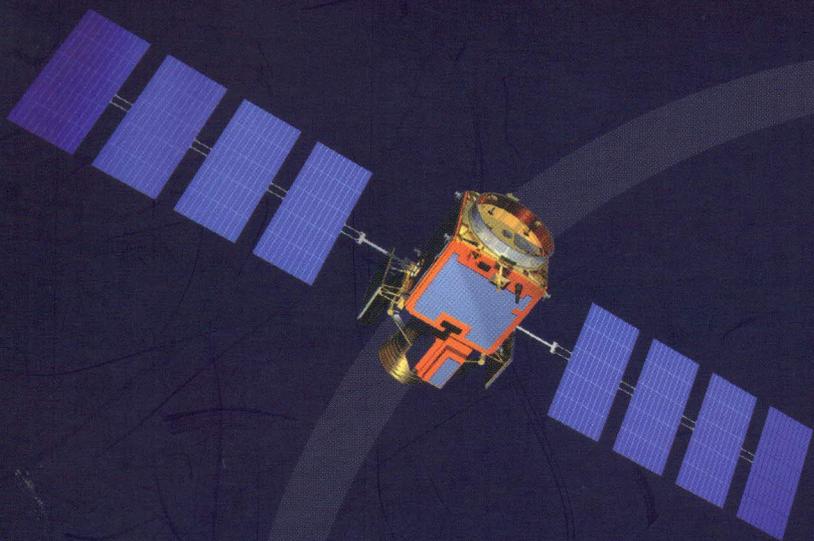


João Francisco Galera Monico



# Posicionamento pelo **GNSS**

2ª edição

Descrição, fundamentos e aplicações



editora  
unesp

## Posicionamento e navegação: conceitos preliminares

### 1.1 Breve histórico sobre os métodos de posicionamento e navegação

Posicionar um objeto nada mais é do que lhe atribuir coordenadas. Embora atualmente esta seja uma tarefa que pode ser realizada com relativa simplicidade, utilizando-se, por exemplo, satélites artificiais apropriados para esse fim, determinar a posição foi um dos primeiros problemas científicos que o ser humano procurou solucionar. O homem sempre esteve interessado em saber onde ele estava; de início restrito à vizinhança imediata de seu lar, mais tarde o interesse se ampliou para os locais de comércio e, finalmente, com o desenvolvimento da navegação marítima, praticamente para o mundo todo. Conquistar novas fronteiras de modo que o deslocamento da embarcação fosse seguro exigia o domínio sobre a arte de navegar, ou seja, saber ir e voltar de um local a outro e determinar posições geográficas, em terra ou no mar. Por muito tempo, Sol, planetas e as estrelas foram excelentes fontes de orientação. Mas, além da exigência de habilidade do navegador, as condições climáticas podiam significar a diferença entre o sucesso e o fracasso de uma expedição (Dottori e Negraes, 1997). Em seguida, surgiu a bússola, inventada pelos chineses, que proporcionou uma verdadeira revolução na navegação. Mas

ainda perdurava um problema: como determinar a posição de uma embarcação em alto-mar? O astrolábio, a despeito de seu peso e tamanho, possibilitava apenas a obtenção da latitude, sujeita a grande margem de erro. E só podia ser utilizado à noite, desde que houvesse boa visibilidade. Melhorias ocorreram no transcorrer dos anos, com a introdução de novos instrumentos, como o quadrante de Davis e o sextante. A determinação da longitude foi considerada o maior problema científico do século XVIII, o qual se encontra bem retratado em Sobel (1996). De qualquer forma, mesmo com os melhores instrumentos, a navegação celeste só proporcionava valores aproximados da posição, os quais nem sempre eram apropriados para encontrar um porto durante a noite. Com o avanço da eletrônica, alguns sistemas foram desenvolvidos, mas mesmo assim eles sempre apresentavam algum tipo de problema. Qualquer navegador provavelmente já deve ter ouvido sobre o Loran (*Long-Range Navigation System*), o Decca (*Low frequency continuous wave phase comparison navigation*) e o Omega (*Global low frequency navigation system*). Eles são baseados em ondas de rádio. Os dois primeiros funcionam muito bem na faixa costeira, onde há uma rede de estações para dar apoio ao posicionamento. No entanto, um inconveniente desses sistemas é a impossibilidade de posicionamento global, além da limitação em termos de acurácia,<sup>1</sup> em virtude da interferência eletrônica e de variações do relevo. O Omega, apesar de sua cobertura global, apresenta baixa precisão e os equipamentos são de custos elevados. Outro sistema desenvolvido, agora baseado em satélites artificiais, foi o NNSS (*Navy Navigation Satellite System*), também conhecido como Transit, cujas medidas eram baseadas no efeito Doppler (Seeber, 1993). Nesse sistema, as órbitas dos satélites eram muito baixas e não havia uma quantidade muito grande de satélites. Em consequência, não se tinha como obter posições com muita frequência. Mas, mesmo assim, esse sistema foi muito utilizado em posicionamento geodésico. Faltava, no entanto, uma solução que oferecesse boa precisão, facilidade de uso e custos acessíveis para os usuários.

A solução definitiva para o problema surgiu na década de 1970, nos Estados Unidos, com a proposta do NAVSTAR-GPS (*Global Positioning System*), sistema que revolucionou praticamente todas as atividades que

<sup>1</sup> Acurácia é o grau de concordância entre o valor medido de uma grandeza e o considerado "verdadeiro" ou de melhor qualidade. Envolve efeitos sistemáticos (tendência) e aleatórios (dispersão).

dependiam da determinação de posições. Em paralelo e de forma independente, na antiga URSS, foi desenvolvido o GLONASS (*Global Orbiting Navigation Satellite System*), um sistema muito similar ao NAVSTAR-GPS. No final da década de 1990, a Agência Espacial Européia propôs o desenvolvimento do Galileo. Esse sistema se encontra em desenvolvimento, sendo o primeiro satélite lançado no fim de 2005. Além disso, algumas expansões do GPS estão sendo desenvolvidas, como o WAAS (*Wide Area Augmentation Service*) nos Estados Unidos, o EGNOS (*European GPS Navigation Overlay System*) na Europa, o MSAS (*MSAT Satellite-based Augmentation System*) no Japão e o Gagan (*GPS Aided GEO Augmented Navigation* ou *GPS and GEO Augmented Navigation*) na Índia.

De forma geral, esses sistemas têm sido chamados de GNSS (*Global Navigation Satellite System* – Sistema Global de Navegação por Satélite), nome concebido em 1991, durante a 10<sup>ª</sup> Conferência de Navegação Aérea, quando a Associação Internacional de Aviação Civil (International Civil Aviation Organization – ICAO) reconheceu que a fonte primária para a navegação aérea no século XXI será o GNSS. O uso integrado desses sistemas também deverá revolucionar ainda mais todas as atividades que necessitam de posicionamento.

Uma breve introdução ao GPS e ao GLONASS, sistemas já adotados na prática, é apresentada a seguir, bem como alguns detalhes sobre o Galileo e algumas novidades recentes.

## 1.2 Introdução ao GPS

O NAVSTAR-GPS, ou apenas GPS, como é mais comumente conhecido, é um sistema de radionavegação desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos – DoD (*Department of Defense*), visando a ser o principal sistema de navegação das Forças Armadas norte-americanas. Ele resultou da fusão de dois programas financiados pelo governo norte-americano para desenvolver um sistema de navegação de abrangência global: *Timation* e *System 621B*, sob responsabilidade da Marinha e da Força Aérea, respectivamente. Em razão da alta acurácia proporcionada pelo sistema e do grande desenvolvimento da tecnologia envolvida nos receptores GPS, uma grande comunidade usuária emergiu dos mais variados segmentos da comunidade civil (navegação, posicionamento geodésico, agricultura, controle de frotas etc.).

É comum encontrar em textos sobre GPS que a sigla NAVSTAR significa *NAVigation Satellite with Time And Ranging*. No entanto, lendo o histórico sobre o desenvolvimento desse sistema, apresentado em Parkinson (1996, p.7), constata-se que NAVSTAR era apenas um bom nome para o projeto a ser proposto, e não uma sigla. Pode-se, portanto, depreender que esse nome é bem sugestivo da finalidade do projeto, pois conota “estrela da navegação”.

Como o próprio nome sugere, o GPS é um sistema de abrangência global, que tem facilitado todas as atividades que necessitam de posicionamento, fazendo que algumas concepções antigas possam ser colocadas em prática. Exemplo claro é o que vem ocorrendo com o desenvolvimento da agricultura de precisão, um conceito estabelecido por volta de 1929, que só agora tem sido posto em prática, graças à integração de várias geotecnologias, entre elas o GPS (Stafford, 1996). Além disso, surgiram muitas outras aplicações, em razão da facilidade que o sistema proporciona na obtenção de coordenadas.

A concepção do sistema GPS permite que um usuário, em qualquer local da superfície terrestre, ou próximo a esta, tenha à sua disposição no mínimo quatro satélites para serem rastreados. Como será visto neste livro, esse número de satélites permite que se realize o posicionamento em tempo real. Para os usuários da área de Geodésia,<sup>2</sup> uma vantagem muito importante da tecnologia GPS, em relação aos métodos de levantamento convencionais, é que não há necessidade de intervisibilidade entre as estações. Além disso, o GPS pode ser usado sob quaisquer condições climáticas.

O princípio básico de navegação pelo GPS consiste na medida de distâncias entre o usuário e quatro satélites. Conhecendo as coordenadas dos satélites em um sistema de referência apropriado, é possível calcular as coordenadas da antena do usuário no mesmo sistema de referência dos satélites. Do ponto de vista geométrico, apenas três distâncias, desde que não pertencentes ao mesmo plano, seriam suficientes. Nesse caso, o problema se reduziria à solução de um sistema de três equações com três incógnitas. A quarta medida é necessária por causa

---

<sup>2</sup> Geodésia é a ciência que tem por objetivo determinar a forma e as dimensões da Terra e os parâmetros definidores do campo de gravidade. Alternativamente, pode-se dizer que tem por objetivo determinar a posição de feições da superfície física do planeta, que varia com o tempo.

do não-sincronismo entre os relógios dos satélites e o do usuário, que adiciona uma incógnita ao problema.

O GPS foi declarado operacional em 27 de abril de 1985, com 24 satélites em órbita, mas desde 1983 já estava sendo utilizado no posicionamento geodésico. No final de 2005, 29 satélites estavam operacionais e, em junho de 2007, havia trinta satélites. O sistema proporciona dois tipos de serviços, conhecidos como SPS (*Standard Positioning Service* – Serviço de Posicionamento Padrão) e PPS (*Precise Positioning Service* – Serviço de Posicionamento Preciso).

O SPS é um serviço de posicionamento e tempo padrão disponível para todos os usuários do globo, sem cobrança de qualquer taxa. Até o dia 1º de maio de 2000, esse serviço proporcionava capacidade de acurácia horizontal e vertical dentro de 100 e 140 m, respectivamente, e 340 ns (nanossegundos) nas medidas de tempo, com nível de confiança de 95%. Até essa data, o PPS proporcionava melhores resultados (22,0 m horizontal, 27,7 m vertical e 200 ns), mas era restrito ao uso de militares e usuários autorizados, o que se mantém até hoje. Esse nível de acurácia é obtido com o método de posicionamento mais simples de ser empregado com o GPS (posicionamento por ponto simples, também conhecido como autônomo). Com a aplicação de métodos mais avançados (posicionamento por ponto preciso e posicionamento relativo), o nível de acurácia melhora de modo considerável.

Na realidade, no posicionamento simples, o sistema sempre teve capacidade de proporcionar melhores níveis de acurácia, mas, ao que tudo indica, isso não era de interesse do DoD, haja vista que o sistema é global, o que poderia pôr em risco aspectos de segurança. Dessa forma, a limitação no nível de acurácia citada anteriormente era garantida pela adoção do AS (*Anti-Spoofing*) e da SA (*Selective Availability* – Disponibilidade Seletiva). O AS é um processo de criptografia do código P (seção 2.1.2.1), um dos códigos utilizados no GPS para realizar medidas de distâncias, visando protegê-lo de imitações por usuários não autorizados. A SA, ou seja, a proibição de obter a acurácia capaz de ser proporcionada pelo GPS, era consumada pela manipulação das mensagens de navegação (técnica *epsilon*: e) e da frequência dos relógios dos satélites (técnica *dither*: d). Para grande surpresa da comunidade usuária, essa técnica de deterioração da acurácia no SPS foi abolida do sistema à 0h TU (Tempo Universal) do dia 2 de maio de 2000, o que melhorou a

acurácia em torno de 10 vezes. Com isso, foi anunciado um plano de modernização do GPS, cujos detalhes são apresentados adiante. Muitos outros detalhes podem ser encontrados em <http://www.navcen.uscg.gov/gps/>, além de vários outros sítios na Internet. Em 18 de setembro de 2007 o presidente dos Estados Unidos aboliu definitivamente essa degradação dos futuros satélites GPS (GPSIII).

O GPS consiste de três segmentos principais: Espacial, Controle e de Usuários. Enquanto o primeiro está associado com a constelação dos satélites e seus sinais, o de Controle monitora e faz a devida manutenção do sistema. O sistema de Usuários do GPS é abrangente e continua a se ampliar. Detalhes desses segmentos fazem parte do Capítulo 2.

### 1.3 Introdução ao GLONASS

Similar ao GPS, o GLONASS foi concebido para proporcionar posicionamento 3-D e velocidade, bem como informações de tempo, sob quaisquer condições climáticas, em nível local, regional e global. Esse sistema também foi concebido no início da década de 1970, na antiga URSS, pelo *Soviet Union's Scientific Production Association of Applied Mechanics*, e atualmente é desenvolvido e operado pela *Russian Federation Space Forces*. Em russo, a denominação oficial é *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikowaya Sistema*. Da mesma forma que o GPS, o GLONASS é um sistema militar, mas ocorreram várias declarações do governo russo oferecendo o sistema para uso civil.

O GLONASS foi declarado totalmente operacional no fim de 1995, com uma constelação de 24 satélites. Mas, em decorrência da falta de lançamentos de novos satélites para substituir os mais antigos, ou aqueles que apresentassem problemas, o número de satélites decresceu consideravelmente. No fim de 2005 a constelação contava com apenas doze satélites e em alguns períodos esse número foi até menor. Por exemplo, no fim de 2006, apenas dez satélites estavam operacionais. Deve-se considerar, porém, que três satélites lançados no Natal de 2006 ainda não tinham entrado em operação naquele momento.

A precisão instantânea proporcionada pelo GLONASS, em um serviço similar ao posicionamento simples no SPS do GPS, é da ordem de 60 e 75 m, com 99,7% de probabilidade, para as componentes horizon-

tais e verticais, respectivamente. Informações adicionais podem ser obtidas em <http://www.GLONASS-ianc.rsa.ru>.

Da mesma forma que o GPS, o GLONASS é composto de três segmentos, sendo o segmento de usuários muito menor que o do GPS. Informações complementares são apresentadas no Capítulo 2.

## 1.4 Introdução ao Galileo

A decisão do governo norte-americano de não autorizar outras nações a participarem do controle de uma configuração básica do GPS levou a União Européia (UE) a desenvolver uma solução própria para o GNSS, quer com outras nações, quer sozinha. Em fevereiro de 1999 a UE fez uma recomendação para que os europeus desenvolvessem uma nova constelação de satélites para navegação. Isso foi resultado de muita pesquisa, desenvolvida de julho de 1998 a fevereiro de 1999 (Wolfrum et al., 1999).

Em junho de 1999, baseado nos trabalhos anteriores realizados pelo Fórum Europeu do GNSS, o Ministério dos Transportes Europeu concordou com a fase de definição desse sistema, denominado Galileo, que é a contribuição européia para o GNSS. Este será um sistema aberto e global, com controle civil, que deverá ser completamente compatível com o GPS (e, provavelmente, com o GLONASS), mas independente.

A fase de definição compreendeu o período de 1999 a 2002, na qual se cuidou dos requisitos iniciais e da arquitetura do sistema. Dois estudos principais foram realizados: o primeiro denominado Gala, do Conselho Europeu (EC), sobre a arquitetura do sistema, e o segundo da ESA (*European Space Agency*), denominado GalileoSat, relacionado com o segmento espacial. Tratou-se de uma fase crucial, pois dependia dela a continuidade ou não do sistema.

Em seguida, com aprovação da continuidade do Galileo em 26 de março de 2003, teve início a fase de desenvolvimento do sistema, em que estão o planejamento e a validação do Galileo. Essa fase deve consolidar os requisitos iniciais, o desenvolvimento dos satélites e as componentes de terreno, bem como a validação dos satélites em órbita. O primeiro satélite experimental foi lançado em dezembro de 2005, e denominado GIOVE (*Galileo In-Orbit Validation Element*) A. O lançamen-

to do segundo estava previsto para 2007. Os primeiros quatro satélites operacionais, de um total de trinta, devem ser lançados em 2008 para validação final dos segmentos espacial e terrestre. Os demais satélites operacionais devem ser lançados na fase de implementação do sistema, por um consórcio privado, momento em que o sistema deverá alcançar capacidade operacional. A fase operacional, na qual os serviços serão oferecidos e a manutenção do sistema iniciada, deve ter início em 2011 (COM, 2006).

O financiamento do sistema deve ser garantido pelo orçamento da UE, notadamente por intermédio da ESA e da rede de transporte europeia (*Trans-European Networks*). Além disso, fundos adicionais deverão ser obtidos, resultantes do envolvimento de outras agências ou instituições da UE, de cooperação internacional com outras nações, como Canadá, China, Israel, Japão e Rússia. Negociações com vários desses países já foram iniciadas. Ainda está prevista a adoção de uma parceria público-privada para obter financiamento complementar da iniciativa privada. Várias notícias sobre os problemas advindos dessa parceria têm sido divulgadas na imprensa especializada. Trata-se de uma estratégia diferente da adotada com o EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), que atendia apenas os países europeus. Informações complementares sobre o sistema são fornecidas no Capítulo 2. Para acompanhar o que vem ocorrendo com o sistema, o interessado pode consultar a página do Galileo, que pode ser acessada em [http://europa.eu.int/comm/dgs/energy\\_transport/galileo](http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo).

## 1.5 Novidades: o sistema Beidou/Compass

A China, que no passado revolucionou a navegação a partir do desenvolvimento da bússola, lançou em 11 de abril de 2007 o quinto satélite de seu sistema de navegação e posicionamento. O sistema, denominado Beidou<sup>3</sup> (ou Compass), foi iniciado em 1983, baseado na idéia de utilização de satélites geostacionários para essa finalidade. O primeiro satélite foi lançado em 2000 e a expectativa é que por volta de

---

<sup>3</sup> Beidou é um nome chinês para uma constelação conhecida no Hemisfério Ocidental como Ursa Maior (ou *Big Dipper*).

2008 o sistema esteja pronto para serviços de navegação na China e em regiões vizinhas. E, gradualmente, poderá tornar-se um sistema global.

A partir das informações disponíveis atualmente, a China deverá lançar uma série de satélites para criar o sistema *Compass Navigation Satellite System*, que diferirá um pouco dos demais. Enquanto GPS, Galileo e GLONASS utilizam satélites de órbitas médias, o Beidou (ou Compass) deverá posicionar cinco de seus satélites em órbitas geoestacionárias, tendo os demais (por volta de trinta) órbitas similares às dos GNSS.

Não trataremos de detalhes desse sistema neste livro, mas o leitor deve estar atento para as novidades sobre ele. Informações complementares podem ser obtidas em [http://www.vectorsite.net/ttgps\\_2.html#m2](http://www.vectorsite.net/ttgps_2.html#m2).

## 2

# Os sistemas de posicionamento por satélite NAVSTAR-GPS, GLONASS e Galileo

## 2.1 NAVSTAR-GPS

O GPS foi concebido primariamente como um sistema de navegação (Seeber, 2003). Logo, o objetivo original do sistema era a determinação instantânea de posição, velocidade e tempo de um usuário, em qualquer lugar na Terra ou próximo a esta, independentemente das condições atmosféricas, em um referencial global e homogêneo, com base em medidas de distâncias. Essas distâncias são denominadas pseudodistâncias, em razão do não-sincronismo entre o relógio do usuário e o dos satélites, o qual comparece como uma incógnita adicional no problema a ser resolvido. Logo, cada equação de distância (pseudodistância) apresenta-se com quatro incógnitas (três posições e o erro do relógio do receptor), requerendo que, no mínimo, quatro satélites estejam disponíveis para a realização de medidas simultâneas pelos receptores. Na realidade, na concepção do sistema assumiu-se que quatro ou mais satélites, com posições conhecidas, estivessem sempre disponíveis em qualquer lugar da Terra e a qualquer instante, permitindo a determinação em tempo real da posição do usuário, com a correção do erro do relógio envolvido no processo de medidas.

Para posicionamento de melhor qualidade, além das pseudodistâncias, faz-se também uso das medidas de fase de batimento da onda portadora, as quais permitem obter posições com alto nível de acurácia, embora haja algumas dificuldades adicionais, pois se trata de medidas ambíguas (seção 5.1.2).

O GPS, conforme citado no Capítulo 1, é composto de três segmentos: espacial, de controle e de usuários, descritos a seguir.

### 2.1.1 Segmento espacial

O segmento espacial consiste de no mínimo 24 satélites MEO (*Medium Earth Orbits* – Satélites de Órbita Média) distribuídos em seis planos orbitais igualmente espaçados, com quatro satélites em cada plano, em uma altitude aproximada de 20.200 km. Os planos orbitais são inclinados  $55^{\circ}$  em relação ao Equador e o período orbital é de aproximadamente 12 horas siderais. Dessa forma, a posição dos satélites se repete, a cada dia, aproximadamente quatro minutos antes em relação ao dia anterior. Essa configuração garante que, no mínimo, quatro satélites GPS sejam visíveis em qualquer local da superfície terrestre, a qualquer hora. As Figuras 2.1 e 2.2 ilustram, respectivamente, a constelação dos satélites GPS e a distribuição destes em cada um dos planos orbitais.

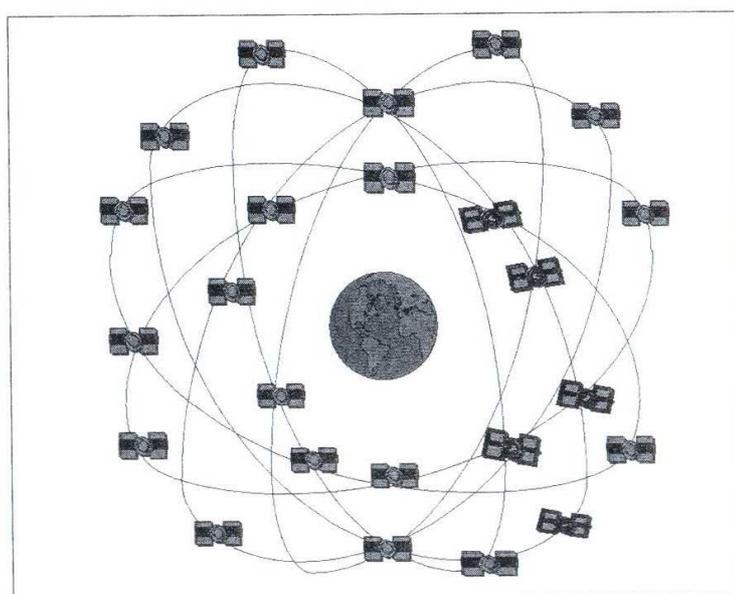


Figura 2.1 – Constelação dos satélites GPS.

## Posicionamento pelo GNSS

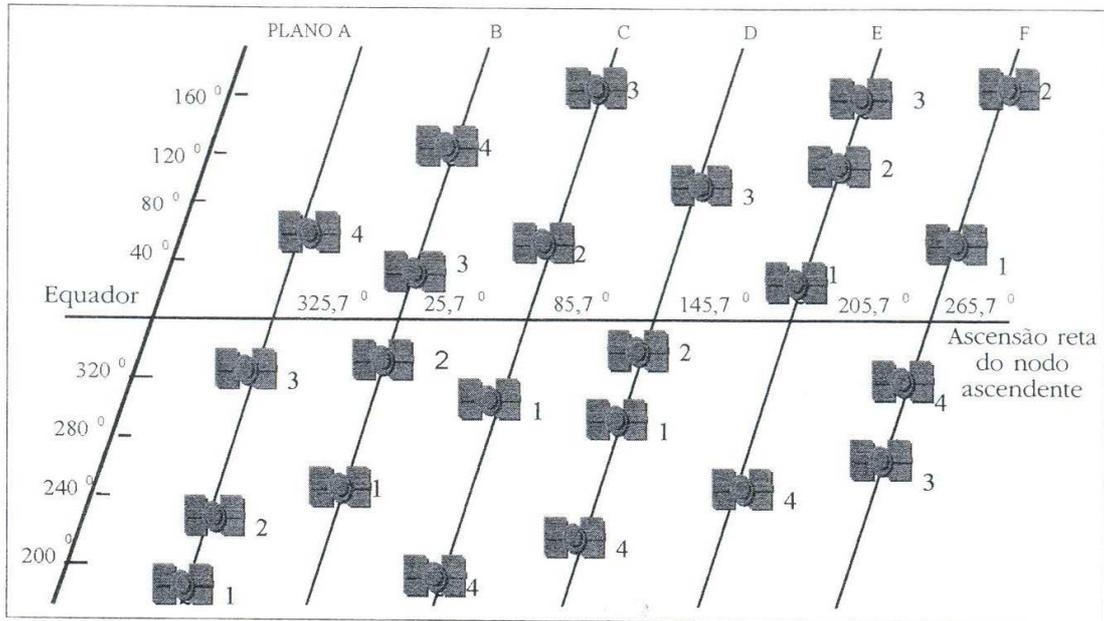


Figura 2.2 – Distribuição dos satélites na constelação final (SEEBER, 1993).

Na concepção original, quatro tipos de satélites fizeram parte do projeto NAVSTAR-GPS. Eles são denominados satélites do Bloco I, II, IIA e IIR.

Os satélites do Bloco I foram protótipos, e todos os onze planejados foram lançados. O último satélite desse Bloco, denominado SVID 12, foi desativado no fim de 1995.

Os Blocos II e IIA (“A” refere-se a *Advanced* – avançado) são compostos por 28 satélites, os quais se referem, respectivamente, à primeira e à segunda geração de satélites GPS. Trata-se dos satélites operacionais, planejados para dar apoio à configuração mínima de 24 satélites. Desses satélites, nove são do Bloco II (SVIDs 13 a 21) e dezenove pertencem ao Bloco IIA (SVIDs 22 a 40). Em relação aos satélites do Bloco II, os do Bloco IIA têm capacidade de comunicação recíproca. Além disso, enquanto os satélites do Bloco II podem armazenar apenas até catorze dias de dados de navegação, os do Bloco IIA têm capacidade de até 180 dias. Eles foram fabricados pela companhia Rockwell International. O primeiro satélite desse bloco pesava mais de 1.500 kg, com custo estimado em 50 milhões de dólares americanos (Hofmann-Wellenhof; Lichtenegger; Collins, 1997). Quando o sistema foi declarado operacional, em 27 de abril de 1995, todos os satélites pertenciam a esses dois Blocos. A Figura 2.3 ilustra um satélite do Bloco II.

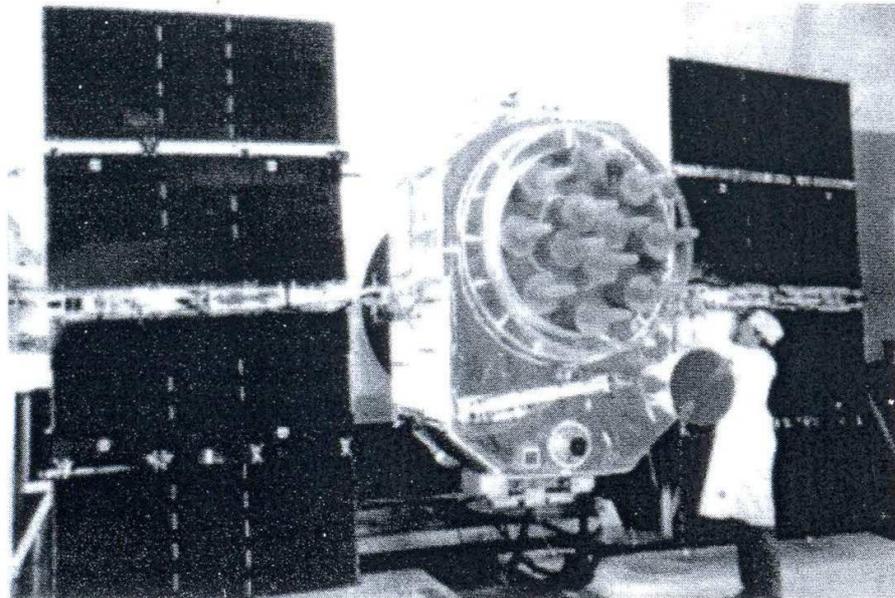


Figura 2.3 – Satélite GPS do Bloco II.

Os satélites do Bloco II e IIA estão sendo substituídos pelos 22 satélites do Bloco IIR (SVIDs 41 a 62), a terceira geração de satélites, conforme a necessidade. Duas das vantagens desses satélites em relação aos anteriores são a capacidade de medir distâncias entre eles (*cross link ranges*) e calcular efemérides no próprio satélite (Seeber, 1993), além de transmitir essas informações entre os satélites e para o sistema de controle em Terra. Até setembro de 2007, dezesseis satélites do Bloco IIR (“R” refere-se a *Replenishment* – reabastecimento) haviam sido lançados. No primeiro lançamento, em 17 de janeiro de 1997, ocorreu uma falha. O segundo satélite, lançado em 20 de julho de 1997, entrou em operação em 31 de janeiro de 1998. Em 26 de setembro de 2005 ocorreu o 14º lançamento de satélites do Bloco IIR, sendo o primeiro satélite GPS modernizado (IIR-M1), razão pela qual é designado IIR-M. Os satélites do Bloco II-R foram fabricados pela companhia Lockheed Martin. Seu peso é superior a 2.000 kg, com custo da ordem de 25 milhões de dólares americanos, cerca de metade do custo de um satélite do Bloco II.

A quarta geração de satélites, que substituirá os do Bloco IIR, denomina-se Bloco IIF (“F” refere-se a *Follow-on* – continuação), e será composta por 33 satélites. Trata-se dos satélites que deverão incorporar a modernização do GPS.

Cada satélite carrega padrões de frequência altamente estáveis (césio e rubídio) com estabilidade entre  $10^{-12}$  e  $10^{-13}$  por dia, formando uma referência de tempo muito precisa. Os satélites do Bloco II e IIA estão equipados com dois osciladores atômicos de césio e dois de rubídio, ao passo que os satélites do Bloco I eram equipados apenas com osciladores de quartzo. Os satélites do Bloco IIR carregam osciladores de rubídio, e os do Bloco IIF poderão vir a carregar *Maser* de hidrogênio, o que há de melhor, atualmente, em termos de padrão de frequência.

Os satélites GPS têm sido identificados por vários esquemas de numeração. Entre eles pode-se citar o SVN (*Space Vehicle Number* – Número do Veículo Espacial), ou número NAVSTAR, o PRN (*Pseudo-Random-Noise* – Ruído Falsamente Aleatório) ou SVID (*Space Vehicle Identification* – Identificação do Veículo Espacial) e número da posição orbital. Neste livro, para evitar confusão, sempre que ocorrer identificação de satélites, ela estará relacionada com o número de seu PRN, que corresponde à identificação utilizada nas mensagens de navegação, que coincide com o SVID, já empregado no transcrito do livro. Onde isso não ocorrer, o critério de identificação adotado será explicitado.

### 2.1.1.1 Características dos sinais GPS

Atualmente, cada satélite GPS transmite duas ondas portadoras: L1 e L2. Elas são geradas da frequência fundamental de 10,23 MHz, a qual é multiplicada por 154 e 120, respectivamente. Assim, as frequências (L) e os comprimentos de onda ( $\lambda$ ) de L1 e L2 são:

$$L1 = 1575,42 \text{ MHz e } \lambda \cong 19 \text{ cm;}$$

$$L2 = 1227,60 \text{ MHz e } \lambda \cong 24 \text{ cm.}$$

Essas duas frequências são geradas simultaneamente, permitindo aos usuários, conforme veremos na seção 5.2.2.2 (b), corrigir grande parte dos efeitos provocados pela ionosfera. No futuro, quando o Bloco IIF estiver em operação, uma terceira portadora fará parte do sistema, a qual é designada L5, com frequência de  $115 \cdot f_0$ , ou seja, 1176,45 MHz ( $L5 = 1176,45 \text{ MHz e } \lambda \cong 25,5 \text{ cm}$ ).

Os códigos que formam o PRN são modulados, em fase, sobre as portadoras L1 e L2. Essa técnica permite realizar medidas de distâncias, a partir da medida do tempo de propagação da modulação (Leick, 1995).

Um PRN é uma seqüência binária de +1 e -1, ou 0 e 1, que parece ter característica aleatória. Como é gerado por um algoritmo, pode ser univocamente identificado. Trata-se basicamente dos códigos C/A e P.

O código C/A (*Coarse Acquisition*), com comprimento de onda por volta de 300 m, é transmitido em uma razão de 1,023 MHz. Ele é gerado com base no produto de duas seqüências PR (*pseudorandom* – pseudo-aleatórias), denominadas G1 e G2, cada uma com período de 1.023 bits. O código C/A resultante também consiste de 1.023 bits, com período de 1 ms (milissegundo). Cada satélite transmite um código C/A diferente, entre os 37 definidos no ICD-GPS-200C (DoD, 1997). Isso poderia causar dificuldades para um receptor GPS distinguir entre todos os códigos possíveis. No entanto, o código C/A faz parte de uma família de códigos (*Gold codes*) que tem como característica básica a baixa correlação entre seus membros. Isso possibilita a rápida distinção dos sinais recebidos, simultaneamente, de vários satélites (Leick, 1995). Ele é modulado apenas sobre a onda portadora L1. Esse é o código a partir do qual os usuários civis obtêm as medidas de distâncias que permitem obter a acurácia estipulada no SPS. Ele não é criptografado, embora possa ter sua precisão<sup>1</sup> degradada.

O código P (*Precise or Protected* – Preciso ou Protegido) tem sido reservado para uso dos militares norte-americanos e usuários autorizados. Ele é transmitido com freqüência  $f_0$  de 10,23 MHz, o que corresponde a uma seqüência de 10,23 milhões de dígitos binários por segundo. Essa freqüência, maior que a do código C/A, faz que medidas resultantes do código P sejam mais precisas. Ele é gerado, matematicamente, partindo do produto de dois códigos PN, X1 e X2, que, por sua vez, também são gerados a partir do produto de dois outros códigos. O período do código X1 é de 1,5 s, o que corresponde a 15.345.000 bits ( $1,5 \times (f_0 = 10,23 \times 10^6)$ ). O período de X2 é de 15.345.037 bits. Essa combinação permite que se tenha um código resultante com duração de 266,4 dias ( $15.345.000 \times 15.345.037 = 2,354 \times 10^{14} / f_0 = 23010752,69 \text{ s} / 86400 \text{ s} = 266,4 \text{ dias}$ ). No entanto, eles são arrançados de forma a produzir uma série de 37 seqüências de códigos, mutuamente exclusivas, cada uma com duração de sete dias. Desse modo, para o código P,

<sup>1</sup> Precisão é a dispersão de um conjunto de observações ou resultados experimentais. Boa precisão está associada a desvio-padrão pequeno. Entretanto, pode existir erro sistemático grande, caso em que a tendência seria alta.

tem-se 37 PRN. A cada satélite é atribuído um determinado PRN, que é modulado nas portadoras L1 e L2. Portanto, todos os satélites transmitem na mesma frequência, mas podem ser identificados pelo código exclusivo de cada satélite. Trata-se da técnica denominada CDMA (*Code Division Multiple Access* – Divisão do Código para Múltiplo Acesso) (Spilker, 1996), válida tanto para o código C/A quanto para o código P.

Como há um número menor de satélites em órbita, algumas das seqüências dos códigos P e C/A não são utilizadas para eles, mas reservadas para outras aplicações, como transmissores terrestres (*pseudolites* – pseudo-satélites). Trata-se dos PRN 33 a 37.

O seguimento de código atribuído a cada satélite é reiniciado a cada semana, à 0h TU, de sábado para domingo, criando a semana GPS, uma unidade de tempo muito importante para o sistema.

Embora o código P seja mais preciso, ele é criptografado, quando o sistema está operando no modo AS, passando a ser denominado código Y. Esse código não está disponível para os usuários civis. Trata-se de uma versão segura do código P. O propósito principal é evitar que inimigos consigam fraudá-lo, mediante a geração de uma réplica (Spilker, 1996). Só a usuários autorizados são disponibilizadas informações sobre sua estrutura.

Com o anúncio da modernização do GPS em 1998 pelo DoD, entrou em cena o código civil L2C, a ser modulado na portadora L2, visando reduzir os problemas advindos do código Y. Também foi anunciada uma nova portadora, a L5. No início planejou-se que doze satélites do Bloco IIR seriam modernizados com o código L2C, com o primeiro lançamento previsto para 2003. No entanto, o primeiro satélite modernizado refere-se ao 14º lançamento dos satélites do Bloco II-R, ocorrido em 26 de setembro de 2005. Logo, em vez de doze, apenas nove satélites do Bloco IIR serão modernizados (IIR-M). A portadora L5, com frequência de 1176,45 MHz, será incorporada aos satélites do Bloco IIF. Essa portadora terá modulado sobre ela um código 10 vezes mais longo que o C/A, denominado neste livro código L5C.

O código L2C que está sendo incorporado aos satélites do Bloco IIR-M deverá apresentar melhor sensibilidade que o código C/A, disponível na L1. Ele usa um código CM (código de comprimento moderado) com 10.230 bits e um código CL (código de comprimento longo) com 767.250 bits. O código L2C é transmitido com frequência de 511,5

KHz. Logo, enquanto o código CM se repete a cada 20 ms, o CL se repete a cada 1,5 segundo. CM é o código que transporta os dados e CL é considerado o sinal piloto, não tendo dados modulados sobre ele (Mattos, 2004).

Os sinais básicos do GPS são ilustrados na Figura 2.4, inclusive o código L2C na portadora L2, bem como a portadora L5, os quais fazem parte da modernização do GPS. É importante frisar que apenas os satélites lançados a partir de setembro de 2005 têm o código L2C disponível e que a portadora L5 fará parte apenas dos satélites do Bloco IIF.

As mensagens de navegação, que fornecem as informações básicas para o cálculo das posições dos satélites, são também moduladas sobre as portadoras, em uma taxa de 50 bps (bits por segundo). Elas contêm parâmetros orbitais (elementos keplerianos e suas variações), dados para a correção da propagação na atmosfera, parâmetros para a correção do erro dos relógios dos satélites, saúde dos satélites etc.

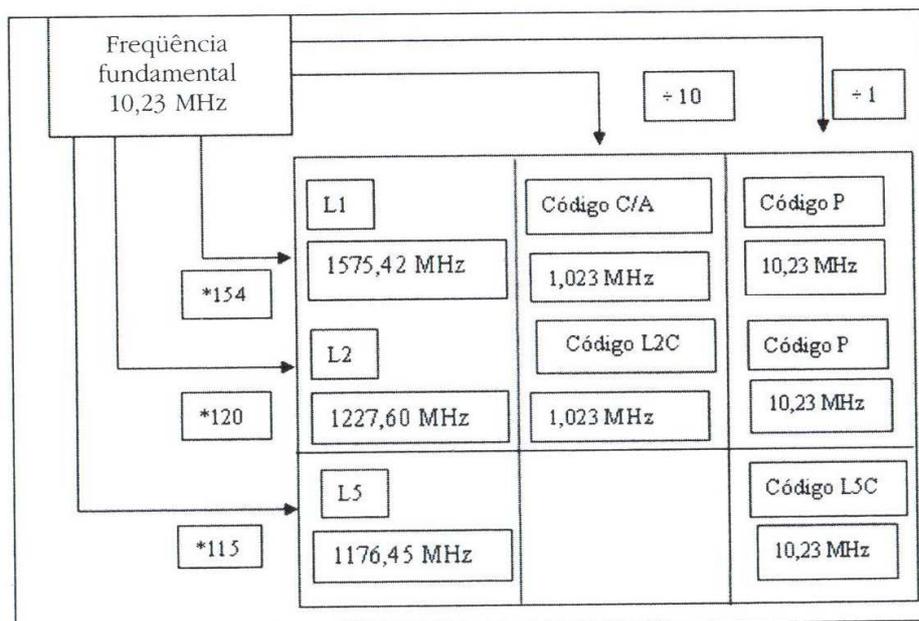


Figura 2.4 – Estrutura básica do sinal GPS.

Dessa breve explanação, pode-se observar que atualmente há três tipos de sinais envolvidos no GPS: as portadoras (L1 e L2), os códigos (C/A, L2C e P(Y)) e os dados (navegação, relógio etc.). Essa estrutura permite não só medir a fase da portadora e sua variação, mas também o tempo de propagação da modulação.

O sinal L1, para um instante  $t$ , pode ser descrito como (Langley, 1996a):

$$S_{L_1}(t) = A_p P_i(t) W_i(t) D_i(t) \cos(f_1 t + \phi_{n,L1,i}) + A_c C_i(t) D_i(t) \sin(f_1 t + \phi_{n,L1,i}) \quad (2.1)$$

Nessa equação tem-se que:

- $A_p$  é a amplitude do código P;
- $P_i(t)$  é a seqüência do código P (+1, -1);
- $W_i(t)$  representa a criptografia sobre o código P, que pode ser diferente para cada satélite  $\{Y_i(t) = P_i(t)W_i(t)\}$ ;
- $D_i(t)$  é o fluxo dos dados com estado +1 e -1;
- $A_c$  é a amplitude do código C/A;
- $C_i(t)$  é a seqüência do código C/A (+1, -1);
- $f_1$  é a freqüência da portadora L1; e
- $\phi_{n,L1,i}$  é o ruído da fase acompanhado do estado do oscilador.

O índice  $i$  representa o satélite em questão.

O sinal L2 tem uma estrutura mais simples porque contém apenas o código P, ou seja:

$$S_{L_2}(t) = B_p P_i(t) W_i(t) D_i(t) \cos(f_2 t + \phi_{n,L2,i}) \quad (2.2)$$

Na equação (2.2),  $P_i(t)$  é novamente a seqüência do código P para o satélite  $i$ , enquanto  $B_p$  representa sua amplitude e  $f_2$ , a freqüência da portadora L2. Os instantes de geração dos dois códigos, dados e as portadoras, são sincronizados. O sinal L2 modernizado tem a seguinte estrutura (Enge, 2003):

$$S_{L_2}(t) = B_p P_i(t) W_i(t) D_i(t) \cos(f_2 t + \phi_{n,L2,i}) + A_{RC} L2C_i(t) D_i^{L2}(t) \sin(f_2 t + \phi_{n,L2,i}) + \text{código\_militar} \quad (2.3)$$

A primeira linha da equação (2.3) representa o sinal L2, como apresentado na equação (2.2). L2C é o novo código, resultante da multiplicação dos códigos CM e CL. O código CM é 10 vezes mais longo que o código C/A, enquanto o código CL é ainda mais longo, o que traz algumas vantagens ao sistema. Por ora pode-se citar a redução da probabilidade de falsa sintonia durante a aquisição do sinal e da interfe-

rência na correlação cruzada, de importância significativa quando o sinal é obstruído e, conseqüentemente, mais fraco que os sinais de outros satélites.

A Figura 2.5 ilustra a combinação de um dos códigos com uma das portadoras. Como os códigos PRN e as mensagens de navegação são fluxos de dados binários, só os estados +1 e -1 deixam a fase da portadora inalterada. A passagem de um *bit* do código de +1 para -1, ou de -1 para +1, causa uma variação de 180° na fase.

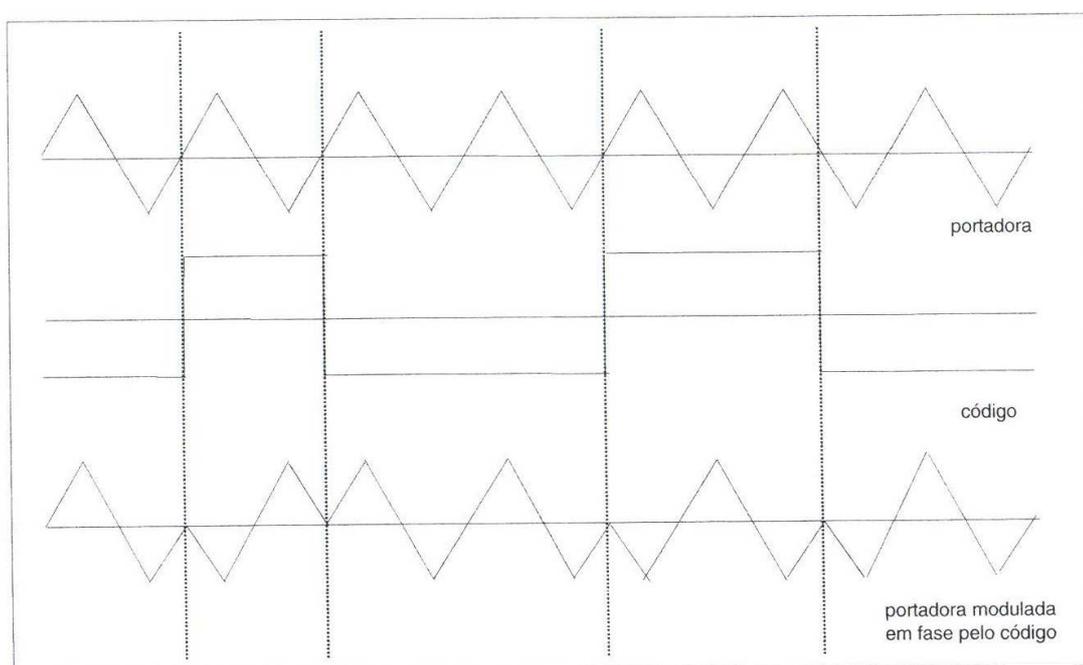


Figura 2.5 – Estrutura dos sinais dos satélites GPS.

Em razão do longo período do código P, torna-se difícil sintonizá-lo sem algum tipo de ajuda. O acesso direto ao código P só é possível para receptores bem sincronizados com o sistema de tempo GPS e posicionados em local com coordenadas conhecidas. Uma possibilidade seria utilizar osciladores de alta performance nos receptores, o que resultaria em custos inacessíveis para a maioria dos usuários. Por essas razões, esse sincronismo em geral é obtido via código C/A, pois este é de fácil aquisição. Porém, um dispositivo que realiza a correlação no receptor com os sinais recebidos dos satélites (*correlator*) deveria pesquisar, para cada satélite, um total de 15.345.000 bits de código (período

do código X1), o que também se tornaria inviável. Isso duraria pelo menos o mesmo período (1,5 s) de transmissão do código. Para solucionar o problema, definiu-se o contador Z (*Z count*). Ele é composto pelo número de épocas de 1,5 s do código X1, desde o início da semana GPS (meia-noite de sábado para domingo), denominado HOW (*Hand Over Word* – Palavra de Transmissão), e pelo número da semana GPS correspondente (ver seção 2.1.5). Cabe lembrar que o período do código X1 é 1,5 s (Spilker, 1996). Logo, a partir do HOW, transmitido com as mensagens de navegação dos satélites, obtém-se o ToW (*Time of Week* – Tempo da Semana). Quando ele é conhecido e o receptor está bem sincronizado com o tempo GPS, a aquisição do código P poderá ser obtida nos próximos 6 segundos (Seeber, 2003, p.221).

Algo similar ocorre com o novo código civil L2C, pois ele é mais longo que o código C/A. Mas, como os receptores que rastrearão o código L2C também deverão rastrear o código C/A, esse problema fica reduzido. Outro aspecto importante diz respeito ao componente do código L2C livre de dados (sem modulação – código CL), o que deverá resultar em medidas da fase com melhor qualidade. Semelhante resultado deve-se esperar do código em L5, isto é, do código L5 C.

### 2.1.1.2 Estrutura da mensagem de navegação

Os dados de navegação GPS são modulados em ambas as portadoras, na razão de 50 bps, com duração de 30 segundos. Portanto, a duração de um bit é 20 ms. As informações contidas em uma mensagem perfazem um total de 1.500 bits, denominado quadro de dados (*data frame*). Ele é dividido em 5 subquadros, de 6 segundos de duração (300 bits) cada um, contendo, cada um, dez palavras de 30 bits. O conteúdo de cada subquadro é apresentado na Tabela 2.1.

No início de cada subquadro aparecem duas palavras especiais, denominadas palavra de telemetria (TLM) e HOW. Quando as mensagens estão sendo enviadas para os satélites ou outra operação está ocorrendo, a palavra TLM é alterada. A palavra HOW contém um número que, multiplicado por 4, proporciona o ToW do próximo subquadro. O HOW é expresso em unidades de 1,5 segundo, contado a partir do início da semana GPS e com duração de uma semana, isto é, variando de 0 a 403.199.

Tabela 2.1 – Conteúdo dos subquadros da mensagem de navegação

Subquadro 1	TLM	HOW	Coefficientes para a correção do relógio do satélite Número da semana GPS e saúde do satélite Idade dos dados
Subquadro 2	TLM	HOW	Parâmetros orbitais
Subquadro 3	TLM	HOW	Continuação dos parâmetros orbitais
Subquadro 4	TLM	HOW	Almanaque para os satélites 25 a 32 (p.2, 3, 5, 7, 8, 9 e 10) Modelo da ionosfera e diferença de tempo GPS-UTC (p.18) Informação do AS ( <i>Anti-spoof flag</i> ) e configuração de 32 satélites Saúde dos satélites 25-32 (p.25) Páginas reservadas e de mensagens especiais
Subquadro 5	TLM	HOW	Almanaque dos satélites 1 a 24 (p.1 a 24) Saúde dos satélites 1 a 24 (p.25)

Os dados dos subquadros 1 a 3 repetem-se nos quadros seguintes até que os dados sejam renovados. Já os subquadros 4 e 5, cada um com 25 páginas, contêm dados diferentes em cada quadro, haja vista que cada quadro conterá uma de suas páginas. Como cada quadro tem duração de 30 segundos, a obtenção do conteúdo completo dos subquadros 4 e 5 levará 12,5 minutos. A Figura 2.6 mostra o esquema da estrutura de um quadro.

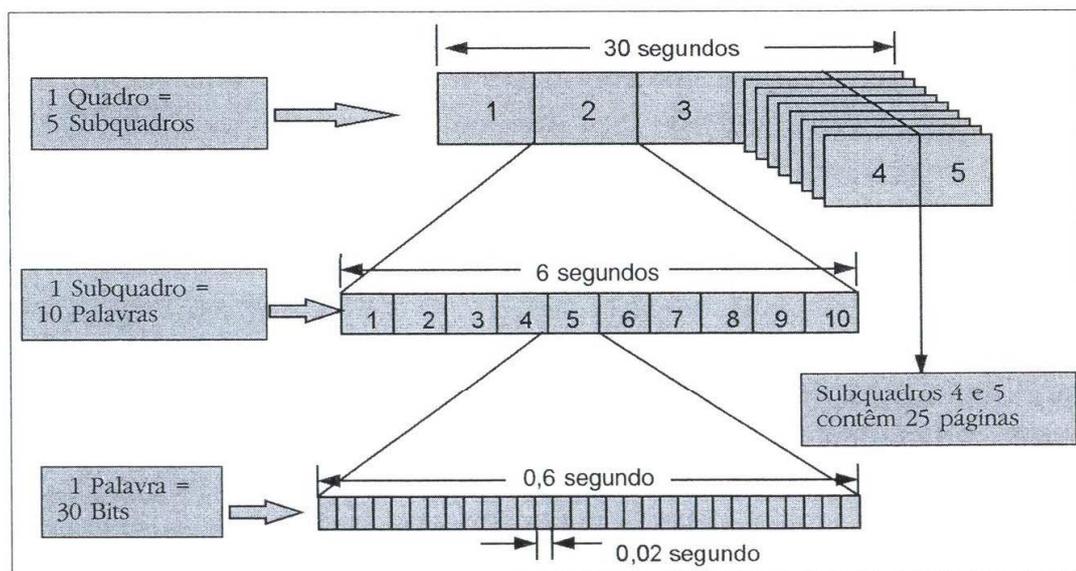


Figura 2.6 – Estrutura de um quadro de mensagens GPS (WELLS et al., 1986).

O almanaque dos satélites, contido nos subquadros 4 e 5, proporciona as informações necessárias para calcular posições aproximadas dos satélites, mesmo daqueles que não estão sendo rastreados. Trata-se de informações mais simplificadas que as contidas nos subquadros 2 e 3, mas essenciais para o planejamento de uma missão de posicionamento ou navegação com GPS.

Como a duração da transmissão de 1 bit de mensagem é 20 ms, tem-se que, durante esse intervalo de tempo, os códigos C/A (1,023 MHz) e P (10,23 MHz) se repetem 20 vezes, e o número de ocorrência de ciclos da portadora L1 é de 315.084.00 (Wells et al., 1986).

Com a modernização do GPS, essa estrutura deverá sofrer algumas alterações.

### 2.1.2 Segmento de controle

As principais tarefas do segmento de controle são:

- monitorar e controlar continuamente o sistema de satélites;
- determinar o sistema de tempo GPS;
- prever as efemérides dos satélites, calcular as correções dos relógios dos satélites; e
- atualizar periodicamente as mensagens de navegação de cada satélite.

O sistema de controle é composto por cinco estações monitoras (Hawaii, Kwajalein, Ascension Island, Diego Garcia e Colorado Springs), três delas com antenas para transmitir os dados para os satélites (Ascension Island, Diego Garcia e Kwajalein), e uma estação de controle central (MCS: Master Control Station) localizada em Colorado Springs, Colorado. Essas cinco estações de monitoramento pertencem à AAF *American Air Force*; com as sete da NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*), antiga NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), compõem as estações monitoras GPS do DoD. A Figura 2.7 mostra a distribuição das estações monitoras e demais elementos do segmento de controle do GPS (Malys et al., 1997).

Cada estação monitora é equipada com oscilador externo de alta precisão e receptor de dupla frequência, o qual rastreia todos os satélites visíveis e transmite os dados para a MCS, via sistema de comunicação. Os dados são processados na MCS para determinar as órbitas dos

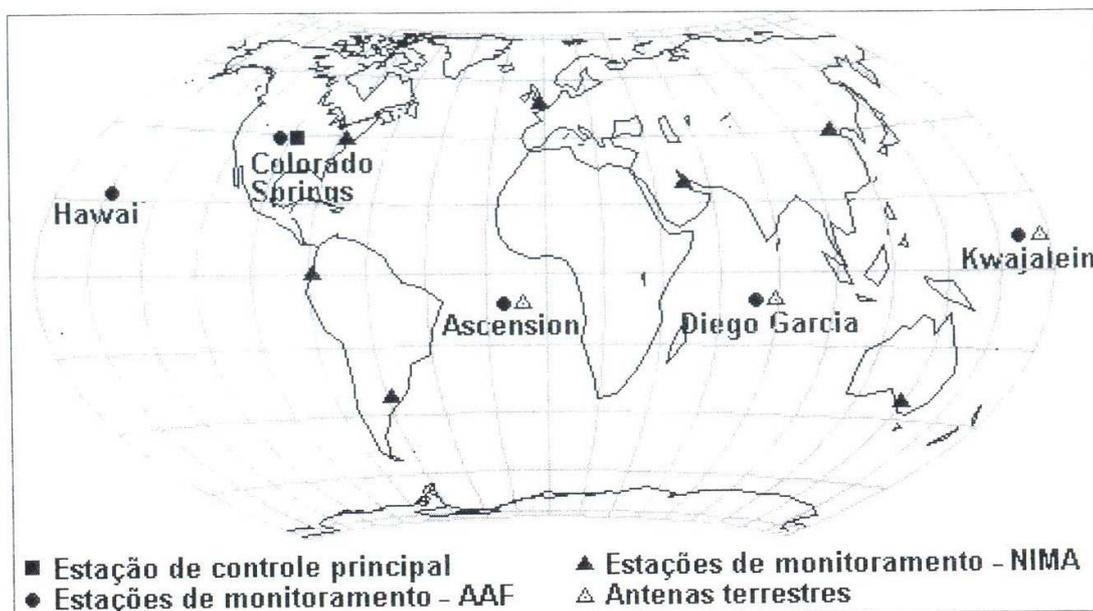


Figura 2.7 – Segmento de controle do GPS.

satélites e as correções dos relógios dos satélites, de modo que periodicamente as mensagens de navegação transmitidas (*broadcast ephemeris* – efemérides transmitidas) sejam atualizadas. A informação atualizada é enviada para os satélites a partir das antenas terrestres. Toda a infraestrutura do segmento de controle passou por atualização em setembro de 2007, incluindo receptores, computadores etc.

As estações de controle (*Monitor Station*) tiveram, originalmente, suas coordenadas determinadas em relação ao referencial WGS 72 (*World Geodetic System of 72*). Em janeiro de 1987 passou-se a adotar o WGS 84. O DMA (*Defense Mapping Agency*), antigo NIMA e atual NGA, realizou refinamentos do WGS 84, os quais culminaram com as realizações denominadas WGS 84 (G730), WGS 84 (G873) e WGS 84 (G1150) (Seção 3.5). Foram nessas novas realizações que as estações de monitoramento do NGA (NIMA), mostradas na Figura 2.7, passaram a fazer parte das estações do DoD. Testes indicaram que o WGS 84 (G730) é compatível no nível do decímetro com o ITRF92 (*International Terrestrial Reference Frame 1992*) (Malys e Slatter, 1994), o WGS 84 (G873) apresenta compatibilidade melhor que 5 cm com o ITRF94 (Malys et al., 1997) e o WGS 84 (G1150) concorda com o ITRF2000 no nível de 1 a 2 cm (Merrigan et al., 2002). As datas em que as novas coordenadas passaram a ser utilizadas pelo segmento de controle operacional do GPS fo-

ram 29 de junho de 1994, para o WGS 84 (G730), 29 de janeiro de 1997 para o WGS 84 (G873) e 20 de janeiro de 2002 para o WGS 84 (G1150).

A distribuição geográfica das estações monitoras somente ao longo do Equador atende aos requisitos de navegação e várias outras aplicações, mas não é adequada para a determinação de órbitas altamente precisas, em particular para aplicações em geodinâmica. Isso em razão do reduzido número de estações, que torna a geometria um pouco deficiente. O IGS (International GNSS Service – Serviço Internacional GNSS), estabelecido pela IAG (*International Association of Geodesy* – Associação Internacional de Geodésia), tem capacidade de produzir efemérides com precisão da ordem de poucos centímetros em cada uma das coordenadas do satélite, podendo atender à maioria das aplicações que exigem alta precisão. Essas efemérides ficam disponíveis aos usuários no prazo de uma semana a partir da coleta dos dados. Atualmente o IGS também produz efemérides rápidas, denominadas IGR, com precisão da ordem de 5 cm, colocando-as à disposição dos usuários diariamente. Há ainda as efemérides ultra-rápidas (IGU), com precisão estipulada em aproximadamente 0,10 m para a parte predita (tempo real), e da ordem de 5 cm para a parte que apresenta latência de 3 horas. Detalhes são apresentados no Capítulo 4. Para acompanhar os avanços e acessar esses produtos, o leitor pode acessar a página do IGS (<http://igsb.jpl.nasa.gov/>).

### 2.1.3 Segmento de usuários

O segmento de usuários está diretamente associado aos receptores GPS, os quais devem ser apropriados para os propósitos a que se destinam, como navegação, geodésia, agricultura ou outra atividade. A categoria de usuários pode ser dividida em civil e militar.

Os militares fazem uso dos receptores GPS para estimar suas posições e deslocamentos quando realizam manobras de combate e de treinamento. Durante a operação *Desert Storm*, na Guerra do Golfo, em 1991, vários receptores GPS foram utilizados para auxílio no deslocamento nas regiões desérticas, onde praticamente não há feições factíveis de ser localizadas em um mapa. Esse fato foi muito noticiado pela imprensa, fazendo que o GPS passasse a ser uma tecnologia bastante co-

nhecida do público em geral. Em outras guerras também muito foi noticiado o uso do GPS. Várias outras atividades militares fazem uso do posicionamento com receptores GPS, como a navegação de mísseis. Mas não são apenas os militares, que desenvolveram o sistema, que tiram proveito dessa valiosa tecnologia.

Atualmente, há grande quantidade de receptores no mercado civil, para as mais diversas aplicações, limitadas apenas pela imaginação dos usuários, o que demonstra que o GPS realmente atingiu sua maturidade. Uma breve descrição dos principais componentes envolvidos em um receptor, acompanhada da apresentação de alguns receptores, faz parte desta seção. Uma descrição detalhada de cada receptor torna-se impossível, além de rapidamente tornar-se obsoleta, em face do grande número de novos receptores que estão sendo desenvolvidos e postos no mercado. Para o leitor interessado em vários aspectos envolvidos em um receptor GPS, uma boa referência é Van Dierendonk (1996), além de vários trabalhos nos anais das conferências ION (*Institute of Navigation* – Instituto de Navegação). Receptores GPS por software também têm tido grandes avanços e há enorme variedade de publicações. Ver, por exemplo, Castillo (2002), Seeber (2003, p.570), Kelley e Baker (2006) e Borre et al. (2007).

#### **2.1.3.1 Descrição dos receptores GPS**

Os principais componentes de um receptor GPS, como mostrado na Figura 2.8, são (Seeber, 2003):

- antena com pré-amplificador;
- seção de RF (radiofrequência) para identificação e processamento do sinal;
- microprocessador para controle do receptor, amostragem e processamento dos dados;
- oscilador;
- interface para o usuário, painel de exibição e comandos;
- provisão de energia; e
- memória para armazenar os dados.

A seguir apresentamos uma breve descrição dos elementos mais importantes, baseada sobretudo em Seeber (2003).

## Posicionamento pelo GNSS

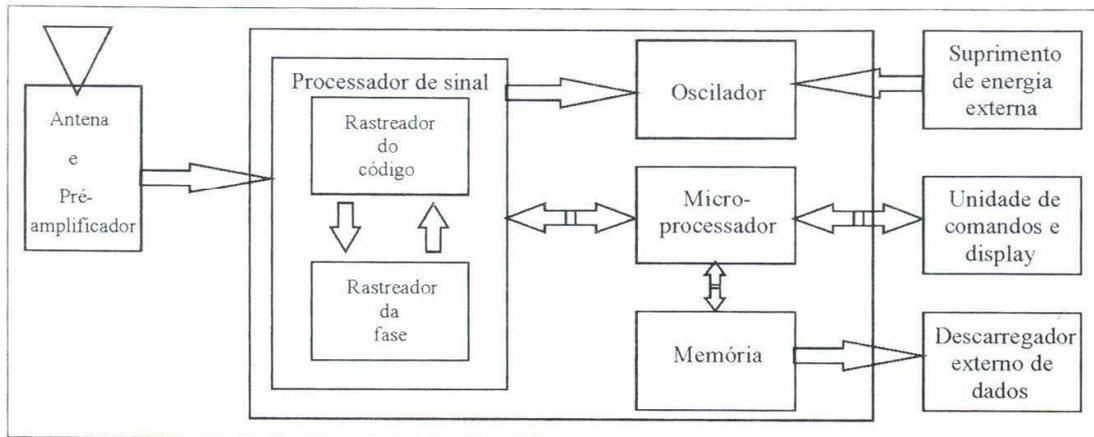


Figura 2.8 – Principais componentes de um receptor GPS.

### (a) Antena

A antena detecta as ondas eletromagnéticas emitidas pelos satélites, converte a energia da onda em corrente elétrica, amplifica o sinal e o envia para a parte eletrônica do receptor. Em razão da estrutura dos sinais GPS, todas as antenas devem ser polarizadas circularmente à direita (RHCP: *Right-Hand Circularly Polarised*). A antena deve ter boa sensibilidade, para garantir a recepção de sinal fraco, e o padrão de ganho deve permitir recepção em todas as elevações e azimutes visíveis. Vários tipos de antenas estão disponíveis no mercado: *monopole* ou *dipole*, *helix*, *spiral helix*, *microstrip* e *choke ring*. Segundo Seeber (2003), um dos tipos de antenas mais usado é a *microstrip*, ideal para equipamentos GPS de pequeno porte.

Para levantamentos geodésicos, a antena deve garantir alta estabilidade de seu centro de fase em relação a seu centro geométrico, e proteção contra multicaminhamento, isto é, sinais refletidos. Nesse caso, a antena também deve permitir a recepção das duas ondas portadoras (L1 e L2). A proteção contra o multicaminho (sinais refletidos) é normalmente efetivada com a instalação da antena sobre um disco de metal (*ground plane* – plano de terreno), ou pelo uso de *choke ring*. Esse último é um dispositivo composto por faixas condutoras concêntricas com o eixo vertical da antena, e fixado ao disco, cuja principal função é impedir que a maioria dos sinais refletidos seja recebida pela antena. Detalhes sobre esse assunto serão apresentados na Seção 5.2.2.3. A Figura 2.9 mostra alguns tipos de antenas, entre elas, algumas citadas anteriormente.

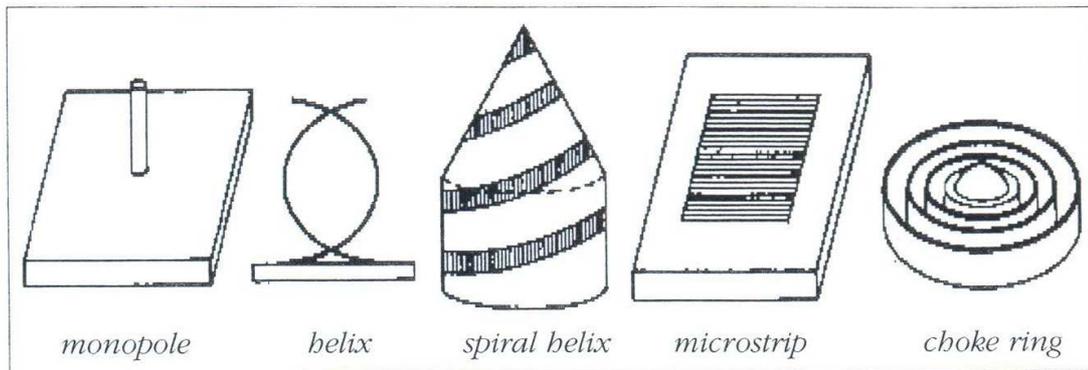


Figura 2.9 – Tipos de antenas GPS (SEEBER, 2003).

Os sinais GPS são muito fracos, tendo aproximadamente a mesma potência que os de TV, transmitidos por satélites geostacionários. A razão pela qual os receptores GPS não necessitam de uma antena de dimensão igual à das parabólicas tem muito a ver com a estrutura dos sinais e a capacidade dos receptores de captá-los. A captação dos sinais GPS está mais concentrada no receptor do que na antena propriamente dita. De qualquer forma, uma antena GPS, em geral, contém um pré-amplificador de baixo ruído que amplifica o sinal antes de ele ser processado pelo receptor (Langley, 1996b).

Os sinais GPS sofrem interferências quando passam através da maioria das estruturas. Algumas combinações de antena/receptor são capazes de captar sinais recebidos dentro de casas de madeira, sobre o painel de controle de veículos e na janela de aviões. Naturalmente, recomenda-se que as antenas sejam montadas com um amplo ângulo de visada, sem obstrução. Sob folhagem densa, em particular quando úmida, os sinais GPS são atenuados, de modo que muitas combinações antena/receptor apresentam dificuldades de captá-los. Atualmente, os esforços concentram-se no desenvolvimento e em melhorias de antenas capazes de ser integradas com telefone celular, as quais já vêm se tornando uma realidade (ver notícia no [www.mundogeo.com.br](http://www.mundogeo.com.br) de 8 de maio de 2007: “Google entra no mercado de celulares com receptores GPS”).

#### (b) Seção de RF

Os sinais que entram no receptor são convertidos na divisão de RF para uma frequência mais baixa, denominada frequência intermediária

(FI), que é mais fácil de ser tratada nas demais partes do receptor. Isso é feito pela combinação do sinal recebido pelo receptor com o sinal (senoidal) gerado pelo oscilador do receptor. Normalmente, os osciladores dos receptores GPS são de quartzo, de qualidade melhor que os utilizados nos relógios de pulso. A maioria dos receptores geodésicos permite o uso de osciladores externos, como um padrão atômico. O sinal com a FI contém toda a modulação presente no sinal transmitido, mas a onda portadora se apresenta alterada em frequência. Essa alteração é a diferença entre a frequência recebida (original) e a gerada no oscilador do receptor. Em geral ela é denominada frequência de batimento da onda portadora (Langley, 1996b). Múltiplos estágios de FI são usados na maioria dos receptores, reduzindo a frequência da portadora em etapas. Finalmente, o sinal FI é trabalhado nos rastreadores do sinal (*signal trackers*), ou seja, nos canais.

### (c) Canais

O canal de um receptor é considerado sua unidade eletrônica primordial, podendo o receptor possuir um ou mais canais. Os tipos de canais podem ser divididos em multicanais (canais dedicados), seqüenciais e multiplexados.

Nos receptores multicanais, também denominados canais paralelos, cada canal rastreia continuamente um dos satélites visíveis. No mínimo quatro canais são necessários para obter posição e correção do relógio em *tempo real*. Se mais canais estiverem disponíveis, um maior número de satélites pode ser rastreado. Os receptores modernos contam com até doze canais para cada frequência, além de canais extras para outro sistema (GLONASS, por exemplo).

Nos receptores seqüenciais, o canal alterna entre satélites dentro de intervalos regulares, em geral não coincidentes com a transmissão dos dados, o que faz que a mensagem do satélite só seja recebida completamente depois de várias seqüências. O receptor necessitará de pelo menos 4 vezes 30 segundos para obter a primeira posição. Alguns receptores dispõem de um canal dedicado para a leitura das mensagens de navegação. Na maioria dos casos utilizam-se canais seqüenciais rápidos, cuja taxa de alternância é da ordem de 1 segundo. Usualmente os receptores não apresentam problemas para recuperar o rastreo da

fase quando esta retorna para o mesmo satélite. No entanto, para aplicações cinemáticas, algumas dificuldades podem surgir.

Na técnica múltiplex, seqüências são efetuadas entre satélites em velocidade muito alta e, quando há necessidade, nas duas freqüências. A razão de troca é, na maioria das vezes, sincronizada com as mensagens de navegação (diferentemente da técnica seqüencial). A mensagem de navegação é obtida continuamente de cada um dos satélites, o que permite que a primeira posição possa ser obtida muito rapidamente; algo em torno de 30 segundos. Medidas de fase da onda portadora são obtidas continuamente, mesmo quando ocorre elevada aceleração. Uma vantagem da técnica múltiplex sobre a de multicanais é que não há necessidade de considerar os efeitos sistemáticos entre canais.

Receptores com um único canal são de baixo custo, mas, como são lentos na aquisição de dados, ficam restritos às aplicações de baixa velocidade. Foram muito empregados no início do desenvolvimento do sistema, até por volta do fim de 1990. Daí em diante o preço dos receptores caiu bastante. Atualmente, os receptores com canais dedicados são os mais adotados, tendência que deve se manter no futuro. Embora sejam mais rápidos, apresentam efeitos sistemáticos entre canais (*inter-channel biases*), os quais são minimizados no processo de calibração realizado pelo microprocessador. Os receptores com técnica múltiplex praticamente desapareceram no mercado civil. A maioria dos receptores geodésicos dispõe de oito a doze canais dedicados (paralelos), com capacidade de rastrear todos os satélites visíveis, por meio da técnica *all-in-view*.

#### (d) Microprocessador

O microprocessador é necessário no controle das operações do receptor (obter e processar o sinal, decodificar a mensagem de navegação), bem como para calcular em *tempo real* as posições e as velocidades em um referencial apropriado, além de outras funções (controle dos dados de entrada e saída, mostrar informações, correções DGPS). Ele usa, essencialmente, dados digitais para efetuar suas funções, pois cada vez mais softwares são incluídos nos circuitos integrados. No desenvolvimento dos receptores modernos, cada vez mais as funções dos receptores são realizadas por software e não por hardware. Os receptores em que a correlação do sinal e o processamento dos dados são

integrados em um software são denominados receptores por software (Borre et al., 2007).

A tendência moderna aponta para a integração das funções de RF e FI de um receptor GPS em um único chip (*application-specific integrated circuit* – ASIC) e das funções de processamento digital de sinal em um outro. A esse conjunto dá-se o nome de *chipset*.

#### **(e) Interface com o usuário**

A unidade de comando e *display* proporciona a comunicação com o usuário. As teclas podem ser usadas para entrar com comandos destinados a selecionar as mais variadas opções de coleta de dados, monitoramento das atividades do receptor, exibição das coordenadas calculadas, além de outros detalhes. Pode-se citar, entre eles, o DOP (*Dilution Of Precision* – Diluição da Precisão), satélites sendo rastreados, ângulo de elevação, bem como a possibilidade de entrar com a altura da antena e a identificação da estação. A maioria dos receptores dispõe de padrão de operação preestabelecido, não requerendo intervenção do usuário. Outros podem ser controlados remotamente. Em resumo, o desenvolvimento nessa área é muito rápido.

#### **(f) Memória**

Os receptores dispõem também de memória interna para armazenagem das observações (pseudodistância e medidas de fase da portadora) e das efemérides transmitidas. Receptores modernos dispõem de memórias de estado sólido (RAM) ou cartões de memória removíveis, além da possibilidade de transferir os dados diretamente para o computador. A capacidade de armazenagem é bastante elevada. A transferência de dados exige a presença de porta serial do tipo RS-232, USB ou equivalente. Alguns programas específicos permitem que determinados tipos de receptores possam ser controlados remotamente.

#### **(g) Suprimento de energia**

O suprimento de energia foi um fator crítico nos receptores da primeira geração, em razão do alto consumo. Os receptores modernos são

concebidos para que tenham consumo mínimo de energia. A maioria tem uma bateria interna de níquel-cádmio ou de lítio, além de uma entrada para energia externa. Alguns chegam mesmo a operar com baterias comuns (pilhas). Dependendo da taxa de coleta de observações, a bateria interna pode ser suficiente para mais de 30 horas. O consumo dos modernos receptores é menor do que 1 Watt.

#### (h) Comunicação

Alguns receptores, em especial aqueles dedicados a funcionar como uma estação de referência, já têm disponível comunicação direta com a internet, via porta TCP/IP, UDP etc. O acesso e o controle podem ser realizados remotamente. Entre os protocolos de comunicação pode-se citar o NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*). Comunicação sem fio (*wireless*), como *Bluetooth*, também já está disponível em alguns receptores, o que permite ao usuário acessar os dados a partir de um telefone celular, desde que tenha permissão para isso.

#### 2.1.3.2 Classificação dos receptores

Os receptores GPS podem ser divididos segundo vários critérios. De acordo com a comunidade usuária, podem ser classificados em:

- receptor de uso militar e
- receptor de uso civil.

É comum encontrar classificação de acordo com a aplicação:

- receptor de navegação;
- receptor geodésico;
- estação de referência;
- receptor para SIG (Sistema de Informações Geográficas);
- receptor de aquisição de tempo etc.

Essa classificação pode ocasionar algum tipo de confusão, já que um receptor dito geodésico pode ser usado para navegação, entre outras possibilidades. Outra classificação, que talvez seja a mais adequada, baseia-se no tipo de dados proporcionado pelo receptor, ou seja:

- código C/A;
- código C/A e portadora L1;
- código C/A e portadoras L1 e L2;
- códigos C/A e P2 e portadoras L1 e L2;
- códigos C/A, P1 e P2 e portadoras L1 e L2; e
- códigos C/A, L2C, P2 e portadoras L1 e L2.

Com a contínua modernização do GPS, outras possibilidades aparecerão no futuro e outras classificações ainda são possíveis. Mas o importante para o usuário é ter clara a aplicação que se objetiva, a precisão desejada, bem como outras características necessárias. Isso poderá auxiliar o usuário na identificação do receptor adequado às suas necessidades, independentemente da classificação adotada.

### 2.1.3.3 Técnicas de processamento do sinal

Em Geodésia, para aplicações envolvendo linhas bases médias e longas, ou em regiões com forte atividade ionosférica, caso típico do Brasil, é essencial usar receptores que proporcionem as portadoras (atualmente L1 e L2) e o acesso ao código nas portadoras (atualmente C/A, P e L2C). A técnica em geral aplicada para acessar a portadora, quando o AS não está em operação, é a da correlação do código. Ela normalmente é empregada para acessar a portadora L1. Como a portadora L2 tem modulado sobre ela apenas o código P, sujeito ao AS, ela deve ser acessada por uma das várias técnicas disponíveis: quadratura do sinal (*squaring*), correlação cruzada, correlação do código com quadratura do sinal e, a mais recente, denominada *Z-Tracking*. Apresenta-se a seguir breve descrição das técnicas mais utilizadas para o processamento de sinal.

#### (a) Correlação do código

Nessa técnica, todos os componentes envolvidos no sinal do satélite são obtidos: leitura do relógio do satélite, mensagens de navegação e a portadora sem modulação. Necessita-se, no entanto, conhecer o código gerado pelo satélite. Isso não é um problema para o código C/A, que é de domínio público, o que não ocorre com o código Y. A partir do código, as distâncias são determinadas no DLL (*delay lock loop*) por meio da técnica de correlação do código. Após removido o código,

a onda portadora é tratada no PLL (*Phase Lock Loop*). Várias etapas estão envolvidas nessa técnica.

Primeiro, uma portadora de referência é gerada no receptor, que então é modulada com uma réplica do código PRN conhecido. Em um segundo estágio, o sinal resultante é correlacionado com o sinal recebido do satélite. Os sinais são deslocados até que seja obtida a máxima correlação. Para obtê-la com melhor acurácia, dois dispositivos, denominados correlacionadores (*correlators*), são utilizados (Hofmann-Wellenhof; Lichtenegger; Collins, 1997, p.81). Quanto menor o espaçamento entre esses dispositivos, melhor será a acurácia resultante. Receptores GPS de alta performance do código C/A adotam essa estratégia (*narrow correlator spacing* – espaçamento estreito entre os correlacionadores). O deslocamento em tempo, entre as duas seqüências de códigos, é a medida do intervalo de tempo do deslocamento do sinal do satélite até o centro de fase da antena do receptor. Como há erro de sincronismo entre os relógios do receptor e do satélite, quando o intervalo de tempo de propagação é multiplicado pela velocidade da luz, tem-se como resultado a observável denominada, na literatura sobre GPS, como pseudodistância, a qual pode ser gerada partindo do código C/A, P ou L2C.

Em uma segunda fase, outro dispositivo interno (*Carrier-tracking Loop*) separa o código PRN da portadora. Essa técnica é conhecida como reconstrução da portadora. Depois que o código PRN é removido (demodulado), o sinal recebido contém ainda as mensagens de navegação, que devem também ser demoduladas, para que se possam realizar medidas sobre a própria portadora. Um filtro passa-alta pode realizar essa tarefa.

O sinal resultante é a portadora, afetada pelo efeito Doppler, sobre a qual a medida de fase da onda portadora é realizada. A medida realizada é denominada fase de batimento da onda portadora, que é a fase relativa entre o sinal recebido e o gerado pelo oscilador do receptor. Um receptor usando essa técnica pode gerar observações de pseudodistância, fase de batimento da onda portadora e variação da fase da portadora (Doppler), além de extrair as mensagens de navegação.

Tal técnica só pode ser aplicada na portadora L2 quando o AS não estiver ativado, ou para usuários com acesso ao código P criptografado (código Y). A maioria dos receptores utiliza uma técnica híbrida. A por-

portadora L1 é reconstruída via correlação do código C/A, e uma das técnicas descritas a seguir (*codeless technique* – técnica sem uso do código, ou quase *codeless*) é aplicada para reconstruir a portadora L2.

#### (b) Quadratura do sinal (*Signal Squaring*)

Nessa técnica, o sinal recebido no receptor é multiplicado por ele mesmo (*squaring*), o que gera uma segunda portadora. Os códigos e as mensagens de navegação são perdidos e o sinal resultante é uma onda senoidal de frequência duas vezes a original, com razão sinal/ruído maior. A vantagem dessa técnica é não ser necessário o conhecimento do código, o que a torna adequada para acessar a portadora L2 quando o AS estiver ativado.

A perda da mensagem de navegação exige o uso de efemérides e correções dos relógios dos satélites obtidas com base em fontes externas. A solução desse problema, como já citado, envolve o uso de uma técnica híbrida. Utiliza-se o código C/A, presente na portadora L1, da qual se obtém a pseudodistância e a fase da onda portadora, bem como as mensagens de navegação e pela aplicação da técnica de quadratura do sinal obtém-se a fase da portadora L2. A detecção de perdas de ciclos e *outliers*, normalmente, é mais difícil sobre dados coletados com receptores que usam a quadratura do sinal sobre L2, em relação aos receptores que empregam a correlação do código. Receptores modernos não utilizam mais essa técnica, muito embora ela já tenha sido muito empregada e uma das pioneiras para recuperar a portadora da L2. Por exemplo, os receptores Trimble 4000SST, alguns ainda em uso, adotam essa técnica.

#### (c) Correlação do código com quadratura do sinal

Nessa técnica, o código Y recebido do satélite na portadora L2 é correlacionado com uma réplica do código P gerado no receptor. Essa correlação é possível em razão do código Y ser resultante de uma soma de módulo dois dos códigos P e W. Como a frequência do código W é 20 vezes menor que a do código Y, sempre ocorrerão partes do código Y que coincidirão com partes do código P. A réplica do código P gerada no receptor será deslocada para que ocorra coincidência com a parte do código P presente no código Y do satélite. Após a correlação um

filtro é aplicado para obter a distância (*code range*) e o sinal é multiplicado por ele mesmo para eliminar o código, para então ser efetuada a medida de batimento da onda portadora. Da mesma forma que a técnica anterior, o que se tem ao final é uma medida em que o comprimento de onda é metade do original (Hofmann-Wellenhof; Lichtenegger; Collins, 1997, p.83).

**(d) Correlação cruzada (Cross-Correlation)**

A técnica da correlação cruzada é uma opção disponível em alguns receptores, como o Trimble 4000SSE, o Trimble 4000SSI e o Turbo Rogue. Eles mudam automaticamente o modo de operação quando o AS é ativado, isto é, passam da técnica de correlação do código para a de correlação cruzada. Usando essa técnica, quatro observações são produzidas: duas medidas de fase das ondas portadoras e duas pseudodistâncias. As medidas de fase são produzidas com comprimentos de ondas iguais aos originais.

Essa técnica se baseia no fato de que o código Y modulado na portadora L1 é idêntico ao da L2, embora não seja necessariamente conhecido. O atraso em virtude da ionosfera faz que o sinal L1 alcance a antena antes do sinal L2. Observando o que há no sinal L1, pode-se usar tal informação para correlacionar com o sinal L2, que chega um pouco mais tarde. Dessa forma, o código Y do sinal L1 é alimentado por um dispositivo no receptor (*variable feed back loop*), até que haja máxima correlação com o código Y da portadora L2. O atraso ocorrido é equivalente à diferença entre as pseudodistâncias (PD) que seriam geradas do código P em L1 e L2, caso fossem disponíveis. Mas o que se obtém é o atraso do código Y nas duas portadoras ( $PD_{L2,Y} - PD_{L1,Y}$ ). Esse valor é adicionado à pseudodistância gerada a partir do código C/A ( $PD_{L1,C/A}$ ) para gerar a pseudodistância em L2, ou seja:

$$PD_{L2} = PD_{L1,C/A} + (PD_{L2,Y} - PD_{L1,Y}) \quad (2.3)$$

De maneira similar, substituindo a pseudodistância PD pela fase da onda portadora  $\phi$ , obtém-se o seguinte resultado para a fase da onda portadora:

$$\phi_{L2} = \phi_{L1,C/A} + (\phi_{L2} - \phi_{L1}) \quad (2.4)$$

O que se pode observar dessas duas últimas expressões é que cada uma das observáveis resultantes é altamente correlacionada com a original, isto é, aquela obtida pela correlação do código em L1. De qualquer forma, o próprio nome da técnica diz algo a esse respeito. Segundo Hofmann-Wellenhof; Lichtenegger; Collins (2001, p.83), trata-se de uma técnica melhor que a da quadratura do sinal, mas degradada em relação à da correlação do código.

#### (e) Técnica *Z-Tracking*

Nessa técnica, considera-se que o código Y pode ser dividido em duas componentes: o código P, original, e o código W, usado na criptografia do código P. Tal como na correlação cruzada, supõe-se que o código Y é o mesmo nas portadoras L1 e L2. Além disso, usa-se o conhecimento de que o código W é gerado em uma frequência bem mais baixa (50 bps), se comparada com a do código P. Uma réplica do código P é correlacionada com o código Y (P + W) das portadoras L1 e L2. Por meio de técnicas de filtragem de sinal, o código W é estimado e removido do sinal que está sendo recebido. Após a eliminação do código W, os sinais se tornam iguais àqueles recebidos quando o AS não estará ativado. Essa técnica proporciona, então, três pseudodistâncias (C/A, Y1 e Y2) e duas medidas de fase da onda portadora (L1 e L2), ambas com comprimentos de onda iguais aos das originais (Ashjaee e Lorenz, 1992). Os receptores Ashtech ZXII empregam essa técnica, além de vários outros.

Uma comparação entre as técnicas usadas quando o AS está ativado foi realizada por Ashjaee e Lorenz (1992) e mostrou que a *Z-Tracking* proporciona a melhor razão sinal/ruído. Mas quando comparada com a técnica em que se faz a correlação direta com o código P, os resultados foram muito inferiores. Isso mostra que ter acesso ao código P é a melhor solução.

Atualmente, a maioria dos receptores geodésicos emprega técnica similar à *Z-tracking*.

#### 2.1.3.4 Exemplos de alguns receptores GPS

O primeiro receptor para fins geodésicos foi introduzido no mercado em 1982. Trata-se do Macrometer V1000, desenvolvido com o apoio

financeiro da NASA, sendo um receptor de frequência simples, que rastreava até seis satélites partindo de seis canais paralelos, por meio da técnica da quadratura do sinal. Dessa forma, as informações das efemérides e dos relógios dos satélites eram perdidas, sendo necessária uma fonte externa para a obtenção das efemérides. A precisão de linhas base de aproximadamente 100 km, levantada com esse equipamento, foi da ordem de 1 a 2 ppm (partes por milhão). Uma nova versão do V1000, o Macrometer II, foi introduzida em 1985, sendo um receptor de dupla frequência. Paralelamente, o DMA, ex-NIMA, atualmente NGA, em cooperação com o U.S. Geological Survey (USGS) e o U.S. National Geodetic Survey (NGS), desenvolveu especificações para a produção de um receptor portátil de dupla frequência, utilizando a técnica de correlação do código. Isso resultou em um receptor de canais múltiplex, com capacidade de rastrear até quatro satélites, denominado TI 4100, desenvolvido pela Texas Instruments e introduzido no mercado em 1984. Esse foi o primeiro receptor a proporcionar todas as observáveis de interesse dos geodestas, agrimensores, cartógrafos e navegadores, isto é: pseudodistâncias a partir do código P em L1 e L2, bem como a partir do código C/A em L1, e fase das portadoras L1 e L2. O equipamento foi extensivamente usado e muitos dos resultados publicados entre 1985 e 1991 foram baseados em dados coletados com o TI 4100. Os dados eram armazenados em gravadores externos ou em fitas cassete, ou transferidos diretamente para um microprocessador externo. O peso total do equipamento gira em torno de 30 kg com consumo de energia da ordem de 100 Watts.

O desenvolvimento dos receptores disponíveis atualmente foi bastante influenciado pela tecnologia aplicada nos exemplos já citados. A maioria dos modelos iniciou com receptores de simples frequência, adotando a técnica de correlação do código C/A e medidas de fase da portadora L1, com capacidade de rastrear apenas quatro satélites. Em um segundo momento, a opção da portadora L2 foi acrescentada, usando-se a técnica de quadratura do sinal, e o número de satélites passíveis de serem rastreados simultaneamente aumentou. O passo seguinte, por volta de 1992, foi a inclusão do código P em L2, ou mesmo em L1, visando melhorar a qualidade da portadora L2. Com a aproximação da ativação permanente do AS, em 1993, os fabricantes passaram a desenvolver técnicas mais apuradas, com o objetivo de obter a portadora

L2 original (*Cross-Correlation*, *Z-Tracking* etc.). Além disto, desenvolveram-se e aprimoraram-se técnicas que passaram a proporcionar melhor precisão nas medidas de pseudodistâncias partindo do código C/A, apenas um pouco pior que a obtida partindo do código P. Receptores com boa imunidade ao multicaminho também fazem parte da realidade atual, além da introdução da tecnologia digital.

Há também no mercado grande variedade de equipamentos GPS apropriados para coletas de dados para um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Isto é, além de obter a posição da feição de interesse, um coletor acoplado ao receptor permite que se colem vários atributos associados às feições levantadas. Detalhes sobre esse assunto são apresentados no Capítulo 11.

Tem-se, atualmente, grande quantidade de receptores disponíveis no mercado, com os mais variados preços, configurações e para as mais diversas aplicações. Isso pode ser visto em vários levantamentos sobre os receptores GPS disponíveis, publicados na revista *GPS World*, em janeiro de 1996, 1997, 1998 e 1999. Na edição de janeiro de 1996, 52 companhias participaram do levantamento feito pela publicação, com um total de 342 receptores. No levantamento de janeiro de 1997, o número de companhias passou para 61, com 394 tipos de receptores. Esse aumento continuou no ano seguinte. Em janeiro de 1998, setenta companhias participaram do levantamento, com um total de 429 receptores. Interessante notar que, em janeiro de 1999, o número de companhias que participaram reduziu-se de setenta para 58, mas mesmo assim o número de tipos de receptores aumentou, passando para 436. Atualmente, o número de marcas de receptores deve ser muito maior.

Diante dessa grande quantidade de modelos de receptores disponíveis, o usuário GPS, ao definir um equipamento a ser adquirido, deve prestar muita atenção a suas especificações. Algumas informações que constam do material de propaganda do equipamento, como precisão e intervalo mínimo para solução da ambigüidade, nem sempre são alcançadas, dependendo de condições especiais. Na maioria das vezes, grande parte dos acessórios relacionados é opcional. É aconselhável que futuros usuários, não acostumados com a nomenclatura e vários outros aspectos envolvidos no GPS, consultem especialistas para ajudá-los na decisão sobre o melhor equipamento a ser adquirido.

A Figura 2.10 mostra dois receptores, o Garmin 38 e o Garmin 12XL, da esquerda para a direita. Trata-se dos chamados receptores de mão, que rastreiam apenas o código C/A e destinam-se a levantamentos expeditos, sendo muito utilizados no Brasil. Até a desativação da SA em 2000, esses receptores proporcionavam precisão horizontal da ordem de 100 m, no nível de probabilidade de 95%. Hoje, esse número é algo em torno de 10 vezes melhor.



Figura 2.10 – Receptores GPS de código C/A.

A Figura 2.11 mostra um receptor que apresenta as mesmas características que os da Figura 2.10, mas é muito reduzido em tamanho e apropriado para ser colocado no pulso, como um relógio.

A Figura 2.12 mostra dois receptores de fabricantes diferentes, mas de qualidade e para aplicações similares. Ambos rastreiam o código C/A e a portadora L1, podendo proporcionar precisão da ordem de 10 cm no modo relativo, assunto do Capítulo 6. Trata-se dos receptores Reliance, da Ashtech, e Pro-XR, da Trimble, mostrados da esquerda para a direita.

## Posicionamento pelo GNSS

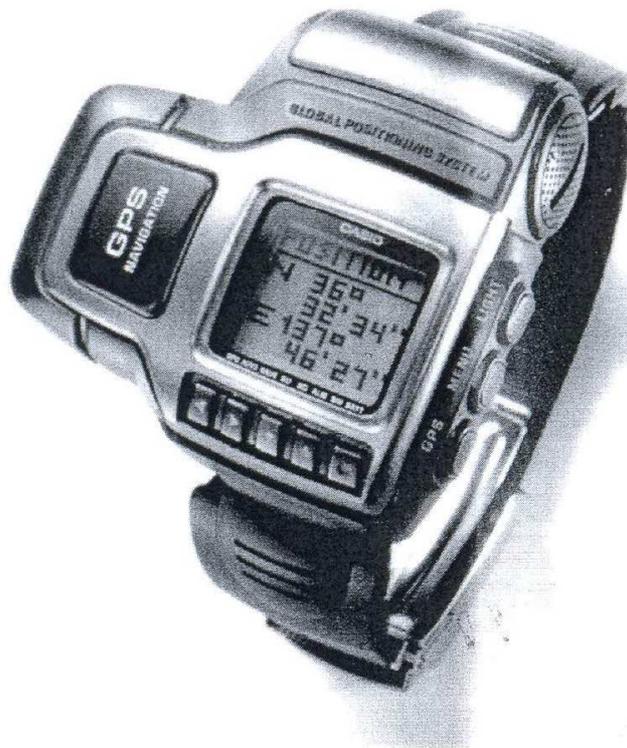


Figura 2.11 – Relógio de pulso com receptor GPS.

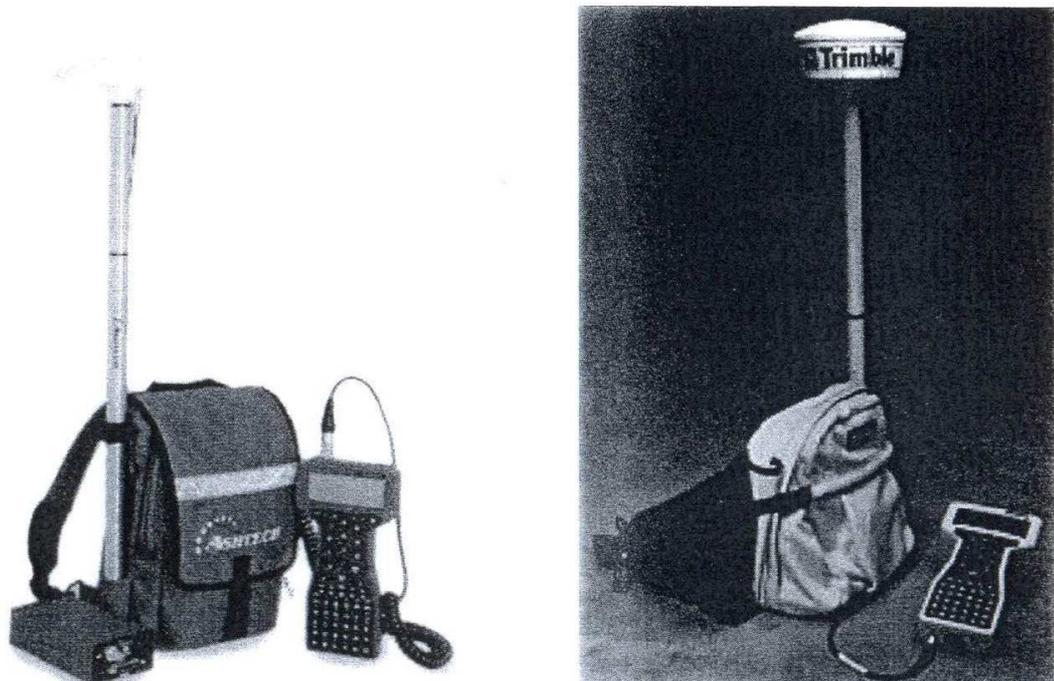


Figura 2.12 – Receptores GPS de código C/A e portadora L1.

A Figura 2.13 mostra dois receptores de dupla frequência, capazes de recuperar a portadora L2 mesmo quando o AS estiver ativado. Eles estão entre os receptores capazes de fornecer alta precisão. Trata-se do receptor Z-XII da Ashtech, à esquerda, e do 4000 SSI da Trimble, à direita.

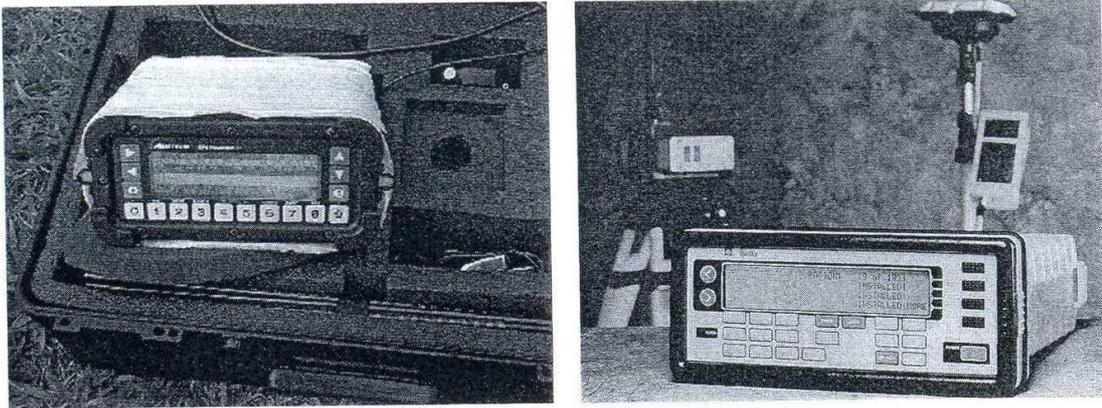


Figura 2.13 – Receptores GPS de dupla frequência.

Os receptores apresentados dominaram a década de 1990. A partir de 2000, modelos mais sofisticados foram desenvolvidos. Atualmente, grande parte dos receptores de mão tem algum tipo de mapa integrado, além de outras funções. A Figura 2.14 mostra, à direita, o receptor Garmin Ique 3600 e, à esquerda, o Garmin GPS MAP76CS.



Figura 2.14 – Receptores GPS integrados com mapas e outras facilidades.

## Posicionamento pelo GNSS

A Figura 2.15 mostra dois modelos de celulares que têm receptor GPS integrado, bem como mapas, podendo ser utilizados para a navegação. Trata-se de produtos que deverão ter muita aceitação no mercado.



Figura 2.15 – Receptores GPS integrados com celular.

No que se refere aos receptores que rastreiam a portadora L1 e o código, a Figura 2.16 mostra um dos modelos mais recentes da Trimble (à esquerda) e da Leica (à direita). São os receptores denominados Pathfinder® ProXT™ e Leica GS20 Professional Data Mapper, respectivamente.



Figura 2.16 – Receptores GPS de código C/A e portadora L1 (geração após 2005).

No que diz respeito aos receptores GPS com duas portadoras, atualmente há vários disponíveis no mercado. Alguns deles, denominados estações de referência, são adequados para a realização de coletas contínuas de dados e podem ser conectados diretamente à internet, sem a necessidade de um computador. Na realidade, o próprio receptor dispõe de um sistema operacional. Na Figura 2.17 são mostrados dois receptores que dispõem dessa capacidade, o NetRS5 da Trimble (à esquerda) e o GRX1200 GG da Leica (à direita). Esses receptores já dispõem de capacidade de rastrear sinais GPS modernizados, bem como o GLONASS.

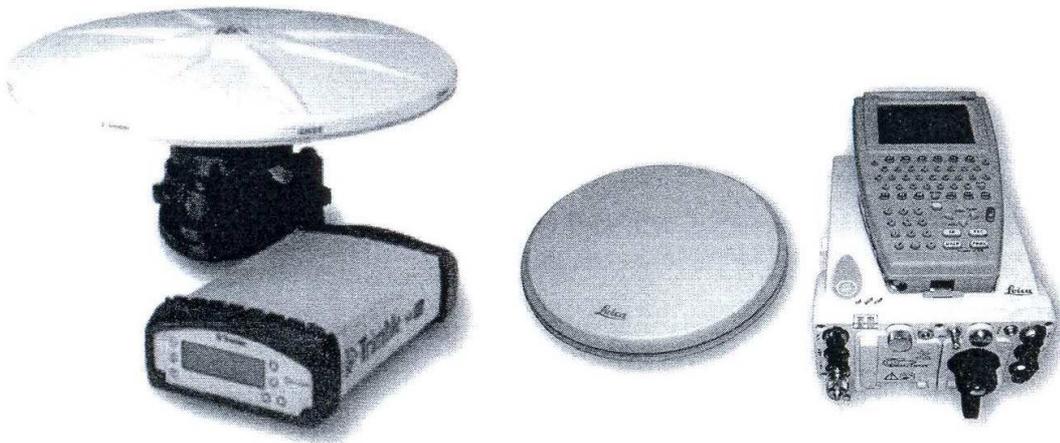


Figura 2.17 – Receptores GPS de dupla frequência com conexão à internet – NetRS5 da Trimble e GRX1200 GG da Leica.

#### 2.1.4 Descrevendo a SA e o AS

Já foi citada na seção 1.1, mesmo que brevemente, a limitação da acurácia do sistema GPS, via *Selective Availability* (SA) e *Anti-Spoofing* (AS).

##### 2.1.4.1 SA

Durante a fase de implementação do GPS, esperava-se que a acurácia do posicionamento utilizando pseudodistâncias a partir do código C/A fosse da ordem de 400 m. No entanto, testes realizados mostraram acurácia em torno de 20 a 40 m (Seeber, 1993). Essa inesperada situação fez que o programa designado *Selective Availability* (SA) fosse in-

corporado nos satélites do Bloco II e nos posteriores. Tratava-se de um programa que não fazia parte do planejamento inicial do GPS. Dois efeitos fazem parte da SA:

- manipulação das efemérides transmitidas (técnica  $\epsilon$ ); e
- desestabilização sistemática do oscilador do satélite (técnica  $\delta$ ).

A SA foi implementada apenas a partir dos satélites do Bloco II, com início em 25 de março de 1990. O nível de degradação foi reduzido durante a Guerra do Golfo, em setembro de 1990, sendo a degradação reativada em 1º de julho de 1991 (Leick, 1995). Trata-se de redução proposital da qualidade do posicionamento com o GPS, para os usuários não autorizados, de modo que a acurácia horizontal e vertical proporcionada pelo SPS seja da ordem de 100 e 156 m, respectivamente, ao nível de confiança de 95%. Isso significa que durante 95% do tempo a acurácia da posição horizontal de um usuário posicionado na forma absoluta, em tempo real, será da ordem de 100 m, ou melhor. Com esse mesmo nível de confiança, o erro na medida de tempo atinge 340 ns.

O impacto da SA sobre os usuários civis tem sido tema de muitas discussões entre usuários GPS. Vários testes foram realizados para avaliar seu efeito. Verificou-se que há aumento no ruído do código e da onda portadora. Os efeitos da técnica  $\epsilon$  podem provocar erros sistemáticos na escala e na orientação de uma linha base, caso a sessão de observação não seja longa o suficiente para eliminar o efeito da perturbação da órbita. A técnica  $\delta$  provoca um efeito adverso na detecção e no reparo de perdas de ciclos para medidas não diferenciadas. O efeito é praticamente eliminado no posicionamento relativo (seção 9.3), pelo fato de este não depender da geometria do satélite. Para navegação, o uso de DGPS (**D**ifferential **GPS**) ou WADGPS (**W**ide **A**rea **D**ifferential **GPS**) praticamente elimina os efeitos da SA (seção 7.4). Em 1996, encontrava-se em discussão a possibilidade de eliminação da SA em um período de quatro a dez anos (Gibbons, 1996). Antes de decorridos os dez anos, em 1º de maio de 2000, o governo norte-americano anunciou a desativação da SA para a 0h (horário de Washington, Estados Unidos) do próximo dia, o que melhorou a precisão proporcionada pelo GPS, ao nível do SPS, em torno de 10 vezes. Ao mesmo tempo, anunciava-se que já se dispunha de tecnologia para implementar a SD (*Selective Denial*