



**Ciências
ULisboa**

Faculdade
de Ciências
da Universidade
de Lisboa

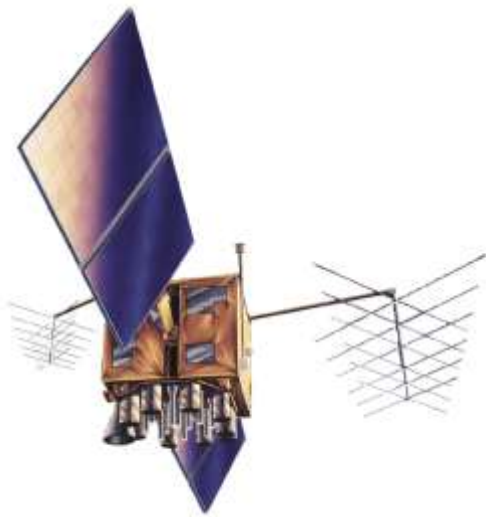


Sistema de Posicionamento Global



V. B. Mendes

Sistema de Posicionamento Global



O Sistema de Posicionamento Global (NAVSTAR GPS – *Global Positioning System*) foi criado e desenvolvido pelo Departamento de Defesa (DoD – *Department of Defense*) dos Estados Unidos da América (EUA), com o objectivo de garantir tempo e navegação de precisão (posição e velocidade), continua e globalmente, em tempo real e sob quaisquer condições atmosféricas. O termo NAVSTAR tem sido associado a um acrónimo para *NAVigation System with Timing and Ranging* (e existem outras

variantes), mas de facto nunca foi essa intenção dos criadores do sistema (... era simplesmente um nome apelativo).

O desenvolvimento do GPS iniciou-se em finais de 1973. Nessa fase inicial, foram desenvolvidos e lançados os primeiros satélites (4 satélites, distribuídos em 2 planos orbitais) e construídos os receptores protótipo. A fase II de desenvolvimento do GPS iniciou-se em 1979 e foi caracterizada por uma elaboração mais completa do sistema. A fase III iniciou-se em 1985, com o desenvolvimento dos satélites de produção. O sistema atinge o funcionamento pleno (FOC - *Full Operational Capability*) em Julho de 1995.

DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O GPS é constituído por três segmentos, denominados segmento espacial, segmento de controlo e segmento do utilizador.

Segmento Espacial

Em termos nominais, o segmento espacial é constituído por uma constelação de 24 satélites (Figura 1), distribuídos por 6 planos orbitais (4 satélites por plano). Os 6 planos orbitais estão separados entre si de 60° em longitude e têm inclinações de 55° , relativamente ao plano equatorial terrestre (os satélites da fase I tinham inclinações de 63°). Os satélites estão colocados a 20 200 km acima da superfície terrestre, descrevem órbitas aproximadamente circulares e giram em torno da terra com um período de 12 horas siderais (~ 11 h 58 min UTC), pelo que serão visíveis num dado local, de dia para dia, com cerca de 4 minutos de avanço. O posicionamento dos satélites nos planos orbitais é feito de modo a que pelo menos 4 satélites possam ser observados em qualquer ponto do globo, em qualquer instante.

Os satélites GPS podem ser identificados pelo número de sequência do lançamento, número do veículo espacial (SVN – *Space Vehicle Number*), número do código PRN (PRN – *Pseudo Random Noise*) usado pelo satélite, número de designação internacional ou número do catálogo NASA (ou *U.S. Space Command*). Existem diferentes séries (gerações) de satélites GPS, denominadas como blocos: Bloco I, Bloco II e Bloco III, com algumas variantes.

Segmento de Controlo

O segmento de controlo tem como funções principais: (1) sincronizar os relógios dos satélites com o tempo GPS; (2) calcular as órbitas dos satélites; (3) injectar essa informação nos satélites, de forma a serem radiodifundidas aos utilizadores, e (4) controlar o estado de funcionamento dos satélites.



Figura 1 - Constelação GPS (Cortesia de *Smithsonian Institution*).

O segmento de controlo (Figura 2) é constituído por uma estação de controlo principal e cinco estações monitoras, três das quais acumulam a função de comunicar com os satélites (estações transmissoras).

As estações monitoras, localizadas em Colorado Springs (*Falcon Air Force Base*), Kwajalein, Diego Garcia, Ascension e Hawaii, são responsáveis pelo rastreio dos satélites GPS. Os dados recolhidos nestas estações são enviados à estação de controlo principal.

A estação de controlo principal (MCS - *Master Control Station*), localizada em Colorado Springs, é responsável pela gestão e controlo da constelação GPS e pelo processamento dos dados obtidos pelas estações monitoras, a partir dos quais são geradas as efemérides, parâmetros ionosféricos e informação de tempo a injectar nos satélites GPS. Esta informação é enviada periodicamente às estações de transmissão (Kwajalein, Diego Garcia e Ascension), que são responsáveis pela injeção desses dados nos satélites.

Segmento do Utilizador

O segmento do utilizador é constituído pelos receptores GPS, que recebem, decodificam e processam os sinais enviados pelos satélites, para calcular a posição e velocidade do utilizador e o tempo. Existe uma grande variedade de antenas e receptores GPS (em estrutura, modo de funcionamento e ... preço), dependendo do tipo de aplicação a que se destinam (navegação, sistemas de informação geográfica, transferência de tempo, geodesia, etc.).

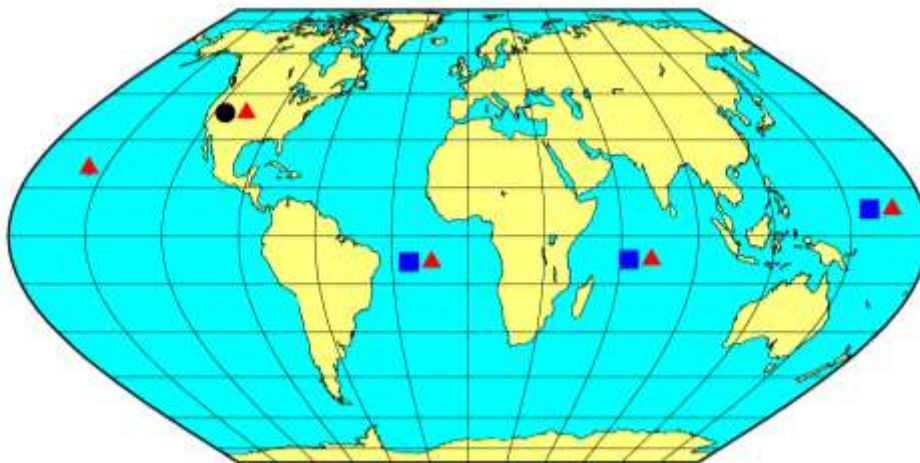


Figura 2 – O segmento de controlo GPS (● – Estação de controlo principal, ▲ – estação monitora, □ – Estação de transmissão)

SINAL GPS - O LEGADO

O sinal GPS é constituído por diversos elementos: ondas portadoras, códigos e dados.

As **ondas portadoras**, sobre as quais são modulados os códigos, são conhecidas como L1 (de *Link 1*) e L2 (de *Link 2*), com frequências 1575.42 MHz e 1227.60 MHz, respectivamente. Ambas as frequências são derivadas de uma frequência fundamental de 10.23 MHz.

Para comunicações com as estações monitoras e de injeção de dados são ainda usadas as frequências 1783.74 MHz e 2227.5 MHz; uma outra frequência, L3, de 1381.05 MHz, é usada para fins militares (detecção de detonações nucleares, em violação do Tratado de Proibição Completa de Ensaio Nucleares (CTBT)).

Os **códigos** têm características de ruído pseudo-aleatório (PRN), i.e., são sequências de zeros e uns, que parecem ter características aleatórias, mas que podem ser identificados sem ambiguidade pelo receptor.

As portadoras são ainda moduladas com uma mensagem de navegação (**dados**), que contém a informação necessária à determinação da posição do satélite.

Códigos GPS

O **código de aquisição livre** ou **C/A** (*C/A – Clear/Acquisition*) é um código PRN de 1023 bits (dígitos binários), gerado à taxa de 1.023 MHz (um décimo da frequência fundamental), com um período de 1 ms. A pequena extensão deste código permite ao receptor GPS sintonizar rapidamente com os diversos satélites e facilitar a transição para a aquisição do código P (bastante mais longo). Cada satélite GPS tem um código C/A próprio, seleccionado de um conjunto de códigos, conhecidos como *Gold*. Esta série de códigos é concebida de modo a minimizar a possibilidade de erro, por parte do receptor, na identificação do satélite. O código C/A é apenas transmitido em L1 (Figura 3).

O **código preciso** ou **protegido**, ou simplesmente **P** (*P – Precise/Protected*) é um código PRN de 2.34×10^{14} bits, gerado à taxa de 10.23 MHz (frequência fundamental), com um período de 267 dias de duração. Este código é dividido em segmentos de 7 dias de duração (reinicializados às 0 h de Domingo, na escala de tempo GPS), que são atribuídos aos diferentes satélites, de modo a que cada satélite possa ser identificado pelo seu código PRN. Usando uma técnica especial de multiplexagem por divisão de código (CDMA – *Code Division Multiple*

Access), é possível que todos os satélites compartilhem a mesma frequência. O código P é transmitido em L1 (em quadratura de fase com o código C/A, ou seja, separados 90° em fase) e L2 (Figura 3).

Mensagem de Navegação

Tanto a portadora 1575.42 MHz como a portadora 1227.60 MHz são continuamente moduladas com a **mensagem de navegação** (também conhecida como **código D**), uma sequência de 1500 bits, gerados à taxa de 50 Hz. A mensagem de navegação contém não só dados exclusivos do satélite que a transmite, mas também dados referentes a todos os restantes satélites.

A mensagem de navegação é constituída por 25 estruturas de 1500 bits, transmitidas à taxa de 50 Hz. Cada estrutura contém 5 subestruturas, formadas por 10 palavras de 30 bits (Figura 4).

A informação contida nas subestruturas 1 a 3 não muda, de uma forma geral, de uma estrutura para outra (e permite assim que o receptor receba informação específica do satélite em 30 s). Para as subestruturas 4 e 5, existe um total de 25 páginas diferentes, uma por cada estrutura.

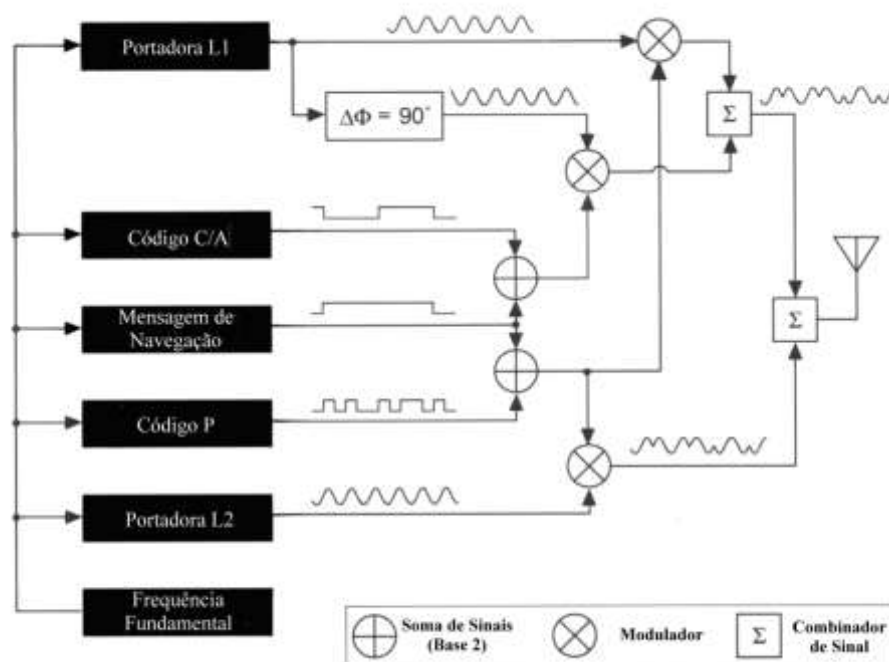


Figura 3 - Estrutura do sinal GPS (Adaptado de [Langley, 1990]).

Uma estrutura principal é constituída por 25 estruturas completas e contém toda a informação do número total de páginas das subestruturas 4 e 5, num total de 37500 bits.

A **subestrutura 1** contém os coeficientes de correcção ao relógio do satélite, o número da semana GPS, a época a que se referem os dados transmitidos e diversos parâmetros, que permitem avaliar a qualidade do sinal recebido.

As **subestruturas 2 e 3** contêm as efemérides radiodifundidas, que permitem o cálculo das coordenadas do satélite.

A **subestrutura 4** contém o almanaque (descrição aproximada de órbitas) para os satélites 25 a 32, dados necessários para um modelo de correcção ionosférica, dados UTC, configuração dos satélites (para um máximo de 32 satélites) e o estado de funcionamento dos satélites 25 a 32.

A **subestrutura 5** contém o almanaque e estado de funcionamento dos satélites 1 a 24.

Cada subestrutura é iniciada por duas palavras: **TLM** (*TeLeMetry*) e **HOW** (*Hand-Over Word*).

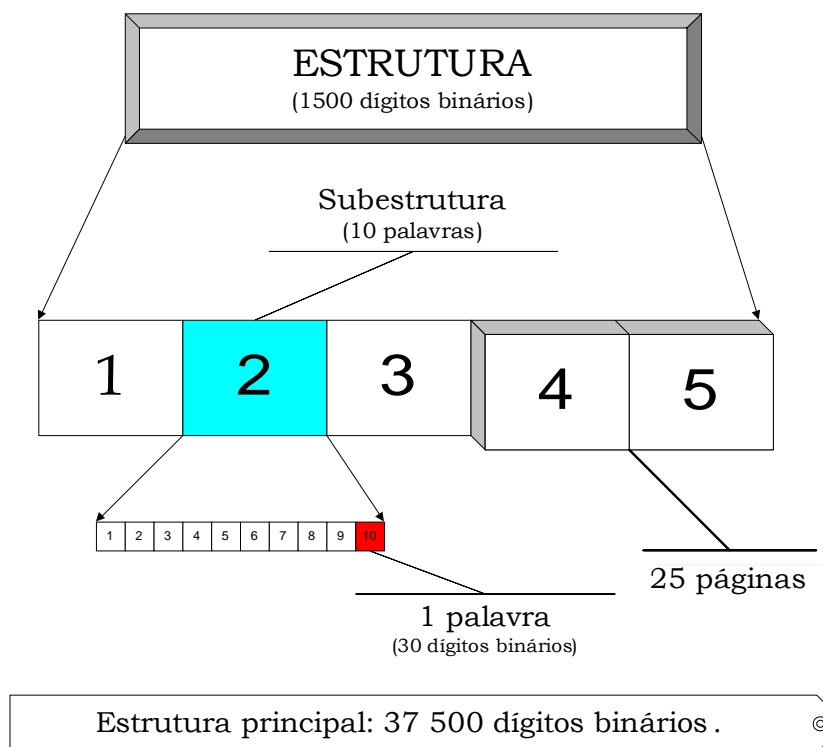


Figura 4 - Estrutura da mensagem de navegação.

A palavra HOW contém um número que, quando multiplicado por 4, dá a **contagem-Z** (*Z-count*) da próxima subestrutura. A contagem-Z é o número de repetições de um código X1, decorridas desde o início da semana GPS. Este código X1 é um código construído sobre o código P, de 1.5 s de duração (15345000 bits). A contagem-Z varia entre 0 e 403200; o conhecimento da contagem-Z permite uma mais fácil aquisição do código-P, pois limita a zona de pesquisa.

A palavra TLM contém um padrão fixo de sincronização de 8 bits e uma mensagem de diagnóstico de 14 bits, que nos permite saber quando certas operações, tais como injeção de dados no satélite, estão a ser realizadas.

Cálculo da posição dos satélites

As efemérides radiodifundidas usam um formato baseado nos elementos de órbita kepleriana e perturbações. Estas efemérides são baseadas numa órbita de referência determinada pela estação de controlo principal, com base nos dados de rastreio das estações monitoras. Os parâmetros difundidos na mensagem de navegação (e respectivas unidades, onde sc representa semi-círculos), dados em função de uma certa época de referência são:

M_0	anomalia média para a época de referência das efemérides (sc)
Δn	correção ao movimento médio calculado (sc/s)
e	excentricidade (adimensional)
\sqrt{a}	raiz quadrada do semi-eixo maior (\sqrt{m})
λ_0	longitude do nodo ascendente do plano da órbita (sc)
i_0	inclinação para a época de referência (sc)
ω	argumento do perigeu (sc)
$\dot{\Omega}_0$	variação da ascensão recta (sc/s)
\dot{i}	variação da inclinação (sc/s)
c_{us}, c_{uc}	correções ao argumento da latitude (rad)
c_{rs}, c_{rc}	correções ao raio da órbita (m)

c_{is}, c_{ic}	correções à inclinação (sc/s)
t_{oe}	tempo de referência das efemérides (s)

A partir da informação orbital radiodifundida na mensagem de navegação, a posição geocêntrica do satélite no WGS 84 é calculada usando o algoritmo seguinte [Van Dierendonck *et al.*, 1980; DoD, 2008]:

$GM = 3.986005 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$	constante gravitacional para o WGS 84
$\omega_e = 7.2921151467 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$	velocidade angular de rotação da terra
$a = (\sqrt{a})^2$	semi-eixo maior
$n = \sqrt{\frac{GM}{a^3}}$	movimento médio calculado
$t_k = t - t_{oe}$	tempo decorrido desde a época de referência
$n = n_o + \Delta n$	movimento médio corrigido
$M_k = M_o + n t_k$	anomalia média
$M_k = E_k - e \sin E_k$	cálculo da anomalia excêntrica (eq. Kepler)
$\sin f_k = \frac{\sqrt{1-e^2} \sin E_k}{1-e \cos E_k}$	
$\cos f_k = \frac{\cos E_k - e}{1-e \cos E_k}$	
$f_k = \tan^{-1} \left(\frac{\sin f_k}{\cos f_k} \right)$	anomalia verdadeira
$\Phi_k = f_k + \omega$	argumento de latitude calculado

$\delta u_k = c_{us} \sin(2\Phi_k) + c_{uc} \cos(2\Phi_k)$	correção ao argumento de latitude
$\delta r_k = c_{rs} \sin(2\Phi_k) + c_{rc} \cos(2\Phi_k)$	correção ao raio da órbita
$\delta i_k = c_{is} \sin(2\Phi_k) + c_{ic} \cos(2\Phi_k)$	correção à inclinação
$u_k = \Phi_k + \delta u_k$	argumento de latitude corrigido
$r_k = a(1 - e \cos E_k) + \delta r_k$	raio da órbita corrigido
$i_k = i_o + \delta i_k + \dot{i} t_k$	inclinação corrigida
$x'_k = r_k \cos u_k$	
$y'_k = r_k \sin u_k$	
$\mathbf{x}' = [x'_k \quad y'_k \quad 0]^T$	vector de posição do satélite no sistema de coordenadas orbital
$\lambda_k = \lambda_o + (\dot{\Omega} - \omega_e) t_k - \omega_e t_{oe}$	longitude do nodo ascendente corrigida
$x_k = x'_k \cos \lambda_k - y'_k \cos i_k \sin \lambda_k$	
$y_k = y'_k \sin \lambda_k + y'_k \cos i_k \cos \lambda_k$	
$z_k = y'_k \sin i_k$	
$\mathbf{x} = [x_k \quad y_k \quad z_k]^T$	vector de posição do satélite no sistema de coordenadas geocêntrico (WGS 84)

Neste algoritmo, t é o tempo GPS à época de transmissão, ou seja, corrigido do tempo de propagação. O valor de t_k deverá constituir o intervalo de tempo real entre a época t e a época t_{oe} e tem que considerar a transição entre semanas GPS. Assim, se t_k for superior (inferior) a 302400 s, dever-se-á subtrair (adicionar) 604800 s a t_k . De notar que o valor de GM foi modificado com a introdução do WGS84(G873), sendo o novo valor correspondente ao recomendado em McCarthy [1996].

Órbitas GPS Pós-Processadas

Para aplicações geodésicas mais exigentes e estudos de geodinâmica, a precisão fornecida pelas órbitas radiodifundidas não é, de uma forma geral, adequada. Como alternativa, a informação referente às órbitas dos satélites GPS pode ser determinada *a posteriori*. Para tal, são usados dados GPS recolhidos por uma rede global de estações, com coordenadas bem definidas (por técnicas independentes), para gerar órbitas pós-processadas (usualmente designadas por órbitas de precisão). Uma das instituições que regularmente faz a determinação de órbitas de alta precisão é o Serviço GNSS Internacional (IGS – *International GNSS Service* (Figura 5)), que opera em cooperação com o IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*). Estas órbitas são disponibilizadas gratuitamente à comunidade científica.



The International **GNSS** Service (IGS), formerly the International GPS Service, is a voluntary federation of more than 200 worldwide agencies that pool resources and permanent GPS & GLONASS station data to generate precise GPS & GLONASS products. The IGS is committed to providing the highest quality data and products as the standard for Global Navigation Satellite Systems (GNSS) in support of Earth science research, multidisciplinary applications, and education. Currently the IGS includes two GNSS, GPS and the Russian GLONASS, and intends to incorporate future GNSS. You can think of the IGS as the highest-precision international civilian GPS community.

Figura 5– Página internet do IGS (<http://igs.jpl.nasa.gov>).

SERVIÇOS DE POSICIONAMENTO GPS

O DoD dos EUA proporciona aos utilizadores dois tipos de serviços: o serviço de posicionamento padrão (SPS – *Standard Positioning Service*) e o serviço de posicionamento preciso (PPS – *Precise Positioning Service*).

O SPS é um serviço de posicionamento e tempo obtido a partir de sinais radiodifundidos na frequência GPS L1. A frequência L1, transmitida por todos os satélites, contém um código (C/A), com uma mensagem de dados de navegação, que está disponível para utilização civil, comercial e científica pacífica [DoD, 2008].

O SPS opera apenas em L1 e é usado na aquisição inicial dos sinais do satélite, através da sintonização do código C/A. Este tipo de serviço está disponível continuamente e a nível mundial. Inicialmente concebido para proporcionar navegação em tempo real com uma exactidão muito inferior à proporcionada pelo PPS, verificou-se que os receptores usando apenas o código C/A proporcionavam posicionamento com uma precisão próxima dos que usavam o código P. Como resultado, o DoD implementou uma técnica que permite limitar a precisão do sistema: **acesso selectivo (disponibilidade selectiva)** (SA – *Selective Availability*). O SA é utilizado para reduzir a precisão da informação GPS (posição, velocidade e tempo), através da introdução de erros pseudo-aleatórios no relógio do satélite (**processo δ**) e da degradação das efemérides radiodifundidas (**processo ϵ**). O acesso selectivo esteve em vigor continuamente desde 15 de Novembro de 1991, embora tivesse sido usado diversas vezes em períodos anteriores. Com a implementação do SA, a incerteza proporcionada aos utilizadores não autorizados era de 100 m para o posicionamento horizontal, 156 m para o posicionamento vertical e 340 ns na transferência de tempo para UTC, para um nível de confiança de 95%. O acesso selectivo foi desactivado (a título definitivo) em 1 de Maio de 2000. Após a desactivação do SA, os níveis de incerteza são actualmente inferiores a 9 m, 15 m, e 40 ns, para o posicionamento horizontal, vertical e transferência de tempo, respectivamente (para um nível de confiança de 95%).

O PPS é um serviço de posicionamento e tempo obtido a partir de acesso autorizado a sinais radiodifundidos nas frequências GPS L1 e L2. A frequência L1, transmitida por todos os satélites, contém um código (C/A), com uma mensagem de dados de navegação, que está disponível para utilização civil, comercial e científica pacífica, e um código preciso (P) com uma mensagem de dados de navegação, que é reservado para uso autorizado. O código P será normalmente criptograficamente alterado para o código Y. O código Y não estará disponível aos utilizadores que não disponham de chaves criptográficas válidas. Os satélites Navstar transmitem

igualmente um segundo sinal P ou Y (P(Y)) com uma mensagem de dados de navegação na frequência L2. A mensagem dos dados de navegação é idêntica para todos os códigos e frequências, mas algumas partes da mensagem dos dados de navegação estarão normalmente alteradas criptograficamente, de modo a que não esteja disponível aos utilizadores que não disponham de chaves criptográficas válidas.

Os utilizadores PPS autorizados com chaves criptográficas válidas podem aceder a qualquer combinação de frequências, códigos e mensagem de dados de navegação disponíveis, em função das suas necessidades de missão individual ou limitações de equipamento. Assim, existem alguns utilizadores PPS que apenas acedem à frequência L1, outros que apenas operam com o código C/A, e outros que não acedem às porções criptograficamente alteradas da mensagem com os dados de navegação [DoD, 2007].

O PPS opera em ambas frequências e usa o código P, permitindo uma maior precisão no posicionamento. O PPS é utilizado essencialmente para fins militares e o acesso a este serviço é controlado através de uma técnica criptográfica, denominada **anti-mistificação** (AS – *Anti-Spoofing*). A técnica AS impede que os receptores GPS sejam enganados por sinais falsos. No entanto, também impede que os utilizadores não autorizados façam medições directas em L2. Esta técnica foi activada às 0^h UT do dia 31 de Janeiro de 1994 e permanece em operação contínua desde essa data, afectando todos os satélites da actual constelação (Bloco II e seguintes). Em condições de AS, o código P é substituído por um código Y (de características semelhantes ao código P e designado por P(Y)); para aceder a este código é necessário conhecer a chave criptográfica, desvendada apenas aos utilizadores autorizados (estes utilizadores podem também eliminar os efeitos nocivos do SA de forma idêntica). A precisão proporcionada pelo PPS é semelhante à obtida actualmente pelo serviço SPS.

A MODERNIZAÇÃO DO GPS

O sucesso do GPS é evidente, mas isso também fez com que os utilizadores se tornassem mais exigentes, em particular nas áreas da navegação. Mas há outras razões que levaram à necessidade de modernizar o GPS, tais como: (1) renovar a constelação GPS (esta sofre alguma degradação e existe mesmo alguma preocupação que venha a ter problemas a partir de 2012), de forma a incorporar os mais recentes avanços tecnológicos; (2) proporcionar sinais com maior potência; (3) responder à ameaça dos novos sistemas globais de navegação por satélite (GNSS), como o sistema europeu Galileo ou sistema russo GLONASS. Este plano de modernização abrange também o segmento de controlo. No âmbito

do segmento espacial, a modernização do GPS passa pela criação de novos sinais (de uso civil e militar), que irão proporcionar: redundância, robustez contra interferências (intencionais ou não), maior disponibilidade do sinal militar em ambientes empastelados, maior exactidão e precisão (no posicionamento, navegação e tempo) e maior integridade e interoperabilidade com outros GNSS. Esta interoperabilidade terá vantagens evidentes, uma vez que permite ter uma verdadeira rede global, com a possível utilização simultânea de todos os GNSS por um único receptor. A modernização irá garantir a retrocompatibilidade com o sinal anterior, possibilitando a utilização dos receptores mais antigos.

Sinal GPS modernizado

O sinal GPS modernizado irá incluir novas portadoras e novos códigos, com as características básicas que são apresentadas nesta secção.

L2C

Trata-se de um novo sinal para os utilizadores civis, modulado na portadora L2. Tem como objectivo melhorar a navegação (proporcionar melhor exactidão) e funcionar como um sinal redundante em casos de interferências localizadas, sendo interoperável com o QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*), em desenvolvimento no Japão. Este aperfeiçoamento na navegação é uma consequência da minimização do efeito da ionosfera, através da combinação das duas frequências, como acontece com o PPS, mas direccionado para receptores menos dispendiosos. No entanto, quando usado isoladamente, a incerteza na posição é significativamente pior do que a proporcionada pelo sinal L1 (cerca de 65%). Este sinal está disponível nos satélites lançados após Setembro de 2005.

Ao contrário do código C/A, o L2C consiste em dois códigos PRN distintos, o **código civil moderado** (CM - *Civilian Moderate*) e o **código civil longo** (CL - *Civilian Long*).

O código CM é constituído por 10230 bits, sendo transmitido à taxa de 511 500 Hz, com um período de 20 ms. O código CL é transmitido à mesma taxa, com um período de 1500 ms, resultando num total de 767 250 bits. Estes sinais são transmitidos usando multiplexagem, formando um sinal com 1 023 000 Hz.

O código CM é modulado com a mensagem de navegação, enquanto que o código CL é um sinal piloto (sem dados), tendo como vantagem o facto de ter mais potência.

Código M

O processo de modernização do GPS inclui também um novo código militar, denominado **código M** (*Militar code* ou *M-code*), que visa melhorar as capacidades de anti-mistificação e acesso seguro aos sinais GPS militares. Ao contrário do código P(Y), o código M foi concebido para ser um código autónomo, permitindo o cálculo da posição sem outra informação adicional (no caso do código P(Y), a sintonização do código P(Y) só acontece após a sintonização inicial do código C/A). O código M é transmitido à taxa de 5.115 MHz e é transmitido em L1 e L2.

O código M foi concebido para ser transmitido usando uma antena direccionada de alto ganho (chamada de *spot beam*), direccionada para uma região específica (cobertura com um diâmetro de várias centenas de quilómetros), com subsequente aumento da potência do sinal. Estas antenas direccionais irão equipar os satélites do Bloco III (a lançar não antes de 2014).

L5

O sinal L5, também denominado de Segurança de Vida (*Safety of Life*), é usado para os serviços de segurança de transporte. O sinal é constituído por dois códigos PRN, transmitidos na portadora L5 (1176.45 MHz): o **código I5**, transmitido em fase, e o **código Q5**, transmitido em quadratura de fase. São constituídos por 10230 bits, transmitidos à taxa de 10.23 MHz (período de 1 ms). A banda atribuída faz parte do Serviço de Radionavegação Aeronáutica. Este sinal é compatível com outros GNSS (Galileo, GLONASS e QZSS). É transmitido com uma maior potência do que os sinais civis actuais, ocupa uma maior largura de banda, tem uma melhor resistência a interferências e uma melhor recepção em utilização em ambientes com má recepção de sinal, dada a menor frequência da portadora. Este sinal está disponível desde 2010.

L1C

Trata-se de um sinal de utilização civil a transmitir na portadora L1. Tal como no caso do sinal L2C, terá um sinal piloto para melhorar a sintonização e um código modulado. O código PRN é constituído por 10230 bits, gerado à taxa de 1.023 MHz. A implementação do L1C será feita de forma a assegurar retrocompatibilidade com o actual sinal em L1. Estará provavelmente disponível a partir de 2014 e proporcionará uma melhor interoperabilidade e compatibilidade com o sinal L1 do Galileo.

Mensagem de navegação modernizada

A mensagem de navegação modernizada (CNAV) inclui um processo de correcção de erros na mensagem de navegação (FEC – *Forward Error Correction*). O FEC tem como objectivo melhorar a robustez do sinal e minimizar o impacto negativo (e considerável) das pequenas interrupções na transmissão da mensagem de navegação, que é feita com uma baixa frequência (50 Hz).

Os dados CNAV constituem uma versão melhorada da mensagem de navegação original, contendo uma representação com maior precisão e com dados mais exactos do que a mensagem de navegação tradicional. Embora mantendo o mesmo tipo de informação, existe uma mudança de arquitectura, passando a ser utilizado um formato de “pseudo-pacotização”. A CNAV é constituída por pacotes de mensagens de 12 s e 300 bits, em vez das estruturas/subestruturas.

Com o formato CNAV, 2 em cada 4 pacotes são dados de efemérides e pelo menos um em cada 4 pacotes contém dados dos relógios. O sistema tem capacidade para definir novos tipos de pacotes no futuro, incorporando novos desenvolvimentos que venham a surgir. Algumas das novidades inerentes à CNAV são:

- 1) Utilização de FEC;
- 2) O número da semana GPS é agora representado com 13 bits, correspondendo a 8192 semanas (o contador só será reinicializado em 2137);
- 3) Existe um pacote que contém os enviesamentos de tempo entre o GPS e os outros GNSS, permitindo uma interoperabilidade com outros sistemas globais de transferência de tempo;
- 4) Tem capacidade para disponibilizar dados para uma constelação com um máximo de 63 satélites (o tipo de mensagem anterior permite apenas uma constelação com um máximo de 32 satélites)

Os dados enviados na mensagem de navegação descrevem a órbita do satélite em questão ajustada a um intervalo de 3 horas. Em regra o intervalo de transmissão é de 2 horas e deverá coincidir com as primeiras duas horas desse intervalo. O algoritmo para obter a posição do satélite é semelhante ao utilizado na mensagem de navegação da geração anterior, com ligeiras modificações.

Tipos de mensagens

Nesta secção são descritos os conteúdos para alguns tipos de mensagens.

Mensagem tipo 10 e 11 – Efemérides, informação sobre o estado de funcionamento dos satélites (“saúde”), semana GPS, qualidade da informação de cada satélite.

A semana GPS refere-se ao início do intervalo de transmissão dos dados.

Mensagem tipo 15 – Texto

Permite a difusão de mensagens de texto.

Mensagem tipo 30 – Relógios, ionosfera e atraso de grupo.

Existe informação sobre os relógios dos satélites (em rigor são coeficientes para o modelo de correcção dos relógios, mas é habitual designar esta informação simplesmente como relógios) nas mensagens dos tipos 30 a 37, que descrevem a escala de tempo de cada um deles, para o período de validade da mensagem.

Mensagem tipo 31 – (Relógios e) almanaque reduzido.

Existem dois tipos de almanaques: Midi e reduzido. Os dados do almanaque reduzido são um subconjunto dos dados do almanaque e proporcionam efemérides menos precisas. O satélite deve transmitir as mensagens do tipo 31 (e/ou 12) e tipo 37, que dizem respeito aos almanaques. Os parâmetros do almanaque reduzido para o conjunto completo de SVs na constelação são transmitidos com um intervalo de tempo mais curto nas mensagens do tipo 31 e/ou 12.

Mensagem tipo 32 – (Relógios e) parâmetros de orientação da Terra.

Os parâmetros de orientação da Terra (EOP) permitem efectuar a transformação entre um sistema cartesiano geocêntrico e um sistema inercial (tomando em consideração fenómenos como a precessão, a nutação e o movimento do pólo).

Mensagem tipo 33 – (Relógios e) UTC.

Os dados desta mensagem permitem relacionar o tempo GPS com o tempo universal coordenado mantido pelo Observatório Naval dos EUA, UTC(USNO).

Mensagem tipo 35 – (Relógios e) GGTO.

Contém os parâmetros que permitem relacionar a escala de tempo GPS com as escalas de tempo de outros GNSS (GGTO - *GPS/GNSS Time Offset*).

Mensagem tipo 36 – (Relógios e) texto

Permite a difusão de mensagens de texto.

Mensagem tipo 37 – (Relógios e) almanaque Midi.

Difusão do almanaque mais completo (Midi).

Segmento de Controlo Modernizado

A evolução no Segmento de Controlo é uma necessidade decorrente do processo de modernização que se regista no Segmento Espacial. As funcionalidades básicas deste segmento compreendem os serviços de comando, controlo e de manutenção do segmento espacial, para apoio não só aos serviços de posicionamento, navegação e tempo (PNT), mas também ao sistema de detecção de detonações nucleares (NDS - *Nuclear Detonation (NUDET) Detection System*).

A modernização do segmento de controlo é constituída por duas fases.

A primeira fase é designada por AEP (*Architecture Evolution Plan*) e teve início em 2007. Caracteriza-se por uma substituição dos sistemas informáticos (*mainframes* existentes desde a década de 1970), aumento da capacidade de vigilância dos sinais GPS e aumento das capacidades de comando. São incorporadas novas estações monitoras (que proporcionam maior visibilidade da constelação e maior exactidão no cálculo das órbitas) e uma estação de controlo principal alternativa (AMCS - *Alternate Master Control Station*). São criados novos serviços, como o GSS (*GPS System Simulator*), o LADO (*Launch Early Orbit Anomaly and Disposal Operations*) e o IMOSC (*Integrated Mission Operations Support Center*). Esta fase permite uma gestão eficaz dos satélites das gerações mais recentes (Blocos IIR, IIR-M e IIF).

O contrato para o desenvolvimento da segunda fase de modernização do Segmento de Controlo foi estabelecido em Fevereiro de 2010 (o valor do contrato é de ~1.5 mil milhões de dólares). Esta fase é designada por OCX (*Next Generation Operational Control Segment* ou *GPS III Operational Control Segment*).

O OCX irá manter a retrocompatibilidade com a constelação de satélites dos Blocos IIR e IIR-M, assegurar novas capacidades associadas aos blocos mais recentes e facilitar a inclusão de futuros blocos, com novas funcionalidades, tais como novos sinais ou técnicas de guerra electrónica aplicada à navegação moderna (*Navwar* ou *Navigation Warfare*).

Os principais subsistemas do OCX são o TT&C (*Telemetry, Tracking, Commanding*), comum a todos os SVs, TT&C específicos para um dado SV, planeamento de missões (incluindo as de apoio a *Navwar*) e missões de navegação. O OCX terá capacidade para monitorizar todos os sinais GPS, controlar de forma mais eficaz a constelação GPS, e lidar com sistemas de envio de mensagens modernizado.

Evolução da Constelação GPS

Como já foi referido, o segmento espacial é constituído por várias gerações de satélites (Figura 6), designados por blocos, com diferentes funcionalidades. Os satélites do Bloco I, Bloco II e Bloco IIA foram desenvolvidos pela *Rockwell International*. Os satélites do Bloco IIR foram desenvolvidos pela *Lockheed Martin*, que terá também a responsabilidade do desenvolvimento dos satélites do Bloco III (contrato recente no valor de 3 mil milhões de dólares). Os satélites do Bloco IIF são da responsabilidade da *Boeing*.

Bloco I

Os satélites do Bloco I (satélites de desenvolvimento) foram usados durante o período de investigação e desenvolvimento inicial do sistema e têm SVN's inferiores a 11. Foram lançados entre 1978 e 1985 e estão todos desactivados (o SVN 10 foi o último satélite deste bloco, tendo cessado a sua actividade em Novembro de 1995). Concebidos para operarem durante 5 anos, alguns destes satélites mantiveram-se activos por um período muito superior (o SVN 3, por exemplo, esteve operacional durante mais de 10 anos). Os satélites do Bloco I transportavam um relógio de Césio e dois de Rubídio e podiam assegurar serviço de posicionamento durante 3-4 dias, sem intervenção do segmento de controlo.

Bloco II

Os satélites do Bloco II foram lançados entre 1989 e 1990 e têm SVN's 13 a 21. Os satélites desta série são mais pesados e electronicamente mais robustos do que os da geração anterior; foram concebidos de modo a assegurar serviço de posicionamento durante 14 dias, sem intervenção do segmento de controlo.

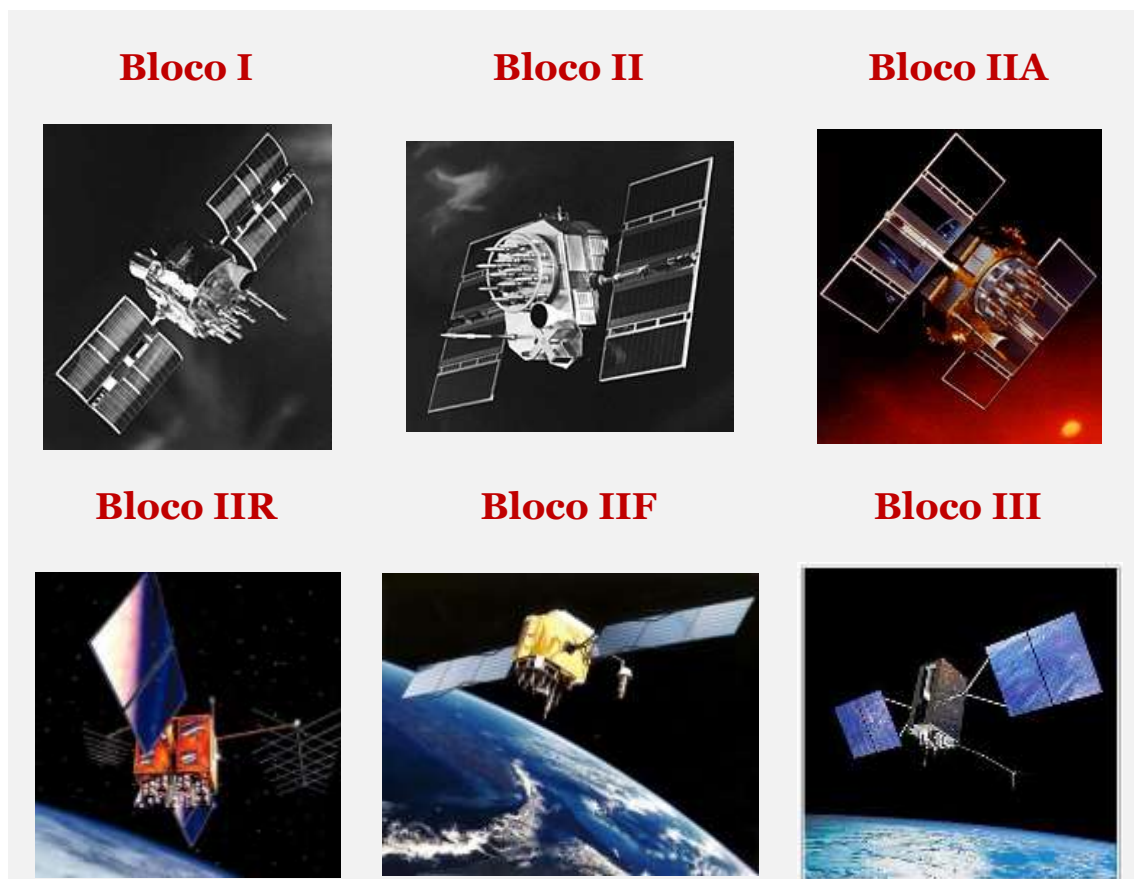


Figura 6 – As diferentes gerações de satélites GPS.

Bloco IIA

A série Bloco IIA (A de *Augmentation*) é constituída pelos SVN's 22 a 40. Foram lançados entre 1990 e 1997 e podiam operar durante 60 dias sem necessidade de intervenção do segmento de controlo (embora com alguma perda de qualidade do serviço de posicionamento).

Os satélites do Bloco II e Bloco IIA transportavam dois relógios de Césio e dois relógios de Rubídio e tinham um tempo de vida esperado de 7.3 anos. Têm capacidade de operar em modo de acesso selectivo e anti-mistificação.

Bloco IIR

Os satélites do Bloco IIR (R de *Replenishment*) têm SVN's 41 a 61. Têm a capacidade de navegar autonomamente e de gerar, se necessário, mensagens de navegação próprias, utilizando para isso as suas capacidades de comunicação e de trilateração entre os diversos satélites desta série. Tal facto permite-lhes assegurar o serviço de posicionamento sem degradação significativa e sem intervenção do segmento de controlo durante 60 dias (*modo Autonav*),

melhorando assim a fiabilidade e integridade do sistema. Em situações normais, estes satélites oferecem serviço de posicionamento sem intervenção do segmento de controlo durante 14 dias (*modo Bloco IIA*). Outras características inovadoras nos satélites do Bloco IIR são a capacidade de reprogramação dos seus microprocessadores e a manutenção de dois relógios atómicos em funcionamento simultâneo. Cada satélite desta série transporta um relógio de Césio e dois relógios de Rubídio e têm um tempo de vida esperado de 7.8 anos. Tal como os satélites da geração anterior, têm capacidade de operar em modo de acesso selectivo e anti-mistificação e podem detectar automaticamente algumas anomalias e adoptar procedimentos que impedem, por exemplo, que o utilizador sintonize satélites com problemas.

O primeiro satélite do Bloco IIR foi lançado em 17 Janeiro de 1997, mas sem sucesso, devido à explosão do foguetão de transporte (Delta II).

Bloco IIR-M

Trata-se de um sub-conjunto de satélites do Bloco IIR que foram modernizados (daí o M de *Modernized*), lançados entre Setembro de 2005 e Agosto de 2009. Os satélites deste bloco transmitem o sinal L2C na frequência L2 e os códigos militares M, em L1 e L2. O SVN 49 (GPS IIR-M) transmite ainda a frequência L5, para efeitos de teste.

Bloco IIF

Os satélites do Bloco IIF têm SVNs 62 a 73 constituem o primeiro bloco de satélites a transmitir o sinal civil L5. O primeiro satélite deste bloco foi (SVN62) foi lançado em 28 de Maio de 2010. Os satélites IIF proporcionam um mínimo de 60 dias de serviço de posicionamento sem intervenção do Segmento de Controlo. Outros benefícios destes satélites são o maior tempo de vida (12 anos) e maiores capacidades computacionais (processadores e memória).

Bloco III

Os satélites do Bloco III têm SVNs 74 a 81 e constituem o primeiro bloco a transmitir o sinal L1C. Proporcionam um mínimo de 60 dias de serviço de posicionamento sem intervenção do Segmento de Controlo. O Bloco III proporciona serviços de posicionamento e tempo melhorados em resultado de uma esperada actualização mais frequente das efemérides e relógios dos satélites. O primeiro satélite deste bloco foi lançado em Dezembro de 2018.

Em Março de 2022, a constelação GPS era constituída por 7 SVs IIR, 7 SVs IIR-M, 12 SVs IIF (Figura 7) e 5 SVs III, num total de 31 satélites. O último lançamento ocorreu em 17 de Junho de 2021 (Figura 7). O NAVCEN mantém informação da situação actual da constelação GPS (<https://www.navcen.uscg.gov>).



Figura 7 – Detalhe e lançamento do satélite GPS III-SV05.