do Galeão, no Rio de Janeiro, possui um sistema GBAS em fase de testes, sendo que um mapa global de estações GBAS em aeroportos pode ser visualizado em: <http://flygls.net/>.

1.9. A-GPS

Atualmente, estão disponíveis gratuitamente os sistemas A-GPS (*Assisted GPS* – GPS assistido) para diversos *smartphones*. No A-GPS, informações sobre as posições dos satélites são enviadas via *internet* ao *smartphone* por antenas terrestres de

operadoras telefônicas, reduzindo para poucos segundos o tempo necessário para receber estas informações e iniciar o posicionamento em tempo-real.

Em locais onde não há cobertura telefônica e disponibilidade do A-GPS, o tempo de inicialização do posicionamento pode exceder 30 segundos, pois as informações a respeito das posições dos satélites são obtidas diretamente a partir do sinal dos satélites, o que, em geral, requer maior tempo de transferência de dados.

1.10. IPS

Recentemente, a limitação do GNSS e RNSS em ambientes internos, devido à obstrução e reflexão dos sinais dos satélites pelas edificações, conduziu aos sistemas de posicionamento de interiores (IPS – *Indoor Positioning System*).

Um IPS é um sistema de localização interno de uma edificação que pode fornecer precisão ao nível centimétrico em relação aos pontos de localização conhecida no ambiente, como pontos de *Wifi* e/ou dispositivos com *bluetooth*.

Desta forma, o IPS pode ser utilizado de modo integrado aos sistemas GNSS, em sistemas híbridos de posicionamento (HPS – *Hybrid Positioning System*).

Encerrando esta seção, cabe mencionar ainda o termo “Geodésia industrial” (*industrial geodesy*), que abrange métodos e técnicas de medição para inspeção, posicionamento e alinhamento de grandes estruturas, como no caso das indústrias naval e *offshore*, aeroespacial, siderúrgica, equipamentos de geração de energia e até mesmo aceleradores de partículas.

A Geodésia industrial pode fazer uso da tecnologia “*indoor GPS*” (iGPS), que assim como no caso do GNSS, faz uso de emissores e receptores de sinais para o posicionamento de alta precisão, porém, em ambientes internos. No Brasil, o Laboratório de Geodésia Industrial (LGI) no *campus* Joinville da UFSC realiza pesquisas no tema. Mais detalhes podem ser obtidos no endereço eletrônico do LGI: <http://lgi.ufsc.br/>.

2. OBSERVÁVEIS GNSS

Sistemas GNSS são sistemas de rádio navegação, isto é, utilizam ondas de rádio (ondas eletromagnéticas). Uma onda eletromagnética é uma onda que se propaga na velocidade da luz ($c = 299.792.458$ metros por segundo no vácuo), obedecendo a seguinte relação matemática:

$$c = \lambda \cdot f$$

onde c é a velocidade da onda (velocidade da luz), λ é o comprimento de onda (distância para a onda apresentar o mesmo valor repetitivo em seu padrão), e f é a frequência da onda, ou seja, o inverso do seu período (tempo necessário para a onda apresentar o mesmo valor repetitivo em seu padrão). O comprimento de onda é medido em unidade linear, como por exemplo, metros, enquanto a frequência é medida em s^{-1} ou Hz (*hertz*).

No caso do GPS, cada satélite transmite duas ondas portadoras na banda L do espectro eletromagnético (ondas de rádio), denominadas de L1 e L2. O comprimento de onda da portadora L1 é $\lambda = 19,03$ cm (frequência de 1,57542 GHz), e da L2 é $\lambda = 24,42$ cm (frequência de 1,22760 GHz).

Logo, o sinal L1, por exemplo, oscila 1.575.420.000 vezes por segundo, com os picos das oscilações se repetindo a cada 19,03 cm no espaço, fazendo com que o sinal L1 percorra $0,1903 \cdot 1.575.420.000 \approx 299.792.458$ metros neste intervalo de tempo.

Satélites GPS do bloco mais moderno (IIR-F), lançados a partir de 2010, transmitem ainda o terceiro sinal L5, com $\lambda = 25,48$ cm (frequência de 1,17645 GHz). Embora já existam receptores GPS tripla-frequência disponíveis no mercado, o sinal L5 ainda é considerado pré-operacional pelo segmento de controle do GPS.

Satélites GLONASS também transmitem sinais em duas (G1, G2) ou três frequências (G1, G2, L3, para o caso de satélites produzidos a partir de 2014). Satélites *BeiDou* transmitem sinais em três frequências (B1, B2 e L5), enquanto satélites *Galileo* transmitem sinais em quatro frequências (E1, E5a ou L5, E5b, E6), sendo que o sinal E6 é de acesso comercial (restrito). Satélites QZSS transmitem os mesmos sinais do GPS (L1, L2, L5) e em uma frequência adicional para o envio de correções (L6), enquanto satélites IRNSS transmitem sinais em apenas duas frequências (L5 e S).

Independente do sistema, para as medidas de distância entre o satélite e o receptor por meio dos sinais GNSS, podem ser utilizados dois tipos básicos de observáveis: pseudodistância do código e fase da onda portadora.

2.1. Pseudodistância do código

A pseudodistância é a distância entre o satélite e o receptor obtida por meio de um código modulado sobre a onda portadora.

Os sinais modulados sobre os sinais GNSS, denominados PRN (*Pseudo-Random Noise* – ruído pseudoaleatório) são códigos binários (valores em uma sequência de -1 e +1), que se repetem em um intervalo regular de tempo, sendo por isto denominados de “pseudoaleatórios”. Como os satélites de um sistema GNSS transmitem sinais nas mesmas frequências (por exemplo: L1, L2 e L5), cada satélite pode ser identificado por meio do seu PRN próprio, sendo esta técnica denominada de CDMA (*Code Division Multiple Access* – múltiplo acesso pela divisão do código).

O valor da pseudodistância é dado pela multiplicação do tempo de propagação do sinal pela velocidade da luz no vácuo considerando um modelo teórico aproximado, isto é, desconsiderando diversos erros envolvidos. Desta forma, a distância obtida pelo código é chamada pela literatura de pseudodistância (*pseudorange*), ou seja, “falsa distância”.

A pseudodistância entre o satélite e o receptor em um dado instante é dada por:

$$PD = c \cdot \Delta t + \varepsilon_{PD}$$

onde Δt é a diferença de tempo entre uma transmissão particular do código emitida pelo satélite e a réplica desta transmissão particular do código gerada no receptor; c é a velocidade da luz e ε_{PD} é o erro da pseudodistância.

Atualmente, os satélites GPS transmitem o código aberto C/A na L1, o código restrito P na L1 e na L2, o código aberto L2C na L2 (para satélites a partir do bloco IIR-M), o código restrito M na L1 e na L2 (para satélites a partir do bloco IIR-M), e os códigos abertos I5 e Q5 na L5 (para satélites a partir do bloco II-F).

O código P é criptografado pela técnica AS (*Anti-Spoofing*), sendo ainda denominado de código Y. O acesso aos códigos restritos P e M sem degradação da precisão é possível somente para os usuários autorizados, isto é, receptores militares.

Desta forma, para usuários civis, a pseudodistância advinda do código C/A possui uma precisão entre 20 e 30 cm, enquanto a pseudodistância advinda do código P possui uma precisão entre 70 e 80 cm, devido ao acesso restrito (criptografado) do mesmo. Ressalta-se que a precisão da pseudodistância do código depende ainda da tecnologia do receptor utilizado.

A próxima geração de satélites GPS (bloco IIIA) irá transmitir o novo código aberto L1C no sinal L1, sendo que este código mais moderno deve apresentar maior precisão em relação ao código C/A usualmente utilizado nos receptores de navegação, GPS automotivos e *smartphones* em geral.

Sobre os demais sistemas GNSS, satélites GLONASS transmitem os códigos abertos L1OF ou L1OC em G1, L2OF ou L2OC em G2, L3OC em L3, e os códigos restritos L1SF ou L1SC em G1, e L2SF ou L2SC em G2, dependendo da geração do satélite. Satélites *Galileo* transmitem diversos códigos nas quatro portadoras, em função dos diversos serviços ofertados. Satélites *Beidou* transmitem o código aberto I em B1, B2 e B3 e o código restrito Q em B1, B2 e B3.

Portanto, se for utilizado um receptor GNSS que rastreia dois ou mais sistemas GNSS, pode-se obter pseudodistâncias entre o receptor e os satélites por meio de diversos, até mesmo dezenas de códigos diferentes.

2.2. Fase da onda portadora

Ao invés de utilizar códigos binários modulados sobre as ondas portadoras, as distâncias entre o satélite e o receptor podem ser obtidas diretamente a partir das próprias ondas portadoras. Esse tipo de observável, dado em ciclos de onda, é chamado de fase da onda portadora. A fase da onda portadora é uma observável muito mais precisa (precisão de poucos milímetros) do que a pseudodistância advinda do código, sendo empregada no posicionamento de alta precisão.

Matematicamente, a fase da onda portadora, em ciclos de onda, é dada por:

$$\varphi_r^s = \varphi^s - \varphi_r + N_r^s + \varepsilon_\varphi$$

onde φ_r^s é a fase da onda portadora no instante de recepção do sinal; φ^s é a fase do sinal do satélite recebida no receptor; φ_r é a fase do sinal gerada no receptor; N_r^s é a ambiguidade da fase e ε_φ é o erro da fase da onda portadora.

Em unidade de metros, a fase da onda portadora se torna:

$$\lambda \cdot \varphi_r^s = \lambda \cdot (\varphi^s - \varphi_r) + \lambda \cdot N_r^s + \lambda \cdot \varepsilon_\varphi$$

2.2.1. Solução das ambiguidades

Quando o receptor é inicializado, a primeira observável da fase da onda portadora é a parte fracional de um ciclo de onda. A partir desta primeira observação, o receptor realiza a contagem de ciclos de onda do satélite até ao receptor de modo cumulativo, isto é, em relação ao número de ciclos inteiros (desconhecidos) da primeira época de medição.

O processo de solução do número de ciclos inteiros da primeira época de medição, para cada satélite, é denominado de solução da ambiguidade. Quando a ambiguidade é solucionada corretamente, ou seja, o número de ciclos inteiros (N) da primeira época é determinado para todos os satélites, o posicionamento resultante é de alta precisão, sendo denominada de “solução fixa”. Caso contrário, a solução obtida é dita “flutuante”, por resultar em um valor fracionário para este número de ciclos inicial.

Diversos fatores afetam a solução das ambiguidades, como a quantidade e distribuição espacial dos satélites; o número de sinais (frequências) rastreados pelo receptor; as condições climáticas (especialmente na alta atmosfera, denominada ionosfera); a quantidade de superfícies que podem obstruir e/ou refletir os sinais dos satélites (como prédios, morros, muros, vegetação e etc.); o tempo total de rastreio dos sinais dos satélites pelo receptor; a quantidade de receptores envolvidos e a distância entre estes, dentre outros.

A solução das ambiguidades é de natureza complexa, e quando houver perda do sinal de um satélite, uma nova ambiguidade (N) deve ser solucionada. Desta forma, é importante conhecer o nível de confiança (NC) da solução fixa obtida, como por exemplo, $NC = 99,9\%$. Este valor deve ser configurado ou ao menos fornecido pelo receptor ou *software* de processamento de dados utilizado.

Os métodos mais empregados para a solução das ambiguidades são o método geométrico (vários minutos ou horas de rastreio dos sinais dos satélites em um mesmo ponto); o método da linha-base conhecida (inicializar o posicionamento em pontos cujas posições já são conhecidas); o método da troca de antenas entre dois receptores (atualmente em desuso); e técnicas *On The Fly* (OTF) empregadas em receptores RTK, que permitem a solução das ambiguidades em poucos segundos.

Quando a solução fixa é obtida, a precisão resultante do posicionamento é de nível centimétrico ou até mesmo milimétrico. No caso da solução flutuante, a precisão depende do tempo de rastreio, sendo possível atingir precisão ao nível centimétrico ou até mesmo milimétrico para sessões de rastreio longas (por exemplo, de algumas horas).

Ressalta-se que é preferível uma solução flutuante, em geral de pior precisão, porém, fornecendo resultados mais realistas, do que uma solução fixa errada, de alta precisão, mas que pode fornecer posições com erros de decímetros ou até mesmo metros. A solução fixa errada pode ocorrer uma vez que precisão e exatidão posicional não são necessariamente sinônimos, conforme será visto no Capítulo 4.

2.3. Outras observáveis GNSS

O efeito *Doppler* corresponde à variação aparente da frequência de uma onda (como um sinal GNSS) devido ao movimento relativo entre o emissor (no caso, o satélite) e o receptor.

Como o satélite e o receptor possuem movimento relativo, devido ao movimento orbital do satélite, a rotação da Terra e eventualmente o deslocamento do próprio receptor, medidas *Doppler* também são registradas, podendo ser utilizadas para melhorar a qualidade do posicionamento e/ou na estimação da velocidade do receptor, quando este se encontra em movimento.

Além de medidas *Doppler*, receptores GNSS em geral registram ainda a razão sinal-ruído (SNR – *Signal-to-Noise-Ratio*) de cada sinal GNSS. Quanto maior o valor da razão SNR, menor o nível de ruído (interferência) no sinal GNSS em questão.

O valor de SNR, dado em dB (decibéis), depende de diversos fatores, como o ângulo de elevação do satélite (quanto mais próximo do zênite maior o SNR); da quantidade de obstáculos na recepção do sinal, como muros, edificações e vegetação; da possível interferência de outras fontes de rádio, das condições da atmosfera e da própria tecnologia do receptor, isto é, do ruído gerado por este no processo de captação do sinal.

Outra medida da intensidade (qualidade) do sinal é a densidade portadora-ruído (CNR – *carrier-to-noise density*), representada por C/N_0 e dada em dB-Hz. O valor de C/N_0 depende dos mesmos fatores de SNR, mas, ao contrário do SNR, considera uma largura de banda de frequências de apenas 1 Hz, enquanto o valor de SNR depende da largura de banda (*bandwidth*) do sistema de processamento do sinal no receptor.

Desta forma, uma maneira de melhorar a qualidade do posicionamento é por meio da adoção de máscaras de SNR ou C/N_0 . Por exemplo, pode-se definir uma máscara para não rastrear sinais GNSS cujo valor de C/N_0 sejam inferiores a 33 dB-Hz.

É importante ressaltar que muitas vezes os termos SNR e C/N_0 são utilizados equivocadamente como sinônimos.

2.4. Combinações entre as observáveis GNSS originais

Além das observáveis originais, isto é, fase da onda portadora e pseudodistância do código, novas observáveis GNSS, obtidas a partir de combinações das observáveis originais, podem ser utilizadas no posicionamento.

A Tabela 2.1 apresenta alguns exemplos de combinações entre as fases das portadoras originais do GPS. Considere “ σ ” como o desvio-padrão (medida de precisão ou nível de ruído) da respectiva observável na sexta coluna.

Tabela 2.1 – Algumas combinações entre as fases das portadoras originais L1 e L2 do GPS						
Observável	Símbolo	Coefficiente L1	Coefficiente L2	λ (cm)	$\pm \sigma$ (mm)	Comentários
L1	L1	1	0	19	3	Sinal L1 original, ruído baixo
L2	L2	0	1	24,4	3,9	Sinal L2 original, ruído baixo
<i>Ion-free</i>	L0	2,54572778	-1,98368398	19	9	“Livre da ionosfera”, ciclos reais, ruído alto
<i>Wide lane</i>	L _W	1	-1	86,2	19,4	Maior ruído, solução fácil da ambiguidade
<i>Narrow lane</i>	L _N	1	1	10,7	2,1	Menor ruído, difícil solução da ambiguidade
54	L ₅₄	5	-4	10,1	10,3	Baixo erro ionosférico, ruído alto, ciclos inteiros

Analisando a Tabela 2.1, nota-se que o sinal L1 possui maior precisão, isto é, menor desvio-padrão do que o sinal L2. A observável L0 é aplicada para reduzir erros da ionosfera em receptores multi-frequência, conforme será visto no Capítulo 4.

A observável L_W é aplicada no posicionamento relativo entre dois receptores distantes centenas de km, devido ao maior comprimento de onda e facilidade de resolução das ambiguidades; enquanto a observável L_N é aplicada somente em casos específicos de boas condições para solução das ambiguidades, fornecendo maior precisão final.

Por fim, a observável L₅₄ é aplicada quando a solução das ambiguidades de L0 é problemática, reduzindo parcialmente os erros da ionosfera, porém, resultando em um sinal com ciclos inteiros (ao contrário do sinal L0, onde os ciclos resultantes são números reais em função dos coeficientes fracionários em L1 e L2).

Os *softwares* de processamento de dados GNSS, em geral, aplicam ou podem aplicar todas estas combinações, dentre outras, adotando a que apresentar melhor resultado final.

Outra observável resultante da combinação de observáveis GNSS originais é a pseudodistância filtrada pela fase, obtida pela combinação entre a pseudodistância do código e a fase da onda portadora.

A pseudodistância filtrada pela fase para um receptor de simples-frequência (sinal L1), em ciclos de onda, é dada por:

$$PD_{FILT}^c(t_k) = \frac{1}{k} \cdot PD_{L1}^c(t_k) + \frac{k-1}{k} \cdot [PD_{FILT}^c(t_{k-1}) + \varphi_{L1}(t_k) - \varphi_{L1}(t_{k-1})]$$

onde k é o número de instantes (épocas de observação), t_k é a época de rastreio e t_{k-1} é a época de rastreio imediatamente anterior, PD_{L1}^c é a pseudodistância em ciclos em L1, isto é, pseudodistância original dividida pelo comprimento de onda da L1, e φ_{L1} é a fase da onda portadora L1.

O desvio-padrão da pseudodistância filtrada pela fase no sinal L1 é dado por:

$$\sigma_{PD_{FILT}^c} = \pm \sqrt{\frac{\sigma_{PD_{L1}^c}^2 \cdot (\sigma_{PD_{L1}^c}^2 + k \cdot \sigma_{\varphi_{L1}}^2)}{k \cdot (\sigma_{PD_{L1}^c}^2 + \sigma_{\varphi_{L1}}^2)}}$$

onde na expressão anterior, $\sigma_{PD_{L1}^c}$ corresponde ao desvio-padrão da pseudodistância em L1 e $\sigma_{\varphi_{L1}}$ corresponde ao desvio-padrão da fase da portadora L1.

Analisando a expressão anterior, nota-se que a precisão da PD_{FILT}^c aumenta conforme o número de instantes (épocas de observação) aumenta, contanto que não ocorram perdas de ciclo (sinal). Nestes casos, o algoritmo da pseudodistância filtrada pela fase deve ser reiniciado, isto é, o número de instantes retorna para $k = 1$.

Desta forma, a pseudodistância filtrada pela fase pode resultar em uma observável GNSS com precisão centimétrica e que não requer solução da ambiguidade, ao contrário da fase da portadora original. Entretanto, a pseudodistância filtrada pela fase também é sensível à perda de ciclos (sinais).

Futuramente, a pseudodistância filtrada pela fase pode-se tornar largamente empregada no posicionamento GNSS em *smartphones*, uma vez que já existem modelos que rastreiam tanto a pseudodistâncias do código quanto a fase da onda portadora.

3. ÓRBITAS DOS SATÉLITES

Satélites de sistemas GNSS e RNSS encontram-se em órbitas geoestacionárias, como alguns satélites *BeiDou*, IRNSS, QZSS e dos SBAS; em órbitas geossíncronas inclinadas, como alguns satélites *BeiDou*, IRNSS e QZSS; ou em órbitas médias inclinadas, como nos sistemas GPS, GLONASS, *Galileo* e demais satélites *BeiDou*.

Uma órbita é geoestacionária (GEO) quando é circular; sobre o equador da Terra e a sua rotação acompanha a rotação da Terra. Desta forma, para um observador na superfície terrestre, o satélite em órbita geoestacionária permanece sempre na mesma posição. Devido à disponibilidade permanente de sinal sobre determinada área, a órbita geoestacionária é muito utilizada em telecomunicações, sistemas RNSS e SBAS.

Uma órbita geossíncrona inclinada (IGSO) também acompanha a rotação da Terra, mas ao contrário da órbita geoestacionária, não é uma órbita circular no plano equatorial, mas sim uma órbita elíptica e inclinada, fornecendo melhor cobertura nas regiões de altas latitudes. A órbita IGSO é propícia aos sistemas RNSS, pois também fornece visibilidade permanente em uma região situada em latitudes intermediárias.

No caso dos satélites GNSS em órbita média inclinada (MEO), a órbita é elíptica e inclinada em relação ao plano equatorial, com período orbital de cerca de 12 horas. O fato de a órbita possuir inclinação em relação ao plano equatorial e um período orbital menor do que a rotação da Terra possibilita a cobertura global da constelação de satélites, sendo o tipo de órbita mais adequado para os sistemas GNSS em geral.

A Tabela 3.1 apresenta um resumo das órbitas dos satélites dos sistemas GNSS.

Tabela 3.1 – Quadro resumo das órbitas dos satélites dos sistemas GNSS.

	GPS	GLONASS	<i>Galileo</i>	<i>BeiDou</i>
Altitude orbital média (em km)	20.180	19.130	23.222	21.528 (MEO), 35.786 (IGSO, GEO)
Período orbital	11h 58m	11h 15m	14h 5m	12h 50m (MEO), 23h 56m (IGSO, GEO)
Inclinação da órbita	55°	56°	64,8°	55,5° (MEO), 55° (IGSO), < 2° (GEO)
N° de planos orbitais	6	3	3	3 (MEO), 3 (IGSO) e 1 (GEO)
Quantidade de satélites previstos	24	24	30 (6 reservas)	27 (MEO), 3 (IGSO), 5 (GEO)

Analisando a Tabela 3.1, nota-se que o GLONASS possui órbitas mais inclinadas que os demais sistemas GNSS, favorecendo o posicionamento em regiões de altas latitudes. O número de satélites visíveis e a distribuição espacial destes nas órbitas estão relacionados com o conceito de diluição da precisão e afetam a qualidade do posicionamento, conforme será abordado na próxima seção.

3.1. Diluição da precisão

DOP (*Dilution Of Precision* – diluição da precisão) é um termo para especificar o efeito multiplicativo da geometria da constelação dos satélites visíveis na precisão das medidas de um receptor. Assume-se que a precisão do posicionamento (σ_{POS}) é igual ao produto entre a precisão da medida de distância satélite-receptor (σ_{DIST}) e o DOP, obtido em função da geometria da constelação de satélites visíveis para este receptor, ou seja:

$$\sigma_{POS} = DOP \cdot \sigma_{DIST}$$

Analisando a expressão anterior, nota-se que quanto maior o valor do DOP, maior é o efeito multiplicativo, ou seja, pior é a precisão resultante no posicionamento.

Existem vários tipos de DOP, a saber: EDOP (DOP na componente Este); NDOP (DOP na componente Norte); HDOP (*Horizontal DOP*, resultante 2D do EDOP e do NDOP); VDOP (*Vertical DOP*); PDOP (*Positional DOP* – resultante 3D do HDOP e do VDOP); TDOP (*Time DOP* – referente ao padrão de tempo, por exemplo, do relógio do receptor), GDOP (*Geometric DOP*, resultante 4D do PDOP e do TDOP).

O PDOP é inversamente proporcional ao volume (V) do poliedro formado entre o receptor e a constelação de satélites visíveis, isto é: $PDOP \propto 1 / V$. Desta forma, quanto maior a distância (abertura) entre os satélites, maior será o volume deste poliedro, e consequentemente, menor será o valor do PDOP.

Além do volume (abertura) da constelação de satélites, os valores de DOP também dependem do número de satélites visíveis, sendo que quanto mais satélites visíveis, menor deve ser o valor do DOP. No caso de posicionamento multi-GNSS, por exemplo, GPS + GLONASS, são fornecidos valores de DOP considerando que todos os satélites visíveis formam uma única constelação GNSS.

Desta forma, atualmente, a questão dos valores de DOP não é tão crítica, pois, em geral, dispõe-se de um número de satélites visíveis GPS + GLONASS maior do que dez, o que resulta em valores de PDOP geralmente menores ou iguais a três.

No entanto, os diferentes tipos de DOP são úteis no planejamento de levantamentos onde pode ocorrer obstrução de sinais, como em áreas urbanas, pois a inclusão desta informação nos *softwares* de planejamento auxilia na definição do melhor horário para o rastreamento dos satélites. O planejamento de um levantamento GNSS considerando estas questões pode ser feito gratuitamente por meio do seguinte endereço eletrônico: <https://www.gnssplanning.com/>.

Quando se busca um posicionamento de alta precisão, pode-se definir ainda uma máscara DOP, como por exemplo, não realizar posicionamento com valor de PDOP superior a 5 ou valor de HDOP superior a 3. A Tabela 3.2 apresenta uma classificação para os valores de DOP no contexto atual de disponibilidade de satélites.

Tabela 3.2 – Classificação para diferentes valores de DOP (posicionamento multi-GNSS).

Valor do DOP	Classificação	Comentários
≤ 1	Ideal	É a situação ideal para o posicionamento de alta precisão.
1 – 2	Excelente	Atualmente, possível de se obter em grande parte das situações.
2 – 3	Bom	Atualmente, valores máximos desejáveis para a alta precisão.
3 – 5	Moderado	Não ideal, se possível, buscar um horário melhor para o rastreamento.
5 – 10	Ruim	Atualmente, só ocorre em situações críticas de rastreamento.
> 10	Muito pobre	Deve-se evitar esta situação no posicionamento de alta precisão.

Os valores de DOP mais adotados na prática são o HDOP e o PDOP. O valor de GDOP é interessante para o posicionamento de alta precisão envolvendo apenas um receptor, em função da relação entre o erro do relógio do receptor e o TDOP.

Devido à configuração espacial dos satélites, em geral, os valores de VDOP serão maiores do que os valores de HDOP, ou seja, a precisão da componente vertical é mais afetada do que a precisão da componente horizontal no posicionamento GNSS.

Existem ainda outras medidas DOP, como o RDOP (*Relative DOP* – DOP relativo), empregado no método de posicionamento relativo envolvendo dois ou mais receptores GNSS; e o ADOP (*Ambiguity DOP* – DOP da ambiguidade), dado em ciclos de onda e relacionado com a solução das ambiguidades.

Quanto menor o valor do ADOP, maior a probabilidade de correta solução das ambiguidades, sendo que para a solução das ambiguidades em métodos de posicionamento em tempo-real, o ideal é: $ADOP \leq 0,13$. O RDOP, atualmente em desuso, também é um indicativo da precisão e solução das ambiguidades em métodos de posicionamento entre dois receptores, sendo que, idealmente: $RDOP \leq 0,2$.

3.2. Efemérides transmitidas e efemérides precisas

Para obter a posição de um receptor GNSS a partir das distâncias aos satélites, devem-se conhecer as coordenadas (posições) dos satélites. A posição de cada satélite

GNSS em determinado instante é obtida por meio das efemérides, produzidas e atualizadas pelos segmentos de controle e outros órgãos relacionados ao GNSS.

As efemérides ditas transmitidas, ou mensagens de navegação, são previsões das órbitas dos satélites que são transmitidas aos satélites para serem enviadas aos usuários por meio dos sinais GNSS. No caso do GPS, o referencial das efemérides transmitidas atualmente é o WGS-84 G1762, no caso do GLONASS, é o PZ-90.11, no caso do *Galileo*, é o GTRF14v01, no caso do *Beidou*, é o CGS 2012, e no caso do QZSS, é o JSG2010. Atualmente, as diferenças entre os referenciais dos sistemas GNSS são de alguns milímetros, no máximo poucos centímetros.

Além disso, cada sistema GNSS possui o seu formato de efemérides transmitidas. No caso do GPS, são fornecidos os elementos keplerianos, que descrevem a órbita teórica do satélite segundo as Leis de Kepler, e os elementos perturbadores da órbita, em função de agentes perturbadores da órbita teórica, como a atração luni-solar e a distribuição heterogênea de massas na Terra, dentre outros. As efemérides transmitidas do GPS possibilitam o cálculo das coordenadas dos satélites até duas horas antes ou depois da época origem, sendo atualizadas a cada duas horas.

É importante salientar que além dos elementos orbitais, as efemérides transmitidas fornecem correções para o erro do relógio dos satélites e também parâmetros de um Modelo Global da ionosfera (Modelo de Klobuchar).

No caso do GLONASS, as efemérides transmitidas contêm a posição (coordenadas dos satélites em PZ-90.11), velocidade, aceleração e alguns elementos keplerianos da órbita dos satélites. Os formatos das efemérides transmitidas do *Galileo* e do *BeiDou* são praticamente idênticos ao do GPS.

Para os usuários que necessitam de alta precisão no posicionamento, pode-se acessar via *internet* as efemérides precisas produzidas por diversos centros de análise de dados GNSS, como o IGS (*International GNSS Service* – serviço GNSS internacional).

As efemérides precisas do IGS são gratuitas e classificadas em preditas, ultra-rápidas, rápidas e finais. Mais detalhes sobre cada tipo de efeméride precisa do IGS podem ser obtidos no seguinte endereço eletrônico: <http://www.igs.org/products>.

Nas efemérides precisas do IGS, a cada 15 minutos são fornecidas as coordenadas (posições) dos satélites em um referencial global compatível ao nível do milímetro com os referenciais dos sistemas GNSS; enquanto as correções dos relógios dos satélites são fornecidas a cada 15 minutos, 5 minutos ou 30 segundos, dependendo do tipo de efeméride precisa.

Em função da dinâmica orbital e da varredura do satélite na superfície terrestre, satélites em órbita média inclinada possibilitam efemérides de maior precisão, seguidos pelos satélites em órbita inclinada geossíncrona. Os satélites geoestacionários, devido a dinâmica orbital praticamente “estacionária” para observadores na superfície terrestre, não favorece a determinação da órbita com alta precisão, especialmente na componente este-oeste, uma vez que o satélite acompanha o movimento de rotação da Terra.

Ressalta-se que para a determinação da posição do satélite em um determinado instante, é realizado um processo de interpolação no *software* de processamento de dados, uma vez que os dados de efemérides são atualizados, por exemplo, a cada duas horas ou a cada 15 minutos. O erro de interpolação é compatível com a qualidade da efeméride utilizada, sendo maior nos horários relativos ao início e final do arquivo quando se utiliza interpoladores polinomiais de alto grau (fenômeno *Runge*).

3.3. Formato de arquivos GNSS

Cada fabricante de receptores possui formatos próprios de armazenamento e transferência de arquivos GNSS. Desta forma, os dados do receptor de um fabricante podem não ser compatíveis com o *software* de processamento de outro fabricante.

Desta forma, para facilitar o intercâmbio de dados GNSS, foi desenvolvido o formato RINEX (*Receiver INdependent EXchange format*), o qual consiste de três tipos de arquivos: arquivo de observações (extensão *.o*); arquivo de dados meteorológicos (extensão *.m*) e arquivo de mensagens de navegação ou efemérides transmitidas (extensão *.n* para GPS, extensão *.g* para GLONASS, extensão *.e* para *Galileo*, extensão *.c* para *BeiDou/Compass*, extensão *.j* para QZSS, extensão *.i* para IRNSS, extensão *.s* para SBAS).

O formato universal RINEX possui várias versões, sendo que o programa gratuito TEQC (*Translation, Edition and Quality Control*), desenvolvido pela UNAVCO em Colorado/EUA, permite a conversão de dados GNSS de qualquer fabricante para o formato RINEX. O TEQC está disponível no seguinte endereço eletrônico: <https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>. Ressalta-se que, em geral, os fabricantes de receptores GNSS fornecem em seus *softwares* de processamento de dados a opção de conversão para o formato universal RINEX.

Atualmente (Agosto de 2018), a versão mais recente do formato RINEX é a versão 3.03, sendo que o manual deste formato de arquivos pode ser obtido no seguinte endereço eletrônico: <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex303.pdf>.

As efemérides precisas de órgãos como o IGS, ao contrário das efemérides transmitidas, não são fornecidas no formato RINEX, mas em um formato denominado SP3 – *Standard Product 3* (extensão *.sp3*), contendo, em geral, a identificação, coordenadas e erro do relógio de cada satélite dos diferentes sistemas GNSS.

Ressalta-se que os dados de observação, contendo as distâncias satélite-receptor em todos os sistemas GNSS (pseudodistâncias dos códigos e fases das portadoras), podem resultar em arquivos de grande extensão, especialmente para sessões de rastreo longas. Desta forma, foi desenvolvido o formato *Hatanaka* por Yuki Hatanaka. O formato *Hatanaka* é uma compactação do arquivo de dados brutos GNSS, com extensão *.d* ao invés de *.o* do arquivo RINEX original.

Um *software* gratuito para a conversão de arquivos no formato RINEX (extensão *.o*) para o formato *Hatanaka* (extensão *.d*) e vice-versa pode ser obtido no seguinte endereço eletrônico: <http://terras.gsi.go.jp/ja/crx2rnrx.html>.

Ressalta-se que a partir de 2018, o IBGE irá fornecer os dados de observação de suas estações GNSS ativas no formato *Hatanaka*, uma vez que cada arquivo disponibilizado pelo IBGE contém 24h de dados com taxa de coleta de 15 segundos, resultando em 5.760 épocas de rastreo ao todo.

Assumindo que em média são rastreados vinte satélites, com pelo menos quatro distâncias satélite-receptor (pseudodistância e fase da portadora em duas frequências), o número de distâncias satélite-receptor seria de 115.200, o que justifica a compressão do arquivo, especialmente para mais constelações e sinais disponíveis futuramente.

Ressalta-se ainda que os arquivos de efemérides não possuem este volume de dados, uma vez que os dados são fornecidos em intervalos regulares para serem utilizados em processos de interpolação. Portanto, arquivos de efemérides não requerem compressão de dados, não sendo compactados no formato *Hatanaka*.

4. ERROS ENVOLVIDOS NO POSICIONAMENTO GNSS

As observáveis GNSS, ou seja, as medidas de distância entre satélite e receptor, estão sujeitas aos mais diversos tipos de erros. As fontes de erros podem ser o próprio satélite, o próprio receptor, a estação GNSS (ponto topográfico), e, principalmente, a propagação do sinal GNSS na atmosfera terrestre.

O tratamento adequado dos diversos erros envolvidos no posicionamento GNSS é de extrema importância na obtenção de resultados de alta precisão. Em trabalhos de baixa precisão, muitos desses erros podem ser negligenciados. Desta forma, as observáveis GNSS como a pseudodistância do código e a fase da onda portadora estão sujeitas a três classes de erros: sistemáticos, grosseiros e aleatórios.

Erros sistemáticos em geral possuem alguma causa conhecida, como por exemplo, alguma lei da Física, podendo ser tratados no processamento de dados ou na própria realização do rastreamento GNSS, por meio de técnicas adequadas. Ressalta-se que a maioria dos tipos de erros GNSS podem ser classificados como sistemáticos.

Erros grosseiros são falhas humanas e/ou instrumentais, não possíveis de serem corrigidas, e, portanto, devem ser evitados. São exemplos de erros grosseiros no posicionamento GNSS a falha na correta leitura da altura da antena do receptor por parte do profissional ou alguma possível anomalia no sinal GNSS. Quando possível, erros grosseiros devem ser identificados e removidos no processamento de dados.

Por fim, os erros aleatórios são inevitáveis, em função da precisão da medição, condições de observação, acuidade do profissional e limitações das técnicas e equipamentos utilizados. O ruído da observável GNSS é um exemplo de erro aleatório.

A precisão nominal do equipamento, informada no manual do fabricante, é uma estimativa do erro aleatório “esperado” no posicionamento, considerando diversos fatores. Por exemplo, para um par de receptores *Topcon Hiper V*, a precisão nominal do posicionamento relativo estático é $\pm (3 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm} \times D)$ em planimetria e $\pm (5 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm} \times D)$ em altimetria, sendo “*D*” a distância entre o par de receptores envolvidos. O termo “*ppm*” corresponde a partes por milhão, logo: $1 \text{ ppm} = 1 \text{ mm por km}$.

Ressalta-se que os erros podem afetar tanto a precisão quanto a acurácia (exatidão) do posicionamento. A precisão corresponde ao desvio-padrão, isto é, uma medida da dispersão interna dos dados, enquanto a acurácia (exatidão) corresponde à diferença entre o valor obtido e o valor “real”, isto é, isento de erros.

Em geral, o processamento dos dados fornece apenas uma estimativa da precisão (desvio-padrão), sendo a acurácia ou exatidão desconhecida. Na ausência de erros

sistemáticos e/ou grosseiros significativos, o desvio-padrão pode ser interpretado tanto como uma medida de precisão quanto de exatidão.

Desta forma, é importante o conhecimento dos diversos tipos de erros e como estes podem ser devidamente tratados. A seguir serão apresentados os principais tipos de erros envolvidos no posicionamento GNSS.

4.1. Erro orbital

O erro orbital corresponde à diferença entre a posição do satélite, obtida pelas efemérides, e a posição “real” do satélite. O erro orbital resulta da limitação das efemérides em modelar completamente todas as forças que agem nas órbitas dos satélites, como a força gravitacional da Terra e a atração lunissolar, dentre outras.

No caso das efemérides transmitidas, em geral, o erro orbital é de poucos metros. No caso das efemérides precisas, o erro orbital será de decímetros ou centímetros, dependendo do tipo de efeméride precisa e de órbita do satélite GNSS.

Quando se utiliza apenas um receptor, o erro orbital é diretamente propagado para a sua posição. No posicionamento envolvendo dois receptores, como regra geral, o erro orbital no valor da linha-base (distância relativa entre dois receptores) pode ser aproximado de acordo com a seguinte expressão:

$$\Delta b = b \cdot \frac{\Delta r}{r}$$

Onde Δb é o erro resultante na linha-base, b é o comprimento da linha-base, Δr é o erro na posição do satélite (erro orbital), e r é a distância do satélite ao receptor (aproximadamente 20.000 km no caso de órbitas médias inclinadas).

Como o erro orbital varia de poucos metros, utilizando efemérides transmitidas, até poucos centímetros, utilizando efemérides precisas, a Tabela 4.1 apresenta alguns valores para Δb (em mm), considerando $r = 20.000$ km. Estudos na literatura mostram que os valores da Tabela 4.1 são em geral “pessimistas”, estando mais relacionados ao erro na componente vertical do que na componente horizontal da linha-base.

Tabela 4.1 – Valores para o erro resultante na linha-base (Δb em mm), em função do comprimento da linha-base (b em km, linhas à esquerda) e do erro orbital (Δr em m, colunas acima), considerando $r = 20000$ km.

	0,01	0,02	0,05	0,1	0,5	1	2	5
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	1,3
10	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	1,0	2,5
20	0,0	0,0	0,1	0,1	0,5	1,0	2,0	5,0
50	0,0	0,1	0,1	0,3	1,3	2,5	5,0	12,5
100	0,1	0,1	0,3	0,5	2,5	5,0	10,0	25,0
150	0,1	0,2	0,4	0,8	3,8	7,5	15,0	37,5
200	0,1	0,2	0,5	1,0	5,0	10,0	20,0	50,0
300	0,2	0,3	0,8	1,5	7,5	15,0	30,0	75,0
400	0,2	0,4	1,0	2,0	10,0	20,0	40,0	100,0
500	0,3	0,5	1,3	2,5	12,5	25,0	50,0	125,0

4.2. Erro do relógio do satélite

Os satélites GNSS possuem relógios atômicos, isto é, altamente precisos. Entretanto, no caso do GPS, por exemplo, os relógios atômicos dos satélites não estão perfeitamente sincronizados com o tempo oficial GPS, ditado por um relógio atômico da estação de controle terrestre central localizada em Colorado Springs nos EUA.

A diferença entre o tempo do sistema GNSS, ditado pelo respectivo relógio atômico padrão, e o tempo de um satélite GNSS, ditado por seus relógios atômicos internos, corresponde ao erro do relógio do satélite. Ressalta-se que cada sistema GNSS possui o seu próprio sistema de tempo.

É importante notar que o erro do relógio do satélite não é constante, uma vez que o padrão de tempo é baseado em oscilações atômicas. Desta forma, os dados relativos aos erros dos relógios dos satélites são atualizados periodicamente nas efemérides.

No caso das efemérides transmitidas, o erro do relógio do satélite obtido é de poucos nanosegundos ($1 \text{ nanosegundo} = 10^{-9} \text{ s}$), o que resulta em um erro na distância entre o satélite e o receptor de poucos metros; enquanto que no caso das efemérides precisas, o erro do relógio do satélite em geral é inferior a 100 picosegundos ($1 \text{ picosegundo} = 10^{-12} \text{ s}$), o que resulta em um erro na distância entre o satélite e o receptor de poucos centímetros.

Utilizando dois receptores, o erro do relógio do satélite é cancelado, considerando que, para um mesmo instante, o erro do relógio do satélite afeta igualmente as medidas de distância entre o satélite e os dois receptores envolvidos.

4.3. Efeitos de Relatividade e rotação da Terra

Os satélites GNSS se encontram a cerca de 20.000 km (MEO) ou 36.000 km (GEO e IGSO) de altitude. Logo, estão sujeitos a um campo gravitacional muito mais fraco do que o campo gravitacional na superfície terrestre. Além disso, satélites MEO percorrem cerca de 3,9 km/s enquanto satélites GEO ou IGSO percorrem cerca de 3,07 km/s. Logo, os satélites possuem velocidade tangencial maior do que os corpos situados na superfície terrestre, cuja velocidade tangencial é cerca de 465 m/s no Equador.

Como o tempo passa mais devagar para corpos sujeitos a menor campo gravitacional, porém, passa mais rápido para corpos sujeitos a maior velocidade, correções relativísticas, isto é, considerando a Teoria da Relatividade de Einstein, devem ser aplicadas no posicionamento GNSS.

Estas correções são feitas diretamente no relógio dos satélites, pois, no caso do GPS, por exemplo, antes do lançamento ao espaço, a frequência nominal dos relógios dos satélites é reduzida em 0,00455 Hz. Caso contrário, não seria possível realizar posicionamento de alta precisão utilizando sistemas GNSS.

Efeitos relativísticos residuais podem ser corrigidos no processamento dos dados, por meio de *softwares* adequados, ou minimizados utilizando dois receptores.

Além disso, o cálculo da posição do satélite deve ser feito para o instante de transmissão do sinal em um sistema de coordenadas fixo a Terra, isto é, um referencial terrestre, como por exemplo, o WGS-84 G1762 (GPS) ou o PZ-90.11 (GLONASS).

Dessa forma, deve-se efetuar a correção do movimento de rotação da Terra, pois, durante a propagação do sinal, isto é, do instante de transmissão do sinal pelo satélite ao instante de recepção do sinal pelo receptor, o sistema de referência terrestre rotaciona em relação ao satélite, alterando assim as suas coordenadas.

Portanto, a posição do satélite, obtida nas efemérides para o instante de recepção do sinal, deve ser rotacionada sobre o eixo de rotação da Terra em um ângulo α , definido como o produto do tempo de propagação do sinal (t) pela velocidade angular de rotação da Terra (ω).

Como o tempo de propagação do sinal é da ordem de $t = 0,067$ s para um satélite a uma altitude de cerca de 20.000 km, e a velocidade angular de rotação da Terra é da ordem de $\omega = 7,22 \cdot 10^{-5}$ rad/s (cerca de 15"/s), a correção para a posição do satélite, do instante de recepção ao instante de transmissão do sinal, é da ordem de 100 metros. Esta correção é aplicada automaticamente pelos *softwares* GNSS em geral.

4.4. Erro devido à ionosfera

Com relação à propagação de ondas, a ionosfera é a camada da atmosfera situada entre cerca de 50 a 1.000 km de altitude, sendo formada por partículas ionizadas. A ionosfera é uma das maiores fontes potenciais de erros no GNSS.

O erro devido à ionosfera depende da frequência do sinal GNSS (quanto maior a frequência, menor é o erro) e do nível de ionização, isto é, do conteúdo total de elétrons livres (TEC – *Total Electron Content*) ao longo da direção entre o satélite e o receptor. Uma unidade de TEC corresponde a 10^{16} elétrons livres por metro quadrado.

O TEC varia com o passar do tempo e com a localização geográfica, sendo influenciado por diversos fatores, como por exemplo: ciclo solar, época do ano, hora do dia, latitude geográfica ou geomagnética, atividade geomagnética, dentre outros.

Sobre as variações de longo período, o Sol apresenta ciclos regulares com cerca de onze anos de duração cada, onde cada ciclo apresenta um pico de atividade solar. Atualmente, estamos no ciclo solar 24, iniciado em Janeiro de 2008 e que deverá se encerrar no final de 2018. O próximo pico de atividade solar está previsto para 2025.

Sobre as variações sazonais, nos equinócios (meses de Março e Setembro) os valores do TEC em geral são maiores; enquanto nos solstícios (meses de Junho e Dezembro) os valores do TEC em geral são menores.

Sobre as variações diurnas no Brasil, em termos gerais, os valores máximos de TEC ocorrem entre às 14h e 16h e os valores mínimos ocorrem entre às 4h e 6h no horário local.

Em função da frequência do sinal e do valor de TEC, o erro de primeira ordem da ionosfera na distância satélite-receptor pode ser estimado por:

$$I_{rec}^{sat} = \pm \frac{40,3}{f^2} \cdot TEC$$

onde f é a frequência do sinal GNSS. O termo “ $\pm$ ” corresponde a um erro positivo (atraso ionosférico) no valor da pseudodistância e a um erro negativo (avanço ionosférico) no valor da fase da onda portadora.

Existem diversos *websites* que fornecem mapas globais do TEC, atualizados algumas vezes a cada hora. Como exemplo, pode-se citar o seguinte endereço eletrônico: <https://www.trimble.com/Positioning-Services/Ionospheric-TEC-map.aspx>.

No Brasil, o INPE disponibiliza o seguinte mapa regional para consulta: <http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/tec-map-inicio/>. A NASA fornece um mapa global onde é realizada a conversão de TEC para erro esperado na distância satélite-receptor (I_{rec}^{sat}). Como regra geral, 1 TEC = +16 cm de erro (positivo) na pseudodistância e -16 cm de erro (negativo) na fase da portadora do sinal L1. A consulta do mapa global com valores de erro no sinal L1 do GPS pode ser realizada no seguinte endereço eletrônico: <http://www.gdgps.net/products/tec-maps.html>.

Como o erro devido à ionosfera depende da frequência do sinal GNSS, é possível eliminar o erro de primeira ordem com receptor GNSS multi-frequência, por meio da observável denominada *ion-free*, designada por L0 ou L3. Este é o principal motivo para os satélites GNSS transmitirem sinais em pelo menos duas frequências. O erro de primeira ordem da ionosfera pode atingir dezenas de metros, enquanto erros ionosféricos remanescentes, em geral, atingem no máximo alguns cm.

As combinações lineares *ion-free* (L0) mais utilizadas para a pseudodistância e para a fase da onda portadora são dadas respectivamente por:

$$PD_{IF} = PD_{L1} - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2} \cdot PD_{L2}, \quad \varphi_{IF} = \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \cdot \varphi_{L1} - \frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \cdot \varphi_{L2}$$

onde PD_{IF} , PD_{L1} , PD_{L2} são, respectivamente, as pseudodistâncias para L0, L1 e L2, f_{L1} e f_{L2} são, respectivamente, as frequências das portadoras L1 e L2, e φ_{IF} , φ_{L1} , φ_{L2} são, respectivamente, as fases de L0, L1 e L2.

A observável *ion-free* (L0) apresenta o mesmo comprimento de onda da portadora L1, porém, por ser uma combinação linear envolvendo tanto o sinal L1 quanto o sinal L2, possui ruído (desvio-padrão) cerca de três vezes maior do que o sinal L1 (veja a Tabela 2.1 do Capítulo 2).

Para usuários que não dispõem de receptores multi-frequência, existem algumas possibilidades de minimização do erro devido à ionosfera, como por exemplo, no posicionamento entre dois receptores, pois se considera que o comportamento da ionosfera (TEC) nos locais é praticamente o mesmo. Devido a esta condição, a literatura recomenda que a distância entre o par de receptores não exceda 20 km.

Em condições normais, o erro devido a ionosfera decorrelaciona a uma taxa de cerca de 1 ppm (1 mm por km). Em condições críticas no Brasil, este gradiente pode exceder 1.000 ppm (1 m por km). Entretanto, como o erro ionosférico depende de

diversos fatores, dependendo das condições, a distância entre os dois receptores pode ser muito maior do que 20 km.

Pode-se ainda minimizar o erro devido à ionosfera corrigindo os dados GNSS por meio de algum modelo da ionosfera. Os coeficientes do Modelo de Klobuchar são transmitidos nas mensagens de navegação (efemérides transmitidas), o que permite corrigir em torno de 50% a 60% do erro total devido à ionosfera.

Com a modernização dos sistemas GNSS, com a inclusão da terceira portadora L5 no GPS e a integração de diferentes sistemas, espera-se melhoras na solução das ambiguidades e do erro devido à ionosfera no posicionamento GNSS.

4.4.1. Anomalias ionosféricas

Em condições normais, o erro devido à ionosfera pode ser reduzido por meio do sinal *ion-free*, do posicionamento relativo entre dois receptores e/ou por meio de modelos da ionosfera como o modelo de Klobuchar. Entretanto, anomalias da ionosfera, que resultam em sinais GNSS ruidosos e até mesmo em perdas de sinais, podem impossibilitar o posicionamento de alta precisão.

A formação de bolhas ionosféricas após o pôr do sol, especialmente nas regiões equatoriais ou de altas latitudes, pode resultar em irregularidades denominadas cintilações ionosféricas. As cintilações ionosféricas resultam em enfraquecimento, aumento do nível de ruído e até mesmo perda do sinal GNSS, podendo durar várias horas. Em termos gerais, as maiores ocorrências de cintilação ionosférica na América Latina são entre os meses de Setembro a Abril, das 20h às 3h locais.

Sobre a localização geográfica, em geral, a região equatorial é onde ocorrem os maiores valores e as maiores variações do TEC; as regiões de médias latitudes são relativamente livres de anomalias ionosféricas, enquanto as regiões polares apresentam padrão imprevisível. Em períodos de máxima atividade solar, as regiões entre os trópicos podem estar sujeitas a cintilações ionosféricas em até 100 dias por ano, enquanto as regiões de médias latitudes, em geral, estarão sujeitas aos efeitos de cintilações ionosféricas apenas alguns dias por ano.

Na região entre os trópicos, ocorre ainda o fenômeno denominado de anomalia equatorial, com o primeiro pico diário por volta das 14h e outro pico diário antes da meia-noite, por volta das 21h no horário local. O segundo pico tende a não ocorrer em períodos de baixa atividade solar. A anomalia equatorial pode impossibilitar o posicionamento de alta precisão devido às altas variações nos valores de TEC.

Além disso, explosões e ventos solares podem afetar o campo geomagnético da Terra, resultando em anomalias ionosféricas com duração e intensidade variáveis e que podem degradar significativamente a qualidade do posicionamento GNSS. A aurora polar é um exemplo de fenômeno que pode resultar deste tipo de evento.

Mapas globais com atualização a cada cinco minutos sobre a ocorrência de cintilações ionosféricas podem ser obtidos no seguinte endereço eletrônico: <https://www.trimble.com/Positioning-Services/Ionosphere-Scintillation-map.aspx>. Para profissionais nas regiões entre os trópicos ou de altas latitudes, o monitoramento da ionosfera é fundamental para não comprometer os resultados do rastreamento GNSS.

Atualmente, existem receptores como o modelo *PolaRx5S* do fabricante *Septentrio*, que estima índices da ionosfera e valores de TEC em tempo-real, podendo ser utilizado em métodos de posicionamento em rede para mitigar estes efeitos.

4.5. Erro devido à troposfera

A troposfera corresponde à baixa atmosfera, situando-se até uma altitude de cerca de 50 km. Ao contrário da ionosfera, a troposfera é um meio não dispersivo para sinais abaixo de 30 GHz, isto é, a refração do sinal independe de sua frequência.

O efeito da troposfera nas distâncias satélite-receptor, também conhecido como refração ou atraso troposférico, pois resulta em um erro positivo no valor da distância, pode variar de poucos decímetros até dezenas de metros, e depende da densidade da atmosfera e do ângulo de elevação do satélite no horizonte, pois, quanto mais próximo do horizonte, maior é o percurso do sinal percorrido na troposfera.

Para reduzir os efeitos da troposfera, pode-se utilizar a chamada máscara de elevação, usualmente recomendada pela literatura entre 10° e 15°. No caso, sinais GNSS abaixo do ângulo de máscara são descartados. A máscara de elevação pode ser configurada no receptor antes do rastreamento GNSS ou posteriormente no *software* de processamento dos dados. A máscara de elevação também reduz o efeito da ionosfera.

A refração troposférica consiste de duas componentes: uma composta de gases secos (componente hidrostática) e outra composta de vapor d'água (componente úmida). A componente hidrostática depende da quantidade de nitrogênio e oxigênio, sendo que o erro na distância satélite-receptor, em geral, corresponde a poucos metros no zênite e varia com a temperatura e a pressão atmosférica local. Este atraso é estimado com relativa exatidão e a variação é pequena, cerca de 1% durante várias horas.

A componente úmida (vapor d'água) depende da umidade do ar, sendo que o erro usualmente corresponde a alguns centímetros ou decímetros no zênite. Entretanto, a variação em função do tempo, cerca de 20% em poucas horas, é muito maior do que no caso da componente seca, o que torna difícil a predição deste atraso com alta exatidão.

O atraso troposférico (erro total) é aproximado como a soma dos efeitos das componentes hidrostática e úmida, sendo que a componente seca corresponde a cerca de 90% do erro total. Em outras palavras, o tempo chuvoso pouco interfere na qualidade do posicionamento GNSS. Em termos gerais, quanto maior a temperatura e/ou a latitude, menor é o erro; quanto maior a pressão atmosférica e/ou a altitude, maior é o erro.

Usualmente, a modelagem do erro das duas componentes é dada pelo produto entre o atraso zenital (vertical) e uma função de mapeamento, a qual relaciona o atraso vertical no zênite (erro mínimo) com o atraso para outros ângulos de elevação (E), conforme a expressão a seguir:

$$T_r^S = [T_{ZH} \cdot mh(E) + T_{ZW} \cdot mw(E)]$$

onde T_r^S é o atraso troposférico total, T_{ZH} e T_{ZW} são, respectivamente, o atraso troposférico no zênite ($E = 90^\circ$) para a componente seca e para a componente úmida, $mh(E)$ e $mw(E)$ são, respectivamente, as funções de mapeamento que relacionam o atraso zenital das componentes seca e úmida com o ângulo de elevação (E) do satélite.

Em geral, os valores para T_{ZH} e T_{ZW} são obtidos por meio de algum modelo da troposfera, sendo o modelo de Hopfield o mais conhecido. Desta forma, o *software* de processamento calcula e aplica as correções em função dos parâmetros da troposfera (temperatura, pressão, umidade e etc.) para o local e instante do posicionamento.

O INPE fornece valores de atraso zenital troposférico obtidos por meio de um modelo de previsão numérica de tempo (PNT), com 15 km de resolução espacial e previsões a cada 3h para a América do Sul. Estes dados podem ser obtidos gratuitamente no seguinte endereço eletrônico: <http://satelite.cptec.inpe.br/zenital/>.

4.6. Perdas de ciclo (sinal)

Conforme visto anteriormente, se não houver perda do sinal de um satélite, a ambiguidade deste permanece constante durante todo o período de rastreamento do receptor GNSS. Porém, podem ocorrer obstruções do sinal de um ou mais satélites, resultando

em perdas de ciclo. Desta forma, após o sinal do satélite ser rastreado novamente pelo receptor, uma nova ambiguidade desta nova primeira época deve ser solucionada.

Perdas de ciclo em geral são causadas pelo bloqueio do sinal GNSS por obstruções como edificações, morros, árvores, pontes, túneis e ainda por outros fatores, como variações abruptas na ionosfera, aceleração do receptor, modo de economia da bateria (especialmente em *smartphones*) e/ou interferência de outras fontes de rádio.

A perda de ciclo afeta a solução da ambiguidade da fase da onda portadora, porém, não é tão crítica para o posicionamento utilizando a pseudodistância advinda do código, desde que o receptor permaneça rastreando o sinal dos demais satélites.

4.7. Erro do multicaminho

O multicaminho ocorre quando o receptor recebe sinais refletidos por superfícies e objetos localizados nas proximidades deste, como construções, árvores, muros, automóveis, postes, taludes, corpos d'água, a própria superfície do local, dentre outros, resultando em um aumento no valor da distância satélite-receptor, devido ao maior percurso percorrido pelos sinais refletidos.

O erro do multicaminho é maior para a pseudodistância advinda do código, podendo atingir vários metros, do que para a fase da onda portadora, atingindo apenas alguns centímetros. Entretanto, o multicaminho também dificulta a solução da ambiguidade, especialmente para a observável *ion-free*, o que pode impossibilitar o posicionamento de alta precisão com correta solução da ambiguidade.

Atualmente, o multicaminho é um dos erros GNSS de modelagem mais complexa, pois depende da geometria do posicionamento e das condições locais de rastreio. Neste sentido, estimativas para o valor do erro do multicaminho nas pseudodistâncias em L1 e L2 são dadas respectivamente por:

$$MC_{L1} = PD_{L1} - \left(1 + \frac{2}{(f_1/f_2)^2 - 1}\right) \cdot \varphi_{L1} + \left(\frac{2}{(f_1/f_2)^2 - 1}\right) \cdot \varphi_{L2}$$

$$MC_{L2} = PD_{L2} + \left(\frac{2 \cdot (f_1/f_2)^2}{(f_1/f_2)^2 - 1}\right) \cdot (\varphi_{L2} - \varphi_{L1})$$

onde MC_{L1} e MC_{L2} são os erros estimados do multicaminho para as pseudodistâncias em L1 e L2, PD_{L1} e PD_{L2} são os valores das pseudodistâncias em L1 e L2, φ_{L1} e φ_{L2} são os

valores das fases da onda portadora em L1 e L2, f_1 e f_2 são as frequências das portadoras L1 e L2.

O *software* gratuito TEQC fornece os valores de MC_{L1} e MC_{L2} para receptores multi-frequência. Desenvolvimentos tecnológicos em receptores e *softwares* de processamento de dados GNSS possibilitam reduzir o efeito do multicaminho por meio de algoritmos adequados.

Para evitar ou reduzir o multicaminho, deve ser evitada a presença de superfícies refletoras nas proximidades do receptor GNSS, embora muitas vezes isso não seja possível, como por exemplo, no caso de levantamentos em áreas urbanas.

Nestas situações, uma alternativa é utilizar antenas GNSS apropriadas, como por exemplo, antenas com tecnologia *choke-ring* ou *pinwheel* para o receptor em repouso (modo estático); ou então múltiplas antenas para o receptor em movimento (modo cinemático), o que aumenta os custos e, em geral, não é viável do ponto de vista prático.

Uma maneira mais prática de reduzir o efeito do multicaminho é por meio da máscara de elevação, semelhante ao caso do erro troposférico e ionosférico. Outra forma de reduzir o multicaminho é definir uma máscara para a razão sinal-ruído (SNR). Por exemplo, sinais GNSS com SNR inferior a 30 dB são descartados no posicionamento, o que permite reduzir também o efeito de anomalias ionosféricas.

Pesquisas no Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas na UFPR investigam o uso de um material de espuma (isolante eletromagnético) como atenuador de multicaminho, sendo um dispositivo mais leve (prático) e muito mais barato do que uma antena *choke-ring*; podendo fornecer desempenho semelhante.

De forma geral, a recomendação é não realizar o posicionamento GNSS quando se deseja alta precisão (cm ou mm) em locais sujeitos a multicaminho acentuado.

4.8. Erro do relógio do receptor

Receptores GNSS em geral possuem relógios ditados por osciladores de quartzo, menos precisos do que os relógios atômicos dos satélites, porém, de custo muito mais baixo. A diferença entre o tempo do relógio do receptor e o tempo do sistema GNSS, ditado pelo relógio atômico padrão da estação central, é o erro do relógio do receptor.

O erro do relógio do receptor depende da tecnologia do receptor e é sensível a variações de temperatura, situação que pode afetar o posicionamento com *smartphones*.

Como o tempo do relógio do receptor é baseado em osciladores de quartzo, o erro do relógio do receptor não permanece constante durante todo o rastreo, devendo

ser estimado em cada época do posicionamento, uma vez que um milésimo de erro no relógio do receptor, por exemplo, corresponde a cerca de 300 km de erro na distância satélite-receptor, considerando que o sinal GNSS se propaga na velocidade da luz.

Este é o principal motivo pelo qual os sistemas GNSS são projetados para que, em estágio plenamente operacional, pelo menos quatro satélites estejam visíveis para qualquer localização em qualquer instante: três satélites são suficientes para determinar a posição tridimensional do receptor, mas um quarto satélite é necessário para corrigir as distâncias em função do erro do relógio deste receptor.

Como cada sistema GNSS possui o seu próprio sistema de tempo, idealmente, cada sistema GNSS deve ter ao menos quatro satélites rastreados para realizar o posicionamento, mesmo de modo integrado.

Alguns receptores permitem realizar o posicionamento integrado mesmo com três ou menos satélites de um sistema GNSS, como alguns modelos do fabricante *Spectra Precision*, por meio da tecnologia *Z-Blade GNSS-centric*. Ressalva-se que, atualmente, o rastreamento de três ou menos satélites GPS ou GLONASS só ocorre em situações críticas. Em geral, mais satélites estarão disponíveis em ambos os sistemas.

No posicionamento relativo entre dois receptores, o erro do relógio de cada receptor é cancelado, considerando que este afeta igualmente as medidas de distância entre o receptor e os satélites em um mesmo instante.

4.9. Centro de fase da antena

O centro de fase eletrônico (CFE) da antena do receptor é um ponto virtual no qual as medidas dos sinais são referenciadas, e, geralmente, não coincide com o centro geométrico da antena. A diferença varia de acordo com a intensidade e direção do sinal, e ainda com a frequência da onda portadora (L1, L2, L5 e etc.), ou seja, o CFE é variável para cada sinal, satélite e instante do posicionamento realizado.

O CFE é normalmente tratado no posicionamento de alta precisão, pois a diferença em relação ao ARP (*Antenna Reference Point* – ponto de referência da antena) pode atingir vários cm dependendo do modelo utilizado. O ARP e a variação do CFE constam no manual da antena.

Como o CFE varia em função da intensidade e direção do sinal, este pode ser obtido por calibração, sendo que o IGS fornece parâmetros de calibração para diversos modelos de antenas GNSS. Desta forma, estas correções podem ser aplicadas no *software* de processamento dos dados, bastando informar o tipo de antena do receptor.

Ressalta-se que o centro de fase da antena do satélite (ponto de referência para a emissão dos sinais), também difere do centro de massa do satélite (ponto de referência para as suas coordenadas), sendo que a posição do centro de fase da antena em relação ao centro de massa do satélite é necessária para a determinação das órbitas com alta precisão. Desta forma, o IGS também fornece estes valores e as suas variações.

Uma maneira de minimizar os efeitos da variação do CFE no posicionamento relativo consiste na utilização de receptores com antenas de mesmo fabricante e modelo, orientadas ainda na mesma direção, como por exemplo, o norte magnético ou o norte verdadeiro. Este é o motivo pelo qual algumas antenas possuem uma marca (“seta”) sobre a sua superfície, indicando que esta marca deve ser orientada ao norte desejado.

Desta forma, espera-se que os deslocamentos dos centros de fase sejam aproximadamente iguais nas antenas dos receptores envolvidos, sendo então minimizados no posicionamento relativo. Quanto menor a distância entre os receptores, maior a proximidade entre os ângulos de elevação dos satélites para ambos os receptores, isto é, maior será a redução deste tipo de erro.

4.10. Fase *wind-up*

O erro da fase *wind-up* consiste na variação do valor medido da fase da onda portadora devido a mudanças na orientação relativa entre a antena transmissora (satélite) e a antena do receptor. Em geral, o erro da fase *wind-up* pode alcançar cerca de meio comprimento de onda, ou seja, cerca de 9,5 cm na fase do sinal L1.

Satélites GNSS em geral têm os seus painéis solares orientados em relação ao Sol, e, desta forma, ocorrem lentas rotações de suas antenas com o passar do tempo, sendo estas rotações mais críticas na ocorrência de eclipses. Nestes casos, o efeito da fase *wind-up* pode rapidamente atingir alguns decímetros.

A fase *wind-up* é praticamente eliminada no posicionamento relativo entre dois receptores que permanecem estáticos, mesmo para linhas-base de centenas de km.

Entretanto, no posicionamento cinemático em tempo-real (RTK), podem ocorrer erros de ordem decimétrica quando há mudança abrupta da trajetória da antena, como por exemplo, na realização de uma curva em ângulo reto acompanhando a feição levantada, resultando em solução flutuante da ambiguidade. Nestes casos, o ideal é o deslocamento mantendo a orientação da antena em uma direção fixa, o que não é viável do ponto de vista prático.

No posicionamento por ponto preciso (PPP), quando se deseja alta precisão (cm ou mm), este efeito deve ser corrigido no *software* de processamento de dados utilizado.

Ressalta-se que correções da fase *wind-up* não se aplicam em posicionamentos utilizando a pseudodistância ao invés da fase da onda portadora, uma vez que a rotação relativa não altera a distância entre as antenas, apenas o valor da fase observada.

4.11. Atrasos instrumentais do satélite e do receptor e o ruído do receptor

O caminho percorrido pelas diferentes portadoras no *hardware* do satélite e do receptor não é o mesmo, e estas diferenças de caminhos percorridos pelas portadoras no *hardware* do satélite e do receptor resultam no atraso instrumental do satélite e do receptor, respectivamente.

No caso dos satélites, durante a calibração na fase de testes, a magnitude do atraso é determinada e introduzida como parte das mensagens de navegação, sendo diferente para cada satélite. Por exemplo, o atraso da portadora L2 é cerca de 1,647 vezes maior do que o atraso da portadora L1 para um dado satélite GPS, e estes valores são constantemente atualizados por meio do segmento de controle.

No caso dos receptores GNSS, estes valores são obtidos por calibração ou estimados durante o processamento dos dados GNSS. Além disso, em geral, os receptores GNSS possuem múltiplos canais (um para cada satélite), ou seja, os sinais de cada satélite percorrerão caminhos eletrônicos diferentes no *hardware* do receptor. Para corrigi-los, o receptor realiza uma calibração no início de cada rastreio GNSS.

Efeitos residuais são praticamente eliminados no posicionamento relativo ou podem ser estimados no processamento dos dados para os casos em que se deseja alta precisão no PPP, especialmente no contexto atual de solução fixa em tempo-real.

Além destes erros de natureza sistemática, o receptor gera ruído, sendo este um erro de natureza aleatória, função da tecnologia do fabricante empregada no receptor. O ruído afeta a qualidade do sinal rastreado e é maior para a pseudodistância (em geral, alguns decímetros) do que para a fase da onda portadora (no máximo alguns mm).

4.12. Erros na estação GNSS

Como erros na própria estação GNSS, isto é, no ponto topográfico ocupado com o receptor GNSS, pode-se citar possíveis erros de coordenadas, em função da qualidade da rede de referência adotada; da época do levantamento em relação à época de referência da determinação rede (devido principalmente ao movimento de tectônica de

placas); e ainda o efeito de marés terrestres, cargas oceânicas e movimento do polo sobre a superfície terrestre do local onde se encontra a estação GNSS.

No caso do posicionamento relativo, ao se utilizar um receptor-base em um ponto de posição considerada conhecida, os erros nos valores de suas coordenadas serão diretamente propagados para as coordenadas do receptor localizado no ponto de interesse. Desta forma, é muito importante o profissional estar atento sobre a qualidade posicional de um ponto considerado como base no método relativo. A qualidade posicional envolve tanto os efeitos de precisão quanto possíveis efeitos de tendência.

Sobre a tectônica de placas, esta resulta em deslocamentos da superfície terrestre, e, conseqüentemente, em variações das coordenadas de um mesmo ponto com o passar do tempo. Como exemplo, pode-se citar que a componente norte da estação IFSC da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) em Florianópolis/SC está atualmente defasada em mais de 20 cm em relação ao valor oficial homologado pelo IBGE, em função da diferença de tempo de mais de 18 anos em relação à Maio de 2000, ou seja, a época de referência do SIRGAS2000, atual sistema geodésico do Brasil.

O efeito da tectônica de placas é mais acentuado em regiões situadas na borda das placas, como no caso dos países andinos na América do Sul. Este efeito pode ser corrigido pelo uso de modelos de velocidades ou no posicionamento entre dois receptores situados sobre uma mesma região da placa. Entretanto, eventos extremos como terremotos podem causar deslocamentos de metros em apenas alguns minutos.

O efeito das marés sólidas ou terrestres, devido à atração lunissolar e rotação da Terra, pode provocar um deslocamento da superfície terrestre de até 40 cm no Equador em um intervalo de tempo de apenas seis horas. Este efeito pode ser corrigido por meio de modelos no *software* de processamento de dados utilizado ou minimizado no posicionamento entre dois receptores, especialmente para linhas-base curtas.

A carga dos oceanos ou até mesmo de rios de grande porte como o Rio Amazonas sobre a superfície terrestre pode exercer variações de ordem centimétrica, especialmente na componente vertical. Assim como no caso das marés sólidas, quando se busca alta precisão e alta exatidão, este efeito pode ser corrigido por meio de modelos adequados ou minimizado no posicionamento entre dois receptores.

Existem ainda erros de magnitude menor, como o movimento do polo e a carga da atmosfera sobre a superfície terrestre, que podem resultar em uma variação de até 25 mm na componente horizontal e vertical da estação GNSS, respectivamente. Ambos os efeitos podem ser corrigidos por meio de modelos (embora os *softwares* comerciais em

geral negligenciem estes efeitos), ou então minimizados no posicionamento entre dois receptores.

4.13. Comentários gerais sobre os erros no posicionamento GNSS

O erro esperado na distância satélite-receptor, considerando todas as fontes de erros envolvidas, é designado por UERE (*User Equivalent Range Error* – erro equivalente de distância). Assumindo que os erros não possuem correlações, o UERE pode ser obtido pela raiz quadrada do somatório do quadrado dos erros individuais.

Por exemplo, considerando erro orbital de 1 m; erro do relógio do satélite de 1,5 m; atraso ionosférico de 8,5 m; atraso troposférico de 5 m; erro de multicaminho de 0,9 m e ruído da pseudodistância do código C/A de 0,30 m, o erro esperado na direção da distância satélite-receptor é dado por:

$$UERE = \pm\sqrt{1^2 + 1,5^2 + 8,5^2 + 5^2 + 0,9^2 + 0,3^2} = 10,070 \text{ m}$$

Nota-se que o erro esperado (UERE) é menor do que o somatório de todos os erros, uma vez que se espera certa compensação dos diversos erros envolvidos.

Em geral, quando o posicionamento é afetado majoritariamente por erros aleatórios, a qualidade posicional será função do ruído do receptor e da precisão das distâncias satélites-receptor, ou seja, espera-se alta precisão e alta exatidão quando se utiliza a fase da onda portadora.

Os erros sistemáticos podem afetar apenas a exatidão, como por exemplo, no caso da não correção do movimento de tectônica de placas, resultando em um erro sistemático de decímetros nos valores das coordenadas, mas sem afetar a precisão do posicionamento.

Em outros casos, quando os erros sistemáticos são de menor magnitude do que a própria precisão do posicionamento, estes podem ser considerados como erros aleatórios, como por exemplo, a variação do centro de fase da antena nos valores de pseudodistâncias do código.

Os erros grosseiros podem afetar tanto a precisão quanto a exatidão posicional, como no caso de multicaminho acentuado, anomalias ionosféricas, perdas críticas de sinal resultando em soluções flutuantes ou fixas erradas, dentre outros casos.

A Tabela 4.2 apresenta um resumo dos principais tipos de erros envolvidos no posicionamento GNSS.

Tabela 4.2 – Quadro-resumo das principais fontes e tipos de erros no posicionamento GNSS.

Fonte	Erro	Magnitude	Principais Tratamentos
Satélite	Orbital	cm – m	Efemérides precisas, uso de dois receptores
	Relógio do satélite	cm – m	Efemérides precisas, uso de dois receptores
Trajeto do sinal	Ionosférico	10 – 100 m	<i>Ion-free</i> , modelos, uso de dois receptores, máscaras
	Troposférico	dm – 30 m	Modelos, uso de dois receptores, máscara de elevação
	Perda de sinal	***	Identificação e estimação no processamento
	Multicaminho	mm – m	Máscara de elevação ou SNR, tecnologia adequada
Receptor	Relógio do receptor	10 – 100 m	Estimação no posicionamento, emprego do método de posicionamento relativo
	Centro de fase da antena	mm – cm	Parâmetros de calibração da antena, uso de receptores de mesmo modelo e orientação
	Ruído	mm – dm	Tecnologia do receptor, uso da pseudodistância filtrada pela fase ou da fase da onda portadora
Estação	Tectônica de placas	cm(s) por ano	Modelos de velocidades, uso de dois receptores situados sobre a mesma região da placa tectônica
	Maré terrestre	mm – dm	Modelos, uso de dois receptores

Encerrando este documento, cabe aqui uma reflexão: futuramente, com *smartphones* multi-GNSS rastreando o código L1C e até mesmo a fase da onda portadora; com a disponibilidade de efemérides precisas e modelos gratuitos de ionosfera e troposfera em tempo-real; em situações com boas condições de rastreamento com valores baixos de DOP e TEC; considerando um posicionamento de média duração (alguns minutos por ponto), é possível obter erro posicional planimétrico inferior ao metro em levantamentos de baixo-custo?

Os métodos de posicionamento envolvendo um, dois ou mais receptores serão apresentados no próximo documento desta série: “Métodos de levantamento por satélites”.

5. REFERÊNCIAS

- BEIDOU. **Beidou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document**. Disponível em: <<http://www.beidou.gov.cn/xt/gfzx/201712/P020171218337008148266.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2018.
- DE OLIVEIRA, P. S.; MOREL, L.; FUND, F.; LEGROS, R.; MONICO, J. F. G.; DURAND, S.; DURAND, F. Modeling tropospheric wet delays with dense and sparse network configurations for PPP-RTK. **GPS solutions**, v. 21, n. 1, p. 237-250, 2017.
- GALILEO. **Open Service Signal In Space Interface Control Document**. Disponível em: <https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Galileo-OS-SIS-ICD.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2018.
- GLONASS. **GLONASS Interface Control Document**. Disponível em: <<http://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/glonass/interfeysnyy-kontrolnyy-dokument/>>. Acesso em: 12 ago. 2018.
- GONG, X.; GU, S.; LOU, Y.; ZHENG, F.; GE, M.; LIU, J. An efficient solution of real-time data processing for multi-GNSS network. **Journal of Geodesy**, v. 92, n. 7, p. 797-809, 2018.
- GPS. **Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard**. Disponível em: <<https://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2018.
- GPS. **Global Positioning System Wide Area Augmentation System (WAAS) Performance Standard**. Disponível em: <<https://www.gps.gov/technical/ps/2008-WAAS-performance-standard.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2018.
- IRNSS. **Signal in Space ICD for Standard Positioning Service**. Version 1.1. Disponível em: <https://www.isro.gov.in/sites/default/files/irnss_sps_icd_version1.1-2017.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2018.
- LIMA, C. M. D. A. **Posicionamento por ponto preciso com solução de ambiguidades inteiras no contexto de rede GPS**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. UNESP, Presidente Prudente, 2015.
- LI, X.; LI, X.; YUAN, Y.; ZHANG, K.; ZHANG, X.; WICKERT, J. Multi-GNSS phase delay estimation and PPP ambiguity resolution: GPS, BDS, GLONASS, Galileo. **Journal of Geodesy**, v. 92, n. 6, 579-608. 2018.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more**. New York: Springer-Verlag, 2008. 516p. ISBN: 9783211730126.
- KAZMIERSKI, K.; SOŚNICA, K.; HADAS, T. Quality assessment of multi-GNSS orbits and clocks for real-time precise point positioning. **GPS Solutions**, v. 22, n. 1, p. 11, 2018.
- KHODABANDEH, A.; TEUNISSEN, P. J. G. On the impact of GNSS ambiguity resolution: geometry, ionosphere, time and biases. **Journal of Geodesy**, v. 92, n. 6, p. 637-658, 2018.
- LEICK, A.; RAPOPORT, L.; TATARNIKOV, D. **GPS satellite surveying**. 4th Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. 840p. ISBN: 9781118675571.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2º Edição. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 2008. 480p. ISBN: 9788571397880.
- PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. Brazilian active GNSS networks as systems for monitoring the ionosphere. **GPS Solutions**, v. 21, n. 3, p. 1013-1025, 2017.
- QZSS. **Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Satellite Positioning, Navigation and Timing Service**. Disponível em: <<http://qzss.go.jp/en/technical/download/pdf/ps-is-qzss/is-qzss-pnt-002.pdf?t=1534815174777>>. Acesso em: 08 ago 2018.
- SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. 2nd Edition. Hannover: Walter de Gruyter, 2003. 589p. ISBN 3110175495.
- SU, M.; ZHENG, J.; YANG, Y.; WU, Q. A new multipath mitigation method based on adaptive thresholding wavelet denoising and double reference shift strategy. **GPS Solutions**, v. 22, n. 2, p. 40. 2018.
- TEUNISSEN, P. J. G. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation. **Journal of geodesy**, v. 70, n. 1-2, p. 65-82, 1995.
- TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. **GPS for Geodesy**. 2nd Edition. Berlin: Springer-Verlag, 1998. 650p. ISBN: 9783642720130.
- VANI, B. C. **Investigações sobre modelagem, mitigação e predição de cintilação ionosférica na região brasileira**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. UNESP. Presidente Prudente, 2018.
- ZHANG, X.; TAO, X.; ZHU, F.; SHI, X.; WANG, F. Quality assessment of GNSS observations from an Android N smartphone and positioning performance analysis using time-differenced filtering approach. **GPS Solutions**, v. 22, n. 3, p. 70. 2018.
- ZUMBERGE, J. F.; HEFLIN, M. B.; JEFFERSON, D. C.; WATKINS, M. M.; WEBB, F. H. Precise Point Processing for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. B3, p. 5005-5017. 1997.