

O SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GPS) E SUAS APLICAÇÕES

Prof. Dr. Sérgio M. Paz e Prof. Dr. Carlos E. Cugnasca

1. A Ciência da Navegação

1.1 A navegação na pré-história

Tão antiga quanto a presença do Ser Humano na Terra é a noção de espaço, de posição. Movido pelo instinto de sobrevivência, o Homem Primitivo descobre que há um espaço onde ele pode se resguardar das intempéries do clima -- uma caverna, por exemplo (Paz, 1997). Esse espaço, porém, não é o mais adequado para obter alimentos. Ainda movido pelo instinto de sobrevivência, o "Homem das Cavernas" sai em busca de comida, vagando por espaços desconhecidos... até que encontra uma árvore carregada de frutas, ou um lago cheio de peixes.

Saciado em seu apetite, novamente ele precisa de um abrigo. Ele poderia, portanto, sair vagando, em busca de outra caverna. Mas o Homem é um ser social; há outros companheiros com os quais convive; alguns deles não saíram em busca de alimentos, e esperam que ele lhes leve uma fruta ou um peixe para comer. Além disso, se aquela caverna em que estava lhe servia para suas necessidades, por que correr o risco de não encontrar outra antes que a chuva ou o frio voltem?

Nosso personagem precisa retornar à sua caverna. Felizmente, além de instintos, ele tem memória e inteligência. Durante o caminho de ida, ele notou peculiaridades: uma árvore mais alta, um tronco mais retorcido, uma pedra mais azulada, uma distante montanha à direita... Esses pontos lhe servem, agora, de referência, e o orientam de volta para "casa".

Mais tarde, ele sentirá fome novamente. Outras vezes, ele sairá de sua caverna, em busca de frutas ou peixes. Algumas vezes, ele voltará àquela mesma árvore frutífera, ou àquele mesmo lago, seguindo as mesmas referências de antes: a árvore alta, o tronco retorcido, a pedra azul, a montanha. Em outras vezes, ele procurará novas frutas e novos peixes, e descobrirá novos caminhos, com novas referências.

Um dia, um raio derruba a árvore alta... Outro dia, ele encontra um outro tronco retorcido, muito parecido com o primeiro... Outro dia, ele erra a sua estimativa da distância à montanha... Outro dia, com tantos caminhos já aprendidos, sua memória falha, e ele se esquece do caminho original.

Nosso amigo tem problemas!

Mas ele tem, também, a inteligência para resolvê-los! Ele pensa: "Árvores altas, às vezes caem. Troncos retorcidos, se parecem. É difícil avaliar a distância correta a montanhas distantes. Já aquela pedra azul, está sempre ali, no mesmo lugar, facilmente identificável. Talvez eu deva procurar outras pedras que me orientem melhor... ou, se não as encontrar, eu mesmo irei colocá-las em meu caminho, de outras formas e cores, no lugar da árvore, ou do tronco, ou na direção da montanha... onde eu quiser! Para não me confundir, farei um desenho, no qual incluirei as principais referências que me levam às árvores com frutas e aos lagos com peixes. Esse desenho, não só será útil a mim, mas também a meus companheiros, quando eu não puder mais fazer esse caminho!"

Essa história tão simples vem se repetindo há milhares de anos. Muitas pedras azuis foram encontradas, e outras tantas colocadas, marcando caminhos a serem seguidos, de modo cada vez mais preciso e confiável. Muitos desenhos foram feitos, descrevendo esses caminhos, facilitando para os que os trilharam depois de seu descobridor. Neste início do terceiro milênio, essas pedras e esses desenhos estão tão sofisticados quanto precisos.

1.2 Evolução da navegação

Como nosso amigo das cavernas, caminhando passo a passo, aos poucos foi ocorrendo o desenvolvimento dessa ciência chamada navegação.

À medida em que iam sendo descobertos, os caminhos se tornavam cada vez mais longos. Primeiro, a melhoria da postura fez o Homem caminhar ereto, tornando-o capaz de ir mais longe. Então, ele encontrou a água -- o que não é nenhuma surpresa, pois ela cobre cerca de 2/3 de nosso planeta -- e percebeu que ali podia se locomover melhor.

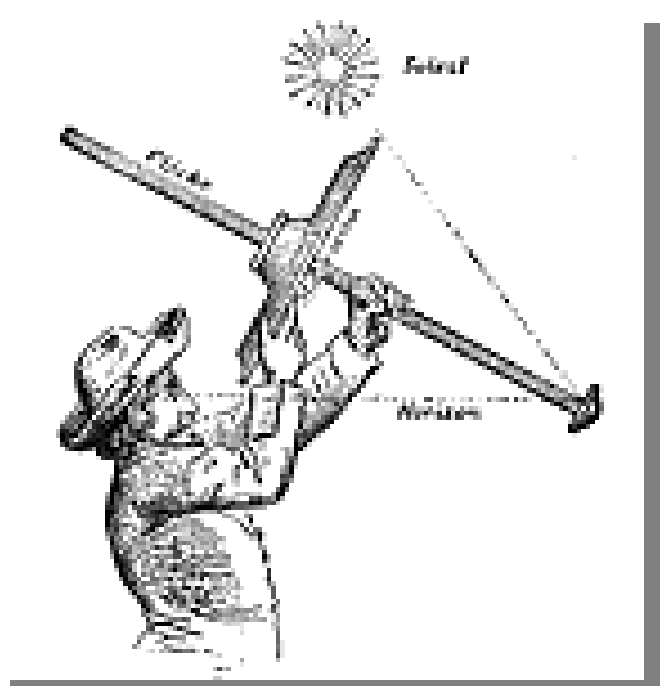
A princípio, a navegação se fez nos rios, de forma empírica. A orientação era dada por referências que se podiam avistar nas margens. O passo seguinte foi a navegação marítima, primeiramente costeira, e, depois, oceânica.

Eis, aqui, um grande salto. Na navegação costeira, ainda é possível a orientação através de pontos avistados em terra. Para facilitar, algumas “pedras” iam sendo colocadas, como os faróis (o famoso Farol de Alexandria, por exemplo, é de 299 a.C.). Mas, em alto mar, não era possível se ver pedra, tronco, árvore... nem mesmo montanha! Foi, então, que o Homem olhou para cima, para o céu, e viu ali outras pedras: os astros!

Há vários registros de povos que, na antigüidade, tinham bom conhecimento de astronomia, o que lhes permitia uma razoável orientação pelos astros. Graças a isso, alguns povos se aventuraram pelos oceanos e produziram cartas e livros de navegação. Surgiram, nessa época, os primeiros instrumentos para a navegação astronômica, como um precursor do astrolábio, construído pelo astrônomo grego Hiparco (século II a.C.).

No início da idade média, a navegação estacionou, ou mesmo regrediu. O isolamento dos feudos, auto-suficientes, desestimulou as grandes viagens. As poucas viagens empreendidas por alguns povos bárbaros eram feitas de maneira ainda empírica.

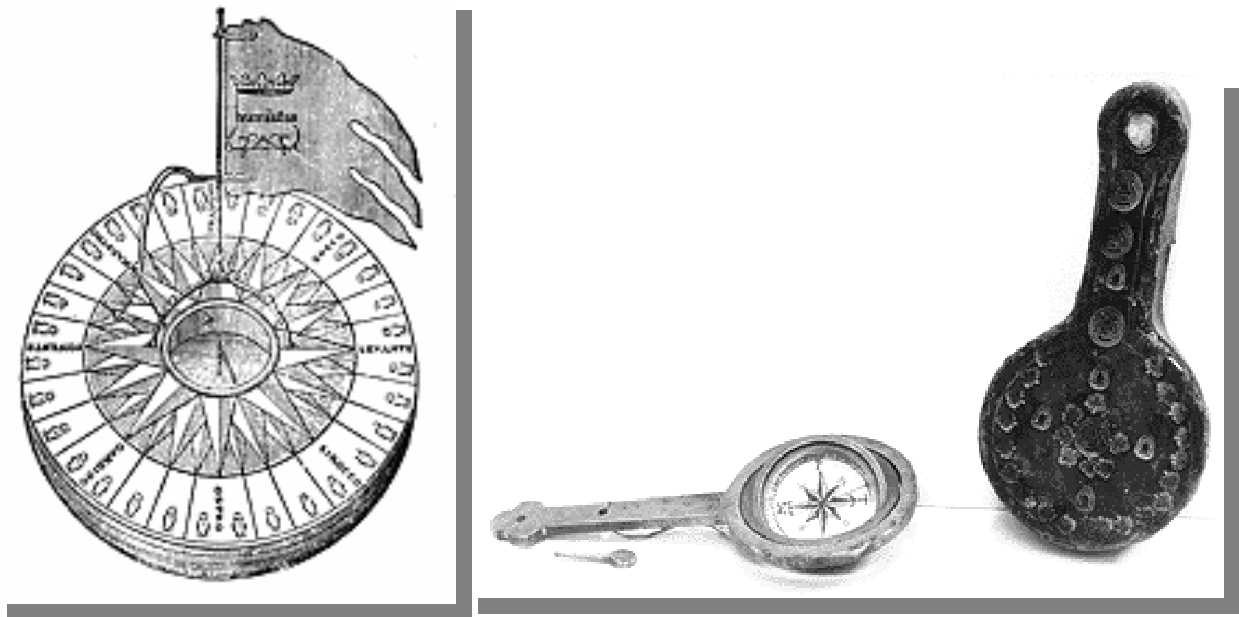
A esse tempo, já se conhecia uma excelente referência, uma verdadeira “pedra azul” para os povos europeus: a estrela Polar, uma das estrelas da constelação da Ursa Menor, que é uma estrela fixa sobre o pólo norte. Mas essa “pedra” tem lá seus problemas: não pode ser vista durante o dia, nem nas noites nubladas e nebulosas. Além disso, ela também não poderia ser avistada do Hemisfério Sul, no dia em que os navegadores cruzassem o Equador.



antigos instrumentos de medição da altura de estrelas

Uma outra “pedra azul” sempre esteve disponível, 24 horas por dia, sob qualquer condição meteorológica, em quase toda a superfície da Terra, mas faltava um instrumento que pudesse enxergá-la: o magnetismo do pólo norte. Esse instrumento, a bússola, de provável origem chinesa, iria chegar à Europa somente por volta do ano 1000, tornando-se extremamente popular entre os navegadores a partir do século XIII. Nela, uma agulha imantada, flutuando numa tigela com água, aponta sempre para o norte da Terra.

A bússola, os portulanos (roteiros descritivos de viagens) e as cartas náuticas (primitivos mapas) acabaram dando novo impulso à navegação. Talvez pela sua peculiar posição geográfica, coube a Portugal o papel de centro de estudos e de avanços tecnológicos. A Escola de Sagres, criada pelo Infante Dom Henrique no início do século XV, reuniu cientistas e navegadores de toda a Europa, dando grande impulso à exploração portuguesa do Oceano Atlântico.



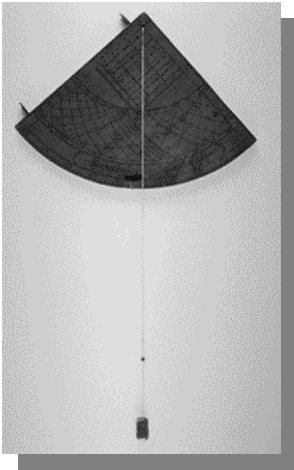
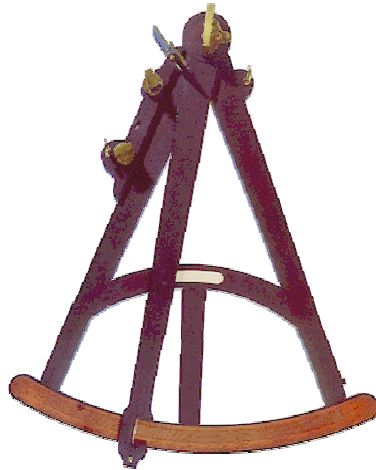
diferentes modelos de bússolas

1.3 Determinação das coordenadas geográficas

A bússola, tal qual o uso da estrela Polar na antigüidade, fornecia a direção a ser seguida, mas não era capaz de dar a posição da nau. No final da idade média, a determinação da posição de um ponto na superfície terrestre ainda era um grande desafio à ciência. Para se chegar a ela, era necessário, antes, que se definisse um sistema de coordenadas e um ponto de origem. Com o aprofundamento do conhecimento da geometria terrestre, foram criados os conceitos de latitude e de longitude.

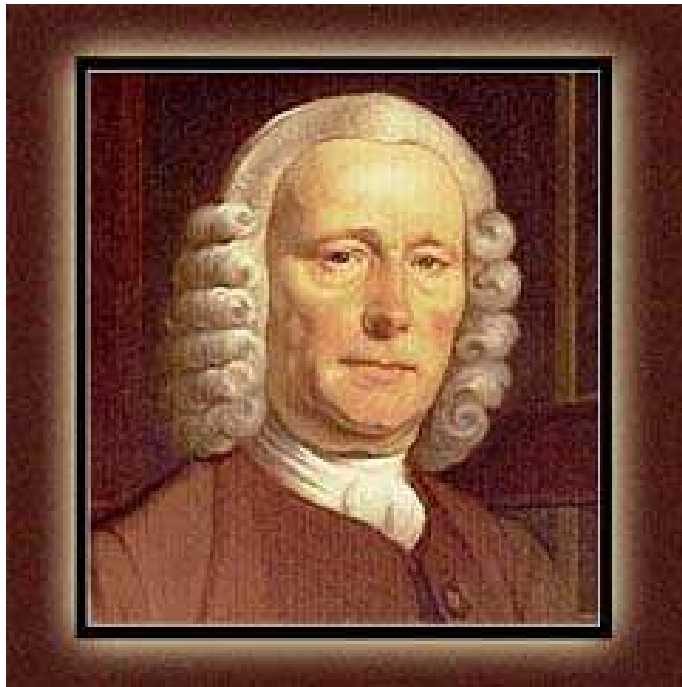
A determinação da latitude não foi um grande problema. Desde a antigüidade, sabia-se que astros, como a estrela Polar, são capazes de fornecer a direção a ser seguida. Os portugueses, em Sagres, perceberam que, mais do que isso, a altura de certos astros, isto é, o ângulo sob o qual o astro é observado no céu, relativo à linha do horizonte, tem relação com a latitude do ponto de observação. No caso da estrela Polar, esse ângulo é a própria latitude do ponto de onde essa estrela é observada. Ao sul do Equador, de onde não é possível avistar a estrela Polar, poderia ser medida a altura do Sol ao meio dia, e a latitude seria fornecida por uma tabela previamente elaborada.

Para a medição desse ângulo, isto é, da altura de certas estrelas, foram desenvolvidos alguns instrumentos, dentre os quais o astrolábio, mais adequado para medir a altura do Sol, e o quadrante, precursor do sextante e do octante, que são usados até hoje. Assim, apesar de algumas restrições, como os problemas de nuvens e neblina, e do balanço da nau (que prejudica a medição), a latitude já podia ser determinada, com razoável precisão.

*quadrante**octante**astrolábio*

A determinação da longitude, porém, permanecia insolúvel. Procurou-se a ajuda dos astros, mas todas as soluções propostas foram ineficazes. Apesar de todas as tentativas, durante alguns séculos, a melhor maneira de se obter a longitude era por estima, isto é, baseava-se nas referências e descrições das cartas, e, principalmente, na experiência do navegador. Era, portanto, um método altamente impreciso.

Já se sabia que a hora da observação de um fenômeno celeste -- como o nascer do Sol, por exemplo -- depende diretamente do lugar de onde é observado. Por comparação entre esse instante e a hora do meridiano de referência (o de Greenwich), e conhecendo-se a latitude, seria possível obter-se a longitude. Durante mais de 2 séculos tentou-se resolver esse problema, até que, em meados do século XVIII, conseguiu-se construir um cronômetro suficientemente preciso para tanto.

*John Harrison e seu cronômetro, construído em 1761*

Deste ponto, até hoje, tudo o que o Homem tem feito é aprimorar cada vez mais os mecanismos de determinação da posição. As “pedras azuis” que vêm sendo colocadas, cada vez mais engenhosas e sofisticadas, têm tornado a navegação cada vez mais fácil e precisa.

1.4 Avanços da tecnologia

Como em muitos ramos da ciência, um grande impulso foi dado à navegação durante a II Guerra Mundial, quando a eletrônica, definitivamente, passou a servir como base para a instrumentação. Surgiram, nessa época, dois importantes sistemas, conhecidos pelos nomes de “Loran” (de “long range navigation”, ou “navegação de longo alcance”) e “Decca” (Logsdon, 1992). Ambos se baseavam em ondas de rádio de alta frequência emitidas por estações fixas, e captadas pelo veículo em movimento. No veículo, um receptor era capaz de detectar o intervalo de tempo decorrido entre a emissão do sinal de rádio e sua recepção, podendo, assim, determinar a distância entre emissor e receptor. Conseguindo determinar as distâncias a 3 estações emissoras distintas, e sabendo suas respectivas posições, através do método da trilateração, o receptor poderia determinar a sua própria posição.

Embora tenham sido utilizados até recentemente, esses sistemas apresentavam algumas limitações. Em primeiro lugar, o alcance de uma estação emissora era, em geral, restrito a algumas centenas de quilômetros. No caso da navegação marítima, por exemplo, essa restrição não prejudicava a navegação costeira, mas impedia o uso desses sistemas para navegação em alto mar.

O sistema “Omega” (Logsdon, 1992), semelhante aos sistemas Loran e Decca, ao contrário destes, utilizava-se de ondas de baixa frequência, que apresentavam maior alcance. Assim, com apenas 8 estações fixas, localizadas na Noruega, Libéria, Havaí, Dakota do Norte (Estados Unidos), ilha de Diego Garcia (Oceano Índico), Argentina, Austrália e Japão, sua abrangência era mundial. Entretanto, da mesma forma que seus predecessores, seu uso acabava sendo limitado, prejudicado por interferências elétricas, más condições atmosféricas e variações topográficas. Com isso, certas aplicações, onde se fazia necessária maior precisão no posicionamento, não eram satisfeitas por instrumentos que utilizavam os sistemas Loran, Decca e Omega.

Em fins da década de 50, a tecnologia deu mais um importante passo, ao se capacitar para colocar “pedras azuis” fabricadas pelo Homem onde antes só havia pedras naturais: o espaço. Dez anos após o início da “Era Espacial” (com o lançamento do satélite soviético Sputnik I, em 1957), entrava em operação o “Navy Navigation Satellite System”, mais conhecido por “Transit” (Logsdon, 1992). O princípio de seu funcionamento baseava-se no chamado “efeito Doppler”, pelo qual a frequência de um sinal emitido por uma fonte em deslocamento é alterada. Até recentemente muito usado pela navegação marítima (especialmente pela transoceânica), ainda assim o sistema Transit apresentava algumas limitações: o pequeno número de satélites e a sua baixa órbita impediam que se pudesse obter a posição do receptor a qualquer momento; por se basear no efeito Doppler, apresentava elevada imprecisão quando o receptor se movimentava.

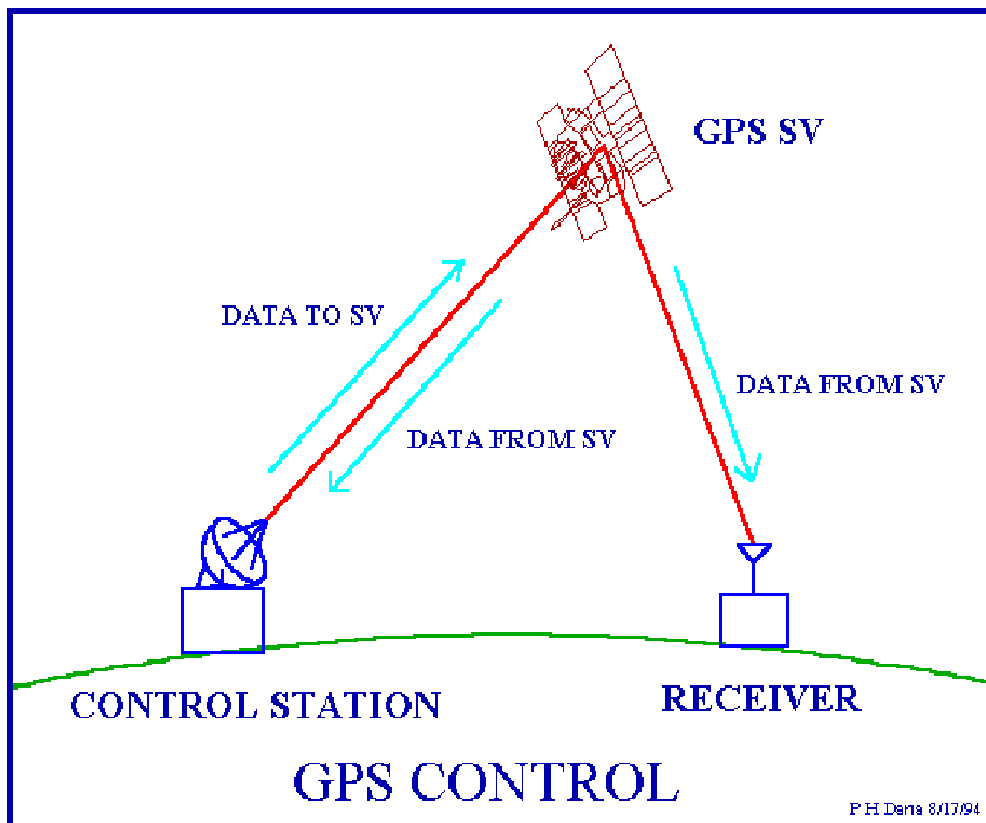
Finalmente, em 1973, nascia um novo sistema de navegação e posicionamento, resultado indireto de todo esse conhecimento tecnológico, acumulado ao longo de muitos anos: o “Navigation Satellite with Time and Ranging / Global Positioning System” (Hurn, 1989). Mais conhecido como “NAVSTAR/GPS”, ou, simplesmente, “GPS”, esse sistema foi concebido com fundos do Departamento de Defesa dos Estados Unidos para fornecer a posição instantânea e a velocidade de um ponto sobre a superfície terrestre, ou próximo a ela. Inicialmente para fins militares, o GPS é hoje utilizado por diversos segmentos da sociedade civil, e seu uso tende a se popularizar cada vez mais.

Até hoje, o GPS é a mais sofisticada, engenhosa e eficiente ferramenta que o Homem criou para saber sua posição na Terra.

Desde 1973, estima-se que o Governo norte-americano tenha investido algumas dezenas de bilhões de dólares no projeto. Nesse período, algumas alterações de ordem técnica foram introduzidas, e os constantes aprimoramentos da tecnologia têm provocado um progressivo aumento na precisão. Hoje, já é possível obter-se uma precisão da ordem de centímetros para a posição de um determinado ponto.

2. O Sistema de Posicionamento Global

O sistema GPS, como um todo, é composto por três segmentos: o segmento espacial, composto por satélites artificiais da Terra que emitem sinais eletromagnéticos; o segmento de controle, composto pelas estações terrestres que mantêm os satélites em funcionamento; e o segmento dos usuários, composto pelos receptores, que captam os sinais enviados pelos satélites e, com eles, calculam sua posição.



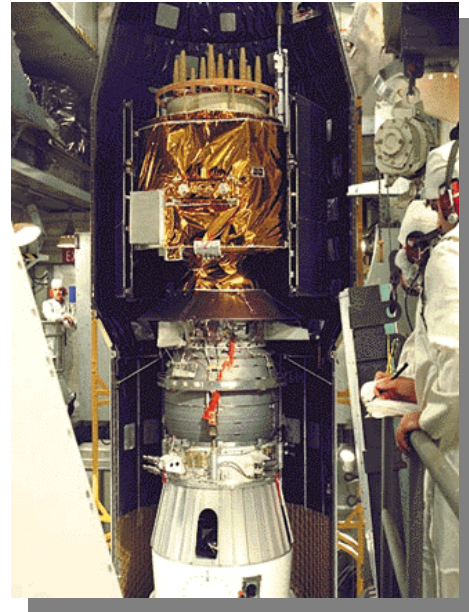
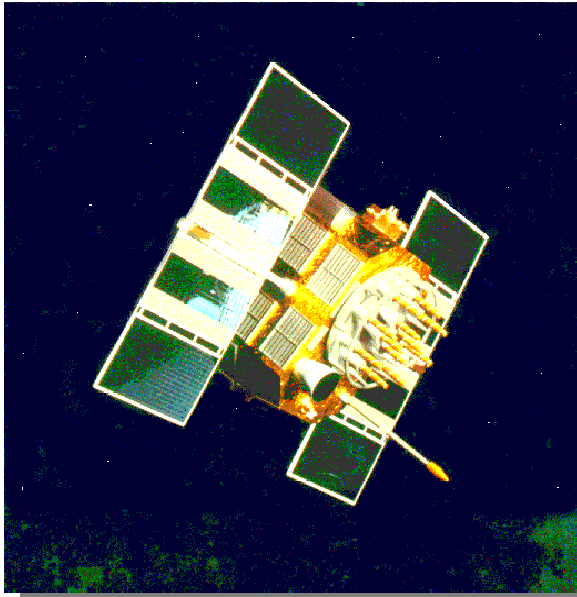
os sinais enviados pelos satélites são captados pelo receptor, que calcula sua própria posição; as estações de controle garantem o bom funcionamento dos satélites e, eventualmente, modificam sua configuração

2.1 O segmento espacial

Numa primeira etapa do projeto do sistema, foram construídos 11 protótipos de satélites pela empresa “Rockwell International”. Esses satélites constituíram o chamado “bloco I”. Mais tarde, entraram em operação os satélites do “bloco II”, para o qual foram construídos 28 satélites, dos quais foram lançados 24. Vinte e um deles estão normalmente em operação, e os demais ficam de reserva.

A vida útil prevista para cada satélite é de 7 anos e meio, embora alguns estejam em operação há mais de 10 anos. Satélites de um terceiro bloco, denominado “bloco IIR”, foram, depois, projetados e construídos pela empresa “General Electric”, em substituição aos do bloco anterior, introduzindo melhorias decorrentes dos avanços da tecnologia. E, atualmente, já se projetam os satélites do novo “bloco IIF”.

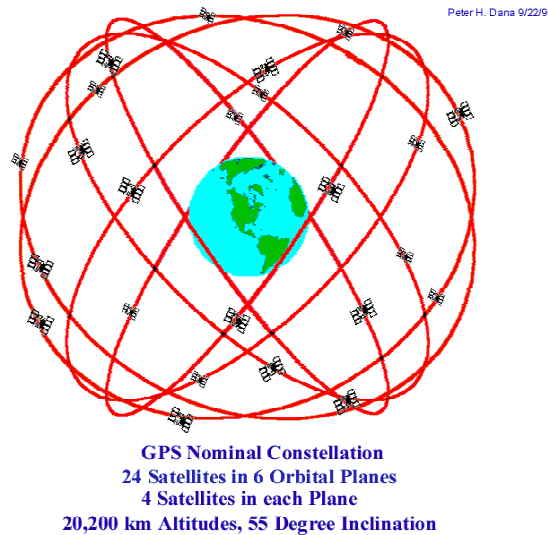
Cada satélite é dotado de painéis solares retráteis, que se constituem em sua fonte de energia. Quando estendidos, esses painéis conferem ao satélite um comprimento de aproximadamente 5m. Sua massa, em órbita, é de aproximadamente 1.000kg.



um dos satélites da constelação do GPS, e o foguete Delta II, responsável pelo seu lançamento

A órbita de um satélite é percorrida em, aproximadamente, 12 horas, o que significa que ele executa 2 voltas em torno da Terra a cada dia (na verdade, a órbita é completada em 11 horas e 58 minutos e, com isso, ele aparece no horizonte 4 minutos mais cedo a cada dia). Os 24 satélites estão distribuídos em 6 órbitas distintas, o que faz com que qualquer ponto da superfície terrestre tenha, próximo a ele, pelo menos 4 satélites acima da linha do horizonte. O plano de cada órbita forma, com o plano do Equador terrestre, um ângulo de 55° . A altura em que cada satélite executa sua órbita, em relação à da Terra, é de, aproximadamente, 20.000km.

Como se nota, ao contrário dos satélites comumente utilizados para comunicações, os satélites GPS não são geo-estacionários, isto é, não permanecem numa posição fixa em relação à Terra, acompanhando a sua rotação. Entre os motivos para esse fato, pode-se citar que, para ser geo-estacionário, um satélite tem que permanecer no plano equatorial; se todos eles se situassem nesse plano, os pontos mais próximos aos pólos teriam uma cobertura menos favorável. Mas o principal motivo para se querer ter os satélites em rotação em torno da Terra é o de que, periodicamente, cada um deles passa próximo a uma estação de controle, podendo, assim, enviar e receber informações sobre sua órbita.

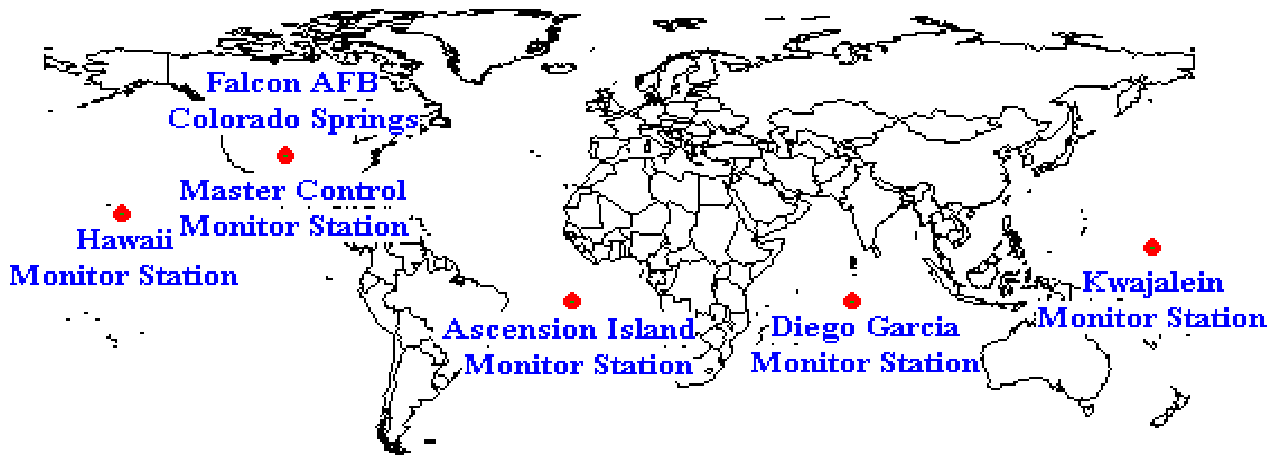


a constelação de satélites do GPS

Em cada satélite, há 2 relógios de césio, e 2 de rubídio, altamente precisos, calibrados na frequência de 10,23MHz. Na verdade, a frequência de ajuste é de 10,2299999545MHz; a pequena diferença é para corrigir os efeitos relativísticos que fazem os relógios se adiantarem cerca de 38 μ s por dia.

2.2 O segmento de controle

Este segmento é constituído por estações distribuídas ao longo da superfície terrestre, com a função de monitorar os satélites, efetuando eventuais correções em suas órbitas e em seus relógios. Há 5 dessas estações distribuídas pela superfície terrestre: a de Colorado Springs, no oeste dos Estados Unidos; a do Havaí, Estados Unidos, no Oceano Pacífico; a de Kwajalein, nas ilhas norte-americanas das Carolinas, também no Oceano Pacífico; a da ilha de Ascensão, possessão britânica do Atlântico Sul; e a da ilha de Diego Garcia, também possessão britânica, no Oceano Índico. A estação de Colorado Springs abriga o centro de operações do sistema, e é chamada de “estação mestra”. No cabo Canaveral, no estado norte-americano da Flórida, fica a estação de lançamento dos satélites. Com essa distribuição, a qualquer instante cada satélite está sendo monitorado por uma estação de controle.



Global Positioning System (GPS) Master Control and Monitor Station Network

as estações de controle do GPS, localizadas nas proximidades da linha do Equador

2.3 O segmento dos usuários

O segmento dos usuários é composto pelo ilimitado número de receptores (estima-se, da ordem de dois milhões de unidades) espalhados pelo mundo, nas mais diversas aplicações. A função básica de um receptor é captar os sinais dos satélites que estiverem “visíveis” (isto é, sem nenhuma obstrução entre eles e o receptor), e, com as informações obtidas nesses sinais, calcular a sua posição (latitude, longitude e altitude). Tipicamente, um receptor GPS apresenta uma antena (para a captação dos sinais), circuitos eletrônicos (para tratamento dos sinais), e um mostrador (para apresentação das coordenadas calculadas). Ele também costuma apresentar um teclado (para a entrada de dados e de comandos), e pode, ainda, oferecer um canal serial (para a saída de dados destinados a outro equipamento eletrônico).



modelos diversos de receptores GPS

3. Determinação da posição do receptor GPS

Para poder calcular sua posição no espaço, em 3 dimensões, um receptor GPS precisa determinar, a partir dos sinais emitidos pelos satélites, as distâncias entre ele e, no mínimo, quatro satélites, e as posições desses satélites. Com isso, através do método da trilateração, o receptor pode obter suas coordenadas geográficas (latitude e longitude) e sua altitude, e pode, ainda, determinar o instante atual, com altíssima precisão.

3.1 Determinação da posição de um satélite

Cada satélite executa uma órbita bem definida em torno da Terra. Essa órbita, ligeiramente elíptica, é descrita por uma certa quantidade de parâmetros. O conjunto dos parâmetros previstos para todos os satélites (tais como “excentricidade”, “ascensão reta do nodo ascendente no tempo de referência das efemérides (semicírculo)”, “amplitude em radianos dos termos harmônicos cosseno e seno para correção da inclinação da órbita”), chamado de “almanaque”, é, em geral, armazenado na memória do receptor, além de ser constantemente transmitido pelos satélites. Eventuais desvios na órbita de cada satélite, detectados pelas estações de controle, definem novos parâmetros, que a descrevem de modo ainda mais preciso, e cujo conjunto é chamado de “efemérides”, também incluído nas mensagens transmitidas pelos satélites (cada satélite transmite suas próprias efemérides, enquanto todos transmitem todo o almanaque). Com todos esses dados, os receptores podem “rastrear” os satélites “visíveis”, determinando sua posição a cada instante.

3.2 Determinação da distância de um satélite ao receptor

Já a distância entre satélite e receptor é calculada de maneira indireta. Na verdade, o que o receptor mede é o intervalo de tempo decorrido entre o envio do sinal pelo satélite, e a sua efetiva recepção. Esse é o tempo de percurso do sinal, ou seja, o tempo necessário para o sinal percorrer a distância entre satélite e receptor. Multiplicando esse tempo pela velocidade de deslocamento do sinal, o receptor obtém a sua distância ao satélite.

Ocorre que a medição do tempo de percurso do sinal é afetada pela baixa precisão do relógio interno do receptor. Com isso, a distância do receptor a cada satélite apresenta um erro considerável, sendo, então, chamada de “pseudo-distância” (ou “pseudo-range”). Porém, ao se tomarem as distâncias a pelo menos 4 satélites diferentes, num mesmo instante, os efeitos da imprecisão do relógio se anulam. É por isso que um receptor precisa captar sinais enviados por, no mínimo, 4 satélites.

Note-se que todos os satélites transmitem sinais na mesma frequência, próxima a 1,5GHz. Apesar disso, da grande distância dos satélites aos receptores e da pequena potência de transmissão, a detecção dos sinais é possível pelo emprego da técnica do espalhamento espectral.

3.3 Fontes de imprecisão

A precisão na determinação da posição de um receptor, portanto, depende da precisão das posições dos satélites e das distâncias a eles.

O erro na determinação da posição de um satélite pode ocorrer em função de um eventual desvio de órbita e do atraso com que esse desvio é detectado pelas estações de controle e registrado nas efemérides dos satélites. Esse erro, porém, é, em geral, bem pequeno (tipicamente, pode provocar imprecisão de 2,5m na determinação da posição do receptor).

Já a medição da distância entre satélite e receptor pode ser afetada por uma série de fatores. Mesmo que os desvios no relógio do receptor sejam filtrados por redundância, com sinais enviados por um quarto satélite, eventuais desvios nos relógios dos satélites não podem ser detectados pelo receptor. Também, aqui, o efeito na posição do receptor é pequeno (tipicamente, de 1,5m), pois os relógios dos satélites são altamente precisos, e também monitorados pelas estações de controle.

Outro fator que influi na precisão das medidas é a variação da velocidade dos sinais eletromagnéticos emitidos pelos satélites, quando atravessam a atmosfera terrestre. A velocidade

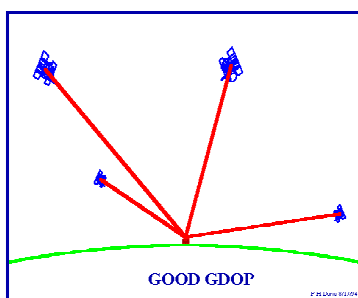
dos sinais, constante apenas no vácuo, é afetada por partículas ionizadas (existentes na ionosfera) e pelo vapor d'água (existente na troposfera). É possível se fazer um modelamento da atmosfera que procura avaliar os desvios da velocidade dos sinais dos satélites, mas esse modelamento nunca é perfeito, pois as condições atmosféricas se alteram de modo imprevisível. Também, aqui, os efeitos no cálculo da posição do receptor não são muito elevados (tipicamente, de 5,5m).

Há, ainda, pequenos efeitos (da ordem de 0,6m) causados pelo fenômeno do “multicaminhamento”, isto é, das múltiplas reflexões que o sinal de um satélite pode sofrer, em obstáculos próximos à antena do receptor. Tal fenômeno é semelhante ao “fantasma” dos aparelhos de TV.

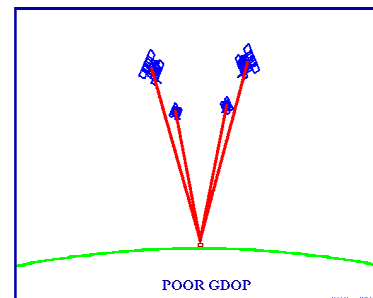
Todos esses fatores, e, ainda, eventuais imprecisões do receptor GPS, somados, conduzem a um erro típico, na determinação da posição do receptor, da ordem da dezena de metros.

Ocorre, porém, que até alguns anos atrás, havia ainda um outro fator, responsável pela elevação do erro a cerca de 100m: a chamada “disponibilidade seletiva”. O Departamento de Defesa dos Estados Unidos, operador dos segmentos espacial e de controle, podia, a qualquer momento, introduzir erros propositadamente, que afetavam tanto a determinação da posição dos satélites quanto o cálculo da distância dos satélites aos receptores. Apenas alguns receptores do exército americano e de seus aliados não eram afetados por esses erros. Concebido inicialmente para ser utilizado em épocas de guerra, o recurso da disponibilidade seletiva vinha sendo mantido ligado quase que ininterruptamente desde que foi introduzido, mas, atendendo a reivindicações do segmento civil dos usuários, ele acabou sendo desligado no final do governo do Presidente Clinton.

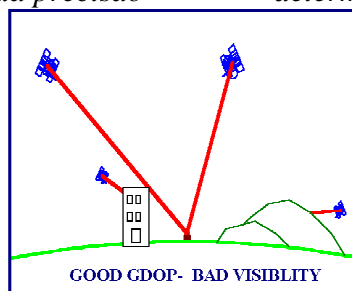
Finalmente, existem ainda fatores referentes à disposição relativa dos satélites, no instante em que seus sinais são captados por um receptor, que definem a chamada “diluição de precisão” (“dilution of precision”, ou DOP). Quanto mais espalhados no céu estiverem os satélites, mais precisa é a determinação da posição do receptor.



uma disposição favorável dos satélites proporciona uma baixa diluição da precisão



o agrupamento dos satélites no céu prejudica a determinação da posição do receptor



obstruções aos sinais também reduzem a precisão, apesar da disposição favorável dos satélites

É importante observar, ainda, que a determinação das coordenadas geográficas de um ponto depende de um sistema de referências. Como a Terra não é uma esfera, foram criados vários sólidos imaginários (elipsóides) que procuram melhor representar o formato real da Terra (a Geóide) numa certa localidade. Os valores que definem um elipsóide (eixo maior, eixo menor, ponto central e orientação dos eixos) formam um “datum”. Um mapa apresenta suas coordenadas sempre em relação a um determinado “datum”. O mais utilizado atualmente (inclusive pelo GPS), e que mais se

aproxima globalmente da Geóide, é o “World Geodetic System”, criado em 1984 (WGS-84). A utilização de coordenadas GPS em um mapa baseado em outro “datum” exige a conversão de coordenadas; caso contrário, podem ocorrer erros significativos.

3.4 Mecanismos de correção

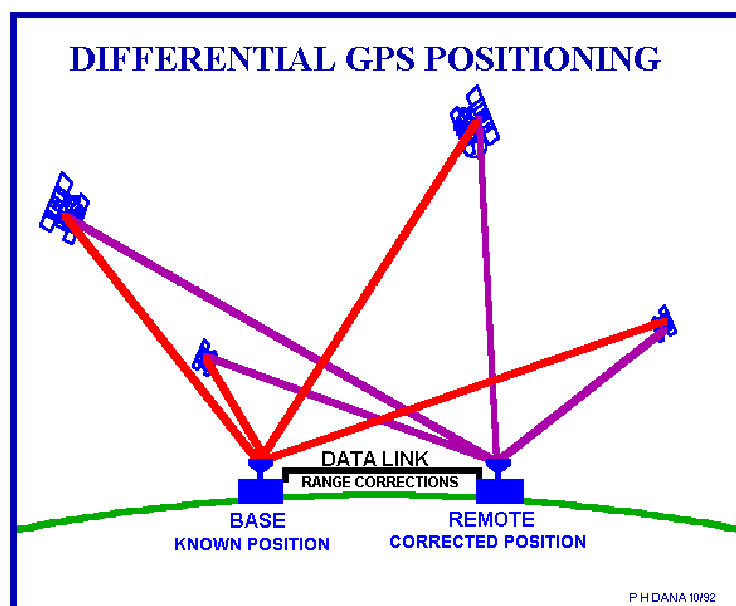
A técnica chamada de “GPS diferencial” surgiu para reduzir, ou mesmo eliminar, os efeitos das diversas fontes de imprecisão. Com essa técnica, consegue-se obter uma precisão total entre 2m e 5m, mesmo que a disponibilidade seletiva esteja ativada. Seu princípio é bastante simples: além do receptor GPS “itinerante”, isto é, que se locomove pelos pontos cujas coordenadas se deseja determinar, utiliza-se um outro receptor GPS, chamado de “base” ou de “referência”, que permanece fixo, num ponto cuja posição é bem conhecida. Esse receptor de referência, utilizando os sinais que recebe dos satélites, determina a sua posição, sujeita a todos os erros anteriormente descritos. Comparando-a com a sua posição real, previamente conhecida, ele pode, a cada instante, determinar o erro a que está sujeito o sinal enviado por cada satélite que ele avista. Dessa forma, o receptor de referência pode tentar corrigir os erros dos sinais captados pelo receptor itinerante, assumindo que esses erros sejam iguais aos que afetam a determinação de sua própria posição.

É evidente que isso não se pode garantir. As imprecisões introduzidas pelo próprio receptor, por exemplo, são específicas para cada aparelho: o receptor de referência não pode avaliar os erros provocados pelas características do receptor itinerante. Os efeitos do multicaminhamento são, também, particulares a cada receptor, e não podem ser corrigidos.

Já os efeitos da atmosfera podem ser bastante atenuados, quanto mais próximos os receptores itinerante e de referência se mantiverem.

Finalmente, os erros introduzidos por desvios na órbita e no relógio interno dos satélites podem ser totalmente eliminados pela técnica do GPS diferencial. Note-se que, nesta categoria de erros, enquadram-se os produzidos pela ativação da disponibilidade seletiva.

Uma outra técnica, já bem mais complicada, é utilizada em aplicações que exigem maior precisão, da ordem de milímetros. Essa técnica se baseia no princípio da interferometria, e pode exigir uma complexa rede de estações de base. Os cálculos envolvidos são bastante complexos, e as medições efetuadas exigem cuidados especiais -- a perda de uma particular medida pode comprometer toda a operação de determinação de uma posição.



no GPS diferencial (DGPS), um receptor de referência consegue aumentar a precisão do posicionamento de outro receptor

4. Aplicações

Embora tenha sido concebido há mais de 30 anos, o sistema GPS só se tornou totalmente operacional na década de 90, quando passou a funcionar com os 24 satélites previstos. E, de lá para cá, permeceu em constante evolução, a fim de se ampliar sua precisão e aplicabilidade.

Outro fator que pode impulsionar o aperfeiçoamento do sistema GPS é a sua descaracterização como instrumento militar. Na época de sua concepção, em meio à “Guerra Fria”, com o mundo dividido em dois blocos claramente antagônicos, o grande apelo para se conseguirem recursos financeiros necessários ao projeto era o seu potencial bélico. Trinta anos depois, o mundo mudou, as perspectivas são outras... e, felizmente, o uso do GPS para fins pacíficos parece ser bem mais abrangente. Chega a ser curioso que já existam, no mercado, receptores capazes de processar, simultaneamente, sinais enviados tanto pelos satélites GPS (norte-americanos) quanto pelos satélites GLONASS (sistema russo, semelhante ao GPS, porém de futuro incerto).

Tal qual vem ocorrendo com a indústria da informática, o que se observa é que, a cada dia, surgem novos fabricantes de instrumentos, lançando novos produtos, cada vez mais precisos e sofisticados, ao mesmo tempo em que o aumento da demanda colabora na redução dos preços. No início dos anos 80, o modelo mais barato de um receptor GPS não custava menos do que 140 mil dólares. Dez anos depois, esse valor já tinha caído para 2 mil dólares. Hoje, numa loja qualquer de artigos eletrônicos, é possível encontrar um receptor por cerca de 100 dólares.

Fica, pois, difícil estimar-se o número de modelos diferentes de receptores GPS existentes no mercado, bem como o número de unidades em operação. É bem possível que o cálculo de 300 modelos e de 4 milhões de unidades já esteja totalmente superado.

Numa tentativa de se agruparem as suas diversas aplicações, citam-se aqui três “categorias”, embora, formalmente, essa classificação não exista. Essas categorias são: geodésia, coleta de dados e navegação.

4.1 Geodésia

A categoria de aplicações de geodésia engloba as que exigem os receptores de maior precisão, da ordem de centímetros ou milímetros. As aplicações desse grupo envolvem topografia, altimetria, cartografia, geologia, sensoriamento remoto, agrimensura, etc. Receptores GPS estão sendo utilizados, por exemplo, para a medição e o monitoramento do deslocamento das placas da crosta terrestre. No Brasil, técnicos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) empregam receptores GPS para o refinamento da rede de marcos geodésicos do país.

4.2 Coleta de dados

Os receptores que se classificam como “coletores de dados” não necessitam ter tanta precisão como os utilizados em geodésia. Precisão da ordem de 1m, e mesmo de 5m, são, em geral, satisfatórias para estas aplicações. Além de determinarem sua posição, eles permitem, por exemplo, que seu operador defina categorias e classificações para os elementos a serem coletados, criando uma espécie de “dicionário de dados”. Quando sai a campo, o operador apenas seleciona as características do elemento a ser cadastrado. As aplicações, aqui, são muito variadas: planejamento urbano, planejamento rural, agricultura, planejamento de traçados de estradas e dutos, cadastramento de espécies animais e vegetais, mapeamento de tipos de solos, mapeamento de sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, etc.

4.3 Navegação

O terceiro grupo de aplicações, aqui chamado de aplicações de navegação, geralmente exige do receptor um comportamento dinâmico e uma resposta imediata. Em alguns casos, é necessária uma alta precisão, como na aplicação militar de navegação de mísseis e nos sistemas de aterrissagem de aeronaves. Mas, na maioria das aplicações, é satisfatória uma precisão na faixa entre 2m e 100m

(neste último caso, a técnica do GPS diferencial nem é necessária). Receptores GPS já são largamente utilizados na navegação aérea e na navegação marítima. Um grande mercado, que agora começa a ser bastante explorado, é o da indústria automobilística. Alguns modelos de veículos já são oferecidos com um receptor GPS acoplado a um computador de bordo que orienta o motorista sobre o melhor caminho a ser seguido até seu destino. O gerenciamento e monitoramento de frotas de caminhões e ônibus tem sido bastante aprimorado com a instalação de receptores nos veículos da frota. Veículos agrícolas podem ser conduzidos automaticamente com a orientação desse equipamento. E até atividades esportivas e de lazer, como enduros, excursões e caminhadas ecológicas, já empregam receptores GPS.

Referências Bibliográficas

- HURN, J. **GPS - A guide to the next utility**. Trimble Navigation, Sunnyvale, Estados Unidos, 1989.
- LOGSDON, T. **The NAVSTAR Global Positioning System**. Van Nostrand Reinhold, Nova Iorque, Estados Unidos, 1992.
- PAZ, S.M. **Uma ferramenta para desenvolvimento de equipamentos que utilizem um receptor do Sistema de Posicionamento Global (GPS)**. São Paulo, SP, 1997. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.