
Ministerio da Ciência e Tecnologia
Conselho Nacional de Desenvolvimento
Científico e Tecnológico



**OBSERVATÓRIO
NACIONAL**

PUBLICAÇÃO ESPECIAL

Nº 07
1990

NAVSTAR/GPS: ASPECTOS TEÓRICOS E
APLICAÇÕES GEOFÍSICAS

Marcelo C. dos Santos

*Tese de Mestrado
Rio de Janeiro, Maio/90*

PUBLICAÇÕES DO OBSERVATÓRIO NACIONAL

CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTIFICO E TECNOLÓGICO

OBSERVATÓRIO NACIONAL

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

NAVSTAR/GPS:
ASPECTOS TEÓRICOS E APLICAÇÕES GEOFÍSICAS

MARCELO CARVALHO DOS SANTOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Rio de Janeiro, Maio de 1990



Dedicatória

*Dedico este trabalho a meus pais, e a minha esposa,
Denise, por seu apoio e compreensão.*

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Denizar Blitzkow, da Universidade de São Paulo, por sua valiosa orientação na escolha e desenvolvimento do tema de Tese, sua grande paciência, e sua sincera amizade.

Ao Prof. Dr. Roland Baraud, do Observatório Nacional, por sua eficiente co-orientação.

Ao Prof. Dr. Petr Vaníček, da Universidade de New Brunswick, por seus ensinamentos e esclarecimentos sobre o GPS.

Aos colegas da pós-graduação em Geofísica, Edvaldo Simões da Fonseca Junior, Renato Fontes Guimarães, Roberta Mary Vidotti, e da pós-graduação em Astrofísica, Claudio Bastos Pereira, M.Sc. e Miguel Ayan Gaya, M.Sc., pelas valiosas discussões sobre diversos assuntos deste trabalho.

Ao Engenheiro Márcio Henrique de Oliveira Aquino, M.Sc., da Petrobrás S.A., pelas discussões envolvendo aspectos inerentes ao Capítulo 4.

Ao Engenheiro Herbert Erwes, da Casa Wild-Kern, por seu inestimável apoio no processamento dos dados.

Ao Prof. Dr. John LaBrecque, da Columbia University, e aos Profs. Drs. Marcus Aguiar Gorini e Wendelin Franz Lotze, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, pelo apoio encontrado.

A Rosane Marques S. dos Santos e Edvardes Ramos Filho, pela confecção das figuras do trabalho.

Aos pesquisadores, engenheiros, técnicos e demais funcionários do Observatório Nacional.

A todos os colegas da pós-graduação, cujo convívio tornou menos árduo o desenrolar deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta os aspectos teóricos do *Navigation System using Time and Ranging/Global Positioning System*, conhecido pela sigla *NAVSTAR/GPS*. Este Sistema é uma poderosa ferramenta capaz de fornecer posição tri-dimensional precisa, independente de condições climáticas. O *NAVSTAR/GPS* se serve de duas observáveis básicas: medidas de pseudo-distância e de fase da frequência de batimento da portadora. Estas observáveis são afetadas por alguns efeitos sistemáticos, quais sejam, os erros oriundos da dessincronização dos relógios dos satélites e do receptor, efeitos da ionosfera e troposfera, incertezas dos parâmetros orbitais e a ambiguidade do ciclo inteiro, este último apenas quando se utiliza medidas de fase. Estes efeitos devem ser eliminados ou drasticamente reduzidos no caso em que uma posição bastante precisa seja desejada. No bojo deste trabalho são descritas as alternativas que lidam com estes efeitos. São apresentados os modelos matemáticos para as várias combinações lineares entre as observações. Inclui-se igualmente as características do posicionamento estático e cinemático, no modo absoluto e diferencial. São descritas as tarefas geofísicas com as quais o *NAVSTAR/GPS* pode colaborar. O sistema demonstra potencial para satisfazer até mesmo às maiores exigências da Geodinâmica. Por fim, calculou-se uma base, medida com receptores *NAVSTAR/GPS*. Os resultados obtidos confirmam o nível de precisão esperado.

ABSTRACT

The theoretical aspects of the Navigation System using Time and Ranging/Global Positioning System (NAVSTAR/GPS) are presented. This System is a powerful tool which provides accurate tri-dimensional positioning regardless weather conditions, in a worldwide basis. NAVSTAR/GPS works with two basic observables: pseudo-range and carrier beat phase measurements. These observables are affected by some biases, namely, satellite and receiver clock error, ionospheric and tropospheric effects, orbital parameters uncertainties and the integer cycle ambiguity, the last when dealing with phase measurements. These biases should be eliminated or drastically reduced if accurate positioning is desired. Several approaches can be taken to cope with these biases. The mathematical models for the various linear combinations between the observations are presented. The inherent characteristics of static and kinematic positioning, either in absolute or differential modes are also included. The geophysical tasks where NAVSTAR/GPS can help are described. It is shown that NAVSTAR/GPS can satisfy even the most stringent requirements of Geodynamics. At last, a baseline measured with NAVSTAR/GPS receivers is computed. The results confirm the accuracy level previously expected.

SUMARIO

CAPITULO 1	1
INTRODUÇÃO	
CAPITULO 2	4
HISTÓRICO DOS SISTEMAS DE RASTREIO DE SATÉLITES	
2.1 - Definição	4
2.2 - Rastreo Ótico	4
2.3 - Rastreo Foto-elétrico	5
2.4 - Rastreo Eletrônico	6
2.4.1 - Método Interferométrico	6
2.4.2 - Métodos para medição da distância ao satélite	7
2.4.3 - Método Doppler	8
2.4.4 - NAVSTAR/GPS	10
CAPITULO 3	12
CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA	
3.1 - Estrutura das Órbitas e Sistema de Controle	12
3.2 - Estrutura dos Sinais GPS	12
3.3 - Formato e Conteúdo da Mensagem GPS	17
3.4 - Sistema de Tempo GPS	22
3.5 - Efemérides	25

CAPITULO 4	29
MÉTODOS E MODELOS MATEMÁTICOS	
4.1 - Princípios Básicos de medição	29
4.1.1 - Medidas de Pseudo-distância	29
4.1.2 - Medidas de Fase	32
4.1.3 - Precisão dos Métodos	36
4.2 - Combinações Lineares de Observações	37
4.2.1 - Diferença da Pura Fase com o tempo	38
4.2.2 - Simples Diferença de Fase	39
4.2.3 - Dupla Diferença de Fase	40
4.2.4 - Tripla Diferença de Fase	41
4.3 - Processamento das Observações	42
4.3.1 - Posicionamento através do código	42
4.3.2 - Posicionamento através da Fase	43
4.3.3 - Obtenção da Ambiguidade	43 ⁴
4.4 - Correlação Matemática entre observáveis das Diferenças de Fase	44
 CAPITULO 5	 47
POSICIONAMENTO ESTÁTICO E CINEMÁTICO	
5.1 - Precisão em função da geometria dos satélites	47
5.2 - Posicionamento Estático	50
5.2.1 - Definição	50
5.2.2 - Posicionamento Estático Absoluto	51
5.2.3 - Posicionamento Estático Diferencial	51
5.2.3.1 - Vantagens	51

5.2.3.2 - Posicionamento Estático	
Diferencial com Pseudo-distância	53
5.2.3.3 - Posicionamento Estático	
Diferencial com medidas de fase	54
5.2.4 - Estações em Rede	55
5.2.5 - Aprimoramento da Órbita	57
5.3 - Determinação de altitudes com o GPS	61
5.3.1 - Introdução ao problema	61
5.3.2 - Determinação da Altura Geoidal	64
5.3.3 - Emprego do NAVSTAR/GPS	66
5.4 - Posicionamento Cinemático	68
5.4.1 - Definição	68
5.4.2 - Posicionamento Cinemático Absoluto	68
5.4.3 - Posicionamento Cinemático Diferencial	69
5.4.4 - Fatores Limitantes na utilização dos	
Métodos de Posicionamento Diferencial	73
5.4.5 - Exigências para o	
Posicionamento Cinemático Diferencial	74
5.4.6 - Experiências Realizadas	75
5.6 - Detecção e Remoção de perdas de ciclo	77
 CAPITULO 6	 80
APLICAÇÕES NA GEOFISICA	
6.1 - Campo de Aplicação	80
6.2 - Aplicações Estáticas	80
6.2.1 - Posicionamento de Instrumentos Geofísicos	80

6.2.2 - Geodinâmica	83
6.2.2.1 - Movimentos Tectónicos	83
6.2.2.2 - Fenómenos decorrentes da Deglaciação	87
6.2.2.3 - Fenómenos induzidos pelo Homem	87
6.2.2.4 - Detecção dos Movimentos Horizontais e Verticais da Crosta	90
6.2.3 - Parâmetros de Rotação da Terra	101
6.3 - Aplicações Dinâmicas	102
6.3.1 - Levantamentos Geofísicos marinhos e aéreos	103
6.3.1.1 - Levantamentos Magnéticos	103
6.3.1.2 - Levantamentos Sísmicos	104
6.3.1.3 - Levantamentos Gravimétricos	105
6.3.1.4 - Posicionamento no mar	107
6.3.1.5 - Posicionamento aéreo	109
6.3.1.6 - Aplicação do NAVSTAR/GPS	109
6.3.2 - Rastreamento de satélite à satélite	110
 CAPITULO 7	 112
PROCESSAMENTO GPS DA BASE GEODÉSICA CFN-JOÃO LOURINHO	
7.1 - Introdução	112
7.2 - Descrição da Base Geodésica CFN-João Lourinho	112
7.3 - Coordenadas dos Vértices	113
7.4 - Medição da Base com GPS	116
7.5 - Processamento da Seção; Resultados	118

CAPITULO 8	129
CONCLUSÕES	
BIBLIOGRAFIA	135
APENDICE A	149
CÁLCULO DAS COORDENADAS CARTESIANAS DOS SATÉLITES	
APENDICE B	154
PLANEJAMENTO DE UMA SEÇÃO DE OBSERVAÇÃO	

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

A presente Dissertação de Mestrado possui como objetivos básicos o estudo dos aspectos teóricos do NAVSTAR/GPS e de suas aplicações na Geofísica.

O NAVSTAR/GPS, cuja sigla advém da junção de NAVigation System using Time And Ranging (NAVSTAR) e Global Positioning System (GPS), é um sistema de posicionamento por satélite que vem propiciando o mais rápido e espetacular desenvolvimento já ocorrido na Geodésia, com reflexos notáveis nas diversas atividades que necessitam do conhecimento da posição, rápida e precisa.

O NAVSTAR/GPS apresenta vantagens sobre os atuais métodos de posicionamento. Com efeito, as técnicas clássicas são custosas e lentas, e dependentes de condições climáticas favoráveis, bem como da intervisibilidade entre as estações. Esta última limita a separação entre estações, geralmente a um máximo de 50 km. O NAVSTAR/GPS não depende de condições climáticas e sua operação é simples e rápida, dispensando a necessidade de equipe de campo numerosa. Além disso, como não existe necessidade de intervisibilidade entre as estações, suas localizações podem ser escolhidas de modo a otimizar a geometria da rede.

Estações móveis de VLBI (Very Long Baseline Interferometry) e SLR (Satellite Laser Ranging) fazem uso de equipamento mais volumoso e caro do que o NAVSTAR/GPS, e necessitam de acesso por estrada, preparo do sítio que vai abrigar a estação, e período mais longo de instalação. O SLR ainda requer

condições climáticas favoráveis.

O sistema de posicionamento por meio de satélite TRANSIT é suplantado pelo NAVSTAR/GPS notadamente no que se refere a rapidez do posicionamento, pois enquanto este necessita de uma hora de observação, aquele requer dois dias.

O NAVSTAR/GPS trabalha com duas observáveis básicas: pseudo-distância e medidas de fase da frequência de batimento da portadora. Estas observáveis são afetadas por erros oriundos da imprecisão dos relógios dos satélites e dos receptores, da passagem dos sinais pela ionosfera e troposfera, da incerteza dos parâmetros orbitais e da ambiguidade do ciclo inteiro, este último somente quando se empregam medidas de fase. Estes erros devem ser eliminados ou drasticamente reduzidos se alta precisão for desejada.

Dentre as tarefas geofísicas com as quais o NAVSTAR/GPS pode colaborar, encontram-se aquelas relacionadas com o posicionamento de instrumentos geofísicos em levantamentos terrestres, com a Geodinâmica, com a determinação de parâmetros de interesse geofísico, e com a determinação da posição e velocidade de sensores geofísicos a bordo de plataformas móveis. Testes comprovam a pertinência destas aplicações.

O presente trabalho se encontra estruturado em capítulos e apêndices.

O Capítulo 2 apresenta um breve histórico dos Sistemas de Rastreamento de Satélites, desde o Rastreamento Ótico até o Rastreamento Eletrônico, passando pelo Rastreamento Foto-elétrico. São descritos os diversos métodos que compõem cada um dos sistemas.

O Capítulo 3 trata das características do sistema

NAVSTAR/GPS, tais como configuração das órbitas, estrutura dos sinais transmitidos pelos satélites GPS e formato e conteúdo da Mensagem por estes transmitida, Sistema de Tempo GPS, e aspectos referentes às efemérides dos satélites.

O Capítulo 4 descreve os métodos e modelos matemáticos empregados no processamento das observações GPS. Os métodos e suas precisões são apresentados, bem como os modelos matemáticos das combinações lineares entre medidas de fase, e as vantagens e desvantagens de cada um deles.

O Capítulo 5 refere-se ao posicionamento estático e cinemático, tanto no modo absoluto quanto no modo relativo ou diferencial. O problema crítico da determinação de altitudes com o NAVSTAR/GPS, bem como a questão relativa a detecção e remoção de perdas de ciclo são também enfocados neste capítulo.

O Capítulo 6 trata das aplicações do NAVSTAR/GPS na Geofísica, discorrendo sobre as aplicações estáticas (aquelas nas quais o receptor permanece fixo) e dinâmicas (quando o receptor se acha em movimento).

O Capítulo 7 apresenta e analisa o resultado do processamento da medição de uma base geodésica através de receptores GPS.

Finalmente, o Capítulo 8, que traz em seu bojo as considerações finais deste trabalho.

Dois apêndices encerram o trabalho: os Apêndices A e B, que tratam, respectivamente, do cálculo das coordenadas dos satélites GPS, e do planejamento de uma seção de observações.

CAPITULO 2

HISTÓRICO DOS SISTEMAS DE RASTREIO DE SATELITES

2.1 - Definição

Entende-se como Sistema de Rastreo de Satélites, os sistemas que visam obter a posição de um satélite em um dado sistema de referência e em uma dada época, ou, de modo inverso, determinar a posição de pontos sobre a superfície da Terra, ou próximo a ela, através da utilização de ondas eletromagnéticas, emitidas ou refletidas por objetos em órbita da Terra.

2.2 - Rastreio Ótico

O Rastreio Ótico é o precursor dos Sistemas de Rastreio de Satélites. Sua origem remonta à Segunda Guerra Mundial, quando os alemães, premidos pela necessidade de monitorarem a trajetória de seus foguetes balísticos, as "bombas voadoras", desenvolveram um sistema ótico com esta finalidade. Mais de uma década depois, o lançamento dos primeiros satélites artificiais trouxe a necessidade do conhecimento de suas órbitas, o que pôde ser feito através deste sistema.

O Rastreio Ótico se vale de todas as técnicas óticas, visuais ou fotográficas, que possibilitem a obtenção de informações sobre a posição do satélite, em um dado instante. Basicamente, dois métodos são usados: o Visual e o Fotográfico. O Método Visual se vale de lunetas, teodolitos, ou cineteodolitos, junto a algum tipo de cronômetro. O Método Fotográfico, que

consiste em tomar-se uma sequência de fotografias do satélite contra o firmamento estrelado, se vale de câmaras balísticas, tais como a Baker-Nunn, a Hewit, a Câmara IGN, a Wild BC-4, etc [GEMAEL, 1975]. Ambos buscam o conhecimento das coordenadas uranográficas do satélite, a partir da posição dos astros ao redor. Este princípio serviu de base à astro-triangulação [BOMFORD, 1980].

Dentro do ponto-de-vista de um Rastreo Ótico, os satélites são classificados como passivos ou ativos, sendo aqueles apenas refletores da luz solar, e estes capazes de emitir uma sequência de lampejos em instantes determinados.

Durante a década de 60 foram lançados satélites, tais como os Echo 1 e 2, o Pageos (passivos), o Anna e os Geos 1 e 2 (ativos) [BOMFORD, 1980]. Rede de estações foram estabelecidas, tais como a do National Oceanic Survey [GEMAEL, 1975] e a rede Baker-Nunn do Smithsonian Astrophysical Observatory [MUELLER, 1964]. Contudo, este sistema foi abandonado para fins geodésicos, devido às fontes de erro inerentes, como a refração ótica, que levam a uma alta imprecisão [WELLS et al, 1986], além de outras inconveniências, como dependência de condições climáticas e uso restrito à noite.

2.3 - Rastreo Foto-elétrico

O Método Foto-elétrico foi desenvolvido no início da era espacial. Ele basicamente consiste em uma fenda em forma de M colocada em uma luneta. Quando a luz oriunda do satélite passa pela fenda, aciona um foto-multiplicador. Os pulsos produzidos são

gravados em fita magnética junto a informações de tempo [MUELLER, 1964; GEMAEL, 1975].

2.4 - Rastreo Eletrônico

Os diferentes métodos de Rastreo Eletrônico estão quase sempre baseados em satélites ativos, aqui com o sentido de transmitirem ondas eletromagnéticas de alta frequência, visando reduzir o efeito da refração ionosférica. Os Métodos Eletrônicos podem ser divididos em 3 grupos [MUELLER, 1964]: aqueles que usam o princípio da interferometria, aqueles que determinam a distância satélite-receptor, e aqueles que se utilizam do efeito doppler.

2.4.1 - Método Interferométrico

As técnicas que fazem uso da rádio-interferometria se baseiam na medida da diferença de fase de sinais de rádio oriundos de um satélite, que atingem duas antenas receptoras separadas por uma distância conhecida, obtendo-se o co-seno diretor da direção do satélite em relação ao eixo que liga as duas antenas. Um conjunto de dois pares de antenas orientadas segundo as linhas norte-sul e leste-oeste, respectivamente, é suficiente para definir a direção do satélite [GEMAEL, 1975]. O mesmo princípio é utilizado na Interferometria de Bases Muito Longas (VLBI - Very Long Baseline Interferometry), sendo que neste caso o interesse reside na determinação dos componentes da base formada pelas duas antenas [WELLS et al, 1986].

Durante o Ano Geofísico Internacional foram lançados os

satélites Vanguard. Para rastreá-los foi implantada a rede Prime Minitrack, sob a administração da NASA. Esta rede inicialmente cobria apenas o território norte-americano, tendo sido posteriormente estendida de modo a cobrir todo o continente. Uma versão simplificada, o Minitrack II, foi operada pelo U. S. Army Map Service, atual Defense Mapping Agency, com propósitos eminentemente geodésicos, ao invés da simples determinação de órbitas [MUELLER, 1964]. A NASA, através de seu Projeto de Dinâmica Crustal, vem utilizando o sistema VLBI Mark III em estudos geodinâmicos [CLARK et al, 1987].

2.4.2 - Métodos para medição da distância ao satélite

A distância satélite-receptor, pode ser medida através de micro-ondas ou de laser. Diversos sistemas se basearam nestas medidas, tanto para a simples determinação da órbita de satélites quanto para o posicionamento geodésico. De um modo geral, todos eles determinam o tempo de percurso das ondas eletromagnéticas, desde a estação emissora de terra, reflexão ou retransmissão pelo satélite, e seu retorno.

O Sistema GRARR (Goddard Range and Range Rate System), fez uso de ondas de radar na banda S⁽¹⁾. Embora não tenha sido concebido com fins geodésicos, ele acabou contribuindo através da determinação da distância entre estações muito separadas [BOMFORD, 1980]. A precisão em distância do GRARR é da ordem de 5 metros [WELLS et al, 1986].

⁽¹⁾ A faixa de frequência da banda S vai de 2 a 4 GHz.

O Sistema SECOR (Sequential Collation of Range), foi operado entre 1962 e 1970 pelo exército norte-americano, e foi concebido especialmente para posicionamento. O sistema era composto por 4 estações de terra que emitiam sinais em 420,9 MHz. O satélite, por seu turno, retransmitia dois sinais em 449 e 224,5 MHz. Os satélites SECOR possuíam órbita quase circular e uma altitude entre 900 e 3700 km. O sistema foi usado para estabelecer uma rede mundial de 37 estações de astro-trilateração, sendo improvável que torne a ser usado novamente [BOMFORD, 1980]. A precisão em distância era da ordem de 3 a 10 metros [WELLS et al, 1986].

O emprego do laser para medição da distância até o satélite vem sendo desenvolvido desde o final da década de 60. Mais de uma dezena de satélites, equipados com retro-refletores, podem ser rastreados de estações SLR (Satellite Laser Ranging) fixas ou móveis. Dentre eles, os mais importantes são o LAGEOS (LAsER GEODynamics Satellite), da NASA, e o francês Starlette, colocados em órbita em 1976 e em 1975, respectivamente. Atualmente, o SLR é capaz de obter distâncias com precisão de poucos centímetros, o que garante a potencialidade deste sistema em aplicações na Geodésia e na Geofísica [COHEN E SMITH, 1985; ASHKENAZI, 1985b].

2.4.3 - Método Doppler

A utilização do efeito doppler remonta a 1957, quando W. H. Guier e G. C. Weiffenbach, do Laboratório de Física Aplicada da Universidade John Hopkins, constataram a possibilidade de

rastrearem o Sputnik I utilizando este efeito. Pouco depois, McClure, físico do mesmo Laboratório, propôs a operação inversa: medir a frequência doppler de um satélite de órbita conhecida para posicionar o observador.

Baseado neste conceito, o Naval Weapons Laboratory e a Universidade John Hopkins desenvolveram, entre 1958 e 1963, o Navy Navigation Satellite System (NNSS), mais conhecido como Sistema TRANSIT. Este sistema entrou em operação em 1964, apenas para emprego militar, sendo liberado à comunidade civil em 1967.

O Sistema TRANSIT visava, originalmente, atender às necessidades da navegação marítima. Entretanto, este sistema também encontrou largo emprego na Geodésia e na Geofísica, devido ao desenvolvimento de técnicas especiais de observação e pós-processamento que possibilitam a obtenção de precisão sub-métrica, o que exige, contudo, alguns dias de rastreamento. Estimava-se que em 1984 haviam, espalhados pelo globo, cerca de 50.000 receptores TRANSIT, aí incluídos perto de 1.000 de uso geodésico (ASHKENAZI, 1985a).

O Sistema TRANSIT é atualmente composto por 8 satélites (5 Oscar e 3 Nova), dispostos em órbitas polares, circulares, a uma altitude de 1100 km e com período de rotação de 107 minutos. Cada satélite transmite duas portadoras de frequências ligeiramente abaixo de 400 e 150 MHz, controlados por padrões de frequência a bordo dos satélites. A posição orbital do satélite é transmitida através de uma mensagem superposta às portadoras através de modulação em fase (WELLS et al, 1986). O movimento orbital dos satélites TRANSIT é controlado por uma rede composta por quatro estações rastreadoras.

O emprego do Sistema TRANSIT em aplicações que exigem posicionamento contínuo é restringido pelo fato do efeito doppler requerer um certo período de tempo para sua observação. Igualmente inibidor é o intervalo de tempo entre passagens sucessivas dos satélites TRANSIT, que pode alcançar até 2 horas dependendo da latitude do observador.

A União Soviética opera um sistema similar ao TRANSIT, denominado Tsicada.

Outro sistema que usa o efeito doppler para posicionamento é o Sistema ARGOS. Este sistema, oriundo de um projeto de cooperação entre o Centro Nacional de Estudos Espaciais da França, a NASA e o U. S. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), foi implantado em 1978 com o lançamento do protótipo TYROS/N, seguido dos satélites NOAA-6 a NOAA-10 [WELLS, et al, 1986]. É um sistema que serve apenas como apoio à navegação.

2.4.4 - NAVSTAR/GPS

Necessidades de cunho militar, tais como posicionamento contínuo e em tempo real com precisão da ordem do centímetro, e exata determinação da velocidade e tempo, dentre outras [ANDRADE, 1988], não satisfeitas com o Sistema TRANSIT, levaram, já em meados da década de 60, a marinha e a força aérea norte-americanas a desenvolverem programas isolados, o TIMATION e o 621 B, respectivamente [EASTON, 1980]. Em 1973 os dois sistemas foram fundidos, sob a sigla NAVSTAR/GPS, ficando seu desenvolvimento sob a chancela do Departamento de Defesa dos Estados Unidos.

O NAVSTAR/GPS é um sistema concebido para fornecer a posição tri-dimensional do receptor, bem como uma precisa informação de tempo. Para tal, quatro métodos podem ser empregados, baseados na medida da distância satélite-receptor (pseudo-distância), na medida da fase da frequência de batimento da portadora, no efeito doppler, e em princípios de interferometria.

Em 1978 foram colocados em órbita os primeiros satélites protótipos, que permitiram testes com o sistema. Estes satélites seriam substituídos, posteriormente, por aqueles que formariam a constelação definitiva. Diversos fatores, dentre eles o trágico desastre com o ônibus espacial Challenger, provocaram um atraso na programação inicial de se colocar em órbita a constelação definitiva até o final de 1988. Prevê-se que, já no começo da década de 90, a constelação definitiva do sistema estará implantada [JONES, 1989].

Atualmente, fevereiro de 1990, encontram-se em órbita 12 satélites, metade deles protótipos, o que permite uma cobertura de aproximadamente 8 horas por dia.

A União Soviética está implantando um sistema similar, chamado GLONASS [ANODINA e PRILEPIN, 1989].

CAPITULO 3

CARACTERISTICAS DO SISTEMA

3.1 - Estrutura das Órbitas e Sistema de Controle

O NAVSTAR/GPS, quando totalmente implantado, possuirá uma constelação de 24 satélites, sendo 21 operacionais e 3 reservas ativos, dispostos em 6 planos orbitais, contendo cada um deles 4 satélites em órbita circular a uma altura de aproximadamente 20.000 km, sendo o período de 12 horas siderais. Os planos orbitais terão inclinação de 55° [JONES, 1989]. Esta configuração garante para qualquer ponto da superfície da Terra, ou próximo a ela, um mínimo de quatro satélites acima do horizonte durante as 24 horas do dia. Cada satélite possui a bordo 4 osciladores atômicos de alta precisão, sendo dois de Césio e dois de Rubídio.

O NAVSTAR/GPS encontra apoio em terra através de um Sistema de Controle, atualmente composto de cinco estações, estando a Estação de Controle Mestre localizada em território norte-americano (em Colorado Springs) e as demais espalhadas pelo globo (no Havai e em Kwajalein, Oceano Pacífico; em Diego Garcia, Oceano Índico; e na Ilha de Ascensão, Oceano Atlântico) [JONES, 1989]. Este Sistema de Controle tem como finalidades monitorar o comportamento dos osciladores atômicos e a saúde dos satélites, determinar suas órbitas, bem como a de injetar nos satélites a Mensagem que eles transmitirão posteriormente.

3.2 - Estrutura dos Sinais GPS

Cada satélite GPS transmite dois sinais, S_{L_1} e S_{L_2} , obtidos a partir da modulação de duas portadoras de frequência na banda-L: L_1 , com frequência de 1.575,42 MHz (equivalente a um comprimento de onda de 19,05 cm) e L_2 , com frequência de 1.227,60 MHz (equivalente a um comprimento de onda de 24,45 cm).

A portadora L_1 é modulada pelos códigos P ("precise code") e C/A ("clear acquisition"), também chamado de código S ("standard code"), ao passo que a portadora L_2 é modulada apenas pelo código P. Além de pelo menos um dos códigos, ambas as portadoras contêm um fluxo ininterrupto de dados, de 30 segundos de duração, chamado de Mensagem. Fazem parte da Mensagem as efemérides do satélite, parâmetros do relógio e "status" do sistema.

A geração da frequência das portadoras, dos códigos e da Mensagem, é controlada pelos osciladores atômicos de alta precisão, também chamados de padrões de frequência, que se encontram a bordo dos satélites. A Tabela 3.1 mostra que todos os elementos gerados guardam relações com a frequência fundamental de 10,23 MHz dos padrões de frequência.

Os códigos constituem-se numa sequência de pulsos (função degrau). Os valores de cada pulso (0 ou 1) correspondem a diferentes estados do código (+1 ou -1, respectivamente). O código C/A é gerado pelo algoritmo de Gold, em cada satélite, e se repete a cada milissegundo. Em cada satélite o código possui um padrão característico, que o distingue dos demais. Já o código P, é gerado por um algoritmo que se repete a cada 267 dias. Observada ao longo deste período, a sequência não apresenta nenhuma simetria, razão pela qual se denomina "pseudo-aleatória" (BLITZKOW

E SA, 1985]. Estes 267 dias são divididos em 38 segmentos de 1 semana. Embora todos os satélites gerem o mesmo código P, cada um transmite um segmento distinto do mesmo, correspondente a uma semana. Ao final da semana GPS, 0 horas de TU da noite de sábado para domingo, cada satélite volta a transmitir o segmento da semana que lhe foi atribuído [WELLS et al, 1982].

Oscilador de Referência (Cs, Rb)	
Frequência Fundamental (f_0)	10,23 MHz
Portadora L_1	
Frequência	$154 * f_0 = 1.575,42$ MHz
Comprimento de Onda	19,05 cm
Portadora L_2	
Frequência	$120 * f_0 = 1.227,60$ MHz
Comprimento de Onda	24,45 cm
Código P	
Frequência	$f_0 = 10,23$ MHz (Mbps)
Comprimento de Onda	29,31 m
Duração do Ciclo	267 dias; 7 dias/satélite
Código C/A	
Frequência	$f_0 / 10 = 1,023$ MHz (Mbps)
Comprimento de Onda	293,1 m
Duração do Ciclo	1 milisegundo
Fluxo de Dados (Mensagem)	
Frequência	$f_0 / 204.600 = 50$ bps
Duração do Ciclo	30 segundos

Tabela 3.1 - Componentes do Sinal GPS [SEESER, 1986]

O fluxo de dados que compõe a Mensagem é uma sequência de baixa frequência, de 50 bps (bits/segundo), com duração de 30 segundos, perfazendo um total de 1.500 bits.

As duas portadoras são moduladas em fase pela função degrau [BLITZKOW E SÁ, 1985]. Esta modulação é feita através da multiplicação da portadora pelo código. Cada transição de +1 para -1 ou de -1 para +1 leva a uma inversão de 180° na fase da portadora. A Figura 3.1 mostra esquematicamente a concepção da modulação em fase.

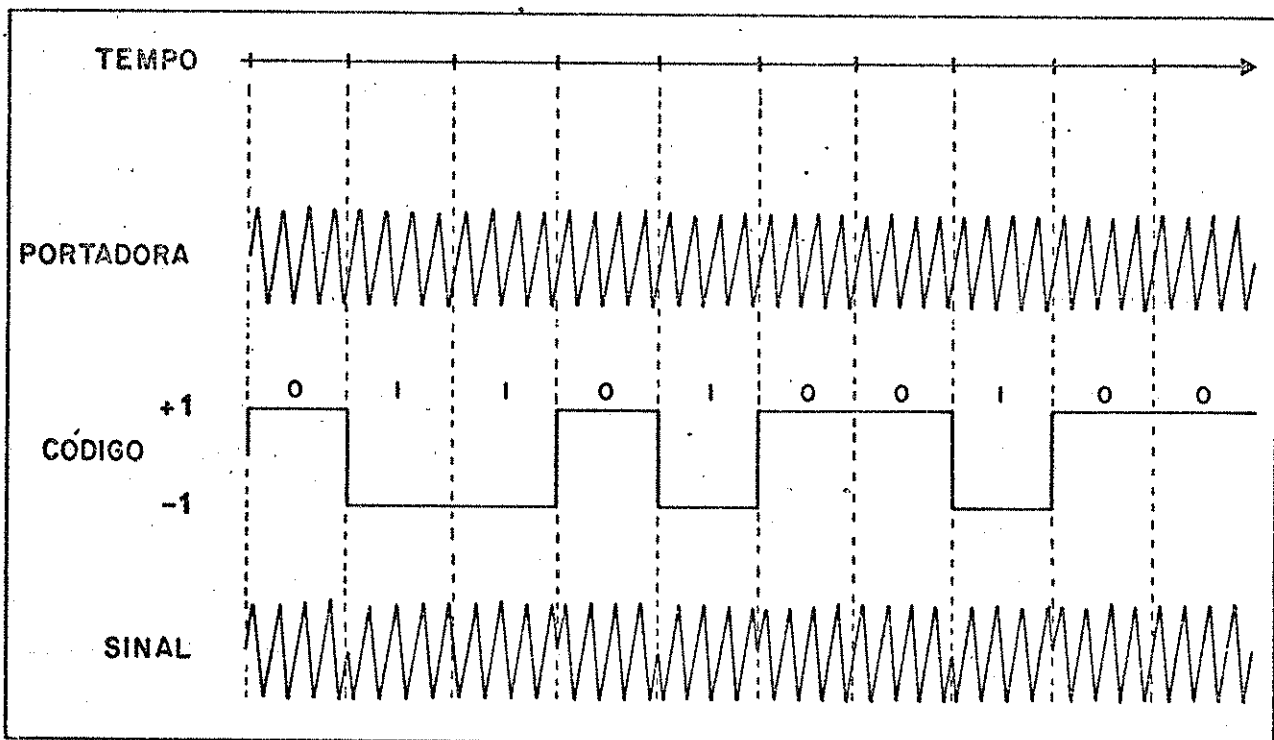


Figura 3.1 - Concepção da Modulação em Fase

Os códigos permitem ao processador interno do receptor obter o tempo de percurso do sinal desde o satélite até o mesmo,

através de um processo de correlação, no qual são comparadas sequências do código (P ou C/A) transmitidas pelo satélite com aquelas geradas pelo receptor.

O sinal S_{L_1} , transmitido pelo i -ésimo satélite, pode ser representado pela equação:

$$S_{L_1}(t) = A_P P_i(t) D_i(t) \cos(\omega_1 t + \phi(t)) + A_C C_i(t) D_i(t) \sin(\omega_1 t + \phi(t)) \quad (3.1)$$

onde A_P e A_C representam as amplitudes, $P_i(t)$ e $C_i(t)$ representam os códigos P e C/A, respectivamente, e $D_i(t)$ o fluxo de dados.

O sinal S_{L_2} tem uma estrutura mais simples por não conter o código C/A, sendo representado por:

$$S_{L_2}(t) = B_P P_i(t) D_i(t) \cos(\omega_2 t + \phi(t)) \quad (3.2)$$

onde B_P representa a amplitude do sinal.

Tanto as portadoras quanto os códigos são síncronos entre si.

Nas medidas de pseudo-distância, o código P oferece precisão maior do que aquela possível de ser obtida com o código C/A (veja Capítulo 4). Além disso, o fato do código P ser transmitido nas duas frequências permite a obtenção de uma adequada correção para o efeito da refração ionosférica. Entretanto, existe uma dificuldade no acesso a este código devido a sua extensão: É impossível um receptor varrer rapidamente o comprimento de 7 dias do código P de modo a sintonizá-lo. Para tal, o satélite transmite uma informação adicional, conhecida por

HOW ("Hand-Over Word"), que permite o conhecimento do intervalo específico do código P transmitido num determinado instante. Isto é feito junto ao código C/A, o que implica na necessidade de sintonizá-lo primeiro, mesmo se desejando utilizar somente o código P.

3.3 - Formato e Conteúdo da Mensagem GPS

A Mensagem GPS é formada por um conjunto de informações, normalmente chamado de "Quadro". Cada quadro contém 5 subquadros, cada um composto de 300 bits, sendo que cada conjunto de 30 bits forma uma palavra.

Cada bit da mensagem tem a duração de 20 ms. Durante este período ocorrem 20.460 pulsos do código C/A, 204.600 pulsos do código P, e 31.508.400 ciclos da portadora L_1 .

As duas primeiras palavras de cada subquadro contém a palavra de Telemetria TLM ("Telemetry Word") e a palavra HOW. TLM contém um preâmbulo de 8 bits que funciona como padrão de sincronização, que facilita o acesso ao dado de navegação. HOW contém o contador Z ("Z-count"), e muda a cada 6 segundos. O contador Z representa o número inteiro de 1,5 segundos de tempo decorrentes 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 ($24 \text{ hs} * 3.600 \text{ s} * 7 \text{ dias} / 1,5 \text{ s} = 403.200$). Através do contador Z, é possível saber a faixa do código P que deve ser varrida dentro da extensão de 7 dias, permitindo então que o receptor sintonize este código. A palavra HOW contém um número, que multiplicado por

4, fornece o contador Z do próximo subquadro. A Figura 3.2 mostra, esquematicamente, o formato da mensagem GPS.

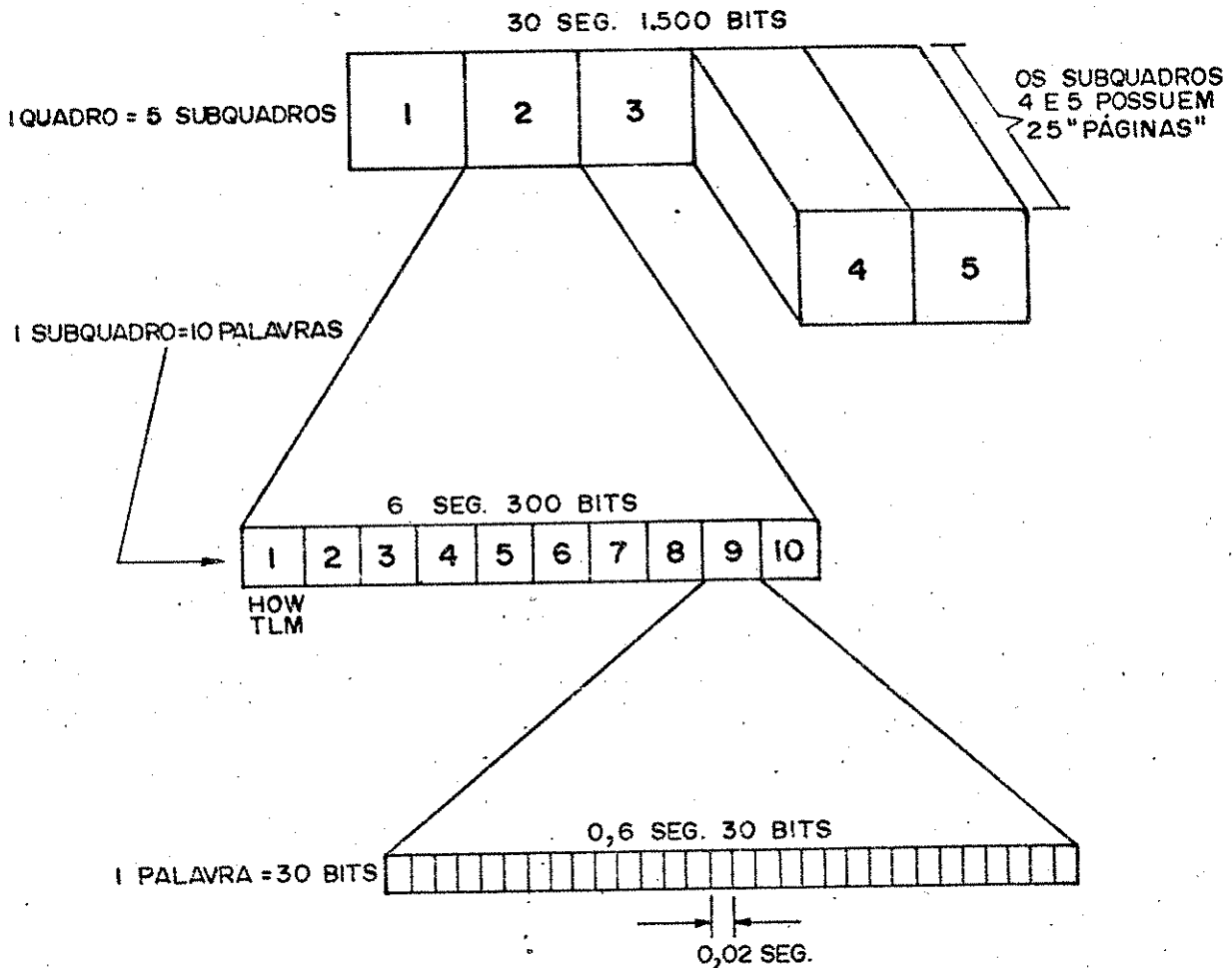


Figura 3.2 - Formato da Mensagem GPS

Os subquadros têm o seguinte conteúdo:

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 refração ionosférica;
- diferença 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 informa as condições das efemérides transmitidas e das componentes do sinal.

A idade dos dados indica o intervalo de tempo decorrido desde a última atualização dos dados transmitidos pelo satélite.

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 descrevem o movimento kepleriano do satélite e são necessários 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 necessário para usuários de uma só frequência.

Os subquadros 1 a 3 são repetidos em cada quadro, até

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

O conteúdo do Subquadro 1, e dos Subquadros 2 e 3, é detalhado abaixo, com o símbolo adotado, significado e unidade, nesta ordem (VAN DIERENDONCK et al, 1980; SEEGER, 1986).

Subquadro 1:

- SV-PRN - número do satélite (sem unidade)
- WN - número da semana GPS (sem unidade)
- URA - exatidão do satélite (sem unidade)
- HEALTH - saúde 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 (seg, s/s, s/s²)

Subquadro 2 e 3 (Efemérides Transmitidas):

- M_0 - anomalia média no tempo de referência para as efemérides (semi-círculo)
- e - excentricidade (sem dimensão)
- \sqrt{a} - raiz quadrada do semi-eixo maior (metros^{1/2})
- Ω_0 - ascensão reta no tempo de referência para as efemérides

(semi-círculo)

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

ω - argumento do perigeo (semi-círculo)

AODE - idade dos dados das efemérides (segundos)

t_{OE} - tempo de referência para as 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_{rs} - amplitude dos termos harmônicos coseno e seno para correção do raio vetor (metro)

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

\dot{i} - variação temporal da inclinação (semi-círculo/segundo)

Os seis primeiros parâmetros apresentados nos Subquadros 2 e 3 são os chamados elementos keplerianos, que definem o movimento orbital dos satélites GPS quando sujeitos somente à parte central da atração gravitacional, sendo a posição do satélite uma função do tempo, desde t_{OE} . A Figura 3.3 mostra os elementos keplerianos. Nela, a anomalia verdadeira (f) foi representada em lugar da anomalia média (M).

Os demais parâmetros que compõem este Subquadro (excluídos t_{OE} e AODE) descrevem as variações da órbita dos satélites GPS, como resultado da ação de forças perturbadoras que agem sobre eles, tais como o efeito da não esfericidade da Terra, atração luni-solar, pressão da radiação solar. Estas pequenas perturbações devem ser levadas em consideração, muito embora seu

efeito combinado seja 3 ordens de grandeza menor do que aquele provocado pela parte kepleriana do potencial.

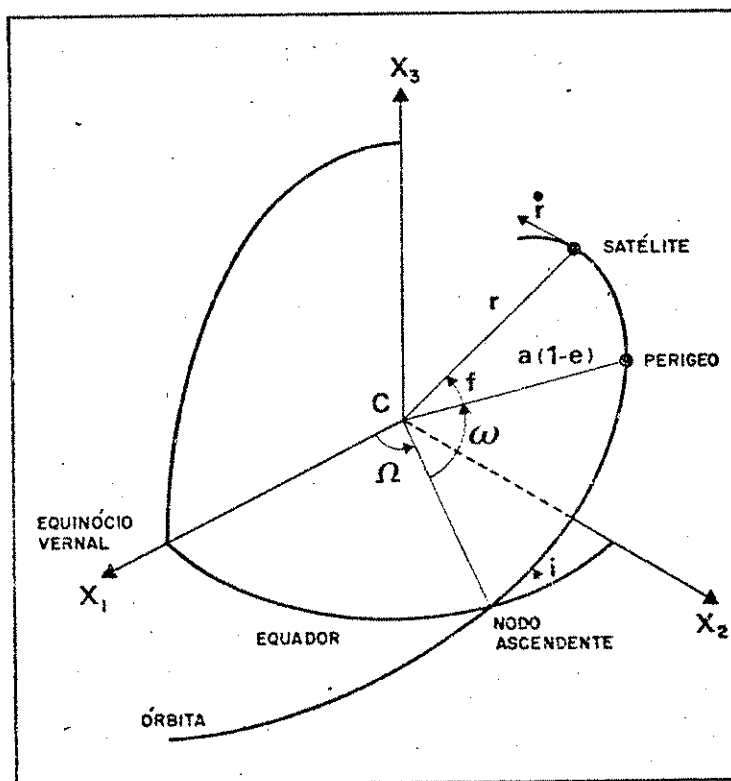


Figura 3.3 - Elementos Orbitais Keplerianos [WELLS et al, 1986]

A Figura 3.4 mostra os 16 parâmetros que descrevem a órbita dos satélites GPS. Ainda nesta figura, pode-se notar que o elemento Ω_0 representa, de fato, a longitude do nó ascendente no tempo de referência para as efemérides.

3.4 - Sistema de Tempo GPS

O Sistema de Tempo GPS é um Sistema de Tempo Atômico, controlado por osciladores de Césio, e que guarda com o Tempo Atômico Internacional uma diferença constante de 19 segundos

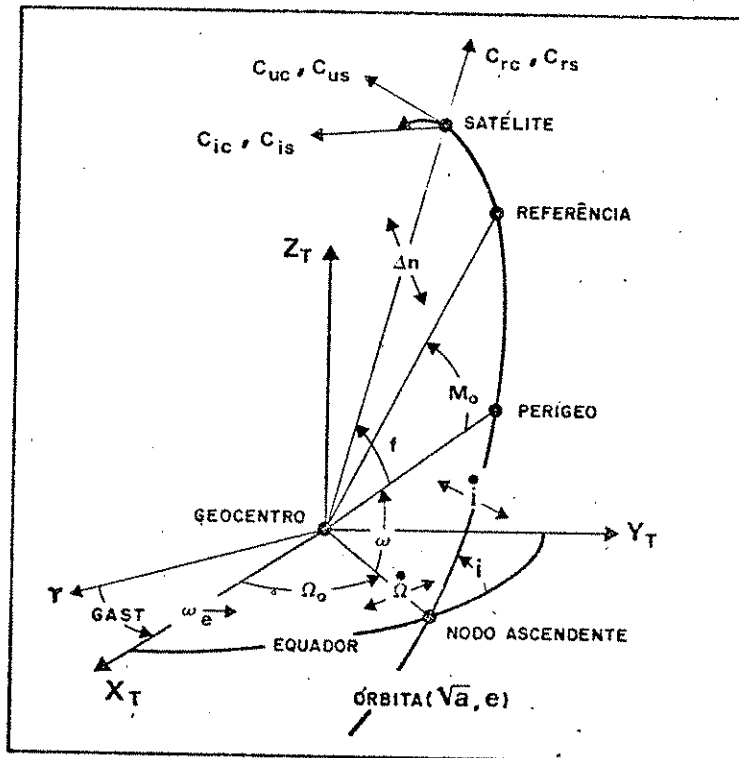


Figura 3.4 - Órbita GPS [WELLS et al, 1988]

[DELIKARAOGLU, 1989]. Sua escala teve início às 0 horas de TUC, do dia 6 de janeiro de 1980. Como o Tempo GPS não sofre a mesma correção de segundo inteiro que periodicamente atinge o TUC, passou a existir uma diferença crescente entre eles. O conhecimento desta diferença é necessário para a aquisição da hora através dos satélites GPS. Como a última alteração no valor do TUC se deu em 01/01/1990, a partir desta data a diferença em questão é de 6 segundos [IERS, 1989].

O Tempo GPS é dado através do número da semana e do contador Z. O número de semanas GPS varia de 0 a 1.023, o que corresponde a aproximadamente 20 anos. Em segundos, pode tomar

valores de 0, no começo da semana, até um máximo de 604.800 (403.200 * 1,5.seg = 604.800 seg).

O tempo mantido pelo oscilador a bordo do satélite difere do Tempo GPS devido a flutuações na frequência de seu oscilador. O Sistema de Controle observa e prediz o comportamento do relógio. Este comportamento é modelado por um polinômio de 2^o 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 [VAN DIERENDONCK et al, 1980]

$$t_{GPS} = t_s - \Delta t \quad (3.3)$$

sendo

$$\Delta t = a_0 + a_1(t_{GPS} - t_{oc}) + a_2(t_{GPS} - t_{oc})^2 \quad (3.4)$$

onde

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

t_{GPS} - tempo no Sistema GPS

t_s - tempo no satélite

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

No cálculo de (3.4), 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} .

Diferenciando (3.4) obtém-se a deriva do relógio do satélite

$$\dot{\Delta t} = a_1 + 2a_2(t_{GPS} - t_{oc}) \quad (3.5)$$

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.

3.5 - Efemérides

O conhecimento da posição orbital do satélite é fundamental para o cálculo da posição do receptor que o rastreia.

O conjunto de coordenadas que definem a posição orbital de um satélite em função do tempo constituem as efemérides. Elas podem ser classificadas em Pós-Calculadas ("post-processed ephemeris") ou Transmitidas ("broadcast ephemeris").

As efemérides pós-calculadas são obtidas após terem sido feitas observações do satélite, sendo, portanto, uma estimativa da sua posição no período de observação. Estações fixas rastreiam o satélite. Os dados coletados são ajustados por mínimos quadrados de modo a obter-se a melhor aproximação da órbita rastreada. Várias fontes para este tipo de efeméride são atualmente disponíveis, como a calculada pelo U.S. Naval Surface Weapons Center (NSWC), conhecida por "Efemérides Precisas". Os dados orbitais são coletados pelas Estações de Controle do Sistema GPS e por outras quatro situadas na Austrália, Ilhas Seychelles,

Inglaterra e Argentina. É provável que no futuro, um número maior de organizações venha a fornecer esta modalidade de efemérides. As efemérides pós-calculadas são indispensáveis nos levantamentos feitos com receptores que não decodificam a mensagem ou quando se deseja órbita mais precisa do que a fornecida pela mensagem do satélite. A precisão atual das Efemérides Precisas é de cerca de 5 metros [WELLS et al, 1986].

As efemérides transmitidas são obtidas pela extrapolação das efemérides de referência (que são uma estimativa inicial da trajetória do satélite, calculada sobre uma semana de dados das 5 estações monitoras GPS) para os dias subsequentes. Esta predição é feita através de um filtro de Kalman, sendo reformatada em parâmetros da mensagem GPS que são introduzidos na memória do satélite. Estas efemérides fazem parte da mensagem transmitida pelo satélite, permitindo posicionamento em tempo real. A precisão atual das efemérides transmitidas varia de 20 a 80 metros, dependendo da "idade" da injeção das efemérides [DELIKARAOGLU, 1989]. Espera-se que a qualidade destas efemérides seja degradada quando o Sistema entrar em fase operacional.

Uma imprecisão nas Efemérides Transmitidas afeta a determinação da posição, através do posicionamento isolado, introduzindo, nesta posição, erros aproximadamente da mesma grandeza que aqueles das efemérides.

Já para o posicionamento relativo, como os erros das efemérides incidem similarmente em ambas as estações, seus efeitos ficam bastante reduzidos. Uma regra prática para estimar o efeito da órbita em uma base composta por 2 receptores, apresentada por VANÍČEK et al [1985],

$$\frac{db}{b} = \frac{dr}{\rho} \quad (3.7)$$

onde

dr - erro na posição do satélite

b - base

ρ - distância ao satélite

db - erro na base

foi redimensionada por ZIELIŃSKI [1988] como

$$\frac{b}{10 \rho} < \frac{db}{dr} < \frac{b}{4 \rho} \quad (3.8)$$

A Tabela 3.5 apresenta erros, absolutos (db) e relativos (ϵ_r), na determinação de bases, para lados de 10, 100 e 1.000 quilômetros, e erros orbitais de 5, 10, 20, 50 e 100 metros, segundo a equação (3.8). Pode-se constatar que quanto maior a distância entre os receptores, maior a influência da imprecisão das efemérides.

Na Tabela 3.5, a unidade de dr, b, db e ϵ_r é metro, quilômetro, milímetro e parte por milhão (ppm), respectivamente.

$\frac{dr}{b}$	10	100	1000
5	$0,2 < db < 0,6$ $0,02 < \epsilon_r < 0,06$	$2,5 < db < 6,0$ $0,02 < \epsilon_r < 0,06$	$25 < db < 60$ $0,02 < \epsilon_r < 0,06$
10	$0,5 < db < 1,2$ $0,05 < \epsilon_r < 0,12$	$5,0 < db < 12$ $0,05 < \epsilon_r < 0,12$	$50 < db < 120$ $0,05 < \epsilon_r < 0,12$
20	$1,0 < db < 2,5$ $0,1 < \epsilon_r < 0,25$	$10 < db < 25$ $0,1 < \epsilon_r < 0,25$	$100 < db < 250$ $0,1 < \epsilon_r < 0,25$
50	$2,5 < db < 6,2$ $0,25 < \epsilon_r < 0,62$	$25 < db < 62$ $0,25 < \epsilon_r < 0,62$	$250 < db < 620$ $0,25 < \epsilon_r < 0,62$
100	$5,0 < db < 12,5$ $0,5 < \epsilon_r < 1,25$	$50 < db < 125$ $0,5 < \epsilon_r < 1,25$	$500 < db < 1250$ $0,5 < \epsilon_r < 1,25$

Tabela 3.5

- Erros de uma base GPS em função da imprecisão das efemérides -

CAPITULO 4

MÉTODOS E MODELOS MATEMÁTICOS

4.1 - Princípios Básicos de Medição

O NAVSTAR/GPS permite a obtenção da distância satélite-receptor através de um dos códigos ou através da própria portadora. A observável obtida através dos códigos é chamada de pseudo-distância⁽²⁾⁽³⁾. Já a obtida pela portadora é a medida da fase.

4.1.1 - Medidas de Pseudo-distância

A Pseudo-distância corresponde ao intervalo de tempo necessário ao alinhamento de uma réplica do código, gerada pelo

⁽²⁾ O termo "pseudo-distância" advém do correspondente na língua inglesa "pseudo-range", e representa a distância satélite-receptor afetada por um certo número de efeitos sistemáticos. O emprego deste termo vem sendo questionado por uma parcela da comunidade científica sob a alegação de que uma distância, mesmo que impregnada de erros, permanece sendo distância. Neste trabalho, contudo, será mantida a expressão pseudo-distância, devido ao seu largo emprego na literatura.

⁽³⁾ A rigor, a observável da medida de pseudo-distância é o intervalo de tempo gasto no processo de alinhamento, a ser descrito.

receptor, com o código recebido do satélite, multiplicado pela velocidade da luz [WELLS et al, 1986].

O alinhamento, também chamado de correlação, se dá do seguinte modo. Inicialmente, considera-se que o receptor gera uma réplica do mesmo código que se deseja sintonizar. O código recebido por este último estará atrasado de um intervalo de tempo Δt correspondente ao tempo gasto pelo sinal para percorrer a distância satélite-receptor. O receptor atrasa sua réplica buscando efetuar o alinhamento (correlação máxima) entre ela e o código recém-chegado. Uma vez alinhados, o produto dos códigos fornece apenas valores +1 para a função amplitude resultante. O intervalo de tempo gasto neste processo corresponde ao intervalo de tempo Δt mencionado acima.

Chamando de p a pseudo-distância, t_s o instante da transmissão do sinal no satélite (referido ao sistema de tempo do relógio do satélite) e T_u o instante da recepção do sinal pelo receptor (referido ao sistema de tempo do relógio do receptor), tem-se

$$p = \Delta t c = (T_u - t_s) c \quad (4.1)$$

Mas, conforme visto no Capítulo 3, não há uma perfeita sincronização dos relógios do satélite em relação ao tempo GPS. Deste modo, pode-se reescrever a equação (3.3) de modo que

$$t_s = t_{GPS} + \Delta t \quad (4.2)$$

sendo Δt a correção do relógio do satélite em relação ao tempo

GPS, obtido através da equação (3.4), e t_{GPS} o instante da transmissão do sinal no tempo GPS.

De modo análogo, pode-se obter a correção para a não sincronização dos relógios do receptor com o tempo GPS

$$T_u = T_{GPS} + \Delta T \quad (4.3)$$

onde T_{GPS} é o instante da recepção do sinal e ΔT representa a correção do relógio do receptor, ambos em relação ao Sistema de Tempo GPS.

Reescrevendo a (4.1), e reagrupando-a, tem-se que

$$p = c (T_{GPS} - t_{GPS}) + c (\Delta T - \Delta t) \quad (4.4)$$

O primeiro termo da equação (4.4) representa a distância geométrica ρ entre o satélite e o receptor. Além dos termos apresentados na equação acima, a medida da pseudo-distância é influenciada pelos efeitos provocados pelas refrações ionosférica (Δ_{ion}) e troposférica (Δ_{trop}). Reescrevendo a (4.4), obtem-se

$$p = \rho + c (\Delta T - \Delta t) + \Delta_{ion} + \Delta_{trop} \quad (4.5)$$

que é o modelo fundamental para o qual o NAVSTAR/GPS foi concebido.

Na equação (4.5) as 4 incógnitas são as coordenadas cartesianas do receptor e a correção ΔT do seu relógio, motivo pelo qual um mínimo de 4 satélites devem ser rastreados simultaneamente.

Cada grupo de observações simultâneas (para 4 satélites,

$$df = \left[\begin{matrix} \text{n}^\circ \text{ de grupos} \\ \text{n}^\circ \text{ de instantes} \times (\text{n}^\circ \text{ de satélites} - 1) \end{matrix} \right] - 3$$

por exemplo), em instantes diferentes, possui uma incógnita ΔT . Deste modo, a equação (4.5) tem um número de graus de liberdade igual ao produto do número de grupos ^{de observações simultâneas} pelo número de satélites observados em cada grupo menos 1, menos 3 [ANDRADE, 1988].

Para um determinado período de rastreamento, torna-se mais vantajoso determinar o comportamento do relógio do receptor para este período, modelando-o através do polinômio

$$\Delta T = b_0 + b_1 (T_u - T_0) + b_2 (T_u - T_0)^2 \quad (4.6)$$

onde b_0 , b_1 , b_2 são o estado, a marcha e a variação da marcha do relógio do receptor, e T_0 é o instante do início das observações. Procedendo deste modo, tem-se um modelo com seis incógnitas, mas com um maior número de graus de liberdade, ou seja, igual ao produto do número de satélites observados pelo número de grupos ^{de observações simultâneas} menos seis [ANDRADE, 1988]. $df = (\text{n}^\circ \text{ de satélites} \times \text{n}^\circ \text{ de instantes}) - 6$

A distância geométrica ρ pode ser expressa em função das coordenadas cartesianas do receptor (X_R, Y_R, Z_R) e do satélite (X_K, Y_K, Z_K) , pois

$$\rho = \| \vec{r} - \vec{R} \| = [(X_K - X_R)^2 + (Y_K - Y_R)^2 + (Z_K - Z_R)^2]^{1/2} \quad (4.7)$$

onde \vec{r} é o vetor posição do satélite e \vec{R} o vetor posição do receptor. Como as coordenadas cartesianas do satélite geralmente não são perfeitamente conhecidas, adiciona-se a ρ o termo $d\rho$ relativo ao efeito do erro das efemérides, de modo que

$$\rho = \| \vec{r} - \vec{R} \| + d\rho \quad (4.8)$$

4.1.2 - Medidas de Fase

A medida de fase da frequência de batimento da portadora⁽⁴⁾, simplificada chamada de medida de fase, corresponde a diferença de fase entre o sinal de referência gerado pelo oscilador do receptor e o sinal por este recebido, transmitido pelo satélite [WELLS et al., 1986]. Expressando matematicamente, tem-se que

$$\phi_j^i = \phi^i(t) - \phi_j(T) \quad (4.9)$$

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 $\phi^i(t)$ é a fase do sinal transmitido pelo i-ésimo satélite no instante t, sendo estes elementos medidos em ciclos.

A expressão (4.9) pode ser revertida, isto é, a fase de batimento pode ser igual ao sinal transmitido menos o recebido, dependendo do receptor [WEI, 1986].

Na prática, são efetuadas medidas de fase para vários satélites no instante de recepção T. Como cada satélite possui uma distância diferente para o receptor, existirão tantos instantes t quantos satélites. Este inconveniente pode ser evitado expressando-se cada instante de transmissão como uma função do

⁽⁴⁾ a palavra "portadora" é usualmente empregada para indicar que o batimento é efetuado sobre ela, e não sobre o código.

instante de recepção. Deste modo [WEI, 1986]

$$t = T - \delta\tau \quad (4.10)$$

onde $\delta\tau$ corresponde ao tempo gasto pelo sinal no seu percurso entre o satélite e o receptor, sendo expresso por

$$\delta\tau = (\rho_j^i / c) + (\delta A_j^i / c) \quad (4.11)$$

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 (4.10), $\phi^i(t)$ pode ser expresso por

$$\phi^i(t) = \phi^i(T - \delta\tau) \quad (4.12)$$

$\delta\tau$ being small, we can expand $\phi^i(t)$ in a Taylor's series

(Linearizando por Taylor, tem-se que)

$$\phi^i(t) = \phi^i(T) - \frac{\partial \phi^i}{\partial t} \delta\tau = \phi^i(T) - f \delta\tau \quad (4.13)$$

Entrando com as equações (4.13) e (4.11) na (4.9), obtem-se uma nova expressão para ϕ_j^i

$$\phi_j^i = \phi^i(T) - \phi_j^i(T) - (f/c) \rho_j^i - (f/c) \delta A_j^i \quad (4.14)$$

que representa a quantidade observada pelo receptor [REMONDI,

1985; WELLS et al, 1986].

A medida de fase ϕ_j^t é feita continuamente desde a primeira medida $\phi_j^t(T_0)$. Esta medida de fase está baseada em um alinhamento de fase do relógio do receptor com o sinal da portadora, mas sem o conhecimento de qual ciclo representaria perfeita sincronização de fase. Então, à equação (4.14) deve ser adicionada a incógnita N_j^t , conhecida por ambiguidade, que representa o número inteiro de ciclos no instante inicial T_0 [REMONDI, 1985; WELLS et al, 1986]

$$\phi_j^t = \phi^t(T) - \phi_j^t(T) - (f/c) \rho_j^t + N_j^t - (f/c) \delta A_j^t \quad (4.15)$$

A equação (4.15) é conhecida na literatura como modelo da Pura Fase. Nela, são incógnitas da solução, além das coordenadas cartesianas do receptor, $\phi^t(T)$, $\phi_j^t(T)$ e N_j^t .

A diferença [$\phi^t(T) - \phi_j^t(T)$] subentende a falta de sincronização entre os osciladores do satélite e do receptor [AQUINO, 1988].

Para se encontrar uma equação correspondente a (4.15) em unidade de comprimento, multiplica-se esta equação pelo comprimento de onda $\lambda = c/f$, e define-se que $\Phi = -\lambda \phi_j^t$. Fazendo $\phi^t = f \Delta t$ e $\phi_j^t = f \Delta T$, e negligenciando-se os índices, obtém-se

$$\Phi = \rho + c (\Delta T - \Delta t) + \lambda N - \Delta_{ion} + \Delta_{trop} \quad (4.16)$$

A equação (4.16) é comparável à equação da pseudo-distância (4.5), indicando que Φ também pode ser encarado como distância influenciada pelos mesmos efeitos sistemáticos. A

diferença essencial entre as duas equações está na introdução da incógnita N , que representa o número inteiro de ciclos contido na distância satélite-receptor no instante do começo da medida de fase. A menos que alguma perda de ciclo ocorra durante o rastreamento, esta ambiguidade incógnita permanece invariável (isto é, existirá apenas uma ambiguidade para cada par receptor-satélite), sendo o receptor capaz de contar as variações do ciclo inteiro devido a mudanças na distância satélite-receptor com o tempo [WELLS et al, 1986].

As duas principais dificuldades das medidas de fase da frequência de batimento da portadora envolvem o problema da ambiguidade do ciclo. A primeira está relacionada à dificuldade da obtenção do número inicial de ciclos inteiros da portadora entre o satélite e o receptor, ao passo que a segunda diz respeito a eventuais perdas de ciclo, isto é, a perda da contagem dos ciclos inteiros, durante o rastreamento. Perdas de ciclo ocorrem quando o sinal do satélite é obstruído de algum modo, não sendo possível rastreá-lo durante o tempo em que a obstrução persistir [WELLS et al, 1986], ou quando a fase deixa de ser momentaneamente observada devido a excesso de ruído ou a um movimento do receptor [MADER, 1986].

O sinal negativo do termo correspondente à refração ionosférica deve-se ao fato do sinal sofrer uma aceleração durante sua passagem por esta camada [SEEBER, 1986].

4.1.3 - Precisão dos Métodos

A precisão das medidas de pseudo-distância e da fase de

frequência de batimento pode ser apreciada por duas regras práticas apresentadas por WELLS et al (1986).

A primeira regra prática reportada, relaciona a precisão da medida da pseudo-distância à precisão com a qual o pico da correlação pode ser mantido. Esta precisão corresponde a 1% do período entre épocas sucessivas do código. Para o código P, cujas épocas sucessivas são de 0,1 μ s, a precisão é de 1 ns. Multiplicando-se pela velocidade da luz, obtem-se um valor de 30 cm. Para o código C/A, os valores são dez vezes menos precisos, ou seja, 3 metros.

No tocante a medidas de fase, uma outra regra prática estabelece que medidas deste tipo podem ser feitas para até 1% do comprimento de onda. Para a portadora L_1 , que tem comprimento de onda de cerca de 20 cm, a precisão é de 2 mm.

4.2 - Combinações Lineares de Observações

Conforme citado anteriormente, a medida da distância satélite-receptor é influenciada por efeitos sistemáticos oriundos da incerteza da posição do satélite, da dessincronização do relógio do satélite e do receptor, e das camadas atmosféricas que os sinais percorrem. Estes efeitos sistemáticos acarretam numa precisão de poucos metros no posicionamento absoluto, levando a uma inaplicabilidade desta modalidade de posicionamento frente às exigências mais rigorosas da Geodésia e de algumas aplicações geofísicas.

Os efeitos sistemáticos descritos exibem correlação entre sinais recebidos simultaneamente por diferentes receptores

que observam os mesmos satélites. O posicionamento relativo se serve destas correlações, em busca de um aumento da precisão, possibilitando a eliminação ou redução dos efeitos sistemáticos, através da diferença entre medidas, sejam elas obtidas com o emprego de um dos códigos ou com a fase da portadora.

A precisão alcançável com medidas de fase da portadora levou a comunidade geodésica e geofísica ao desenvolvimento de modelos matemáticos baseados em combinações lineares de observações, inspirados em técnicas aplicadas no VLBI.

A seguir são apresentados os modelos matemáticos das combinações lineares de observações de fase.

4.2.1 - Diferença da Pura Fase com o tempo

O modelo da Pura Fase, expresso pela equação (4.15), apresenta mais incógnitas que observações. Para sanar este problema, algumas alternativas são propostas. ANDRADE [1988] sugere que seja feita a diferença da Pura Fase observada para um mesmo satélite em dois instantes distintos 1 e 2, eliminando-se os parâmetros em excesso. Deste modo, obtém-se

$$\phi_j^i(T_{1,2}) = \phi_j^i(T_2) - \phi_j^i(T_1) = - (f/c) \rho_j^{12} - (f/c) \delta A_j^{12} \quad (4.17)$$

$$\text{onde: } \rho_j^{12} = \rho_j^i(T_2) - \rho_j^i(T_1)$$

$$\delta A_j^{12} = \delta A_j^i(T_2) - \delta A_j^i(T_1)$$

Este modelo é válido somente se não houver perda de sintonia entre os instantes 1 e 2. A equação (4.17) se assemelha a

expressão do conhecido Método Doppler. Para que um bom resultado seja alcançado, são necessárias várias horas de observação, devido à lenta variação da distância receptor-satélite. Contudo, como vários satélites podem ser rastreados simultaneamente, o período de observação pode ser encurtado, sendo bem menor quando comparado ao período correspondente no Sistema Transit [ANDRADE, 1988].

ASHKENAZI E YAU [1986] e AQUINO [1988], por seu turno, trabalham com a abordagem interferométrica básica, usada no GPS, que consiste na combinação da equação (4.15) para diferentes satélites e diferentes receptores. Combinando-se, por exemplo, quatro satélites ($i = 1, 2, 3, 4$) e dois receptores ($j = A, B$), oito equações seriam formadas, resultando em 11 incógnitas por instante, sendo incógnitas além das 3 coordenadas relativas entre as estações, oito incógnitas dependentes do tempo \bar{N}_j^t .

$$\bar{N}_j^t = \phi_i^t C D - \phi_j^t C D + N_j^t \quad (4.18)$$

Este problema pode ser resolvido através do artifício proposto por GOAD [1985] que consiste em adotar uma estação base (A, por exemplo) e um satélite base (1, por exemplo). Guardando as 5 incógnitas \bar{N} envolvidas com a estação A e o satélite 1, as 3 incógnitas restantes podem ser convenientemente combinadas de forma que resultem em 3 novas incógnitas inteiras não-dependentes do tempo, K_B^2 , K_B^3 e K_B^4 . Este artifício conduz a uma solução com observações feitas em 3 instantes.

4.2.2 - Simplex Diferença de Fase

Aplicando a equação (4.15) a dois receptores A e B, sintonizados no mesmo satélite i , obtém-se

$$\phi_{AB}^i = \phi_B^i - \phi_A^i = -\phi_{AB}^{(TD)} - (f/c) \rho_{AB}^i + N_{AB}^i - (f/c) \delta A_{AB}^i \quad (4.19)$$

onde:

$$N_{AB}^i = N_B^i - N_A^i$$
$$\rho_{AB}^i = \rho_B^i - \rho_A^i$$
$$\phi_{AB}^{(TD)} = \phi_B^{(TD)} - \phi_A^{(TD)}$$
$$\delta A_{AB}^i = \delta A_B^i - \delta A_A^i$$

O termo $\phi_{AB}^{(TD)}$ representa o efeito do não-alinhamento entre os osciladores dos receptores e N_{AB}^i a ambiguidade inteira inicial entre os receptores A e B.

O modelo expresso pela equação (4.19), indica a remoção dos efeitos dos erros associados com o relógio do satélite. Também percebe-se um maior número de incógnitas que de equações. Este problema pode ser resolvido com o mesmo artifício proposto por GOAD [1985].

A Simplex 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 serão iguais, anulando-se. Este raciocínio é considerado válido para uma base máxima de 100

km. Estas diferenças possibilitam ainda uma redução nos erros causados pela incerteza dos parâmetros orbitais transmitidos.

4.2.3 - Dupla Diferença de Fase

Aplicando a equação (4.19) a dois satélites i e k , obtém-se

$$\phi_{AB}^{ik} = \phi_{AB}^k - \phi_{AB}^i = N_{AB}^{ik} - (f/c) \rho_{AB}^{ik} - (f/c) \delta A_{AB}^{ik} \quad (4.20)$$

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

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

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

Do modelo da Dupla Diferença de Fase, claramente depreende-se a remoção dos erros provenientes dos relógios do satélite e do receptor.

Durante a solução deste modelo, a posição de um dos receptores deverá ter suas coordenadas fixas através de injunções [ANDRADE, 1988].

- Também a Dupla Diferença de Fase, à exemplo da Simples Diferença de Fase, possibilita uma expressiva redução dos efeitos causados pela refração atmosférica e parâmetros orbitais.

4.2.4 - Tripla Diferença de Fase

Aplicando a (4.20) a dois instantes T_1 e T_2 , obtém-se

$$\begin{aligned} \phi_{AB}^{ik}(T_{1,2}) &= \phi_{AB}^{ik}(T_2) - \phi_{AB}^{ik}(T_1) = \\ &= -(f/c) \left[\rho_{AB}^{ik}(T_2) - \rho_{AB}^{ik}(T_1) \right] - (f/c) \left[\delta A_{AB}^{ik}(T_2) - \delta A_{AB}^{ik}(T_1) \right] \end{aligned} \quad (4.21)$$

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

O modelo da Tripla Diferença de Fase se apresenta isento de qualquer ambiguidade.

À exemplo da Dupla Diferença de Fase, durante a solução da Tripla Diferença de Fase a posição de um dos receptores deverá ter suas coordenadas fixas através de injunções.

Também a Tripla Diferença de Fase, à exemplo das anteriores, possibilita uma expressiva redução dos efeitos causados pela refração atmosférica e parâmetros orbitais..

4.3 - Processamento das Observações

O processamento das observações GPS pode se dar de diferentes maneiras, dependendo da aplicação e da precisão inerente a ela.

4.3.1 - Posicionamento através do código

As medidas de pseudo-distância, através do código P ou

do código C/A, encontram seu principal campo de emprego na navegação em tempo real e no pré-processamento de dados.

Conforme mencionado, a precisão esperada para a pseudo-distância medida com o código P é maior do que aquela obtida com o código C/A. Entretanto, espera-se que o código P venha a ser substituído por um código secreto Y de uso militar e de acesso restrito, tornando-se o código C/A no único código disponível à comunidade civil. Existe ainda o risco adicional de que a precisão da posição final obtida com o código C/A venha a ser "degradada", por exemplo, através da introdução de "erros" em alguns dos parâmetros da Mensagem GPS [WELLS et al, 1986].

O modelo da pseudo-distância, expresso através da equação (4.5), apresenta-se como altamente indicado para pré-processamento de dados, oferecendo, além das coordenadas iniciais da estação, os parâmetros para correção do estado do relógio do receptor. Estes últimos permitem uma solução para o problema da dessincronização do relógio do receptor com respeito ao tempo GPS na ordem do nanosegundo [BEUTLER et al, 1988].

4.3.2 - Posicionamento através da Fase

Dentre os diversos modelos das diferenças de fase, a Simples Diferença de Fase foi inicialmente o mais utilizado devido a sua semelhança com o VLBI. Entretanto, logo percebeu-se que a Dupla Diferença de Fase oferecia uma solução mais consistente para a ambiguidade [ASHKENAZI E YAU, 1986]. A maioria dos algoritmos de processamento estão baseados neste modelo. Alguns centros usam a Tripla Diferença de Fase [EREN, 1987] devido ao fato deste modelo

estar livre de toda ambiguidade. Contudo, o mais comum é utilizá-lo durante o pré-processamento, como uma espécie de filtro.

4.3.3 - Obtenção da Ambiguidade

Testes têm comprovado a pertinência da obtenção de bases estáticas com precisão relativa de $10 \text{ mm} \pm 1$ (ou 2) ppm, usando-se medidas de fase. Entretanto, este nível de precisão exige um período de cerca de 30 minutos de rastreamento [ASHKENAZI et al, 1988].

Considerando o modelo da Dupla Diferença de Fase, expresso por (4.20), encontra-se como incógnita a ambiguidade inteira inicial N_{AB}^{ik} , correspondente ao par de satélites observados. Os valores encontrados na solução ficam próximos a um valor inteiro (por exemplo, 49,996 ou 50,003). Estes primeiros valores, são então fixados no seu valor inteiro (50) numa solução subsequente. Esta segunda solução conduz a um resultado mais preciso. A razão da necessidade de aproximadamente 30 minutos de dados repousa no fato de que antes deste intervalo a incógnita inteira calculada não converge ao seu valor teórico [ASHKENAZI et al, 1988].

4.4 - Correlação Matemática entre observáveis das Diferenças de Fase

Um exame das diferentes observáveis das medidas de fase apresentadas na seção (4.2) mostra que somente as observáveis da Pura Fase e da Simples Diferença de Fase podem ser consideradas

como matematicamente independentes. Já as observáveis da Dupla e da Tripla diferenças de fase podem ser expressas como diferenças de Pura Fase. Em outras palavras, enquanto sucessivas observáveis de Dupla Diferença compartilham leituras de fase comuns, o mesmo não ocorre com as observáveis correspondentes da Simples Diferença [ASHKENAZI E YAU, 1986; AQUINO, 1988].

Considerando a observação básica independente (a Pura Fase), duas estações A e B, e dois satélites i e k, pode-se escrever o vetor das observações de Simples Diferença

$$\begin{bmatrix} \phi_{AB}^i \\ \phi_{AB}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_A^i \\ \phi_B^i \\ \phi_A^k \\ \phi_B^k \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

De modo análogo, considerando-se duas estações A e B e quatro satélites i, j, k, l, escreve-se o vetor das observações de Dupla diferença

$$\begin{bmatrix} \phi_{AB}^{ij} \\ \phi_{AB}^{ik} \\ \phi_{AB}^{il} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & -1 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 \\ +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_A^i \\ \phi_B^i \\ \phi_A^j \\ \phi_B^j \\ \phi_A^k \\ \phi_B^k \\ \phi_A^l \\ \phi_B^l \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Para todo conjunto de observações compostas por diferenças, existirá uma matriz R composta por elementos 0, +1 e -1, e um vetor composto por observações de Pura Fase cuja matriz de correlação será sempre representada por uma matriz unidade.

Pela lei de propagação da covariância, chega-se a matriz de correlação das observações de Simples Diferença

$$C = R \cdot I \cdot R^T = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

que por ser diagonal indica que estas observações não são correlacionadas.

De modo análogo, pela mesma lei, chega-se a matriz de correlação das observações de Dupla Diferença

$$C = R \cdot I \cdot R^T = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 2 \\ 2 & 4 & 2 \\ 2 & 2 & 4 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

que por ser uma matriz cheia, indica existir correlação entre as observações de Dupla Diferença.

Quando precisão geodésica for desejada, a não inclusão de matrizes de correlação no processamento de observações de Dupla Diferença afeta os resultados significativamente [ASHKENAZI E YAU, 1986].

CAPITULO 5

POSICIONAMENTO ESTATICO E CINEMATICO

5.1 - Precisão em função da Geometria dos Satélites

A precisão com a qual posições são determinadas usando GPS dependem da precisão da medição da distância receptor-satélite e da geometria da configuração dos satélites [WELLS et al, 1986].

A precisão da medição da distância receptor-satélite é usualmente chamada de UERE, sigla oriunda do inglês "user equivalent range error", que representa o efeito conjunto da incerteza das efemérides, dos erros de dessincronização dos relógios do satélite e do receptor, dos efeitos na propagação do sinal (ionosfera, troposfera e reflexão) e eventual ruído do receptor.

O UERE sozinho não representa a precisão final da medida, pelo fato desta ser também afetada pela geometria da configuração dos satélites no momento das observações. O efeito da geometria da configuração dos satélites é dado através do fator de diluição de precisão, representado pela sigla DOP, oriunda do inglês "Dilution Of Precision".

A precisão do posicionamento σ pode ser obtida por

$$\sigma = \text{DOP} \cdot \sigma_0 \quad (5.1)$$

onde σ_0 representa a precisão da medição e DOP é um escalar que representa a contribuição da configuração dos satélites para a

precisão do posicionamento.

Da expressão (5.1), pode-se verificar que quanto menor o valor da DOP, mais a precisão do posicionamento se aproxima da precisão da medição. Reveste-se, então, a DOP, de utilidade para o planejamento de observações, na escolha dos satélites cuja configuração geométrica forneça os menores valores de DOP [MILLIKEN E ZOLLER, 1978].

Cinco diferentes DOP vem sendo utilizados, dependendo da coordenada, ou combinação de coordenadas, que se está considerando. São eles:

VDOP - diluição de precisão da posição vertical

HDOP - diluição de precisão da posição horizontal

TDOP - diluição de precisão para tempo

PDOP - diluição de precisão para posição tri-dimensional

GDOP - diluição de precisão para posição tri-dimensional e tempo

Entrando na equação (5.1), tem-se

$$\begin{aligned}\sigma_h &= \text{VDOP} \cdot \sigma_o \\ \sigma_{\phi, \lambda} &= \text{HDOP} \cdot \sigma_o \\ \sigma_{\phi, \lambda, h} &= \text{PDOP} \cdot \sigma_o \\ \sigma_T &= \text{TDOP} \cdot \sigma_o \\ \sigma_{\phi, \lambda, h, T} &= \text{GDOP} \cdot \sigma_o\end{aligned}\tag{5.2}$$

onde σ_h é o desvio padrão em altura, $\sigma_{\phi, \lambda}$ é a precisão da posição horizontal, $\sigma_{\phi, \lambda, h}$ é a precisão tri-dimensional, σ_T é o desvio padrão para tempo e $\sigma_{\phi, \lambda, h, T}$ é a precisão para posição tri-dimensional e tempo [WELLS et al, 1986].

As diversas DOP podem ser calculadas a partir da raiz quadrada do traço da matriz variância-covariância dos parâmetros, assumindo-se a matriz dos pesos como unitária [SEEBER, 1986; VANÍČEK, 1987, comunicação pessoal; ANDRADE, 1988]

$$[A^T A]^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_X^2 & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} & \sigma_{XT} \\ & \sigma_Y^2 & \sigma_{YZ} & \sigma_{YT} \\ & & \sigma_Z^2 & \sigma_{ZT} \\ & & & \sigma_T^2 \end{bmatrix} \quad \text{simétrica} \quad (5.3)$$

onde

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_1}{\partial X} & \frac{\partial p_1}{\partial Y} & \frac{\partial p_1}{\partial Z} & \frac{\partial p_1}{\partial \Delta t u} \\ \frac{\partial p_2}{\partial X} & \frac{\partial p_2}{\partial Y} & \frac{\partial p_2}{\partial Z} & \frac{\partial p_2}{\partial \Delta t u} \\ \frac{\partial p_3}{\partial X} & \frac{\partial p_3}{\partial Y} & \frac{\partial p_3}{\partial Z} & \frac{\partial p_3}{\partial \Delta t u} \\ \frac{\partial p_4}{\partial X} & \frac{\partial p_4}{\partial Y} & \frac{\partial p_4}{\partial Z} & \frac{\partial p_4}{\partial \Delta t u} \end{bmatrix}$$

$$e \quad p_i = \rho + \Delta t u$$

As DOP são expressas por:

$$GDOP = (\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2 + \sigma_T^2)^{1/2} = [(PDOP)^2 + (TDOP)^2]^{1/2}$$

$$PDOP = (\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2)^{1/2}$$

$$HDOP = (\sigma_X^2 + \sigma_Y^2)^{1/2}$$

$$VDOP = (\sigma_Z^2)^{1/2}$$

$$TDOP = (\sigma_T^2)^{1/2}$$

(5.4)

A GDOP pode ser também expressa por

$$GDOP \cong \frac{1}{V}$$

(5.5)

onde V é o volume de um tetraedro que possui como arestas os segmentos que ligam as extremidades dos vetores unitários direcionados do receptor a cada um dos 4 satélites.

5.2 - Posicionamento Estático

5.2.1 - Definição

Entende-se por posicionamento estático todo o tipo de emprego de receptores GPS para a determinação da posição de estações situadas sobre a superfície terrestre, isentas de movimento próprio, desconsiderando-se aqui os movimentos que as estações venham a sofrer provocados por fenômenos geofísicos, como movimentos tectônicos, por exemplo. Tais fenômenos, de fato, se apresentam como algo que pode ser investigado com o auxílio de determinações estáticas com o GPS.

Normalmente, o posicionamento estático não necessita de resultados em tempo real, permitindo um longo período de rastreamento, o que conduz à coleta de um conjunto abundante de dados. O pós-processamento destes dados permite que sejam alcançados os melhores resultados possíveis.

5.2.2 - Posicionamento Estático Absoluto

O meio mais simples de se determinar a posição de uma estação estática consiste em se deixar um receptor isolado sobre ela. Medidas de pseudo-distância, tomadas para 4 satélites, conduzirão a precisões entre 10 e 20 metros, obtidas instantaneamente, empregando os códigos P e C/A, respectivamente [ASHKENAZI, 1985a].

O modelo matemático utilizado é aquele expresso pela equação (4.5), onde as coordenadas cartesianas dos satélites e o termo relativo a dessincronização dos respectivos relógios podem ser obtidos via efemérides transmitidas, restando como incógnitas as coordenadas cartesianas do receptor, bem como o termo relativo a dessincronização do seu relógio. Os termos relativos a refração troposférica e ionosférica podem ou não ser aplicados.

Ampliando-se o período de observação para 4 a 8 horas, pode-se esperar precisão ao nível do metro, usando-se, na solução, ajuste por mínimos quadrados e parâmetros orbitais refinados [WELLS et al, 1986].

A geometria dos satélites exerce papel importantíssimo nesta aplicação, influenciando na precisão alcançada.

5.2.3 - Posicionamento Estático Diferencial

5.2.3.1 - Vantagens

Uma das vantagens do posicionamento diferencial reside na possibilidade de serem cancelados, ou minimizados, os erros

provenientes das refrações troposférica e ionosférica, bem como aquele oriundo das efemérides transmitidas. Tais erros afetam igualmente ambas as estações dependendo do comprimento da base formada por elas, pois quanto maior a base, menor é a semelhança dos efeitos citados sobre as estações. O comprimento das bases é fator limitante da eficiência do posicionamento diferencial.

O emprego de receptores que rastreiam as duas frequências torna possível o cálculo de correções de primeira ordem para a ionosfera, e é indispensável quando alta precisão relativa for desejada para bases longas. Ainda assim pode existir um pequeno efeito residual, particularmente quando as observações forem efetuadas próximas ao meio-dia ou durante um período de máxima atividade solar. Quando da utilização de receptores que utilizam somente uma frequência, a correção do efeito provocado pela ionosfera pode ser feita baseando-se no modelo de correção da ionosfera, transmitido na Mensagem dos Satélites. Tal modelo, contudo, é capaz de corrigir somente uma parte do efeito. Estudos realizados mostram que o efeito causado pela ionosfera no resultado final de bases calculadas com e sem a utilização deste modelo é da ordem de 1 ppm, podendo atingir algumas partes por milhão em rastreios realizados durante a máxima atividade solar [WELLS et al, 1986].

O efeito causado pela troposfera pode ser corrigido utilizando-se algum dos modelos disponíveis, ou simplesmente assumindo que com a diferença das observações coletadas pelos receptores instalados nos extremos da base, qualquer efeito troposférico será totalmente removido, ou consideravelmente

reduzido. A segunda alternativa é viável para bases cujo comprimento máximo seja de 100 km [WELLS et al, 1986]. Precisasões relativas ao nível do centímetro, notadamente para bases mais longas, exigem a coleta dos parâmetros troposféricos. Convém mencionar que a fonte dominante de erro na componente vertical advém da troposfera [THORNTHON et al, 1986].

O efeito conjunto da incerteza dos parâmetros orbitais e do comprimento da base foi apresentado na Seção 3.5.

Outra vantagem do posicionamento estático diferencial advém da possibilidade de serem eliminados os termos que representam a dessincronização dos relógios dos satélites e dos receptores.

5.2.3.2 - Posicionamento Estático Diferencial com Pseudo-distância

O posicionamento diferencial possibilita a determinação das componentes ΔX , ΔY e ΔZ , oriundas da diferença entre as coordenadas cartesianas das estações que compõem a base, que, numa abordagem simples, são obtidas pelo posicionamento absoluto efetuado sobre elas. Utilizando o modelo matemático da pseudo-distância, expresso pela equação (4.5), para duas estações A e B que rastreiam simultaneamente o mesmo satélite i , e fazendo a diferença, obteremos um modelo da forma

$$\Delta \vec{R}_{AB} = \vec{R}_B - \vec{R}_A \quad (5.6)$$

onde \vec{R} é o vetor posição do receptor. Os erros comuns para cada

estação foram cancelados ao ser efetuada a diferença das duas soluções, restando somente aqueles relativos a dessincronização dos relógios dos receptores [WELLS et al, 1986].

5.2.3.3 - Posicionamento Estático Diferencial com medidas de fase

O posicionamento estático diferencial, usando técnicas interferométricas e combinações lineares entre as medidas de fase, tem-se mostrado como o meio mais poderoso de se obter precisões relativas com alta precisão. Os modelos matemáticos e as vantagens da utilização de cada um deles, foram descritos no Capítulo 4.

Diversos testes têm sido realizados, por diferentes instituições de pesquisa, visando aquilatar a potencialidade desta modalidade de posicionamento, quantificando a utilização de dados coletados com uma ou duas frequências para bases de diferentes tamanhos, com diferentes modelos matemáticos, bem como demais problemas inerentes. Dois exemplos representativos são descritos a seguir.

BOCK et al [1984] apresenta os resultados de 11 testes realizados com o rastreador MacrometerTM Modelo V-1000. Este instrumento, fabricado pela Litton Aero Service é capaz de rastrear somente a fase da portadora L_1 , sendo incapaz de decodificar a Mensagem transmitida pelos satélites GPS, necessitando que os parâmetros orbitais sejam supridos por fonte externa e exigindo que a sincronização do relógio dos receptores seja feita por calibrações antes e após as observações. Os testes envolveram a observação de bases cujo comprimento variava de 748 m

a 2.400 km, e foram calculadas através da Simples e da Dupla Diferença de Fase. O modelo da Dupla Diferença de Fase foi usado para as bases de até 24 km de comprimento, empregando dados de 2 a 3 horas de observação; o modelo da Simples Diferença de Fase foi usado para as demais bases, utilizando dados de 10 horas de observação e padrão atômico de frequência para controle do relógio dos receptores. Os resultados indicam uma precisão relativa de 2 ppm para as três componentes.

LADD [1986], por sua vez, apresenta os resultados de 30 bases independentes, com comprimento variável de 10 a 56 km, que foram determinadas com o Macrometer IITM, receptor que se distingue do anterior por ser capaz de medir sobre as duas frequências. O período de observação para cada base variou de 1 a 3,5 horas. A posição relativa das estações ficou dentro de 1 ppm para as coordenadas horizontais e 1,6 ppm para a vertical. O modelo empregado foi o da Dupla Diferença de Fase.

5.2.4 - Estações em Rede

O conceito de posicionamento estático diferencial conduziu naturalmente a idéia de estações compondo uma rede, em analogia a uma rede geodésica convencional. É fácil imaginar uma rede de estações sendo ocupadas por um conjunto de receptores GPS, e as observações feitas sendo posteriormente tratadas de modo semelhante às observações convencionais.

Uma rede GPS pode ser classificada como rede (de extensão) local, quando não ultrapassa 100 km, ou rede (de extensão) regional ou continental. Na primeira, as coordenadas das

estações que compõem a rede são as principais incógnitas, podendo-se desconsiderar os efeitos causados pelos parâmetros orbitais, devido a dimensão da rede. Nas demais redes, correções orbitais devem ser introduzidas se alta precisão for desejada [WELLS et al, 1986].

Uma rede pode ser ocupada de modo a que as bases sejam observadas independentemente e depois combinadas no ajustamento da rede. Melhores resultados têm sido obtidos quando todas as bases são observadas [VANÍČEK et al, 1985].

O modelo básico para um ajustamento tri-dimensional, considerando-se uma base como unidade fundamental, pode ser expresso por

$$\Delta \vec{R}_{ij} = \vec{R}_j - \vec{R}_i, C_{\Delta R} \quad (5.7)$$

onde $\Delta \vec{R}_{ij}$ é um valor oriundo da observação GPS da base composta pelas estações i e j , processadas em um estágio anterior. O vetor $\Delta \vec{R}_{ij}$ é considerado como observação associado a matriz covariância $C_{\Delta R}$, e \vec{R}_j e \vec{R}_i são as incógnitas a serem calculadas [WELLS et al, 1986].

Testes, com a solução de redes locais, realizados no Canadá, são descritos por WELLS et al [1986], utilizando os rastreadores MacrometerTM V-1000 e TI-4100⁽⁵⁾. Os resultados

⁽⁵⁾ O receptor TI-4100, fabricado pela Texas Instruments Inc., é um receptor cuja principal característica é a de poder observar tanto os dois códigos quanto as duas fases.

encontrados giram entre 1 e 2 ppm.

5.2.5 - Aprimoramento da Órbita

Conforme visto na Seção 3.5, equações (3.7) e (3.8), a influência da órbita dos satélites GPS na determinação de uma base depende do comprimento desta. Em outras palavras, quanto maior a base, maior a necessidade de parâmetros orbitais precisos.

Uma alternativa válida no posicionamento diferencial consiste em se adotar as efemérides transmitidas, supondo-as como corretas. Esta abordagem, comumente adotada para bases ou redes locais, se pouco influi na precisão final de bases curtas, pode acarretar em erros que variam de 1 a 4 ppm para bases que se aproximam do limite dos 100 km (equações 3.7 e 3.8). Por outro lado, desejando-se a medição de uma base de 1.000 km com precisão de 5 cm (0,05 ppm), como desejado em aplicações na Geodinâmica, deve-se conhecer as órbitas com uma precisão de, aproximadamente, 1 metro (BEUTLER et al, 1985).

Como a imprecisão dos parâmetros orbitais disponíveis traz os transtornos mencionados, torna-se indispensável a obtenção destes parâmetros junto com aqueles que realmente interessam, as coordenadas do receptor, principalmente para bases e redes regionais ou continentais.

As primeiras experiências neste sentido deixaram claro ser possível estimar parâmetros orbitais da ordem de poucos metros, equivalente a 0,1 ppm do ralo orbital, utilizando o modelo de Dupla Diferença de Fase (ABBOT et al, 1985; BEUTLER et al,

1985]. Além disso, ficou demonstrado ser possível o aprimoramento da órbita mesmo em redes locais [BEUTLER et al, 1985]. Os testes referidos foram realizados usando-se réceptores de uma frequência sobre redes locais.

O mesmo conceito exposto e testado por BEUTLER et al [1985] foi extendido a bases e redes regionais e continentais como solução que permite a elas grande precisão. A alternativa desenvolvida com este fim consiste na determinação simultânea da órbita dos satélites GPS e da posição das estações incógnitas, com o envolvimento de estações cuja posição seja previamente conhecida, chamadas de Estações Fiduciais.

Tal procedimento consiste em uma rede de estações fiduciais cuja posição tenha sido prévia e precisamente estabelecida por alguma técnica independente, como VLBI ou SLR. Estas estações fiduciais definem um sistema de coordenadas fixo à Terra, relativo ao qual as órbitas dos satélites e as bases geodésicas podem ser determinadas simultaneamente.

Durante a medição da base GPS, os receptores das estações incógnita rastreiam os satélites simultaneamente aos receptores localizados nas estações fiduciais. Numa análise subsequente, por mínimos quadrados, os dados de distância oriundos das estações fiduciais permitem que valores refinados das órbitas dos satélites GPS sejam estimados junto com a posição das estações incógnitas. Sem a possibilidade de se estimar com precisão a órbita dos satélites GPS não seria possível obter bases regionais com precisão ao nível do centímetro.

A Figura 5.1 apresenta um cenário hipotético de

utilização do conceito de rede fiducial, onde quatro estações fiduciais (círculos negros) envolvem duas estações incógnitas (círculos vazados) [KROGER et al, 1986].

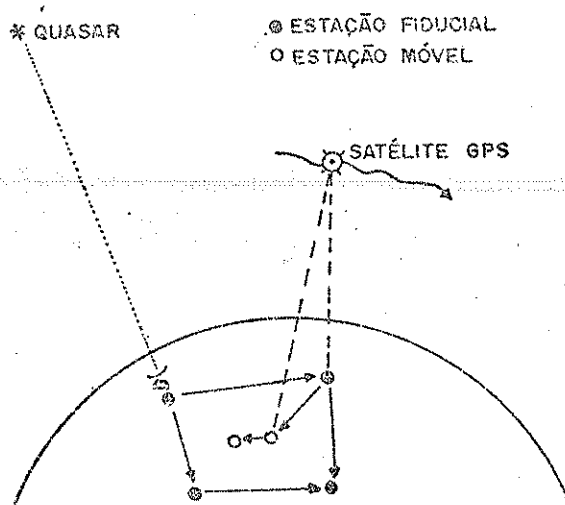


Figura 5.1 - Conceito de Rede Fiducial

Como exemplo ilustrativo da distribuição de estações em uma rede fiducial, citam-se aquelas inicialmente instaladas em Fort Davis, Texas; Westford, Massachussetts; e em Richmond, Flórida. Outras localizações sendo consideradas são Quito, Equador; São Paulo; Santiago do Chile; e Cayena, Guiana Francesa [KROGER et al, 1986]. Outras redes fiduciais para fins específicos têm sido propostas, como as apresentadas na Figura 5.2, destinadas a estudos geodinâmicos no Caribe e no Pacífico Sul. Círculos negros representam estações fiduciais, ao passo que círculos vazados representam a localização das estações de interesse [THORNTON et al, 1986].

As precisões desejadas impõem o emprego de receptores capazes de medir simultaneamente as portadoras L_1 e L_2 , e que,

preferencialmente, sejam também capazes de medir as pseudo-distâncias p_1 e p_2 . É também importante que cada estação possua equipamento que colete dados troposféricos precisos, sendo uma exigência a utilização de radiômetro de vapor d'água [THORNTHON et al, 1986].

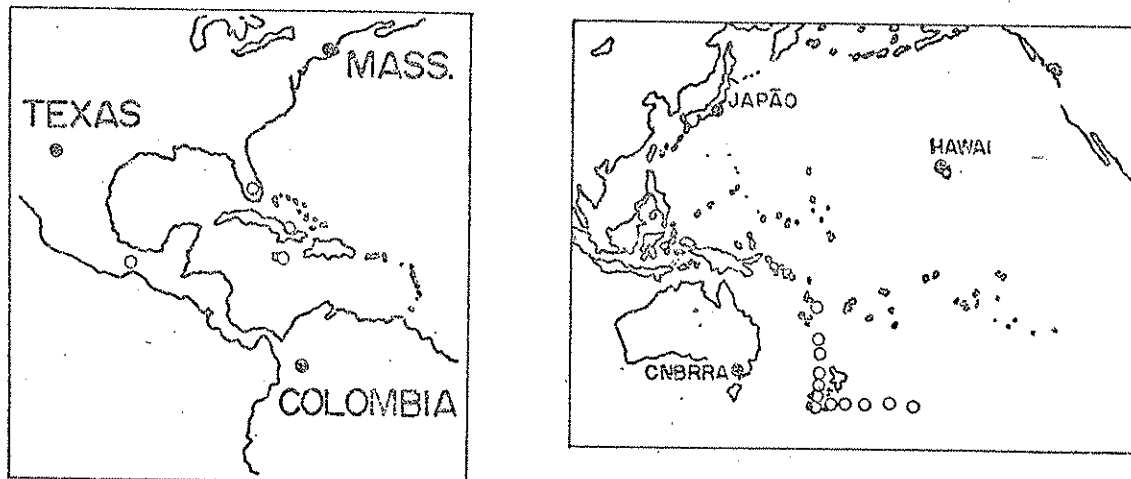


Figura 5.2 - Modelos de Redes Fiduciais

Diversas experiências realizadas comprovam a potencialidade do emprego de redes fiduciais para o aprimoramento da órbita. A mais notável foi o teste de bases de alta precisão, março de 1985, composto por um triângulo de lados de 71, 245 e 313 km, situado na Califórnia, e cinco estações fiduciais distribuídas ao longo dos EUA, cujos dados foram processados por diferentes instituições [BOCK et al, 1986; BEUTLER et al, 1986]. Bock comparou o resultado final do cálculo dos 3 lados com valores conhecidos, obtidos com VLBI, encontrando uma diferença GPS-VLBI de 0,2 ppm para cada componente. Beutler, por sua vez, apresentou

seus resultados em termos de repetibilidade diária, encontrando precisões relativas de 0,08 ppm em distância, 0,08 ppm em latitude, 0,16 ppm em longitude e 0,29 ppm em altura. A qualidade da órbita foi estimada em 0,1 ppm.

5.3 - Determinação de Altitudes com o GPS

5.3.1 - Introdução ao problema

O posicionamento absoluto com o NAVSTAR/GPS fornece o terno cartesiano da estação sobre a qual o rastreamento é efetuado segundo um referencial geodésico cuja origem se situa no centro de massa da Terra. O referencial realizado, por meio de observações GPS, é conhecido pela sigla WGS-84, sendo WGS oriundo das iniciais de World Geodetic System (veja Apêndice A).

Desejando-se a determinação do terno cartesiano da estação em um referencial geodésico local, deve-se lançar mão de parâmetros de translação TX, TY e TZ, que relacionem os dois referenciais de modo que

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{LOCAL}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{WGS-84}} + \begin{bmatrix} TX \\ TY \\ TZ \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Por sua vez, do posicionamento diferencial resultam as componentes ΔX , ΔY , ΔZ do vetor que une as duas estações 1 e 2, sobre as quais o rastreamento foi efetuado. Conhecendo-se as coordenadas cartesianas de uma delas, de 1 por exemplo, em um

referencial geodésico qualquer, determinam-se as coordenadas de 2, segundo o mesmo referencial, através de

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

WGS-84
WGS-84

ou LOCAL
ou LOCAL

No caso das coordenadas da estação 1 estarem relacionadas a um referencial local, é desnecessário a aplicação da equação (5.8).

As novas coordenadas cartesianas podem ser transformadas em coordenadas geodésicas latitude, longitude e altura elipsoidal, por meio de relações matemáticas bem conhecidas [BOMFORD, 1980].

Deste modo, do GPS obtém-se a altura elipsoidal ou geométrica, que é a distância da estação a um elipsóide tomado como referência. No caso de se desejar alturas ou desníveis entre estações objetivando algum tipo de aplicação especial, como por exemplo o controle de movimentos verticais da crosta, o conhecimento da altura elipsoidal é plenamente satisfatório.

Aplicações de Engenharia e Mapeamento, contudo, necessitam da altitude ortométrica, que é aquela que se refere a uma superfície equipotencial, o geóide. Para tal, é necessário o conhecimento da separação entre o geóide e o elipsóide adotado como referência, a altura ou ondulação geoidal. A Figura 5.3 mostra esquematicamente estas três quantidades.

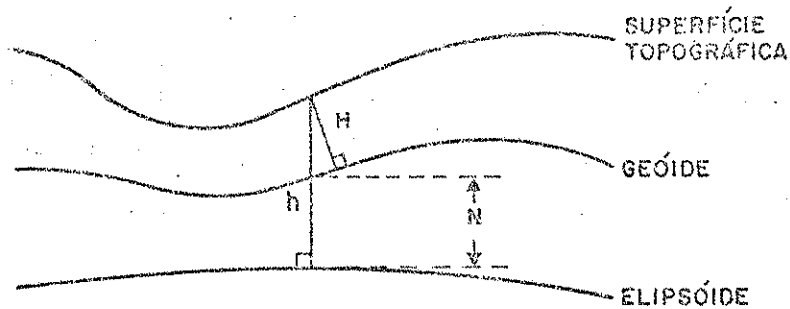


Figura 5.3 - Sistema de Alturas

A diferença entre a altura elipsoidal (h), quantidade medida com o GPS, e a altitude ortométrica (H), é a altura ou ondulação geoidal (N), dada simplesmente por

$$N \cong h - H \quad (5.10)$$

ou, em se desejando a diferença de altura geoidal entre dois pontos

$$N_2 - N_1 = (h_2 - h_1) - (H_2 - H_1) \quad (5.11)$$

ou

$$\Delta N = \Delta h - \Delta H$$

o que implica em dizer que, tendo-se h ou Δh fornecido pelo GPS, pode-se obter N ou ΔN se H ou ΔH for conhecido, ou vice-versa.

5.3.2 - Determinação da Ondulação Geoidal

A determinação da altura ou ondulação geoidal é tarefa da Geodésia Física, que para tal faz uso de vários tipos de dados, tratados isoladamente ou não, tais como anomalias de gravidade, modelos do potencial gravitacional, posições tri-dimensionais oriundas de outros sistemas de posicionamento por satélite (como o Transit, por exemplo), observações astronômicas e nivelamento geométrico de precisão.

Modelos do geóide podem tomar a forma de valores pontuais, perfis, ou representação espacial, global ou regional, através de um mapa geoidal. A Figura 5.4 mostra o Mapa Geoidal (Preliminar) do Brasil, referido ao SAD-69, conforme apresentado por BLITZKOW et al [1989]. Para alcançar o resultado descrito visualmente pelo mapa, BLITZKOW se utilizou de dados oriundos de pontos satélite obtidos com o Sistema Transit, rastreados sobre a rede de nivelamento geométrico de precisão.

As regiões onde estas informações não estavam disponíveis foram preenchidas com valores pontuais do modelo do potencial gravitacional GEM-T1, em blocos de $0,5^\circ$ por $0,5^\circ$. Pode-se verificar que a magnitude máxima da ondulação do geóide com respeito ao elipsóide adotado pelo SAD-69 é da ordem de 25 metros. Também se observa que o gradiente geoidal alcança valores máximos de aproximadamente 1 metro por 100 km em áreas das Regiões Nordeste, Norte e Centro-oeste. Testes indicam que os valores de N possuem uma precisão relativa da ordem de 20 centímetros para cada 20 quilômetros [BLITZKOW et al, 1989].

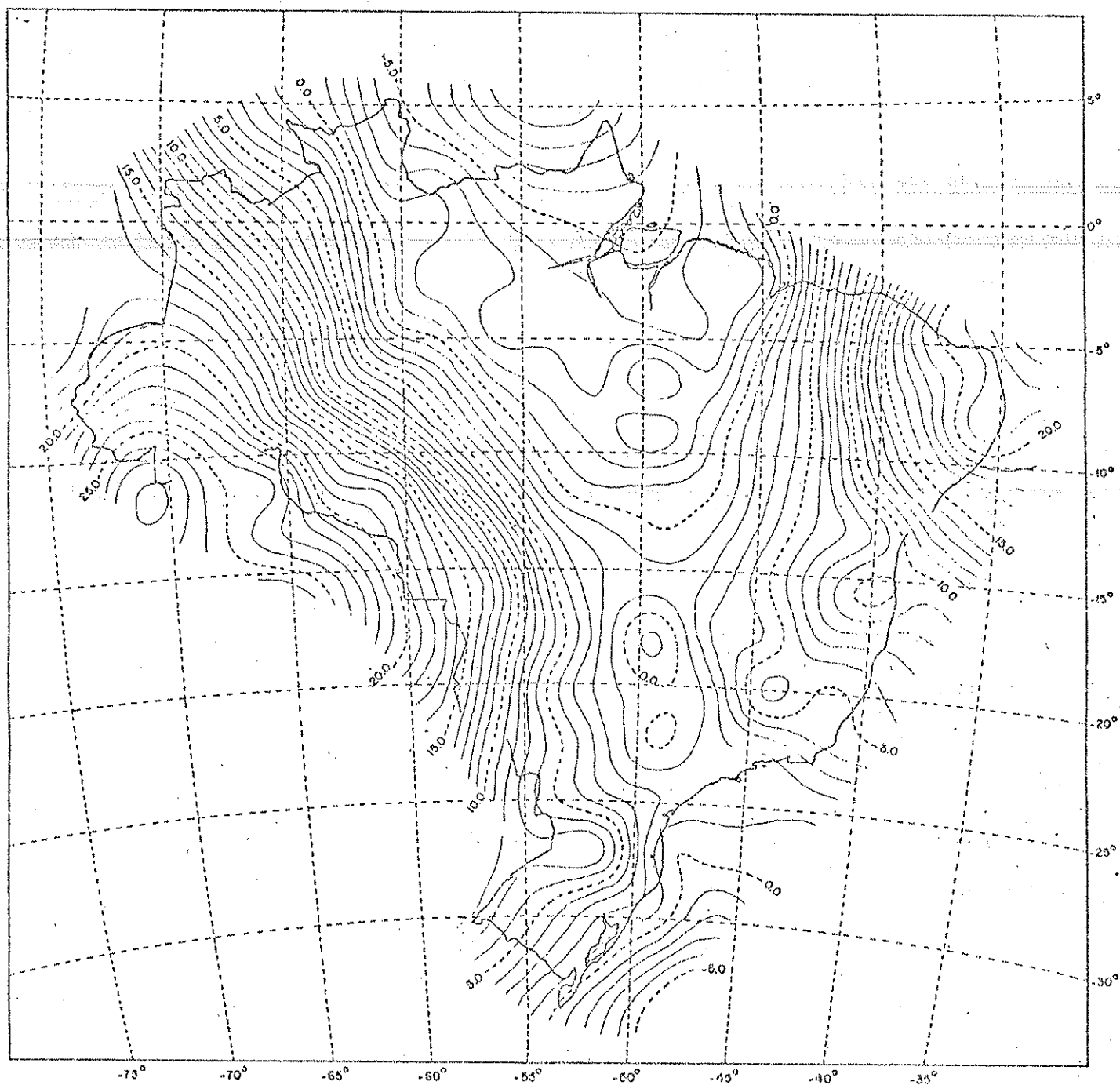


Figura 3.4 - Mapa Geoidal Preliminar do Brasil

6.3.3 - Emprego do NAVSTAR/GPS

Conforme visto anteriormente, o NAVSTAR/GPS fornece posição tri-dimensional cuja precisão relativa varia de 10 a 20 metros, para posicionamento absoluto através de medidas de pseudo-distância, até o nível do centímetro, para posicionamento diferencial através de medidas de fase. Deste modo, conclui-se que as aplicações do GPS na determinação da altitude ortométrica é limitada tanto pelo método de posicionamento utilizado quanto pela qualidade da altura geoidal disponível.

A determinação precisa da altura elipsoidal relativa entre estações por meio de medidas de fase, da ordem de 1,6 cm/ 10 km (1,6 ppm) foi verificada em testes nos quais esta quantidade foi combinada com medidas gravimétricas e de ondulação geoidal visando a determinação de diferenças de altitudes ortométricas, ou em combinação com diferenças de altitudes ortométricas para a determinação de um geóide relativo bastante preciso. ENGELIS et al [1984], em teste realizado sobre uma rede, situada em Ohio, EUA, composta por 13 pares de estações, com altitude ortométrica conhecida, separadas no máximo de 35 quilômetros, observa uma concordância de 5 cm entre as diferenças de altura geoidal oriundas do GPS, obtidas com medidas de fase, e as calculadas através da integral de Stokes e da colocação por mínimos quadrados (exceto para duas linhas cujas diferenças foram de 14 e 25 centímetros), concluindo ser possível a utilização de dados gravimétricos para converter diferenças de altura elipsoidal em diferenças de altitude ortométrica com precisão de ± 5 cm, sobre

35 km, contanto que suficiente informação gravimétrica exista na área. ENGELIS et al [1985], em estudo semelhante ao anterior, realizado sobre uma rede, situada ao sul de Bonn, Alemanha Ocidental, composta por 14 estações com altitude ortométrica precisa conhecida, conclui que a combinação de dados GPS, obtidos com medidas de fase, com métodos gravimétricos tradicionais, mostra-se como excelente para a densificação de redes verticais ao nível de precisão de ± 2 cm, contanto que existam suficientes dados gravimétricos. Também DENKER E WENZEL [1987], usando técnicas semelhantes, alcançaram resultados idênticos.

Em regiões onde inexistam informações precisas de diferenças de altura geoidal, uma solução simples permite a determinação de altitudes ortométricas, desde que existam estações cuja altitude ortométrica seja conhecida, por nivelamento preciso. Ela consiste na simples ocupação destas estações por receptores GPS, que forneceria Δh entre elas, numa posterior determinação de ΔN através da equação (5.3), e, por interpolação, a determinação da altura geoidal para as outras estações de interesse [KING et al, 1985]. Uma outra abordagem que pode ser adotada, consiste na determinação pura e simples da diferença de altura elipsoidal entre uma RN e outra estação para a qual se deseja o valor da altura geoidal N . O mesmo N obtido através do rastreamento sobre a RN será adotado para a determinação da altitude ortométrica da estação. Esta abordagem é restrita a aplicações que aceitem imprecisão na altitude ortométrica da ordem do metro, ou mais, sendo o gradiente geoidal fator limitante da distância entre a RN e as estações de interesse.

5.4 - Posicionamento Cinemático

5.4.1 - Definição

Entende-se por posicionamento cinemático todo o tipo de emprego de receptores GPS para a determinação da posição, e, em alguns casos, da velocidade, de plataformas móveis, tais como veículos, embarcações e aeronaves. Esta modalidade de posicionamento se aplica desde às mais singelas necessidades de navegação marítima ou aérea, às mais exigentes prescrições como da aerogravimetria.

Mais recentemente, o termo "posicionamento cinemático" teve seu significado estendido para designar procedimentos de medição que permitem a determinação das coordenadas de estações terrestres em poucos segundos.

5.4.2 - Posicionamento Cinemático Absoluto

O meio mais simples de se determinar a trajetória de uma plataforma móvel consiste em deixar um receptor a bordo rastreando somente um dos códigos. Este procedimento garante navegação, marítima ou aérea, em tempo real. A precisão alcançada também é função da geometria dos satélites. As precisões disponíveis para navegação são de 10 metros com o código P e de 15 a 20 metros com o código C/A. No caso do código C/A vir a ser degradado, sua precisão cairá para 100 metros [ZACHMANN, 1989]. Os números apresentados tendem a melhorar com o aumento do número de satélites em órbita devido a possibilidade de escolha de geometria

mais favorável.

5.4.3 - Posicionamento Cinemático Diferencial

A precisão alcançada no posicionamento cinemático absoluto, através de um dos códigos, é insuficiente quando uma precisão mais alta for necessária para determinados propósitos. O emprego do posicionamento cinemático no modo diferencial permite uma melhoria na precisão por razões já citadas.

Existem 3 métodos principais de emprego e modelamento das observações GPS neste tipo de posicionamento. São eles o Método da Correção da Posição Diferencial ("differential position correction method"), o Método da Pseudo-distância suavizada pela Fase ("phase-smoothed pseudorange method") e o Método da Diferença de fase ("phase differencing method") [HEIN et al, 1988].

Na proposta básica do Método da Correção da Posição Diferencial, um receptor, instalado sobre uma estação cuja posição seja conhecida (estação de controle) compara esta posição com aquela determinada por observações de pseudo-distância, calcula as diferenças, e transmite-as para os usuários próximos como correções a serem introduzidas à solução de suas respectivas posições. Neste método podem ocorrer certos problemas, como a utilização de diferentes satélites pela estação de controle e usuários. Outro meio de utilização deste método consistiria na transmissão de correções de pseudo-distância para cada satélite. O processador do usuário subtrairia a correção da pseudo-distância medida a priori, refinando a solução de sua navegação. Os dados

medida a priori, refinando a solução de sua navegação. Os dados desta mensagem conteriam a identificação da estação e dos satélites, e a correção para cada satélite visível pela estação de controle. Naturalmente, o formato da mensagem deve ser padronizado em uma base nacional ou internacional, tarefa esta de empreendimento não tão simples [KALAFUS et 1983; KALAFUS et al, 1986]. Com este conceito, a posição relativa pode ser obtida com precisão de 3 a 5 metros, com o código P, e de 5 a 15 metros, com o código C/A [HEIN et al, 1988].

O Método da Pseudo-distância suavizada pela Fase se utiliza de medidas de fase da frequência de batimento da portadora para filtrar os erros na observação da pseudo-distância. Neste método a portadora tanto pode ser usada em diferenças da pura fase com o tempo (doppler) [KLEUSBERG, 1986] quanto em outros tipos de combinação. Uma posição relativa com precisão de 0,5 a 1 metro pode ser alcançada com o código P, e de 1 a 3 metros com o código C/A [HEIN et al, 1988].

O Método da Diferença de Fase é essencialmente o mesmo aplicado no posicionamento estático diferencial. Ele consiste em dois receptores, 1 e 2, que permanecem instalados sobre duas estações A e B, respectivamente, o tempo necessário para a solução da ambiguidade inteira, após o que um dos receptores, o 2 por exemplo, é remanejado para outra estação, incógnita, mantendo a sintonia, e conseqüentemente, preservando a solução da ambiguidade. Ao chegar nesta terceira estação, somente poucas observações são necessárias para determinar a nova base com

suficiente precisão⁽⁶⁾. A antena é então movida para todas as demais estações. Todos os cuidados devem ser tomados visando evitar perdas de ciclo, que, se ocorressem, forçariam um reinício da operação. Um conhecimento a priori das coordenadas da estação A permite a determinação das coordenadas das demais estações. Uma rede de 20 estações pode ser observada em menos de 1 hora, dependendo de sua distribuição espacial, com precisão comparável à do posicionamento estático. Embora este procedimento de medição seja de natureza cinemática, o algoritmo aplicado é o mesmo do posicionamento estático diferencial, isto é, são formadas duplas-diferenças (equação 4.20) entre as estações incógnitas e a estação estática [ASHKENAZI et al, 1988]. A precisão da posição relativa alcançada é da ordem de 1 a 3 centímetros [HEIN et al, 1988], nas 3 componentes.

O Método da Diferença de Fase enseja 3 técnicas para determinar a base original, e por conseguinte, a ambiguidade inteira. Na primeira, deixam-se as duas antenas nas posições estáticas por 30 minutos, ou mais, no início de cada seção. Uma vez que a ambiguidade é resolvida, o movimento da antena

⁽⁶⁾ Teóricamente, o período de repouso da antena itinerante sobre a estação incógnita deve ser o suficiente para garantir que ao menos uma medida seja gravada. Supondo-se um intervalo entre medições sucessivas de 3 segundos, e que 1 minuto seja suficiente para verificar algum erro grosseiro ou efetuar anotações na caderneta de campo, seriam gravadas 19 medições a mais do que o necessário.

itinerante pode ter início. A segunda técnica consiste em começar com duas estações A e B que tenham suas coordenadas tri-dimensionais conhecidas, fazendo com que as incógnitas na equação (4.20) passem a ser as (n-1) ambiguidades, onde n é o número de satélites rastreados simultaneamente em A e B [ASHKENAZI et al, 1988; ANDRADE E GEMAEL, 1989]. A terceira técnica consiste em, inicialmente, ocupar duas estações A e B, bem próximas, uma delas com coordenadas conhecida (A). Após somente 1 ou 2 minutos de rastreamento, as antenas trocam de posição, sem que haja interrupção de sintonia, efetuando novo rastreamento no mesmo intervalo de tempo. Reescrevendo a equação da dupla-diferença de fase (4.20) para os intervalos de tempo do primeiro e do segundo rastreamento, t_1 e t_2 ,

$$\phi_{AB}^{ik}(t_1) = - (f/c) [\rho_B^k(t_1) - \rho_A^k(t_1) - \rho_B^l(t_1) + \rho_A^l(t_1)] + N_{AB}^{ik} \quad (5.12)$$

$$\phi_{AB}^{ik}(t_2) = - (f/c) [\rho_B^k(t_2) - \rho_A^k(t_2) - \rho_B^l(t_2) + \rho_A^l(t_2)] + N_{AB}^{ik} \quad (5.13)$$

subtraindo (5.11) de (5.12), encontra-se

$$\begin{aligned} \phi_{AB}^{ik}(t_1) - \phi_{AB}^{ik}(t_2) = & - (f/c) [\rho_B^k(t_2) - \rho_A^k(t_2) - \rho_B^k(t_2) + \\ & + \rho_A^l(t_2) + \rho_B^k(t_1) - \rho_A^k(t_1) - \rho_B^l(t_1) + \rho_A^l(t_1)] \end{aligned} \quad (5.14)$$

Esta terceira técnica, conhecida por "Intercâmbio de Antenas", permite que sejam determinadas as coordenadas da estação B, em um curto espaço de tempo, após o que pode-se calcular as ambiguidades inteiras e prosseguir no levantamento cinemático [REMONDI, 1986; HOFMANN-WELLENHOF E REMONDI, 1988].

ANDRADE E GEMAEL [1989], inspirados nos princípios do Método das Diferenças de Fase, propuzeram uma metodologia que visa acelerar as observações de campo no levantamento de redes GPS. Esta metodologia permite que uma rede composta por um quadrilátero completo tenha suas 6 bases independentes ocupadas em 1 hora e 10 minutos de rastreamento, ao invés das 3 horas normalmente exigidas, negligenciando o tempo de deslocamento.

5.4.4 - Fatores limitantes na utilização dos Métodos de Posicionamento Cinemático Diferencial

Os métodos descritos apresentam vantagens e desvantagens a nível operacional e de processamento.

Inicialmente, a capacidade do posicionamento cinemático diferencial ser realizado em tempo real, depende da capacidade da solução se dar também em tempo real. Isto implica na necessidade de existir uma ligação via rádio, por exemplo, entre o receptor fixo e o itinerante. O Método das Diferenças de Fase é o mais restritivo dos 3 para posicionamento em tempo real.

A eventual possibilidade de perda de ciclo, é o maior problema do emprego de medidas de fase no posicionamento cinemático. É relativamente simples sobrepujar este problema no

posicionamento estático, mas no cinemático é mais difícil, pois a posição do receptor itinerante varia. Na prática, a perda de ciclos torna-se inevitável, por exemplo, em um navio num mar agitado. A detecção da perda de ciclo é a chave para um posicionamento cinemático preciso usando-se medidas de fase.

5.4.5 - Exigências para o Posicionamento Cinemático Diferencial

O posicionamento cinemático diferencial impõe determinadas exigências quando se deseja precisão melhor do que um metro. Elas serão resumidas nos parágrafos a seguir.

Os receptores utilizados no posicionamento cinemático diferencial devem possuir determinadas características que auxiliem na resolução de alguns problemas. Um dos mais críticos é a já mencionada perda de ciclo. Um receptor que tenha a capacidade de rastrear mais do que quatro satélites oferece a possibilidade de evitar este problema, selecionando-se aqueles em que este problema não tenha ocorrido. Igualmente importante é a capacidade que o receptor tenha de observar tanto pseudo-distância quanto a fase, em ambas as frequências. Esta devido a necessidade de corrigir as observações dos efeitos causados pela ionosfera e para detectar e corrigir as eventuais perdas de ciclo; aquela para atender à exigência do método da pseudo-distância amaciada pela fase. Finalmente, o receptor deve ter interface apropriada que permita o estabelecimento de uma linha de comunicação na eventualidade de posicionamento em tempo real.

De fundamental importância é a capacidade do receptor de

manter sintonia com o sinal transmitido pelo satélite durante o movimento da antena. Geralmente, se um receptor possui uma largura de banda estreita, mais precisas serão as medidas que ele venha a fazer. Neste caso, entretanto, se a antena se mover, o receptor terá mais dificuldade em manter a sintonia. Com o alargamento de banda, o receptor pode resistir a maiores acelerações, mas o dado resultante terá mais ruído. Uma solução pode ser a alteração da largura de banda antes e depois do movimento da antena, no caso de um levantamento cinemático no qual a antena repouse sobre as estações a determinar. No caso de um movimento ininterrupto, como o de um navio ou avião, esta solução certamente não se aplica.

5.4.6 - Experiências Realizadas

Diversas experiências realizadas com posicionamento cinemático diferencial são encontradas na literatura. REMONDI [1986] reporta os resultados iniciais da aplicação do Método da Diferença de Fase em uma pequena rede, onde se demonstra pela primeira vez que precisões equivalentes às obtidas no posicionamento estático são possíveis. ASHKENAZI et al [1988] descreve e apresenta os resultados de 3 testes efetuados sobre a base de calibração de medidores eletrônicos de distância da Universidade de Nottingham. Remondi e Ashkenazi verificaram uma variação linear das coordenadas obtidas com o tempo, tornando-se necessário que o receptor itinerante retorne à base inicial para a correção desta variação. Ashkenazi constatou a existência de correlação entre a variação linear e a geometria dos satélites,

concluindo que quanto menor o PDOP mais a variação linear tende a zero. Também LANDAU [1987] realizou experiência semelhante, na qual utilizou automóvel para transportar o receptor itinerante, encontrando resultados similares aos encontrados nas experiências anteriores. MADER [1986] e BROZENA et al [1989] descrevem e apresentam os resultados de experiências para o posicionamento preciso de aeronave. Mader conclui ser factível posições horizontais e verticais com precisão de 2 a 5 centímetros, ou melhor, respectivamente. Brozena comparou os resultados da altura de voo determinada com GPS com os obtidos com um radar altímetro a bordo, encontrando diferenças que oscilaram de 20 a 80 cm. O radar altímetro utilizado na experiência possui precisão de 10 cm.

Experiências realizadas com o Método da Pseudo-distância suavizada pela Fase são descritas por KLEUSBERG [1986], onde é apresentado algoritmo de ajustamento que filtra o ruído dos dados de pseudo-distância (código P) usando a diferença da pura fase com o tempo (doppler). Os resultados mostrados (erros nas coordenadas horizontais de 0,5 metro) referem-se a uma base estática de 40 km. Kleusberg estima em 1 metro a precisão da posição relativa quando aplicado a plataforma móvel. LACHAPELLE et al [1987] apresentam testes realizados no posicionamento de um veículo transitando por uma rodovia com velocidade variando entre 20 e 100 km/h. A estação fixa de controle distava de aproximadamente 1.000 km da área do teste, de modo a também serem avaliados efeitos oriundos da órbita e refração ionosférica. Foi utilizado o modelo da dupla-diferença de fase como filtro. Foram obtidas precisões de 1 a 3 metros (1 a 3 ppm) para as 3 componentes. O emprego desassistido da

pseudo-distância (isto é, sem a fase como filtro) levou a valores de 2 a 5 metros quando o código P foi usado e de 10 metros usando-se somente o código C/A.

5.5 - Deteção e Remoção das perdas de ciclo

Perdas de ciclo se constituem na principal dificuldade quando se emprega medidas de fase da frequência de batimento da portadora. É necessário evitá-las, ou removê-las, de modo a obter-se precisões menores que o comprimento de onda da portadora (19 cm para a L_1). Para tal, várias técnicas são empregadas, em posicionamento estático e cinemático [MADER, 1986; WELLS et al, 1986; BASTOS E LANDAU, 1988; HEIN, 1988].

No posicionamento estático, uma solução bastante comum consiste em manter fixa a posição da estação num ajustamento, e editar os dados manualmente inspecionando-se a série de resíduos correspondentes. Outra solução consiste em modelar os dados através de um polinómio, para cada satélite, o que implica na necessidade de uma inspeção anterior dos dados via edição manual. Uma terceira alternativa faz uso do modelo da Tripla Diferença de Fase. Este modelo é isento de toda a ambiguidade, mas como é formado pela combinação de duplas-diferenças, pode-se facilmente detectar perdas de ciclo pela análise dos resíduos com relação a diferentes pares de satélites [WELLS et al, 1986].

No posicionamento cinemático, uma técnica assume que entre medidas de fase subsequentes, a dinâmica do movimento do receptor comporta-se de tal modo que uma simples interpolação pode

ser feita. Receptores com pequeno intervalo entre observações são preferíveis. Este método usa somente uma frequência [HEIN et al, 1988].

Outra técnica faz uso de um algoritmo baseado no emprego de medidas de fase nas duas frequências. Este algoritmo utiliza o resíduo ionosférico $\delta\Phi(t)$, expresso por

$$\delta\Phi(t) = \Phi_1(t) - (f_1/f_2) \Phi_2(t) \quad (5.15)$$

onde Φ_1 e Φ_2 são as medidas de fase para o satélite nas frequências de L_1 e L_2 , respectivamente. Esta quantidade possui variação suave. Não havendo perda de ciclo, sua variação é somente devida aos efeitos da ionosfera. Bruscas mudanças indicam perda de ciclo. Neste caso, pode-se procurar valores que correspondam ao número inteiro de ciclos não contados, que minimizem a variação de $\delta\Phi(t)$ [MADER, 1986; BASTOS E LANDAU, 1988].

Outro algoritmo faz uso do resíduo de distância $\Delta\rho$, expresso por

$$\Delta\rho_i(t) = \lambda_i [\Phi_i(t) - \Phi_i(t_1)] - [\rho(t) - \rho(t_1)] \quad (5.16)$$

onde o índice i representa L_1 ou L_2 , e λ_i e Φ_i são o comprimento de onda e a fase da portadora, respectivamente; ρ representa a distância observada derivada das medidas do código; t representa o instante atual, e t_1 o instante inicial. A quantidade $\Delta\rho$ não é afetada por um possível movimento do receptor, nem por qualquer

outro efeito, por serem os mesmos tanto para pseudo-distância quanto para medidas de fase. Deste modo, qualquer perda de ciclo causará uma discontinuidade em $\Delta\rho$. Como perdas de ciclo são específicas para medidas de fase, a parte da equação (5.16) que depende do código permanece inalterada, podendo-se reescrever

$$\Delta\rho_i(t) = \lambda_i [\Phi_i(t) + N - \Phi_i(t_1)] - [\rho(t) - \rho(t_1)] \quad (5.17)$$

onde t se refere ao instante após a perda do ciclo e N representa o número inteiro de ciclos perdidos durante a interrupção, que tem de ser somado à fase observada depois da perda de ciclo para refazer a continuidade de $\Delta\rho$ [MADER, 1986; BASTOS E LANDAU, 1988].

Os algoritmos expressos por (5.15) e (5.16) encontram aplicação em posicionamento estático e cinemático.



CAPITULO 6

APLICAÇÕES NA GEOFISICA

6.1 - Campo de Aplicação

O NAVSTAR/GPS se apresenta à Geofísica como poderosa ferramenta, aliando informação tri-dimensional (em diferentes níveis de precisão) e portabilidade.

As tarefas geofísicas às quais o GPS demonstra potencial para colaborar podem ser agrupadas como aplicações estáticas e dinâmicas (VANÍČEK, 1988, comunicação pessoal).

As aplicações estáticas do NAVSTAR/GPS à Geofísica vão desde aquelas relacionadas ao posicionamento de equipamentos geofísicos, até o estudo de movimentos horizontais e verticais da crosta, aí incluindo-se o monitoramento de movimentos tectônicos, reajustamento isostático e subsidência, passando pela determinação de parâmetros de interesse geofísico, tais como os relativos à rotação terrestre.

Como aplicações dinâmicas podem ser citadas todas aquelas que envolvem a determinação da posição de sensores em plataformas móveis, isto é, a bordo de navios, aeronaves ou satélites.

6.2 - Aplicações Estáticas

6.2.1 - Posicionamento de Instrumentos Geofísicos

Uma das aplicações mais imediatas do NAVSTAR/GPS diz respeito ao posicionamento de sensores geofísicos sobre a

Terra, em levantamentos sísmicos, magnéticos e gravimétricos.

O rigor do posicionamento nestes levantamentos varia em função do dado a ser coletado e do nível de detalhamento desejado. Prescrições adotadas internacionalmente em sísmica, por exemplo, apontam para as tolerâncias planimétrica (T_p) e altimétrica (T_a)

$$T_p = 2 K + 10 \sqrt{K} \quad (6.1)$$

$$T_a = 0,1 + 0,4 \sqrt{K} \quad (6.2)$$

onde K é o comprimento do trecho em quilômetros. Neste caso, podem ser cometidos erros de 51,6 m, em planimetria, e de 1,4 m, em altimetria, numa linha de 10 km [PETROBRÁS, 1985]. Já em sísmica tri-dimensional, que exige linhas sísmicas paralelas e pontos de tiro equidistantes, as tolerâncias planimétrica e altimétrica são

$$T_p = (1/1.000) * D \quad (6.3)$$

$$T_a = 0,15 * \sqrt{K} \quad (6.4)$$

implicando num erro máximo de 10 m, em planimetria, e de 0,6 m, em altimetria, para uma linha de 10 km. Na equação (6.3), D representa o comprimento do trecho em metros [BENEVIDES et al, 1989]. Para os levantamentos magnéticos, pode-se considerar as mesmas tolerâncias que as adotadas para a sísmica 2D.

Em gravimetria, o erro admissível no posicionamento é função da sensibilidade do gravímetro em detectar variações de elevação e latitude. Diferenciando a fórmula da gravidade normal (1967) [TSUBOI, 1981]

$$\gamma = 978,03185 (1 + 0,0053024 \text{ sen}^2 \phi - 0,0000059 \text{ sen}^2 2\phi) \text{ (gal)} \quad (6.5)$$

obtem-se

$$d\gamma = 2 A (B \text{ sen } \phi \text{ cos } \phi - 2 C \text{ sen } 2\phi \text{ cos } 2\phi) d\phi \quad (6.6)$$

onde $A = 978,03185$, $B = 0,0053024$, $C = 0,0000059$, ϕ é a latitude da estação gravimétrica, $d\phi$ é a incerteza na posição da estação e $d\gamma$ o efeito que esta incerteza provoca na gravidade medida pelo gravímetro. Considerando um gravímetro capaz de detectar variações de 0,01 mgal, pode-se, através da equação (6.6), determinar o erro máximo de posicionamento que não influirá na medida da gravidade, em função da latitude. Verifica-se que um erro maior do que 12,3 m, ao longo da componente norte-sul, já seria detectável pelo gravímetro, numa região de latitude 45° . Afastando-se desta latitude, a tolerância planimétrica aumenta.

Em altimetria as exigências são maiores. O gradiente normal da gravidade [TSUBOI, 1981]

$$\frac{\partial g}{\partial z} = - 0,3086 \text{ h (mgal/metro)} \quad (6.7)$$

indica existir uma variação de 0,3086 mgal para cada metro galgado ao longo da componente vertical. Em outras palavras, um erro no posicionamento altimétrico de até 3 centímetros não será detectado por um gravímetro capaz de medir diferenças de 0,01 mgal.

As tolerâncias apresentadas anteriormente são satisfatoriamente atendidas com o emprego de técnicas topográficas clássicas. O maior rigor exigido pela gravimetria, no tocante a altimetria, só pode ser atendido pelo nivelamento geométrico. As técnicas topográficas clássicas, contudo, são geralmente lentas, custosas e dependentes das condições climáticas.

O emprego do NAVSTAR/GPS, além de oferecer considerável economia de tempo, satisfaz às exigências de posicionamento dos levantamentos geofísicos terrestres. As tolerâncias da sísmica, do magnetismo e da parte planimétrica da gravimetria podem ser atendidas através de medidas de pseudo-distância, notadamente se aplicadas no modo diferencial. Já a exigência altimétrica da gravimetria só pode ser satisfeita com o emprego de medidas de fase. O inconveniente desta aplicação decorre de eventuais perdas de ciclo advindo de interferências causadas por obstáculos, por exemplo quando o levantamento se der em região densamente recoberta por vegetação. Este fato pode tornar mais lento, ou mesmo inibir, as medidas de fase.

6.2.2 - Geodinâmica

A utilização do NAVSTAR/GPS, desde que atendendo a determinadas condições de observação e processamento, satisfaz às mais rigorosas exigências da Geodinâmica, fornecendo informações precisas tanto para movimentos horizontais da crosta, quanto para movimentos verticais (deformações provocadas nos limites das placas, reajustamento isostático e subsidência).

6.2.2.1 - Movimentos Tectônicos

Com a formulação da teoria das placas tectônicas [WILSON, 1965; MORGAN, 1968], que engloba a deriva continental e o espalhamento do assoalho oceânico, e o conseqüente delineamento da geometria das placas, surgiu o interesse em monitorar os seus movimentos relativos, explicar o mecanismo que dirige estes movimentos e delimitar exatamente suas fronteiras.

Os movimentos das placas são de certo modo interdependentes, pois que uma mudança na velocidade ou direção no movimento de uma placa pode refletir em alterações nos movimentos das demais. Algumas conseqüências do movimento relativo das placas rígidas podem ser citadas, tais como alteração da geometria dos contatos transformantes entre cordilheiras e zonas de subducção, evolução dos mosaicos formados pelas cordilheiras, contatos transformantes e zonas de subducção e alteração da área das placas [KENNETT, 1962].

As primeiras determinações do movimento relativo entre placas adjacentes foram feitas a partir da análise de dados oriundos (a) das anomalias magnéticas encontradas em ambos os lados das cordilheiras oceânicas, o que permitiu a obtenção da velocidade de separação entre placas, e (b) das observações da tendência das falhas transformantes e estudo dos mecanismos focais de determinados terremotos, o que tornou possível encontrar-se a direção local destes movimentos. Diversos modelos representando o movimento atual das placas foram propostos por vários autores, como CHASE [1978], apresentado na figura 6.1. Para tal, Chase fez uso de 90 valores de espalhamento estimados a partir das

cordilheiras oceânicas, 69 medidas de tendências de falhas transformantes e 101 vetores de terremotos transcorrentes, tendo considerado ainda a Terra dividida em 12 placas principais [BOTT, 1982].

A Figura 6.1 mostra as principais placas que compõem a superfície da Terra, indicando os limites entre placas divergentes como linhas pontilhadas e os limites entre placas convergentes e falhas transformantes (San Andreas) como linhas tracejadas. As direções e velocidades (em mm/ano) do movimento relativo são apresentadas nos limites entre as placas [BOTT, 1982].

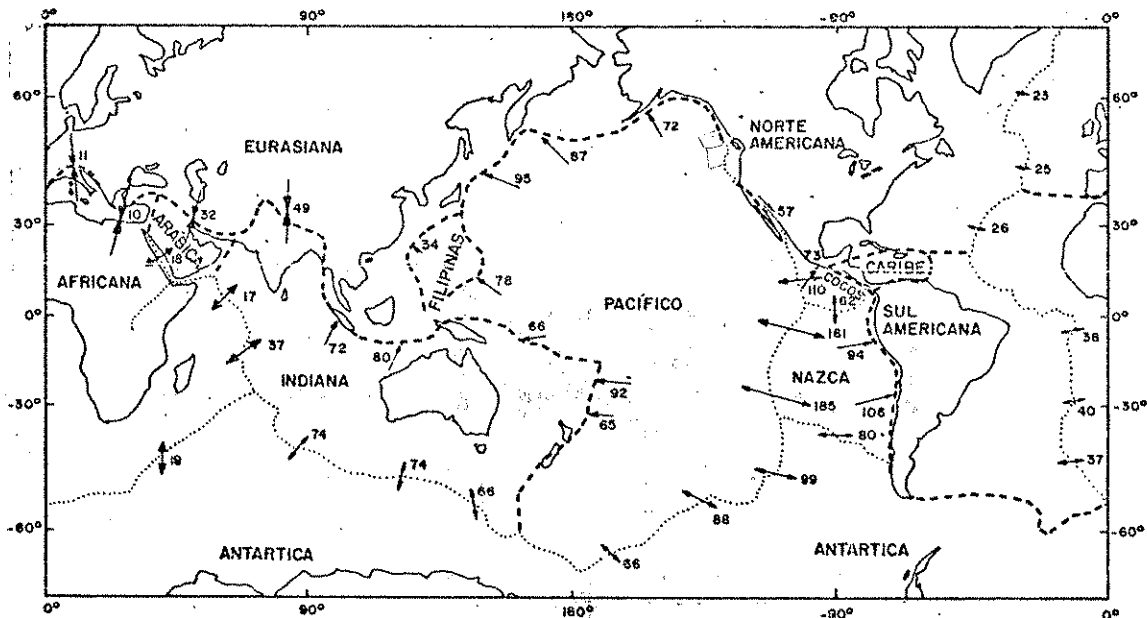


Figura 6.1 - Principais Placas e seus movimentos relativos

O movimento relativo entre as placas provoca a acumulação de tensões nas zonas adjacentes aos seus limites, que são, cedo ou tarde, liberadas em forma de terremotos. Embora o volume de sismicidade mundial esteja concentrado nas margens das

placas, não é incomum a existência de terremotos fora destas áreas. Estudos em áreas sismicamente ativas indicam que movimentos na superfície podem ser compreendidos como partes de acumulação e liberação periódicas de energia. Esta sequência, conhecida como ciclo de um terremoto (Figura 6.2), reflete as deformações de longo período entre dois terremotos (fase inter-sísmica), as deformações precursoras de curto período imediatamente antes do evento (fase pré-sísmica), a rápida liberação de esforço durante o terremoto (fase co-sísmica), e um possível fenômeno de relaxamento imediatamente após o evento (fase pós-sísmica) (BROWN E REILINGER, 1980).

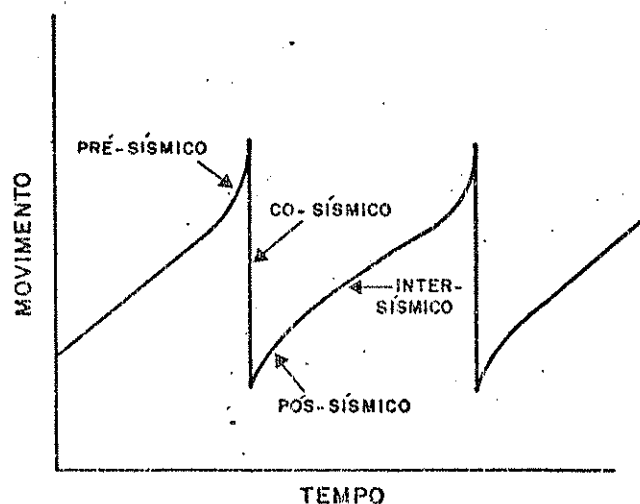


Figura 6.2 - Ciclo do Terremoto

A possibilidade de observar na superfície deformações ou deslocamentos verticais oriundos da acumulação de esforços, serve de base para a idéia de se usar métodos geodésicos para a predição de terremotos (VANÍČEK E KRAKIWISKY, 1982; MOGI, 1985).

6.2.2.2 - Fenómenos decorrentes da Deglaciação

A magnitude dos movimentos verticais da crosta está relacionada à carga sobre ela aplicada. Dependendo da carga, a crosta sofrerá um desequilíbrio isostático (como consequência buscará uma posição de re-equilíbrio), ou haverá tão somente deformações nas camadas mais superficiais da crosta, devido a compactação [VANIČEK E KRAKIWSKY, 1982].

De todas as fontes de carga existentes, a mais notável é o gelo. Durante a última glaciação foram cobertas grandes porções do Canadá, Groenlândia, Fenoscândia, Sibéria e ponta sul da América do Sul. A deglaciação, que começou a aproximadamente 18.000 e terminou a cerca de 7.000 anos [PELTIER, 1986], continua a causar repercussões nas regiões antes cobertas de gelo e em seus arredores, que passam por um processo de reajustamento isostático, possibilitando estudos sobre a aparente distribuição de viscosidade no manto imediatamente abaixo da litosfera [BOTT, 1982]. A Figura 6.3, adaptada de Bott, apresenta a velocidade contemporânea de soerguimento da Fenoscândia. A Figura 6.4, extraída de WALCOTT [1986], mostra a velocidade atual de movimento vertical da região dos Grandes Lagos, relativa a um zero arbitrário situado em Milwaukee, EUA.

6.2.2.3 - Fenómenos induzidos pelo Homem

Fenómenos de carga e descarga não tão proeminentes quanto os anteriores, mas também importantes, são aqueles manifestados como subsidência local ou regional, como, por

exemplo, aquelas induzidas pelo Homem através de carga depositada sobre a crosta.

Um exemplo bastante interessante deste tipo de subsidência é aquele provocado pela carga que o preenchimento de reservatórios exerce sobre a crosta. Tal fenômeno oferece a oportunidade de serem efetuados estudos sobre a elasticidade e

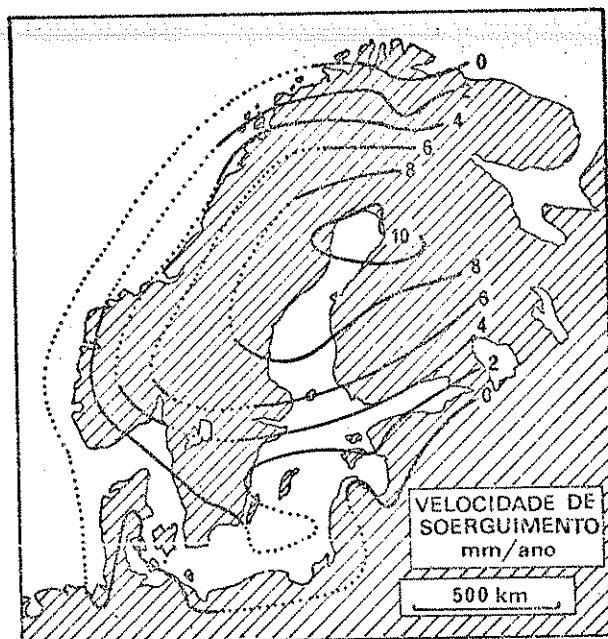


Figura 6.3 - Velocidade de Soerguimento da Fenoscândia

não-homogeneidade da crosta. Em alguns casos, foram detectados movimentos verticais ascendentes, como o analisado por LAMBERT et al [1986], ocorrido na represa canadense de La Grande-2, na província de Quebec, em 1979, onde o deslocamento de 4 cm, após o preenchimento do reservatório, é anômalo com respeito a modelos teóricos para uma Terra elástica.

Outra forma de subsidência local ou regional é a decorrente da retirada de fluidos do subsolo. Excessiva extração

de água subterrânea usualmente resulta em considerável acomodação sobre áreas comparativamente grandes. VANÍČEK E KRAKIWIJSKY [1982] citam as subsidências registradas na Cidade do México, de 2,5 metros, entre 1959 e 1969, e no vale de São Joaquim, Califórnia, de 1,5 metros, entre 1952 e 1957. Também POLEY E TALWANI [1986]

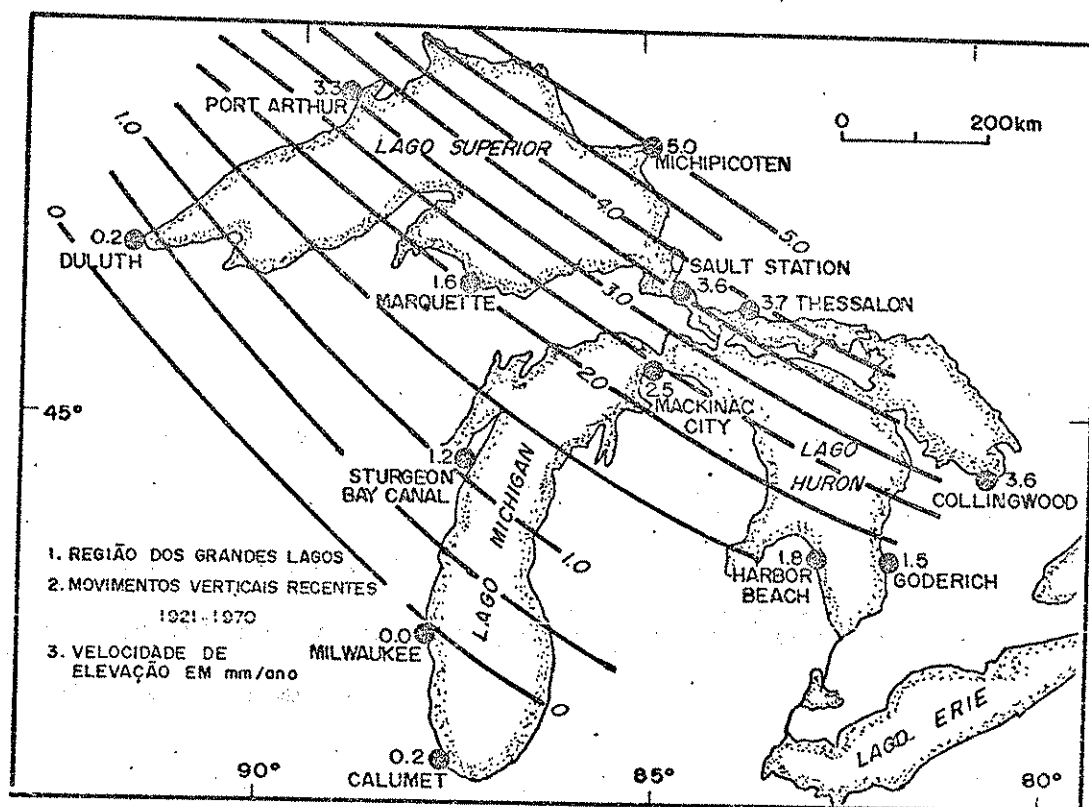


Figura 6.4 - Velocidade Atual de Soerguimento dos Grandes Lagos

concluem que grande parte do recente movimento vertical registrado nas proximidades de Charleston, Carolina do Sul, deve-se a retirada de água.

Outro tipo de subsidência local é aquela decorrente de atividades de mineração. O monitoramento deste deslocamento vertical é feito por motivos econômicos, ecológicos e de segurança [DAVIDSON et al, 1983]. A magnitude deste deslocamento depende do

grau de exploração da mina e da geologia do local.

6.2.2.4 - Deteccção dos Movimentos Horizontais e Verticais da Crosta

As técnicas geodésicas clássicas (triangulação, trilateração e nivelamento) têm sido usadas na deteção de movimentos horizontais e verticais, fornecendo parâmetros geométricos que auxiliam nos estudos sobre deformação crustal.

A situação ideal para se observar tais movimentos consiste no estabelecimento de um conjunto de estações adequadamente distribuídas, monumentalizadas no terreno, que tenham suas coordenadas tri-dimensionais determinadas, e que venham a ser periódica e regularmente reocupadas. O objetivo é a obtenção das distâncias e desníveis relativos, ao longo do tempo.

As técnicas geodésicas mencionadas, contudo, apresentam como característica intrínseca a capacidade de fornecerem informações planimétricas e altimétricas isoladamente. A combinação destas técnicas fornecem informações tri-dimensionais, porém tal combinação nem sempre é possível.

A dificuldade em se concretizar esta combinação advém das características operacionais distintas das técnicas citadas. A triangulação e a trilateração, cujas figuras se compõem de lados da ordem de dezenas de quilômetros, necessitam que os vértices destas figuras se situem em locais elevados, geralmente de difícil acesso, a fim de que sejam intervisíveis. A exigência de intervisibilidade usualmente limita a separação entre vértices a menos de 50 km. Já o nivelamento, por seu turno, se desenvolve em

locais menos acidentados, via de regra ao longo de estradas. O nivelamento de vértices de triangulação ou trilateração é muitas das vezes impraticável.

O estabelecimento e manutenção de redes geodésicas (planimétricas e altimétricas) com o fim precípua de atender a necessidades geofísicas nem sempre é possível. O mais comum é serem usados os dados oriundos das redes geodésicas, mantidas pelos serviços geodésicos nacionais, que, em muitas das vezes, podem não estar na localização ideal para estudos geofísicos.

Vale ainda salientar que as técnicas clássicas são custosas, lentas e dependentes das condições climáticas.

Uma rede geodésica planimétrica de primeira ordem, usando os métodos clássicos, possui precisão relativa de 10^{-6} [BOMFORD, 1980]. Exemplos típicos são encontrados na costa oeste dos Estados Unidos, onde determinações planimétricas foram repetidas ao longo de várias décadas, como na Califórnia, visando o monitoramento de movimento de placas. Os resultados indicam um movimento lateral relativo total através do sistema de falha de San Andreas de 32 mm/ano. Como o deslocamento relativo é da mesma ordem de grandeza da precisão relativa das técnicas utilizadas, erros significantes acumularam-se no ajustamento, mas o movimento relativo das estações próximas foi preservado [SAVAGE E BURFORD, 1973]. Atenção especial deve ser dada a eventuais mudanças de metodologia de observação quando se lida com medições efetuadas ao longo das décadas. As redes planimétricas também são capazes de indicar o vetor de deslocamento horizontal causado por terremotos. A Figura 6.5 mostra estes vetores, conforme registrado pela rede de triangulação de primeira ordem do Japão, causado pelo terremoto

de Kanto ($M = 7,9$) [ISHII E KATO, 1989]. Também mostram-se capazes de monitorar movimentos associados a vulcanismo [ARCHBOLD et al, 1988].

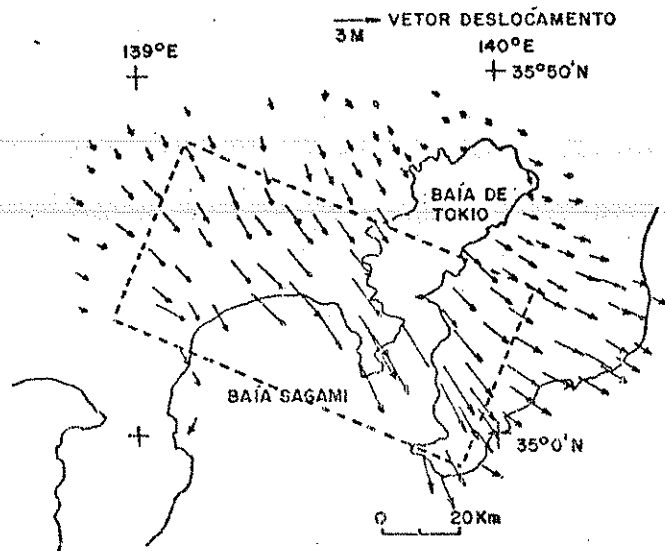


Figura 6.5 - Vetores de deslocamento horizontal

O nivelamento geodésico pode alcançar precisões de 2 cm numa linha de 200 km [BOMFORD, 1980]. Esta técnica vem sendo utilizada na detecção de movimentos verticais da crosta através do nivelamento periódico de marcos, sobre períodos de dias a décadas. O nivelamento é bastante estável sobre longos períodos de tempo e longas bases. Contudo é menos custoso e mais preciso para pequenas e médias distâncias [BROWN E REILINGER, 1980]. Mudanças efetuadas na metodologia de execução do nivelamento com o transcorrer das décadas e erros sistemáticos negligenciados podem levar a um mascaramento dos resultados. STEIN et al [1986] testaram a influência da redução da distância entre o nível e as miras, de 60 metros em 1955 para 26 metros em 1971, em uma linha de nivelamento

de 50 km na Califórnia, e concluíram que houve um erro de um terço no desnível entre os extremos da linha devido ao erro de refração. Uma análise adicional feita por CRAYMER E VANÍČEK [1986] sobre a mesma linha, concluiu também existir efeitos oriundos da calibração da mira. Tem-se questionado se alguns movimentos verticais detectados, ou parte deles, não seriam resultantes de erros desconsiderados [BROWN E REILINGER, 1980].

Outro meio de detectar movimentos verticais é através da observação da variação da aceleração da gravidade em um ponto. Negligenciando o efeito das marés terrestres, qualquer variação da gravidade observada leva a indagação de quanto a alteração observada é devido a redistribuição de massa dentro da terra e de quanto ela é devida a um movimento vertical. Uma variação desta natureza permite apenas a suposição de que pode ter havido movimento vertical [VANÍČEK E KRAKIWISKY, 1982].

Movimentos verticais podem, ainda, ser observados de modo contínuo através da observação das marés oceânicas. Contudo, como elas incluem vários tipos de perturbações, não se pode obter alta precisão, além do que as estações para observação de marés são limitadas à costa [MOGI, 1985].

O desenvolvimento de diversas técnicas espaciais para medição de bases geodésicas, com precisão relativa superior àquelas das técnicas geodésicas clássicas, ofereceu uma nova perspectiva na utilização da Geodésia pela Geodinâmica.

Dentre estas novas técnicas, a que propicia a melhor precisão relativa, de 10^{-8} ou melhor, é o VLBI, seguido de perto pelo SLR [ASHKENAZI, 1985b; KOLENKIEWICZ et al, 1985]. Ambos têm sido usados nos estudos de deformações crustais em zonas

limitrofes entre placas [CHRISTODOULIDIS et al, 1985; CLARK et al, 1987; KROGER et al, 1987]. Contudo, a aplicação destes sistemas espaciais na Geodésia é limitada pelos altos custos instrumental e operacional. No caso particular do SLR, os custos são também função das condições climáticas (o sistema é dependente destas), no que pode provocar a necessidade de uma estação vir a ser ocupada por diversas semanas. O sistema composto por VLBI móvel é

menos sensível ao mau tempo, mas envolve outras condicionantes. Como este sistema se serve de fracos sinais de rádio oriundos de fontes distantes, ele necessita de equipamento volumoso, composto por antenas de alto ganho, receptores de baixo ruído e um potente sistema de armanezagem e processamento. Além disso, o tempo necessário para se alcançar a precisão do sistema é da ordem de 24 horas. Para aplicações geodésicas que envolvam a ocupação de diversas estações em poucos dias, faz-se necessário um sistema mais compacto e eficiente [DAVIDSON, 1983; THORNTON et al, 1986].

O NAVSTAR/GPS se constitui na melhor alternativa ao VLBI e ao SLR, devido não só à sua maior mobilidade e menor custo operacional, mas, principalmente, devido à sua grande precisão relativa, 10^{-7} ou melhor, desde que sejam utilizados receptores capazes de rastrear as duas frequências, sejam feitas duplas-diferenças entre estações conhecidas e incógnitas, e seja empregado programa que permita a determinação da órbita dos satélites durante o período compreendido pelo rastreo [BEUTLER et al, 1988].

O controle dos movimentos crustais pode ser feito através de um conjunto de estações GPS, periodicamente reocupadas, podendo estas serem controladas por um menor número de estações,

VLBI por exemplo, que serviriam como estações fiduciais.

Campanhas com GPS vêm sendo empreendidas de modo a avaliar seu desempenho no monitoramento de movimentos tectônicos. DONG E BOCK [1989] analisam os resultados até então alcançados por uma campanha de 5 anos, iniciada em dezembro de 1986, na região centro e sul da Califórnia, que visa monitorar movimentos tectônicos. Evidências geológicas e resultados de VLBI e SLR indicam a ocorrência de deformações horizontais da ordem de 10 mm/ano a oeste da falha de San Andreas. As primeiras observações GPS permitiram antever que estas deformações seriam detectadas com precisão de 5 mm/ano, sobre os 5 anos de duração da campanha. Resultados comparados com bases anteriormente medidas com VLBI indicam precisões horizontal e vertical de 0,01 ppm e de algumas dezenas de milímetros respectivamente.

DAVIS et al [1989] analisam os resultados de repetidas medições GPS, efetuadas desde janeiro de 1986, em 4 redes e 1 base isolada, todas elas na Califórnia. Os piores resultados mostram resíduos entre 0,3 e 0,4 ppm para a componente norte, entre 0,3 a 0,6 ppm para a componente leste, e entre 0,4 a 0,7 para a componente vertical. Já os melhores resultados indicam resíduos de 0,03 ppm para a componente norte, de 0,05 ppm para a componente leste e de 0,18 ppm para a componente vertical. Comparação com resultados anteriormente obtidos com distanciômetro a laser não indicam diferença detectável.

O Projeto GPS CASA/UNO, é um projeto de cooperação que envolve 30 instituições de diferentes países. O seu principal objetivo é o de monitorar movimentos geodinâmicos ao longo de várias fossas, cinturões e falhas na complexa região tectônica da

América Central e do Sul, e deduzir estimativas quantitativas da dinâmica das placas do Caribe, Cocos, Nazca e Sul-americana. Na primeira campanha (Figura 6.6), 25 estações foram ocupadas. Um total de 16 receptores TI- 4.100 foram empregados coletando dados durante 212 dias de observação. Além disso, 12 estações distribuídas pela Europa, América do Norte, Austrália e Pacífico serviram como estações fiduciais, e estações adicionais instaladas nos EUA e Canadá operaram simultaneamente. A Figura 6.6 mostra a localização das estações CASA/UNO, feições tectônicas, e movimentos das placas (relativo à placa sul-americana) preditos à luz do modelo geofísico Nuvel 1. A parte venezuelana do projeto se

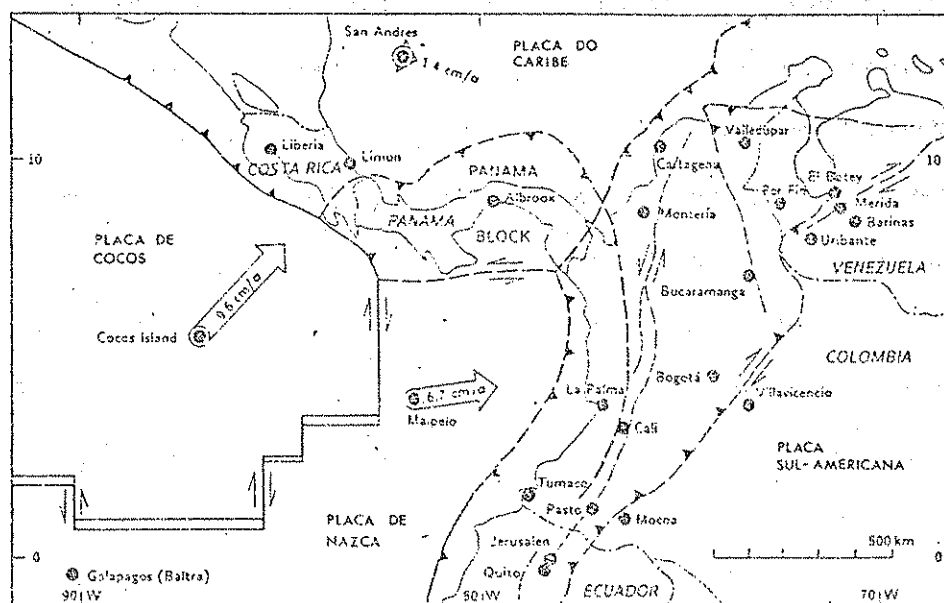


Figura 6.6 - Projeto CASA/UNO

deu na ocupação de 5 estações dispostas de modo a envolverem a Falha de Boconó. Estas estações foram processadas

independentemente. Como não haviam dados das estações fiduciais, as órbitas foram mantidas fixas e não foram ajustadas. Este procedimento não causou perda na precisão devido à relativamente pequena extensão da rede (a maior base média 241 km). Os desvios foram menores do que 1 centímetro [DREWES et al, 1989].

Outro exemplo de aplicação do NAVSTAR/GPS no monitoramento de movimentos tectônicos é o projeto AGEDEN (Austrian Geodynamic Densification) [RINNER et al, 1988]. Este projeto faz parte do projeto europeu WEGENER-MEDLAS, onde investigações geodésicas e geofísicas na zona de transição entre as placas africana e eurásiana estão sendo levadas a cabo. O projeto AGEDEN se propõe a determinar as componentes de deformação sofrida em 3 áreas tectonicamente ativas dos Alpes austríacos, onde se estima existir movimento vertical ascendente de 1 mm/ano. Nestas áreas, foram monumentalizadas 15 estações, perfazendo redes de cerca de 50 km² cada, a serem ocupadas periodicamente por receptores GPS. As sete estações pertencentes a rede DÖNAV [SEEBER et al, 1987] foram também ocupadas, tendo sido observadas simultaneamente com as da rede AGEDEN. A rede AGEDEN foi projetada de modo a que as estações que a compõem cercassem a estrutura geodinâmica a ser monitorada, na forma aproximada de um retângulo. Externamente a este retângulo estariam situadas as estações de controle da rede DÖNAV. Esta configuração torna possível a detecção de qualquer possível tendência de movimento. A Figura 6.7 mostra a configuração mencionada. A Figura 6.8 mostra a distribuição das estações AGEDEN, representadas por círculos. O número dentro do círculo indica o dia da campanha no qual foi efetuado o rastreamento. O círculo duplo representa estações DÖNAV. A

primeira campanha foi realizada no período de 10 a 17 de setembro de 1987, e contou com o emprego de 8 receptores TI 4.100. Os resultados finais encontrados nesta primeira campanha foram da ordem de 0,1 ppm. Como as bases são de cerca de 50 km, a precisão necessária para notar o movimento de 1 mm/ano é de 0,02 ppm, sendo então sugerido um período de 5 anos para a remedição das 3 redes.

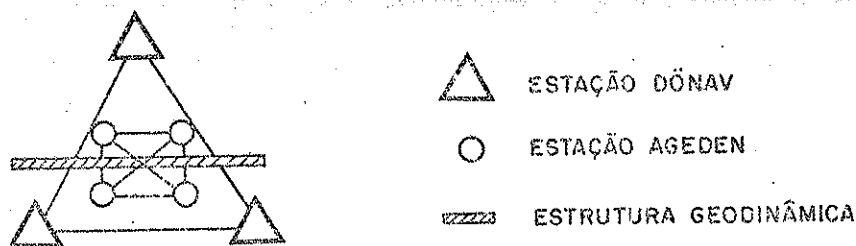


Figura 6.7 - Disposição das Estações

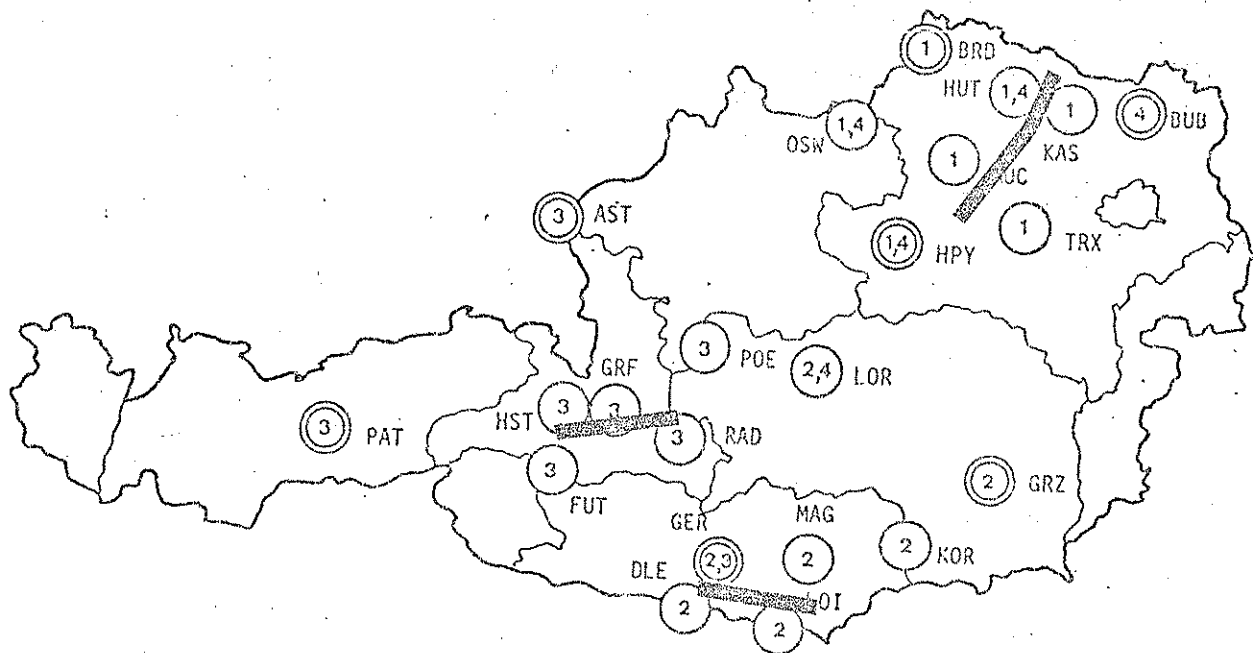


Figura 6.8 - Distribuição da Rede AGEDEN

Um outro projeto desta natureza vem sendo empreendido nos Andes. Trata-se da Poligonal GPS Centro-Andina ANSA (KLOTZ E LELGEMANN, 1988). É um projeto feito através da cooperação de instituições da Alemanha, Argentina e Chile, cuja finalidade é a de, através da determinação periódica das coordenadas de estações materializadas na região centro-andina por meio da constelação GPS, obter o movimento relativo horizontal e vertical entre as estações. A Figura 6.9 mostra a distribuição das estações. A primeira campanha foi efetuada em 1988.

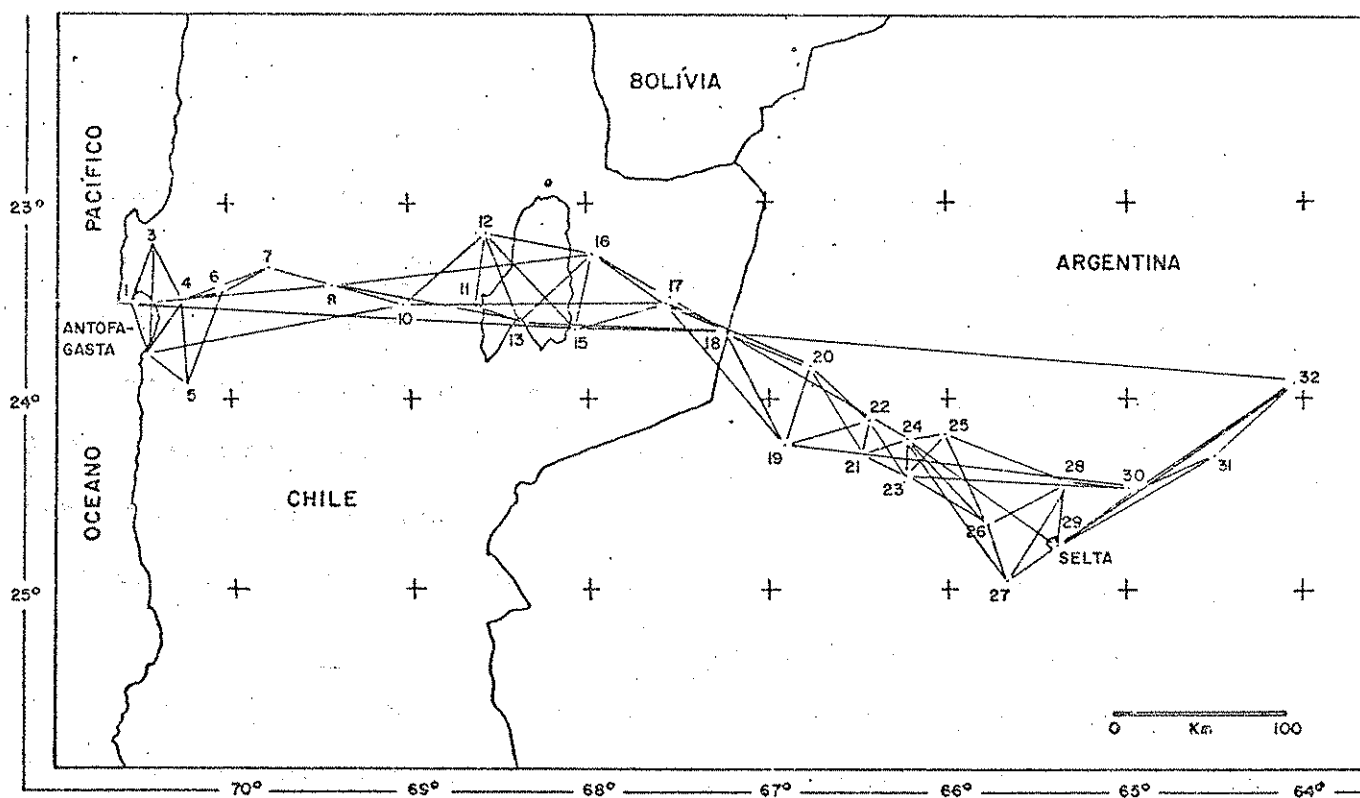


Figura 6.9 - Distribuição das Estações ANSA

Uma das regiões tectonicamente ativas mais exploradas é a Islândia, onde o interesse em acompanhar as deformações crustais por meios geodésicos não é recente [MÖLLER E RITTER, 1980; SPICKERNAGEL, 1980; TORGE E KANNGIESER, 1980; JOHNSEN et al, 1980; WENDT et al, 1985]. Já existem registros da realização de campanhas GPS [FOULGER et al, 1987].

O NAVSTAR/GPS também pode ser utilizado nos estudos concernentes ao soerguimento pós-glacial. PELTIER [1986] propôs um modelo no qual indica duas regiões de maior taxa de soerguimento pós-glacial, e as regiões adjacentes de subsidência. Baseado neste modelo, CARTER et al [1986] recomendam o desenvolvimento de dois perfis ao longo destas duas regiões. O primeiro começando na Flórida, prosseguindo pela costa leste dos EUA, cruzando o Canadá e terminando no Alaska. O segundo perfil começaria na Espanha e Itália, cruzaria a França, Alemanha e terminaria na Suécia. Os marégrafos nestas regiões também seriam amarrados ao perfil. A Figura 6.10 mostra o desenvolvimento destes perfis. Os círculos negros são estações GPS. As estrelas indicam estações VLBI equipadas com o sistema Mark III. As estações estariam espaçadas de cerca de 100 km. Os perfis seriam regularmente refeitos de modo a verificar o modelo de Peltier.

O emprego do GPS no controle de subsidência provocada pela retirada de fluido ou por mineração atende às necessidades que este tipo de aplicação exige, como alta precisão altimétrica e rapidez na reocupação das estações que componham a rede de controle. A aplicação do posicionamento cinemático diferencial, com a utilização do Método da Diferença de Fase, que fornece precisão relativa ao nível do centímetro, pode ser uma

alternativa. As estações seriam sistematicamente ocupadas através de um conjunto de receptores que se moveriam rapidamente entre as estações de interesse.

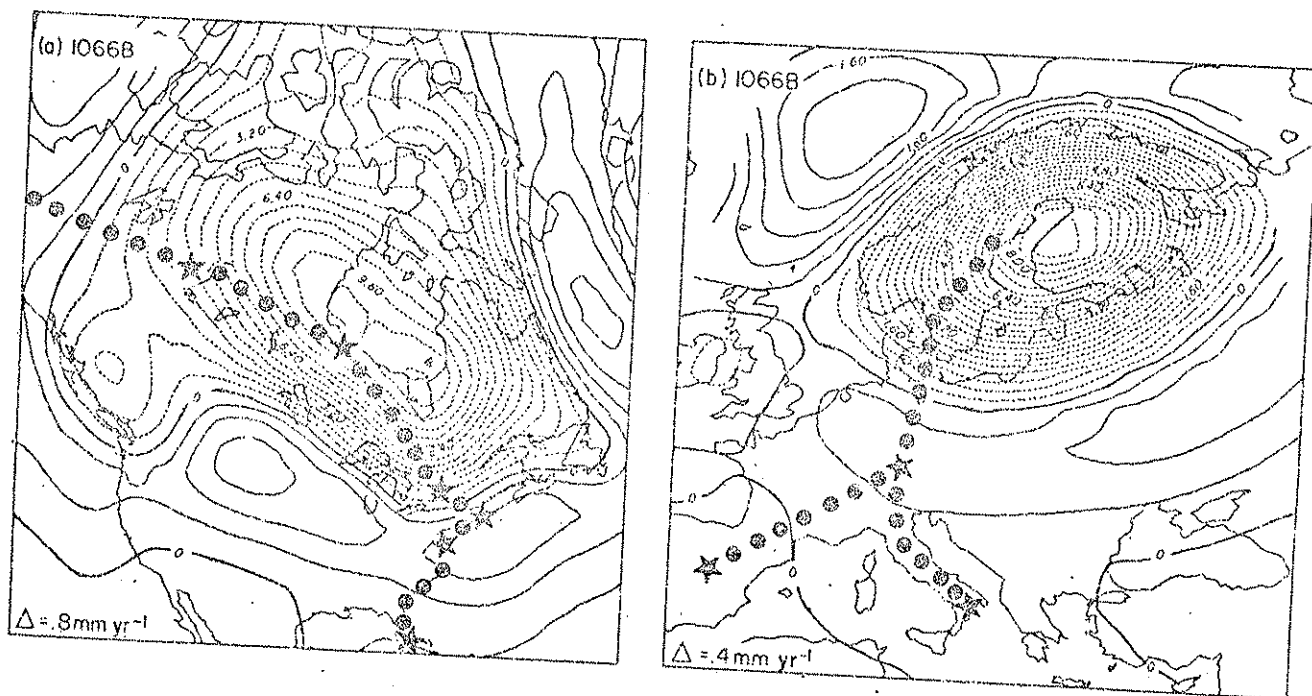


Figura 6.10 - Perfil composto por estações GPS e VLBI

6.2.3 - Parâmetros de Rotação da Terra

Desde 1969, novas técnicas espaciais (SLR, LLR⁽⁷⁾ e

(7) Lunar Laser Ranging é um sistema através do qual medidas de distância para a Lua, por meio de laser, são realizadas por poucas estações especialmente equipadas. Refletores foram instalados na superfície lunar pelas tripulações das missões Apolo 11, 14 e 15, e remotamente por duas sondas soviéticas (WELLS et al, 1986).

VLBI) vem sendo progressivamente usadas para monitorar os parâmetros de rotação da Terra. Desde janeiro de 1988, a solução de rotina do IERS é exclusivamente baseada nas 3 técnicas mencionadas [PAQUET E LOUIS, 1988]. Os resultados alcançados são da ordem de 0,003" e 0,002", para o movimento polar (x_p , y_p), e de 3 ns e 1 ns, para variação de UT1, para o SLR e o VLBI, respectivamente [ASHKENAZI, 1985b]. Dados ajustados de observações LLR efetuadas no Observatório McDonald, Texas, oferecem um valor de 0,009" para variação de latitude⁽⁸⁾ [DICKEY et al, 1985]. Dados GPS foram processados visando obter os parâmetros de rotação terrestre [PAQUET E LOUIS, 1988; WOODEN, 1985]. Os resultados encontrados foram bastante próximos aos obtidos com SLR.

6.3 Aplicações Dinâmicas

Aplicações Dinâmicas são aquelas que envolvem a determinação da posição (e velocidade) de sensores a bordo de plataformas móveis, tais como navios, aeronaves e satélites. Estas aplicações se dão nos levantamentos geofísicos marinhos e aéreos, e na determinação da órbita de satélites artificiais de interesse geofísico.

⁽⁸⁾ Sendo o LLR dominado pela operação de uma única estação, é sensível a uma projeção do movimento polar: a componente ao longo do meridiano do Observatório de McDonald.

6.3.1 - Levantamentos Geofísicos marinhos e aéreos

6.3.1.1 - Levantamentos Magnéticos

Levantamentos magnéticos marinhos são quase sempre feitos simultaneamente com levantamentos marinhos sísmicos ou gravimétricos, ou com uma combinação dos dois, dentro do escopo de uma pesquisa geofísica global (relacionada com a física terrestre) ou na prospecção de petróleo e gás natural. Os dados magnéticos são coletados por meio de um magnetômetro, adaptado dentro de um recipiente à prova d'água, chamado peixe, rebocado por um cabo de 150 a 300 metros, e a 15 metros de profundidade. A partir desta medida obtém-se mapas magnéticos do campo anômalo, que, em geral, são menos precisos do que aqueles obtidos através de levantamentos aéreos. As exigências quanto a precisão do posicionamento são condicionadas mais pelas outras medidas que estiverem sendo coletadas em conjunto (TELFORD et al, 1981; DOBRIN, 1981).

Um levantamento aeromagnetométrico é levado à termo com a aeronave descrevendo linhas de vôo paralelas e espaçadas de uma distância constante, a uma determinada altura, ambas previamente definidas em função da profundidade da anomalia a ser pesquisada e do detalhamento desejado. O magnetômetro pode ser rebocado ou instalado na própria aeronave. O método de navegação (posicionamento) empregado deve ser capaz de detectar possíveis variações de rumo e altura sofridas pela aeronave, durante o aerolevanteamento, permitindo sua correção. Variações de rumo e altitude, principalmente esta última, acarretarão em leituras associadas a outras feições que não aquelas de interesse. Um levantamento aeromagnético planejado de tal modo que as linhas de

vão sejam espaçadas de 300 metros e a altura do magnetômetro seja de 820 metros, admite desvio horizontal máximo de 90 metros para cada 24 quilômetros voados [BHATTACHARYYA, 1971; TELFORD et al, 1981; DOBRIN, 1981].

6.3.1.2 - Levantamentos Sísmicos

O método sísmico é uma parte importante de quase todos os esforços exploratórios na busca de reservas de petróleo e gás natural. A sísmica marinha se vale de uma fonte sísmica e de um conjunto de hidrofones, ambos rebocados por uma embarcação. Os hidrofones estendem-se por um cabo cuja extensão pode alcançar 5 quilômetros, ao fim do qual existe uma bóia. A exigência de posicionamento, neste caso, não se reduz à posição da embarcação, mas inclui a fonte sísmica, os hidrofones e a bóia. Nos levantamentos sísmicos marinhos convencionais, são desejáveis precisões relativas de ± 20 metros, ao passo que precisões absolutas de ± 100 metros são suficientes. Por precisão absoluta entende-se aquela que amarra o levantamento marinho a um levantamento em terra; precisão relativa indica a localização de um perfil sísmico em relação aos vizinhos [TELFORD et al, 1981; MORGAN, 1983].

As exigências para a sísmica 3D são mais rigorosas, já que nesta o espaçamento entre os perfis sísmicos varia de somente 25 a 100 metros. Neste caso, a posição absoluta oscila entre $\pm 10-30$ metros, e a posição relativa entre ± 5 a 15 metros [MORGAN, 1983].

6.3.1.3 - Levantamentos Gravimétricos

A força da gravidade efetiva em um ponto sobre a Terra é a resultante vetorial da atração da Terra e a força centrífuga [TSUBOI, 1981]. Em outras palavras, a aceleração da gravidade medida por um instrumento que gira com a Terra é igual a diferença entre a aceleração da gravidade medida por um instrumento desprovido de rotação e a aceleração centrífuga.

Suponha-se, agora, um gravímetro em uma plataforma móvel. Se o instrumento possuir uma componente de velocidade para leste durante a medição da gravidade, a velocidade do navio se adiciona à velocidade angular resultante da rotação da Terra, acarretando um aumento da força centrífuga e decréscimo da gravidade lida. De modo oposto, para uma componente de velocidade na direção oeste, a leitura da gravidade aumenta.

A influência da velocidade leste-oeste de um corpo sobre o valor aparente de gravidade foi primeiramente mostrada pelo físico húngaro R. V. Eötvös (1847-1919), sendo chamada de Efeito Eötvös. Este efeito fornece uma medida espúria da gravidade devido ao fato do instrumento em plataforma móvel experimentar acelerações centrífugas modificadas pela velocidade da plataforma.

A correção Eötvös, que ao ser somada algebricamente à gravidade medida em uma plataforma móvel fornece o valor estacionário correspondente, é dada por [DEHLINGER, 1978]

$$s_{EC} = 7,5 v \cos \phi \sin \alpha + 0,004 v^2 \quad (6.8)$$

onde α é o azimute da rota (rumo) da plataforma móvel, v a sua

velocidade (expressa em nós) e ϕ a sua latitude.

Da equação (6.8) pode-se verificar que para um navio, navegando a uma velocidade de 10 nós, o valor máximo para ϵ_{EC} será de 75,4 mgal, estando o mesmo navegando ao longo do equador no sentido E-W. O valor mínimo para ϵ_{EC} será de 0,4 mgal, quando o navio tiver rumo 0° (ou 180°). No caso de uma aeronave voando com uma velocidade de 200 nós, a correção Eötvös alcançará valor máximo de 1.516,0 mgal no equador e voando no sentido E-W, e valor mínimo de 16,0 mgal, quando o vôo se der no sentido N-S.

Gravímetros marinhos podem medir diferenças de 1 mgal e alguns de até 0,1 mgal [DEHLINGER, 1978]. Entretanto, devido aos valores que a correção Eötvös pode alcançar, a precisão com a qual ela pode ser obtida é geralmente o fator limitante da precisão dos dados gravimétricos obtidos em plataformas móveis. Deste modo, em levantamentos desta natureza é necessário grande precisão na obtenção da velocidade, rumo e latitude; pois incertezas nestas variáveis causarão imprecisões na correção Eötvös.

Diferenciando a equação (6.8), obtem-se o erro Eötvös [DEHLINGER, 1978]

$$d\epsilon_{EC} = 7,5(\cos \phi \sin \alpha \, dv + v \cos \phi \cos \alpha \, d\alpha - v \sin \phi \sin \alpha \, d\phi) + 0,008 \, v \, dv \quad (6.9)$$

À luz da equação (6.9) pode-se afirmar, por exemplo, que uma imprecisão de 1 nó, na determinação da velocidade de um navio que navega com uma velocidade de 10 nós sobre o equador, no sentido leste-oeste, resulta em um erro de 7,5 mgal. Pode-se verificar, também, que para uma embarcação que possua velocidade

de 10 nós (velocidade comumente empregada em levantamentos marinhos), serão encontrados erros Eötvös menores do que 1 mgal, quando a imprecisão na velocidade dv e no rumo da forem menores do que 0,1 nó e 1° , respectivamente, negligenciando-se o erro em latitude. Estes valores exigem um posicionamento com precisão no nível do metro. Já para uma aeronave que se desloca em baixa velocidade (100 nós, por exemplo), os valores de dv e da deverão ser menores do que 0,01 nó e $0,1^\circ$, respectivamente, o que exige posicionamento com precisão ao nível do decímetro.

A aerogravimetria apresenta dificuldades adicionais, oriundas da acentuada e rápida variação em g causado pela grande velocidade da aeronave. Variações em g são associadas a variações na altitude da aeronave, aceleração e movimentos de asa e bico. Uma variação de 15 metros em altitude, por exemplo, equivale a um erro de 5 mgal. Embora estes três últimos efeitos sejam também significantes em trabalhos de gravimetria marinha, eles podem ser razoavelmente bem corrigidos devido a baixa velocidade da embarcação e lentas variações em velocidade e rumo. (TELFORD et al, 1981).

6.3.1.4 - Posicionamento no mar

Um método comumente empregado para posicionamento de embarcações em levantamentos geofísicos marinhos, consiste em um sistema integrado composto por um navegador Transit (NAVSAT), um sonar-doppler e uma giro. O sonar-doppler fornece a velocidade do navio, e, via de consequência, a distância por este percorrida. A giro fornece o rumo do navio.

O percurso da embarcação, obtido pelo conjunto sonar-doppler/giro, é controlado pela posição fornecida pelo NAVSAT após cada passagem de um dos satélites do Sistema Transit, o que no intervalo de latitude do Brasil ocorre a intervalos de aproximadamente 2 horas. A diferença encontrada será compensada sobre o percurso já percorrido. Assim sendo, a precisão deste Sistema Integrado será imposta pela precisão do NAVSAT, ou seja, aproximadamente 100 metros (EATON et al, 1976), o que permite a obtenção da velocidade e do rumo com imprecisão da ordem de 0,1 nó e 6 graus, respectivamente. A precisão do Sistema Integrado é fator limitante de sua aplicação.

Os Métodos de Posicionamento Radioelétricos são os que têm fornecido maior precisão no posicionamento de embarcações. Dentre eles, incluem-se o Raydist, o Motorola e o Syledis, os mais empregados no Brasil e os que fornecem as maiores precisões absolutas (Tabela 6.1).

	Alcance (km)	Precisão (m)
Raydist	370	50
Motorola	25-40	2-5
Syledis	25-40	2-3

Tabela 6.1

Os métodos radioelétricos baseiam-se em um mesmo princípio: estações em terra, cujas coordenadas são previamente conhecidas, posicionam uma antena à bordo, através do cruzamento de circunferências (de distâncias: sistemas circulares), cu

através da interseção de hipérboles (de diferenças de distâncias; sistemas hiperbólicos).

As precisões absolutas apresentadas na Tabela 6.1 permitem a obtenção da velocidade e do rumo da ordem de 0,1 nó e 3 graus, para o Raydist, e de 0,05 nó e 0,3 grau para o Syledis. A precisão do Raydist é fator limitante de sua utilização. Com respeito ao Motorola e Syledis, a limitação decorre do alcance.

6.3.1.5 - Posicionamento aéreo

Levantamentos aéreos usualmente empregam um sistema de navegação doppler. O equipamento doppler faz uso do conhecido efeito doppler sobre ondas emanadas de uma fonte móvel. Neste sistema, sinais são transmitidos diagonalmente à vertical da aeronave, para frente e para baixo. As frequências dos sinais refletidos são comparadas com as frequências originais visando obter a velocidade do veículo. A precisão da posição obtida é teoricamente melhor do 1:1.000 [DOBRIN, 1981].

6.3.1.6 - Aplicação do NAVSTAR/GPS

A aplicação do NAVSTAR/GPS no posicionamento de sensores geofísicos em plataformas móveis pode ser feita no modo cinemático diferencial. As precisões alcançadas em diversas experiências, com a utilização de diferentes algoritmos, mostram esta potencialidade.

Tanto a sísmica quanto a magnetometria marinha podem ter seus sensores posicionados no modo cinemático diferencial

usando-se a pseudo-distância amaciada pela fase.

A aeromagnetometria tem como principal exigência o controle na oscilação da altura de voo. Para atendê-la pode-se empregar a pseudo-distância amaciada pela fase.

A gravimetria, marinha e aérea, é restringida pelo efeito Eötvös, e por acelerações espúrias, estas principalmente na aerogravimetria. Para atender a estas exigências deve-se utilizar medidas de diferença de fase.

6.3.2 - Rastreamento de satélite à satélite

A altura de 20.000 km dos satélites GPS permite que os mesmos sejam usados para a determinação da órbita de satélites mais próximos à Terra, desde que estes últimos possuam receptores GPS à bordo. O movimento destes satélites é afetado por forças perturbadoras difíceis de serem previstas precisamente. A concepção do rastreamento de satélite à satélite se baseia na determinação precisa da órbita de satélites de grande altitude, como é o caso dos satélites GPS, que por sua vez possibilitaria a determinação da órbita dos satélites "mais baixos" [BOMFORD, 1980].

Este é o caso do satélite Landsat 4 [JORGENSEN, 1984], lançado no verão de 1983 numa órbita quase circular com 705 km de altitude, levando à bordo um receptor GPS, tornando-se o primeiro satélite a usar o GPS com esta finalidade. A melhor precisão encontrada na posição orbital do Landsat 4 foi de 11 metros, o que já excede os outros métodos atuais de rastreamento para satélites de órbita baixa, e satisfaz as mais rigorosas demandas dos usuários. Ressalte-se que este valor foi obtido com uma constelação GPS de

(na época) 4 satélites.

Do mesmo modo, planeja-se que o satélite altimétrico TOPEX/Poseidon venha a ter sua órbita obtida por meio dos satélites GPS. A missão deste satélite será a de medir correntes e marés oceânicas do espaço. O TOPEX/Poseidon, fruto de ação conjunta da NASA e do Centro de Estudos Espaciais da França, tem lançamento previsto para 1992. Espera-se obter precisão nas medidas do nível do mar de ± 14 centímetros, em coordenadas geocêntricas, o que será também função da precisão na determinação da órbita [STEWART E YAMARONE, 1989].

CAPITULO 7

PROCESSAMENTO GPS DA BASE GEODÉSICA CFN-JOÃO LOURINHO

7.1 - Introdução

Este capítulo apresenta os resultados do processamento da base geodésica composta pelos vértices CFN e João Lourinho. A medição desta base fez parte de um conjunto de experiências, realizadas em 1988, descritas por FORTES E BLITZKOW [1989b], que tinham como objetivos: (a) testar receptores e programas, (b) comparar os resultados obtidos com a Rede Geodésica, e (c) verificar os procedimentos operacionais envolvidos numa campanha GPS. As experiências foram levadas a termo através da medição de bases independentes, dentre elas, a base em questão. As observações coletadas foram utilizadas neste processamento.

7.2 - Descrição da Base Geodésica CFN-João Lourinho

Os Vértices Geodésicos CFN e João Lourinho fazem parte da Rede de Triangulação brasileira de 1^a ordem, mantida pela Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Estes Vértices estão situados, respectivamente, no município do Rio de Janeiro e no município de São Gonçalo, conforme mostra a Figura 7.1.

Os Vértices CFN e João Lourinho formam uma base geodésica. O Vértice CFN é uma estação de Laplace, com o azimute referido ao Vértice Artur Lopes, estando este último localizado ao lado da estátua do Cristo Redentor.

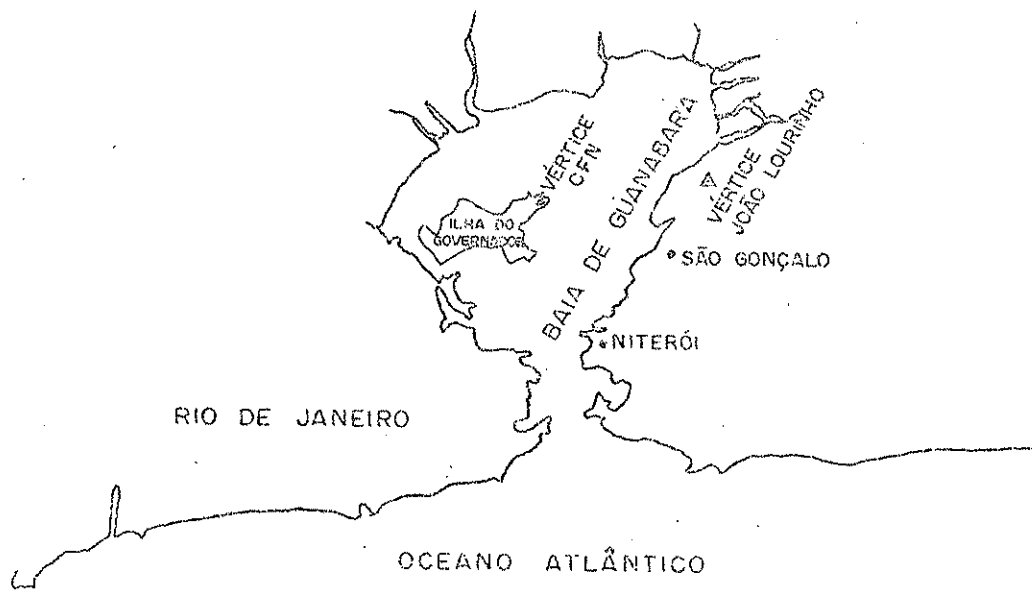


Figura 7.1 - Localização dos Vértices CFN e João Lourinho

7.3 - Coordenadas dos Vértices

As coordenadas geodésicas ϕ e λ dos vértices CFN (estação 1) e João Lourinho (estação 2), bem como suas respectivas altitudes ortométricas H ⁽⁹⁾ fornecidas pelo IBGE, referidas ao SAD-69 e derivadas da rede de triangulação, são apresentadas na Tabela 7.1.

$\phi_1 = - 22^{\circ} 47' 11,6570''$	$\phi_2 = - 22^{\circ} 46' 02,2813''$
$\lambda_1 = - 43^{\circ} 10' 02,6241''$	$\lambda_2 = - 43^{\circ} 01' 38,5190''$
$H_1 = 82,06 \text{ m}$	$H_2 = 281,43 \text{ m}$

Tabela 7.1 - Coordenadas ϕ , λ e H referidas ao SAD-69

⁽⁹⁾ As altitudes ortométricas dos vértices em questão foram obtidas por nivelamento trigonométrico.

As coordenadas cartesianas dos vértices CFN e João Lourinho referidas ao SAD-69 e calculadas a partir de suas respectivas coordenadas geodésicas são apresentadas na Tabela 7.2. Para o referido cálculo, foram utilizadas as relações apresentadas, dentre outros, por GEMAEL [1981]

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\nu + h) \cos \phi \cos \lambda \\ (\nu + h) \cos \phi \sin \lambda \\ [\nu (1 - e^2)] \sin \phi \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

onde ν é o raio de curvatura da seção primeiro vertical e h a altura elipsoidal.

$$\nu = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{1/2}} \quad (7.2)$$

$$h = N + H \quad (7.3)$$

sendo a - semi-eixo maior do elipsóide

$e^2 = f(2 - f)$ - quadrado da primeira excentricidade do elipsóide

f - achatamento do elipsóide

N - ondulação geoidal

$X_1 = 4.291.106,988$	$X_2 = 4.301.669,648$
$Y_1 = -4.025.024,923$	$Y_2 = -4.013.214,844$
$Z_1 = -2.454.986,707$	$Z_2 = -2.453.096,194$

Tabela 7.2 - Coordenadas Cartesianas referidas ao SAD-69

Para a resolução da equação (7.3) foram adotados para N

os valores de + 2,5 m e + 2,6 m, para os vértices CFN e João Lourinho, respectivamente, extraídos do mapa geoidal apresentado na Figura 5.4.

As coordenadas cartesianas apresentadas na Tabela 7.2 foram acrescentadas as translações [FORTES et al, 1989a]

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

$$TY = + 4,37 \text{ m}$$

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

de modo a obter-se as coordenadas dos vértices em questão no WGS-84, de acordo com a equação (5.8). Este novo conjunto de coordenadas está apresentado na Tabela 7.3.

$X_1 = 4.291.040,118$	$X_2 = 4.301.602,778$
$Y_1 = - 4.025.020,553$	$Y_2 = - 4.015.210,474$
$Z_1 = - 2.455.025,227$	$Z_2 = - 2.453.134,714$

Tabela 7.3 - Coordenadas Cartesianas referidas ao WGS-84

A partir das coordenadas cartesianas dos vértices no WGS-84, foram calculadas suas coordenadas geodésicas e alturas elipsoidais, conforme mostra a Tabela 7.4, empregando-se as relações apresentadas por GEMAEL [1981]

$$\tan \lambda = (Y/X) \tag{7.4}$$

$$\tan \phi = \frac{Z + \nu e^2 \sin \phi}{(X^2 + Y^2)^{1/2}} \tag{7.5}$$

$$\nu + h = X \sec \phi \sec \lambda = Y \sec \phi \operatorname{cosec} \lambda \tag{7.6}$$

$\phi_1 = - 22^{\circ} 47' 13,4494''$	$\phi_2 = - 22^{\circ} 46' 04,0746''$
$\lambda_1 = - 43^{\circ} 10' 04,1162''$	$\lambda_2 = - 43^{\circ} 01' 40,0064''$
$h_1 = 74,69 \text{ m}$	$h_2 = 274,62 \text{ m}$

Tabela 7.4 - Coordenadas ϕ , λ e h referidas ao WGS-84

7.4 - Medição da Base com GPS

A base CFN-João Lourinho foi medida no dia 28 de maio de 1988 através de 2 receptores WM 101 ⁽¹⁰⁾.

Efetivamente, na data mencionada foram medidas as bases CFN-João Lourinho (seção 1) e CFN-Artur Lopes (seção 3). Entende-se por seção a parte de uma campanha de observação caracterizada por um único conjunto de erros [VANÍČEK et al, 1985]. As Figuras 7.2 e 7.3 descrevem a diretriz seguida para a ocupação destas duas bases. Um rastreador GPS permaneceu estacionado sobre o Vértice CFN durante todo o período do rastreamento, enquanto que o outro foi incumbido de ocupar os Vértices João Lourinho e Artur Lopes. Naquela época haviam somente

⁽¹⁰⁾ O receptor WM 101 é produzido pela WILD-MAGNAVOX Satellite Survey Company, e destina-se ao posicionamento diferencial e a navegação. Suas principais características são: capacidade de rastrear até 6 satélites; trabalha somente com a portadora L_1 ; se serve do código C/A para medida de pseudo-distância; capacidade de decodificar a Mensagem transmitida pelos satélites; capacidade de efetuar medidas de fase.

Sábado	28/05/88	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	CFN		██							
2	JOÃO LOURINHO		████████							
3	ARTUR LOPES						████████			

Figura 7.2

7 satélites em órbita, o que possibilitava um período de pouco menos de 3 horas de rastreo, compreendido das 6:18 às 10:45 horas TU. A Figura 7.3 indica um período de 71 minutos de rastreo na seção 1, um período de 128 minutos gastos com a desguarnição do Vértice João Lourinho, percurso até o Vértice Artur Lopes e instalação do receptor sobre este último, e 69 minutos de rastreo da seção 3.

Seção	Início	Fim	Observação	Status
1	06:18 28/05/88	07:28 28/05/88	71	OK
2	07:29 28/05/88	09:36 28/05/88	128	OK
3	09:37 28/05/88	10:45 28/05/88	69	OK

Figura 7.3

As observações efetuadas na seção 3 foram tremendamente prejudicadas por dois motivos. O primeiro foi a obstrução provocada pela estátua do Cristo Redentor que somente permitiu a recepção dos sinais de 4 satélites por pouco tempo. Ademais, a base da estátua, composta por placas, possibilitou que os sinais

refletissem causando interferências nefastas. Por este motivo a seção 3 foi desconsiderada para este trabalho.

A tarefa de planejamento de uma seção é resumidamente descrita no Apêndice B.

7.5 - Processamento da Seção; Resultados

As observações coletadas na seção 1 foram processadas com o programa PoPS, versão 3. Este programa foi desenvolvido pela Universidade de Berna, Suíça [SEEBER, 1986], e é utilizado no processamento dos dados coletados com os receptores da linha Wild-Magnavox. Sua versão 3 permite o processamento de observações efetuadas com receptores de uma ou duas frequências, como o receptor WM 102⁽¹¹⁾, por exemplo.

O programa PoPS 3 está estruturado em duas partes principais: o pré-processamento e o processamento das observações GPS.

O pré-processamento se divide em 3 etapas: a determinação dos parâmetros para correção do relógio de cada um dos receptores, através do modelo da pseudo-distância, a formação das simples diferenças, e a detecção das eventuais perdas de ciclo através da tripla-diferença.

O processamento faz uso da Dupla diferença de Fase, quando se define como fixa as coordenadas de uma das estações da seção, visando a determinação das coordenadas da outra.

⁽¹¹⁾ O receptor WM 102 difere do seu antecessor por ser capaz de rastrear as duas portadoras L_1 e L_2 .

Na primeira etapa do pré-processamento, foi feita a determinação dos parâmetros para correção do relógio de cada um dos receptores junto ao cálculo das coordenadas absolutas de cada estação da seção, utilizando-se o modelo da pseudo-distância, adotando-se o código C/A, as efemérides e o modelo da ionosfera transmitidos na Mensagem GPS, e o modelo de Hopfield II para a troposfera.

O emprego da Tripla Diferença não detectou perda de ciclo.

No processamento, fixou-se as coordenadas do Vértice CFN oriundas da Rede, considerando-as como corretas, buscando-se a determinação das coordenadas do Vértice João Lourinho.

Para a análise dos resultados, as coordenadas do Vértice João Lourinho oriundas da Rede foram também consideradas como corretas.

Durante o processamento, contudo, foram utilizadas como fixas as coordenadas antigas do Vértice CFN, o que forçou uma análise dos resultados sobre as diferenças entre as coordenadas oriundas da Rede e as calculadas.

As coordenadas geodésicas e cartesianas do Vértice CFN, referidas ao WGS-84, adotadas no processamento, estão apresentadas na Tabela 7.5.

$\phi_1 = - 22^{\circ} 47' 13,40266''$	$X_1 = 4.291.043,5907$
$\lambda_1 = - 43^{\circ} 10' 04,08394''$	$Y_1 = - 4.025.022,5480$
$h_1 = 78,292 \text{ m}$	$Z_1 = - 2.455.025,3056$

Tabela 7.5 - Coordenadas iniciais do Vértice CFN (WGS-84)

As coordenadas finais do Vértice João Lourinho, fornecidas pelo processamento GPS, estão descritas na Tabela 7.6

$\phi_2 = - 22^{\circ} 46' 04,02081'' \pm 0,0009 \text{ m}$	$X_2 = 4.301.606,0725$
$\lambda_2 = - 43^{\circ} 01' 39,97437'' \pm 0,0012 \text{ m}$	$Y_2 = - 4.015.212,2969$
$h_2 = 277,3686 \pm 0,0024 \text{ m}$	$Z_2 = - 2.453.134,6535$

Tabela 7.6 - Coordenadas finais do Vértice João Lourinho (WGS-84)

A primeira comparação foi feita entre as diferenças das coordenadas cartesianas calculadas (Tabela 7.5 - 7.6) e as oriundas da Rede (Tabela 7.2). Estas diferenças são:

Rede	GPS
$\Delta X = 10.562,660$	$\Delta X = 10.562,4818$
$\Delta Y = 9.810,079$	$\Delta Y = 9.810,2511$
$\Delta Z = 1.890,513$	$\Delta Z = 1.890,6521$

A distância inclinada entre os Vértices CFN e João Lourinho, calculada pelas coordenadas da Rede, é de 14.538,96405 m ao passo que a mesma distância, calculada pelas coordenadas oriundas do GPS, é de 14.538,9688 m. A diferença entre elas é de - 0,00475 m, o que resulta em um erro relativo de 0,33 ppm.

Outra comparação foi feita entre as diferenças das coordenadas geodésicas e das alturas elipsoidais de ambos os Vértices, as calculadas (Tabela 7.5 - 7.6) e as da Rede (Tabela 7.4). As diferenças encontradas foram:

Rede	GPS
$\Delta\phi = 1' 09,3748''$	$\Delta\phi = 1' 09,37585''$
$\Delta\lambda = 8' 24,1098''$	$\Delta\lambda = 8' 24,10957''$
$\Delta h = 199,33 \text{ m}$	$\Delta h = 199,0766 \text{ m}$

Comparando-se as diferenças entre si, observa-se que o erro absoluto em latitude é de 0,00105 segundos de arco (0,0323 m), em longitude equivale a - 0,00023 segundos de arco (0,0066 m), e em altura elipsoidal é de - 0,2534 m. O erro relativo em latitude e longitude é de 2,23 ppm e de 0,45 ppm, respectivamente. O maior valor encontrado na comparação entre as diferenças de altura elipsoidal pode ser oriundo da imprecisão intrínseca ao método de nivelamento trigonométrico, que, conforme já mencionado, foi utilizado para a determinação da altitude ortométrica dos vértices.

Posteriormente, o processamento foi feito utilizando-se períodos cumulativos de observação de 17, 32, 47 e 70 minutos. O interesse deste novo processamento se prendeu em (a) comparar as distâncias inclinadas (vetores) entre os dois vértices para os 4 períodos de observação, com a mesma distância oriunda da rede, de modo a se constatar o tempo gasto para a convergência do resultado, (b) comparar as diferenças das coordenadas geodésicas entre os vértices para os referidos períodos, com as mesmas diferenças provenientes da rede, e (c) visualizar o comportamento do desvio padrão das componentes do vetor ao longo dos 4 períodos.

Este novo processamento foi efetuado no modo automático ("batch mode"), que impossibilita a escolha de alternativas de processamento. Isto acarretou na obtenção das coordenadas finais

do Vértice João Lourinho (para 70 minutos de observações) um pouco diferentes daquelas fornecidas pelo primeiro processamento, e, conseqüentemente, uma distância inclinada também diferente.

Outra observação a ser feita, relativa a este segundo processamento, refere-se ao fato de, durante sua execução para as observações de 17, 32 e 47 minutos, terem sido mantidas como fixas as coordenadas do Vértice João Lourinho. Também foram utilizadas coordenadas diferentes das anteriormente empregadas. Este fato não invalida qualquer um dos objetivos deste novo processamento, expressos acima.

Os resultados do novo processamento são apresentados abaixo.

Para o período de 17 minutos de observação:

- componentes do vetor:

$$\Delta X = 10.562,4961 \pm 0,0045$$

$$\Delta Y = 9.810,2032 \pm 0,0057$$

$$\Delta Z = 1.890,6291 \pm 0,0057$$

- distância inclinada: 14.538,9439 metros

- diferença entre coordenadas geodésicas e altura elipsoidal:

$$\Delta \phi = 1' 09,37503'' \pm 0,0034 \text{ m}$$

$$\Delta \lambda = 8' 24,10436'' \pm 0,0034 \text{ m}$$

$$\Delta h = 199,119 \text{ m} \pm 0,0078 \text{ m}$$

Para o período de 32 minutos de observação:

- componentes do vetor:

$$\Delta X = 10.562,4944 \pm 0,0025$$

$$\Delta Y = 9.810,2123 \pm 0,0030$$

$$\Delta Z = 1.890,6346 \pm 0,0033$$

- distância inclinada: 14.538,9495 metros

- diferença entre coordenadas geodésicas e altura elipsoidal:

$$\Delta\phi = 1' 09,37539'' \pm 0,0020 \text{ m}$$

$$\Delta\lambda = 8' 24,10566'' \pm 0,0018 \text{ m}$$

$$\Delta h = 199,120 \text{ m} \pm 0,0043 \text{ m}$$

Para o período de 47 minutos de observação:

- componentes do vetor:

$$\Delta X = 10.562,5194 \pm 0,0016$$

$$\Delta Y = 9.810,2284 \pm 0,0021$$

$$\Delta Z = 1.890,6353 \pm 0,0017$$

- distância inclinada: 14.538,9786 metros

- diferença entre coordenadas geodésicas e altura elipsoidal:

$$\Delta\phi = 1' 09,37624'' \pm 0,0011 \text{ m}$$

$$\Delta\lambda = 8' 24,11193'' \pm 0,0013 \text{ m}$$

$$\Delta h = 199,128 \text{ m} \pm 0,0026 \text{ m}$$

Para o período de 70 minutos de observação:

- componentes do vetor:

$$\Delta X = 10.562,5096 \pm 0,0016$$

$$\Delta Y = 9.810,2278 \pm 0,0019$$

$$\Delta Z = 1.890,6370 \pm 0,0014$$

- distância inclinada: 14.538,9713 metros

- diferença entre coordenadas geodésicas e altura elipsoidal:

$$\Delta\phi = 1' 09,37585'' \pm 0,0009 \text{ m}$$

$$\Delta\lambda = 8' 24,10964'' \pm 0,0012 \text{ m}$$

$$\Delta h = 199,116 \text{ m} \pm 0,0024 \text{ m}$$

Da comparação entre a distância inclinada calculada pelas coordenadas da Rede (considerada como correta), com aquelas obtidas para cada conjunto de observações, foram calculados os erros absolutos (σ) e relativos (σ_r), apresentados na Tabela 7.7.

tempo (min)	ϵ (m)	ϵ_r (ppm)
17	- 0,0202	1,39
32	- 0,0146	1,00
47	+ 0,0146	1,00
70	- 0,0072	0,50

Tabela 7.7 - Erros absolutos e relativos da distância associados aos períodos de tempo de observação

As Figuras 7.4 e 7.5 mostram as mesmas quantidades apresentadas na Tabela anterior, permitindo uma visualização do tempo de observação necessário para atingir-se determinada precisão. Pode-se constatar que um período de 30 minutos de observação já seria suficiente para se alcançar uma precisão relativa da ordem de 1 ppm.

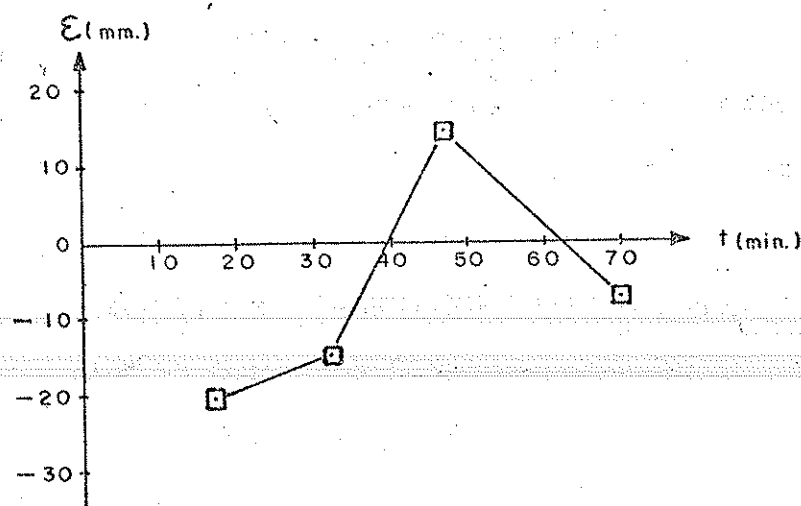


Figura 7.4 - Comportamento do erro absoluto da distância

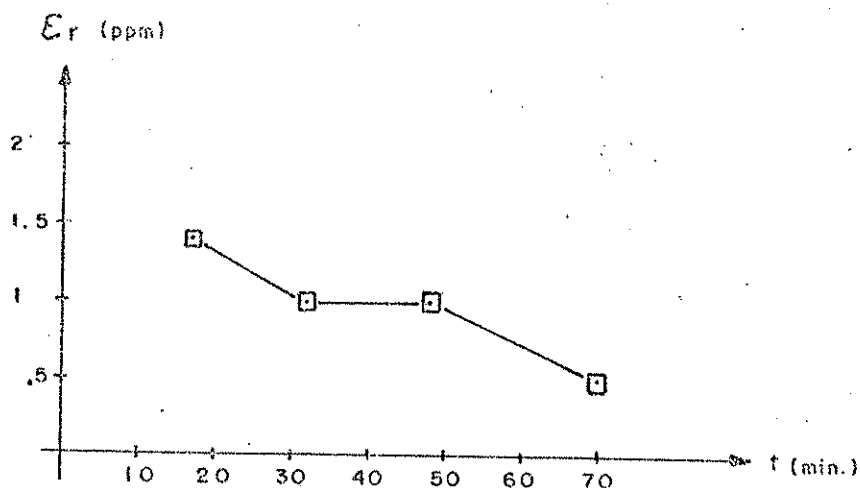


Figura 7.5 - Comportamento do erro relativo da distância

Da comparação entre as diferenças de coordenadas geodésicas provenientes da rede (consideradas como corretas) com aquelas obtidas para cada conjunto de observações, foram calculados os erros absolutos (ϵ_{ϕ} , ϵ_{λ}) e relativos ($\epsilon_{r\phi}$, $\epsilon_{r\lambda}$) apresentados na Tabela 7.8. As Figuras 7.6 e 7.7 mostram a variação temporal das quantidades discriminadas na Tabela 7.8.

t (min)	ϵ_{ϕ} (") ϵ_{ϕ} (m)	ϵ_{λ} (") ϵ_{λ} (m)	$\epsilon_{r\phi}$ (ppm)	$\epsilon_{r\lambda}$ (ppm)
17	0,00023 0,0071	- 0,00544 - 0,1552	0,49	10,67
32	0,00059 0,0181	- 0,00414 - 0,1181	1,24	8,13
47	0,00144 0,0443	0,00213 0,0608	3,05	4,18
70	0,00105 0,0323	- 0,00016 - 0,0046	2,22	0,31

Tabela 7.8 - Erros absolutos e relativos em ϕ e λ

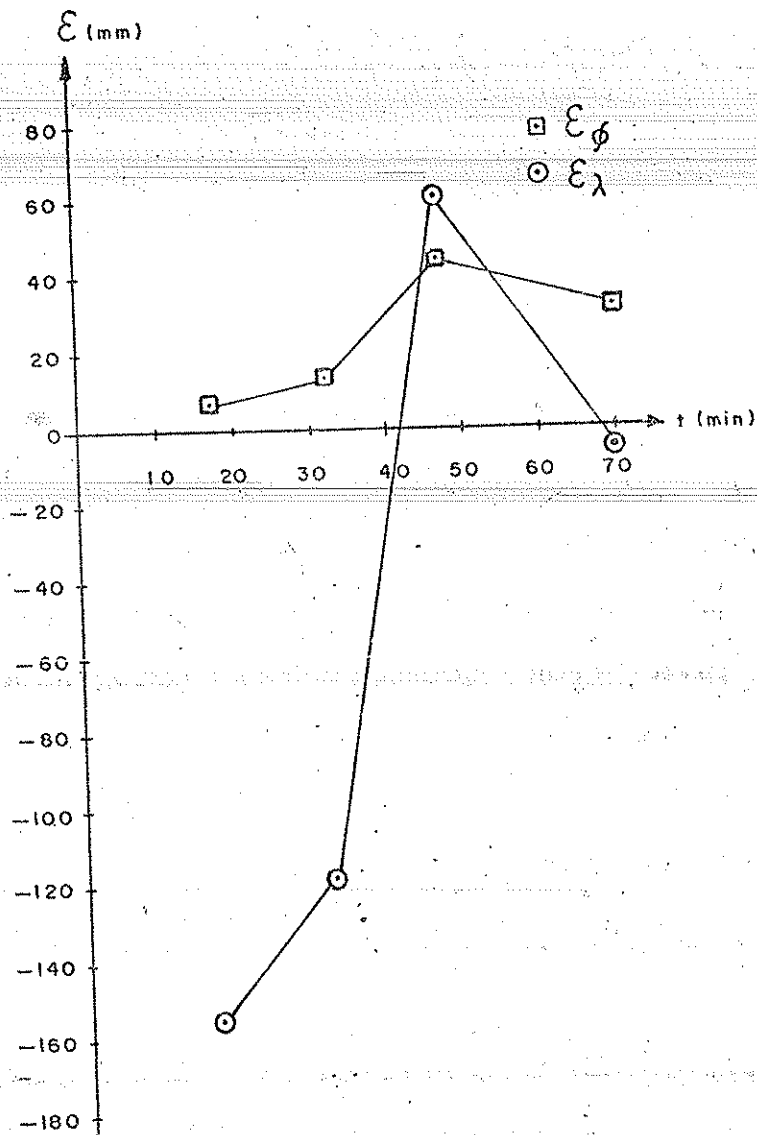


Figura 7.6 - Comportamento do erro absoluto em ϕ e λ

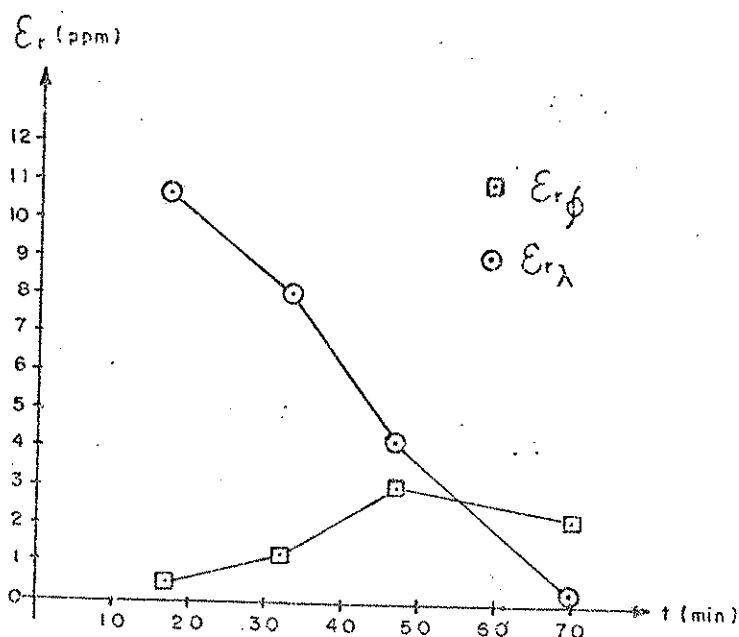


Figura 7.7 - Comportamento do erro relativo em ϕ e λ

As Figuras 7.8 e 7.9 apresentam o comportamento do desvio padrão nas três componentes, σ_x , σ_y , σ_z , e σ_ϕ , σ_λ , σ_h , respectivamente, para cada um dos períodos de observação. É interessante notar na Figura 7.9 o comportamento quase coincidente das componentes σ_ϕ , σ_λ . A componente σ_h possui valores um pouco mais altos do que as demais. É possível que este comportamento deva-se ao fato de não terem sido utilizados dados meteorológicos no processamento

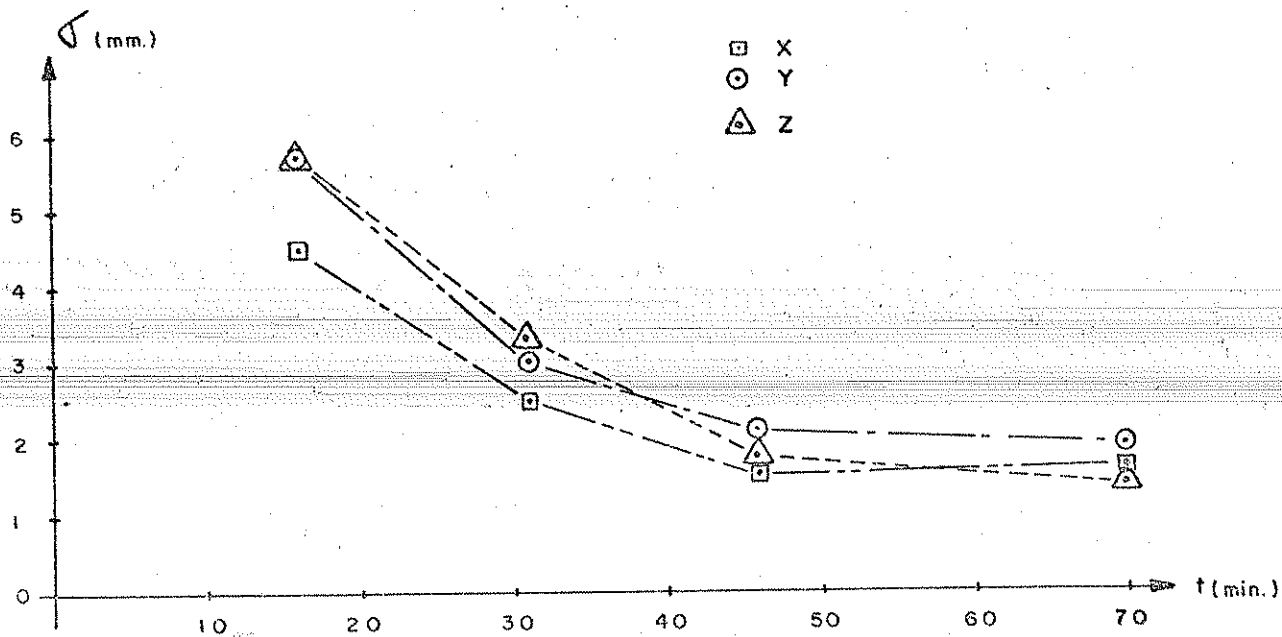


Figura 7.8 - Comportamento dos desvios σ_x , σ_y , σ_z

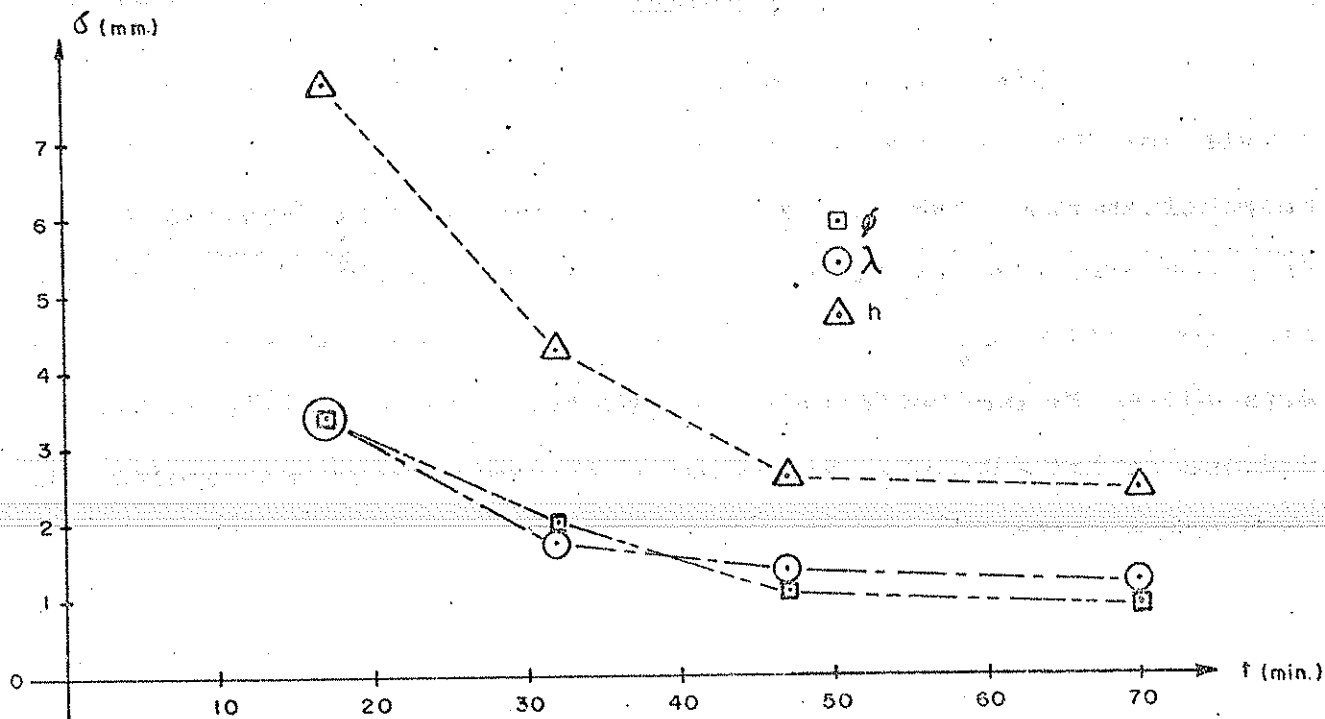
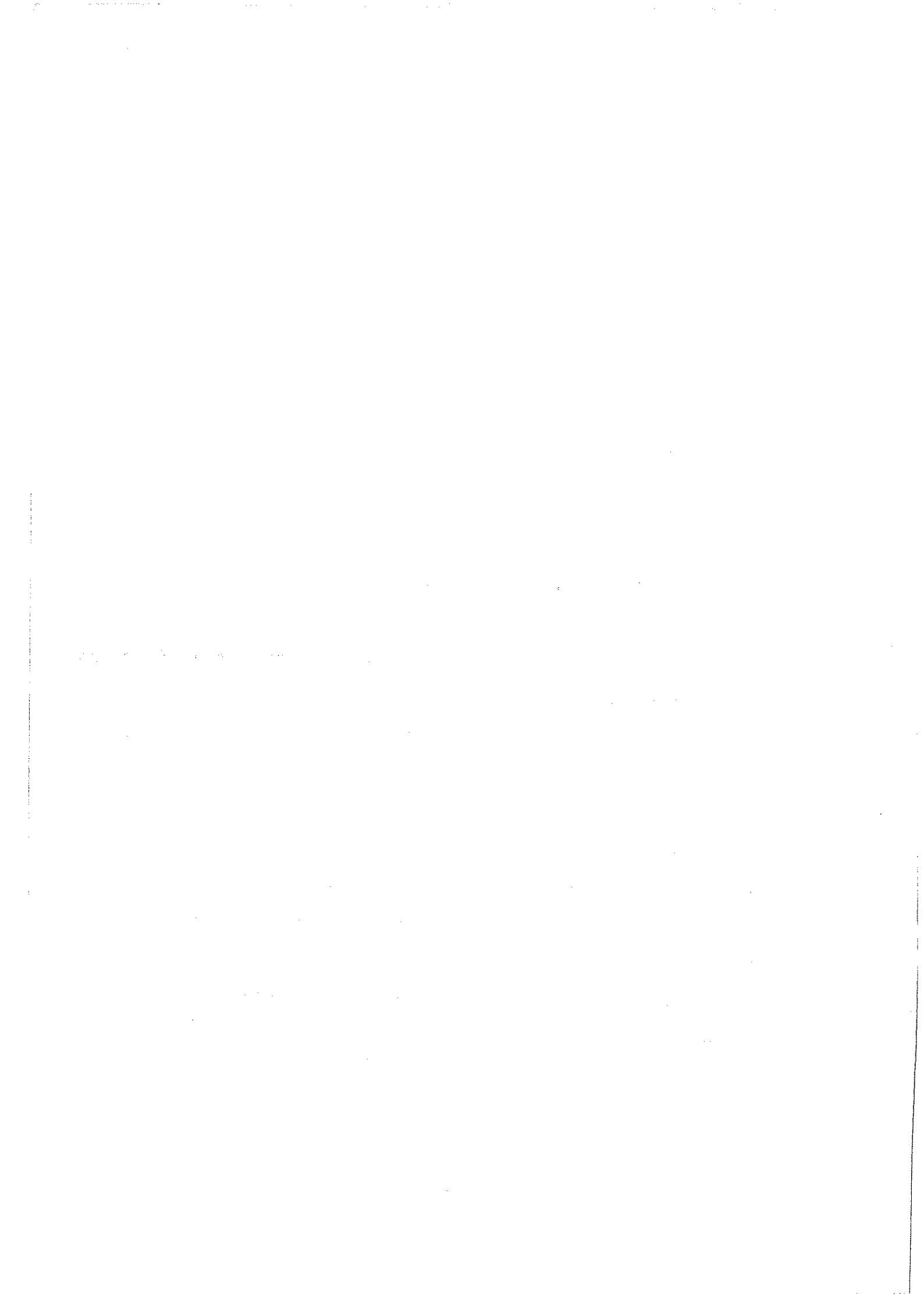


Figura 7.9 - Comportamento dos desvios σ_ϕ , σ_λ , σ_h



CAPITULO 8

CONCLUSÕES

Do exposto ao longo dos capítulos precedentes, julgamos válido concluir que todas as tarefas geofísicas que necessitam de posição, quer como meio ou como fim, podem ser atendidas pelo NAVSTAR/GPS, com vantagens sobre os demais métodos de posicionamento, desde que utilizando-se os procedimentos operacionais e computacionais adequados.

As precisões que podem ser obtidas com o NAVSTAR/GPS foram apresentadas no desenrolar deste trabalho (Capítulo 5) e são resumidas a seguir.

1 - Posicionamento Estático:

1.1 - Absoluto:

- (a) posição instantânea de 10 m com o código P e de 20 m com o código C/A;
- (b) posição ao nível do metro, com 4 a 8 horas de observações de pseudo-distância, e emprego de dados orbitais precisos no ajustamento.

1.2 - Diferencial:

- (a) com um mínimo de 30 minutos de medidas de fase, 2 ppm ou 1 ppm, usando-se uma ou duas portadoras, respectivamente;
- (b) 1 a 2 ppm para estações distribuídas em rede;
- (c) 0,1 ppm ou melhor, quando as órbitas forem estimadas na solução (emprego de estações fiduciais).

2 - Posicionamento Cinemático:

2.1 - Absoluto:

(a) 10 m com o código P e 20 m com o código C/A;

2.2 - Diferencial:

(a) método da correção da posição diferencial: 3 a 5 m com o código P e 5 a 15 m com o código C/A.

(b) método da pseudo-distância suavizada pela fase: 0,5 a 1 m com o código P e 1 a 3 m com o código C/A;

(c) método da diferença de fase: ao nível do centímetro.

As tarefas geofísicas com as quais o NAVSTAR/GPS pode colaborar foram agrupadas em aplicações estáticas e dinâmicas e descritas no Capítulo 6. As precisões que elas exigem a nível de posicionamento são as seguintes:

1 - Aplicações Estáticas:

1.1 - Posicionamento de instrumentos geofísicos:

(a) sísmica 2D e magnetismo: planimetria e altimetria - 51 m e 1,4 m, respectivamente, numa linha de 10 km (Cf. eqs. 6.1 e 6.2);

(b) sísmica 3D: planimetria - 1 m/km (1:5.000); altimetria - 0,6 m numa linha de 10 km (Cf. eqs. 6.3 e 6.4)

(c) gravimetria: planimetria - máximo de 12,3 m (na latitude de 45°); altimetria - 3 cm.

1.2 - Geodinâmica:

(a) Monitoramento de movimentos horizontais e verticais da crosta: da ordem de 0,01 ppm;

(b) Subsidência provocada pelo Homem: ao nível do centímetro.

2 - Aplicações Dinâmicas:

2.1 - Levantamentos geofísicos marinhos e aéreos:

- (a) Levantamentos magnéticos: no mar - 20 m; no ar - $\approx 1:300$;
- (b) Levantamentos sísmicos: no mar - 20 m (2D) e 5 m (3D);
- (c) Levantamentos Gravimétricos: no mar - nível do metro; no ar: nível do decímetro ou centímetro.

Pode-se verificar que, no campo das aplicações estáticas, as atividades relacionadas à Geodinâmica são as que impõem maior rigor em precisão de posicionamento, notadamente as relacionadas ao monitoramento de movimentos verticais e horizontais da crosta, que só podem ser satisfeitas no modo estático diferencial, com medidas de fase, e emprego de estações fiduciais. Dependendo da magnitude destes movimentos, sua detecção só será possível após repetidas observações ao longo de alguns anos. Com respeito ao monitoramento de subsidência provocada pelo Homem, também requer medidas de fase. Neste caso, o deslocamento das estações que compõem a rede de controle pode ser feito no modo estático diferencial, ou, em se desejando maior velocidade na ocupação destas estações, através de algum dos procedimentos do método das diferenças de fase, no modo cinemático diferencial. Nestas aplicações o conhecimento da altura elipsoidal, fornecida pelo NAVSTAR/GPS, é suficiente, pois o interesse reside nos deslocamentos verticais relativos entre as estações.

Os levantamentos terrestres englobam diferentes níveis de precisão. O maior rigor encontra-se na gravimetria, desde que desejando-se utilizar toda a capacidade de leitura do gravímetro,

cuja condicionante principal é a altimetria. Neste caso, deve-se empregar medidas de fase (modo diferencial). Como o interesse nesta aplicação se prende na altitude ortométrica, faz-se necessário o conhecimento da ondulação geoidal, o que adiciona uma nova fonte de incerteza na determinação da gravidade.

Nos levantamentos sísmicos tridimensionais pode-se obter a posição instantânea absoluta através do código P, desde que disponível. Na sísmica bidimensional e na magnetometria, a posição absoluta pode ser alcançada instantaneamente através do código C/A.

Uma abordagem de ordem prática, válida para os levantamentos geofísicos terrestres, consiste na combinação do NAVSTAR/GPS com a topografia clássica, quando o grau de detalhamento do levantamento permita que sejam atingidas precisões menores do que as apresentadas, ou em regiões cujas características dificultem o emprego do GPS, como na amazônia. A título de exemplo, pode-se citar um hipotético levantamento gravimétrico onde se combinem informações planimétricas, oriundas do GPS através do código P ou C/A, com informações altimétricas obtidas por algum método topográfico, referidas às estações gravimétricas.

Dentre os levantamentos geofísicos marinhos e aéreos, englobados nas aplicações dinâmicas, os levantamentos gravimétricos são aqueles que possuem o mais alto nível de precisão, imposto pela correção Eötvös. Para ser atendido, exige a utilização do NAVSTAR/GPS no modo cinemático diferencial, através do método da diferença de fase. O método da pseudo-distância

amaciada pela fase pode ser utilizado na gravimetria marinha devido a baixa velocidade imposta às embarcações, desde que empregando-se o código P. A sísmica tridimensional é atendida pelo método da pseudo-distância amaciada pela fase. Tanto a sísmica bidimensional quanto a magnetometria, marinha e aérea, são satisfatoriamente atendidas pelo método da correção da posição diferencial.

Com respeito aos resultados dos processamentos descritos no Capítulo 7, eles comprovam o nível de precisão relativo que se julga possível obter com o GPS estático, no modo diferencial e utilizando-se de medidas de fase. Deve ser ressaltado que não foram considerados os efeitos oriundos das refrações troposférica e ionosférica bem como o da incerteza das efemérides transmitidas pelos satélites devido a extensão da base geodésica. Para bases maiores, estes efeitos devem ser considerados.

Foi dito acima que a altura elipsoidal, fornecida pelo NAVSTAR/GPS, é suficiente para a detecção de movimentos verticais. Contudo, outras aplicações necessitam da altitude ortométrica, e, por conseguinte, da ondulação geoidal. Quanto mais precisa for a posição determinada pelo GPS, mais precisa deve ser a ondulação geoidal, de modo a não comprometer a altitude ortométrica desejada. Levando em consideração os melhores níveis de precisão que o GPS oferece, a precisão da altitude ortométrica torna-se função, principalmente, da altura geoidal. Deste modo, reveste-se de fundamental importância um contínuo aprimoramento do mapa geoidal. Sugerimos que seja preservado o esforço no aprimoramento do mapa geoidal brasileiro, devendo-se passar a utilizar

resultados de observações GPS em conjunto com outros tipos de dados, sobretudo gravimetria.

Sugerimos ainda, que venham a ser estabelecidas bases GPS, rastreadas sobre Referências de Nível, tendo como origem o datum do Sistema Geodésico Sul-Americano, o Vértice Chuá. Sendo a altura geoidal sobre este Vértice igual a zero, a altura geoidal da Referência de Nível seria obtida através da diferença entre as diferenças de altura elipsoidal, fornecida pelo GPS, e de altitude ortométrica, oriunda das RN, conforme pode ser verificado pela equação (8.11). Neste caso, as fontes de erro são originárias apenas do nivelamento geométrico e das observações GPS.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, constatamos a potencialidade que os assuntos nele tratados possuem para servir como tema para novas pesquisas a serem realizadas no Brasil. Particularmente, desejamos destacar a necessidade de serem desenvolvidas pesquisas envolvendo o posicionamento cinemático diferencial. Esta modalidade de posicionamento pode, dentre diversas contribuições, dar novo impulso a aerogravimetria, levando-a a atingir níveis de precisão que a rivalizem com os levantamentos terrestres, trazendo enorme economia ao país.

BIBLIOGRAFIA

- ↓ ABBOT, R., BOCK, Y., COUNSELLMAN, C., KING, R., GOUREVITCH, S., ROSEN, B. (1985). Interferometric Determination of GPS Satellite Orbits, Proceedings of the First International Symposium with the Global Positioning System, Rockville, EUA, pp. 63-72.
- ↓ ANDRADE, J. B. (1988). NAVSTAR/GPS, Universidade Federal do Paraná, 62 pp.
- ↓ ANDRADE, J. B., GEMAEI, C. (1989). Métodos de Posicionamento Geodésico com GPS, Anais do XIV Congresso Brasileiro de Cartografia, pp. 195-199.
- √ ANODINA, T. G., PRILEPIN, M. T. (1989). The GLONASS System, Proceedings of the 5th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces, EUA, pp. 13-18.
- √ AQUINO, M. H. O. (1988). Satellite Configuration and Terrestrial Positioning Accuracies, University of Nottingham, 151 pp.
- √ ARCHIBOLD, M., MCKEE, C., TALAI, B., MORI, J., OURS, P. (1988). Electronic Distance Measuring Network Monitoring During the Rabaul Seismic/Deformational Crisis of 1983-1985, Journal of Geophysical Research, Vol. 93, No. B10, pp. 12123-12136.
- √ ASHKENAZI, V. (1985a). GPS Trends and Prospects: Potential geodetic and engineering applications, Revista Cartográfica, IPGH, No. 47/48, pp. 15-28.
- √ ASHKENAZI, V. (1985b). Space Geodesy and its application to geophysics, Revista Cartográfica, IPGH, No. 47/48, pp. 29-35.
- √ ASHKENAZI, V., YAU, J. (1986). Significance of Discrepancies in

- the processing of GPS Data with different algorithms, Bulletin Geodesique, Vol. 60, No. 3, pp. 229-239.
- ✓ ASHKENAZI, V., DE LA FUENTE, C., SUMMERFIELD, P. J. (1988). Kinematic Surveying, Published in: Lecture Notes in Earth Science, Vol. 19, pp. 236-247.
- ✓ BASTOS, L., LANDAU, H. (1988). Fixing cycle slips in dual-frequency kinematic GPS-applications using Kalman filtering, Manuscripta Geodaetica, Vol. 13, No. 4, pp. 249-256.
- ✓ BENEVIDES, P., PESSOA, L., FERRÃO, G. (1989). Metodologia de Posicionamento para Sísmica Tridimensional na Área do Rio Urucu, Anais do XIV Congresso Brasileiro de Cartografia, pp. 254-259.
- ✓ BEUTLER, G., GURTNER, W., BAUERSIMA, I., LANGLEY, R. (1985). Modelling and Estimating the Orbits of GPS Satellites, Proceedings of the First International Symposium with the Global Positioning System, EUA, pp. 99-111.
- ✓ BEUTLER, G., GURTNER, W., ROTHACHER, M., SCHILDKNECHT, T., BAUERSIMA, I. (1986). Determination of GPS Orbits using Double Difference Phase Observations from Regional Network, Bulletin Geodesique, Vol. 60, No. 3, pp. 205-220.
- ✓ BEUTLER, G., BAUERSIMA, I., GURTNER, W., ROTHACHER, M., SCHILDKNECHT, T. (1988). Static Positioning with the Global Positioning System (GPS): State of the Art, Published in: Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 19, pp. 363-380.
- BHATTACHARYYA, B. K. (1971). An automatic method of compilation and mapping of high-resolution aeromagnetic data, Geophysics,

Vol. 36, No. 4, pp. 695-716.

- ✓ BLITZKOW, D., SÁ, N. C. (1985). NAVSTAR/GPS. Situação Presente e as Perspectivas Futuras, IAG/USP, 13 pp.
- ✓ BLITZKOW, D., FORTES, L., GODOY, R. (1989). Geoidal Map improvements in Brazil, General Assembly of UGGI, Edimburgo, Escócia.
- ✓ BOCK, Y., ABBOT, R., COUNSELLMAN, C., GOUREVITCH, S., KING, R., PARADIS, A. (1984). Geodetic Accuracy of the Macrometer Model V-1000, Bulletin Geodesique, Vol. 58, No. 2, pp. 211-221.
- ✓ BOCK, Y., ABBOT, R., COUSELLMAN, C., KING, R. (1986). A Demonstration of 1-2 parts in 10^7 accuracy using GPS, Bulletin Geodesique, Vol. 60, No. 3, pp. 241-254.
- ✓ BOMFORD, G. (1980). Geodesy, Oxford University Press, 4th Edition, 731 pp.
- ✓ BOTT, M. (1982). The Interior of the Earth: its structure, constitution and evolution, Edward Arnold Ltd., 403 pp.
- ✓ BROWN, L. D., REILINGER, R. E. (1980). Releveling Data in North America: Implications for Vertical Motions of Plate Interiors, Published in: Dynamics of Plate Interiors, American Geophysical Union, pp. 131-144.
- ✓ BROZENA, J. M., MADER, G. L., PETERS, M. F. (1989). Interferometric Global Positioning System: Three-Dimensional Positioning Source for Airborne Gravimetry, Journal of Geophysical Research, Vol. 94, No. B9, pp. 12153-12162.
- CARTER, W. E., ROBERTSON, D.S., PYLE, T. E., DIAMANT, J. (1986). The application of geodetic radio interferometric surveying to the monitoring of sea-level, Geophysical Journal of the

Royal astronomical Society, Vol. 87, pp. 3-13.

- ✓ CHASE, C. G. (1978). Plate Kinematics: The Americas, East Africa and the rest of the World, Earth and Planetary Science Letters, Vol. 37, No. 3, pp. 355-368.
- ✓ CHRISTODOULIS D. C., SMITH, D. E., KOLENKIEWICZ, R., KLOSKO, S. M., TORRENCE, M. H., DUNN, P. J. (1985). Observing Tectonic Plate Motions and Deformations from Satellite Laser Ranging, Journal of Geophysical Research, Vol. 90, No. B11, pp. 9249-9263.
- ✓ CLARK, T. A., GORDON, D. H., HIMWICH, W. E., MA, C., MALLAMA, A., RYAN, J. W. (1987). Determination of Relative Site Motions in the Western United States Using Mark III Very Long Baseline Interferometry, Journal of Geophysical Research, Vol. 92, No. B12, pp. 12741-12750.
- ✓ COHEN, S.C., SMITH, D. E. (1985). LAGEOS Scientific Results, Introduction, Journal of Geophysical Research, Vol. 90, No. B11, pp. 9217-9220.
- ✓ CRAYMER, M. R., VANÍČEK, P. (1986). Further Analysis of the 1981 Southern California Field Test for Leveling Refraction, Journal of Geophysical Research, Vol. 91, No. B9, pp. 9045-9055.
- ✓ DAVIDSON, D., DELIKARAOGLOU, D., LANGLEY, R., NICKERSON, B., VANÍČEK, P., WELLS, D. (1983). Global Positioning System Differential Positioning Simulations, Technical Report No. 90, University of New Brunswick, Canada, 243 pp.
- ✓ DAVIS, J. L., PRESCOTT, W. H., SVARC, J. L., WENDT, K. J. (1989). Assessment of Global Positioning System Measurements for

Studies of Crustal Deformation, Journal of Geophysical Research, Vol. 94, No. B10, pp. 13635-13-650.

- ✓ DECKER, B. L. (1987). World Geodetic System 1984, Defense Mapping Agency Aerospace Center, 24 pp.
- ✓ DENKER, H., WENZEL, G. (1987). Local Geoid Determination and Comparison with GPS Results, Bulletin Geodesique, Vol. 61, No. 4, pp. 349-366.
- ✓ DELIKARAOGLOU, D. (1989). On Principles Methods and Recent Advances in Studies Towards a GPS-Based Control System for Geodesy and Geodynamics, NASA Technical Memorandum 100716, 150 pp.
- ✓ DEHLINGER, P. (1978). Marine Gravity, Elsevier Scientific Publishing Co., 322 pp.
- ✓ DICKEY, J. O., NEWHALL, X. X., WILLIAMS, J. G. (1985). Earth Orientation from Lunar Laser Ranging and an Error Analysis of Polar Motion Services, Journal of Geophysical Research, Vol. 90, No. B11, pp. 9353-9362.
- ✓ DOBRIN, M.B. (1981). Introduction to Geophysical Prospecting, McGraw Hill Inc., 3rd Edition, 630 pp.
- ✓ DONG, D., BOCK, Y. (1989). Global Positioning System network analysis with phase ambiguity resolution applied to crustal deformation studies in California, Journal of Geophysical Research, Vol 94, No. B4, pp. 3949-3966.
- ✓ DREWEWS, H., REIGHER, C., STUBER, K., SUAREZ, M., TREMEL, H., HENNEBERG, H., HOYER, M., CHOURIO, O., REKKEDAL, S. (1989). The Venezuelan part of the CASA/UNO GPS Project, Manuscripta Geodaetica, Vol. 14, No. 5, pp. 339-344.

- √ EATON, R. M., WELLS, D. E., STUIFBERGEN, N. (1976). Satellite Navigation in Hydrography, International Hydrographic Review, Vol. LIII, No. 1, pp. 99-116.
- √ EASTON, R. L. (1980). The Navigation Technology Program, Navigation, Vol. I, pp. 15-20.
- √ ENGELIS, T., RAPP, R., TSCHERNING, C. (1984). The Precise Computation of Geoid Undulation Differences with Comparison to Results obtained from the Global Positioning System, Geophysical Research Letters, Vol. 1, No. 9, pp. 821-824.
- √ ENGELIS, T., RAPP, R., BOCK, Y. (1985). Measuring orthometric height differences with GPS and gravity data, Manuscripta Geodaetica, Vol. 10, No. 3, pp. 187-194.
- √ EREN, K. (1987). Geodetic Network Adjustment using GPS Triple Difference Observations and a Priori Stochastic Information, Technical Report No. 1, University of Stuttgart, 51 pp.
- √ FORTES, L. P. S., CAGNIN, I., GODOY, R., BLITZKOW, D. (1989a). Determinação dos Parâmetros de Transformação entre os Sistemas NWL-10D, NSWG-922, WGS-84 e o SAD-69, Anais do XIV Congresso Brasileiro de Cartografia, pp. 157-165.
- √ FORTES, L. P. S., BLITZKOW, D. (1989b). Geodetic Positioning Experiments with NAVSTAR/GPS in Brazil, Proceedings of the 5th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces, EUA, pp. 873-886.
- √ FOUGER, G., BILHAM, R., MORGAN, W.G., EINARSON, P. (1987). The Iceland GPS geodetic field campaign 1986, EOS, 29, pp. 1809-1818.

- ✓ GEMAEL, C. (1975). Introdução à Geodésia Celeste, Primeira Parte, Universidade Federal do Paraná, 110 pp.
- ✓ GEMAEL, C. (1981). Referenciais Cartesianos Utilizados em Geodésia, Universidade Federal do Paraná, 80 pp.
- ✓ GOAD C. C. (1985). Precise Relative Positioning Determination Using Global Positioning System Carrier Phase Measurements in a Nondifference Mode, Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville, EUA, pp. 347-356.
- ✓ GROTEN, E. (1988). A Note on Monitoring Tectonic Plate Motions using GPS and Classical Techniques, Published in: Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 19, 449-457.
- ✓ HEIN, G., LANDAU, H., BAUSTERT, G. (1988). Terrestrial and Aircraft Differential Kinematic GPS positioning, Published in: Lecture Notes in Earth Science, Vol. 19, pp. 307-348.
- ✓ HOFFMANN-WELLMHOF, B., REMONDI, B., (1988). The Antenna Exchange: One Aspect of High-precision Kinematic Survey, Published in: Lecture Notes in Earth Science, Vol 19, pp. 261-277.
- ✓ IERS. (1989). Bulletin C-1, International Earth Rotation Service.
- ✓ ISHII, H., KATO, T. (1989). Detectabilities of Earthquake Precursors using GPS, EDM, and Strain Meters, with Special Reference to the 1923 Kanto Earthquake, Journal of the Geodetic Society of Japan, Vol. 35, No. 2, pp. 75-83.
- ✓ JACOBY, W. R. (1988). Geodynamics of Iceland Studied with the Aid of Terrestrial Geodetic and GPS Experiments, Lecture Notes in Earth Science , Vol. 19, pp. 417-426.

- ✓ JOHNSEN, G. V., BJORNSON, A., SIGURDSON, S. (1980). Gravity and Elevation Changes Caused by Magma Movement Beneath the Krafla Caldera, Northeast Iceland, Journal of Geophysics, Vol 47, pp. 132-140.
- ✓ JONES, T. (1989). NAVSTAR Global Positioning System-Status and Update, Proceedings of the 5th International Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces, EUA, pp. 28-52.
- ✓ JORGENSEN, P. S. (1984). Navigating Low Altitude Satellites Using the Current Four Navstar/GPS Satellites, Navigation, Vol. II, pp. 122-131.
- ✓ KALAFUS, R., VILCANS, J., KNABLE, N. (1983). Differential Operation of NAVSTAR GPS, Navigation, Vol. 30, No. 3, pp. 187-204.
- ✓ KALAFUS, R., VAN DIERENDONCK, A., PEALER, N. (1986). Special Committee 104 Recommendations for Differential Service, Navigation, Vol. 33, No. 1, pp. 26-41.
- ✓ KENNETT, J. (1982). Marine Geology, Prentice-Hall Inc., 752 pp.
- ✓ KING R., MASTERS, W., RIZOS, C., STOLTZ, A., COLLINS J. (1985). Surveying with GPS, Monograph No. 9, University of New South Wales, 120 pp.
- ✓ KLEUSBERG, A. (1986). Kinematic Relative Positioning Using GPS Code and Carrier Beat Phase Observations, Marine Geodesy, Vol. 10, No. 3/4, pp. 257-274.
- ✓ KLOTZ, J., LELGEMANN, D. (1988). Present State of the Central Andean GPS-Traversal ANSA, Published in: Lecture Notes in Earth Science, Vol. 19, pp. 427-436.
- ✓ KOLENKIEWICZ, R., RYAN, J., TORRENCE, M. H. (1985). A Comparison Between LAGEOS Laser Ranging and Very Long Baseline

Interferometry Determined Baseline Lengths, Journal of Geophysical Research, Vol. 90, No. B11, pp. 9265-9274.

√ KROGER, P., DAVIDSON, J., GARDENER, E. (1986). Mobile Very Long Baseline Interferometry and Global Positioning System Measurements of Vertical Crustal Motion, Journal of Geophysical Research, Vol. 91, No. B9, pp. 9169-9176.

√ KROGER, P. M., LYZENGA, G. A., WALLACE, K. S., DAVIDSON, J. M. (1987). Tectonic motion in the western United States inferred from Very Long Baseline Interferometry measurements, 1980-1986, Journal of Geophysical Research, Vol. 92, No. B11, pp. 14151-14164.

√ LACHAPELLE, G., FALKENBERG, W., CASEY, M. (1987). Use of Phase Data for Accurate Differential GPS Kinematic Positioning, Bulletin Geodesique, Vol. 61, No. 4, pp. 367-377.

√ LADD, J. (1986). Establishment of a 3-Dimensional Geodetic Network using the Macrometer IITM Dual-Band Surveyor, Bulletin Geodesique, Vol. 60, No. 3, pp. 255-264.

√ LAMBERT, A., LIARD, J. O., MAINVILLE, A. (1986). Vertical Movement and Gravity Change Near the La Grande-2 Reservoir, Quebec, Journal of Geophysical Research, Vol. 91, No. B9, pp. 9150-9160.

√ LANDAU, H. (1989). Precise Kinematic GPS Positioning, Bulletin Geodesique, Vol. 63, No. 1, pp. 85-96.

√ MADER, G. (1986). Dynamic positioning using GPS carrier phase measurements, Manuscripta Geodaetica, Vol. 11, No. 4, pp. 272-277.

- ✓ MILLIKEN, R. J., ZOLLER, C. J. (1980). Principle of Operation of NAVSTAR/GPS and System Characteristics, Navigation, Vol. I, pp. 3-14.
- ✓ MOGI, K. (1985). Earthquake Prediction, Academic Press Japan Inc., 355 pp.
- ✓ MÖLLER, D., RITTER, B. (1980). Geodetic measurements and horizontal crustal movements in the rift zone in NE Iceland, Journal of Geophysics, Vol. 47, pp. 110-119.
- ✓ MORGAN, V. G. (1983). The Challenge of precisely positioning a 3D seismic survey, Navigation, Vol. 30 No. 3, pp. 261-272.
- ✓ MORGAN W. J. (1968). Rises, Trenches, Great Faults and Crustal Blocks, Journal of Geophysical Research, Vol. 73, No. 6, pp. 1959-1982.
- ✓ MUELLER, I. I. (1964), Introduction to Satellite Geodesy, Frederick Unger Publishing Co., New York, 415 pp.
- ✓ PAQUET, P., LOUIS, L. (1988). Recovering Earth Rotation Parameters with GPS, Published in: Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 19, pp. 442-448.
- ✓ PELTIER, W. R. (1986). Deglaciation-Induced Vertical Motion of the North American Continent and Transient Lower Mantle Rheology, Journal of Geophysical Research, Vol. 91, No. B9, pp. 9099-9123.
- ? PETROBRÁS. (1985). Manual de Topografia para a sísmica da Petrobrás, DEPEX/DIGEF.
- ✓ POLEY, C. M., TALWANI, P. (1986). Recent Vertical Crustal Movements Near Charleston, South Carolina, Journal of Geophysical Research, Vol. 91, No. B9, pp. 9056-9066.

- ✓ REMONDI, B. (1985). Global Positioning System Carrier Phase: Description and Use, Bulletin Geodesique, Vol. 59, No. 4, pp. 361-377.
- ✓ REMONDI, B. (1986). Performing Centimeter-Level Surveys in Seconds with GPS Carrier Phase: Initial Results, Navigation, Vol. 32, No. 4, pp. 386-400.
- ✓ RINNER, K., PESEC, P., STANGL, G., HOFMANN-WELLENHOFF, B. (1988). AGEDEN-An Application of GPS for Geodynamic investigations in Austria, Published in: Lecture Notes in Earth Science, Vol. 19, pp.79-92.
- ✓ RUSSEL, S. S. , SCHAILBY, J. H. (1980). Control Segment and User Performance, Navigation, Vol. I, pp. 74-80.
- ✓ SAVAGE, J. C., BURFORD, R. O. (1973). Geodetic Determination of Relative Motion in Central California, Journal of Geophysical Research, Vol. 78, No. 5, pp. 832-845.
- ✓ SEEBER, G. (1986). The Global Positioning System and its use in Geodesy and Geodynamics, Lectures at the Institute of Seismology, Wuhan, China, 140 pp.
- ✓ SEEBER, G., WUBENNA, G. (1987). Status report on DONAV, XIX General Assembly of IUGG, Vancouver, Canada.
- ✓ SPICKERNAGEL, H. (1980). Results of Height Measurements in Northern Iceland 1965/1977, Journal of Geophysics, Vol. 47, pp. 120-124.
- ✓ SPILKER, J. J. (1980). Signal Structure and Performance Characteristics, Navigation, Vol. I, pp. 29-54.
- ✓ STEIN, R. S., WHALEN, C. T., HOLDAHL, R. S., STRANGE, W. E., THATCHER, W. (1986). Saugus-Palmdale, California, Field Test

for Refraction Error in Historical Leveling Surveys, Journal of Geophysical Research, Vol. 91, No. B9, pp. 9031-9044.

- ✓ STEWARD, R. H., YAMARONE, C. A. (1989). The TOPEX/Posseidon Satellite System: Status, Policy and Plans, Proceedings of the 5th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces, EUA, pp. 118-123.
- ✓ TAFF, L. G. (1985). Celestial Mechanics, John Willey & Sons, Inc., 520 pp.
- ✓ TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E., KEYS, D. A. (1981). Applied Geophysics, Cambridge University Press, 841 pp.
- ✓ THORNTON, G. L., FANSELOW, J. L., RENZETTI, N. A. (1986). GPS-Based Geodetic Measurements Systems, Published in: Space Geodesy and Geodynamics, Academic Press, pp. 197-218.
- ✓ TORGE, W., KANNGIESER, E. (1980). Gravity and Height Variations during the present rifting episode in northern Iceland, Journal of Geophysics, Vol. 47, pp. 125-131.
- ✓ TSUBOI, C. (1981). Gravity, George Allen & Unwin, 254 pp.
- ✓ VAN DIERENDONCK, A. J., RUSSEL, S. S., KOPTZKE, E. R., BIRNBAUM, M. (1980). The GPS Navigation Message, Navigation, Vol. I, pp. 55-73.
- ✓ VANÍČEK, P., KRAKIWISKY, E. J. (1982). Geodesy, the concepts; North-Holland Publishing Co., 691 pp.
- ✓ VANÍČEK, P., BEUTLER, G., KLEUSBERG, A., LANGLEY, R. B., SANTERRE, R., WELLS, D. (1985). DIPOP, Differential Positioning Program Package for the Global Positioning System, Technical

- Report No. 115, University of New Brunswick, Canada, 267 pp.
- ✓ WEI, Z. (1986). Positioning with NAVSTAR, The Global Positioning System, Report No. 370, The Ohio State University, 139 pp.
- ✓ WALCOTT, R. I. (1972). Late Quaternary vertical movements in Eastern North America: quantitative evidence of glacio-isostatic rebound, Rev. Geophys. and Space Phys., Vol. 10, pp. 849-884.
- ✓ WELLS D., DELIKARAOGLU, D., VANÍČEK P. (1982). Marine Navigation with NAVSTAR/Global Positioning System (GPS) Today and in the Future, The Canadian Surveyor, Vol. 36, No. 1, pp. 9-28.
- ✓ WELLS, D., BECK, N., DELIKARAOGLU, D., KLEUSBERG, A., KRAKIWISKY, E., LACHAPPELLE, G., LANGLEY, R., NAKIBOGLU, M., SCHWARZ, K., TRANQUILLA, H., VANÍČEK, P. (1986). Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Associates, 286 pp.
- ✓ WENDT, K., MÖLLER, D., RITTER, B. (1985), Geodetic measurements of surface deformations during the present rifting episode in NE-Iceland, Journal of Geophysical Research, Vol. 90, pp. 10163-10172.
- ✓ WILSON, J. T. (1965). A New Class of Faults and their Bearing on Continental Drift, Nature, No. 207, pp. 343-347.
- ✓ WOODEN, W. H., II. (1985). A Comparison of Pole Positions from GPS Satellite and the Navy Navigation Satellite Observations, Proceedings of the 3rd International Symposium on Satellite Doppler Positioning, pp. 71-84.
- ✓ ZIELIŃSKY, J. B. (1989). GPS baseline error caused by the orbit uncertainty, Manuscripta Geodaetica, Vol. 14, No. 2, pp. 117-124.

ZACHMANN, G. (1989). GPS Accuracy for Civil Marine Navigation, Sea Technology, Vol, 30, No. 3, pp. 10-16.

APÊNDICE A

CÁLCULO DAS COORDENADAS CARTESIANAS DOS SATÉLITES GPS

O posicionamento por satélites se vale de dois referenciais cartesianos. São eles o Referencial Cartesiano Celeste Verdadeiro e o Referencial Terrestre Médio.

O Referencial Cartesiano Celeste Verdadeiro (RCCV) é um sistema de coordenadas celestes que mais se aproxima de um Referencial Inercial, isto é, que é estacionário ou em movimento uniforme (sem aceleração) no espaço [WELLS et al, 1986], sendo por isto chamado de quase inercial. O eixo terciário do RCCV é coincidente com o eixo de rotação verdadeiro de uma época T (sujeito à precessão e a nutação), com sentido positivo para o pólo norte verdadeiro da mesma época. O eixo primário coincide com a linha dos equinócios, com sentido positivo para o ponto vernal verdadeiro da época T. O eixo secundário é ortogonal ao eixo primário, no sentido dextrógiro. O RCCV é geocêntrico. As coordenadas esféricas correspondentes às cartesianas celestes verdadeiras são as uranográficas verdadeiras (ascensão reta e declinação referidas ao ponto vernal e ao equador verdadeiro da época considerada), logo sujeitas à precessão e a nutação [GEMMEL, 1981]. Como estes movimentos são bem conhecidos, a orientação do RCCV, para diferentes épocas, pode ser recuperada.

O Referencial Terrestre Médio, conhecido pela sigla CTS, de "Conventional Terrestrial System", é um sistema de coordenadas fixo à Terra sólida, de modo que um ponto estacionário sobre sua superfície não tenha coordenadas variáveis com o tempo. O eixo terciário do CTS é coincidente com o eixo de rotação terrestre

médio, definido pela Origem Convencional Internacional, conhecida pela sigla CIO ("Conventional International Origin"), que é a posição média do pólo do eixo de rotação terrestre no período entre 1900 e 1905. O eixo primário passa através da interseção do plano do meridiano de Greenwich, coerente com a CIO, com o plano do equador terrestre médio para 1900-1905. O eixo secundário é ortogonal ao eixo primário, no sentido dextrógiro. O CTS é geocêntrico [GEMAEL, 1981]. O GPS emprega como Sistema Geodésico definidor do CTS, o "World Geodetic System" 1984 (WGS-84).

Para a obtenção das coordenadas cartesianas do receptor, no CTS, é necessário o conhecimento da posição do satélite, no instante da observação, definida por suas coordenadas neste mesmo Sistema. Entretanto as efemérides são descritas no RCCV.

Os dois sistemas se relacionam por

$$K = R_2 (-x) R_1 (-y) R_3 (TSAG) W \quad (A.1)$$

onde K e W são coordenadas no CTS e RCCV, x e y são as componentes do movimento polar, TSAG é o Tempo Sideral Aparente de Greenwich e R_1 , R_2 e R_3 são matrizes de rotação (Figura A.1).

A obtenção das coordenadas cartesianas dos satélites GPS, no CTS, é feita através do seguinte procedimento computacional apresentado por VAN DIERENDONCK et al [1980]:

(a) constantes adotadas [DECKER, 1987]

constante gravitacional

$$\mu = GM = 3,986.005 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$$

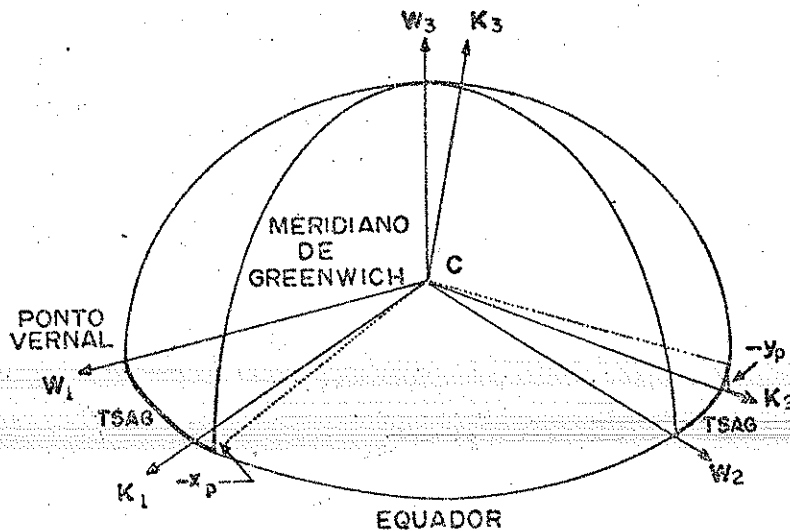


Figura A.1 - Relação entre os Sistemas CTS e RCCV

velocidade angular da Terra

$$\omega_T = 7,292.115 * 10^{-5} \text{ rad/s}$$

(b) cálculo da anomalia verdadeira (f_k)

semi-eixo maior

$$a = (\sqrt{a})^2 \tag{A.2}$$

movimento médio calculado

$$n_0 = (\mu/a^3)^{1/2} \tag{A.3}$$

tempo t_k decorrido desde o tempo de referência t_{OE}

$$t_k = t - t_{OE} \tag{12} \tag{A.4}$$

(12) t está no Sistema de Tempo GPS no instante da transmissão, equivalendo ao tempo de recepção do sinal, neste mesmo sistema de tempo, corrigido do tempo de percurso do sinal. Para o cálculo de t_k é importante verificar um eventual cruzamento da semana GPS: se t_k for maior do que 302.400, subtrair 604.800 de t_k ; se t_k for menor do que -302.400, somar 604.800 a t_k .

movimento médio corrigido das perturbações

$$n = n_0 + \Delta n \quad (\text{A.5})$$

anomalia média

$$M_k = M_0 + n t_k \quad (\text{A.6})$$

equação de Kepler para a anomalia excêntrica

$$M_k = E_k - e \operatorname{sen} E_k \quad (13) \quad (\text{A.7})$$

anomalia verdadeira

$$\cos f_k = (\cos E_k - e) / (1 - e \cos E_k) \quad (\text{A.8})$$

$$\operatorname{sen} f_k = (1 - e^2)^{1/2} \operatorname{sen} E_k / (1 - e \cos E_k) \quad (\text{A.9})$$

(c) cálculo do argumento de latitude corrigido das perturbações (u_k)

argumento de latitude

$$\phi_k = f_k + \omega \quad (\text{A.10})$$

correção do argumento de latitude

$$\delta u_k = C_{us} \operatorname{sen} 2\phi_k + C_{uc} \cos 2\phi_k \quad (\text{A.11})$$

argumento de latitude corrigido

$$u_k = \phi_k + \delta u_k \quad (\text{A.12})$$

(d) cálculo do raio vetor corrigido das perturbações (r_k)

expressão do raio vetor numa elipse

$$r = a (1 - e \cos E_k) \quad (\text{A.13})$$

correção para o raio vetor

$$\delta r_k = C_{rc} \cos 2\phi_k + C_{rs} \operatorname{sen} 2\phi_k \quad (\text{A.14})$$

(13) como a excentricidade da órbita dos satélites GPS é pequena ($e < 0,001$), a solução de (A.5) é feita iterativamente, fazendo

$$E_0 = M$$

$$E_i = M + e \operatorname{sen} E_{i-1}, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

raio vetor corrigido

$$r_k = r + \delta r_k \quad (\text{A.15})$$

(e) cálculo da inclinação do plano orbital corrigida das perturbações (i_k)

correção para a inclinação

$$\delta i_k = C_{ic} \cos 2\phi_k + C_{ia} \sin 2\phi_k \quad (\text{A.16})$$

inclinação corrigida

$$i_k = i_0 + \dot{i} t_k + \delta i_k \quad (\text{A.17})$$

(f) cálculo das coordenadas planas (X'_k , Y'_k) do satélite, que definem sua posição no plano orbital

$$X'_k = r_k \cos u_k \quad (\text{A.18})$$

$$Y'_k = r_k \sin u_k \quad (\text{A.19})$$

(g) cálculo da longitude do nodo ascendente, corrigida das perturbações (λ_k)

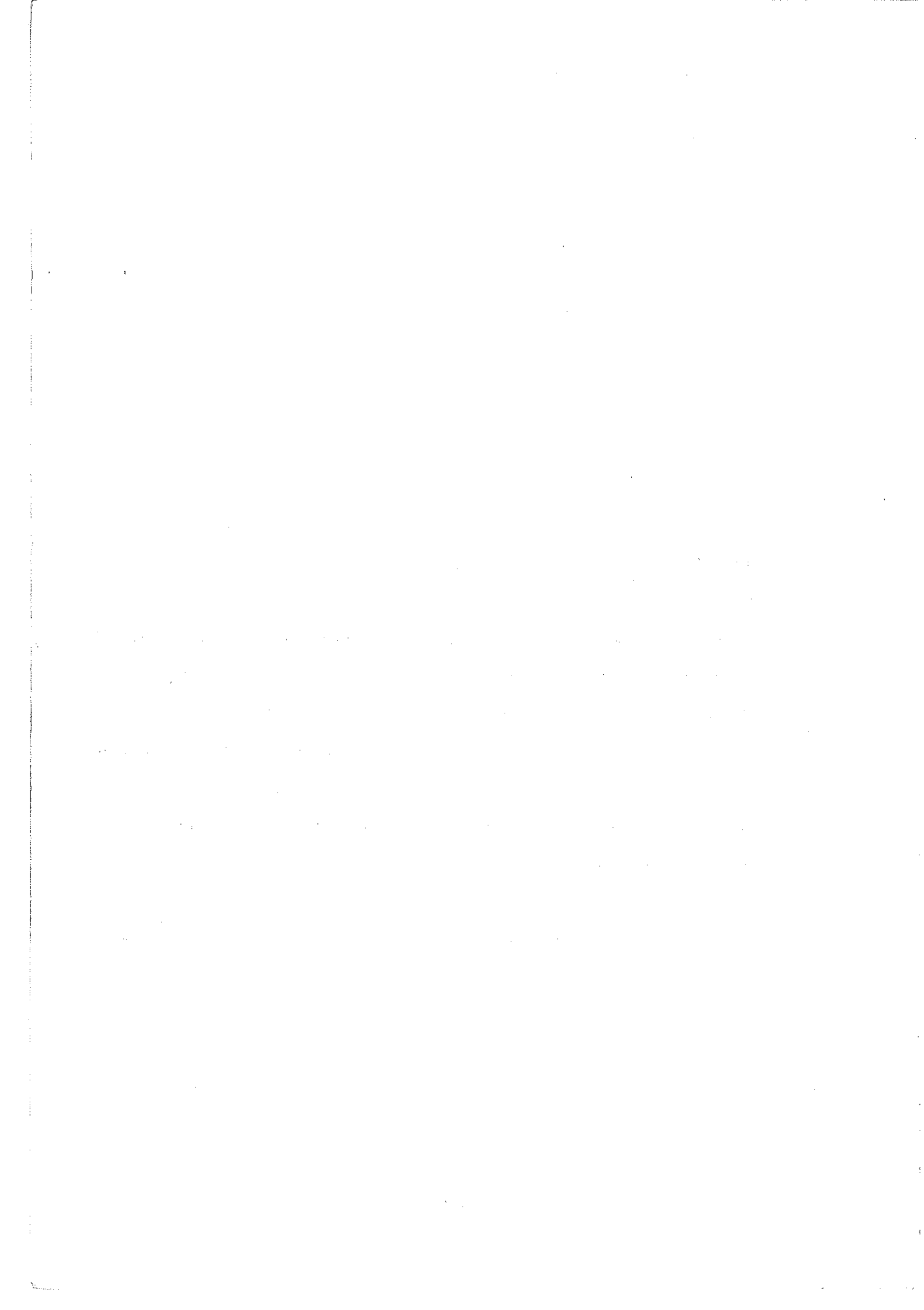
$$\lambda_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \omega_T) t_k - \omega_T t_{OE} \quad (\text{A.20})$$

(h) cálculo das coordenadas cartesianas do satélite no CTS

$$X_k = X'_k \cos \lambda_k - Y'_k \cos i_k \sin \lambda_k \quad (\text{A.21})$$

$$Y_k = Y'_k \sin \lambda_k - Y'_k \cos i_k \cos \lambda_k \quad (\text{A.22})$$

$$Z_k = Y'_k \sin i_k \quad (\text{A.23})$$



APENDICE B

PLANEJAMENTO DE UMA SEÇÃO DE OBSERVAÇÕES

A utilização do NAVSTAR/GPS requer a realização de um planejamento anterior à operação de rastreamento, principalmente até a implantação da constelação definitiva. Este planejamento envolve a escolha dos satélites que ofereçam a melhor geometria (menor DOP) e daqueles que não serão obstruídos por algum obstáculo durante o rastreamento. Esta escolha só será possível mediante prévio conhecimento da órbita dos satélites no período em que será realizado o rastreamento, informação esta contida no almanaque. O almanaque compõem uma das partes da Mensagem transmitida pelos satélites GPS. Um único satélite é capaz de informar o almanaque dos demais.

O programa básico que fornece tanto o ângulo de elevação acima do horizonte quanto o azimute dos satélites é chamado de ALERT. Este programa determina os dois elementos (elevação e azimute) a partir das coordenadas cartesianas dos satélites, calculadas em função das informações contidas no almanaque, para intervalos de tempo regulares, de 10 minutos por exemplo. Da Figura B.1, pode-se extrair que

$$E = \tan^{-1} \left[\frac{Z_K}{\sqrt{X_K^2 + Y_K^2}} \right] \quad (B.1)$$

$$Az = \tan^{-1} \left[\frac{X_K}{Y_K} \right] \quad (B.2)$$

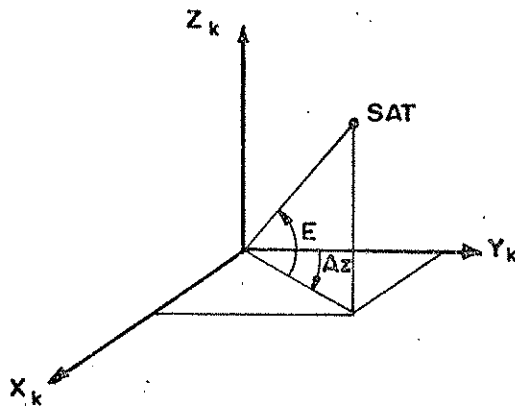


Figura B.1 - Ângulo de Elevação e Azimute de um Satélite

onde X_k , Y_k , Z_k são as coordenadas cartesianas do satélite. Para o cálculo do ALERT são ainda necessárias a posição aproximada da estação e a data em que será realizado o rastreamento.

Os dados contidos no ALERT permitem a construção de gráficos úteis ao planejamento e previsão da precisão dos resultados finais.

Definindo-se um ângulo mínimo de elevação para os satélites⁽¹⁴⁾, abaixo do qual não haverá rastreamento, podem ser construídos diversos gráficos, sendo os mais comuns o Gráfico Polar, o Gráfico de Disponibilidade e o Gráfico de Visibilidade.

O Gráfico Polar se constitui numa projeção

(14) Este ângulo de elevação mínimo, denominado de máscara de elevação ("elevation mask"), geralmente se situa entre 10° e 15° .

estereográfica no sistema de coordenadas horizontais, e possibilita a visualização da posição dos satélites em termos de azimute e elevação em relação a posição do rastreador, durante um período de 24 horas.

O Gráfico de Disponibilidade permite que sejam constatadas as "janelas" de observação, isto é, o período no qual um mínimo de 4 satélites estejam acima da máscara de elevação.

O Gráfico de Visibilidade mostra o período segundo o qual cada um dos satélites estará acima da referida máscara.

As páginas seguintes apresentam:

- um ALERT, para o dia 9 de março de 1989, para um rastreo em uma estação situada na cidade do Rio de Janeiro, cujas coordenadas aproximadas adotadas foram: $\phi = -23^{\circ}$ e $\lambda = -43^{\circ} 15'$.

- um Gráfico Polar referido ao ALERT apresentado. Tanto o ALERT quanto o Gráfico Polar foram calculados através do programa GPSMAP, da ASHTEC Inc., gentilmente cedido pela Georeferencial Ltda.

- um Gráfico de Disponibilidade, para a mesma data e local (aproximado) do rastreo da base geodésica CFN-João Lourinho;

- um Gráfico de Visibilidade, referente à mesma data e local.

Deve ser mencionado que os dois últimos gráficos foram obtidos a partir do almanaque do dia 6 de fevereiro de 1990, e foram apresentados com caráter meramente ilustrativo. As informações de um almanaque devem ser utilizadas para um período próximo à sua última atualização, estimando-se um período máximo de até dois meses, a partir do qual as órbitas reais estarão bastante distantes das preditas pelo almanaque.

Com respeito a escolha da localização da estação onde será efetuado o rastreamento, algumas considerações de ordem prática devem ser feitas.

O ponto para o qual a posição é realmente determinada é o centro elétrico da antena do receptor. Deste modo, a estação deve ser escolhida em um lugar no qual a visão do céu seja desobstruída, com um horizonte livre segundo a máscara de elevação definida. Como o sinal emitido pelo satélite GPS se propaga em linha reta, qualquer obstáculo que se interponha entre o satélite e a antena provocará perda de sintonia.

Deve-se também evitar estações próximas a superfícies que sejam capazes de refletir os sinais, tais como superfícies de água ou metálicas, telhados, terraços, pois existe a chance que os raios oriundos do satélite sejam refletidos pela superfície e recebidos junto com os sinais diretos (Figura B.2). Deve-se igualmente evitar estações próximas a antenas retransmissoras, linhas de transmissão, etc.

Estas considerações são válidas tanto para posicionamento estático quanto para posicionamento cinemático de um veículo em terra. Já para posicionamento cinemático de embarcações ou aeronaves, devido à característica destes posicionamentos, não deverão existir obstruções que eclipsam a recepção dos sinais. *pode acontecer obstrução devido a, e.g., manobras do avião em uma curva (o asa pode obstruir o sinal)*

Para finalizar, é oportuno enfatizar a importância que deve ser dada, durante o planejamento, ao reconhecimento das vias de acesso às estações, principalmente no caso de se desejar ocupar mais de uma estação (ou seção) por dia. Neste caso, o conhecimento

do tempo a ser gasto no deslocamento do receptor é de suma importância. Atenção também deve ser dada a fonte de energia (geradores, baterias) a ser empregada durante o rastreamento, de modo a se evitar uma possível interrupção do trabalho por falta de energia.

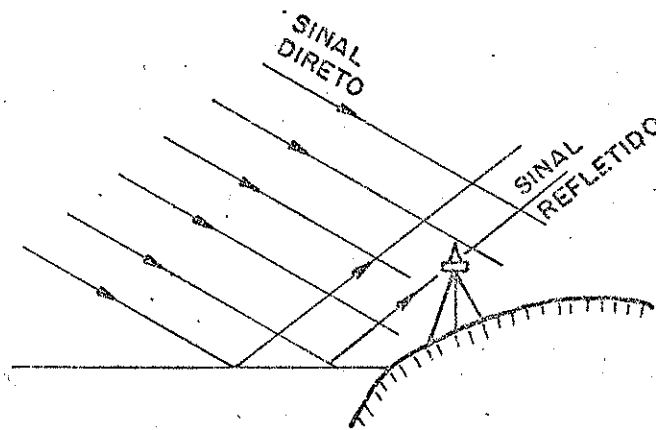


Figura B.2 - Sinais GPS refletidos e diretos

Table 1

Satellite visibility for (LAT: 523-4-0.00 LONG: 443-15-0.00 Alt: 0.000(m) RIO DE JANEIRO
 Date of Table: 9-MAR-89 (Day 68) Date of Almanac: 03/09/89

15°

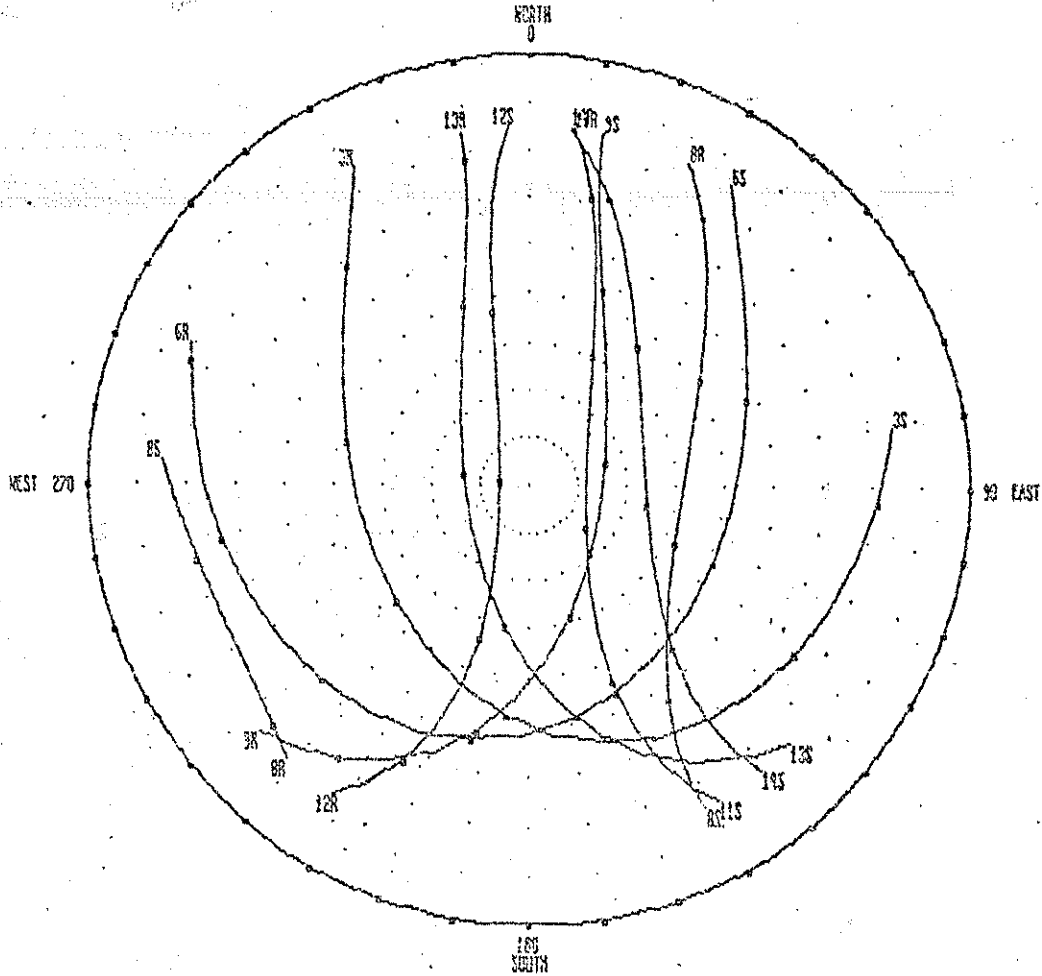
Cut off Angle:

UTC	m	Ref	478 EL AZ	478 EL AZ	478 EL AZ	478 EL AZ	478 EL AZ	478 EL AZ
0000	00	000						
0001	00	000						
0002	00	000						
0003	00	000						
0004	00	000						
0005	00	000						
0006	00	000						
0007	00	000						
0008	00	000						
0009	00	000						
0010	00	000						
0011	00	000						
0012	00	000						
0013	00	000						
0014	00	000						
0015	00	000						
0016	00	000						
0017	00	000						
0018	00	000						
0019	00	000						
0020	00	000						
0021	00	000						
0022	00	000						
0023	00	000						
0024	00	000						
0025	00	000						
0026	00	000						
0027	00	000						
0028	00	000						
0029	00	000						
0030	00	000						
0031	00	000						
0032	00	000						
0033	00	000						
0034	00	000						
0035	00	000						
0036	00	000						
0037	00	000						
0038	00	000						
0039	00	000						
0040	00	000						
0041	00	000						
0042	00	000						
0043	00	000						
0044	00	000						
0045	00	000						
0046	00	000						
0047	00	000						
0048	00	000						
0049	00	000						
0050	00	000						
0051	00	000						
0052	00	000						
0053	00	000						
0054	00	000						
0055	00	000						
0056	00	000						
0057	00	000						
0058	00	000						
0059	00	000						
0060	00	000						
0061	00	000						
0062	00	000						
0063	00	000						
0064	00	000						
0065	00	000						
0066	00	000						
0067	00	000						
0068	00	000						
0069	00	000						
0070	00	000						
0071	00	000						
0072	00	000						
0073	00	000						
0074	00	000						
0075	00	000						
0076	00	000						
0077	00	000						
0078	00	000						
0079	00	000						
0080	00	000						
0081	00	000						
0082	00	000						
0083	00	000						
0084	00	000						
0085	00	000						
0086	00	000						
0087	00	000						
0088	00	000						
0089	00	000						
0090	00	000						
0091	00	000						
0092	00	000						
0093	00	000						
0094	00	000						
0095	00	000						
0096	00	000						
0097	00	000						
0098	00	000						
0099	00	000						
0100	00	000						

GPS Satellite Polar Map

RIO DE JANEIRO
 Lat: 23 0' 0.00"
 Long: 43 15' 0.00"
 Alt: 0.00m
 Cut Off Angle: 15

Date and Times are UTC
 Start Date: 9-MAR-89(68)
 Start Time: 0 hrs 0 mins
 Calc Span: 24 hrs 0 mins
 Alm Ref Week: 478



SV	@ Azimuth	Rise Time	Set Time	@ Azimuth	Rise Time	Set Time
3	331	68:11:21	68:19:26			
6	293	68: 5:54	68:13:18			
8	221	68: 0:47	68: 2:35	26	68: 7:36	68:11:52
9	227	68: 9:29	68:15: 4			
11	7	68: 8:27	68:13:11			
12	212	68:11:26	68:16:16			
13	349	68: 9:47	68:15:16			
14	7	68:15:25	68:20:14			

POP5 3.31
 WH Satellite Survey Company
 Satellite availability

Page 3
 Tue 6 Feb 1990
 13:28

rio de janeiro Sat 26 May 1988 Cut-off angle 15x
 23x25' S 43x37' W .50 m All times GMT - 3

Sats																									Sats
10	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	10
8	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	8
6	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	6
4	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	4
2	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	2
0																									0
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

POPS 3.31
WH Satellite Survey Company
Satellite passes

Page 2
Tue 6 Feb 1990
13:27

rio de janeiro Sat 28 May 1988 Cut-off angle 15x
23x23' S 43x37' W 50 m All times GMT - 3

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Sat																										Sat
2																										2
3																										3
4																										4
6																										6
7																										7
8																										8
9																										9
11																										11
12																										12
13																										13
14																										14
16																										16
Sat																										Sat

