

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I. 1 - Geodésia - Definição

A geodésia é definida classicamente como a ciência que estuda a forma e as dimensões da Terra. A palavra geodésia em si é de origem grega e significa “particionando a Terra” ($\gamma\eta$ - Terra, $\delta\alpha\iota\omega$ - dividido).

A era dos satélites artificiais imediatamente seguida pela revolução da eletrônica, proporcionaram novos e atraentes rumos à geodésia. Primeiramente, os métodos de posicionamento ganharam muito em rapidez e precisão. Em seguida, a geodésia pode se lançar em outros campos, não de seu interesse específico, mas de valiosa utilidade, tais como: monitoramento das marés terrestres, controle do movimento de placas tectônicas, detecção de movimentos verticais da crosta, controle de grandes estruturas de engenharia, estudo do campo gravitacional, etc. Esta abrangência torna difícil definir exatamente geodésia e delimitar seus campos de aplicação, porém, mostra alguns de seus envolvimento atuais.

I. 2 - Evolução histórica do posicionamento

O ser humano sentiu necessidade de se posicionar quando de suas primeiras viagens. Daí a primazia do posicionamento cinemático sobre o estático.

Em palavras simples navegar significa saber onde se está e onde se vai - saber ir e voltar. Os recursos de que se necessita para navegar dependem das características da viagem como a distância e o meio (terrestre, aéreo, aquático, ...).

Sejam quais forem os recursos para a navegação, o conhecimento da forma da Terra e a adoção de um referencial adequado são imprescindíveis.

Pitágoras (6° sec. a. C.) deu um grande passo na evolução histórica da forma da terra ao atribuir ao planeta o modelo esférico alegando razões de caráter estético e filosófico. Coube ao grande filósofo Aristóteles (4° sec. a. C.) apresentar os primeiros argumentos científicos em prol daquela forma. As partículas têm uma tendência natural, assegurava ele, de cair para o centro do mundo (uma direção para baixo). Neste movimento todas as partes competem entre si para se colocarem na região inferior o que as leva a se comprimirem em forma de uma bola. Além deste argumento de caráter gravitacional, Aristóteles lembrou dois outros fatores: a sombra circular da terra nos eclipses de lua e a variação no aspecto do céu estrelado com a latitude.

A concepção esférica atravessou incólume muitos séculos até esbarrar nas análises de caráter teórico do genial Isaac Newton (séc. XVII). Segundo ele, a forma esférica era incompatível com o movimento de rotação. Este, devido à força centrífuga, impõe um achatamento nos pólos. Estava aberta a fase elipsoidal que durou muito pouco se comparada com a esférica. O famoso matemático alemão, C. F. Gauss, concluiu, após aplicar o método dos mínimos quadrados numa série de medições geodésicas em Hannover, que os resíduos obtidos estavam muito acima dos erros aleatórios inerentes às observações.

Isto indicava que o modelo matemático adotado para a Terra, o elipsóide de revolução, não era adequado. Sugeriu então uma forma levemente irregular mais tarde denominada GEÓIDE. Entretanto, como referência para o estabelecimento de sistemas de coordenadas geodésicas continua-se utilizando o elipsóide.

Fixada e aceita a forma da terra, os métodos e técnicas de posicionar um ponto de sua superfície em relação a um referencial, ganharam cada vez mais importância e precisão. Assim é que as chamadas TRIANGULAÇÕES, em geral quadriláteros subdivididos em triângulos, iniciadas no século XVII na França, passaram a ter um grande desenvolvimento. Aliadas às observações astronômicas e eventualmente complementadas com algumas variantes, como poligonais eletrônicas, elas se constituíram, durante vários séculos, no único método de determinação "precisa" das coordenadas em pontos (vértices) da superfície.

A Era Espacial iniciada com o lançamento do primeiro satélite artificial, o SPUTNIK I (4 de outubro de 1957), marcou uma mudança radical em muitas ciências e em particular nos métodos de posicionamento. A primeira idéia de utilização do efeito Doppler-Fizeau na determinação de órbitas dos satélites artificiais remonta à mesma época e é devida a Guier e Weiffenbach. Posteriormente McClure sugeriu a operação inversa: utilizar a frequência Doppler de um satélite de órbita conhecida para posicionar o observador. Desenvolvido pela Universidade John Hopkins o sistema denominado Navy Navigation Satellite System (NNSS), também conhecido como TRANSIT, entrou em operação em 1967. Até recentemente prestou um eficiente apoio para o posicionamento geodésico e para a navegação marítima. Entretanto, razões relacionadas com a estrutura do sistema, não permitiam que o mesmo fosse usado para a navegação aérea e impunham restrições diversas aos posicionamentos acima referidos.

Isto levou o Departamento de Defesa dos Estados Unidos a investir na concepção de um novo sistema. Proveniente da fusão em 1973 de dois projetos, TIMATION (Time Navigation) da Marinha e 621B da Força Aérea, nasceu o que veio a ser denominado NAVSTAR/GPS.

O Navigation Satellite with Time and Ranging (NAVSTAR) ou Global Positioning System (GPS), popularizado atualmente pela última sigla, foi projetado para fornecer a posição instantânea bem como a velocidade de um ponto sobre a superfície da Terra ou próximo a ela, num referencial tridimensional. O sistema atende plenamente a navegação em geral e vem oferecendo precisões e facilidades cada vez maiores nos posicionamentos estático e cinemático.

CAPÍTULO II

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Antes de entrar no sistema GPS propriamente dito, serão apresentados alguns conceitos fundamentais imprescindíveis para o entendimento das diversas aplicações do mesmo.

I. 3 - Superfícies de referência

Existem três superfícies que rotineiramente envolvem o geodesta ou quem necessite de posicionamento. A primeira delas é a “superfície física” (SF) limitante do relevo topográfico. A segunda é chamada “superfície elipsoidal”, limitante de um elipsóide de revolução, figura matemática gerada pela rotação de uma elipse entorno do eixo menor. Finalmente, a terceira é a “superfície geoidal”, conceitualmente mais complicada e que limita uma forma geométrica chamada GEÓIDE. É definida como a superfície equipotencial do campo de gravidade que coincide com o nível médio não perturbado dos mares (Fig. II.1).

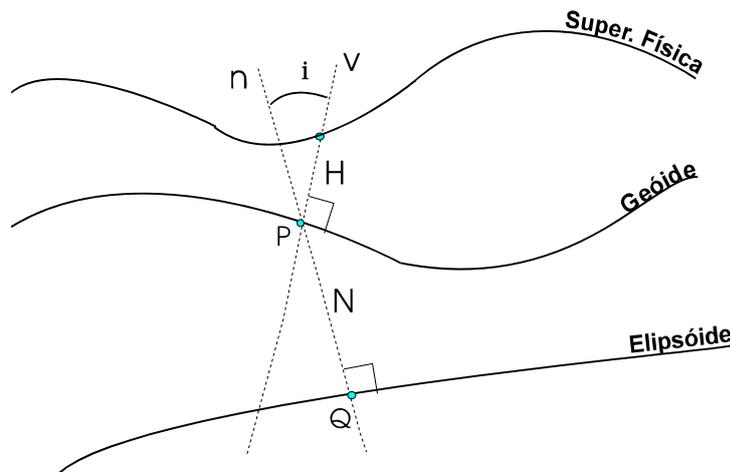


Fig II.1 - Conceito de vertical, de normal e das superfícies associadas.

Considere-se um ponto P sobre o geóide. A reta que passa por P perpendicular ao mesmo define a direção de uma linha de força chamada vertical (v). A reta que passa por P perpendicular ao elipsóide define a direção de uma linha de força chamada normal (n). A primeira é associada ao campo de gravidade da Terra real e a segunda da Terra normal. O ângulo que a vertical forma com o normal é chamado “deflexão da vertical” ou “ângulo de desvio da vertical” (i). Normalmente considera-se as componentes deste ângulo segundo dois planos perpendiculares: a componente meridiana (ξ) (plano da direção norte-sul) e a componente 1^o vertical (η) (plano de direção leste-oeste).

A separação entre a superfície física e a superfície geoidal tomada ao longo da vertical é chamada “altitude ortométrica” (H). É obtida através da operação de nivelamento geométrico associado à gravimetria.

A separação entre as superfícies geoidal e elipsoidal ao longo da normal é a “altura” ou “ondulação geoidal” (N) (Fig. II.1). Seu cálculo foi objeto tradicionalmente da geodésia física e hoje pode ser feito também a partir da observação de satélites artificiais.

II. 2 - Coordenadas geodésicas ou elipsoidais e cartesianas

Em se tratando de posicionamento é fundamental o conceito de coordenada. Bastante familiar são as coordenadas geográficas: latitude e longitude. Denomina-se latitude astronômica ϕ_A ao ângulo formado pela vertical e sua projeção sobre o plano do equador. A latitude é medida de 0° a 90° com origem no equador, positiva no hemisfério norte e negativa no hemisfério sul, por convenção. A longitude astronômica λ_A é o ângulo diedro formado pelo meridiano astronômico médio de referência e pelo meridiano astronômico do ponto. É contada positiva por leste de 0° a 360° .

A latitude geodésica ou elipsóidica ϕ_G é definida como o ângulo que a normal forma com sua projeção sobre o plano do equador. O ângulo diedro formado pelos meridianos geodésicos de referência (IRM) e do ponto mede a longitude geodésica ou elipsóidica λ_G . Para definir sem ambigüidade a posição de um ponto P sobre a superfície da Terra necessita-se da distância, ao longo da normal, entre o elipsóide e o ponto, a altitude geométrica (h) (Fig. II.2-1).

As coordenadas astronômicas são referidas à direção da vertical, enquanto as coordenadas geodésicas ou elipsóidicas são referidas à direção da normal. As relações entre elas são:

$$\phi_A - \phi_G = \xi$$

$$(\lambda_A - \lambda_G) \cos \phi_G = \eta \quad (\text{II.2-1})$$

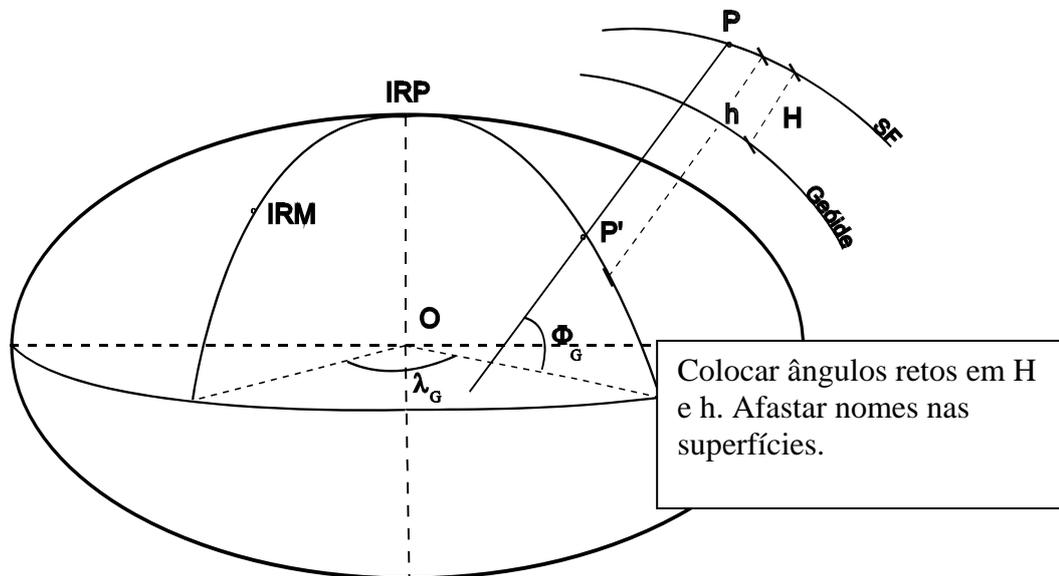


Fig. II.2-1 - Coordenadas geodésicas ou elipsóidicas.

O Sistema de Referência Terrestre do IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Services) é conhecido pela sigla ITRS (IERS Terrestrial Reference System) e definido conforme os critérios estabelecidos pelo IERS.

Trata-se de um sistema cartesiano geocêntrico, isto é, origem no centro de massa da Terra como um todo, o que inclui os oceanos e a atmosfera. A origem foi melhor caracterizada recentemente através das técnicas SLR (Satellite Laser Ranging) e LLR (Lunar Laser Ranging). A orientação dos eixos foi aquela estabelecida em 1984 pelo BIH e é mantida pelo IERS nas realizações do ITRS dentro de ± 3 mas (miliarcosegundo) [Ma and Feissel, 1997, pg. II-3]. Durante muito tempo o eixo OX^3 do Referencial Terrestre era orientado segundo a posição média do polo no período de 1900 – 1905, na época chamado CIO (Conventional International Origin). A partir de técnicas mais modernas de observação o BIH ajustou a posição do polo em 1984 e a partir daí manteve estável sob a sigla IRP (IERS Reference Pole). Trata-se de uma nova materialização do CIO, consistente com as técnicas modernas mais precisas. Ainda em consistência com o Sistema BIH 1984 o eixo OX^1 do ITRS é orientado segundo o IRM (IERS Reference Meridian). O eixo OX^2 a 90° de OX^1 completa um sistema dextrógiro.

As coordenadas (x_1, x_2, x_3) de um ponto da Terra rígida variam com o tempo neste sistema em função do “movimento do pólo”.

Em resumo, o ITRS tem as seguintes características:

- é geocêntrico;
- o eixo OX^1 é orientado na direção do IRM;
- o eixo OX^3 é orientado na direção do IRP
- o eixo OX^2 a 90° de OX^1 completando um sistema dextrógiro (Fig. II.2-2).

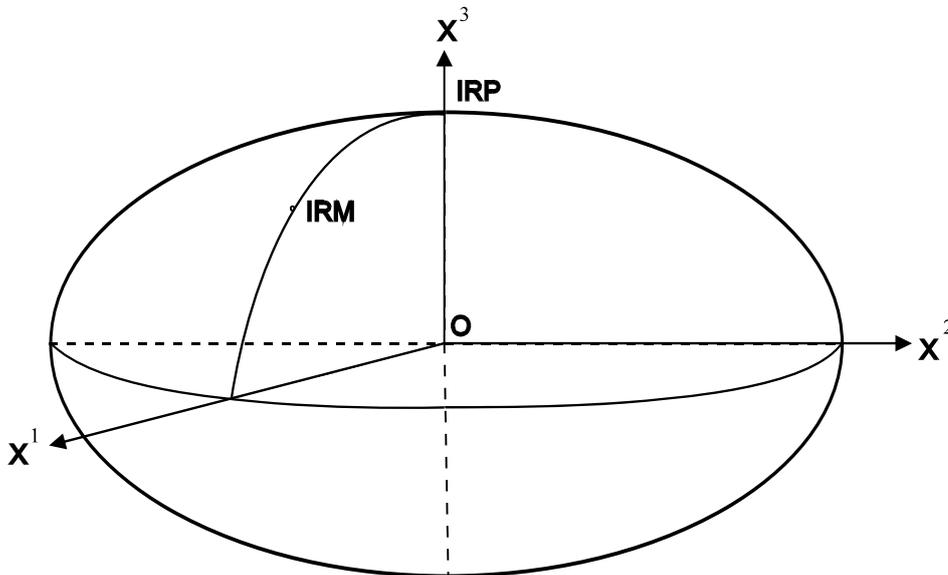


Fig. II.2-2 - Sistema Terrestre Convencional.

O posicionamento e a cartografia se valem sempre de coordenadas geodésicas ou elipsóidicas, ao invés de cartesianas, referidas a um elipsóide de revolução. Este fica definido através de dois parâmetros, por exemplo, os dois semi-eixos: maior “a” e menor “b”. Tem sido usual, entretanto, escolher o semi-eixo maior e o achatamento, este representado por “f” e definido como:

$$f = \frac{a-b}{a} \quad (\text{II.2-2})$$

II. 3 - Datum

Escolhida a superfície de referência para as coordenadas geodésicas têm-se o que é denominado “DATUM GEODÉSICO HORIZONTAL” (D.G.H.). Para que um sistema geodésico fique caracterizado é necessário fixar e orientar o elipsóide no espaço. A fixação foi realizada no passado mediante a escolha de um ponto origem e a atribuição, de alguma forma, de coordenadas geodésicas, ϕ_G , λ_G ao mesmo, bem como, de um valor para a altura geoidal N . A orientação era definida pelo azimute de uma direção inicial. Esta caracterização de um DGH conduzia ao conceito denominado *sistema geodésico definido*. Os métodos geodésicos clássicos, triangulação e poligonação, ou as técnicas modernas, uso de satélites artificiais, permitem que se obtenham coordenadas em tantos pontos quantos necessários, devidamente materializados no terreno, vinculadas ao ponto origem.

O conjunto de marcos assim estabelecidos com as respectivas coordenadas leva ao conceito de *sistema geodésico materializado*. O que se desejou sempre foi uma perfeita coerência entre o sistema definido e o materializado; entretanto, os erros inerentes aos processos de medição não permitem geralmente uma completa identificação entre os mesmos.

A menos de alguns sistemas locais usados no passado em caráter emergencial, o Brasil adotou durante muitos anos o DATUM “Córrego Alegre”. Este nome provém de um vértice da triangulação, localizado nas imediações de Uberaba, e que constituía a sua origem. Os elementos característicos deste DGH eram:

$$\begin{aligned}\Phi_G &= \Phi_A = 19^\circ 50' 15,14'' \text{ S} \\ \lambda_G &= \lambda_A = 48^\circ 57' 42,75'' \text{ W} \\ N &= 0 \\ A_G &= 128^\circ 21' 48,96''\end{aligned}\tag{II.3-1}$$

sendo adotado como elipsóide o de Hayford cujos parâmetros são:

$$\begin{aligned}a &= 6.378.388 \text{ m} \\ f &= 1:297,00\end{aligned}\tag{II.3-2}$$

e A_G o azimute geodésico da direção Córrego Alegre- Chapada das Areias.

A partir de 1979, a Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), através de seu Departamento de Geodésia, decidiu por uma mudança. Adotou o sistema conhecido como SAD-69 (SOUTH AMERICAN DATUM 1969), cuja origem é o vértice CHUÁ. Este DGH é caracterizado pelos seguintes elementos:

$$\begin{aligned}\Phi_G &= 19^\circ 45' 41,6527'' \text{ S} \\ \lambda_G &= 48^\circ 06' 04,0639'' \text{ W} \\ A_G &= 271^\circ 30' 04,05'' \\ N &= 0\end{aligned}\tag{II.3-3}$$

sendo $\xi = 0,31''$ e $\eta = -3,52''$, isto para o vértice Chuá, tendo como elipsóide aquele do Sistema de Referência 1967 cujos parâmetros são:

$$\begin{aligned}a &= 6.378.160 \text{ m} \\ f &= 1:298,25\end{aligned}\tag{II.3-4}$$

e sendo A_G o azimute da direção Chuá-Uberaba.

A partir da assinatura pelo Presidente do IBGE em 25 de fevereiro de 2005 da Resolução 1/2005, ficou estabelecido como Sistema Geodésico Brasileiro o SIRGAS 2000, época 2000,4.

Isto tem implicado na existência de cartas referidas ao antigo sistema Córrego Alegre e cartas referidas ao recente SAD-69, com a possibilidade, a curto prazo, de surgirem mapeamentos novos vinculados ao SIRGAS2000, exigindo a devida atenção do usuário.

A partir da definição da origem do sistema geodésico, e.g., Chuá ou Córrego Alegre, eram conduzidas as redes de triangulação que visavam fornecer coordenadas aos vértices materializados no terreno, os quais serviam de referência para os trabalhos de cartografia, de engenharia, etc.

Hoje o conceito de sistema geodésico mudou e não se estabelece mais uma origem. Através das técnicas espaciais implanta-se uma rede de referência. Neste aspecto existem redes de diferentes amplitudes: rede mundial (IGS), redes continentais (SIRGAS), redes nacionais (RBMC), redes estaduais (Rede GPS do Estado de São Paulo) e até regionais ou locais.

Por outro lado, vem se evoluindo para um referencial que constitua uma perfeita materialização do Sistema de Referência Terrestre. Nesta tentativa surgiram, entre outros, o WGS-72 (World Geodetic System 1972), o NSWC (Naval Surface Weapon Center) com algumas variantes. Estes ficam apenas citados a título de ilustração. É importante mencionar com mais pormenores o chamado WGS-84 (World Geodetic System 1984) adotado como referencial nos satélites GPS. Na verdade, estes sistemas constituem mais do que um simples referencial; estabelecem valores para uma série de constantes, tais como: velocidade angular da Terra, velocidade da luz, constante universal da gravitação, etc. As principais constantes a salientar no sistema WGS-84 são:

$$a = 6.378.137\text{m} \pm 0,5 \text{ m}$$

$$f = 1:298,257223563 \quad (\text{II3-5})$$

$$c = 299792458 \text{ m.s}^{-1} \text{ (velocidade da luz)}$$

$$J_2 = 0,108263 \times 10^{-2}$$

É importante salientar que a materialização de um sistema cartesiano geocêntrico tem se beneficiado nos últimos anos das observações interferométricas levadas a efeito nas estações VLBI, bem como das observações “laser” tanto aos satélites artificiais quanto à lua. Em função da alta precisão das referidas observações e do cuidado no processamento das mesmas, hoje se admite que o referencial terrestre está satisfatoriamente materializado através do que é denominado ITRF. O WGS-84 por outro lado está devidamente compatibilizado com o ITRF, versão 2000, dentro de poucos centímetros.

O Departamento de Geodésia do IBGE determinou há alguns anos parâmetros de transformação do sistema WGS-84 para o sistema SAD 69 que consistiu nas seguintes translações:

Sistema de Posicionamento por Satélite – GPS

$$TX = + 66,87 \text{ m}$$

$$TY = - 04,37 \text{ m}$$

$$TZ = + 38,52 \text{ m}$$

Os sistemas até aqui mencionados são de extrema importância prática. Mas a última década deu um grande passo para estabelecer os conceitos mais adequados em relação a referenciais que atendessem às necessidades diversas das atividades humanas. Neste aspecto concluiu-se que há uma série de fenômenos que resultam em deslocamentos de pontos e/ou alterações de movimento cuja quantificação é importante determinar:

- deslocamentos/deformações de obras de engenharia
- movimentos de placas da litosfera: inter-placa e intra-placa
- marés oceânicas e terrestres
- efeitos de carga sobre a crosta
- movimento de rotação
- deslocamento do eixo de rotação
- comportamento dinâmico do sistema Terra-Lua
- movimento dos planetas e dos satélites, etc.

Para quantificar as grandezas vinculadas a estes fenômenos é usado o Sistema de Referência Terrestre Internacional (ITRS – International Terrestrial Reference System ou, como definem alguns autores, IERS Terrestrial Reference System, sendo IERS o acrônimo de International Earth Rotation and Reference Systems Services). O ITRS é fixo à Terra acompanhando-a em seus diferentes movimentos. Mas é essencial estabelecer um referencial fixo no espaço. O desenvolvimento da técnica VLBI (Very Long Baseline Interferometry), aplicação da interferometria na observação de corpos celestes, em particular, dos Quasares, permitiu estabelecer o chamado Referencial Celeste; sua origem é o baricentro do sistema solar e o plano primário é próximo ao equador médio em J2000 (ano Juliano 2000) [Arias et al., 1995] [McCarthy, 1996]. A origem da ascensão reta deve ser próxima do equinócio dinâmico J2000, consistente com o valor convencional do FK5 (12h 29m 6,6997s em J2000) [Arias et al., 1995]. Com isso fica definido o Sistema de Referência Celeste Internacional (ICRS – International Celestial Reference System ou IERS Celestial Reference System).

CAPÍTULO III

CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA GPS

III. 1 - Estrutura dos satélites e dos sinais

A estrutura final do sistema compreende constelação de 27 satélites (34 operacionais e mais 3 reservas) distribuídos em 6 planos orbitais distintos (Fig. III.1-1). O objetivo primordial da configuração era o dispor, em qualquer ponto sobre a superfície da Terra ou próximo a ela, de um mínimo de quatro satélites acima do horizonte 24 horas por dia. A altura dos satélites é aproximadamente de 20.000 km e uma inclinação do plano da órbita em relação ao plano do equador de 55° . Isto implica num período (duração de uma revolução ao redor da Terra) de 12 horas (siderais).

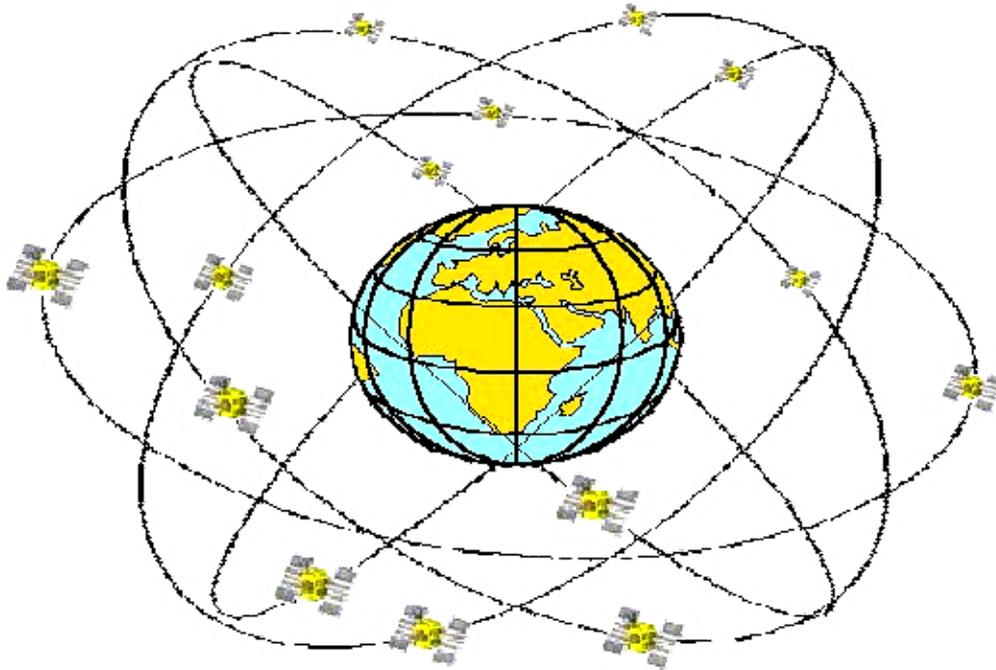


Fig. III.1-1 - Estrutura da órbita dos satélites GPS.

Os sinais emitidos pelos veículos espaciais (VE) são caracterizados por um certo número de componentes todas baseadas numa frequência fundamental de 10,23 MHz controlada por osciladores atômicos de césio e de rubídio. Os satélites transmitem dois sinais L_1 e L_2 com frequências respectivas:

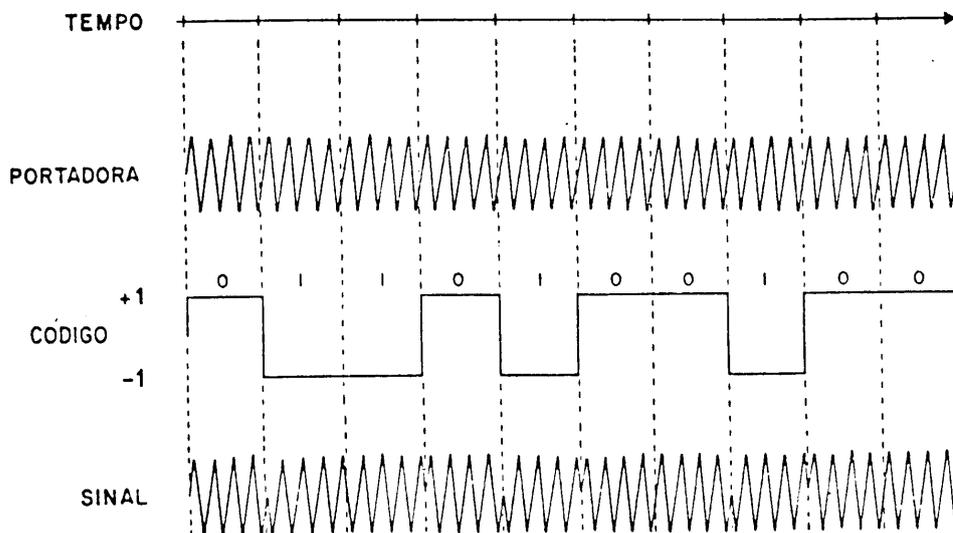


Fig III.1-2 – Concepção da modulação em fase.

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 154 \times 10,23 = 1575,42 \text{ MHz} \\ \omega_2 &= 120 \times 10,23 = 1227,60 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (\text{III.1-1})$$

Os comprimentos de onda destas portadoras são respectivamente 19,05 cm e 24,45 cm. Os diferentes tipos de modulações sobrepostas a estas portadoras podem ser traduzidos pelas equações:

$$L_1(t) = A_P P_i(t) D_i(t) \cos[\omega_1 + \Phi(t)] + A_G G_i(t) D_i(t) \sin[\omega_1 + \Phi(t)] \quad (\text{III.1-2a})$$

$$L_2(t) = B_P P_i(t) D_i(t) \cos[\omega_2 + \Phi(t)] \quad (\text{III.1-2b})$$

cujos termos serão explicados a seguir.

As duas portadoras são moduladas em fase, com distinção entre as fases cosenoidal e senoidal, por uma função degráu. A fig. III.1-2 mostra a concepção da modulação em fase.

A fase cosenoidal de ambas as portadoras é modulada por uma seqüência de pulsos (da função degráu) conhecida como código P (preciso ou protegido) e representado em (III.1-2a) e (III.1-2b) por $P_i(t)$.

O código P é gerado por um algoritmo que se repete a cada 267 dias. Observado ao longo deste período a seqüência não apresenta nenhuma simetria, razão pela qual se denomina “pseudo aleatória”. Cada satélite, na prática, transmite um segmento específico

de 7 dias do código P. Isto caracteriza cada VE permitindo que se selecione um satélite particular para rastrear entre os que estão acima do horizonte. Às 0hs TU (Tempo Universal) da noite de sábado para domingo é reiniciada em cada satélite a geração de seu segmento do código P. A frequência do código P é de 10,23 MHz.

É impossível a um receptor varrer rapidamente o comprimento de 7 dias do código P de modo a sintonizá-lo. Para tanto, o satélite transmite uma informação complementar, chamada código HOW (Hand-Over Word) que permite conhecer um intervalo específico do código transmitido naquele instante. Esta informação é modulada junto com o código C/A e é conhecida como contagem Z.

A fase senoidal da portadora L_1 é modulada por uma seqüência de pulsos (função degráu) chamada código C/A (Clear Access) representada na equação (III.1-2a) por $G_i(t)$. O código C/A é gerado pelo algoritmo de Gold em cada satélite, se repete a cada 1 milissegundo e tem uma frequência de 1,023 Mhz.

III. 2 - Formato e conteúdo da mensagem

Além dos dois códigos, ambas as fases da portadora L_1 e uma das fases da portadora L_2 são moduladas por uma seqüência de baixa frequência (50 bps) de dados representada nas equações (III.1-2) por $D_i(t)$. Compreendem um conjunto de informações necessárias ao usuário, conhecido como “mensagem”, e que constitui o que é denominado “quadro”.

O conjunto de informações de um quadro está dividido em 5 subquadros, cada um composto de 300 bits, sendo que cada conjunto de 30 bits forma uma palavra. O quadro todo totaliza 1500 bits. Cada bit da mensagem tem a duração de 20 ms. Portanto, um subquadro é composto de 10 palavras e tem a duração de 6 segundos, sendo de 30 segundos a duração do quadro. A fig. III.2-1 mostra, esquematicamente, o formato da mensagem GPS.

“As duas primeiras palavras de cada subquadro contém a palavra de Telemetria TLM e a palavra HOW. A TLM contém um preâmbulo de 8 bits que funciona como padrão de sincronização, facilitando o acesso aos dados de navegação. HOW contém o contador Z e muda a cada 6 segundos. O contador Z representa o número inteiro de 1,5 segundos de tempo decorridos desde o início da semana (início do segmento de 7 dias do código P). Deste modo, o contador Z varia de 0, no início da semana, a 403.199 imediatamente antes do final da semana ($24\text{hs} \times 3.600 \times 7 \text{ dias} / 1.5\text{s} = 403.200$). Através do contador Z, é possível saber a faixa do código P que deve ser varrida dentro da extensão de 7 dias, permitindo que o receptor sintonize este código. A palavra HOW contém um número, que multiplicado por quatro, fornece o contador Z do próximo subquadro” [Santos, 1990].

O conteúdo dos subquadros foi assim idealizado:

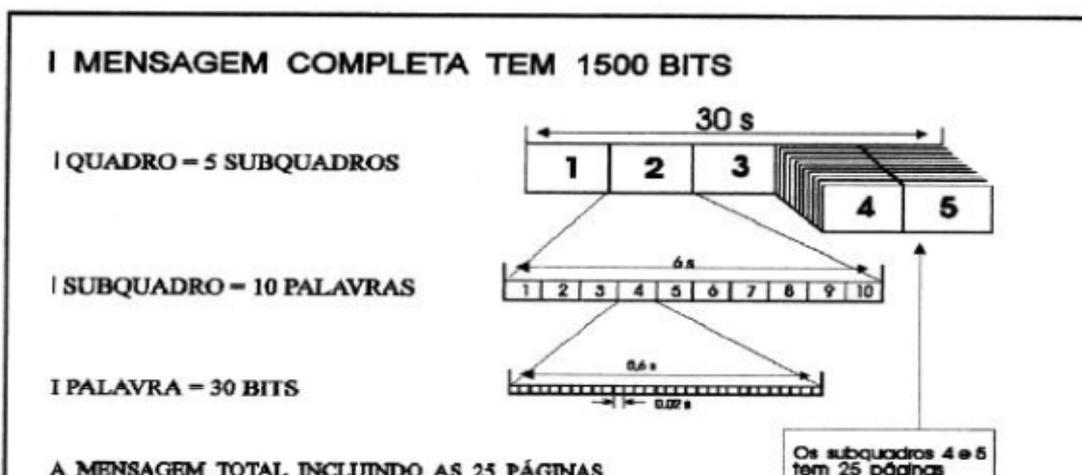


Fig. III.2-1 - Formato da mensagem GPS.

Subquadro 1

- número da semana GPS;
- número do satélite;
- idade dos dados;
- “saúde” do satélite;
- coeficientes para correção do relógio do satélite.

Subquadro 2 e 3

- parâmetros orbitais (efemérides transmitidas)

Subquadro 4

- modelo para a correção da refração ionosférica;
- diferenças de tempo GPS-TUC;
- almanaque para os satélites 25 a 32, no caso de mais do que 24 satélites estarem em órbita;
- estado de funcionamento (saúde) destes satélites.

Subquadro 5

- almanaque para os primeiros 24 satélites em órbita.
- estado de funcionamento (saúde) dos mesmos.

A saúde do satélite é uma expressão consagrada no GPS para informar as condições de funcionamento do mesmo, da transmissão das efemérides e das componentes do sinal.

A idade dos dados indica o intervalo de tempo decorrido desde a última atualização dos mesmos.

Os coeficientes para a correção do relógio permitem o modelamento da deriva do oscilador do satélite, a partir de um polinômio de segunda ordem.

Os parâmetros orbitais ou efemérides descrevem o movimento Kepleriano do satélite e são usados para o cálculo de sua posição.

Os almanaques dos satélites consistem nas efemérides dos mesmos, permitindo a obtenção menos precisa da posição para efeito de planejamento do rastreamento.

O modelo para correção da ionosfera é composto por um conjunto de 8 coeficientes, sendo essencial aos usuários com receptores de uma só frequência.

“Os subquadros 1 a 3 são repetidos em cada quadro, até que seus valores sejam renovados. Já os subquadros 4 e 5 fornecem dados distintos, através de 25 sequências consecutivas, após o que se repetem. Por isso, diz-se que estes dois últimos subquadros são divididos em 25 “páginas”. Cada página contém informações (mencionadas anteriormente) para um satélite. Como cada quadro tem a duração de 30 segundos, será necessário esperar 12,5 minutos ($30s \times 25 = 750s$), para a obtenção do conteúdo completo dos subquadros 4 e 5, supondo 25 satélites” [Santos, 1990].

O conteúdo do subquadro 1, e dos subquadros 2 e 3, é detalhado a seguir, com o símbolo adotado, significado e unidade:

“Subquadro 1:

SV-PRN - número do satélite (sem unidade)

WN - número da semana GPS (sem unidade)

URA - exatidão do satélite (sem unidade)

AODC - idade dos dados do relógio (segundos)

t_{oc} - tempo de referência para os parâmetros do relógio (segundos)

a_0, a_1, a_2 - coeficientes do polinômio para correção do relógio do satélite, representando, respectivamente, o estado, a marcha e a variação da marcha (s, s/s, s/s²)

Subquadro 2 e 3 (efemérides transmitidas):

M_0 - anomalia média no tempo de referência das efemérides (semi-círculo)

e - excentricidade (sem dimensão)

\sqrt{a} - raiz quadrada do semi-eixo maior (metros)

Ω_0 - ascensão reta do nodo ascendente no tempo de referência das efemérides (semi-círculo)

i_0 - inclinação da órbita no tempo de referência das efemérides (semi-círculo)

ω - argumento do perigeo

AODE - idade dos dados das efemérides (segundos)

t_{oc} - tempo de referência das efemérides (segundos)

Δn - correção do movimento médio (semi-círculo)

C_{uc}, C_{us} - amplitude dos termos harmônicos coseno e seno para correção do argumento da latitude (radianos)

C_{ic}, C_{is} - amplitude dos termos harmônicos coseno e seno para correção da inclinação da órbita (radianos)

C_{rc}, C_{re} - amplitude dos termos harmônicos coseno e seno para correção do raio vetor (metro)

$\dot{\Omega}$ - variação temporal da ascensão reta (semi-círculo/segundo)

\dot{i} - variação temporal da inclinação (semi-círculo/segundo)” (Santos, 1990).

Os seis primeiros parâmetros referentes aos subquadros 2 e 3 são chamados elementos Keplerianos. Definem o movimento orbital dos satélites quando sujeitos

somente à parte central da atração gravitacional. Referem-se a uma dada época t_{OE} . A fig. III.2-2 mostra os elementos Keplerianos, aparecendo na mesma a anomalia verdadeira (f) em lugar da anomalia média (M).

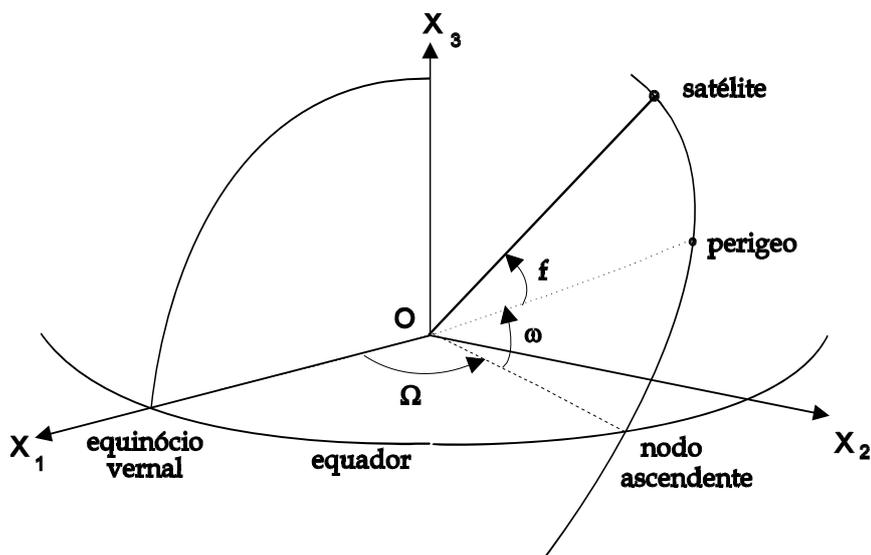


Fig III.2-2- Elementos orbitais.

Os parâmetros restantes que aparecem neste subquadro (excluídos t_{OE} e AODE) descrevem as variações de determinados elementos da órbita dos satélites, como resultado da ação de forças perturbadoras que agem sobre eles, tais como: o campo gravitacional da Terra, a atração luni-solar, a pressão da radiação solar e o atrito com a atmosfera.

III. 3 - Sistema de tempo GPS

O tempo GPS é um Sistema de Tempo Atômico, controlado por dois osciladores de césio e dois de rubídio a bordo dos satélites. Sua escala teve início às 0hs TUC, do dia 6 de janeiro de 1980 (meia noite do dia 5 para o dia 6). O tempo GPS não sofre a correção de segundo inteiro que periodicamente é aplicada ao TUC. Com isso, passou a existir uma diferença crescente entre eles a qual é informada pelos satélites no subquadro 4. Por exemplo, a partir de 01/01/1999 a diferença em questão passou a ser de 13 segundos (USNO), permanecendo até a seguinte correção ao TUC.

O tempo GPS é dado através do número da semana e do contador Z. O número de semanas GPS estava previsto para variar de 0 à 1.023, o que corresponderia a aproximadamente 20 anos. No dia 21 de agosto de 1999 à meia noite (0hs do dia 22) a contagem venceu e voltou a zero.

O tempo mantido pelos osciladores a bordo dos satélites sofre muito pouca oscilação em função da estabilidade daqueles osciladores. Entretanto, há também a dificuldade de manter uma perfeita sincronização no tempo dos diferentes satélites, o que acarreta a necessidade de observar e prever o comportamento dos relógios. Isto é feito pelo Sistema de Controle. Este comportamento é modelado por um polinômio de 2º grau. Os coeficientes do polinômio estão contidos no subquadro 1 da mensagem transmitida pelo satélite. A correção do tempo do satélite para o tempo GPS é feita por:

$$t_{GPS} = t_S - \Delta t \quad (III.3-1)$$

sendo

$$\Delta t = a_0 + a_1(t_{GPS} - t_{OC}) + a_2(t_{GPS} - t_{OC})^2 \quad (\text{III.3-2})$$

onde:

Δt - representa a correção do relógio do satélite em relação ao tempo GPS;

t_{GPS} - tempo do sistema GPS;

t_s - tempo no satélite;

t_{OC} - tempo de referência para os coeficientes a_0 , a_1 , a_2 .

“No cálculo de (III.3-2), t_{GPS} pode ser substituído por t_s sem perda de precisão. No cálculo de $t_{GPS} - t_{OC}$ deve-se atentar para o fato do tempo GPS ter extensão de uma semana. Assim, se $t_{GPS} - t_{OC}$ for maior do que 302.400, subtrai-se 604.800 de t_{GPS} . Se $t_{GPS} - t_{OC}$ for menor do que -302.400, soma-se 604.800 a t_{GPS} ” [Santos, 1990].

Diferenciando (III.3-2) obtém-se a deriva do relógio do satélite

$$\Delta \dot{t} = a_1 + 2a_2(t_{GPS} - t_{OC}) \quad (\text{III.3-3})$$

O parâmetro AODC (“Age of Data Clock”), idade dos dados do relógio, fornece o intervalo de tempo desde a última atualização da mensagem, possibilitando uma ponderação do relógio dentro de um algoritmo de ajustamento.

CAPÍTULO IV

MÉTODOS E MODELOS MATEMÁTICOS

A principal finalidade do sistema NAVSTAR/GPS é o de utilizar os sinais (códigos) recebidos do satélite para o posicionamento, ou seja, para obter as coordenadas do observador (antena do receptor) num determinado referencial. Alternativamente o sistema pode ser usado para determinar a velocidade (caso de um observador em movimento-veículo) ou obter informação precisa de tempo.

IV. 1 - Observações do código - distância

No caso específico do posicionamento, a grandeza fundamental que teoricamente deriva das observações é a distância estação-satélite. Originalmente o sistema previa a obtenção desta distância através de um dos códigos P ou C/A. Para tanto, o receptor tendo o relógio perfeitamente sincronizado com o relógio do satélite, deve gerar uma réplica do sinal (código) transmitido pelo mesmo. O sinal gerado é deslocado (atrasado) no tempo e comparado com o sinal recebido até se obter uma correlação (alinhamento) máxima entre os mesmos. O intervalo de tempo necessário para atingir a correlação corresponde ao tempo de percurso do sinal transmitido entre o satélite e o receptor. O mesmo multiplicado pela velocidade da luz resulta na referida distância. Na prática, existem três fatores que afetam esta determinação. Primeiramente não é possível obter uma perfeita sincronização entre os relógios da estação e do satélite. Além disso, existem atrasos na propagação do sinal através da atmosfera. Por fim, há um erro de sincronização dos relógios nos diversos satélites. A relação entre a distância “observada” R e a distância real ρ é a seguinte:

$$R_i = \rho_i + c \Delta t_{A_i} + c(\Delta t_u - \Delta t_{s_i}) \quad (i = 1,2,3,4 \text{ satélites}) \quad (\text{IV.1-1})$$

sendo

$$\rho_i = \left[(X_{s_i} - X)^2 + (Y_{s_i} - Y)^2 + (Z_{s_i} - Z)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{IV.1-2})$$

a distância estação-satélite. (A grandeza observada R_i é com frequência impropriamente denominada pseudo-distância).

Os dados transmitidos pelos satélites, como já foi descrito, permitem calcular as coordenadas cartesianas dos mesmos, bem como a correção do relógio Δt_s . O atraso Δt_A devido à atmosfera é calculado a partir dos modelos. Assim, as incógnitas são as coordenadas cartesianas da estação X , Y , Z e o erro de sincronização do relógio do receptor Δt_u . Elas podem ser determinadas a partir da observação de um mínimo de quatro satélites. As observações podem ser simultâneas ou sequenciais; se o observador estiver em movimento há necessidade de que elas sejam simultâneas.

Esta aplicação básica do GPS pode utilizar o código P ou C/A. A escolha de um ou outro código tem características distintas. Devido à frequência mais alta, o código P fornece mais precisão na determinação da distância e em consequência das coordenadas. Por outro lado, o fato do código P ser transmitido nas duas frequências permite que se obtenha uma adequada correção para o efeito da refração na ionosfera. Existe, porém, uma dificuldade vinculada com a extensão deste código. É impossível a um receptor varrer rapidamente o comprimento de 7 dias do código de modo a identificá-lo. É necessário que o satélite transmita uma informação complementar que permita conhecer o intervalo específico do código transmitido num determinado instante. Isto é feito junto com o código C/A e é chamado código HOW. Deste modo, mesmo que se pretenda utilizar somente o código P, é sempre necessário discriminar inicialmente o código C/A. Este por sua vez, além da frequência mais baixa o que aumenta a indefinição do tempo de percurso satélite-estação, é transmitido somente numa portadora. Isto impede de corrigir adequadamente o retardo devido à refração ionosférica.

A intenção inicial do Departamento de Defesa (DoD) dos Estados Unidos foi restringir o código P para o uso cívil codificando a informação HOW. A idéia evoluiu e o DoD decidiu encriptografar o código P sobrepondo ao mesmo uma nova modulação, o código Y. É o que se conhece por AS (Anti Spoofing). Isto faz com que o código P não possa ser utilizado nas aplicações civis em geral. Esta alternativa teve duas finalidades: primeiro, evitar que o código P seja usado; segundo, impedir que alguém, com intuito de perturbar o sistema, gere e transmita o código P de algum ponto na superfície da terra ou fora dela e que nada tenha a haver com a posição de um satélite. Isto resultaria numa posição espúria.

Baseado na disposição preliminar do DoD de limitar o uso do código P e considerando que o código C/A não atende às necessidades geodésicas, a comunidade científica estudou outras alternativas. Com a experiência do sistema Doppler e do VLBI não foi difícil imaginar uma técnica que fizesse uso da portadora.

IV. 2 - Medidas da fase

A alternativa de uso da portadora consiste em efetuar medidas de fase na frequência de batimento, no método conhecido por “fase de batimento da portadora”. Corresponde à diferença de fase entre o sinal de referência gerado pelo oscilador do receptor e o sinal por este recebido, transmitido pelo satélite, cuja expressão matemática é:

$$\Phi_j^i = \Phi^j(t) - \Phi_j(T) \quad (\text{IV.2-1})$$

onde Φ_j^i é a fase da frequência de batimento da portadora obtida no j-ésimo receptor para o i-ésimo satélite, $\Phi_j(T)$ é a fase do sinal gerado pelo j-ésimo receptor no instante ‘T’ em que o sinal transmitido pelo satélite chega ao receptor, e $\Phi^j(t)$ é a fase do sinal recebido, transmitido pelo i-ésimo satélite no instante ‘t’.

Como a fase do sinal recebido $\Phi^j(t)$ é idêntica à fase do sinal transmitido no instante da transmissão, este último pode ser modelado como:

$$t = T - \delta\tau \quad (\text{IV.2-2})$$

onde $\delta\tau$ corresponde ao tempo de percurso do sinal entre o satélite e o receptor, sendo expresso por:

$$\delta\tau = (\rho_j^i / c) + (\delta A_j^i / c) \quad (IV.2-3)$$

Na equação acima, ρ_j^i representa a distância entre as antenas do i -ésimo satélite e do j -ésimo receptor, e δA_j^i representa o efeito conjunto da refração ionosférica e troposférica ($\delta A = -\Delta_{ion} + \Delta_{trop}$).

A partir da equação (IV.2-2), $\Phi^i(t)$ pode ser expresso por:

$$\Phi^j(t) = \Phi^j(T - \delta\tau) \quad (IV.2.4)$$

Utilizando a linearização por Taylor, tem-se:

$$\Phi^j(t) = \Phi^j(T) - \frac{\partial\Phi}{\partial t} \delta\tau = \Phi^j(T) - f\delta\tau \quad (IV.2-5)$$

Substituindo as equações (IV.2-5) e (IV.2-3) na (IV.2-1), obtém-se uma nova expressão para Φ_j^i :

$$\Phi_j^i = \Phi^j(T) - \Phi_j(T) - (f/c) \rho_j^i - (f/c) \delta A_j^i \quad (IV.2-6)$$

A medida de fase Φ_j^i , primeiro membro da equação acima, é feita de maneira contínua pelo receptor desde o instante inicial T_0 da primeira medida $\Phi_j^i(T_0)$, sendo registrados valores em intervalos pré-fixados. Este monitoramento da fase é feito sem conhecer o número inteiro de ciclos entre o satélite e o receptor no referido instante. Visando dar um sentido geométrico à equação (IV.2-6) deve ser adicionada a incógnita N_j^i , conhecida por ambigüidade, que representa o número inteiro de ciclos no instante inicial T_0 :

$$\Phi_j^i = \Phi^j(T) - \Phi_j(T) - (f/c) \rho_j^i + N_j^i - (f/c) \delta A_j^i \quad (IV.2-7)$$

A equação (IV.2-7) é conhecida na literatura como modelo da “pura fase”. A solução da mesma esbarra na dificuldade do número excessivo de incógnitas, composto das coordenadas cartesianas do receptor, das frações de ciclo no satélite $\Phi^i(T)$ e no receptor $\Phi_j(T)$ e na ambigüidade N_j^i .

É conveniente representar a (IV.2-7) em unidades de comprimento o que se consegue multiplicando seus termos pelo comprimento de onda $\lambda=c/f$, obtendo-se:

$$\Phi = \rho + c(\Delta T - \Delta t) + \lambda N - \Delta_{ion} + \Delta_{trop} \quad (IV.2-8)$$

onde $\Phi = \lambda\Phi_j^i$ e os índices foram negligenciados. O sinal negativo do termo correspondente à refração ionosférica deve-se ao fato do sinal sofrer um retardo durante sua passagem por esta camada.

A equação (IV.2-8) é comparável à equação de distância (IV.1-1). A diferença fundamental entre as duas equações está na existência da incógnita N , razão pela qual se diz que a distância dada pela equação (IV.2-8) é ambígua. A menos que alguma

interrupção do sinal ocorra durante o rastreamento, a ambigüidade incógnita permanecerá invariável, isto é, existirá apenas uma ambigüidade para cada par receptor-satélite.

Os maiores desenvolvimentos na área do GPS nos últimos anos estão relacionados com as técnicas de resolução das ambigüidades. Inicialmente se constatou que uma boa geometria dos satélites facilitava a resolução, o que implica em efetuar observações por um período longo (horas). Mesmo assim, o sucesso do resultado é totalmente dependente da continuidade no monitoramento da fase, ou seja, na inexistência de eventuais perdas de ciclo ou perda da contagem dos ciclos inteiros durante o rastreamento.

Efeitos sistemáticos presentes nas observações exibem correlação entre sinais recebidos simultaneamente por diferentes receptores que observam os mesmos satélites, em diferentes instantes. O posicionamento relativo explora estas correlações, conseguindo um aumento da precisão, eliminando ou reduzindo efeitos sistemáticos e diminuindo o número de incógnitas.

A precisão possível com medidas de fase da portadora levou a comunidade geodésica ao desenvolvimento de modelos matemáticos baseados em combinações lineares de observações. Os modelos e combinações lineares são apresentados a seguir.

IV. 2.1 - Diferença de pura fase com o tempo

O modelo da pura fase, representado pela equação (IV.2-7), implica num número excessivo de incógnitas, somente contornável com um aumento grande das observações. Para sanar o problema, algumas alternativas são utilizadas. Uma primeira opção consiste em fazer a diferença da pura fase observada para um mesmo satélite em dois instantes distintos 1 e 2, resultando nas seguintes equações:

$$\Phi_j^i(T_1) = \Phi^i(T_1) - \Phi_j(T_1) - (f/c) \rho_j^i(T_1) + N_j^i(T_1) - (f/c) \delta A_j^i(T_1) \quad (\text{IV.2.1-1})$$

para o instante T_1 e

$$\Phi_j^i(T_2) = \Phi^i(T_2) - \Phi_j(T_2) - (f/c) \rho_j^i(T_2) + N_j^i(T_2) - (f/c) \delta A_j^i(T_2) \quad (\text{IV.2.1-2})$$

para o instante T_2 . A diferença da (IV.2.1-2) para (IV.2.1-1) resulta:

$$\begin{aligned} \Phi_j^i(T_{1,2}) = \Phi_j^i(T_2) - \Phi_j^i(T_1) &= [\Phi^i(T_2) - \Phi^i(T_1)] - [\Phi_j(T_2) - \Phi_j(T_1)] - (f/c) \\ &[\rho_j^i(T_2) - \rho_j^i(T_1)] - (f/c)[\delta A_j^i(T_2) - \delta A_j^i(T_1)] \end{aligned} \quad (\text{IV.2.1-3})$$

fazendo:

$$\Phi^i(T_{1,2}) = \Phi^i(T_2) - \Phi^i(T_1)$$

$$\Phi_j(T_{1,2}) = \Phi_j(T_1) - \Phi_j(T_2)$$

$$\rho_j^i(T_{1,2}) = \rho_j^i(T_1) - \rho_j^i(T_2)$$

$$\delta A_j^i(T_{1,2}) = \delta A_j^i(T_1) - \delta A_j^i(T_2)$$

obtem-se:

$$\Phi_j^i(T_{1,2}) = \Phi_j^i(T_2) - \Phi_j^i(T_1) = \Phi_j^i(T_{1,2}) + \Phi_j(T_{1,2}) + (f/c)[\delta \rho_j^i(T_{1,2}) + \delta A_j^i(T_{1,2})]$$

(IV.2.1-4)

supondo que não haja perda de sintonia entre os instantes 1 e 2. A característica da equação (IV.2.1-4) é a isenção de qualquer ambigüidade. Um bom resultado é alcançado quando se estende as observações por várias horas, exigência esta relacionada com a lenta variação da distância receptor-satélite.

IV. 2.2 - Simple diferença de fase

Aplicando a equação (IV.2-7) a dois receptores A e B, sintonizados no mesmo satélite i, obtém-se

$$\Phi_{AB}^i = \Phi_B^i - \Phi_A^i = \Phi_{AB}(T) + (f/c) \rho_{AB}^i + N_{AB}^i + (f/c) \delta A_{AB}^i \quad (IV.2.2-1)$$

onde: $N_{AB}^i = N_B^i - N_A^i$

$$\rho_{AB}^i = \rho_A^i - \rho_B^i$$

$$\Phi_{AB}(T) = \Phi_A(T) - \Phi_B(T) \quad (IV.2.2-2)$$

$$\delta A_{AB}^i = \delta A_A^i - \delta A_B^i$$

O termo $\Phi_{AB}(T)$ na equação (IV.2.2-1) representa o efeito de não-alinhamento entre os osciladores dos receptores e N_{AB}^i a ambigüidade inteira inicial entre os receptores A e B. Na referida equação desaparece a fase no satélite por ser a mesma para as duas estações, uma vez que se trata do mesmo satélite no mesmo instante.

“O modelo expresso pela equação (IV.2.2-1) indica a remoção dos efeitos dos erros associados com o relógio do satélite. Mas ainda percebe-se um número maior de incógnitas do que equações.

A simples diferença de fase ainda possibilita uma expressiva redução dos erros causados pela refração atmosférica, desde que a distância entre os receptores seja pequena em comparação com os 20.000 km de altitude dos satélites. Assume-se que, neste caso, como os sinais percorrem a camada atmosférica em regiões bem próximas, os efeitos causados pelas refrações ionosférica e troposférica sejam iguais, anulando-se” [Santos, 1990]. Estima-se como aceitável uma base máxima de 100 km.

A simples diferença de fase ainda possibilita uma redução nos erros causados pela incerteza dos parâmetros orbitais transmitidos.

IV. 2.3 - Dupla diferença de fase

Aplicando a equação (IV.2.2-1) a dois satélites i e k, obtém-se

$$\Phi_{AB}^{ik} = \Phi_{AB}^k - \Phi_{AB}^i = N_{AB}^{ik} + (f/c) \rho_{AB}^{ik} + (f/c) \delta A_{AB}^{ik} \quad (\text{IV.2.3-1})$$

onde $N_{AB}^{ik} = N_{AB}^k - N_{AB}^i$

$$\begin{aligned} \rho_{AB}^{ik} &= \rho_A^k - \rho_B^k - \rho_A^i + \rho_B^i \\ \delta A_{AB}^{ik} &= \delta A_A^k - \delta A_B^k - \delta A_A^i + \delta A_B^i \end{aligned} \quad (\text{IV.2.3-2})$$

Este modelo acarreta na remoção dos erros provenientes dos relógios do satélite e do receptor. O efeito da atmosfera é, na pior hipótese, minimizado bem como os parâmetros orbitais.

A posição de um dos receptores deverá ser conhecida.

IV. 2.4 - Tripla diferença de fase

Este método resulta da aplicação da (IV.2.3-1) a dois instantes T_1 e T_2 , implicando na seguinte equação:

$$\begin{aligned} \Phi_{AB}^{ik}(T_{1,2}) &= \Phi_{AB}^{ik}(T_2) - \Phi_{AB}^{ik}(T_1) = \\ &= (f/c)[\rho_{AB}^{ik}(T_2) - \rho_{AB}^{ik}(T_1)] - (f/c)[\delta A_{AB}^{ik}(T_2) - \delta A_{AB}^{ik}(T_1)] \end{aligned} \quad (\text{IV.2.4-1})$$

onde:

$$\begin{aligned} \rho_{AB}^{ik}(T_2) &= \rho_A^k(T_2) - \rho_B^k(T_2) - \rho_A^i(T_2) + \rho_B^i(T_2) \\ \rho_{AB}^{ik}(T_1) &= \rho_A^k(T_1) - \rho_B^k(T_1) - \rho_A^i(T_1) + \rho_B^i(T_1) \\ \delta A_{AB}^{ik}(T_2) &= \delta A_A^k(T_2) - \delta A_B^k(T_2) - \delta A_A^i(T_2) + \delta A_B^i(T_2) \\ \delta A_{AB}^{ik}(T_1) &= \delta A_A^k(T_1) - \delta A_B^k(T_1) - \delta A_A^i(T_1) + \delta A_B^i(T_1) \end{aligned}$$

A grande vantagem do modelo é a eliminação das ambigüidades. Assim como na Dupla Diferença, as coordenadas de um ponto devem ser conhecidas na solução. A exemplo dos modelos anteriores, a Tripla Diferença de Fase possibilita uma expressiva redução dos efeitos da atmosfera e dos parâmetros orbitais.

Em resumo, as simultâneas diferenças contribuem de duas maneiras na solução: reduzindo o número de incógnitas e eliminando ou minimizando o efeito dos erros sistemáticos. Porém, criam uma dificuldade complementar, pois, aumentam as correlações.

IV.3 - COMBINAÇÕES LINEARES DAS OBSERVAÇÕES

Combinações lineares entre observações de mesmo tipo podem ser formadas tanto entre as fases da portadora quanto dos códigos. Elas foram inicialmente usadas para eliminar o atraso da ionosfera; entretanto, mostraram-se úteis na solução da ambigüidade.

Uma combinação arbitrária das fases da portadora em L_1 e L_2 tem a forma:

$$\Phi_{nm}(t) = n\Phi_1(t) + m\Phi_2(t)$$

com n, m inteiros arbitrários. Existem infinitas combinações dependendo da escolha ilimitada de n e m. Entretanto as opções úteis devem satisfazer as seguintes condições:

- coeficientes inteiros para resultar em ambigüidades inteiras
- comprimento de onda razoavelmente longo para facilitar a fixação da ambigüidade
- baixa influência da ionosfera
- ruído limitado na observação

Duas combinações específicas são particularmente importantes: uma chamada banda larga em que $n = 1$ e $m = -1$:

$$L_{BL} = L_1 - L_2 \qquad \lambda_{BL} = 86,2 \text{ cm} \qquad (\text{IV.3-1})$$

e a outra banda estreita com $n = m = 1$

$$L_{BE} = L_1 + L_2 \qquad \lambda_{BE} = 10,7 \text{ cm} \qquad (\text{IV.3-2})$$

A vantagem da observação de banda larga, comparada com a observação original da L_1 , é que a ambigüidade a ser fixada refere-se a um sinal com um comprimento de onda quatro vezes maior. A desvantagem é que o ruído também será amplificado. A observação de banda estreita tem o menor ruído, mas é difícil fixar a ambigüidade em razão do menor comprimento de onda do que o sinal original. É usada em pequenas distâncias.

A magnitude do efeito nas duas combinações citadas é a mesma, porém, de sinal oposto. A média aritmética da banda larga e da banda estreita resulta num sinal livre da ionosfera:

$$L_o = \frac{L_{BL} + L_{BE}}{2} \qquad (\text{IV.3-3})$$

As ambigüidades das bandas larga e estreita são:

$$N_{BL} = N_1 - N_2 \quad (\text{IV.3-4a}) \qquad N_{BE} = N_1 + N_2 \quad (\text{IV.3-4b})$$

Há uma dependência entre elas. Quando uma delas é par a outra tem que ser par: da mesma forma, se uma for ímpar a outra será igualmente ímpar. É a conhecida “condição par-ímpar” cujo efeito é uma “reação em cadeia” no sentido de que, quando uma das ambigüidades é fixada as soluções indicam de maneira mais clara as demais ambigüidades.

IV. 4 - Solução da ambigüidade

Como foi mencionado, as medidas da fase são realizadas no receptor a partir de um dado instante T_0 , passando-se a monitorar a variação da fase a partir do instante inicial. Porém, desconhece-se qual o número inteiro de ciclos que ocorreu na portadora entre o satélite e o receptor. É por isso que a contagem que se obtém em qualquer momento $t_0 + \Delta t$ é um valor ambíguo. A “solução da ambigüidade”, expressão usada para indicar a determinação do número inteiro de ciclos entre o satélite e o receptor no instante t_0 , é essencial quando se deseja obter a diferença de coordenadas entre as antenas dos receptores, supondo o uso do método diferencial característico das aplicações geodésicas do GPS, com precisão da ordem do centímetro. Saliente-se que haverá uma ambigüidade para cada satélite observado por um receptor.

O problema da ambigüidade tornou-se a maior dificuldade do GPS para a geodésia e muitas estratégias foram pesquisadas para uma solução confiável e rápida. As principais são:

- geométrica
- combinações das fases do código e da portadora
- procura da ambigüidade
- métodos combinados.

A alternativa da geometria se aproveita da variação da relação geométrica entre o satélite e o receptor com o tempo. Observando o satélite durante um período longo e mantendo uma contagem contínua durante o mesmo, a ambigüidade inicial não muda. Por outro lado, obtém-se uma diferença de coordenadas oriunda do efeito Doppler, tal como no sistema TRANSIT, permitindo a determinação das coordenadas do ponto. Com estas coordenadas pode-se calcular a distância estação-satélite e comparar com a distância observada ambígua (eivada da ambigüidade). Da comparação deriva-se diretamente a ambigüidade.

Esta técnica funciona bem se o período de observação for longo (≥ 2 hs.), se o número de satélites for no mínimo quatro e se não houver interrupção da sintonia com os satélites. Se houver perda de um satélite e os restantes forem menos do que quatro é necessário introduzir uma nova ambigüidade de um novo satélite. Os valores da ambigüidade assim estimados são números fracionários. Eles poderão ser fixados como inteiros se forem muito próximos de um número inteiro, ou seja, se o erro relativo na direção satélite-receptor for menor do que meio ciclo (< 12 cm). Este particular exige um tempo longo de observação. Uma determinação errônea da ambigüidade resulta em erros sistemáticos nas coordenadas.

A combinação das fases do código e da portadora vale-se do caráter não ambíguo das medidas de fase sobre o código uma vez que sua estrutura é conhecida. Este método independe da geometria, mas exige um baixo nível de ruído nas medidas do código. Isto somente é possível com o código P. Em função das restrições ao mesmo esta alternativa geralmente é difícil de ser aplicada.

A “procura da ambigüidade” consiste em iniciar por um valor aproximado resultante, por exemplo, da solução fracionária e a partir daí restringir o vetor solução a valores inteiros aplicando técnicas de otimização. O problema básico é que o número de operações aritméticas aumenta drasticamente com o número de elementos das possíveis

soluções. Este processo vem sendo aperfeiçoado e parece ser a alternativa mais promissora permitindo a fixação “instantânea” da ambigüidade, viabilizando as aplicações cinemáticas do GPS, particularmente aéreas. É a chamada solução da ambigüidade “em movimento” (“on the fly” ou “on the way”).

O método combinado utiliza de uma forma ou de outra diversas das técnicas anteriores e outras. A idéia básica é que uma ambigüidade fixada estabiliza a solução num passo seguinte.

É importante salientar que se houver uma base conhecida, iniciando as observações nos extremos da mesma, as ambigüidades podem ser fixadas com poucos minutos de observação.

IV.5 – Métodos rápidos de posicionamento

A partir da euforia inicial de resolver a ambigüidade em duas horas de observações e com isso obter uma posição com precisão centimétrica, nasceu a aspiração de diminuir a espera para poucos minutos de rastreamento ou até obter a posição instantânea sem perder a precisão. Daí surgiram os métodos rápidos de posicionamento cujo problema básico está ligado à resolução da ambigüidade. Vários autores ligaram os seus nomes às tentativas de diminuir o tempo de observação ou mesmo observar somente numa época fixando as ambigüidades. São eles: B. W. Rimondi, G. Wübenä, G. L. Mader, G. Beutler entre outros. A proliferação das idéias levou também a uma diversidade de denominações, tais como: cinemático, pseudo-cinemático, ‘stop and go’, pseudo-estático, rápido estático; nem sempre caracterizando uma técnica independente. Talvez o autor que primeiro conseguiu estabelecer uma lógica nos conceitos e sugerir uma nomenclatura coerente foi [Seeber, 1993]. Segundo o autor os métodos rápidos podem ser classificados em três tipos:

- Cinemático
- Pseudo-cinemático
- Rápido Estático

O método cinemático pressupõe que um veículo ou aeronave em movimento, a partir de um dado instante, inicie o rastreamento dos satélites disponíveis, resolva instantaneamente as ambigüidades e continue seu movimento, determinando a sua posição a intervalos pequenos de tempo (e.g. 1s). Esta alternativa pressupõe a aplicação de métodos rápidos de resolução das ambigüidades (‘on the fly’). O método é aplicado em levantamentos marinhos de precisão, em aerofotogrametria, etc.

Há casos em que pode-se inicialmente resolver as ambigüidades através de um método estático qualquer e, a partir daí, deslocar uma das antenas ocupando os pontos que se fizerem necessários, sem perder a sintonia aos mesmos satélites. A permanência em cada ponto pode ser muito curta (1 min.). O método é conhecido como ‘pseudo cinemático’ e se presta a levantamentos locais de precisão como controle de uma estrutura de engenharia, por exemplo, uma barragem.

A idéia básica do método conhecido como ‘rápido estático’ é de permanecer por pouco tempo em cada ponto (5 – 10 min.) sem a preocupação de resolver preliminarmente as ambigüidades. Há duas alternativas normalmente usadas: primeiramente uma simples ocupação dos pontos. Os receptores podem ser desligados durante o trajeto e as

ambigüidades precisam ser resolvidas em cada ponto com as observações disponíveis. O método funciona satisfatoriamente se a geometria for boa, o que implica em um número maior possível de satélites. A segunda alternativa utilizada é planejar o levantamento de tal modo que as estações sejam reocupadas depois de algo entorno de 1h. A idéia fundamental que justifica a estratégia é a ciência de que uma boa geometria se consegue, não necessariamente rastreando por uma hora, mas retornando ao ponto depois de uma hora. Assim, a antena é estacionada num ponto inicial por 5 min., deslocada para o ponto seguinte sem necessidade de manter a sintonia aos satélites, estacionado por outros 5 min. e assim sucessivamente até completar 1h.; volta-se então ao ponto inicial repetindo o procedimento. O arquivo é tratado como um conjunto único de observações (daí a conveniência em não desligar o receptor durante a operação) e a falta de sintonia durante o deslocamento de um ponto ao outro é considerada perda de ciclos, recebendo o tratamento normalmente empregado para esta deficiência do sistema GPS.

IV.6 - DGPS

O posicionamento geodésico usando observações da fase é feito no método relativo ou diferencial. As várias possibilidades de correlacionar diferentes estações, diferentes satélites e diferentes instantes conduz aos métodos descritos no parágrafo IV.2. Mas há uma técnica específica de posicionamento relativo com o uso do código C/A que vem sendo bastante utilizada e é conhecida por DGPS (Differential Global Positioning System). Além do AS, até 1º de maio de 2000 havia uma outra restrição no sistema GPS conhecida como SA (Selective Availability). Tratava-se de um erro proposital introduzido no tempo do satélite. A idéia do DGPS era eliminar os efeitos sistemáticos causados pelo SA e por outros fatores. O SA causava um erro de até 100 m na posição absoluta com o código C/A. Com a desativação daquela restrição o erro ficou reduzido para 25 m no máximo. Utilizando a técnica do DGPS o erro cai para 1-5 m. Para tanto, um receptor é colocado fixo num ponto com coordenadas previamente determinadas e assim são obtidas correções a serem aplicadas por um usuário (veículo). Podem ser derivadas correções para a posição ou para a distância. No primeiro caso são comparadas as coordenadas conhecidas na estação fixa com aquelas obtidas do rastreamento dos satélites. As diferenças serão as correções a serem aplicadas ao usuário móvel. No segundo caso, são comparadas as distâncias aos satélites rastreados; são calculadas diferenças entre as distâncias obtidas a partir das coordenadas da estação e do satélite com as distâncias obtidas pelo rastreamento.

Neste caso, são corrigidas as distâncias aos satélites rastreados simultaneamente na estação fixa e na móvel. Esta última alternativa é mais recomendável pois as coordenadas nas duas estações, fixa e móvel, podem não resultar do rastreamento dos mesmos satélites.(Fig. IV.5).

Uma possibilidade é armazenar os dados nos dois receptores para posterior processamento. Quando se exige a posição em tempo real do receptor móvel é necessário que a estação-base transmita via rádio as correções para que sejam recebidas e aplicadas. Este é o caso mais comum na navegação. Já existem iniciativas neste sentido inclusive com uma padronização das correções transmitidas numa taxa de 50 bps pela “Radio Technical Committee for Marine Services” (RTCM).

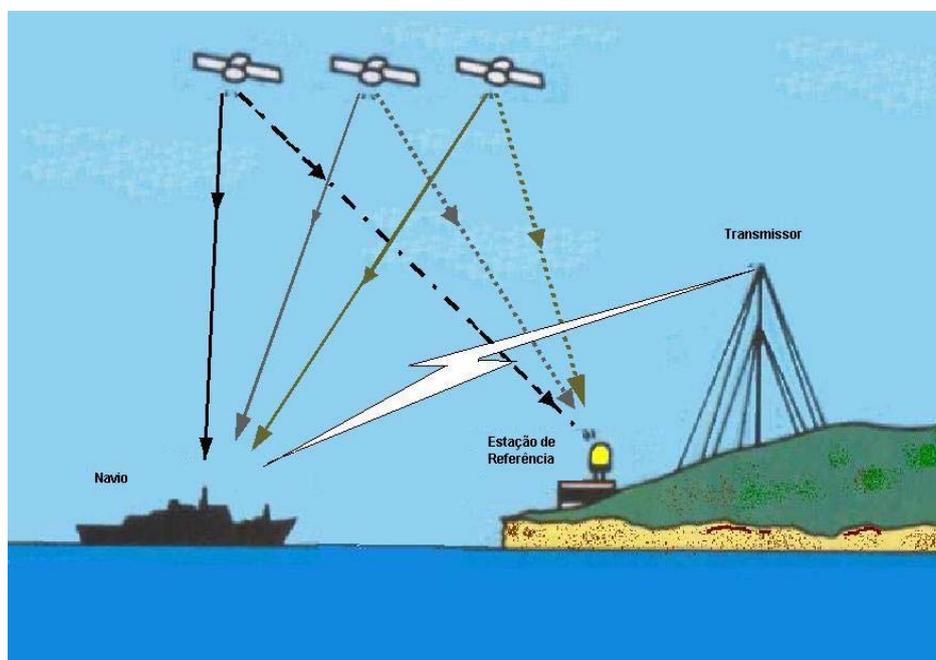


Fig. IV.5 - Aplicação do DGPS

Além do AS, o DoD implementou, durante vários anos, uma outra restrição conhecida com Selective Availability (SA). Através da mesma era introduzido um erro proposital e conhecido, podendo ser nas efemérides e/ou no relógio do satélite. Durante a sua vigência a restrição ocorreu somente no relógio. A partir de 2 de maio de 2000, por decreto presidencial, o DoD dos Estados Unidos desativou o SA. A idéia do DGPS foi eliminar os efeitos sistemáticos, em particular, aquele resultante do SA nas aplicações do GPS em navegação. Evidentemente que outros efeitos sistemáticos também são eliminados, desde que ocorram nas duas estações.

O erro típico na posição absoluta de um receptor que usa o código C/A é de ± 30 m. Com o SA ligado este erro aumentava para ± 100 m. Com a alternativa do DGPS o erro fica na ordem de 1 a 5 m no posicionamento do receptor móvel.

As possibilidades de aplicação são:

- a) navegação mais precisa em águas costeiras
- b) aproximação ao porto
- c) mapeamento do fundo oceânico
- d) hidrografia
- e) levantamentos sísmicos e gravimétricos
- f) posicionamento de sensores submersos na prospecção mineral no mar
- g) calibração de sistemas de retransmissão.

IV.7 – Posicionamento preciso por ponto

A expressão posicionamento preciso por ponto (PPP) significa a determinação de coordenadas com precisão de centímetros, ou mesmo alguns milímetros, utilizando somente um receptor, portanto, posicionamento absoluto. Contrapõe-se ao uso de dois receptores através da dupla diferença de fase; este também oferece precisão centimétrica. Por outro lado, difere ainda da alternativa de uso do código, seja no modo absoluto como no relativo, cuja precisão é da ordem de metros. O posicionamento PPP se vale do conhecimento da órbita dos satélites com alta precisão e da perfeita sincronização entre os relógios dos satélites através de correções adequadas. Estes dois aspectos justificam a denominação 'preciso' por tratar-se de produtos de alta qualidade para o processamento. Por outro lado, a alta precisão exige o uso de receptores geodésicos com dupla frequência e a opção de medidas de fase de batimento da portadora.

CAPÍTULO V

O GPS E A ALTIMETRIA

Há uma expectativa de usar o sistema GPS para determinar a altitude ortométrica, evitando assim a onerosa operação do nivelamento geométrico. Ao nível de precisão que normalmente se requer a altimetria, isto não pode ser feito com o código C/A. Seria possível usar o código P e com certeza a fase de batimento da portadora.

Através das observações GPS no método diferencial, obtém-se as coordenadas cartesianas X, Y, Z de um ponto desconhecido em função das diferenças de coordenadas fornecidas pelo GPS e das coordenadas supostamente conhecidas do ponto de partida. A relação entre as coordenadas cartesianas e as geodésicas é:

$$X = (N + h) \cos\phi \cos\lambda \quad (\text{V.1})$$

$$Y = (N + h) \cos\phi \operatorname{sen}\lambda$$

$$Z = [N(1 - e^2) + h] \operatorname{sen}\phi$$

a partir das quais o terno geodésico (ϕ , λ , h) é obtido em função de (X, Y, Z). A longitude é derivada diretamente enquanto a latitude e a altura geométrica são calculadas por um processo iterativo. A grandeza altimétrica que compõe o terno geodésico é a altura geométrica h . Esta se relaciona com a altitude ortométrica H de maneira aproximada, através da altura geoidal N :

$$h \cong N + H \quad (\text{V.2})$$

A aproximação é devida ao fato das três grandezas não serem co-lineares. Assim, a determinação de H utilizando o GPS implica no conhecimento da altura geoidal.

Contribuem atualmente para a determinação das alturas geoidais os modelos do geopotencial, os levantamentos gravimétricos e as observações sobre os satélites artificiais quando conduzidas sobre o rede de nivelamento. No primeiro caso é obtida a componente de longo comprimento de onda da altura geoidal. No segundo, as anomalias da gravidade são utilizadas na integral modificada de Stokes para obter a componente de curto

comprimento de onda da altura geoidal. Finalmente, observações aos satélites artificiais, seja com o antigo sistema TRANSIT ou atualmente com o GPS, sobre a rede de nivelamento, permitem o uso de (V.2) para determinar N , uma vez que H é conhecido do nivelamento.

A Fundação IBGE e a Universidade de São Paulo têm trabalhado ao longo dos últimos dez anos num projeto de melhoria da carta geoidal no Brasil. Neste sentido, um intenso programa de observações com o sistema TRANSIT foi conduzido sobre a rede de nivelamento de 1a. ordem resultando em um total de mais de 200 pontos. Este trabalho foi realizado na década de 70. No momento, a atenção está voltada para o GPS e já se dispõe de mais de uma centena de alturas geoidais derivadas. Levantamentos gravimétricos também têm sido intensificados de modo a melhorar a cobertura, sobretudo em regiões vazias. Estes dados e o mais recente modelo do geopotencial, EGM96, permitiram obter uma versão recente da carta geoidal (Fig. V). O erro absoluto esperado desta carta é inferior a 2 m e o relativo de 2 cm/km (20 PPM).

Em muitas aplicações da cartografia e sobretudo da engenharia as precisões exigidas são bem superiores às da carta geoidal disponível. Daí a razão que justifica novos esforços para a melhoria da carta geoidal.

Por outro lado, o sistema GPS sempre trabalha no modo diferencial quando as precisões exigidas são altas. Se na estação de referência do GPS a altura geoidal for conhecida de alguma forma e a estação a determinar não estiver muito distante (poucas dezenas de quilômetros) o uso da diferença de altura geoidal entre os dois pontos pode oferecer uma maior confiança na determinação da altitude ortométrica com o sistema GPS. Assim, sejam os pontos 1 e 2 com as respectivas coordenadas geodésicas, altura geoidal e altitude ortométrica:

Ponto 1: $\varphi_1, \lambda_1, h_1, N_1, H_1$

Ponto 2: $\varphi_2, \lambda_2, h_2, N_2, H_2$

Considere-se a diferença de altitude geométrica entre os dois pontos:

$$h_2 - h_1 = dh \quad \text{ou} \quad H_2 + N_2 - H_1 - N_1 = dh$$

$$H_2 = H_1 - N_2 + N_1 + dh \quad \text{ainda:}$$

$$H_2 = H_1 + (N_1 - N_2) + dh$$

$$\text{Finalmente:} \quad H_2 = H_1 + dN + dh$$

Admitindo que o ponto 1 seja inteiramente conhecido, obtém-se a altitude ortométrica de 2 em função da diferença de altura geoidal e da diferença de altitude geométrica entre os dois pontos. A vantagem é que a carta geoidal necessita de uma precisão relativa e não absoluta compatível com a exigência do levantamento, o que é sempre mais viável.

Carta Geoidal do Brasil

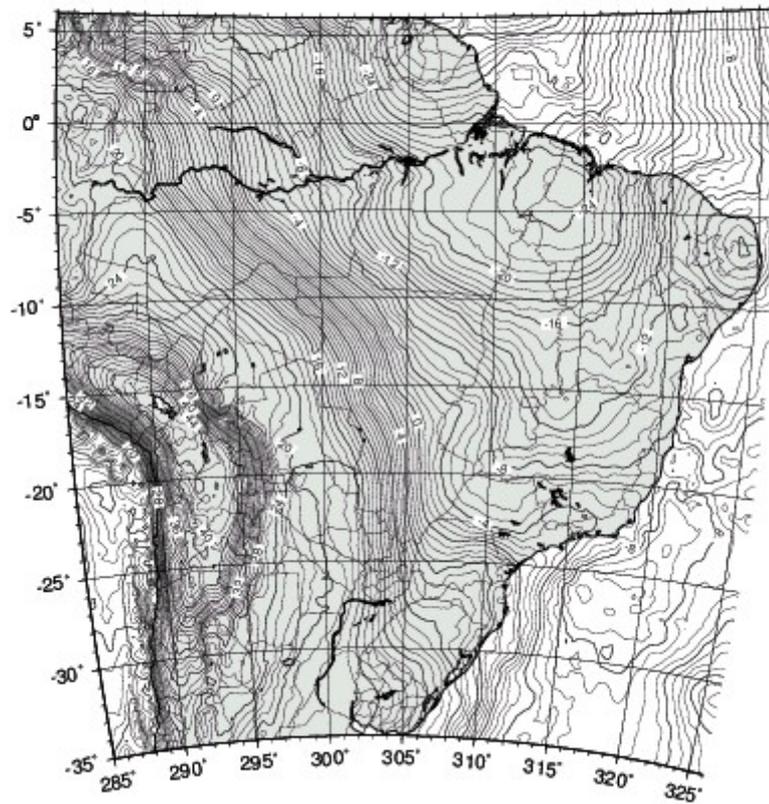


Fig. V – Modelo geoidal do Brasil.

CAPÍTULO VI

O GPS E A ENGENHARIA

O sistema GPS traz importantes benefícios e avanços para a engenharia. Em grandes obras civis o sistema facilita a implantação de apoio topográfico para a locação da obra, permite levantar planimetricamente uma obra existente, contribui no monitoramento e no controle de grandes estruturas e finalmente auxilia no cadastro e no controle de entidades as mais diversas. O transporte aéreo, marítimo e terrestre receberam igualmente um benefício surpreendente com a facilidade de posicionamento do sistema GPS. O resultado é a melhoria do planejamento e da logística no transporte e na entrega de mercadorias.

VI.1 - APOIO TOPOGRÁFICO

Os trabalhos de apoio conduzidos através dos processos topográficos, hoje valendo-se de estações totais eletrônicas, exigem o conhecimento de um ponto de partida com coordenadas conhecidas e de uma direção com um azimute estabelecido. Esta tarefa ficou tremendamente facilitada com o sistema GPS. Utilizando receptores geodésicos de uma ou duas frequências as coordenadas podem ser transportadas em distâncias de centenas ou até milhares de quilômetros com precisão de poucos centímetros em um intervalo de 2 hs. ou até menos. Desta forma, é fácil implantar dois pontos de apoio numa área de interesse transportando as coordenadas desde uma estação pertencente a uma rede qualquer de referência. Isto satisfaz a exigência da topografia em relação às coordenadas e ao azimute. A condição fundamental para a perfeita operação do GPS é um horizonte razoavelmente desobstruído relativo à antena do receptor. Com isso, o próprio levantamento topográfico na área de interesse fica restrito aos pontos que apresentem deficiência de visibilidade aos satélites devido a obstáculos como: vegetação, edificação, etc. O levantamento total de uma obra já existente também se vale da combinação do sistema GPS com os métodos topográficos. Neste caso o GPS supre igualmente a tarefa para todos os pontos com uma visibilidade favorável.

O monitoramento de grandes estruturas é fundamental para a segurança. Diversos controles são necessários, entre eles a deformação e o deslocamento. O controle do deslocamento implica em utilizar como referência um ponto com uma estabilidade confiável de modo que uma possível variação nas coordenadas ou na distância em relação à referência possa realmente ser atribuída a um deslocamento da estrutura. Quando o ponto de referência está próximo à estrutura e, portanto, na área de influência da mesma, ele pode estar sofrendo algum tipo de deslocamento simultâneo com a estrutura. O GPS traz um grande aporte para este problema permitindo observações desde um ponto remoto com uma estabilidade recomendável.

Em diversos processos na área operacional faz-se necessário proceder a um cadastro de entidades que, ou precisam ser periodicamente monitoradas ou entram na avaliação para implementação de mudanças, atualizações ou mesmo implantação de novas tecnologias. Exemplos práticos são as torres ou postes de transmissão de energia, estações de retransmissão de sinais de micro-ondas (telefonia), residências para implementação de novas tecnologias (TV a cabo), etc. A obtenção de coordenadas nestes entes para eventual implementação em um sistema de informação geográfica (SIG) é possível e rápida com um

receptor GPS. Igualmente aí a precisão exigida irá apontar a técnica recomendável e o equipamento adequado.

VI.2 - O GPS NO TRANSPORTE

O sistema GPS foi desenvolvido com um objetivo básico: atender à navegação aérea. Com isso ele realiza basicamente todo o tipo de posicionamento de veículos em movimento. A precisão exigida varia em função do objetivo do posicionamento do ente em movimento. O uso simples do código C/A fornece um erro máximo de ± 30 m. Isto é suficiente para posicionar uma aeronave em rota ou um navio em um cruzeiro em alto mar. Mas há inúmeros casos que um erro de 30 m pode não ser desejável. Por exemplo, uma aeronave no procedimento de aproximação para pouso, uma navegação costeira mais cuidadosa, um levantamento marinho para fins de pesquisa e estudo, etc. Neste caso o DGPS constitui uma alternativa promissora.

O sistema GPS vem se constituindo numa componente importante do transporte rodoviário de cargas. Um veículo de carga equipado com um receptor GPS e um sistema de transmissão pode ter seu movimento monitorado por uma central de controle. Esta facilidade tem reflexo no planejamento do transporte, no monitoramento das condições de operação do veículo e na segurança da operação. Nas aplicações mais gerais o receptor GPS pode operar simplesmente com o código C/A. A transmissão das informações, do veículo para uma central de controle, pode ser via um "link" de rádio ou utilizando um satélite de comunicação. No primeiro caso, fica-se restrito à área ou corredor atendido pelo "link". O satélite viabiliza transmissões em longas distâncias, possibilitando operações de caráter nacional e até continental.

Os sistemas de monitoramento de carga, numa versão mais simples, contemplam a transmissão da posição do veículo para uma central de controle, sem numhuma interferência do motorista, que mantém uma conveniente vigilância sobre o seu deslocamento. Um passo mais avançado é dado quando o veículo dispõe de uma unidade de controle com algumas teclas que, quando acionadas, dão conhecimento à central de simples mensagens pré-formatadas, tais como: emergência, acidente, tráfego interrompido, etc. A central pode, eventualmente, transmitir mensagens mais completas para o motorista que as lê na unidade do veículo. Uma interação maior entre o motorista e o veículo é conseguida se a unidade de controle do veículo for mais completa e permitir que o motorista digite informações e as transmita para a central, assim como, receba respostas da central. A sofisticação do sistema como um todo pode aumentar se o mesmo contemplar a colocação de sensores no veículo, tais como: temperatura e rotação do motor, velocidade do veículo, consumo de combustível, abertura do compartimento de carga, etc. Estas informações, sendo transmitidas para a central com uma frequência desejável, resultam numa maior assistência e monitoramento. A abertura do compartimento de carga pode inclusive ter a opção de ser acionada somente pela central de controle.

CAPÍTULO VII

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A restrição ao código P, acenado desde o início pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos determinou uma busca de novas alternativas de uso do GPS para o posicionamento de alta precisão. Com isso nasceu a técnica de uso da portadora com medidas da fase, descritas no capítulo IV.

A portadora pode ser obtida de duas maneiras distintas. A primeira, mais lógica e direta, consiste em subtrair o código (e evidentemente as mensagens). Como os dois códigos são modulados em fases distintas, a tarefa pode ser conseguida com o código P ou C/A independentemente. Porém, mantida a restrição ao primeiro, resta somente a alternativa do segundo. Neste caso fica-se restrito somente a uma frequência, aquela em que o código C/A é modulado, com a conseqüente impossibilidade de corrigir o efeito da refração ionosférica. A segunda alternativa é quadrar o sinal recebido. Neste caso elimina-se tanto um como outro código, tendo em vista que eles assumem sempre os valores +1 ou -1, podendo-se dispor das duas frequências. Porém a conseqüência é que haverá um aumento no ruído com uma perda na qualidade do sinal a ser utilizado nas observações. Não obstante este fato, em anos passados os fabricantes colocaram à disposição receptores que utilizavam a referida técnica.

Hoje porém, existe uma nova geração de receptores que usam uma tecnologia especial de recuperação do código P a partir do Y. Como este tem uma frequência muito baixa (50 bps) o fato é aproveitado para reconstituir o código P através de um processo de correlação.

O posicionamento por satélite genericamente pode ser feito de modo absoluto ou relativo. No primeiro caso, são determinadas as coordenadas de um ponto (receptor) de maneira independente. Isto é conseguido instantaneamente pelo GPS usando um dos códigos. No segundo caso, são determinadas as diferenças de coordenadas entre dois pontos. Isto exige que as observações sejam simultâneas e neste caso pode-se usar o código ou a fase.

O uso do GPS que oferece uma alta precisão é a fase de batimento da portadora no método relativo.

BIBLIOGRAFIA

- ANDRADE, J.B. (1988) NAVSTAR-GPS. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. UFPr. Curitiba.
- ARIAS, E.F.; CHARLOT P.; FEISSEL M. e LESTRADE J.F. (1995) - The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service, ICRS. *Astronomy and Astrophysics*, 303, pp. 604-608.
- BLITZKOW D. e SÁ N.C. de (1985) - NAVSTAR/GPS - A situação presente e as perspectivas futuras. XIIº Congresso Brasileiro de Cartografia. Brasília.
- BLITZKOW D.; CINTRA J.P. e FORTES L.P.S. (1991) - A contribution to the geoid determination. XX Assembléia Geral da UGGI, Viena.
- First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, vols. I e II. U.S. Department of Commerce, NOAA. Maryland, April 15-19, 1985.
- Global Positioning System (1980) - Papers published in *Navigation*. The Institute of Navigation, vols. I e II. Washington.
- GROTEN E. and STRAUSS R. (1988) *GPS - Techniques applied to Geodesy and Surveying*. Springer-Verlag.
- Ma C. & Feissel M. (1997). *Definition and Realization of the International Reference System by VLBI Astrometry of Extragalactic Objects*. IERS Technical Note 23. Observatoire de Paris. Central Bureau of IERS. Paris.
- McCARTHY D. D. (1992). IERS Technical note 13. Observatoire de Paris. Central Bureau of IERS. Paris.
- SANTOS M.C. (1990) NAVSTAR/GPS: Aspectos teóricos e aplicações geofísicas. Dissertação de Mestrado. Observatório Nacional - CNPq. Rio de Janeiro.
- SEEBER G. (1993). *Satellite Geodesy - Foundations, methods and applications*. Walter de Gruyter. Berlin.
- WELLS D. (1986) - *Guide to GPS Positioning*. Canadian GPS Associates. University of New Brunswick. Fredericton.