

WAGNER CARRUPT MACHADO

SOLUÇÃO RÁPIDA DAS AMBIGÜIDADES GPS PARA APLICAÇÕES NO
POSICIONAMENTO RELATIVO DE LINHAS DE BASE CURTAS

WAGNER CARRUPT MACHADO

SOLUÇÃO RÁPIDA DAS AMBIGÜIDADES GPS PARA APLICAÇÕES NO
POSICIONAMENTO RELATIVO DE BASES CURTAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Presidente Prudente, para obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas (Área de Concentração: Aquisição, análise e representação de informações espaciais)

Orientador: Prof. Dr. João Francisco Galera Monico

Presidente Prudente

2002

DADOS CURRICULARES
WAGNER CARRUPT MACHADO

NASCIMENTO	16.01.1974 - MOGI DAS CRUZES- SP
FILIAÇÃO	Oswaldo Machado Nehy Aparecida Carrupt Machado
1994/1998	Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - Unesp

*Aos meus pais, Oswaldo Machado e Nehy
Aparecida Carrupt Machado, irmãos, Luciana,
Marcelo e Oswaldo, e futura esposa, Prô querida*

Pelo constante apoio em todos os sentidos e de
forma incondicional.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de externar meus mais sinceros agradecimentos à CAPES, pelo apoio financeiro durante o desenvolvimento do projeto. Gostaria também de agradecer a Prof. Dra. Ana Maria Osório Araya Balan, por me iniciar na pesquisa científica. As pessoas que me ajudaram, de um jeito, ou de outro, no desenvolvimento desse projeto. Ao pessoal do Laboratório de Geodésia Espacial, que sempre escutou meus desabafos e abriu espaço para discussões, em especial ao Jardel Aparecido Fazan, que, além de tudo, me proporcionou apoio operacional e me ajudou bastante na fase final. Ao pessoal da Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, pelas conversas produtivas, em especial aos alunos Luiz Fernando Sapucci, André Luis Pereira de Castro, Ítalo Tsuchia, Daniel Rodrigues dos Santos e Kátia Cristina Lino de Oliveira. Ao pessoal do Laboratório de Mapeamento Móvel, em especial ao Rodrigo (Danone), por disponibilizar alguns arquivos de dados. Gostaria também de agradecer aos amigos Eugenio Ferreira Taira e ao Rodrigo (feio), por se disponibilizarem a me ajudar. Ao pessoal dos Renegados (1994-2001), pelos momentos de descontração. Aos meus queridos irmãos, Marcelo e Oswaldo, pelo apoio logístico no final, e à Luciana, por me direcionar para o mundo da cartografia. Por fim, gostaria de agradecer aos professores do Departamento de Cartografia e da Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Unesp por compartilharem o conhecimento por eles adquirido, em especial ao professor Paulo de Oliveira Camargo.

You can get it

If you really want.

Try, try and try...

Jimmy Cliff

RESUMO

O posicionamento com GPS no nível de precisão centimétrico é baseado na medida da fase de batimento da onda portadora. No entanto, esta observável é ambígua de um número inteiro de ciclos entre as antenas do satélite e do receptor no instante da primeira observação, denominado de ambigüidade GPS. Tais ambigüidades são introduzidas como parâmetros nas equações de observação e, devido à sua natureza inteira, não existe um método padrão para solucioná-las diretamente. Uma estratégia comumente utilizada é aplicar o método dos mínimos quadrados seqüencial condicionado juntamente com técnicas de busca. A resolução das ambigüidades pode ser dividida em duas etapas: a estimação e a validação. A estimação diz respeito ao cálculo do valor da ambigüidade. A validação é utilizada para inferir se a solução pode ser aceita ou não. Desde o final da década de 1980, até os dias de hoje, a solução da ambigüidade vem sendo um dos principais tópicos de pesquisa em posicionamento geodésico e vários métodos foram propostos. Atenção especial vem sendo dada à solução rápida das ambigüidades. Essa dissertação apresenta uma nova contribuição no desenvolvimento do software GPSeq, o qual é um software de processamento de dados GPS desenvolvido em meio acadêmico. Inicialmente, o software comportava apenas o processamento de dados coletados através de posicionamento relativo estático de linhas de base curtas. Durante o desenvolvimento de um projeto de iniciação científica (IC) financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), o método LAMBDA, para solução rápida das ambigüidades, foi implementado. Nessa contribuição, implementou-se o processo de Detecção, Identificação e Adaptação (DIA) local para a solução *float* das ambigüidades. Implementou-se também, um algoritmo que permite processar, tanto dados coletados através de posicionamento relativo estático, quanto cinemático, de bases curtas. Realizou-se, também, um estudo inicial a respeito da validação

da solução inteira das ambigüidades. Alguns experimentos e resultados mostraram que o software GPSeq é compatível no nível centimétrico com softwares comerciais. Além disso, os resultados mostram que, em casos limites, os testes ratio e a diferença entre a forma quadrática dos resíduos da segunda melhor e a melhor solução, utilizados para a validação da solução das ambigüidades, não proporcionaram resultados satisfatórios com as linhas de base processadas.

ABSTRACT

Centimeter level GPS positioning is based on the very precise carrier beat phase measurements. However, this observable is ambiguous by a number of whole cycles between the satellite and receiver antenna at the first epoch of data collecting, which is called the ambiguity. GPS ambiguities are introduced as parameters to be estimated in the observation equations. However, since they are integer numbers there is no standard techniques for solve them. One of the ways is to apply sequential conditional least-squares estimation together with integer search techniques. The ambiguity resolution can be divided in two steps: estimation and validation. The estimation is concerned with the computation of the ambiguities values. The validation step is used to infer if the estimated value can be accepted or not. From the last decade until nowadays ambiguity resolution has been one of the most important research topic in geodetic positioning and a several methods have been proposed. Special attention has been made about the fast ambiguity resolution. This project presents a new contribution to the GPSeq software implementation, which is a GPS data processing software developed in academic environment. Initially, the software was able to process data from static relative positioning for short baselines. During the development of a Scientific Initiation project supported by FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo), the LAMBDA method for rapid ambiguity resolution was implemented. In this contribution, local Detection Identification Adaptation (DIA) for float quality control and an algorithm for processing both, kinematic and static relative data, was implemented. An initial study about fixed ambiguity validation was also carried out. Some experiments are presented, whose results shown that the GPSeq solution is compatible on the centimeter level with commercial software. The results also shown an inefficiency of the ratio and the difference between the quadratic form of the residuals of the second best and best solution tests in validating the ambiguity resolution in time limits of solution of the baselines processed.

Conteúdo

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Descrição do problema	2
1.2 Objetivos	5
1.3 Justificativa	5
1.4 Conteúdo da dissertação	6
2 AJUSTAMENTO RECURSIVO E CONTROLE DE QUALIDADE	8
2.1 Estimação pelo Método dos Mínimos Quadrados	8
2.2 Filtro de Kalman para sistemas lineares	11
2.2.1 Predição ou ciclo de propagação	13
2.2.2 Filtragem ou ciclo de atualização	14
2.3 Filtro de Kalman para sistemas não lineares	15
2.3.1 Predição ou ciclo de propagação	16
2.3.2 Filtragem ou ciclo de atualização	17
2.4 Controle de qualidade	18
2.4.1 Teste de hipótese	19
2.4.2 Detecção	19
2.4.3 Identificação	21
2.4.4 Relação entre o nível de significância dos testes de detecção e identificação	24
2.4.5 Adaptação	24
3 MODELOS UTILIZADOS NO POSICIONAMENTO COM NAVSTAR-GPS.....	26
3.1 Equações de observação	26
3.1.1 Pseudodistância	27
3.1.2 Fase de batimento da onda portadora	28

3.1.3 Erros sistemáticos que degradam a precisão do posicionamento	
com GPS	28
3.1.3.1 Erros orbitais	30
3.1.3.2 Erro do relógio do satélite	33
3.1.3.3 Ionosfera	34
3.1.3.4 Troposfera	36
3.1.3.5 Multicaminhamento	37
3.1.3.6 Perdas de ciclos	39
3.1.3.7 Erro do relógio do receptor	42
3.1.3.8 Coordenadas da estação	43
3.1.4 Duplas diferenças	43
3.2 Modelo estocástico	46
3.3 Posicionamento relativo	47
3.3.1 Posicionamento relativo estático	49
3.3.2 Posicionamento relativo cinemático	51
3.4 Diluição da precisão	53
4 SOLUÇÃO DA AMBIGÜIDADE E CONTROLE DE QUALIDADE	55
4.1 Estimação	56
4.1.1 Solução <i>float</i>	57
4.1.2 Solução das DD de ambigüidade	57
4.1.2.1 Espaço de procura	59
4.1.3 Métodos de solução da ambigüidade	62
4.1.3.1 Método Seqüencial	64
4.1.3.2 Método da Troca de Antena	64
4.1.3.3 Combinações lineares entre as portadoras	66
4.1.3.4 Método de Euler/Landau	66

4.1.3.5 Método FARA	67
4.1.3.6 Método LAMBDA	68
4.1.3.7 <i>Whitening Filter</i>	71
4.1.4 Solução <i>fixed</i>	72
4.2 Validação	72
5 IMPLEMENTAÇÃO: ASPECTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS	76
5.1 Dados de entrada	77
5.2 Modelos matemáticos e estratégias adotados	77
5.2.1 Modelo funcional e estocástico	78
5.2.2 Cálculo das coordenadas dos satélites	79
5.2.2.1 Rotação da Terra	83
5.2.3 Estimação recursiva e controle de qualidade	84
5.2.4 Solução <i>fixed</i>	87
6 EXPERIMENTOS: COLETA DE DADOS, PROCESSAMENTO E ANÁLISE	92
6.1 Softwares comerciais utilizados	93
6.1.1 <i>GPSurvey</i>	93
6.1.2 <i>Reliance 3.13</i>	94
6.2 Experimentos realizados	95
6.2.1 Posicionamento relativo estático	95
6.2.2 Posicionamento relativo cinemático	107
7 COMENTÁRIOS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	118
7.1 Comentários e Conclusões	118
7.2 Recomendações	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Três tipos de estimação	10
FIGURA 3.1 - Comportamento da fase de batimento da onda portadora na ausência e presença perdas de ciclos	40
FIGURA 3.2 - Comportamento da Simple Diferença da fase de batimento da onda portadora na presença e ausência perdas de ciclos	41
FIGURA 3.3 - Comportamento da Dupla Diferença e Tripla Diferença da fase de batimento da onda portadora com perdas de ciclos	41
FIGURA 3.4 - Dupla diferença entre satélites e receptores	44
FIGURA 4.1 - Espectro do desvio-padrão das DD de ambigüidades condicionadas (Fonte: TEUNISSEN, 1998b)	61
FIGURA 4.2 - Número de candidatas por número de bordas seqüenciais (Fonte: TEUNISSEN, 1998b)	62
FIGURA 4.3 - Troca de antena (Fonte: MONICO, 2000)	65
FIGURA 5.1 - Discrepâncias nas coordenadas X,Y e Z para as soluções <i>float</i> e <i>fixed</i> (estático)	89
FIGURA 5.2 - Discrepâncias nas coordenadas X,Y e Z para as soluções <i>float</i> e <i>fixed</i> (cinemático)	90
FIGURA 5.3 - Fluxograma do software GPSeq	91
FIGURA 6.1 - Comprimento das linhas de base (estático)	96
FIGURA 6.2 - Número de satélites observados em cada linha de base (estático).....	96

FIGURA 6.3 - ADOP (estático)	97
FIGURA 6.4 - Intervalos de tempo para solução das DD das ambigüidades no GPSeq com modelo estático e GPSeq com modelo cinemático	98
FIGURA 6.5 - Estatística GOM (estático)	99
FIGURA 6.6 - Diferenças das coordenadas (estático)	100
FIGURA 6.7 - Estatística ratio (estático)	102
FIGURA 6.8 - Comportamento da estatística ratio (estático com modelo dinâmico para estático)	103
FIGURA 6.9 - Comportamento da estatística ratio (estático com modelo dinâmico para cinemático)	104
FIGURA 6.10 - Estatística $\Delta\Omega$ (estático)	105
FIGURA 6.11 - Comportamento da estatística $\Delta\Omega$ (estático com modelo dinâmico para estático)	106
FIGURA 6.12 - Comportamento da estatística $\Delta\Omega$ (estático com modelo dinâmico para cinemático)	107
FIGURA 6.13 - Comprimento médio das linhas de base (cinemático)	108
FIGURA 6.14 - Número de satélites observados em cada linha de base (cinemático)	109
FIGURA 6.15 - ADOP (cinemático)	110
FIGURA 6.16 - Intervalos de tempo mínimo para solução das DD de ambigüidades no GPSeq	111
FIGURA 6.17 - Estatística GOM (cinemático)	112

FIGURA 6.18 - Diferenças das coordenadas (cinemático)	113
FIGURA 6.19 - Estatística ratio (cinemático)	114
FIGURA 6.20 - Comportamento da estatística ratio (cinemático)	115
FIGURA 6.21 - Estatística $\Delta\Omega$ (cinemático)	116
FIGURA 6.22 - Comportamento da estatística $\Delta\Omega$ (cinemático)	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Número de artigos sobre solução das ambigüidades GPS.....	4
Tabela 2.1 - Possíveis eventos no ato de testar	19
Tabela 3.1 - Erros sistemáticos do NAVSTAR-GPS que afetam a precisão do posicionamento	29
Tabela 3.2 - Comparação entre as efemérides transmitidas, IGU, IGR e IGS	32
Tabela 5.1 - Arquivo de entrada do software GPSeq	77
Tabela 6.1 - Módulos e funções do GPSurvey	93

1 INTRODUÇÃO

Dentre os sistemas de posicionamento geodésicos atualmente disponíveis, tais como o VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), o SLR (*Satellite Laser Range*), o LLR (*Lunar Laser Range*), o DORIS (*Doppler Orbitograph and Radio Positioning Integrated by Satellite*), o PRARE (*Precise Range And Rate Experiment*), o NAVSTAR GPS (*NAVigation System with Time and Ranging Global Positioning System*) se destaca devido à precisão, facilidade e baixo custo, resultantes de sua utilização. O GLONASS (*Global Navigation Satellite System*), sistema de posicionamento russo muito similar ao GPS, após tornar-se operacional nos anos de 1990, despertou o interesse da comunidade científica no sentido de ser integrado com o GPS. No entanto, esse sistema não recebeu a devida manutenção e, nos dias de hoje (12/2001), sua constelação, que deveria ser de vinte e quatro satélites, se encontra com apenas nove, sendo que três destes satélites foram lançados no início de Dezembro de 2001.

O posicionamento com GPS pode ser efetuado a partir de observações da fase de batimento da onda portadora e da pseudodistância obtida a partir da correlação dos códigos. Tendo em vista que a precisão com que os receptores realizam a medida da fase de batimento da onda portadora ser da ordem do milímetro, esta observável torna-se indispensável na realização de posicionamentos que requeiram alta precisão (MONICO, 1996).

O modelo matemático que envolve a fase de batimento da onda portadora, além das coordenadas da estação de interesse, possui as ambigüidades como incógnitas, que por serem números inteiros, requerem procedimentos não convencionais de otimização no seu processo de estimação.

1.1 Descrição do problema

Quando um receptor GPS é ligado, ele calcula a diferença entre a fase emitida pelo satélite e sua réplica gerada no receptor, resultando em uma medida fracionária (ϕ_i), e um contador de ciclos inteiros é iniciado. Durante o rastreamento, o contador é incrementado por um ciclo sempre que a fase fracionária muda de 2π para 0. Assim, em uma determinada época, a fase instantânea acumulada ϕ é a soma da medida fracionária da fase com um determinado número de ciclos inteiros (LEICK, 1995).

As coordenadas do centro de fase da antena do receptor estão em função da distância geométrica entre o centro de fase das antenas do receptor e do satélite. Portanto, quando a medida da fase de batimento da onda portadora é utilizada como observável, torna-se necessário determinar o número de ciclos inteiros envolvidos entre os centros de fase, no instante da primeira medida. Esse número é denominado ambigüidade GPS, o qual permanece constante, caso não ocorra obstrução do sinal (LEICK, 1995).

A precisão com que os receptores realizam as medidas da fase de batimento da onda portadora está relacionada com o comprimento de onda dos sinais emitidos pelos satélites, os quais são emitidos a partir de frequências conhecidas, sendo de 1575,42 MHz para a L1 e 1227,60 MHz para a L2. Portanto, o comprimento de onda para a L1 e L2 são de aproximadamente 19,04 cm e 24,43 cm, respectivamente (MONICO, 2000).

Devido ao fato dos sinais GPS sofrerem a influência de várias fontes de erros, tais como a refração troposférica e ionosférica, estimar as

ambigüidades, utilizando a fase de batimento da onda portadora, torna-se impraticável. Para contornar esta situação, faz-se uso de posicionamentos relativos. O posicionamento relativo em linhas de base curtas tem sido extensivamente utilizado para se obter posicionamento preciso. Neste trabalho, faz-se uso do processo de diferenciação, mediante a utilização das Duplas Diferenças (DD), onde os erros comuns nas duas estações envolvidas são reduzidos e as DD das ambigüidades são estimadas juntamente com as componentes da base (ΔX , ΔY e ΔZ).

Em curtos intervalos de tempo de aquisição de dados, a estimativa *float* da dupla diferença de ambigüidade apresenta baixa precisão e forte correlação, inclusive com as componentes da base, o que dificulta sua solução. A correlação é reduzida quando a geometria dos satélites se altera consideravelmente. Mas isso demanda um longo intervalo de tempo de coleta de dados, tendo em vista que os satélites orbitam com velocidade aproximada de 4 km/s, à aproximadamente 22.000 km de altitude. Dessa forma, é de grande importância a solução da ambigüidade logo no início do levantamento. Isso reduz o tempo de ocupação e aumenta a produtividade para algumas aplicações práticas, o que significa redução nos custos.

Devido à natureza inteira das DD das ambigüidades, o seu processo de estimação não é o comumente utilizado em outras ciências. Dentre os métodos de solução existentes, destaca-se o ajustamento seqüencial condicionado associado a métodos de procura discreta (TEUNISSEN, 1998b).

A solução das ambigüidades é a chave para obtenção de posicionamento de alta precisão com o NAVSTAR-GPS, a custos reduzidos.

Neste contexto, o controle de qualidade da solução, realizado com base em testes estatísticos, é um assunto de fundamental importância. De modo que, se as ambigüidades forem injuncionadas com valores incorretos, o posicionamento passa a ter baixa acurácia, embora, em certos casos, possa expressar boa precisão.

Visando reduzir o intervalo de tempo de coleta de dados e dar suporte às aplicações cinemáticas que necessitam de precisão centimétrica, a solução rápida das ambigüidades GPS tornou-se um dos principais tópicos de pesquisa, despertando o interesse, tanto científico, quanto comercial. Um relatório publicado em 2000 pelo *Special Study Group* (SSG) 1.157, um grupo de estudo pertencente à *International Association of Geodesy* (IAG) que se ocupa com a pesquisa sobre a solução e validação das ambigüidades GPS, mostrou que o número de publicações sobre esse tópico vem aumentando com o decorrer dos anos. A Tabela 1.1 mostra o número de artigos cadastrados pela IAG, bem como o período das publicações (KIM & LANGLEY, 2000).

Tabela 1.1 - Número de artigos sobre solução das ambigüidades GPS

Período (anos)	Número de artigos
1981-1984	1
1985-1989	24
1990-1994	123
1995-1999	177
Total	325

(Fonte: KIM & LANGLEY, 2000)

No contexto deste trabalho, implementou-se, suplementarmente, o desenvolvimento de um software para processamento de dados GPS. Inicialmente, o modelo matemático utilizado atendia apenas a posicionamentos relativo estático de linhas de base curtas (MONICO, 1992). Durante o

desenvolvimento do projeto de Iniciação Científica financiado pela FAPESP (processo-97/02298-2), cujo título: "Solução rápida das ambigüidades GPS para posicionamento estático de bases curtas", o método OTF LAMBDA (*Least squares AMBiguity Decorrelation Adjustment*) foi implementado no software, reduzindo consideravelmente o intervalo de tempo para a resolução das DD das ambigüidades (MACHADO, 1998). A próxima etapa, visando ampliar a capacidade do software, abrange a implementação de um modelo matemático que atenda também o posicionamento relativo cinemático.

1.2 Objetivos

Os objetivos desta dissertação de mestrado são: contribuir com o desenvolvimento do software GPSeq, no que diz respeito à solução da ambigüidade e sua validação; contribuir com o desenvolvimento de um software nacional, eficiente e confiável; definir e implementar uma estratégia de processamento de dados GPS provenientes de levantamentos que utilizam a técnica de posicionamento relativo estático e cinemático para bases curtas.

1.3 Justificativa

A estimação rápida dos valores das ambigüidades GPS é de fundamental importância em posicionamentos que requeiram alta precisão, tendo em vista que após as ambigüidades serem solucionadas, as pseudodistâncias obtidas a partir da fase de batimento da onda portadora passam a ter, por causa do baixo nível de ruído, precisão de ordem milimétrica. Solucionar as ambigüidades rapidamente tem como consequência o aumento da produtividade, uma vez que o

intervalo de tempo de rastreamento pode ser drasticamente reduzido, quer seja no posicionamento estático, quer seja no posicionamento cinemático.

Por ser um dos tópicos de pesquisa em posicionamento por satélite que, com o decorrer dos anos, vem despertando interesse, tanto de pesquisadores, quanto de empresários, o presente trabalho refere-se ao acompanhamento tecnológico mundial, visando colocar um produto nacional eficiente e confiável para a comunidade geodésica local.

O assunto em pauta é de considerável relevância, não apenas em nível nacional, mas também no internacional, pois trata de um dos principais problemas no que diz respeito ao posicionamento relativo cinemático com precisão centimétrica.

1.4 Conteúdo da dissertação

A presente dissertação foi organizada em sete capítulos, cujos principais conteúdos seguem elencados.

O Capítulo 1 introduz o problema, os objetivos e as justificativas do trabalho.

No Capítulo 2, apresenta-se a teoria da estimação de parâmetros pelo filtro de Kalman para sistemas lineares e não-lineares, bem como o controle de qualidade pelo processo DIA.

No Capítulo 3, apresenta-se os modelos matemáticos, funcional e estocástico, envolvidos na estimação de coordenadas com NAVSTAR-GPS. Inicialmente, apresenta-se as equações de observação da pseudodistância e da fase de batimento da onda portadora e os erros envolvidos. Apresenta-se, também, as

equações de observação das DD, o modelo estocástico e os modelos utilizados no posicionamento relativo estático e cinemático.

No Capítulo 4, apresenta-se os modelos matemáticos envolvidos na estimação das DD de ambigüidades *float* e *fixed*, bem como alguns métodos de solução existentes. Por fim, discorre-se acerca da teoria para validação da solução *fixed*.

No Capítulo 5, discute-se acerca dos aspectos de implementação dos modelos matemáticos adotados no software GPSeq.

O Capítulo 6 mostra os experimentos, resultados e análises. Inicialmente, faz-se uma breve descrição de alguns softwares comerciais utilizados nos experimentos. Descreve-se também, os experimentos realizados e resultados obtidos, incluindo a configuração da coleta de dados.

No Capítulo 7, apresenta-se os comentários finais, conclusões e recomendações, onde se realiza comentários a respeito do que foi desenvolvido durante o decorrer da pesquisa. Apresenta-se, também, as conclusões referentes aos experimentos realizados e se faz algumas recomendações para futuros trabalhos.

2 AJUSTAMENTO RECURSIVO E CONTROLE DE QUALIDADE

O posicionamento com o NAVSTAR-GPS é baseado na medida de distâncias e/ou frações de ciclos entre as antenas dos satélites e as antenas dos receptores. Os parâmetros de maior interesse a serem estimados no ajustamento são as coordenadas cartesianas tridimensionais (X, Y, Z) dos pontos de interesse. Todavia, pode-se estimar, também, o estado do relógio do receptor e/ou dos satélites, ambigüidades e refrações ionosféricas e/ou troposféricas.

O processo de cálculo de parâmetros pode ser dividido em duas partes: a estimação, que visa determinar o valor numérico dos parâmetros e de sua qualidade, e o controle de qualidade, que tem por finalidade verificar a consistência entre o modelo matemático e as observações.

Este capítulo aborda, inicialmente, o processo de estimação de parâmetros pelo Filtro de Kalman, o qual está fundamentado no Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Por fim, apresenta-se o controle de qualidade do Filtro de Kalman através de um processo de Detecção, Identificação e Adaptação (DIA), o qual faz uso de testes estatísticos.

2.1 Estimação pelo Método dos Mínimos Quadrados

O marco inicial da teoria da estimação se deu por volta de 1800, com a teoria de Gauss e Legendre. Eles, trabalhando independentemente e simultaneamente, publicaram os fundamentos do MMQ determinístico. Tais fundamentos foram sendo generalizados e expandidos ao longo dos anos, dando origem ao método recursivo. Além disso, passou-se a considerar a probabilidade das variáveis. Na atualidade, pode-se utilizar o princípio do MMQ para estimação

recursiva de parâmetros que variam com o tempo, modelados por um sistema dinâmico. Um breve histórico sobre a teoria da estimação pode ser encontrado em (CAMARGO, 1992) e (GELB *et al*, 1996).

O sistema matricial dado pela equação (2.1), representa o modelo linearizado, onde m observações estão relacionadas com u parâmetros a serem estimados (GEMAEL, 1994):

$$l = Ax + v \quad (2.1)$$

onde:

- l - vetor de ordem $(m \times 1)$ das observações subtraído das observações calculadas em função dos parâmetros aproximados;
- A - matriz de coeficientes de ordem $(m \times u)$;
- x - vetor de ordem $(u \times 1)$ das correções aos parâmetros aproximados;
- v - vetor de ordem $(m \times 1)$ dos resíduos.

De acordo com a teoria do MMQ, a solução desejada da equação (2.1) deve conduzir à parâmetros estimados, $\hat{x}$, que minimizem a soma do quadrado dos resíduos, ou seja:

$$J = \min_{\hat{x} \in R^u} (l - A\hat{x})^T (l - A\hat{x}) \quad (2.2)$$

A condição necessária de primeira ordem para a minimização é:

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{x}} = 0 \quad (2.3)$$

Aplicando-se a condição dada pela equação (2.3) na equação (2.2), chega-se a:

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} (A^T l) \quad (2.4)$$

onde:

- $\hat{x}$ - é o vetor de ordem $(u \times 1)$ dos parâmetros ajustados (estimados).

Ao se considerar a variação temporal dos parâmetros, existem três possibilidades de estimativa, sendo elas (GELB *et al*, 1996):

- Suavização - quando o instante da estimativa é anterior ao instante da última medida;
- Filtragem - quando os instantes da estimativa e da última medida se coincidem;
- Predição - quando o instante da estimativa é posterior ao da última medida.

Uma ilustração das três possibilidades de estimação pode ser vista na Figura 2.1.

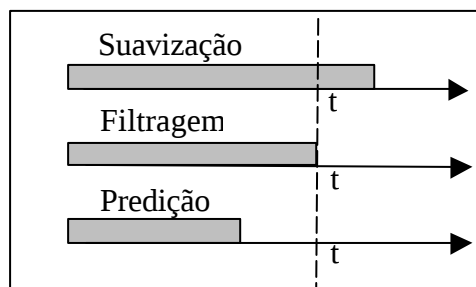


FIGURA 2.1 - Três tipos de estimação

onde:

- t - representa o instante da estimativa;
- - representa o período das medidas disponíveis.

Como visto na equação 2.4, o processo de estimação de parâmetros através do MMQ envolve operações de matrizes, as quais são

dimensionadas em função do número das observações e dos parâmetros a serem estimados. Quando o número de observações for elevado, como no caso do posicionamento com NAVSTAR-GPS, a utilização desse método torna-se indesejável se as observações forem consideradas simultaneamente no processo. No entanto, o advento da estimação recursiva, introduzida por Kalman em 1960, tornou-se uma opção atraente, sendo empregada nesse projeto. A seguir, apresenta-se a estimação de parâmetros através do Filtro de Kalman.

2.2 Filtro de Kalman para sistemas lineares

O Filtro de Kalman é um método de estimação recursivo, pois trabalha com as últimas estimativas e medidas mais recentes, não havendo necessidade de se armazenar todas as informações recebidas; e ótimo, porque fornece uma estimativa com variância mínima. A estimação é uma combinação de predição e filtragem, sendo constituído pelo modelo dinâmico e pelo modelo de medidas (CAMARGO, 1992).

Tendo em vista que o modelo dinâmico pode ser discreto ou contínuo, bem como o modelo de observação, o filtro de Kalman pode ser formulado para o caso discreto/discreto, contínuo/contínuo e contínuo/discreto. Como a proposta desta dissertação é utilizar o Filtro de Kalman para estimar coordenadas (X, Y, Z) a partir das medidas das observáveis NAVSTAR-GPS, que são realizadas em épocas de tempo discreto, apenas o caso discreto/discreto será abordado. Detalhes sobre os outros casos podem ser encontrados em (GELB *et al*, 1996).

O modelo dinâmico para o caso discreto é dado por:

$$x_{k/k} = \Phi_{k/k-1} x_{k-1} + w_{k/k} \quad (2.5)$$

onde:

- $x_{k/k}$ - vetor de estado da época k de ordem $(u \times 1)$;
- $\Phi_{k/k-1}$ - matriz de transição de estado linear da época $k-1$ para a época k de ordem $(u \times u)$;
- $w_{k/k}$ - vetor das correções ao sistema dinâmico de ordem $(u \times 1)$, $w_{k/k} \sim N(0, Qw_{k/k})$.

A matriz de transição da equação (2.5) apresenta as seguintes propriedades (KALMAN, 1960 *apud* CAMARGO, 1992):

$$\Phi_{k/k} = I \quad (2.6)$$

$$\Phi_{k/k-1} \Phi_{k+1/k} = \Phi_{k+1/k-1} \quad (2.7)$$

$$\Phi_{k-1/k}^{-1} = \Phi_{k/k-1} \quad (2.8)$$

Quando os parâmetros a serem estimados não forem dependentes do tempo, que é o caso das ambigüidades GPS, a matriz de transição atenderá a primeira propriedade (Eq. 2.6).

O modelo de observação para a época k pode ser escrito como:

$$l_k = A_k x_{k/k} + v_k \quad (2.9)$$

Salienta-se que a diferença entre as equações (2.1) e (2.9) está no fato dessa última considerar que os parâmetros a serem estimados variam com o tempo.

2.2.1 Predição ou ciclo de propagação

Na predição, as observações da época atual ainda não são consideradas, apenas o modelo dinâmico é utilizado. O vetor de estado predito é dado por (GELB *et al*, 1996):

$$\hat{x}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} \hat{x}_{k-1/k-1} \quad (2.10)$$

A Matriz Variância-Covariância (MVC) dos parâmetros preditos é calculada através de (GELB *et al*, 1996):

$$Q\hat{x}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} Q\hat{x}_{k-1/k-1} \Phi_{k/k-1}^T + Qw_k \quad (2.11)$$

onde:

- $Q\hat{x}_{k-1/k-1}$ - é a MVC do vetor de estado atualizado da época $k-1$
- Qw_k - é a MVC do vetor das correções ao sistema dinâmico;

A partir da equação (2.10), obtém-se a melhor estimativa até a época k , sem a introdução das observações da época atual, uma vez que são consideradas apenas as informações anteriores.

Como pode ser visto a partir das equações (2.10) e (2.11), para executar o Filtro de Kalman é necessário dispor do vetor de estado e respectiva MVC da época anterior. No início do processo, tais quantidades podem ser calculadas através do MMQ na forma de lote. Neste caso, apenas as observações da primeira época podem ser consideradas no cálculo.

2.2.2 Filtragem ou ciclo de atualização

A filtragem utiliza informações de todas as épocas processadas até a época atual, incluindo as informações da predição. É, portanto, a melhor estimativa da época k . O vetor de estado atualizado é dado por (GELB *et al*, 1996):

$$\hat{x}_{k/k} = \hat{x}_{k/k-1} + K_{k/k} (l_k - A_k \hat{x}_{k/k-1}) \quad (2.12)$$

A MVC dos parâmetros filtrados pode ser escrita como:

$$Q\hat{x}_{k/k} = (I - K_{k/k}A_k)Q\hat{x}_{k/k-1} \quad (2.13)$$

onde:

– I - é a matriz identidade de ordem $(u \times u)$.

A matriz $K_{k/k}$ é conhecida como matriz ganho de Kalman, a qual leva a uma estimativa ótima, sendo escrita como (GELB *et al*, 1996):

$$K_{k/k} = Q\hat{x}_{k/k-1}A_k^T (A_k Q\hat{x}_{k/k-1}A_k^T + Qlb_k)^{-1} \quad (2.14)$$

onde:

– Qlb - é a MVC das observações.

A diferença entre o vetor das observações atuais e o vetor das observações preditas é denominada de resíduo predito, o qual pode ser escrito como (TEUNISSEN, 1990):

$$\underline{v}_k = l_k - A_k \hat{x}_{k/k-1} \quad (2.15)$$

A MVC dos resíduos preditos é calculada através da seguinte equação (TEUNISSEN, 1990):

$$Q_{\underline{v}_k} = Qlb_k + A_k Q\hat{x}_{k/k-1}A_k^T \quad (2.16)$$

Os resíduos preditos e sua respectiva MVC podem ser utilizados no processo de controle de qualidade recursivo.

Quando o número de observações da época atual é menor que o número de parâmetros, a matriz $K_{k/k}$ pode ser escrita em função da MVC dos resíduos preditos, neste caso tem-se (MONICO, 2000):

$$K_{k/k} = Q\hat{x}_{k/k-1}A_k^T + (Qv_k)^{-1} \quad (2.17)$$

2.3 Filtro de Kalman para sistemas não lineares

Na seção anterior, apresentou-se o Filtro de Kalman para sistemas lineares. Porém, devido a não linearidade do modelo matemático utilizado no posicionamento com NAVSTAR-GPS, torna-se necessário abordar o Filtro de Kalman para sistemas não lineares. Neste caso, o filtro é classificado como linearizado, quando se conhece a trajetória nominal dos parâmetros, e estendido, quando não se conhece a trajetória (CAMARGO, 1992). Como no posicionamento com NAVSTAR-GPS a trajetória é desconhecida, apenas o caso estendido será visto.

O modelo dinâmico e modelo de medida para o caso não linear podem ser escritos como (GELB *et al*, 1996):

$$x_{k/k} = \Theta_{k/k-1}x_{k-1/k-1} + w_k \quad (2.18)$$

$$l_k = A_k x_{k/k} + v_k \quad (2.19)$$

onde:

- $\Theta_{k/k-1}$ - é uma matriz de ordem $(u \times u)$ de transição de estado não linear;

- A_k - é a matriz de coeficientes de ordem $(m \times u)$, tendo como elementos as derivadas da equação de observação com relação aos parâmetros. Os demais elementos já foram definidos para os casos lineares.

Linearizando-se as equações (2.18) e (2.19) pela série de Taylor nos pontos $\hat{x}_{k-1}$ e $\hat{x}_{k/k}$, obtém-se:

$$\hat{x}_{k/k} = x_{k/k-1}^0 + \Theta_{k/k-1}(x_{k-1/k-1} - \hat{x}_{k-1/k-1}) + w_k \quad (2.20)$$

$$l_k = l_{0k} + A_k(x_{k/k} - \hat{x}_{k/k}) + v_k \quad (2.21)$$

onde:

$$- \quad x_{k/k-1}^0 = f_{k/k-1}(\hat{x}_{k-1/k-1})$$

$$- \quad \Theta_{k/k-1} = \left. \frac{\partial f_{k/k-1}(x_{k-1/k-1})}{\partial x_{k-1/k-1}} \right|_{x_{k-1/k-1} = \hat{x}_{k-1/k-1}}$$

$$- \quad l_{0k} = g_k(\hat{x}_{k/k})$$

2.3.1 Predição ou ciclo de propagação

Como a trajetória nominal do corpo é desconhecida, emprega-se a estimativa da época anterior no cálculo da estimativa predita e filtrada. O vetor de estado propagado pode ser escrito como sendo (CAMARGO, 1992):

$$\hat{x}_{k/k-1} = x_{k/k-1}^0 \quad (2.22)$$

A MVC dos parâmetros preditos é calculada através de (CAMARGO, 1992):

$$Q\hat{x}_{k/k-1} = \Theta_{k/k-1} Q\hat{x}_{k-1/k-1} \Theta_{k/k-1}^T + Qw_k \quad (2.23)$$

2.3.2 Filtragem ou ciclo de atualização

A filtragem para o caso não linear é realizada de maneira similar ao caso linear, porém, devido à não linearidade, é necessário realizar iterações. O vetor de estado atualizado é calculado iterativamente através da expressão:

$$\hat{x}_{it+1,k} = \hat{x}_{it,k} + K_{it,k} \left[(lb - l_{0it,k}) - A_{it,k} (\hat{x}_{k/k-1} - \hat{x}_{it,k}) \right] \quad (2.24)$$

onde:

- $\hat{x}_{it+1,k}$ - vetor dos parâmetros da iteração it ;
- it - contador das iterações.

A iteração é interrompida quando uma tolerância seja atendida. Esse procedimento é realizado através de um teste de convergência, onde a diferença entre o vetor dos parâmetros da iteração atual e o da época anterior ($\hat{x}_{it,k} - \hat{x}_{it+1,k}$) é analisada.

A matriz ganho de Kalman também é calculada iterativamente através de:

$$K_k = Q \hat{x}_{k/k-1} A_{it,k}^T (A_{it,k} Q \hat{x}_{k/k-1} A_{it,k}^T + Q l b_k)^{-1} \quad (2.25)$$

Após a convergência, calcula-se a MVC dos parâmetros filtrados através de:

$$Q \hat{x}_{k/k} = (I - K_k A_k) Q \hat{x}_{k/k-1} \quad (2.26)$$

Em seguida, o mesmo procedimento é utilizado para estimar o vetor de estado predito e filtrado, bem como suas MVCs, para as épocas subsequentes.

Salienta-se que alguns métodos de fatorização, como o *Square Root Information Filter* (SRIF), podem ser aplicados no Filtro de Kalman, os quais são detalhadamente discutidos em BIERMAN (1977).

2.4 Controle de qualidade

Devido à complexidade da realidade física, os modelos matemáticos não são elaborados de maneira a representá-la com total fidelidade. Desta forma, se ocorrerem discrepâncias relevantes entre o modelo matemático e as observações, os resultados da estimação serão de boa acuracidade.

Assumindo-se que o modelo matemático esteja adequado a um suposto problema, como no caso do NAVSTAR-GPS, o controle de qualidade visa verificar o quanto as observações estão consistentes com tal modelo, bem como indicar sobre a presença de erros para que o mesmo seja adaptado (TIBERIUS, 1998).

Sendo assim, o controle de qualidade pode ser executado em 3 etapas, sendo elas: detecção, identificação e adaptação, constituindo o processo conhecido como DIA. No passo de detecção, testa-se o modelo de observação de maneira global, verificando a presença de erros no conjunto de observações. O passo de identificação tem por objetivo localizar a possível fonte de erro responsável pela rejeição do teste global, sendo executado por observação, individualmente. No passo adaptação, o modelo de observação é adaptado, de forma a eliminar a influência dos erros identificados, possibilitando a estimação ótima obtida pelo processo de estimação sem presença de erros (TEUNISSEN, 1998a).

2.4.1 Teste de hipótese

O teste de hipótese pode ser entendido como uma regra de decisão para se aceitar ou rejeitar uma suposição, que pode ser verdadeira ou falsa, quanto ao valor de um parâmetro populacional. Devido à dificuldade de se examinar a população inteira, utiliza-se uma amostra aleatória. Formula-se a denominada hipótese nula (H_0) para os parâmetros a serem testados. A rejeição de H_0 significa a aceitação de uma hipótese alternativa (H_a).

A não rejeição da H_0 advém da insuficiência de evidências para rejeitá-la. Sendo assim, ao se acatar o resultado de um teste de hipóteses, pode-se cometer dois tipos de erros: o α (erro do Tipo I) e o β (erro do tipo II). O erro do tipo I, também denominado de nível de significância, é a probabilidade de se rejeitar uma hipótese que na realidade é verdadeira. O erro do tipo II, é a probabilidade de se aceitar uma hipótese que na realidade é falsa. A Tabela 2.1 mostra os possíveis resultados que podem ocorrer no ato de se acatar o resultado de um teste de hipóteses (TIBERIUS, 1998).

Tabela - 2.1 - Possíveis resultados no ato de testar		
Realidade	H_0 verdadeira	H_0 falsa
Decisão		
Aceitar H_0	OK	β
Rejeitar H_0	α	OK

2.4.2 Detecção

Num processo de medida envolvendo m observações a u incógnitas, pode-se formular as seguintes hipóteses H_0 e H_a (TEUNISSEN, 1998a):

$$H_0 : L_k = A_k X_k + v_k \quad (2.27)$$

$$H_a : L_k = A_k X_k + c_k \nabla + v_k \quad (2.28)$$

onde:

- ∇ é um escalar desconhecido que representa a magnitude do erro;
- c é um vetor ($m \times 1$) conhecido, que representa o tipo do erro.

Com base nas equações (2.27) e (2.28), ressalta-se que a hipótese H_0 considera ausência de erro no modelo de observação, enquanto que a hipótese H_a considera que o modelo de observação contenha erro.

O teste para detecção pode ser realizado a partir de uma análise dos resíduos preditos, que por estarem em função das observações, tanto da época anterior, quanto da época atual, possibilitam que o teste seja executado paralelamente ao Filtro de Kalman. Neste caso, as hipóteses H_0 e H_a são escritas como (TEUNISSEN, 1998a):

$$H_0 : E\{\underline{v}_k\} = 0 \quad (2.29)$$

$$H_a : E\{\underline{v}_k\} = c_v \nabla \quad (2.30)$$

A estatística utilizada para testar H_0 (2.29) contra H_a (2.30) é dado por (CAMARGO, 1992):

$$T_{LOM}^k = \underline{v}_k^T Q_{\underline{v}_k}^{-1} \underline{v}_k \quad (2.31)$$

A estatística acima é denominada de *Local Overall Model* (LOM), a qual abrange todas as observações da época k , sendo, portanto, m -dimensional e local. Sobre H_0 , T_{LOM}^k segue a distribuição $c^2(m_k)$. A presença do

erro é detectada quando a estatística T_{LOM}^k exceder o valor da c^2 , a um determinado nível de significância α_1 .

O teste de detecção local pode ser insensível com relação aos erros globais não modelados, os quais podem ser detectados através de um teste de abrangência global. Neste caso, a hipótese global pode ser dada por (TEUNISSEN, 1998a):

$$H_0^{k_0,k} : E\{\underline{v}_{k_0,k}\} = 0 \quad (2.32)$$

$$H_a^{k_0,k} : E\{\underline{v}_{k_0,k}\} = c_v^{k_0,k} \nabla \quad (2.33)$$

onde:

- k_0 - época que se considera que o erro está começando a ocorrer;
- $\underline{v}_{k_0,k} = (\underline{v}_{k_0}^T, \dots, \underline{v}_k^T)^T$

A estatística global para testar $H_0^{k_0,k}$ (2.32) contra $H_a^{k_0,k}$ (2.33)

é dada por (TEUNISSEN, 1998a):

$$T_{GOM}^{k_0,k} = \sum_{i=k_0}^k \underline{v}_i^T Q_{\underline{v}_i}^{-1} \underline{v}_i \quad (2.34)$$

A estatística representada pela equação (2.34) é denominada de *Global Overall Model* (GOM), a qual abrange todas as observações das épocas k_0 até k . A estatística dada pela equação (2.34) pode ser calculada recursivamente através de (TEUNISSEN, 1998a):

$$T_{GOM}^{k_0,k} = T_{GOM}^{k_0,k-1} + G_{k_0,k} (T_{LOM}^k - T_{GOM}^{k_0,k-1}) \quad (2.35)$$

onde:

$$- G_{k_0,k} = m_k / \sum_{i=k_0}^k m_i$$

Sobre H_0 , $T_{GOM}^{k_0,k}$ segue a distribuição $c^2 \left(\sum_{i=k_0}^k m_i \right)$. O erro é

detectado quando a estatística $T_{GOM}^{k_0,k}$ exceder o valor da c^2 . Verifica-se que esse teste será igual ao teste de detecção local (Eq. 2.31) quando $k_0=k$.

Um problema é escolher a época que se assume ser o início de ocorrência do erro k_0 . Tendo em vista que a época origem é desconhecida, pode-se utilizar $k_0=1$. Porém, essa prática não é muito conveniente no que diz respeito ao atraso na detecção. Uma outra opção é utilizar uma janela móvel (TEUNISSEN, 1998a).

2.4.3 Identificação

Assumindo-se que o modelo matemático seja consistente com as observações, se o teste global for rejeitado, a possível fonte de erro pode ser identificada através de uma análise uni-dimensional. Neste passo, o vetor c (Eq. 2.28) deve ser especificado. A estatística local para identificar a fonte de erro no modelo é dada por (TEUNISSEN, 1998a):

$$t_k = \frac{c_k^T Q_{\underline{y}_k}^{-1} \underline{y}_k}{\sqrt{c_k^T Q_{\underline{y}_k}^{-1} c_k}} \quad (2.36)$$

Sobre H_0 , t_k tem distribuição normal com média 0.

O erro é identificado quando a estatística t_k exceder o valor da distribuição normal, a um determinado nível de significância α_0 .

A identificação, para o caso global, pode ser realizada com a utilização da seguinte estatística (TEUNISSEN, 1998a):

$$t_{k_o,k} = \frac{\sum_{i=k_o}^k c_{v_i}^T Q_{v_i}^{-1} \underline{v}_i}{\sqrt{\sum_{i=k_o}^k c_{v_i}^T Q_{v_i}^{-1} c_{v_i}}} \quad (2.37)$$

Ressalta-se que a estatística dada pela equação (2.37) tem que ser calculada para cada hipótese alternativa e para cada época compreendida no período de k_o a k , evidenciando que a utilização de uma janela móvel se torna mais adequado para esse propósito. A identificação é realizada através do maior valor absoluto de $t_{k_o,k}$ de todas as épocas e hipóteses alternativas. Como no teste local, o erro é identificado quando $t_{k_o,k}$ exceder o valor da distribuição normal a um determinado nível de significância (TEUNISSEN, 1998a).

Similarmente ao teste de detecção global, essa estatística também pode ser calculada recursivamente por:

$$(t_{k_o,k})^2 = (t_{k_o,k-1})^2 + g_{k_o,k} [(t_k)^2 - (t_{k_o,k-1})^2] \quad (2.38)$$

onde:

$$- \quad g_{k_o,k} = c_{v_k}^T Q_{v_k}^{-1} c_{v_k} / \sum_{i=k_o}^k c_{v_i}^T Q_{v_i}^{-1} c_{v_i}$$

O vetor c_{v_i} pode ser calculado recursivamente através de:

$$c_{v_i} = c_i - A x_{i,k_o} \quad i=k_o \dots k \quad (2.39)$$

onde:

$$- \quad x_{i+1,k_o} = \Theta_{i+1,i} (x_{i,k_o} + k_i c_{v_i}) \quad , \quad x_{k_o,k_o} = 0$$

2.4.4 Relação entre o nível de significância dos testes de detecção e identificação

Para que o processo de controle de qualidade seja efetuado de maneira adequada, é necessário que haja uma relação entre o nível de significância dos testes de detecção e de identificação, a qual pode ser determinada através de séries de Bonferroni, truncadas a primeira ordem (CHEN, 1983 *apud* CAMARGO, 1992). Para testes unilaterais a relação entre os níveis de significância é dada por (CAMARGO, 1992):

$$a_1 = 2ma_0 \quad (2.40)$$

2.4.5 Adaptação

Caso algum erro seja detectado e identificado nos passos anteriores, o modelo de observação deve ser adaptado imediatamente para manter a característica do filtro em proporcionar resultados ótimos na estimação.

Na adaptação local, é possível eliminar o efeito do erro sistemático no vetor de estado filtrado na mesma época em que tal efeito foi detectado e localizado. Neste caso, o vetor de estado adaptado e sua respectiva MVC, para a época k , são calculados através de (TEUNISSEN, 1998a):

$$\hat{x}_{k/k}^a = \hat{x}_{k/k}^0 - K_k c_k \hat{V}_k \quad (2.41)$$

$$Q_{\hat{x}_{k/k}^a}^a = Q_{\hat{x}_{k/k}^0} + K_k c_k s_{\hat{V}_k}^2 c_k^T K_k^T \quad (2.42)$$

onde:

- $\hat{x}_{k/k}^0$ - vetor inicial dos parâmetros aproximados;
- $\hat{V}_k$ - estimativa do erro identificado;

– $s_{\hat{V}_k}^2$ - variância de $\hat{V}_k$.

A estimativa do erro, bem como sua variância são calculados através de (TEUNISSEN, 1998a):

$$\hat{V}_k = t_k / \sqrt{c_k^T Q_{V_k}^{-1} c_k} \quad (2.43)$$

$$s_{\hat{V}_k}^2 = 1 / c_k^T Q_{V_k}^{-1} c_k \quad (2.44)$$

No que diz respeito à adaptação global, a eliminação do efeito sistemático no filtro ocorre com um certo atraso, que vai desde a época k_0 até a época k . A adaptação pode ser realizada através de suavização. No entanto, essa solução pode não ser conveniente em alguns casos. Nestes casos pode-se utilizar a solução dada por (TEUNISSEN, 1998a):

$$\hat{x}_{k/k}^a = \hat{x}_{k/k}^0 - \Theta_{k,K+1} x_{k_0,k+1} \hat{V}_{k_0,K} \quad (2.45)$$

$$Q_{\hat{x}_{k/k}^a}^a = Q_{\hat{x}_{k/k}} + \Theta_{k-1,k} x_{k_0,k+1} s_{\hat{V}_{k_0,k}}^2 x_{k_0,k+1}^T \Theta_{k-1,k}^T \quad (2.46)$$

O erro e sua MVC podem ser calculados através de (TEUNISSEN, 1998a):

$$\hat{V}_{k_0,k} = t_{k_0,k} / \sqrt{\sum_{i=k_0}^k c_{V_i}^T Q_{V_k}^{-1} c_{V_i}} \quad (2.47)$$

$$s_{\hat{V}_{k_0,k}}^2 = 1 / \sqrt{\sum_{i=k_0}^k c_{V_i}^T Q_{V_k}^{-1} c_{V_i}} \quad (2.49)$$

Após o processo de adaptação, o filtro retorna à condição dada pela hipótese H_0 , ou seja, pela equação (2.29) no caso local e equação (2.32), no caso global.

3 MODELOS UTILIZADOS NO POSICIONAMENTO COM NAVSTAR-GPS

Os modelos são utilizados para tentar descrever alguma realidade física. Em geodésia, eles são constituídos de duas partes: o modelo funcional e o modelo estocástico. O modelo funcional tenta descrever as relações existentes entre as observações e os parâmetros. O modelo estocástico é utilizado para considerar a variabilidade probabilística das observações (TEUNISSEN, 1998a).

Quando os modelos funcional e estocástico estão corretamente definidos de acordo com as observações, é conveniente obter a solução pelo MMQ. Os efeitos sistemáticos podem ser introduzidos como parâmetros no modelo funcional, serem eliminados através de técnicas apropriadas de observação, ou suas combinações lineares (HAN, 1997), (MONICO, 2000).

Nesta seção, são apresentados os modelos matemáticos utilizados no processo de estimação de coordenadas a partir de observações oriundas dos satélites NAVSTAR-GPS. Apresenta-se o modelo funcional da pseudodistância e da fase de batimento da onda portadora e alguns dos erros sistemáticos. Apresenta-se, também, os modelos funcional e estocástico da *DD* e os conceitos de posicionamento relativo estático e cinemático.

3.1 Equações de observação

As observações NAVSTAR-GPS mais utilizadas para posicionamento são as pseudodistâncias e a fase de batimento da onda portadora. As pseudodistâncias são medidas a partir dos códigos pseudo-aleatórios (*Pseudo*

Random Noise - PRN) CA (*Course Aquisition*), que é modulado apenas no sinal L1, e/ou do código Y, modulado nos sinais L1 e L2. O número de ciclos é medido a partir da fase de batimento da onda portadora em um, ou nos dois sinais (SEEBER, 1993).

3.1.1 Pseudodistância

A medida da pseudodistância é obtida a partir da correlação entre o código gerado pelo satélite no instante de transmissão (t^t) e sua réplica gerada no receptor no instante de recepção (t_r). A equação da pseudodistância entre o satélite s e o receptor i pode ser escrita como (MONICO, 2000):

$$PD_i^s = r_i^s + c(dt_i - dt^s) + Ion_i^s + Trop_i^s + Orb^s + v_{PD_i}^s \quad (3.1)$$

onde:

- r_i^s - distância geométrica entre o satélite e o receptor, a qual pode ser calculada no instante de transmissão ou de recepção do sinal;
- c - velocidade da luz no vácuo;
- dt_i - erro do relógio do receptor em relação ao tempo NAVSTAR-GPS;
- dt^s - erro do relógio do satélite em relação ao tempo NAVSTAR-GPS;
- Ion_i^s - erro causado pela ionosfera;
- $Trop_i^s$ - erro causado pela troposfera;
- Orb^s - erro da posição do satélite;

- $v_{PD_i}^s$ - resíduo contendo os erros não modelados.

3.1.2 Fase de batimento da onda portadora

A medida da fase de batimento da onda portadora é realizada a partir da diferença entre a fase gerada pelo satélite, no instante de transmissão do sinal, e sua réplica gerada pelo receptor, no instante de recepção do sinal. Apenas uma medida fracionária $f_i^s(t_0)$ é obtida, restando o número de ciclos inteiros, denominado de ambigüidade (Amb), que é uma incógnita do modelo. A equação da fase de batimento da onda portadora pode ser escrita como (MONICO, 2000):

$$f_i^s = -f \left(\frac{r_i^s - Ion_{i+}^s Trop_i^s}{c} \right) + f(dt^s - dt_i) + (f_i(t_0) - f^s(t_0)) + Amb_i^s + \frac{f}{c} Orb^s + v_{f_i^s} \quad (3.2)$$

onde:

- f - frequência da fase;
- $f_i(t_0)$ - fase gerada no receptor na época de referência t_0 ;
- $f^s(t_0)$ - fase transmitida pelo satélite na época de referência t_0 ;
- Amb_i^s - ambigüidade;
- $v_{f_i^s}$ - resíduo contendo os erros não modelados da fase de batimento da onda portadora.

Os outros elementos já foram devidamente identificados (Eq. 3.1).

3.1.3 Erros sistemáticos que degradam a precisão do posicionamento com NAVSTAR-GPS

Todas as medidas estão suscetíveis a erros, sendo eles do tipo: grosseiro, sistemático ou aleatório. Portanto, o posicionamento com NAVSTAR-GPS, cujas medidas são realizadas a partir de sinais emitidos por satélites artificiais, também está sujeito a degradações provocadas por algumas fontes de erro. Esta seção está focada nas fontes de erros sistemáticos, as quais podem ser reunidas em quatro grupos: satélites, propagação do sinal, receptor/antena e estação. A Tabela 3.1 mostra os erros sistemáticos que degradam o posicionamento com NAVSTAR-GPS associados às suas fontes (MONICO, 2000).

Tabela 3.1 - Erros sistemáticos do NAVSTAR-GPS que afetam a precisão do posicionamento

Fontes	Erros
Satélite	Atraso entre as duas portadoras no hardware do satélite
	Erro da órbita
	Erro do relógio
	Relatividade
Propagação do sinal	Refração Troposférica
	Refração Ionosférica
	Perdas de ciclos
	Rotação da Terra
	Multicaminho
Receptor\antena	Erro do relógio
	Erro entre os canais
	Centro de fase da antena
Estação	Erro nas coordenadas
	Multicaminho
	Marés terrestres
	Movimento do Pólo
	Cargas dos oceanos
	Pressão atmosférica

A Tabela 3.1 apresenta 17 tipos de erros que degradam o posicionamento com NAVSTAR-GPS. Embora a maioria desses efeitos seja drasticamente reduzida no posicionamento relativo, alguns deles devem ser abordados com maiores detalhes, pois dependem do comprimento da linha de base ou não são reduzidos no processo de diferenciação.

3.1.3.1 Erros orbitais

As coordenadas e o erro do relógio dos satélites NAVSTAR-GPS podem ser calculados com a utilização das efemérides transmitidas, as quais são resultantes de um processo de predição. São considerados dados de 4 semanas anteriores ao dia de sua utilização. Estes dados são utilizados para calcular as trajetórias e monitorar o comportamento dos relógios dos satélites, os quais são propagados para o futuro. As primeiras 28 horas de predição são divididas em intervalos de 4 horas (ZUMBERGE & BERTIGER, 1996).

Os parâmetros das efemérides e de correção do erro do relógio do satélite são referenciados, respectivamente, a uma época origem (t_{oe}) e (t_{oc}). Os elementos de cada efemérides transmitidas são válidos entre o intervalo de tempo de duas horas antes e duas horas depois de sua época origem. As coordenadas são referenciadas ao sistema de referência do NAVSTAR-GPS (WGS-G873) (MONICO, 2000).

No caso das efemérides transmitidas, o procedimento de cálculo das coordenadas do satélite envolve 4 etapas, as quais consistem na determinação do instante de transmissão do sinal na escala de tempo NAVSTAR-GPS, cálculo

da anomalia verdadeira, cálculo das coordenadas no plano orbital e cálculo das coordenadas terrestres. Detalhes acerca do cálculo das coordenadas dos satélites NAVSTAR-GPS podem ser encontrados em (HOFMANN-WELLENHOF *et al*, 1997).

Uma outra possibilidade seria utilizar as efemérides e erro do relógio dos satélites produzidos por centros de pesquisa, como o *International GPS Service* (IGS). Existem três tipos de efemérides produzidas pelo IGS, sendo elas (IGS, 2001):

- IGU - Denominadas efemérides ultra-rápidas, sendo resultantes de uma combinação entre 27 horas de observações e 21 horas de órbitas preditas. Elas são geradas duas vezes ao dia, às 3:00 horas e 15:00 horas do Tempo Universal (TU);
- IGR - correspondem às efemérides rápidas, são pós-processadas, tornando-se disponíveis a partir de 17 horas após a coleta dos dados;
- IGS - são as efemérides precisas, resultantes da combinação final das soluções obtidas pelos centros de análise. Também são pós-processadas e disponibilizadas em até 12 dias após a coleta dos dados.

As efemérides IGS contêm, dentre outras informações, as coordenadas cartesianas (X, Y e Z) e o erro do relógio dos satélites, calculados com intervalo de 15 minutos. As coordenadas estão referenciadas ao *International*

Terrestrial Reference Frame (ITRF), que é o sistema de referência melhor determinado da atualidade (MONICO, 2000).

Uma comparação entre as efemérides transmitidas e as produzidas pelo IGS pode ser vista na Tabela 3.2 (IGS, 2001b).

Tabela 3.2 - Comparação entre as efemérides transmitidas, IGU, IGR e IGS

Efemérides	Acurácia	Latência	Atualização	Intervalo
Transmitidas	~260 cm / ~7 ns	tempo real	Contínua	Critério do usuário
IGU	~25 cm / ~5 ns	tempo real	duas vezes ao dia	15 min
IGR	5 cm / 0,2 ns	17 horas	Diariamente	15 min
IGS	<5 cm / 0,1 ns	~13 dias	Semanalmente	15 min

A seguir, apresenta-se uma regra prática que pode ser utilizada para estimar erro esperado na linha de base, a qual relaciona o erro na posição do satélite com comprimento da linha de base (WELLS *et al*, 1986):

$$\Delta dl = dl \frac{Orb^s}{ds} \quad (3.3)$$

onde:

- Δdl - erro na linha de base;
- dl - comprimento da linha de base;
- Orb^s - erro na posição do satélite;
- ds - distância entre o satélite e receptor.

Embora essa equação seja útil para se estimar o erro provocado pelo erro da posição do satélite na linha de base, há evidências de ela seja pessimista. Trabalhos sugerem que a equação (3.3) seja mais adequada para representar erros na componente vertical (SANTOS, 1995 *apud* MONICO, 2000).

3.1.3.2 Erro do relógio do satélite

Embora altamente estáveis, os relógios dos satélites não acompanham o sistema de tempo NAVSTAR-GPS. Isso causa efeitos negativos no ajustamento, sendo necessário corrigir o instante de recepção do sinal de tal efeito.

Os relógios dos satélites são monitorados pela estação de controle do NAVSTAR-GPS, denominada Colorado Springs, que calcula a diferença entre o tempo NAVSTAR-GPS e o tempo dos relógios dos satélites, tais diferenças são mantidas dentro de 1 ms (WELLS *et al*, 1986).

O erro dos relógios dos satélites sofre um processo de predição, sendo enviado aos usuários através da mensagem de navegação, na forma de coeficientes (a_0 , a_1 e a_2) de um polinômio de segunda ordem, dado por (MONICO, 2000):

$$dt^s = a_0 + a_1(t_{GPS} - t_{o_c}) + a_2(t_{GPS} - t_{o_c})^2 \quad (3.4)$$

onde:

- t_{GPS} - tempo NAVSTAR-GPS;
- t_{o_c} - tempo origem do relógio.

Portanto, o erro do relógio dos satélites pode ser calculado e considerado no processo de estimação das coordenadas. A precisão do erro do relógio calculado através das efemérides transmitidas pode ser visto na Tabela 3.2.

É importante ressaltar que durante o período de 4 de julho de 1994 a 1 de Maio de 2000, usuários civis do NAVSTAR-GPS conviviam com a

disponibilidade seletiva (SA - *Selective Availability*), a qual tinha como objetivo degradar, intencionalmente, a precisão proporcionada pelo sistema. A SA foi introduzida no sistema através de dois mecanismos, sendo eles: a manipulação das efemérides transmitidas (técnica *epsilon*: ϵ) e a desestabilização do relógio dos satélites (técnica *dither*: δ). Ressalta-se que a implementação da técnica δ poderia provocar a desestabilização física do oscilador, ou a manipular os parâmetros de correção do relógio enviados na mensagem de navegação, ou mesmo ambos (BIAN, 1996). Com essa degradação implementada, os usuários obtinham acurácia horizontal, vertical e de tempo de 100 m, 140 m e 340 ns (95%), respectivamente (Van GRAAS & BRAASCH, 1996). Experimentos realizados logo após a desativação da SA mostram que a precisão do posicionamento melhorou cerca de 10 vezes (MACHADO *et al*, 2000).

3.1.3.3 Ionosfera

A ionosfera é a região da atmosfera que contém elétrons, bem como átomos e moléculas eletricamente carregados, a qual está compreendida entre aproximadamente 50 km e 1000 km acima da crosta terrestre (WELLS *et al*, 1986), (LIN, 1997).

Medidas da atividade e manchas do Sol, que vêm sendo realizadas há aproximadamente 300 anos, mostram uma certa periodicidade de 11 anos, bem como uma variabilidade de potência entre cada ciclo. Alguns dos ciclos mais potentes ocorreram nos últimos 50 anos. Atualmente, estamos no ciclo 23 e os valores de máxima atividade nesse ciclo são esperados entre o período de 2000 e 2002 (KUNCHES, 1997).

Quando sinais de rádio, como o do NAVSTAR-GPS, se propagam pela ionosfera, eles sofrem um atraso, o qual está relacionado com o número de elétrons que estão contidos numa coluna com secção transversal de $1,0 \text{ m}^2$ de área ao longo do caminho do sinal entre o satélite e o receptor, denominado de Conteúdo Total de Elétrons (TEC - *Total Electrons Content*). O atraso causado pela ionosfera pode ser estimado, até mesmo em tempo-real (LIN, 1997).

Outro efeito da ionosfera que degrada a precisão das observáveis NAVSTAR-GPS é a cintilação, a qual causa rápidas variações na amplitude da fase dos sinais de rádio. A cintilação ionosférica ocorre após o por do Sol, e pode fazer com que ocorra perda de sintonia entre o receptor e os satélites, portanto rastreios nesse período do dia devem ser evitados (FINN & KNIGHT, 1996).

O motivo inicial para que os satélites NAVSTAR-GPS emitam sinais em duas frequências distintas está relacionado com os efeitos da ionosfera, tendo em vista que a combinação linear L0, livre dos efeitos da ionosfera, elimina os termos de primeira ordem desse efeito (MONICO, 2000).

O NAVSTAR-GPS está passando por um processo de modernização, no qual está prevista a inserção de uma terceira frequência não criptografada, denominada de L5, bem como um código civil na portadora L2, o que proporcionará benefícios para a correção dos efeitos da ionosfera (SPILKER *et al.*, 1999 *apud* MONICO, 2000).

Usuários que utilizam receptores de simples frequência podem minimizar os efeitos da ionosfera com o posicionamento relativo, ou utilizar algum modelo da ionosfera (LEICK, 1995). No entanto, deve-se ressaltar que os efeitos da ionosfera são devidamente minimizados apenas em posicionamento

relativo de base curta, restringindo a utilização dessa técnica. Uma opção válida para o território brasileiro é o modelo regional da ionosfera desenvolvido como tese de doutorado, o qual utilizou dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) e apresenta bons resultados (CAMARGO, 1999).

3.1.3.4 Troposfera

A troposfera é a camada da atmosfera mais próxima da superfície terrestre, abrangendo altitude aproximada de 9 km nos pólos e 16 km na região equatorial (LANGLEY, 1996). Ela é composta por duas componentes, uma composta por gases secos, denominada de hidrostática, e outra composta por vapor d'água, a componente úmida. Seus efeitos variam de poucos metros até 30 metros, dependendo das condições atmosféricas e do ângulo de elevação do satélite (MONICO, 2000).

Um efeito da troposfera sobre o posicionamento com NAVSTAR-GPS que pode ser citado é a atenuação atmosférica, a qual provoca uma diminuição da potência da onda eletromagnética, dependendo da frequência. Para amenizar esse efeito, recomenda-se utilizar observações de satélites que estejam acima de 5° de elevação.

Outro efeito causado pela troposfera é a cintilação troposférica. Trata-se de uma oscilação na fase da onda causada por irregularidades e turbulências no índice de refatividade atmosférica, sendo dependente da frequência, do tempo, das condições atmosféricas e do ângulo de elevação dos satélites. Seus efeitos no posicionamento com NAVSTAR-GPS são pequenos se forem utilizados ângulos de elevação maiores que 10°.

Existe, também, o atraso troposférico, ou refração troposférica, que é causado pelas componentes seca e úmida. No primeiro caso, o atraso é de cerca de 90% do atraso total, com aproximadamente 2,3 m no zênite. Sua variação com relação ao tempo é pequena, podendo ser predita com boa precisão. No segundo caso, o atraso é causado pelo vapor d'água e sua variação com o tempo não permite ser predita com boa precisão. No entanto, sua magnitude é bem menor do que a causada pela componente seca (MONICO, 2000).

Os efeitos causados pela troposfera podem ser minimizados com a utilização de uma máscara de elevação superior à 10° em conjunto com modelos de atraso (SAPUCCI, 2001). Outra opção é realizar posicionamento relativo. Porém, nesse caso, o comprimento da linha de base representa um fator limitante, o qual não deve ultrapassar 15 km, aproximadamente (GOAD, 1996).

3.1.3.5 Multicaminhamento

O multicaminhamento é o efeito causado quando um sinal chega na antena do receptor por dois, ou mais, caminhos diferentes, ou seja, quando o sinal sofre reflexões durante sua trajetória. A ocorrência desse efeito depende do meio onde a antena do receptor está instalada (LANGLEY, 1996).

Estudos foram realizados acerca dos efeitos do multicaminhamento na fase da onda portadora, onde se concluiu que (LEICK, 1995):

- o erro máximo é de aproximadamente 1/4 do comprimento de onda;

- a frequência do multicaminhamento está em função do ângulo de elevação do satélite. É proporcional à distância perpendicular entre a antena e a superfície refletora e inversamente proporcional ao comprimento de onda;
- a combinação linear L0 não se comporta adequadamente na presença de multicaminhamento.

Os efeitos do multicaminhamento na pseudodistância são maiores do que na fase de batimento da onda portadora. Além disso, a pseudodistância derivada do código C/A apresentará maior erro que a do código P, tendo em vista que a magnitude do multicaminhamento está em função da razão de transmissão de ambos (MONICO, 2000).

Alguns procedimentos podem ser adotados para minimizar a ocorrência do multicaminhamento (LANGLEY, 1996):

- critério na seleção do local de instalação da antena;
- utilizar antenas construídas especialmente para minimizar o multicaminhamento, tal como a *chocke ring*;
- utilizar receptores desenvolvidos para identificar multicaminhamento.

Como o período de translação dos satélites NAVSTAR-GPS em torno da Terra é de 12 horas siderais, a constelação se repete diariamente quase que de maneira idêntica. Isto faz com que o multicaminhamento quase se repita em levantamentos estáticos com longos períodos de ocupação, permitindo que

seus efeitos sejam atenuados. No caso prático de posicionamento cinemático, o multicaminhamento é considerado aleatório (MONICO, 2000).

3.1.3.6 Perdas de ciclos

Durante a realização de um levantamento com NAVSTAR-GPS, quando o sinal de um ou mais satélites rastreados pelo receptor for(em) interrompido(s), ocorre uma perda na contagem Dos ciclos acumulados da fase. A este evento denomina-se perda de ciclos. A consequência da perda de ciclos é a introdução de um salto, por um número de ciclos inteiros, nas observações realizadas após a sua ocorrência. A parte fracionária da medida da fase de batimento da onda portadora não é afetada por esta descontinuidade na contagem dos ciclos (LEICK, 1995).

Freqüentemente, a ocorrência de perda de ciclos está associada a obstruções. No entanto, a sua causa pode estar relacionada com outros fatores, sendo eles: multicaminhamento, efeitos atmosféricos, inclinação e aceleração da antena, problemas no software do receptor e mau funcionamento dos relógios do satélite (SEEBER, 1993) e (MONICO, 1998).

A perda de ciclos pode ocorrer de uma época para outra, ou durante um intervalo de várias épocas. Além disso, durante o rastreo podem ocorrer várias perdas de ciclos, podendo possuir magnitude de um a milhões de ciclos (LEICK, 1995).

Na ausência de perda de ciclos, o comportamento de uma série temporal de medidas da fase de batimento da onda portadora deve ser contínuo.

Um salto súbito no gráfico do comportamento indica a ocorrência de perda de ciclos, Figuras (3.1) e (3.2).

Para ilustrar o efeito da perda de ciclos numa seqüência pequena de observações de fase de batimento da onda portadora, bem como na sua simples, dupla e tripla diferença, coletou-se dados durante 150 épocas com taxa de coleta de 15 segundos, provocando perda de ciclos intencionalmente, através de obstrução na antena, em uma das estações. As Figuras 3.1 e 3.2 mostram o comportamento da fase de batimento e da sua simples diferença na ausência e presença de perdas de ciclos. A Figura 3.3 mostra o comportamento da dupla e tripla diferença na presença de perda de ciclos. Nestas figuras, foram consideradas observações coletadas a partir dos satélites PRN 31 e 21.

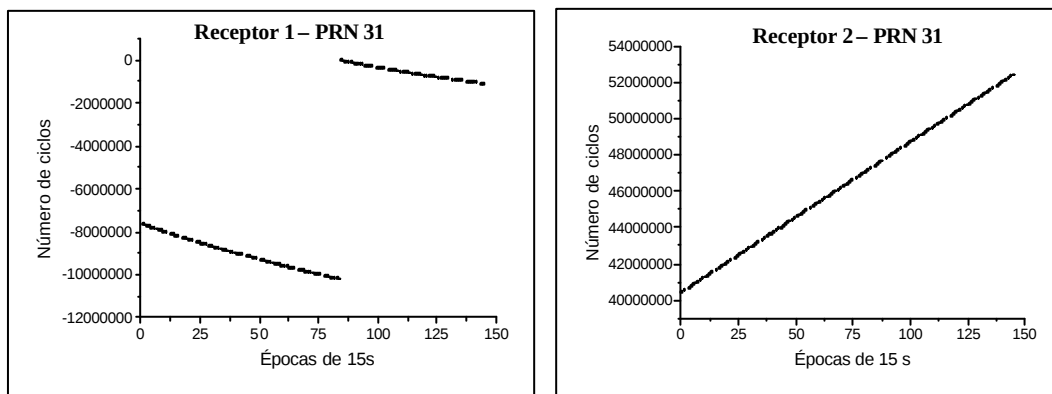


FIGURA 3.1 - Comportamento da fase de batimento da onda portadora na ausência e presença perdas de ciclos

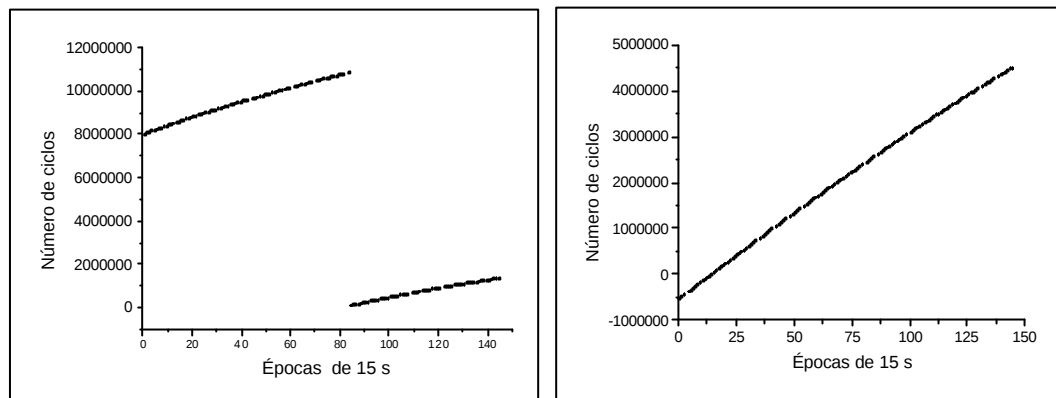


FIGURA 3.2 - Comportamento da Simple Diferença da fase de batimento da onda portadora na presença e ausência perdas de ciclos

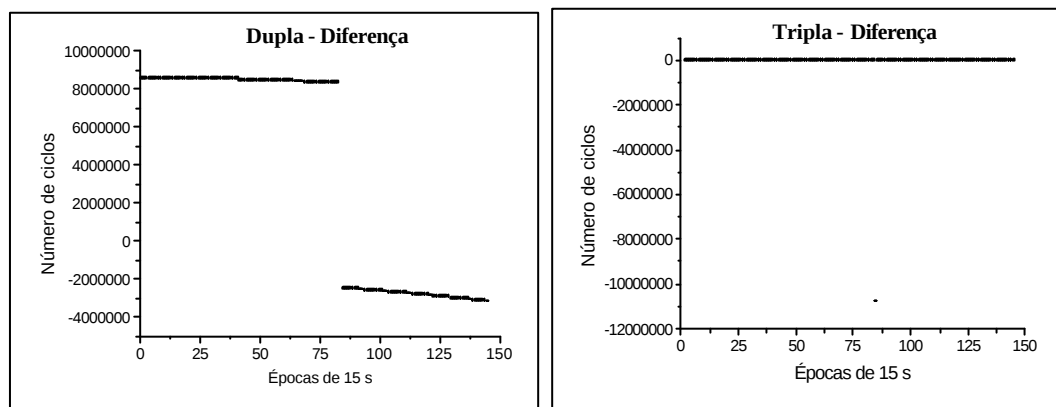


FIGURA 3.3 - Comportamento da Dupla Diferença e Tripla Diferença da fase de batimento da onda portadora com perdas de ciclos

A partir das Figuras 3.1, 3.2 e 3.3, nota-se que a perda de ciclos ocorrida na fase de batimento da onda portadora afeta todas as observações subsequentes, inclusive nas simples e duplas diferenças. Porém, apenas uma tripla diferença é afetada pela perda de ciclos. Isto é decorrente do fato da tripla diferença ser a diferença entre duas duplas diferenças de épocas adjacentes.

Conclui-se que para corrigir as observações afetadas pela perda de ciclos é necessário detectar, na série temporal, onde ela ocorreu, bem como determinar sua magnitude.

Dentre as diversas maneiras de se detectar as de perdas de ciclos, cita-se a análise do comportamento de quantidades de épocas adjacentes (HOFMANN-WELLENHOF *et al*,1997), a análise dos resíduos da solução da tripla e dupla diferença, utilização o Filtro de Kalman, onde os parâmetros preditos são comparados com a observação da época atual (LEICK, 1995) e aplicar o processo DIA (seção 2.4). Também existe a possibilidade de utilizar a transformação *wavelet* (COLLIN & WARNANT, 1995).

Quando a ocorrência de perda de ciclos for detectada através de uma das técnicas mencionados anteriormente, pode-se corrigir as observações somando-se o número de ciclos que provocou o salto nas observações afetadas. Pode-se também, desconsiderar os dados ou adicionar novas incógnitas ao modelo (LEICK, 1995), (HOFMANN-WELLENHOF,1997) e (MONICO, 2000).

3.1.3.7 Erro do relógio do receptor

Geralmente, os receptores NAVSTAR-GPS são equipados com relógios de quartzo. Há também, receptores com padrões de tempo mais estáveis, no entanto, com custos mais elevados. Porém, ambos tipos de receptores não estão sincronizados com o sistema de tempo NAVSTAR-GPS.

No posicionamento por ponto, o erro do relógio é uma das incógnitas do modelo e pode ser estimado com precisão de 10^{-8} do segundo (MONICO, 2000). No posicionamento relativo o erro do relógio do receptor é minimizado. No entanto, há a necessidade de obtê-los com precisão da ordem de 10^{-6} segundos e a diferença entre eles não devia exceder 1 milissegundo, quando a SA estava ativada (LEICK, 1995). Isto era necessário por causa da não

simultaneidade entre os receptores no momento de realizar as medidas. Neste caso, o posicionamento era prejudicado devido à alta variação do erro do relógio dos satélites. Com a desativação da SA, o erro do relógio dos satélites está mais estável e a não simultaneidade entre as observações pode ser maior, constituindo-se num tópico a ser pesquisado.

3.1.3.8 Coordenadas da estação

No posicionamento relativo o *datum* é eliminado, tendo em vista que são estimadas diferenças de coordenadas (ΔX , ΔY e ΔZ). Neste caso, para que o usuário calcule as coordenadas referenciadas a um *datum* é necessário introduzir as coordenadas de, no mínimo, uma das estações envolvidas no levantamento, como injunção. Ressalta-se que qualquer erro inerente à determinação das coordenadas da estação assumida como base se propagará para as demais estações (MONICO, 2000).

Trabalhos mostram que erros da ordem de 5 m nas coordenadas da estação base podem produzir erros de 1,0, 0,9, e 0,8 ppm nas componentes geodésicas $\Delta\phi$, $\Delta\lambda$ e Δh (BREACH, 1990 *apud* MONICO, 2000). Isso mostra a importância dos usuários terem à sua disposição coordenadas compatíveis com o WGS-84 quando as efemérides transmitidas forem utilizadas para calcular as coordenadas dos satélites (MONICO, 2000).

3.1.4 Duplas diferenças

A dupla diferença é calculada a partir da diferença entre observações simultâneas envolvendo dois satélites (r e s) e duas estações (i e j),

sendo a diferença entre duas simples diferenças. Esta última é calculada a partir da diferença entre observações coletadas simultaneamente por duas estações, a partir do mesmo satélite. Se $m+1$ satélites estão sendo observados simultaneamente por dois receptores, pode-se calcular m DD independentes para cada tipo de observação (pseudodistância e/ou fase) por época (SEEBER, 1993).

Este processo de diferenciação é extensivamente utilizado, pois o erro do relógio dos satélites, bem como do relógio do receptor, são minimizados. Além disso, se as duas estações formarem uma base curta, essa combinação também reduzirá a refração atmosférica (ionosfera e troposfera), resultando em uma observação com pouca influência desses efeitos sistemáticos (MONICO, 1996). Os efeitos sistemáticos não modelados remanescentes nas DD ficam implícitos nos resíduos do modelo. Uma ilustração da DD é mostrada na Figura 3.4.

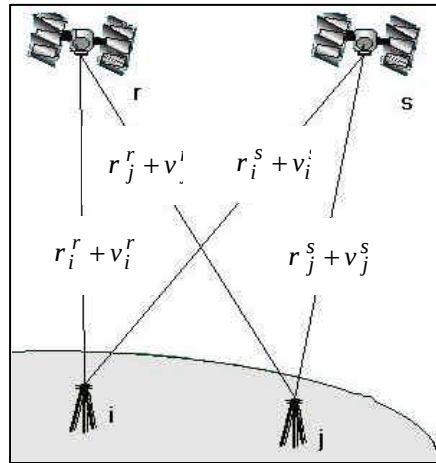


FIGURA 3.4 - Dupla diferença entre satélites e receptores

A equação da DD da pseudodistância para linhas de base curtas pode ser escrita como:

$$PD_{i,j}^{r,s} = r_{i,j}^{r,s} + v_{PD_{i,j}^{r,s}} \quad (3.5)$$

onde:

$$- \quad r_{i,j}^{r,s} = (r_i^r - r_j^r) - (r_i^s - r_j^s);$$

- $v_{PD_{i,j}^{r,s}}$ - representa os erros não modelados e resíduos aleatórios na medida da DD da pseudodistância.

A equação da DD da fase de batimento da onda portadora para bases curtas pode ser escrita como:

$$f_{i,j}^{r,s} = \frac{f}{c} (r_{i,j}^{r,s}) + Amb_{i,j}^{r,s} + v_{f_{i,j}^{r,s}} \quad (3.6)$$

onde:

$$- \quad Amb_{i,j}^{r,s} = (Amb_i^r - Amb_j^r) - (Amb_i^s - Amb_j^s);$$

- $v_{f_{i,j}^{r,s}}$ - representa os erros não modelados e resíduos aleatórios na medida da DD da fase de batimento da onda portadora.

A partir da equação (3.6), verifica-se que, em se tratando de bases curtas, as incógnitas inerentes ao modelo da DD da fase de batimento da onda portadora são as componentes da base (ΔX , ΔY , ΔZ) e as DD das ambigüidades.

É importante ressaltar que existe mais de uma forma de calcular as DD. Uma delas é utilizar a técnica denominada satélite de referência, ou satélite base, onde todas as DD são calculadas a partir das observações oriundas de um satélite, escolhido como base, com as observações dos demais satélites. As DD também podem ser calculadas pela diferença sequencial. Neste caso, as DD são

calculadas a partir das observações de dois satélites escolhidos seqüencialmente, onde observações do mesmo satélite são utilizadas no cálculo de no máximo duas DD. Sendo sat igual ao número de satélites rastreados, as DD pelo método seqüencial são calculadas por: $DD_{i,j}^{r,r+1}$, com $r = 1, 2, \dots, sat-1$ (MONICO, 2000).

3.2 Modelo estocástico

A precisão das observáveis não diferenciadas está relacionada com a resolução com que os receptores realizam as medidas, bem como do comprimento de onda de cada observável (LEICK, 1995).

Considerando que as observáveis não diferenciadas não correlacionam-se entre si, e que tenham a mesma precisão, a seguinte MVC, para cada época, é obtida:

$$Q_{Obs} = s_{\hat{\theta}_{bs}}^2 I_m \quad (3.7)$$

onde:

- $s_{\hat{\theta}_{bs}}^2$ - variância da observação não diferenciada;
- I_m - matriz identidade de ordem $(m \times m)$.

Vale a pena ressaltar que a precisão da fase de batimento da onda portadora é muito melhor que a da pseudodistância.

A partir da propagação de covariâncias, a seguinte MVC para as observações de DD calculadas pelo método do satélite base, para uma determinada época, é obtida:

$$Q_{DD} = s_{obs}^2 \begin{bmatrix} 4 & 2 & . & . & 2 \\ 2 & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & 2 \\ 2 & . & . & 2 & 4 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Se for assumido que não há correlação entre épocas, a MVC completa será bloco diagonal.

Este modelo é largamente utilizado nos programas de processamento de dados NAVSTAR-GPS. No entanto, a correlação entre épocas de coleta de dados e uma ponderação na precisão das observáveis não diferenciadas, considerando-se o ângulo de elevação do satélite, podem ser consideradas para melhorá-lo. Além disso, pode-se considerar a correlação entre observáveis, quando o receptor adotar a estratégia de correlação cruzada para demodular o código P da portadora L2 (HAN, 1997), (TIBERIUS *et al*, 1999). Deve-se ressaltar, que a definição de um modelo estocástico adequado ainda é um assunto a ser pesquisado.

3.3 Posicionamento relativo

O posicionamento pode ser dividido em duas classes principais: posicionamento por ponto, ou absoluto, e posicionamento relativo. No posicionamento absoluto com NAVSTAR-GPS utiliza-se apenas um receptor e as coordenadas são determinadas com relação ao geocentro. No posicionamento relativo as coordenadas são determinadas com relação a um referencial. Neste caso, é necessário que pelo menos dois receptores colem dados de, no mínimo,

dois satélites, simultaneamente. A DD da fase de batimento da onda portadora tem sido bastante empregada neste tipo de posicionamento (MONICO, 2000).

Atualmente, os usuários podem utilizar dados de uma ou mais estação(ões) que pertença(m) a um Sistema de Controle Ativo (SCA), não havendo a necessidade do usuário dispor de dois receptores para realizar posicionamento relativo (MONICO, 2000).

Devido à alta precisão da medida da fase de batimento da onda portadora, ela é a observável fundamental no posicionamento relativo, muito embora o uso da pseudodistância seja útil no cálculo do erro do relógio do receptor e na solução do vetor de ambigüidades (TEUNISSEN, 1998b), (WANG, 1999) e (MONICO, 2000).

As fontes de erro envolvidas no posicionamento com NAVSTAR-GPS deterioram a precisão das observações recebidas pelo receptor de referência e pelo receptor móvel. No entanto, no processo de diferenciação envolvendo linhas de base curtas, os erros relacionados com o relógio dos satélites e receptores, bem como os efeitos da Ionosfera e Troposfera, são minimizados. Isto tem como consequência, a determinação de coordenadas com alto grau de acurácia (WELLS *et al*, 1986). Salienta-se que atenção especial deve ser despendida com relação à simultaneidade das observações, a qual pode ser considerada em dois instantes distintos: transmissão e recepção.

Deve-se ressaltar que, normalmente, as observações recebidas no mesmo instante são transmitidas em instantes diferentes e as transmitidas no mesmo instante são recebidas em instantes diferentes, pois um mesmo satélite, geralmente, está a distâncias diferentes com relação às duas estações. Isso faz com

que os erros do relógio do satélite e receptor não sejam totalmente eliminados no processo de diferenciação, caracterizando uma falta de simultaneidade entre as observações.

É necessário calcular a distância geométrica entre o satélite e o receptor, pois ela é utilizada no cálculo das derivadas parciais que compõem a matriz de coeficientes e do vetor das observações calculadas em função dos parâmetros aproximados. Neste último caso, a distância deve ser calculada com precisão compatível com a das observações, que no caso da fase de batimento da onda portadora é da ordem de poucos milímetros. Como o instante de transmissão dos sinais recebidos pelos receptores envolvidos no cálculo das DD é diferente, torna-se necessário calcular a posição do satélite no instante de transmissão de cada estação, ou seja, a posição do satélite será diferente para cada receptor (MONICO, 2000).

O posicionamento com NAVSTAR-GPS pode ser subdividido em duas classes, o estático e o cinemático. No posicionamento estático, os receptores envolvidos permanecem estacionários, enquanto no cinemático, pelo menos um dos receptores se movimenta durante o levantamento (MONICO, 2000).

3.3.1 Posicionamento relativo estático

No posicionamento relativo estático, tanto o receptor de referência, quanto o receptor móvel, permanecem estacionários durante todo o levantamento. Quando não são aplicados métodos de solução rápida da ambigüidade (seção 4.6), ocupa-se as estações de interesse durante um intervalo

de tempo igual ou superior a vinte minutos. Considerando que um levantamento foi realizado durante k épocas, o modelo matemático linearizado para o posicionamento relativo estático pode ser escrito como:

$$E\left\{\begin{bmatrix} l_{DDf_1} \\ l_{DD_{PD1}} \\ l_{DDf_2} \\ l_{DD_{PD2}} \\ \vdots \\ l_{DDfk} \\ l_{DD_{PDk}} \end{bmatrix}\right\} = \begin{bmatrix} B_1 & I \\ B_1 & 0 \\ B_2 & I \\ B_2 & 0 \\ \vdots & \\ B_k & I \\ B_k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta b \\ \Delta n \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

onde:

- $i=1,2,...,k$ - índice das épocas observadas;
- l_{DDf} e $l_{DD_{PD}}$ - são os vetores das DD calculadas em função dos parâmetros aproximados subtraídos das DD observadas da fase de batimento da onda portadora e da pseudodistância, respectivamente;
- B - matriz de coeficientes associada aos parâmetros referentes às componentes da base;
- Db - vetor de correção aos parâmetros aproximados das componentes da base;
- I - matriz de coeficientes associada aos parâmetros referentes às ambigüidades;
- Dn - vetor de correção aos parâmetros aproximados das ambigüidades

Levantamentos que necessitam de intervalos de tempo inferiores a 20 minutos e o receptor móvel é desligado entre as sessões de coleta, são denominados de estático rápido, cujo modelo matemático funcional, para cada sessão, é idêntico ao dado pela equação 3.9.

3.3.2 Posicionamento relativo cinemático

O posicionamento relativo cinemático tem por finalidade a determinação da trajetória do receptor móvel, a qual é representada por um conjunto de coordenadas para cada época de observação, onde pelo menos um dos receptores envolvidos se desloca sobre as feições de interesse.

No que diz respeito à solução das ambigüidades, pode-se solucioná-las antes de iniciar o movimento, ou estimá-las em conjunto com as componentes da linha de base, por meio das observações coletadas durante o percurso do receptor móvel (HOFMANN-WELLENHOF *et al*, 1997).

No primeiro caso, a solução das ambigüidades é calculada como no posicionamento relativo estático, ou seja, com os dois receptores parados, tal como a equação (3.9). Após coletar dados suficientes para solucionar as ambigüidades, o receptor móvel pode ser deslocado (HOFMANN-WELLENHOF *et al*, 1997).

No segundo caso, o vetor das ambigüidades é estimado utilizando-se os dados coletados durante o percurso do receptor móvel. É importante salientar que, caso não ocorra perda de ciclos, o vetor das ambigüidades será igual para todo o levantamento (SEEBER, 1993).

O modelo matemático funcional linearizado para o segundo caso, considerando que se observou dados durante k épocas, é dado pela equação que segue:

$$E\left\{\begin{bmatrix} l_{DDf_1} \\ l_{DD_{PD1}} \\ l_{DDf_2} \\ l_{DD_{PD2}} \\ \vdots \\ l_{DDfk} \\ l_{DD_{PDk}} \end{bmatrix}\right\} = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \\ B_1 & 0 & & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 & & \cdots & 0 & I \\ 0 & B_2 & & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \ddots & & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & & 0 & & B_k & I \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta b_1 \\ \Delta b_2 \\ \vdots \\ \Delta b_k \\ \Delta n \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Os elementos que compõem a equação (3.10) foram descritos na equação (3.9).

No posicionamento cinemático, embora a antena esteja em movimento contínuo, sua trajetória é descrita pela determinação das coordenadas tridimensionais de uma série de pontos, que na equação (3.10) estão implícitas nos termos b_i ($i = 0, 1, \dots, k$).

O posicionamento relativo cinemático pode ser efetuado de duas maneiras distintas: pós-processado ou em tempo real (RTK - *Real Time Kinematic*). O posicionamento pós-processado tem como desvantagem o fato do usuário não saber os resultados do levantamento até que estes sejam devidamente processados. O posicionamento em tempo real apresenta algumas limitações, dentre elas cita-se a transmissão das observações (LANGLEY, 1998).

3.4 Diluição da precisão

A precisão dos parâmetros a serem estimados no posicionamento com NAVSTAR-GPS está relacionada com a precisão das observações (s_{obs}) e com a configuração da geometria dos satélites envolvidos no processo de estimação (MONICO, 2000).

A relação entre s_{obs} e a precisão dos parâmetros ($s_{\hat{x}}$) é dada pelo DOP (*Dilution of Precision*), através da seguinte expressão (SEEBER, 1993):

$$s_{\hat{x}} = DOP s_{obs} \quad (3.11)$$

Encontra-se na literatura, diferentes designações para o DOP, as quais estão relacionadas com os parâmetros a serem estimados. Como exemplo cita-se o HDOP, o VDOP e o PDOP, que estão relacionados com os parâmetros horizontais, vertical e de posição tridimensional, respectivamente (MONICO, 2000).

Os DOPs citados anteriormente são calculados a partir das observações não diferenciadas. Com o propósito de possibilitar uma verificação sobre a precisão com que as ambigüidades podem ser determinadas, faz-se necessário apresentar o ADOP (*Ambiguity DOP*), que é definido, em número de ciclos, por (TIBERIUS *et al*, 1997):

$$ADOP = \sqrt{\det Q_{\hat{n}}^{-1}} \quad (3.12)$$

onde:

- amb - número de ambigüidades.

O ADOP apresenta a vantagem de permanecer invariante em toda classe de transformação das ambigüidades, podendo ser calculado, também,

através da média geométrica dos desvios-padrão seqüenciais condicionados das ambigüidades (TIBERIUS *et al*, 1997).

O sucesso na solução das ambigüidades pode ser esperado quando o valor do ADOP for da ordem de poucos décimos de ciclos, ou inferior (TIBERIUS *et al*, 1997).

4 SOLUÇÃO DA AMBIGÜIDADE E CONTROLE DE QUALIDADE

O posicionamento com nível de precisão da ordem centimétrica utilizando-se o NAVSTAR-GPS está baseado na medida altamente precisa da fase de batimento da onda portadora, cujo modelo matemático funcional contém o número de ciclos inteiros entre o centro de fase das antenas dos satélites e do receptor no instante da primeira época de coleta de dados, denominada de ambigüidade (Eq. 3.2).

Embora a medida da fase de batimento da onda portadora seja altamente precisa, ela está sujeita a erros sistemáticos, que podem ser atenuados com o processo de diferenciação (Eq. 3.6).

No posicionamento relativo, o processo de estimação das componentes da linha de base é realizado em três passos, sendo eles: a estimação dos parâmetros reais, inclusive das DD de ambigüidades, denominada de solução *float*, estimação das DD de ambigüidades inteiras e cálculo da influência da injunção, das DD de ambigüidades inteiras, nas componentes da linha de base, denominada de solução *fixed* (DE JONGE & TIBERIUS, 1996).

Neste contexto, solucionar as DD de ambigüidades significa estimar tais parâmetros como números inteiros, sendo, portanto, o segundo passo na estimação das componentes da linha de base. O processo de solução das DD de ambigüidades divide-se em duas partes: a estimação, que visa calcular estimativas ótimas das DD de ambigüidades, e a validação, que tem o objetivo de verificar se as estimativas podem ser aceitas estatisticamente (TEUNISSEN, 1998b).

4.1 Estimação

Com base na equação (2.1), pode-se escrever as equações de observação das m DD linearizadas, com u parâmetros a serem estimados, através do seguinte sistema de equações lineares:

$$l_{DD} = Bb + Nn + v_{DD} \quad (4.1)$$

onde:

- $u = 3 + amb$, com 3 representando os parâmetros das componentes da linha de base (ΔX , ΔY e ΔZ) e amb o número de DD de ambigüidade;
- l_{DD} - vetor de ordem $(m \times 1)$ das DD observadas menos as DD calculadas em função dos parâmetros aproximados;
- B - matriz de coeficientes de ordem $(m \times 3)$ relacionada com os parâmetros referentes as componentes da linha de base;
- b - vetor de ordem (3×1) dos parâmetros referentes às componentes da linha de base;
- N - matriz de coeficientes de ordem $(m \times amb)$ relacionada com relação aos parâmetros referentes às DD de ambigüidades;
- n - vetor de ordem $(amb \times 1)$ dos parâmetros referentes às DD de ambigüidades;
- v_{DD} - vetor $(m \times 1)$ dos resíduos DD.

A estimação dos parâmetros das DD pelo MMQ é dada por:

$$(v_{DD})^T Q_{DD}^{-1} (v_{DD}) = \text{mínimo} \quad (4.2)$$

Salienta-se que as DD das ambigüidades são números inteiros, enquanto que as componentes da linha de base são reais, (Eq. 4.1). O processo de estimação das componentes da linha de base é realizado em três passos. No primeiro, os dois tipos de parâmetros são tratados conjuntamente como sendo reais, resultando na solução *float*. No segundo, as DD de ambigüidades inteiras são calculadas. No terceiro e último passo, as componentes da linha de base com a influência de injunção, das DD de ambigüidades inteiras, são calculadas, resultando na solução *fixed* (DE JONGE & TIBERIUS, 1996).

4.1.1 Solução *float*

Os parâmetros estimados na solução *float*, bem como sua respectiva MVC, são representados por:

$$\begin{bmatrix} \hat{b} \\ \hat{n} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} Q_{\hat{b}} & Q_{\hat{b}\hat{n}} \\ Q_{\hat{n}\hat{b}} & Q_{\hat{n}} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Um dos métodos mais utilizados para estimar a solução *float* é o Filtro de Kalman, o qual foi apresentado no capítulo 2.

4.1.2 Solução das DD de ambigüidades

A solução das DD das ambigüidades não pode ser calculada pelo MMQ comumente utilizado, envolvendo métodos de busca discreta. Inicialmente, a solução é obtida pelo vetor das DD de ambigüidades inteiras, $\tilde{n}$, que minimiza a seguinte expressão:

$$(n - \hat{n})^T Q_{\hat{n}}^{-1} (n - \hat{n}) = \text{mínimo} \quad (4.4)$$

A solução mais simples para a equação (4.4) seria arredondar o valor das DD de ambigüidades para o inteiro mais próximo. No entanto, esse procedimento produz a solução correta apenas se $Q_{\hat{n}}$ for diagonal. Neste caso, a solução é dada por (TEUNISSEN, 1998b).

$$\text{mínimo} \sum_{i=1}^{amb} (\hat{n}_i - n_i)^2 / s_{\hat{n}(i,i)}^2 \quad (4.5)$$

A pequenos intervalos de tempo de rastreo, $Q_{\hat{n}}$ é bastante correlacionada, não sendo diagonal. Entretanto, a solução pode ser calculada através da soma dos quadrados da função objetivo se $Q_{\hat{n}}$ for diagonalizada. Neste caso, uma estimação por mínimos quadrados sequencial condicionada é aplicada. A estimativa pelos mínimos quadrados da i -ésima DD de ambigüidade condicionada às DD de ambigüidades anteriores ($I = 1, \dots, i-1$) é dado por (TEUNISSEN, 1998b):

$$\hat{n}_{i|I} = \hat{n}_i - \sum_{j=1}^{i-1} s_{\hat{n}_i \hat{n}_{j|J}} s_{\hat{n}_{j|I}}^{-2} (\hat{n}_{j|J} - \hat{n}_j) \quad (4.6)$$

onde:

- $s_{\hat{n}_i \hat{n}_{j|J}}$ é a covariância entre $\hat{n}_i$ e $\hat{n}_{j|J}$;
- $J = 1, \dots, j-1$.

A diferença $(\hat{n}_i - n_i)$ pode ser escrita como (TEUNISSEN, 1995b):

$$(\hat{n}_i - n_i) = L(\hat{d} - n) \quad \text{e} \quad Q_{\hat{n}} = LDL^T \quad (4.7)$$

onde:

- $\hat{d} = (\hat{n}_1, \hat{n}_{2|1}, \dots, \hat{n}_{amb|AMB})$;

$$- D = \text{diag}(\dots, s_{\hat{n}_{i|l}}^2, \dots) \text{ e } (L)_{lm} = 0 \text{ para } 1 \leq l < m \leq \text{amb} \text{ e } (L)_{lm} = 1 \text{ para } l = m \text{ e } (L)_{lm} = s_{\hat{n}_i \hat{n}_{j|l}} s_{\hat{n}_{j|l}}^2 \text{ para } 1 \leq m < l \leq \text{amb}.$$

O problema de mínimos quadrados, agora, pode ser substituído por (TEUNISSEN, 1995)

$$\text{mínimo} \sum_{i=1}^{\text{amb}} (\hat{n}_{i|I} - n_i)^2 / s_{\hat{n}(i|I, i|I)}^2 \quad (4.8)$$

4.1.2.1 Espaço de procura

Ao invés da procura ser realizada em todo o conjunto dos números inteiros, pode-se utilizar um subconjunto formado por todos os vetores que satisfazem a seguinte inequação:

$$(n - \hat{n})^T Q_{\hat{n}}^{-1} (n - \hat{n}) \leq c^2(n) \quad (4.9)$$

A inequação (4.9) representa um hiper-elipsóide de dimensão (*amb*), centrado em $\hat{n}$, compondo o espaço de procura das DD de ambigüidades. A orientação e o achatamento desse hiper-elipsóide estão em função da $Q_{\hat{n}}$, enquanto que sua dimensão está em função do $c^2(n)$ (TEUNISSEN *et al*, 1995a). Duas maneiras de calcular o valor de $c^2(n)$ são encontradas em (DE JONGE & TIBERIUS, 1996). Uma está em função do volume do espaço de procura e a outra, em função do arredondamento das DD de ambigüidades condicionadas para o inteiro mais próximo (Eq. 4.6).

No caso bidimensional, as bordas do espaço de procura podem ser calculadas através de (TEUNISSEN, 1995):

$$(\hat{n}_1 - n_1)^2 \leq s_{n_1}^2 c^2 \quad (4.10)$$

$$(\hat{n}_{2/1} - n_2)^2 \leq s_{\hat{n}_{2/1}}^2 \left[c^2 - (\hat{n}_1 - n_1)^2 / s_{\hat{n}_1}^2 \right]$$

O processo de estimação pelo MMQ seqüencial condicionado se inicia com a escolha de uma DD de ambigüidade, n_1 , que satisfaça a primeira borda. A seguir, o valor do MMQ condicionado da segunda DD de ambigüidade, $\hat{n}_{2/1}$, é calculado. Com base no valor calculado para $\hat{n}_{2/1}$, escolhe-se um valor inteiro para a segunda ambigüidade, n_2 . Como se deseja os valores das DD de ambigüidades que minimizem a soma dos resíduos, pode-se escolher sempre o inteiro mais próximo. Caso n_2 satisfaça a segunda borda, uma redução na dimensão da elipse ($c^2(n)$) é realizada, a qual está em função da função objetivo do par de ambigüidades calculado, e escolhe-se outro valor para a DD de ambigüidade n_2 . Se o segundo valor para n_2 também satisfizer a segunda borda, realiza-se uma segunda redução na dimensão da elipse e escolhe-se um novo valor para n_2 . Caso contrário, escolhe-se outro valor para n_1 , o qual permitirá calcular outro valor para $\hat{n}_{2/1}$. O processo todo se repete até que não seja possível escolher um valor para n_1 que satisfaça a primeira borda. A solução é obtida pelo último conjunto de DD de ambigüidades que satisfizer as bordas.

No caso de dimensão amb , as bordas podem ser calculadas através de (TEUNISSEN, 1995):

$$(\hat{n}_{amb|amb-1} - \hat{n}_{amb})^2 \leq s_{\hat{n}_{amb|amb-1}}^2 \left[c^2 - \sum_{j=1}^{amb-1} (\hat{n}_{j|j} - \hat{n}_j)^2 / s_{\hat{n}_{j|j}}^2 \right] \quad (4.11)$$

A performance dos algoritmos de procura torna-se mais eficiente quanto menor a correlação entre as DD de ambigüidades. O caso ideal

ocorre quando $Q_{\hat{n}}$ é diagonal. No entanto, a curtos intervalos de tempo de rastreo, as DD de ambigüidades são bastante correlacionadas (TEUNISSEN *et al*, 1995a). Isso significa que os desvios-padrão das DD de ambigüidades não condicionadas diferem significativamente dos desvios-padrão das condicionadas. A Figura 4.1 mostra o espectro do desvio-padrão de doze DD de ambigüidades condicionadas. Os dados são provenientes de um levantamento de uma linha de base, rastreada com receptores de dupla frequência. Não foram consideradas as pseudodistâncias, sendo que sete satélites foram rastreados (TEUNISSEN, 1998b).

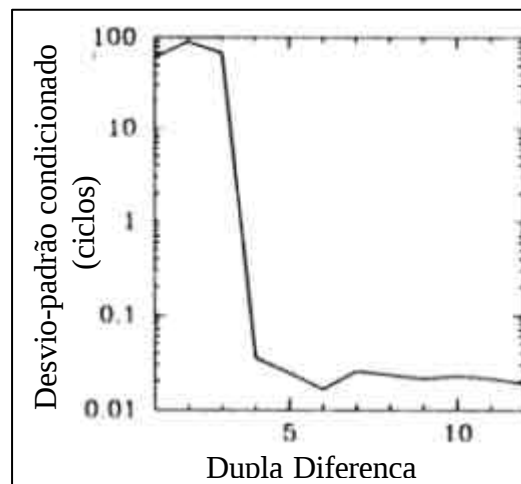


FIGURA 4.1 - Espectro do desvio-padrão das DD de ambigüidades condicionadas (Fonte: TEUNISSEN, 1998b)

Note, a partir da Figura 4.1, que há três desvios-padrão condicionados grandes e nove bem menores, gerando um salto no espectro dos desvios-padrão condicionados. Isto ocorre no local determinado pela dimensão dos parâmetros relacionados com as componentes da linha de base, que nesse caso são três. Essa estrutura exerce impacto no cálculo das bordas do espaço de procura. As três primeiras bordas, por estarem associadas com os maiores desvios-padrão condicionados, apresentarão número elevado de candidatos que as satisfaçam. Similarmente, as bordas do espaço de procura para as outras nove DD

de ambigüidades serão bastante pequenas. Esta situação proporciona uma alta probabilidade do processo não encontrar quatro DD de ambigüidades que satisfaçam a quarta borda, prejudicando o desempenho da procura (TEUNISSEN, 1998b).

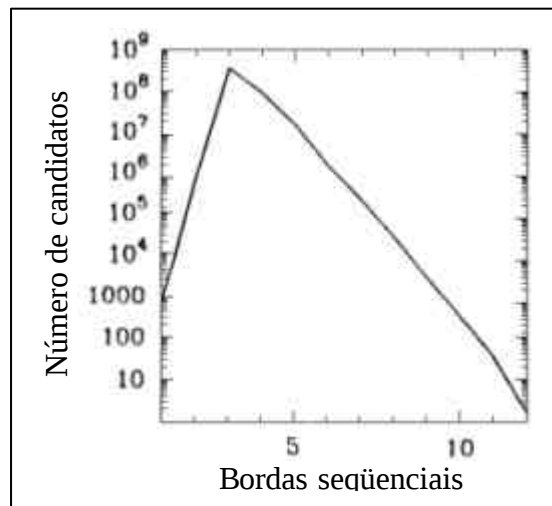


FIGURA 4.2 – Número de candidatos por número de bordas sequenciais (Fonte: TEUNISSEN, 1998b)

Como visto na Figura 4.2, o número de candidatos para a primeira borda é 1000 e vai aumentando até chegar na terceira borda, com mais de 10^8 candidatos. Da quarta borda em diante o número de candidatos vai diminuindo até chegar na décima segunda borda, com apenas um vetor candidato.

4.1.3 Métodos de solução da ambigüidade

A partir das Figuras (4.1) e (4.2), verifica-se que, para estimar as DD de ambigüidades inteiras, é necessário que estas estejam suficientemente separadas das componentes da linha de base (ΔX , ΔY e ΔZ). No entanto, para isso ocorrer naturalmente, a geometria relativa dos satélites deve se alterar consideravelmente, o que demanda um longo intervalo de tempo de coleta de

dados, pois os satélites orbitam a aproximadamente 22.000 km de altitude (MONICO, 1996).

Devido ao interesse científico e comercial que a solução rápida da ambigüidade despertou com o passar dos anos, várias soluções foram propostas em diversos centros de pesquisa do planeta, onde algumas delas vislumbram a solução para posicionamento relativo cinemático. Atenção especial vem sendo dada à solução rápida das ambigüidades, cujo modelo matemático funcional têm como observações básicas as DD da fase de batimento da onda portadora e da pseudodistância (MACHADO & MONICO, 1999).

Entre os métodos de solução existentes pode-se citar: Método da troca de antena, proposto por Remondi; Método de Euler/Landau, Método FARA (*Fast Ambiguity Resolution Approach*), proposto por Frei; método LAMBDA (*Least squares AMBiguity Decorrelation Approach*), proposto por Teunissen (MONICO, 1996), Método FASF (*Fast Ambiguity Search Filter*) proposto por Chen (CHEN & LACHAPELE, 1994) e o Whitening Filtering, proposto recentemente por Mohamed (MOHAMED & SCHWARZ, 1998). A maioria desses métodos utiliza a solução pelo MMQ com algoritmo de procura.

Esta seção apresenta alguns dos métodos de solução da ambigüidade GPS existentes. Entre as formas de classificação, destacam-se os métodos: de solução no domínio das observações, de procura no domínio das coordenadas e de procura no domínio das ambigüidades (KIM & LANGLEY, 2000). Outra proposta de classificação dos métodos de solução das ambigüidades pode ser encontrada em (HAN & RIZOS, 1997).

4.1.3.1 Método Seqüencial

O método seqüencial para a solução da ambigüidade foi proposto por Talbot, o qual utiliza o Filtro Kalman para modelos não lineares (seção 2.2) para a estimação da DD de ambigüidade e sua respectiva MVC (TALBOT, 1991). Alterações são propostas em MONICO (1992). Este método se classifica como método de procura no espaço das ambigüidades (KIM & LANGLEY, 2000).

Com a utilização da MVC, as DD de ambigüidades são testadas e avaliadas a cada época e, caso alguma(s) possa(m) ser fixada(s) como inteiro(s), ela(s) é(são) introduzido(s) como injeção no ajustamento.

O processamento continua até que todas as DD de ambigüidades sejam solucionadas. Devido a forte correlação entre as ambigüidades, a solução de uma delas contribui sobremaneira para solucionar as demais.

Esse método requer que a geometria dos satélites se altere, não se enquadrando como um método de solução rápida. No entanto, ele pode ser utilizado para calcular o vetor estado e a MVC das DD de ambigüidades para serem utilizados como entrada em outros métodos.

4.1.3.2 Método da Troca de Antena

O método da troca de antena (*antenna swap*) foi proposto por Remondi, o qual se enquadra nas técnicas de rastreamento especiais (HAN e RIZOS, 1997). Consiste na instalação de dois receptores (R_1 e R_2) em duas estações (i e j) distintas, que podem estar separadas de 2,0 a 5,0 m. É necessário que uma das duas estações tenha coordenadas conhecidas. Coleta-se dados por aproximadamente um minuto e, sem perder o contato com os satélites (*lock on*),

troca-se as antenas de posição, ou seja, a antena que estava ocupando a estação i passa a ocupar a estação j e vice-versa, e por fim coleta-se dados por mais um minuto (MONICO, 1996).

Fazendo uma combinação entre as equações de observação dos dados coletados no primeiro e no segundo momento, as DD das ambigüidades podem ser solucionadas. Considerando-se que $m+1$ satélites estão sendo rastreados, o modelo matemático desse método pode ser escrito como (MONICO, 1996):

$$E\left\{\begin{bmatrix} l_{DDi} \\ l_{DDj} \end{bmatrix}\right\} = \begin{bmatrix} B_i & N_m \\ B_j & -N_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{b} \\ \hat{n} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Uma ilustração desse método é mostrada na FIGURA 4.3:

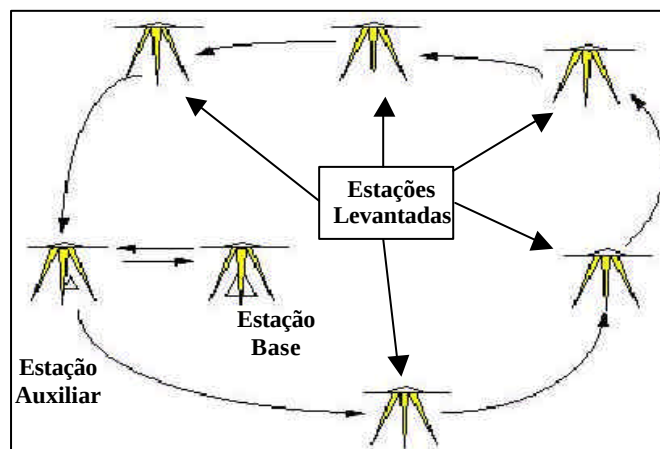


FIGURA 4.3 - Troca de Antena (Fonte - MONICO 2000)

Note que neste método, ao invés de esperar a geometria dos satélites se alterar, altera-se a geometria das antenas. No entanto, se ocorrer perda de ciclos, o processo deve ser repetido.

4.1.3.3 Combinações lineares entre as portadoras

Algumas combinações lineares entre as portadoras L1 e L2 apresentam importante papel no que diz respeito à solução das ambigüidades. Geralmente procura-se por combinações que produzam comprimentos de onda maiores e baixos níveis de ruído. Esse é o caso da combinação linear *wide lane*, com $\cong 86,2$ cm de comprimento de onda (TALBOT, 1991). Essa técnica se enquadra na técnica de solução da ambigüidade no domínio da observação (KIM & LANGLEY, 2000).

Para obter melhor precisão, tanto das componentes da linha de base, quanto das DD de ambigüidades, é necessário que outras combinações, como a L0 (*Ionospheric Free*), sejam utilizadas subseqüentemente no processo (TALBOT, 1991).

Com a inserção da terceira freqüência civil, prevista no processo de modernização do GPS, será possível aplicar uma combinação linear com comprimento de onda de 5,86 m, o que será benéfico para esse tipo de solução de ambigüidade (SANTOS, 2000).

4.1.3.4 Método de Euler/Landau

O método proposto por Euler e Landau em 1992 está baseado no MMQ com algoritmo de procura, se enquadrando nas técnicas de busca no domínio da ambigüidade (KIM & LANGLEY, 2000). Porém, devido ao esforço computacional, que inviabilizaria a solução rápida, aplica-se a decomposição de Cholesky, na MVC das DD de ambigüidades, antes da procura. A decomposição é dada por (MONICO, 1996):

$$Q_{\hat{n}}^{-1} = LL^T \quad (4.13)$$

Desta maneira, a equação (4.4) pode ser escrita como:

$$Z^T Z = \text{mínimo} \quad (4.14)$$

onde:

$$- Z^T = [(\hat{n} - n)]^T L$$

A cada elemento de Z calculado, um valor parcial de χ^2 pode ser calculado, o qual é testado contra um valor preestabelecido. Em caso de rejeição, o cálculo de χ^2 é interrompido e outro vetor de ambigüidade é testado. No caso de mais de um vetor ser aceito em uma determinada época, a procura continua na próxima época e, somente, os vetores aceitos são utilizados (MONICO, 1996).

4.1.3.5 Método FARA

O método FARA (*Fast Ambiguity Resolution Approach*) foi proposto por Frei em 1992, consiste na utilização do MMQ com algoritmo de procura, se enquadrando nas técnicas de busca no domínio das ambigüidades (KIM & LANGLEY, 2000). Intervalos de confiança são utilizados para comparações, ou seja, um intervalo para cada DD de ambigüidade “possível” e entre suas diferenças é criado (MONICO, 1996).

O resultado da procura fornece uma lista de possíveis conjuntos de ambigüidades, os quais são introduzidos no ajustamento como injunções e, o vetor que apresentar menor variância *a posteriori* é selecionado para a solução final.

4.1.3.6 Método LAMBDA

O método LAMBDA foi proposto por P.J.G. Teunissen em 1993, da Universidade de Tecnologia de Delft, na Holanda, o qual utiliza o MMQ associado com algoritmo de procura. Esse método também se enquadra nas técnicas de busca no domínio das ambigüidades (KIM & LANGLEY, 2000).

Como visto anteriormente, os métodos de procura podem não ser eficientes quando $Q_{\hat{n}}$ se apresenta bastante correlacionada, o que é comum no posicionamento NAVSTAR-GPS com intervalos de coleta pequenos. Para reverter essa situação, o método LAMBDA aplica uma transformação no espaço das ambigüidades originais, cujo objetivo é decorrelacionar $Q_{\hat{n}}$ (DE JONGE & TIBERIUS, 1996).

A transformação no conjunto das ambigüidades pode ser escrita como:

$$\hat{n}_Z = Z^T \hat{n} \quad (4.15)$$

onde:

– Z^T - matriz de transformação.

Aplicando-se a lei de propagação de covariâncias, obtém-se a MVC das DD de ambigüidades transformadas:

$$Q_{\hat{n}_Z} = Z^T Q_{\hat{n}} Z \quad (4.16)$$

Realizando-se a decomposição de Cholesky do tipo $L^T D^{-1} L^{-1}$ na $Q_{\hat{n}}$, e assumindo-se que Z seja exatamente igual à L , obtém-se:

$$Q_{\hat{n}_Z} = Z^T Q_{\hat{n}} Z = Z^T L^T D^{-1} L^{-1} Z = D^{-1} \quad (4.17)$$

onde:

– L é uma matriz triangular inferior e D é diagonal.

Isso tem como consequência a total decorrelação das DD de ambigüidades, o que seria ideal. Porém, para que as DD de ambigüidades no novo espaço também sejam inteiras, os elementos que compõem a matriz Z , e sua inversa, devem ser números inteiros. Além disso, deve ser garantido que a transformação preserve o volume do hiper-elipsóide do espaço de procura. (TEUNISSEN *et al*, 1995b).

Ao invés de aplicar a matriz Z inteira, pode-se aplicar uma seqüência de transformações 2-D. Neste caso, considerando que as matrizes L e D sejam particionadas como:

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & & \\ L_{21} & L_{22} & \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} D_{11} & & \\ & D_{22} & \\ & & D_{33} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

onde: as submatrizes L_{22} , L_{11} e L_{33} têm ordem igual a 2, $i-1$ e $amb-i-1$, respectivamente.

Aplicando-se uma matriz de transformação de ordem 2 na i -ésima e $i+1$ -ésima DD de ambigüidade, através de:

$$Z = \begin{bmatrix} I_{i-1} & & \\ & Z_{22} & \\ & & I_{n-i-1} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Se Z_{22} for diferente da matriz identidade, obtém-se a seguinte decomposição triangular:

$$L' = \begin{bmatrix} L_{11} & & \\ \bar{L}_{21} & \bar{L}_{22} & \\ L_{31} & \bar{L}_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \quad D' = \begin{bmatrix} D_{11} & & \\ & \bar{D}_{22} & \\ & & D_{33} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Onde os elementos que são alterados estão indicados com uma barra superior. Isso implica que ao invés de calcular a matriz Z inteira, pode-se aplicar sucessivas transformações nas matrizes L e D e obter uma nova MVC já decomposta.

Para obter uma MVC no espaço transformado, que tenha as características que se deseja, o método LAMBDA utiliza a transformação de Gauss, que, para o caso 2-d, é dada por (DE JONGE & TIBERIUS, 1996):

$$Gauss = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ a & 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Para obter total decorrelação, o valor de α deve ser igual à $l_{i+1,i}$. Porém, geralmente isso não resulta numa matriz composta por números inteiros. Então, utiliza-se $[l_{i+1,i}]$, onde $[.]$ retorna o inteiro mais próximo (DE JONGE & TIBERIUS, 1996).

Essa transformação resulta num conjunto de DD de ambigüidades com menor correlação e com menor desvio-padrão, tornando o espaço de procura original mais esférico (TIBERIUS *et al*, 1997).

A solução das DD de ambigüidades no novo espaço é calculada através do MMQ seqüencial condicionado e a equação (4.4) pode ser substituída por:

$$(\hat{n}_Z - n_Z)^T Q_{\hat{n}_Z}^{-1} (\hat{n}_Z - n_Z) = \min \quad (4.22)$$

A transformação reduz drasticamente o salto do espectro dos desvios-padrão condicionados das DD das ambigüidades apresentada no espaço original (FIGURA 4.1). Além disso, o número de candidatos no início do processo do MMQ seqüencial condicionado também é bastante reduzido

(FIGURA 4.2), viabilizando a solução rápida das ambigüidades. (TEUNISSEN, 1998b).

Por fim, após a procura, quando a solução é calculada, a transformação inversa é aplicada, a qual converterá o resultado para o espaço original.

Duas versões do código fonte desse método, uma em FORTRAN 77 e outra no Matlab, encontram-se disponíveis na página do Departamento de Geodésia da Universidade de Delft, seção de Geodésia Matemática e Posicionamento (TUDelft, 2001).

4.1.3.7 *Whitening Filter*

Este método foi proposto por Mohamed e Schwarz em 1998. Consiste na decorrelação da $\hat{Q}$, que é fortemente correlacionada em intervalos de coleta de dados pequenos. Portanto, se enquadra nas técnicas de busca no domínio das ambigüidades (KIM & LANGLEY, 2000).

O processo de decorrelação é realizado através de uma série intercalada de fatorizações do tipo LDL^T e UDU^T . O processo é similar ao método LAMBDA e termina quando a matriz L^{-1} , ou a U^{-1} , for igual à identidade (MOHAMED & SCHWARZ, 1998).

A solução das ambigüidades com a utilização do *whitening filter* depende da qualidade das ambigüidades *float*, que após a aplicação das transformações, tornam-se muito próximas do valor inteiro, quando se trata de bases curtas. A discriminação do vetor das ambigüidades correto é realizada pelo teste ratio (Eq. 4.27).

A similaridade com o método LAMBDA está no processo de decorrelação da MVC. No entanto, devido ao objetivo inicial do método ser o de proporcionar uma solução *float* com o menor desvio-padrão possível, não se aplica, inicialmente, o MMQ seqüencial condicionado. Caso a solução não passe no teste estatístico, recomenda-se aplicar o algoritmo de procura (MOHAMED & SCHWARZ, 1998).

4.1.4 Solução *fixed*

Por fim, após aplicar algum método de solução da ambigüidade, a solução *fixed* é calculada através do cálculo da influência da injunção nas componentes da linha de base (TEUNISSEN, 1998b):

$$\tilde{b} = \hat{b} - Q_{\hat{b}\hat{a}} Q_{\hat{a}}^{-1} (\hat{a} - \tilde{a}) \quad (4.23)$$

A MVC para a solução *fixed* é calculada a partir de:

$$Q_{\tilde{b}} = Q_{\hat{b}} - Q_{\hat{b}\hat{a}} Q_{\hat{a}}^{-1} Q_{\hat{a}\hat{b}} \quad (4.24)$$

4.2 Validação

Na seção anterior, descreveu-se acerca da estimação das DD de ambigüidades através do MMQ condicionado. Ressalta-se que sempre é possível estimar valores inteiros para ambigüidades. No entanto, antes de aceitar a solução recomenda-se verificar a qualidade desses parâmetros através do processo de validação da solução da ambigüidade (TEUNISSEN, 1998b).

A validação da solução da ambigüidade pode ser dividida em duas etapas: o teste de aceitação, que visa verificar a compatibilidade entre cada

vetor que satisfaz as bordas do espaço de procura com as observações GPS, e o teste de discriminação, que tem por objetivo comparar o quanto o vetor que produz a melhor solução difere da segunda melhor (WANG, 1999).

Assim como no controle de qualidade para o Filtro de Kalman, a validação da solução das ambigüidades está envolvida com testes estatísticos. Nesse caso, três hipóteses podem ser formuladas (TEUNISSEN, 1998b):

$$\begin{aligned} H_1 : l_{DD} &= Bb + Nn + v_{DD}, Q_{DD}, \text{ onde } b \in R^3, n \in R^{(amb)} \text{ e } v_{DD} \in R^m \\ H_2 : l_{DD} &= R^k, Q_{DD} \\ H_3 : l_{DD} &= Bb + N\tilde{n} + v_{DD}, Q_{DD}, \text{ onde } b \in R^3 \text{ e } v_{DD} \in R^m \end{aligned} \quad (4.25)$$

Na equação (4.25), a hipótese H_1 representa o modelo de observação sem injunção, cuja solução pelo MMQ proporciona a solução *float*. A hipótese H_2 é a mais relaxada e não impõe nenhuma restrição ao modelo. A hipótese H_3 representa o modelo de observação com injunção, cuja solução pelo MMQ é a *fixed*. É importante ressaltar que embora a hipótese H_3 considere o vetor $\tilde{n}$ como sendo determinístico e composto por elementos independentes, isso não ocorre na realidade. Porém, na prática isso não implica em maiores problemas (TEUNISSEN, 1998b).

Considerando-se que no momento de calcular a solução da ambigüidade a hipótese H_1 tenha sido validada através do controle de qualidade do Filtro de Kalman, (seção 2.4), resta validar o modelo representado pela hipótese H_3 .

O teste de aceitação é realizado através da validação da H_3 , a qual pode ser efetuada comparando-a contra H_2 ou H_1 . Porém, se H_3 for

comparada contra H_1 , a validação torna-se mais robusta. Para se testar H_3 contra H_1 , o seguinte teste pode ser utilizado (TEUNISSEN, 1998b):

$$(\hat{n} - \tilde{n})^T Q_{\hat{n}}^{-1} (\hat{n} - \tilde{n}) / amb s_0^2 < F_a(amb, \infty) \quad (4.26)$$

Embora o teste da equação (4.26) forneça subsídios para não se rejeitar um vetor, isso não significa que apenas um vetor passará no teste. Portanto, é necessário realizar o teste de discriminação entre os vetores não rejeitados. O teste de discriminação consiste em verificar o quanto o vetor que produz a menor unidade de variância *a posteriori* ($\tilde{n}_1$) é diferente do vetor que produz a segunda menor ($\tilde{n}_2$). Um dos testes de discriminação mais conhecido e utilizado é o teste ratio, o qual consiste na razão entre a unidade de variância *a posteriori* de $\tilde{n}_2$ e $\tilde{n}_1$, ou seja (TEUNISSEN, 1998b):

$$W_2/W_1 > e_r \quad (4.27)$$

onde:

- W_1 e W_2 representam a forma quadrática para $\tilde{n}_2$ e $\tilde{n}_1$, respectivamente, (Eq. 4.4);
- e_r é um valor crítico ($e_r > 1$) que pode ser definido empiricamente.

Embora alguns autores assumam que o teste da equação (4.27) tenha distribuição F, isso não representa a realidade, pois W_1 e W_2 não são estatisticamente independentes.

Outro teste de discriminação proposto é dado pela diferença entre W_1 e W_2 (TIBERIUS & DE JONGE, 1995):

$$\Delta W = W_2 - W_1 > e_{\Delta} \quad (4.28)$$

onde:

- e_{Δ} é o valor crítico, determinado empiricamente.

Como visto no teste da equação (4.28), a discriminação entre as ambigüidades é assumida suficiente quando a distância entre $\check{n}_2$ e $\hat{n}$ for suficientemente maior que a distância entre $\check{n}_1$ e $\hat{n}$. Testes preliminares mostraram que o valor de e_{Δ} pode ser 15, com sete satélites sendo rastreados (TIBERIUS & DE JONGE, 1995).

Teunissen propõe que $\check{n}_1$ e $\check{n}_2$ estejam suficientemente separados quando (TEUNISSEN, 1998b):

$$\check{s}_1^2 < F_{a_1}(amb, \infty)$$

e

$$(4.29)$$

$$\check{s}_2^2 > F_{a_2}(amb, \infty) \geq F_{a_1}(amb, \infty)$$

Neste caso, para que se tenha segurança que $\check{n}_2$ esteja suficientemente separado de $\check{n}_1$, deve-se escolher $F_{a_2}(amb, \infty)$ maior o suficiente do que $F_{a_1}(amb, \infty)$. Esta combinação de testes tem a vantagem da distribuição de probabilidade serem bem definidas (TEUNISSEN, 1998b).

5 IMPLEMENTAÇÃO: ASPECTOS PRÁTICOS E DESCRIÇÃO

A teoria do ajustamento recursivo e respectivo controle de qualidade foram apresentados no capítulo 02. Os modelos envolvidos no posicionamento com NAVSTAR-GPS foram apresentados no capítulo 03. Os aspectos inerentes à solução das ambigüidades, que é a chave do posicionamento preciso com GPS, foram apresentados no capítulo 04. Com o objetivo de unir os três capítulos anteriores, bem como relacionar a teoria com a prática, esse capítulo apresenta os métodos e estratégias adotados na implementação do software GPSseq.

O GPSeq é um software para processamento de dados oriundos de posicionamento relativo de linhas de base curtas com o NAVSTAR-GPS. Inicialmente o software utilizava o método seqüencial para solucionar as ambigüidades, atendendo apenas aplicações estáticas (MONICO, 1992). Posteriormente, tal software foi modificado durante um projeto de iniciação científica, financiado pela FAPESP, desenvolvido entre Agosto de 1997 e Agosto de 1998, período em que o método LAMBDA foi implementado para a solução rápida das DD de ambigüidades (MACHADO, 1998). Neste projeto de mestrado, implementou-se uma estratégia de processamento que permite a utilização do software, tanto para processamentos de dados coletados através de posicionamento relativo cinemático, quanto para relativo estático. Além disso, implementou-se uma rotina para controle de qualidade dos valores estimados pelo Filtro de Kalman, que está baseada no processo DIA.

5.1 Dados de entrada

O software requer como entrada, dados no formato RINEX 2 (*Receiver Independent Exchange Format*). Informações sobre esse formato podem ser encontradas em GURTNER & MADER (1990) e GURTNER (1994). O software desenvolvido processa apenas dados de simples frequência.

Além dos arquivos contendo as observações e os elementos necessários para calcular a posição dos satélites, o software requer um arquivo de entrada contendo o endereço de onde se encontram os arquivos RINEX (*path*), o valor limite para se assumir que as observações coletadas pelos receptores base e móvel são simultâneas, bem como a precisão das observações de fase de batimento da onda portadora (L1) e pseudodistância (C/A) e o número *Pseudo Random Noise* (PRN) do satélite base. Um exemplo do arquivo pode ser visto na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Arquivo de entrada do software GPSeq

c:\visitas\dados\2001\ilha\36\01630360.01o	rinex obs file station 1 (base)
c:\visitas\dados\2001\ilha\36\05790360.01o	rinex obs file station 2 (movel)
c:\visitas\dados\2001\ilha\36\01630360.01n	rinex navigation file (base)
0.10	synchronization
.003	standard deviation L1
0.3	standard deviation C/A
31	base satellite

5.2 Modelos matemáticos e estratégias adotadas

Nesta seção, são apresentados os modelos matemáticos e as estratégias de implementação adotados no desenvolvimento do software GPSeq.

5.2.1 Modelo funcional e estocástico

O modelo funcional implementado no software foi a DD da fase de batimento da onda portadora e da pseudodistância, as quais são descritas na seção (3.1.4), equações (3.5) e (3.6).

A escolha desse modelo funcional se deve a presença dos efeitos sistemáticos que degradam a precisão das observáveis GPS, os quais, se não forem adequadamente tratados, tornam o desvio-padrão de tais observáveis maior que o comprimento de onda, impossibilitando que as ambigüidades sejam estimadas como número inteiro. Uma outra possibilidade seria introduzir os efeitos sistemáticos como incógnitas no modelo matemático. Porém, devido à complexidade física de alguns efeitos, tais como troposfera e ionosfera, o posicionamento relativo tem sido largamente utilizado (GOAD, 1998).

Embora o processo de diferenciação seja útil no tratamento dos efeitos sistemáticos, a sua utilização impõe uma limitação no que se refere ao comprimento da linha de base envolvida no levantamento. Isso ocorre devido ao fato da correlação entre alguns efeitos sistemáticos, tais como ionosfera e troposfera, diminuir quando a linha de base aumenta (GOAD, 1998).

Tendo em vista que o modelo matemático utilizado no software GPSeq não modela os efeitos sistemáticos, sua utilização torna-se restrita a linhas de base curtas, que no caso do GPS pode ser em torno de 10 km, quando a atividade ionosférica está alta. Quando a atividade ionosférica não estiver no período de pico, o comprimento da linha de base pode ser em torno de 15 km, pois a partir desse comprimento os efeitos causados pela troposfera degradam a precisão das DD (GOAD, 1998).

Conforme descrito na seção (3.1.4), as DD podem ser calculadas através de duas técnicas, sendo elas: satélite base e sequencial. Na implementação do software GPSeq, as DD são calculadas a partir da técnica do satélite base, onde combina-se as observações oriundas de um dos satélites rastreados, o base, com as observações dos demais satélites. Porém, se ocorrer perda do sinal do satélite base não será possível calcular as DD, mostrando uma deficiência da técnica adotada.

No que se refere ao modelo estocástico, adotou-se o modelo descrito na seção (3.2). Esse modelo tem sido muito utilizado no decorrer dos anos, apresentando resultados satisfatórios na maioria das aplicações. Porém, para aplicações que requeiram solução instantânea das DD de ambigüidades, é indicada a adoção de um modelo que considere a influência da elevação dos satélites na precisão das observáveis, bem como a correlação temporal entre as observações, quando taxas de coleta pequenas são utilizadas. A definição de um modelo estocástico mais adequado para atender a solução das ambigüidades em tempo real ainda é um tópico que se encontra em pesquisa (HAN, 1997).

5.2.2 Cálculo das coordenadas dos satélites

O processo de estimação dos parâmetros das DD implementado no software GPSeq requer que a posição dos satélites seja calculada, pois suas coordenadas são assumidas como constantes nos modelos apresentados na seção (3.1.4).

As coordenadas dos satélites GPS podem ser calculadas através das efemérides transmitidas, ou interpoladas das efemérides produzidas por algum

centro de pesquisa, como o IGS. No entanto, como visto na seção (5.1), a solução adotada no software GPSeq requer a utilização das efemérides transmitidas, possibilitando que os dados sejam processados logo em seguida à coleta de dados. As efemérides IGU também permitem que os dados sejam processados logo após a coleta dos dados, porém não foi implementada a sua utilização pelo software.

Deve-se ressaltar que não é necessário calcular as coordenadas dos satélites para as duas estações utilizando o procedimento apresentado em (HOFMANN-WELLENHOF *et al*, 1997). É suficiente calculá-las, bem como a velocidade do satélite em cada componente (V_x , V_y e V_z), para uma das estações, por exemplo, a estação base. Conhecendo-se as coordenadas e suas velocidades para a estação base, bem como a diferença dos instantes de recepção entre as duas estações, pode-se calcular as coordenadas do satélite para a estação móvel.

Há dois instantes em que as coordenadas dos satélites podem ser calculadas, sendo eles o instante de transmissão e de recepção. No entanto, ambos não se apresentam sincronizados ao sistema de tempo GPS. Além disso, cuidado especial deve ser dado à não simultaneidade das observações. Portanto, quando as medidas das estações são sincronizadas ao instante de transmissão, geralmente, o instante de recepção não está sincronizado e vice-versa. A diferença entre os instantes de recepção da estação base com relação à estação móvel pode ser calculada através da seguinte equação:

$$\Delta t_r = t_{rb}^s - t_{rm}^s \quad (5.1)$$

onde:

- t_{rb}^s e t_{rm}^s - representam o instante de recepção da estação base e da estação móvel, respectivamente, com erro do relógio do satélite e receptor presentes.

A partir das considerações anteriores, observa-se que as coordenadas dos satélites para a estação base serão diferentes das coordenadas para a estação móvel, haja vista que para cada estação haverá, ou um instante de recepção diferente, ou instante de transmissão diferente, ou ambos.

Tendo em vista a dependência existente entre a posição dos satélites e o tempo, o instante de recepção deve ser corrigido dos erros do relógio dos satélites e do receptor. A importância de se corrigir o tempo de recepção está no fato das coordenadas dos satélites serem utilizadas no cálculo das distâncias geométricas entre os satélites e o receptor. As distâncias geométricas são utilizadas no cálculo do bloco da matriz de coeficientes referente às componentes da linha de base, bem como no vetor l_0 , onde se necessita de nível de precisão compatível com as observações (MONICO, 2000).

O erro do relógio do satélite é calculado a partir dos elementos de um polinômio de segunda ordem (Eq. 3.4) enviados nas efemérides transmitidas. Portanto, o tempo de recepção corrigido do erro do relógio do satélite é calculado através de:

$$t_r = t_r^s + dt^s \quad (5.2)$$

onde:

- t_r^s - é o tempo de recepção com erro do relógio do satélite e do receptor.

O cálculo do erro do relógio do receptor pode ser realizado através do processo de estimação por ponto convencional, onde o erro do relógio do receptor é uma das incógnitas. A estratégia adotada para o software GPSeq foi calcular o erro do relógio do receptor em função das pseudodistâncias e das distâncias geométricas entre os satélites e a estação. As distâncias geométricas são calculadas através dos valores aproximados das coordenadas da estação e das coordenadas dos satélites. Dessa maneira, o erro do relógio do receptor pode ser calculado através de:

$$dt_r = \left(\sum_{i=1}^m PD(i) - Dgeo(i) + c dt^s(i) \right) / cn_{sat} \quad (5.3)$$

onde:

- $Dgeo$ - distância geométrica entre o satélite e a estação.

Calculada a partir das coordenadas dos satélites e as coordenadas aproximadas da estação;

- c - velocidade da luz no vácuo;
- n_{sat} - número de satélites;

O erro do relógio do receptor, conforme apresentado (Eq. 5.3) é calculado através de uma média entre a diferença das pseudodistâncias observadas e as distâncias geométricas corrigidas do erro do relógio dos satélites. Neste caso, as coordenadas aproximadas desenvolvem um papel fundamental no resultado obtido para o cálculo do erro do relógio do receptor, sendo necessário dispor de coordenadas aproximadas com boa qualidade, pois, caso contrário, haverá

problema no cálculo das coordenadas dos satélites, o qual se propagará no cálculo dos elementos da matriz de coeficientes e do vetor l_0 , seção (3.3).

Outro efeito que deve ser considerado no cálculo das coordenadas do satélite é a rotação da Terra durante o intervalo de tempo de propagação do sinal, pois as coordenadas dos satélites são calculadas num sistema fixo à Terra (WGS-84, realização G-873) (SEEBER, 1993).

5.2.2.1 Rotação da Terra

Para que o cálculo da distância geométrica entre o satélite e o receptor seja realizado de maneira correta, deve-se corrigir as coordenadas dos satélites dos efeitos causados pela rotação da Terra durante a propagação do sinal. Isso ocorre devido ao processo de estimação das coordenadas estar baseado num sistema de coordenadas fixo a Terra (WGS-84 G-873), o qual acompanha seu movimento de rotação. Essa correção é realizada através de uma rotação em torno do eixo Z, de um ângulo α , o qual é definido por (SEEBER, 1993):

$$\alpha = w_T t \quad (5.4)$$

onde:

- w_T - é a velocidade de rotação da Terra;
- t - intervalo de tempo de propagação do sinal.

As coordenadas dos satélites, corrigidas da rotação da Terra, são calculadas por:

$$\begin{aligned} X_s &= X'_s \cos \alpha + Y'_s \sin \alpha \\ Y_s &= Y'_s \cos \alpha - X'_s \sin \alpha \\ Z_s &= Z'_s \end{aligned} \quad (5.5)$$

onde:

- X_s , Y_s e Z_s - coordenadas do satélite corrigidas da rotação da Terra;
- X'_s , Y'_s e Z'_s - coordenadas do satélite sem a correção da rotação da Terra.

5.2.3 Estimação recursiva e controle de qualidade

Devido ao número de observações, DD de pseudodistância e DD de fase de batimento da onda portadora, ser maior que o número de incógnitas no final do levantamento, necessita-se ajustar as observações para estimar o vetor dos parâmetros e sua MVC (GEMAEL, 1994).

Entretanto, a grande quantidade de observações que geralmente é coletada no posicionamento com NAVSTAR-GPS faz com que o Filtro de Kalman, apresentado na seção (2.3), torne-se uma ferramenta bastante adequada ao processo de estimação dos parâmetros para a solução *float*, razão pela qual foi o processo adotado no desenvolvimento do software, cujo modelo matemático funcional linearizado é dado pela equação (4.1).

Um fato importante a ser abordado diz respeito à matriz de transição do sistema dinâmico (Eq. 2.18). Observa-se que no posicionamento estático, tanto as componentes da linha de base, quanto às ambigüidades, não variam com o tempo. Sendo assim, a matriz de transição é igual à identidade, (Eq. 2.6), e a MVC do ruído branco do modelo dinâmico, (Eq. 2.20), é igual a zero. No caso do método cinemático, não há como construir a matriz de transição para os

parâmetros referentes às componentes da linha de base, tendo em vista que a trajetória e velocidade da antena são totalmente desconhecidas e imprevistas durante o levantamento. No entanto, a MVC do ruído branco do modelo dinâmico deve ser corretamente construída, associando-se um valor grande à variância relacionada com os parâmetros das componentes da linha de base. No processamento de linhas de base cuja velocidade esteja entre 0 e 5 m/s, pode-se adotar o valor de 10^6 . No caso das ambigüidades, a matriz de transição é identidade e a variância do ruído branco do modelo dinâmico é zero, pois elas não variam com o tempo.

Como visto na seção (2.3.1), para calcular os parâmetros propagados da época $k-1$ para a época k , valores aproximados devem ser atribuídos aos parâmetros a serem estimados (Eq. 2.22). Na implementação do software GPSeq, adotou-se os parâmetros estimados na época $k-1$ como valores aproximados da época k .

Devido ao fato do modelo matemático utilizado no posicionamento com NAVSTAR-GPS não ser linear, iterações devem ser empregadas. Portanto, dois parâmetros que caracterizam o critério de parada devem ser especificados, sendo eles: máximo de iterações, no caso do processo divergir, e o limiar das iterações, que seria o valor mínimo da diferença entre os valores estimados em duas iterações subsequentes, no caso do processo convergir. Os valores adotados no software GPSeq foram 15, para o máximo de iterações, e 0,0004 e 0,002 para a precisão da iteração referente às ambigüidades e coordenadas, respectivamente.

Na implementação do software GPSeq, o controle de qualidade do filtro de Kalman é realizado através do processo DIA, consistindo de três etapas: Detecção, Identificação e Adaptação (seção 2.4).

Verifica-se que o nível de significância do teste de detecção local, (Eq. 2.31), deve estar relacionado com o nível de significância do teste de identificação local (Eq. 2.36), conforme visto na seção (2.4.4) (CAMARGO, 1992). Para se calcular o nível de significância do teste de detecção é necessário atribuir um valor para o nível de significância do teste de identificação (Eq. 2.36). Na implementação do controle de qualidade para o software GPSeq, o valor do nível de significância adotado para o teste de identificação foi de 0,001 (SALZMANN, 1995).

Vale ressaltar que, para o DIA local, após um erro ser detectado através do teste global, as observações são testadas individualmente pelo teste local para ser possível identificar qual(is) observação(ões) está(ão) com erro. Neste momento, o vetor c_k , (Eq. 2.36), deve ser especificado. No caso do NAVSTAR-GPS, podem ocorrer erros grosseiros nas observáveis provenientes dos códigos, denominados de *outliers*, e perda de ciclos na fase de batimento da onda portadora. As *outliers* afetam as pseudodistâncias apenas nas épocas em que elas ocorrem. Portanto, se ocorrer uma *outlier* na época i , numa sequência de m medidas de pseudodistância, onde $1 < i < m$, o vetor c é definido como:

$$c_{out} = [0 \quad \dots \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \quad (5.6)$$

Verifica-se que o vetor c_{out} é composto por 0 para quase todos os elementos, onde o elemento de valor 1 corresponde quando a *outlier* ocorreu.

Como visto na seção (3.1.3.6), as perdas de ciclos afetam todas as observações subseqüentes à sua ocorrência. Portanto, se ocorrer uma perda de ciclos na época j , numa seqüência de m medidas de fase de batimento da onda portadora, onde $1 < j < m$, o vetor c_k é definido como:

$$c_{perda} = [0 \quad \dots \quad 0 \quad 1 \quad \dots \quad 1]^T \quad (5.7)$$

Ressalta-se que os elementos do vetor c_{perda} cujo valor é 0, antecedem a época j , ou seja, quando a perda de ciclos ocorreu. Os elementos com valor 1 representam as observações com influência da perda de ciclos, iniciando na época j . Embora a identificação das perdas de ciclos seja mais adequada a partir do DIA global, na implementação do software GPSeq, utilizou-se o teste local. Nesse caso, a perda de ciclo é identificada quando medidas subseqüentes de fase de batimento da onda portadora de um, ou mais satélites, não passarem no teste de identificação local, (Eq. 2.36), durante 10 épocas. Caso a perda de ciclos seja identificada, introduz-se uma nova DD de ambigüidade como incógnita no vetor dos parâmetros a serem estimados. A estatística GOM é calculada sem a utilização de janela e seu tempo de origem é a primeira época.

5.2.4 Solução *fixed*

Na estimação das DD de ambigüidades, utilizou-se o método LAMBDA, o qual requer como dados de entrada as DD de ambigüidades estimadas como números reais (solução *float*) e respectiva MVC, ambos provenientes do Filtro de Kalman. Dentre os métodos apresentados na seção (4.3), o LAMBDA se destaca por realizar uma transformação de decorrelação no espaço

das DD de ambigüidades originais, diminuindo o desvio-padrão e a correlação de tais parâmetros. Isto tem impacto positivo no processo de estimação pelo MMQ recursivo condicionado, o que torna o processo de cálculo das DD de ambigüidades mais eficiente, possibilitando uma redução no intervalo de tempo de coleta dos dados, (seção 4.3.6). Além dessas características, esse método também pode ser utilizado para estimar ambigüidades resultantes de combinações lineares, tais como: livre da ionosfera e *wide lane*.

No processo de estimação pelo Filtro de Kalman, os parâmetros estimados na última época possuem a melhor solução, pois esse estimador considera as informações de todas as épocas anteriores. Portanto, adotou-se como estratégia para solução das DD de ambigüidades a utilização da solução *float* da última época como dados de entrada para o LAMBDA. Após solucionar as DD de ambigüidades, o processo retorna ao início. Nessa etapa do processamento, as DD de ambigüidades são introduzidas como constantes no modelo matemático funcional, restando apenas os três parâmetros referentes às componentes da linha de base. Neste caso, o modelo dado pela equação (4.1) é substituído por:

$$l_{DD} - Nn = Bb + v_{DD} \quad (5.8)$$

Com esse procedimento, a probabilidade de solucionar as DD de ambigüidades corretamente aumenta e, por consequência, as coordenadas de todos os pontos rastreados podem ser estimadas com alta precisão, inclusive os do início do rastreo.

Uma outra opção seria adotar a suavização. Porém, esse processo requer que os parâmetros estimados e a respectiva MVC de todas as épocas sejam armazenados, ocupando maior memória computacional. Ressalta-se

que na estratégia adotada, apenas as DD de ambigüidades estimadas precisam ser armazenadas.

Com o objetivo de verificar a metodologia adotada na solução das DD de ambigüidades, quatro gráficos foram plotados, os quais mostram a variação temporal das discrepâncias nas coordenadas cartesianas calculadas na solução *float* e *fixed* durante 200 épocas de dados coletados. Utilizou-se dados provenientes de um levantamento que utilizou a técnica de posicionamento relativo estático e de um relativo cinemático. No caso estático, os dados foram coletados no dia de 033 2001 e os resultados foram comparados com os do software GPSurvey. A Figura 5.1 mostra as discrepâncias entre as coordenadas estimadas pela solução *float* e *fixed* para o caso estático.

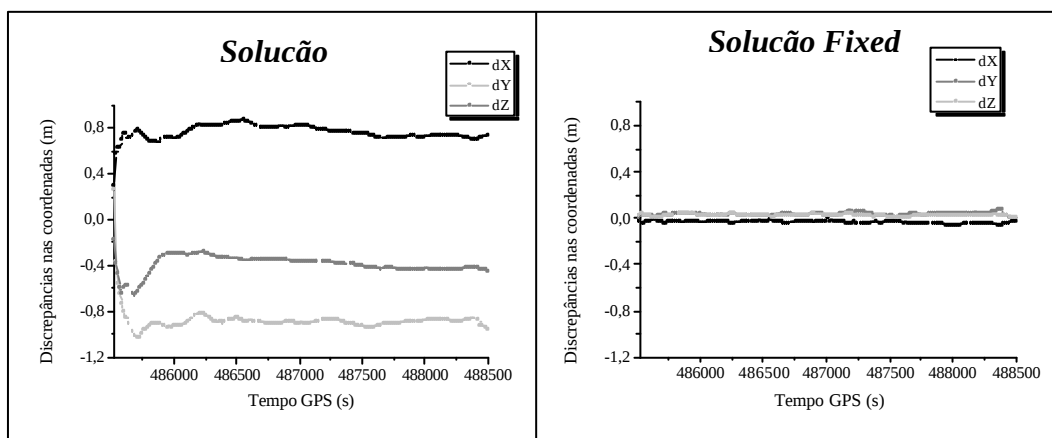


FIGURA 5.1 – Discrepâncias nas coordenadas X,Y e Z para as soluções *float* e *fixed* (estático)

Verifica-se, a partir da Figura 5.1, que as discrepâncias máximas na solução *float* para a linha de base processada chegaram a aproximadamente 0,865 m, 1,023 m e 0,659 m, as médias foram de 0,755 m, -0,883 m e -0,394 m e as discrepâncias mínimas de 0,30 m, 0,260 e 0,170 m, para as coordenadas X, Y e Z, respectivamente. Na solução *fixed* as maiores discrepâncias encontradas

foram de 0,067 m, 0,075 m e 0,039 m, as médias foram de -0,039 m, 0,031 m e 0,023 m e as menores de -0,006 m, -0,003 m, 0,000 m, para as coordenadas X, Y e Z respectivamente.

No caso cinemático, os dados foram coletados no dia 121 de 2001 e os resultados foram comparados com os do software Reliance. A Figura 5.2 mostra as discrepâncias entre as coordenadas estimadas pela solução *float* e *fixed* para o caso cinemático.

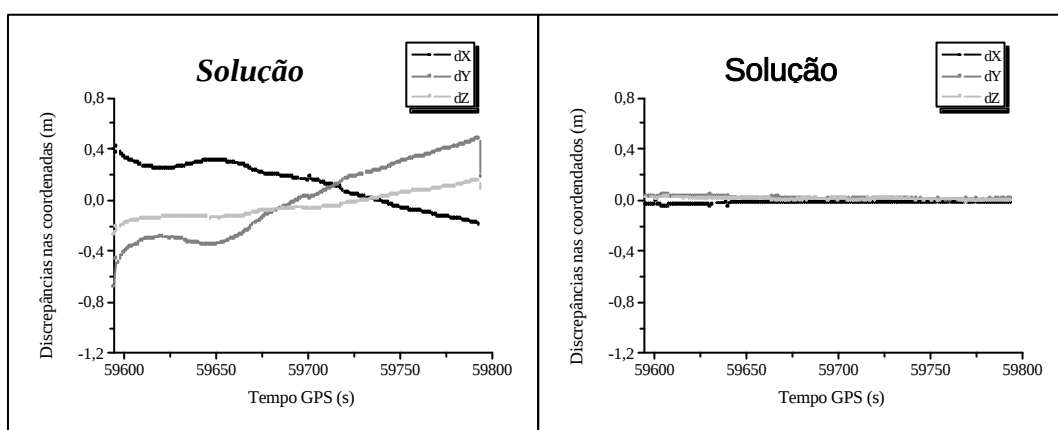


FIGURA 5.2 – Discrepâncias nas coordenadas X,Y e Z para as soluções *float* e *fixed* (cinemático)

A partir da Figura 5.2, verifica-se que as maiores discrepâncias na solução *float* da linha de base processada foram de 0,413 m, -0,673 m e -0,276 m, as médias foram de 0,124 m, -0,010 m e -0,048 m e as menores foram de 0,002 m, 0,002 m e 0,001m, para as coordenadas X,Y e Z, respectivamente. As discrepâncias máximas da solução *fixed* foram de -0,052 m, 0,044 m, 0,022 m, as médias foram de -0,0217 m, 0,0128 m e 0,006 m, e as mínimas foram de 0,010 m, 0,000 m e 0,000 m, para as coordenadas X,Y e Z, respectivamente.

Como pode ser observado nas figuras 5.1 e 5.2, a estratégia adotada possibilita que as coordenadas de todas as épocas sejam estimadas pela solução *fixed*.

O fluxograma do software GPSeq pode ser visto na Figura 5.3.

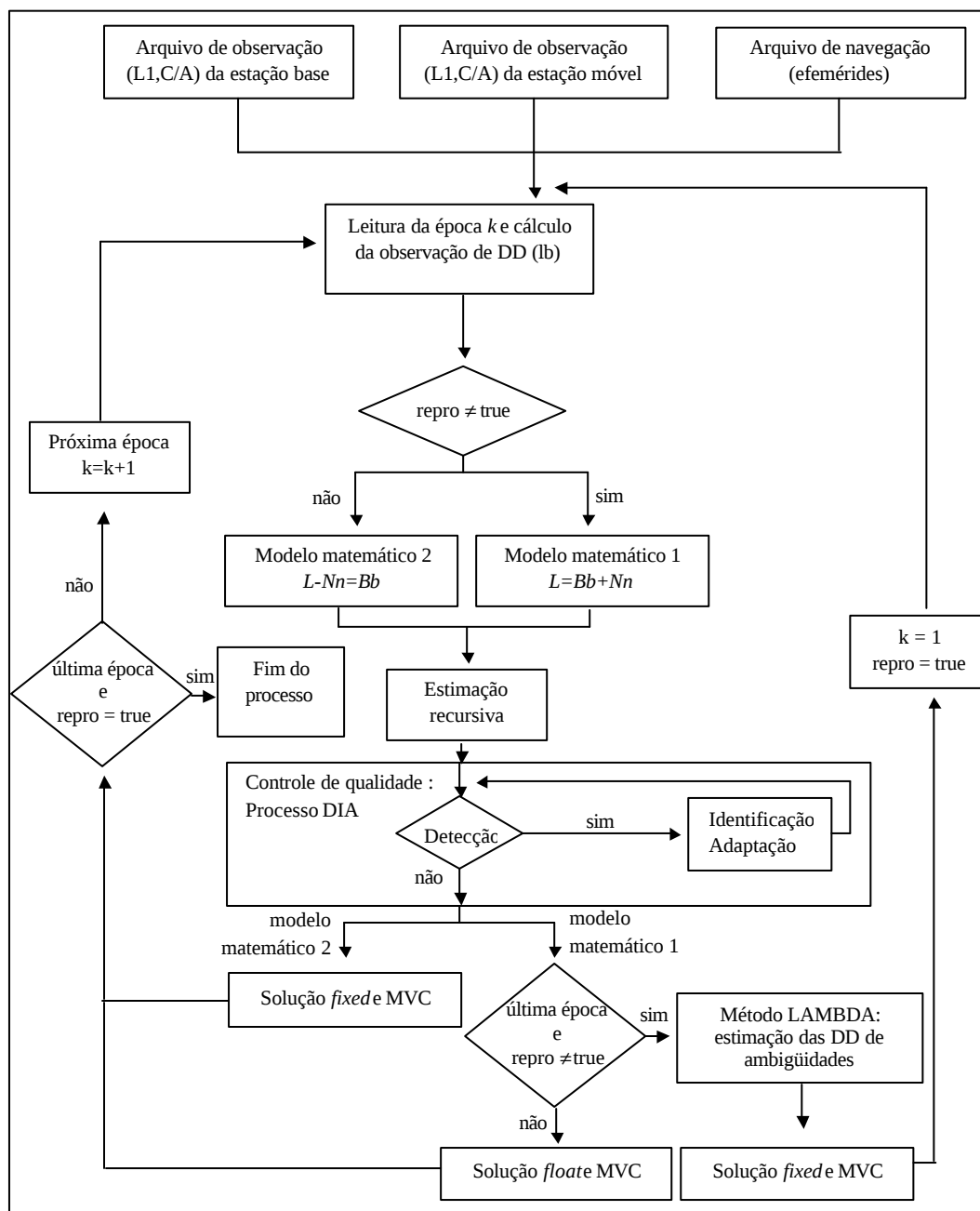


FIGURA 5.3 - Fluxograma do software GPSeq

6 EXPERIMENTOS: COLETA DE DADOS, PROCESSAMENTO E ANÁLISE

Nos capítulos anteriores, a teoria e os aspectos de implementação do software GPSeq foram apresentados. Com objetivo de avaliar o desempenho atual do referido software, este capítulo apresenta os resultados obtidos em alguns experimentos realizados.

Foram realizados dois experimentos. O primeiro visa verificar o impacto de se utilizar o modelo dinâmico para posicionamento cinemático em dados oriundos de levantamento relativo estático. O segundo, tem como objetivo verificar o desempenho do software GPSeq na solução das DD de ambigüidades, no processamento de dados coletados através de posicionamento relativo cinemático. Em ambos experimentos, os resultados do GPSeq foram comparados com softwares de processamento GPSurvey e Reliance. Além disso, um estudo inicial sobre o controle de qualidade da solução das DD de ambigüidade foi realizado.

Inicialmente, apresenta-se uma descrição dos softwares comerciais utilizados nos experimentos. Em seguida, apresentam-se as configurações utilizadas na coleta dos dados oriundos de posicionamento relativo estático, os processamentos realizados, os resultados obtidos e sua análise. Apresentam-se, também, as configurações envolvidas na coleta dos dados coletados através do posicionamento relativo cinemático, os processamentos realizados e a análise dos resultados.

6.1 Softwares comerciais utilizados

Nesta seção, apresenta-se uma breve descrição dos softwares comerciais utilizados.

6.1.1 GPSurvey

O software *GPSurvey* 2.10, da Trimble, processa dados GPS levantados através de posicionamento relativo estático, cinemático e estático rápido, nas portadoras L1 e/ou L1/L2. Este software de processamento de dados GPS é composto por módulos de aplicativos para: planejamento, comunicação entre o computador e o receptor, para transferência de arquivos; pós-processamento, ajustamento de rede, transformação de coordenadas e exportação dos resultados em arquivos padrão CAD.

Os principais módulos desse software são listados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Módulos e funções do GPSurvey

Módulo	Função
Plan	Planejamento com habilidade para armazenar informações no projeto
Quick Plan	Planejamento sem habilidade para armazenar informações no projeto
GPLoad	Comunicação de dados entre: 1. receptores e GPSurvey 2. dados selecionados de coletoras e GPSurvey
WAVE	Pós-processamento de observações oriundas de posicionamento estático, estático-rápido e cinemático
GPTrans	Transformação de coordenadas baseada em parâmetros de transformação pré-definidos ou derivados
TRIMNET Plus	Ajustamento de rede pelo MMQ dos resultados oriundos dos dados GPS (pós-processados ou em tempo real) e dados convencionais

No que se refere ao processamento de dados coletados através de levantamentos relativo estático, para este software solucionar as ambigüidades, é necessário que a estação móvel seja rastreada por, pelo menos, 20 minutos. No processamento de dados oriundos de levantamentos relativos semi-cinamáticos,

ou cinemáticos, é necessário que o receptor móvel tenha realizado um processo de iniciação, o qual deve permanecer por ,no mínimo, 20 minutos estacionado numa única estação. O controle de qualidade da solução *fixed* implementado no GPSurvey é o teste ratio (Eq 4.27).

6.1.2 Reliance 3.13

O software Reliance Processor versão 3.13 da Ashtech, foi desenvolvido pela Magellan Corporation. Este software processa observações de pseudodistância e de fase de batimento da onda portadora referentes apenas à portadora L1. As observações podem ser provenientes de posicionamento relativo estático, semi-cinemático ou cinemático. Suas ferramentas proporcionam soluções cujo nível de acurácia varia do metro ao centímetro. No último caso, a solução das ambigüidades da fase de batimento da portadora está implícita. O Reliance é composto por módulos de aplicativos, sendo eles para gerência de banco de dados, visualização geográfica e cronológica dos dados, pós-processamento, conversor RINEX, filtragem de dados do projeto, transformação de sistemas de coordenadas, exportação em arquivos do tipo ASCII, ambiente CAD e SIG.

No processamento de dados coletados a partir de posicionamento relativo estático, semi-cinemático e cinemático, o Reliance necessita que a estação móvel seja rastreada por um tempo igual ou superior a 25 minutos e não requer processo de iniciação do receptor móvel.

6.2 Experimentos realizados

Os experimentos realizados com o software GPSeq são apresentados nesta seção. Foram realizados dois tipos de experimentos. No primeiro, processou-se dados provenientes de levantamento relativo estático, que foram processados no GPSeq utilizando-se modelo dinâmico para posicionamento estático e cinemático. Com objetivo de verificar a qualidade dos resultados, estes foram comparados com os do GPSurvey. No último experimento, dados oriundos de posicionamento relativo cinemático, com modelo dinâmico adequado para esse tipo de levantamento. Os resultados foram comparados com o Reliance. Em ambos os experimentos, verificou-se os valores dos testes ratio e Ω , no momento em que a ambigüidade foi solucionada corretamente, bem como o comportamento temporal de tais estatísticas.

6.2.1 Posicionamento relativo estático

Nos experimentos envolvendo o método relativo estático, processou-se dados de 6 linhas de base, os quais foram coletados na cidade de Ilha Solteira, na região Noroeste do Estado de São Paulo, nos dias 031, 033, 036 e 038 de 2001. Utilizou-se um par de receptores 4600 LS da Trimble, que armazenam dados de simples frequência (L1 e C/A). A duração da coleta dos dados foi de 40 minutos por linha de base, com taxa de coleta de 15 segundos, resultando em um total de 200 épocas. A máscara de elevação utilizada foi de 15°. O comprimento das linhas de base variou de aproximadamente 5,0 km a 9,5 km, como pode ser visto na Figura 6.1.

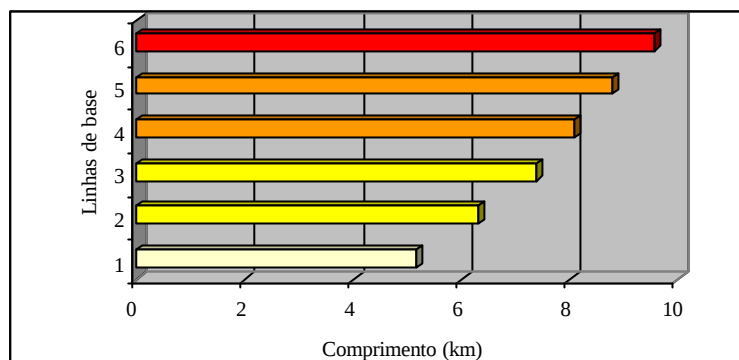


FIGURA 6.1 - Comprimento das linhas de base (estático)

Um outro fator que merece atenção na análise dos resultados obtidos no processamento de dados NAVSTAR-GPS é a geometria dos satélites envolvidos nos levantamentos, pois ela está vinculada à precisão com que os parâmetros podem ser estimados. Neste experimento, analisou-se apenas o número de satélites, como pode ser visto na Figura 6.2.

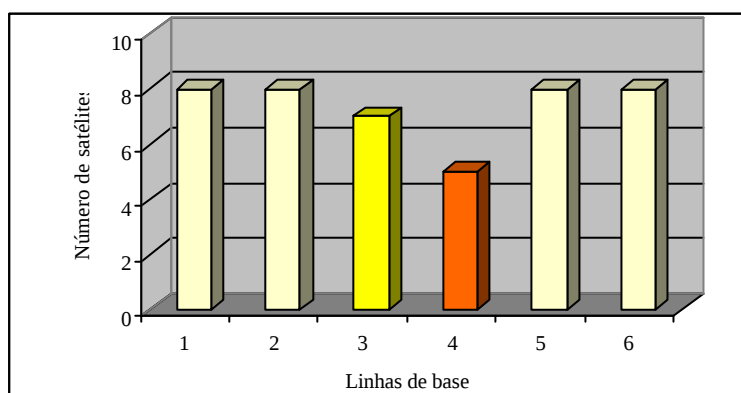


FIGURA 6.2 - Número de satélites observados em cada linha de base (estático)

A partir da Figura 6.2, verifica-se que a linha de base 4 observou dados do menor número de satélites, com 5. A linha de base 6 observou dados de 7 satélites. As demais linhas de base observaram dados de 8 satélites. Esta constelação deve proporcionar uma boa geometria de satélites para se solucionar as DD de ambigüidades.

No que diz respeito à solução das ambigüidades, é conveniente analisar o ADOP, pois seu valor permite verificar com qual precisão a geometria dos satélites permite que as ambigüidades sejam estimadas. A Figura 6.3 mostra os valores do ADOP no processamento do GPSeq com modelo dinâmico para posicionamento cinemático e para estático.

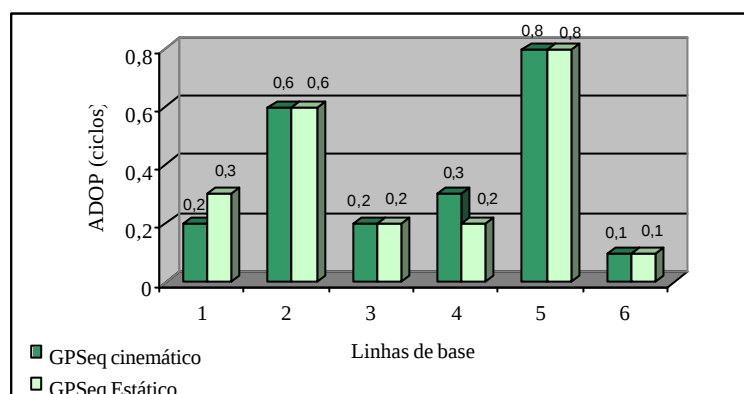


FIGURA 6.3 - ADOP (estático)

Como visto na seção 3.4, espera-se que a solução das ambigüidades ocorra com valores de ADOP de poucos décimos de ciclos. No entanto, as linhas de base 2 e 5, que apresentaram o menor intervalo de tempo de solução, apresentam valores próximos de 1 ciclo. Além disso, verifica-se que não há diferenças entre os valores do ADOP no processamento dos dados com o GPSeq com modelo dinâmico para posicionamento cinemático e estático, na maioria das linhas de bases processadas.

Os dados provenientes dos levantamentos acima descritos foram processados no GPSeq com modelo dinâmico para posicionamento estático e cinemático. Esse experimento teve como objetivo avaliar o desempenho do GPSeq, ao adotar-se o modelo dinâmico para posicionamento cinemático no

processamento de dados provenientes de posicionamento relativo estático. Ambos processamentos foram comparados com os resultados do GPSurvey.

Processou-se os dados coletados em todas as 200 épocas no software GPSeq. Com esse procedimento, os valores das DD de ambigüidades assumidas como corretas foram calculados, o que forneceu subsídios para se realizar uma análise com relação ao intervalo de tempo mínimo necessário para solucionar as DD de ambigüidades. O intervalo de tempo necessário para calcular as DD de ambigüidades corretas, para cada linha de base processada, pode ser visto na Figura 6.4.

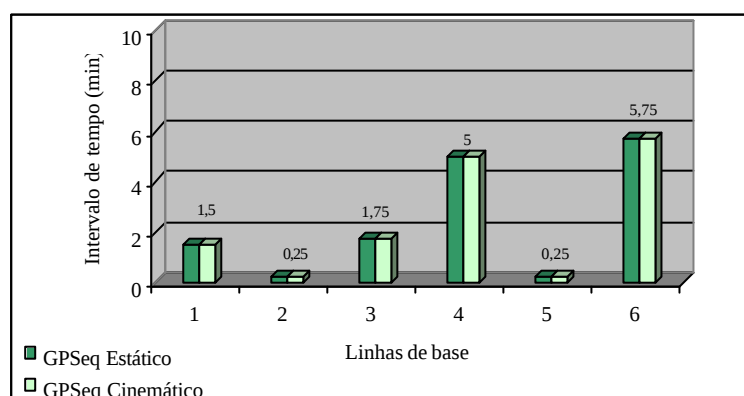


FIGURA 6.4 - Intervalos de tempo para solução das DD das ambigüidades no GPSeq com modelo estático e GPSeq com modelo cinemático

A partir da Figura 6.4, observa-se que o GPSeq utilizou dados de no mínimo 0,25 min e no máximo 5,75 min, mostrando a eficiência proporcionada pelo método LAMBDA. Muito embora, o controle de qualidade estatístico não tenha sido analisado. Além disso, observa-se que a utilização do modelo dinâmico para posicionamento cinemático no processamento de dados coletados através do método relativo estático não afetou de forma negativa o intervalo de tempo da solução, tendo em vista que ambas as soluções ocorreram com a mesma quantidade de dados.

Verifica-se que o valor do ADOP para as linhas de base 2 e 5 foram os piores (Figura 6.3), mesmo sendo as linhas de base que tiveram as ambigüidades solucionadas com menor quantidade de dados (Figura 6.4). Isso mostra que a geometria dos satélites não foi o fator que mais influenciou na quantidade de dados necessário na solução da ambigüidade.

Como visto na Figura 6.4, os processamentos das linhas de base 4 e 6 necessitaram de maior quantidade de dados para solucionar as DD de ambigüidades, o que poderia ser justificado devido ao comprimento da linha de base de tais estações serem maiores. No entanto, a linha de base 5, que tem comprimento maior que a linha de base 4, necessitou de apenas 1 época de dados. Por isto, decidiu-se avaliar a qualidade das observações envolvidas no processamento através da estatística GOM. A Figura 6.5 apresenta o valor calculado para a estatística GOM nas linhas de base processadas.

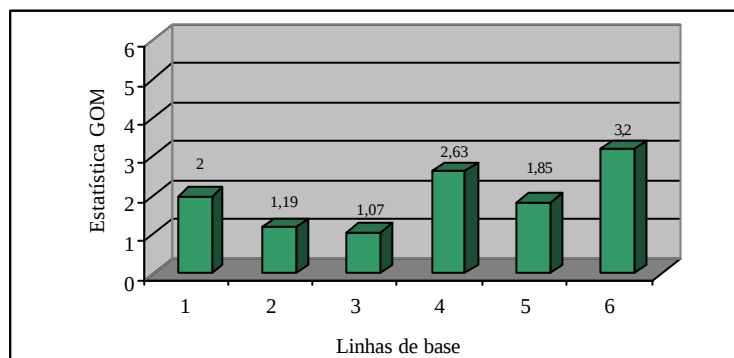


FIGURA 6.5 - Estatística GOM (estático)

Observa-se, a partir da Figura 6.5, que as linhas de base que apresentaram os maiores valores para a estatística GOM foram a 4 e a 6. Isto mostra que as observações de DD envolvidas nessas duas linhas de base contêm maior quantidade de erros sistemáticos remanescentes, cujas fontes podem ser tanto da atmosfera, quanto de sinais refletidos.

Uma outra análise que pode ser realizada está relacionada com o número de satélites e o comprimento da linha de base. Observa-se, a partir da Figura 6.4 que o intervalo da solução das DD de ambigüidades para as linhas de base 4 e 6 foram elevados, se comparados com as demais linhas de base. No caso da linha de base 4, o levantamento foi realizado com o menor número de satélites, Figura 6.2. Quanto à linha de base 6, o fator que, provavelmente, está influenciando o intervalo da solução é o resíduo devido aos efeitos atmosféricos remanescentes nas observações de DD, tendo em vista se tratar da linha de base mais longa.

No que se refere à qualidade das coordenadas, realizou-se uma comparação entre os resultados do GPSurvey e do GPSeq. No processamento com o GPSurvey, utilizou-se todos os dados disponíveis das seis linhas de base processadas. No caso do GPSeq, utilizou-se dados coletados dentro do intervalo de tempo citado anteriormente, (Figura 6.4). As diferenças máximas e mínimas das coordenadas, bem como o Erro Médio Quadrático (EMQ) das diferenças podem ser vistas na Figura 6.6.

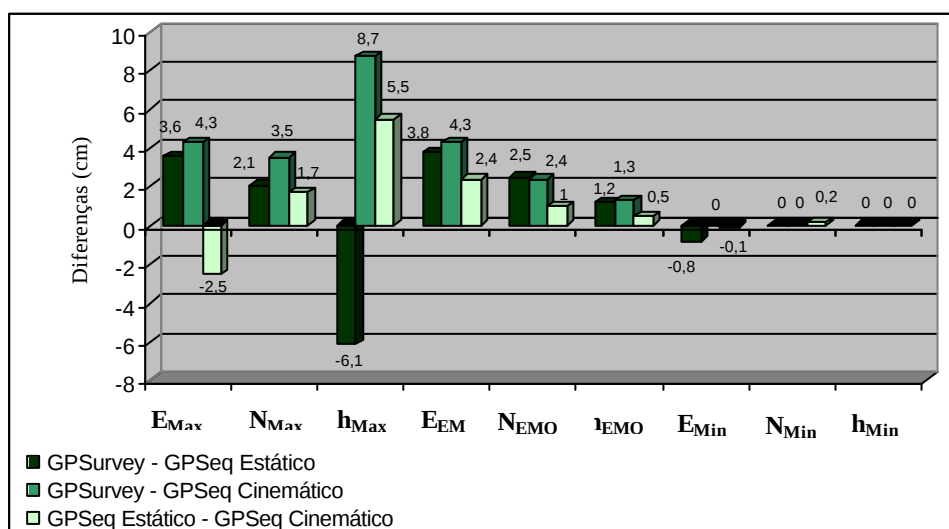


FIGURA 6.6 - Diferenças das coordenadas (estático)

Como pode ser visto na Figura 6.6, as maiores discrepâncias ocorreram entre as coordenadas calculadas pelo GPSurvey e o GPSeq utilizando o modelo dinâmico para posicionamento cinemático. Observa-se que o pior resultado ocorreu na componente altimétrica, cuja discrepância atingiu 8,7 cm. As maiores discrepâncias nas componentes horizontais foram de aproximadamente 4,0 cm e 3,5 cm, para as componentes E e N, respectivamente. Verificou-se, que as discrepâncias menores ocorreram entre as coordenadas calculadas pelo GPSeq com modelo cinemático e estático, mostrando que o resultado decorrente de ambas as soluções são compatíveis. Os erros médios quadráticos (EMQ) mostram que a solução do GPSeq e GPSurvey, para as linhas de base processadas, está compatível no nível de aproximadamente 4,0 cm, enquanto que a solução do GPSeq com modelo dinâmico para posicionamento cinemático está compatível na ordem de 2,4 cm com a do GPSeq com modelo dinâmico para posicionamento estático.

Com objetivo de iniciar um estudo com relação ao controle de qualidade para a solução das ambigüidades no posicionamento relativo estático, analisou-se os valores da estatística ratio na época em que a solução da DD de ambigüidade ocorreu, Figura 6.4. Os valores calculados no GPSurvey, no GPSeq com modelo dinâmico para posicionamento cinemático e no GPSeq com modelo dinâmico para posicionamento estático são apresentados na Figura 6.7.

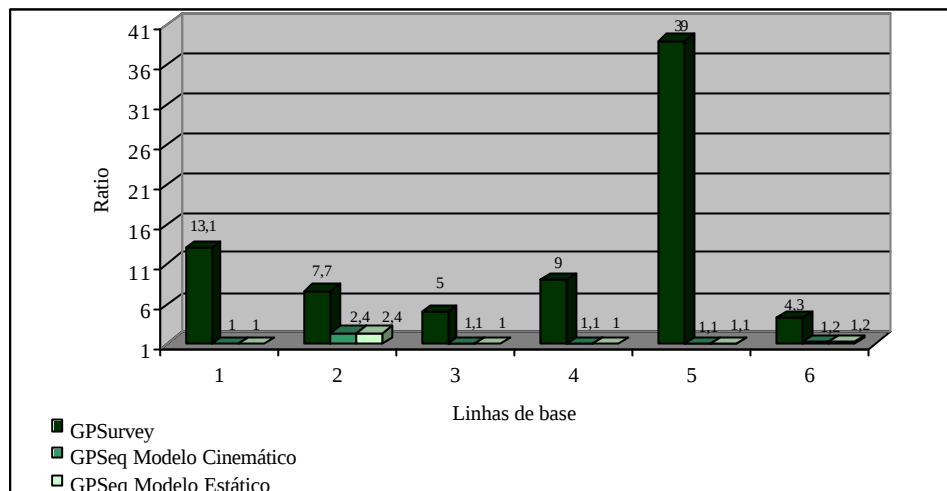


FIGURA 6.7 - Estatística ratio (estático)

Como visto na seção 4.2, a estatística ratio é calculada através da razão entre a unidade de variância *a posteriori* das duas melhores soluções (Eq. 4.27). Quanto maior o seu valor, maior a segurança em se fixar as DD de ambigüidades. A partir da Figura 6.7, verifica-se que os valores da estatística ratio calculados pelo GPSurvey são bem melhores do que os calculados pelo GPSeq. Isto ocorreu devido ao GPSurvey ter utilizado os dados das 200 épocas no processamento, enquanto o GPSeq utilizou a quantidade mínima de dados (Figura 6.4). Nota-se que os valores calculados pelo GPSeq, salvo para a linha de base 2, não oferecem segurança para se fixar as DD de ambigüidades.

Observa-se também, que os valores calculados para o GPSeq com modelo dinâmico para posicionamento cinemático e estático não apresentam diferenças, mostrando, mais uma vez, que as soluções são compatíveis.

Devido aos valores que a estatística ratio apresentou nas condições limite da solução das DD de ambigüidades, resolveu-se verificar o seu

comportamento temporal. O comportamento da estatística ratio para o GPSeq com modelo dinâmico para posicionamento estático pode ser visto na Figura 6. 8.

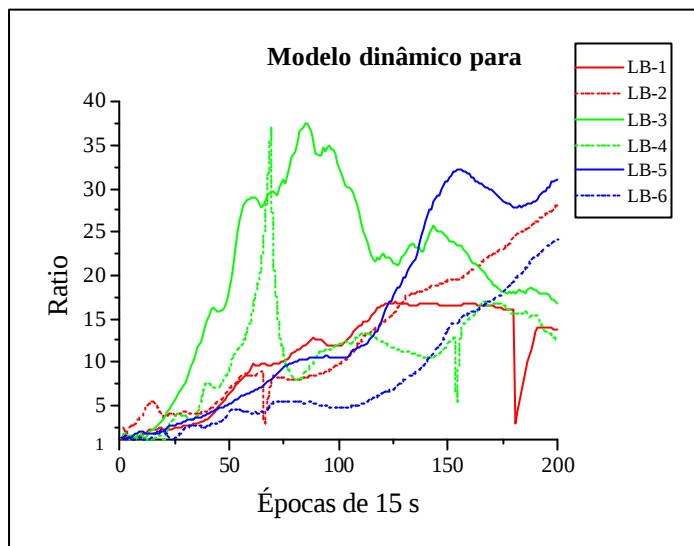


FIGURA 6.8 - Comportamento da estatística ratio (estático com modelo dinâmico para estático)

Analisando os resultados apresentados na Figura 6.8, verifica-se que os valores da estatística ratio tendem a melhorar quanto maior a quantidade de dados processados. Com base nesta estatística, seria necessário coletar dados por, aproximadamente, 25 épocas para que a solução das DD de ambigüidades seja aceita no teste de qualidade das linhas processadas.

O comportamento da estatística ratio para o GPSeq com modelo dinâmico para posicionamento cinemático pode ser visto na Figura 6.9.

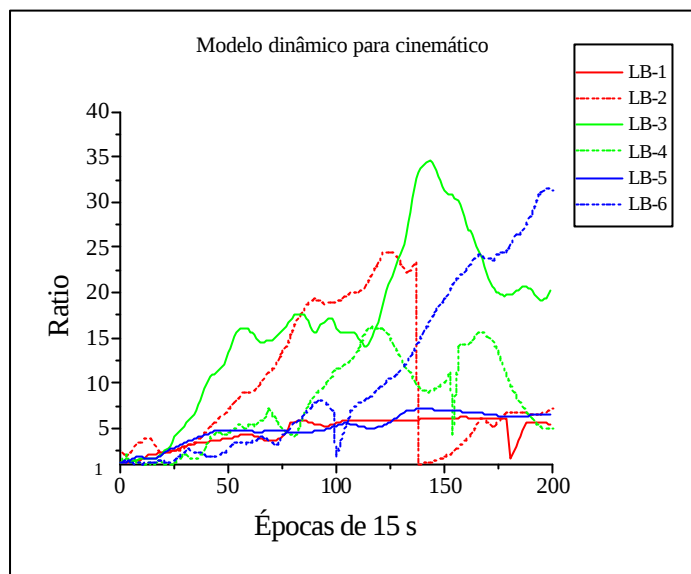


FIGURA 6.9 - Comportamento da estatística ratio (estático com modelo dinâmico para cinemático)

Analogamente aos resultados apresentados na Figura 6.9, verifica-se que, no processamento de dados coletados através de posicionamento relativo estático e com a utilização do modelo dinâmico para posicionamento cinemático, o valor da estatística ratio tende a aumentar, quanto maior a quantidade de dados, conforme apresentado na Figura 6.9. Neste caso, para a solução das DD de ambigüidades ser aceita por este teste discriminação seria necessário utilizar dados de 35 épocas, aproximadamente.

Comparando-se os resultados das Figuras 6.8 e 6.9, verifica-se que a estatística ratio apresenta um comportamento ascendente conforme a quantidade de dados envolvida aumenta, conforme esperado. Observa-se, também, a presença de alguns saltos na série temporal, os quais ocorreram, ou com introdução de mais uma incógnita, no caso de um satélite começar a ser rastreado, ou quando o valor da estatística GOM sofre um salto. Além disso, nota-se que no processamento dos dados com a utilização do modelo dinâmico

para posicionamento cinemático, necessitaria-se de cerca de 10 épocas a mais de coleta de dados para que a solução das DD de ambigüidades seja aceita no teste de discriminação, se comprado com o resultado obtido no processamento dos dados com a utilização de modelo dinâmico para posicionamento estático.

Analisou-se, em paralelo à estatística ratio, o valor da diferença entre a forma quadrática do vetor dos resíduos que proporcionou a melhor unidade de peso *a posteriori* e a do vetor que proporcionou a segunda melhor. Ao valor calculado por este procedimento, denominou-se de $\Delta\Omega$, neste trabalho. Os valores da estatística $\Delta\Omega$, no momento em que a solução das DD de ambigüidades ocorreu, podem ser vistos na Figura 6.10.

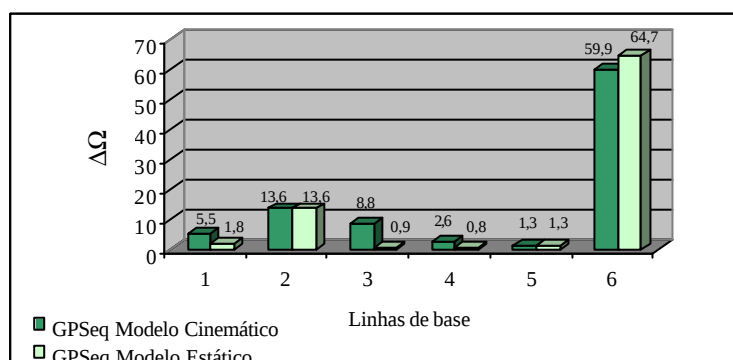


FIGURA 6.10 - Estatística DW (estático)

Verifica-se, a partir da Figura 6.10, que há uma compatibilidade entre as soluções do GPSeq com modelo dinâmico estático e cinemático. No caso das linhas de base 1, 3 e 4, o valor de $\Delta\Omega$ no GPSeq com modelo dinâmico para posicionamento cinemático até foi melhor do que para o GPSeq com modelo dinâmico para estático.

No entanto, os valores de $\Delta\Omega$ não proporcionam segurança para se fixar as ambigüidades, salvo para a linha de base 6. Ressalta-se que a

quantidade mínima de dados para se solucionar as DD de ambigüidades foi utilizada.

Assim como para a estatística ratio, analisou-se o comportamento temporal da estatística $\Delta\Omega$. A Figura 6.11 mostra o comportamento temporal da estatística no processamento dos dados utilizando modelo dinâmico para posicionamento estático.

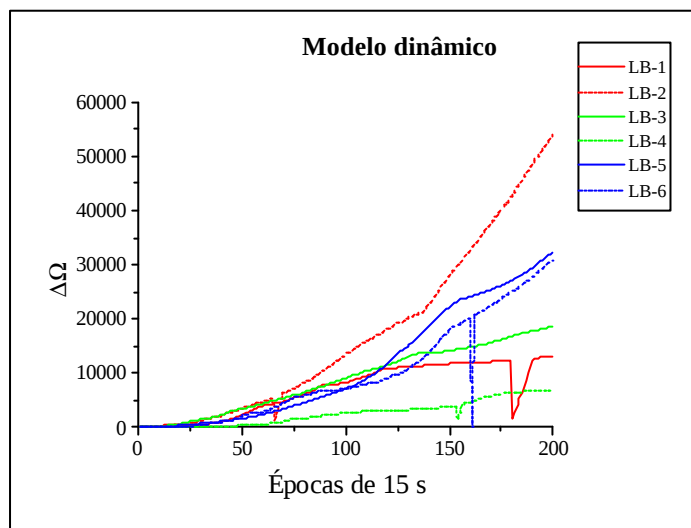


FIGURA 6.11 - Comportamento da estatística DW (estático com modelo dinâmico para estático)

A partir da Figura 6.11, observa-se que o comportamento da estatística $\Delta\Omega$ tende a melhorar com o aumento da quantidade de dados, chegando a valores bastante elevados. Neste caso, o vetor das DD de ambigüidades seria discriminado através deste teste antes de 50 épocas.

A Figura 6.12 apresenta o comportamento temporal da estatística $\Delta\Omega$ no processamento com modelo dinâmico para posicionamento cinemático.

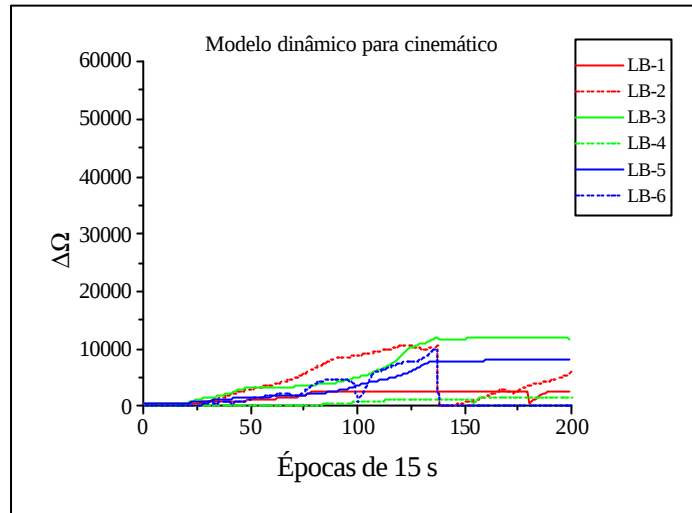


FIGURA 6.12 - Comportamento da estatística DW (estático com modelo dinâmico para cinemático)

Observando-se a Figura 6.12, verifica-se que o comportamento da estatística $\Delta\Omega$ no processamento com modelo dinâmico para posicionamento cinemático tende a melhorar com o aumento da quantidade de dados. Porém, se comparado com o resultado apresentado na Figura 6.11, observa-se que os valores da $\Delta\Omega$ são bem menores. Com a utilização desta estatística, o vetor das DD de ambigüidades poderia ser discriminado a partir de, aproximadamente, 50 épocas de coleta de dados.

6.2.2 Posicionamento relativo cinemático

Os experimentos realizados para avaliar o desempenho do software GPSeq no processamento de dados coletados através de posicionamento relativo cinemático, são apresentados nesta seção.

Os levantamentos foram realizados na cidade de Presidente Prudente, que está localizada na região oeste do Estado de São Paulo. Na execução dos levantamentos foram utilizados os receptores GPS ZXII e Reliance, da Ashtech, os quais armazenam dados de dupla e simples frequência, respectivamente. Dois levantamentos foram realizados, cujas máscaras de elevação foi de 15° para o receptor móvel e 10° para o receptor base. Utilizou-se taxa de coleta de 1 segundo.

O primeiro levantamento foi realizado no dia 121 de 2000, o qual teve duração de 70 minutos. O receptor foi instalado em um veículo que se deslocou com velocidade média de aproximadamente 7,0 m/s. Nesse caso, o comprimento da linha de base variou de 3,0 km a aproximadamente 6,0 km. Para possibilitar uma análise sobre a influência do comprimento da linha de base na solução das DD de ambigüidades, esse levantamento foi dividido em quatro linhas de base.

Os dados do segundo levantamento foram coletados no dia 129 de 2001 e sua duração foi de 45 minutos. A velocidade média da antena foi de 0,8 m/s. O comprimento das linhas de base processadas pode ser visto na Figura 6.13.

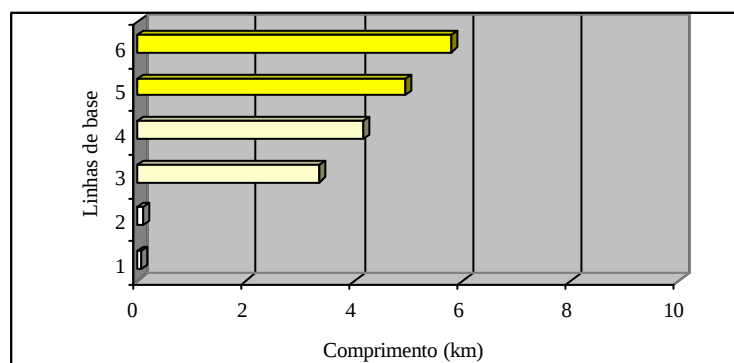


FIGURA 6.13 - Comprimento médio das linhas de base (cinemático)

Como pode ser visto na Figura 6.13, as linhas de base que foram processadas no software GPSeq são todas curtas, não ultrapassando os 6,0 km. Portanto, espera-se que os efeitos sistemáticos sejam quase que totalmente eliminados no processo de diferenciação.

Um outro fator importante a ser analisado no processamento de dados NAVSTAR-GPS coletados através de posicionamento relativo é número de satélites que estão sendo rastreados simultaneamente nas estações envolvidas, o qual está vinculado à precisão com que os parâmetros podem ser estimados. O número de satélites envolvido nos levantamentos pode ser visto na Figura 6.14.

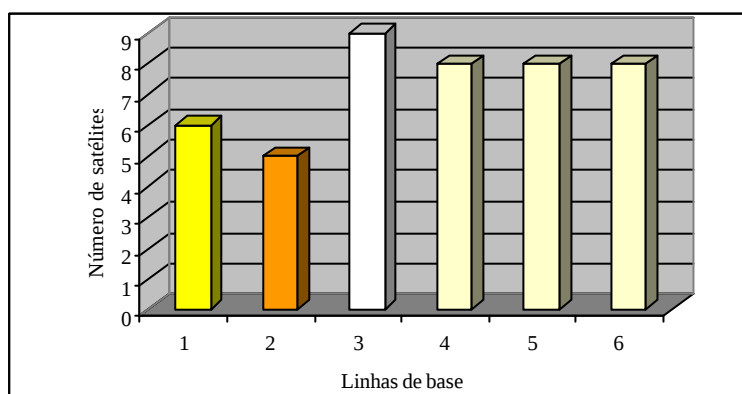


FIGURA 6.14 - Número de satélites observados em cada linha de base (cinemático)

A partir da Figura 6.14, percebe-se que os levantamentos foram realizados bom número de satélites. Dados de 5 satélites foram rastreados no levantamento da linha de base 2, sendo a linha de base que rastreou o menor número de satélite. O maior número de satélites observado ocorreu no levantamento da linha de base 3, com 9 satélites.

Similarmente ao que foi realizado na seção 6.2.1, verificou-se os valores do ADOP para cada linha de base processada, conforme mostrado na Figura 6.15.

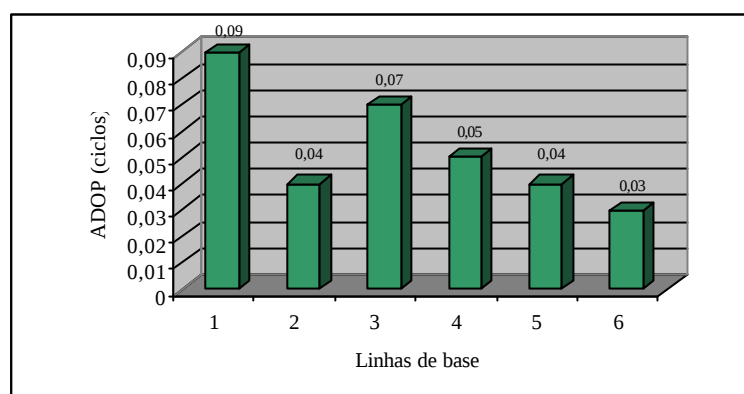


FIGURA 6.15 - ADOP (cinemático)

Os resultados apresentados na Figura 6.15 mostram bons valores de ADOP para as linhas de base processadas. Verifica-se, também, que o valor do ADOP está relacionado com número de satélites sendo observados e a quantidade de dados processados. Além disso, verifica-se que os valores do ADOP apresentados na Figura 6.15 são bem menores dos que os apresentados na seção anterior (Figura 6.3).

Realizou-se uma análise com relação à menor quantidade de dados necessária para solucionar as DD de ambigüidades, bem como a verificação da qualidade das coordenadas calculadas pelo GPSeq.

No que diz respeito à quantidade de dados, verificou-se o número de épocas de coleta mínimo necessário para o software GPSeq solucionar as DD de ambigüidades. Utilizando-se os dados de todas as épocas, estimou-se os valores das DD de ambigüidades assumidos como corretos. Em seguida, processou-se os dados novamente e verificou-se a época em que a solução

ocorreu. A Figura 6.16 mostra o intervalo de tempo mínimo de coleta de dados para o GPSeq solucionar as DD de ambigüidades das linhas de base processadas.

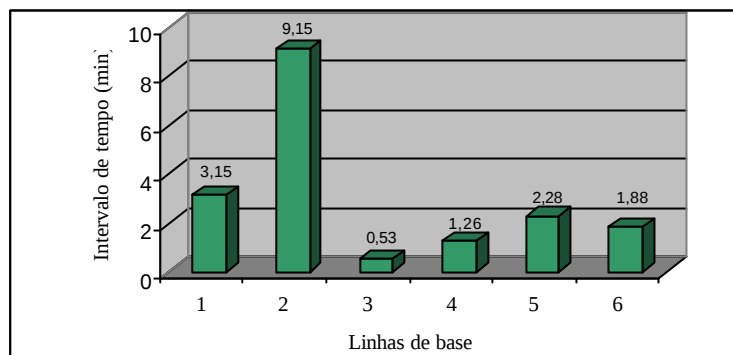


FIGURA 6.16 - Intervalos de tempo mínimo para solução das DD de ambigüidades no GPSeq

Como pode ser visto na Figura 6,15, o software GPSeq solucionou as DD de ambigüidades num intervalo de tempo consideravelmente pequeno, variando de aproximadamente 0,5 minuto a 9,2 minutos, no melhor caso e o pior caso, respectivamente.

O menor intervalo de tempo necessário para solucionar as DD de ambigüidades ocorreu na linha de base 3. Isto pode ser explicado por ela ter sido levantada com 9 satélites. Verifica-se, também, que as linhas de base 1 e 2 necessitaram de maior quantidade de dados para solucionar as DD de ambigüidades, mesmo sendo as linhas de base com menor comprimento. Isso pode ter ocorrido devido ao número de satélites ser menor do que das outras linhas de base processadas, mostrando a importância de se ter redundância de observações para solucionar as DD das ambigüidades.

Os valores do ADOP para as linhas de base processadas não apresentam diferenças significativas. Verifica-se que os piores resultados são referentes às linhas de base 1 e 3. No caso da linha de base 1, a geometria dos

satélites é menos favorável, como citado anteriormente. No caso da linha de base 3, o valor do ADOP está relacionado com a pequena quantidade de dados processada.

Como esses dados foram coletados no início de 2001, período em que a atmosfera apresentou alta atividade ionosférica, devido ao período de máxima atividade solar do ciclo número 23, decidiu-se verificar a qualidade das observações através da estatística GOM, a qual pode ser vista na Figura 6.17.

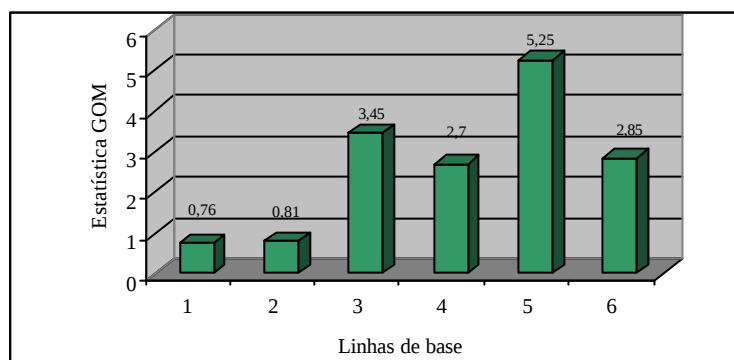


FIGURA 6.17 - Estatística GOM (cinemático)

Verifica-se, a partir da Figura 6.17, que a estatística GOM das linhas de base 1 e 2 são as menores, mostrando que os efeitos sistemáticos foram suficientemente minimizados pelo posicionamento relativo. Ressalta-se, também, que este levantamento foi realizado num campo aberto, com pouca probabilidade de ocorrer multicaminhamento. As linhas de base de 3 a 6 apresentaram os maiores valores para a estatística GOM. Isto está associado ao comprimento destas linhas de base, que é, significativamente, maior do que o das linhas de base 1 e 2. Por isto, os efeitos atmosféricos não são minimizados com a mesma eficiência, resultando numa observação com maior quantidade remanescente de tais efeitos. Além disso, ressalta-se que o meio onde este último levantamento foi

realizado é mais propenso a multicaminhamento, pois ocorreu numa via pública, com trânsito de outros veículos.

No que diz respeito à qualidade das coordenadas, calculou-se as diferenças entre as coordenadas calculadas pelo Reliance e pelo GPSeq no instante da solução das DD de ambigüidades, Figura 6.16. As diferenças podem ser vistas na Figura 6.18.

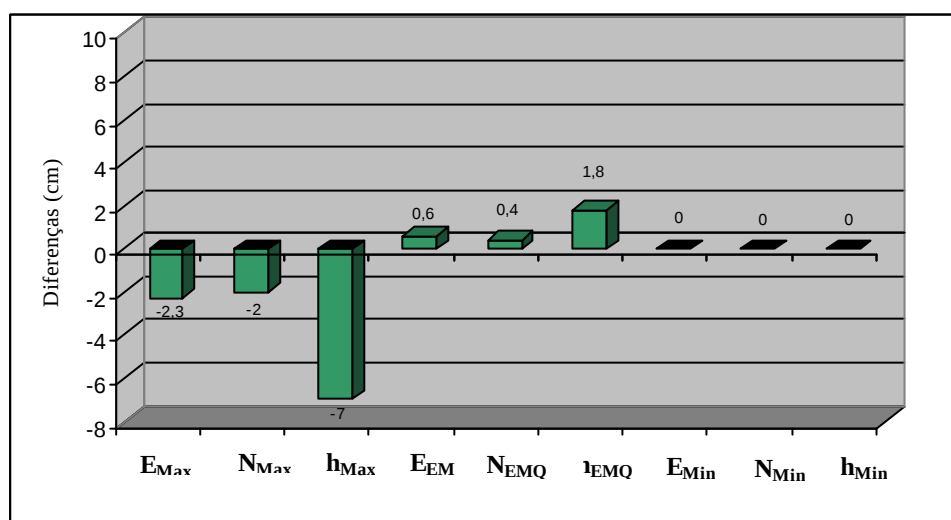


FIGURA 6.18 - Diferenças das coordenadas (cinemático)

A partir da Figura 6.18, verifica-se que a maior discrepância ocorreu na coordenada h , com -7,0 cm. As maiores discrepâncias nas coordenadas horizontais, E e N , foram de -2,3 cm e -2,0 cm, respectivamente. Isto mostra que, nos piores casos, a discrepância entre as soluções é da ordem centimétrica. Percebe-se, através do EMQ, que a solução proporcionada pelo GPSeq está compatível com a solução do Reliance no nível de aproximadamente 2,0 cm. Nos melhores casos, não houve discrepância em nenhuma das coordenadas.

Embora nenhum controle de qualidade estatístico para a solução das ambigüidades tenha sido efetivamente implementado no software GPSeq, um

estudo inicial foi realizado acerca do teste ratio no processamento de dados coletados através de posicionamento relativo cinemático. A Figura 6.19 apresenta os valores da estatística ratio para as linhas de base processadas no momento em que as ambigüidades foram solucionadas.

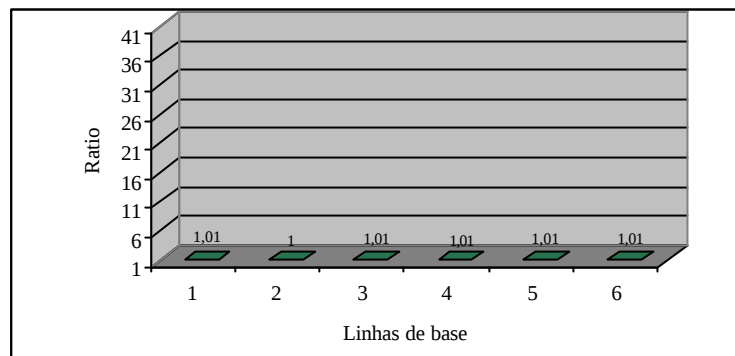


FIGURA 6.19 - Estatística ratio (cinemático)

Muito embora as ambigüidades tenham sido solucionadas corretamente, verifica-se, a partir da Figura 6.19, que o valor da estatística ratio das linhas de base processadas é muito próximo de 1,0, o que tem como consequência a rejeição do teste de discriminação entre o vetor que proporcionou a melhor e a segunda melhor unidade de peso a *posteriori*.

Assim como nos experimentos realizados com dados coletados a partir de posicionamento relativo estático, verificou-se o comportamento temporal da estatística ratio. No processamento das linhas de base 1 e 2, processou-se dados de 750 épocas, com taxa de coleta de 1 s, pois tais linhas de base necessitaram de maior quantidade de dados para solucionar as DD de ambigüidades. Para as demais linhas de base, processou-se dados de 400 épocas. O comportamento temporal da estatística ratio pode ser visto na Figura 6.20.

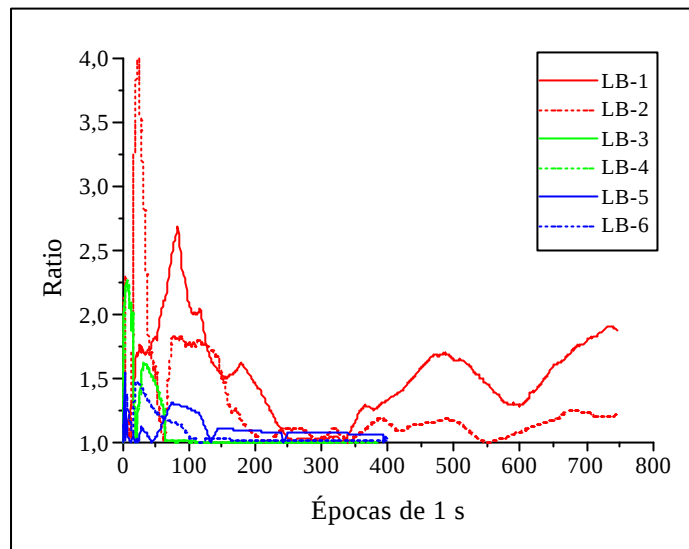


FIGURA 6.20 - Comportamento da estatística ratio (cinemático)

A partir da Figura 6.20, observa-se que o comportamento da estatística ratio para as linhas de base 1 e 2 é melhor do que para as linhas de base restantes, muito embora apresente alguns pontos de mínimo, que quase tocam o eixo X do gráfico, em algumas épocas. Além disso, o comportamento do ratio para as linhas de base 1 e 2 apresenta uma curva ascendente após a época 600, mostrando que a quantidade de dados processados, nesse caso, pode trazer segurança estatística no momento de se aceitar a solução. O comportamento dessa quantidade para as demais linhas de base não apresentou resultados satisfatórios. Isso pode estar relacionado com a qualidade das observações, pois essas linhas de base apresentaram o valor da estatística GOM maiores do que as linhas de base 1 e 2.

Similarmente ao que foi realizado nos experimentos envolvendo dados oriundos de posicionamento relativo estático, analisou-se os valores da

estatística $\Delta\Omega$ no momento em que a solução das DD de ambigüidades ocorreu, cujos valores podem ser vistos na Figura 6.21.

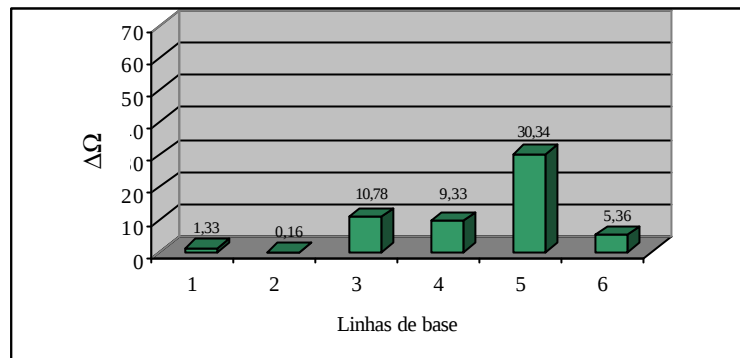


FIGURA 6.21 - Estatística DW (cinemático)

A partir da Figura 6.21, verifica-se que, salvo a linha de base 5, os valores de $\Delta\Omega$ são pequenos, o que, teoricamente, significa que não há indícios estatísticos aceitar o teste de discriminação dos vetores de DD das ambigüidades.

Da mesma maneira como foi realizado com a estatística ratio, resolveu-se verificar o comportamento temporal da estatística $\Delta\Omega$, o qual pode ser visto na Figura 6.22.

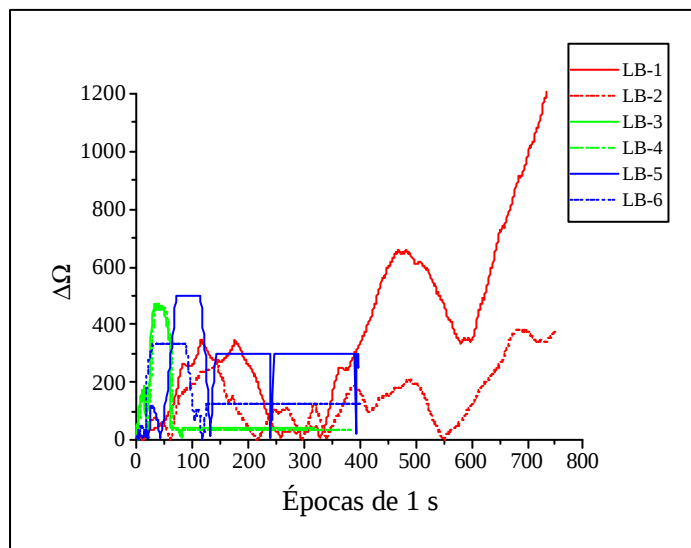


FIGURA 6.22 - Comportamento da estatística DW (cinemático)

Observa-se, a partir da Figura 6.22, que o comportamento da estatística $\Delta\Omega$ é similar à do ratio. No entanto, após a época100 o seu valor é aceitável, na maioria dos casos. Para as linhas de base 1 e 2, o seu comportamento se apresentou parecido com o comportamento do ratio.

7 COMENTÁRIOS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesta seção, apresentam-se os comentários sobre o desenvolvimento do trabalho, as conclusões obtidas a partir dos experimentos apresentados na seção 6, finalizando-se com recomendações para trabalhos futuros.

7.1 Comentários e Conclusões

No presente trabalho, implementou-se o modelo matemático de maneira a atender posicionamentos relativo estático e cinemático de linhas de base curta, bem como o controle de qualidade baseado no processo de Detecção Identificação e Adaptação (DIA). Portanto, o software que está sendo desenvolvido na FCT/UNESP, até o estágio atual, proporciona ao usuário um rápida resolução das DD de ambigüidades e, conseqüentemente, alta precisão no posicionamento a curtos intervalos de tempo de coleta de dados, para levantamentos relativo estático ou cinemático.

Como visto nas Figuras (6.1) e (6.13), as linhas de base processadas são curtas, não ultrapassando 10,0 km. Isso tem como consequência uma adequada diminuição dos efeitos atmosféricos, contribuindo para a solução das DD de ambigüidades. Além disso, observa-se, a partir das Figuras (6.2) e (6.14), que o número de satélites envolvido nos levantamentos foi favorável, com um mínimo de 5 e máximo de 9 satélites observados. Os valores do ADOP dependem da quantidade de dados processada e da geometria dos satélites, como pode ser concluído a partir das Figuras (6.3) e (6.15), apresentando bons valores, na maioria das linhas de base processadas.

A partir dos experimentos apresentados na seção (6.2.1), conclui-se que o modelo dinâmico para posicionamento cinemático proporciona resultados compatíveis com o modelo dinâmico para posicionamento estático, quando se processa dados levantados através de posicionamento relativo estático. Potanto, a mesma rotina pode ser utilizada para processar dados coletados em ambos os métodos de posicionamento.

No que diz respeito à quantidade de dados necessário para a solução das DD de ambigüidades, conclui-se que o software GPSeq é capaz de solucionar as DD de ambigüidades corretamente em intervalos de tempo bem reduzidos, variando de 0,25 a 9,15 minutos de dados coletados. Além disso, verifica-se que a quantidade de satélites exerce um papel fundamental no êxito de se solucionar as DD de ambigüidades em curtos intervalos de tempo.

Quanto à qualidade das coordenadas, os experimentos realizados mostram que a solução adotada pelo software GPSeq apresenta-se compatível na ordem de centímetros com os softwares comerciais GPSurvey e Relience (Fig. 6.6 e 6.18).

Com relação ao controle de qualidade da solução das DD de ambigüidades, verificou-se que para ambos os processamentos os testes de discriminação das ambigüidades, ratio e $\Delta\Omega$, não apresentaram resultados satisfatórios em condições limite de intervalo de tempo mínimo. A partir da análise dos comportamentos temporais das estatísticas ratio e $\Delta\Omega$, verifica-se que para o processamento de dados coletados a partir de posicionamento relativo cinemático, essas estatísticas não apresentaram bons resultados com o aumento da quantidade de dados, na maioria dos casos. Já para o caso estático, o aumento na

quantidade dos dados proporcionou melhores valores para essas estatísticas. Ressalta-se que é importante que a solução da ambigüidade esteja baseada em elementos estatísticos, pois a partir desse procedimento, pode-se verificar a qualidade com que tais parâmetros foram estimados.

7.2 Recomendações

Como pode ser observado, a partir do capítulo 5, o software GPSeq vem sendo utilizado como objeto de estudo no que se refere à solução das ambigüidades GPS. Portanto, devido à dinâmica da ciência, modelos matemáticos vêm sendo desenvolvidos para proporcionar novas soluções aos usuários. Nesse contexto, cita-se o caso do modelo estocástico para solução das ambigüidades em tempo-real, um tópico ainda em desenvolvimento e que merece muita atenção.

Além do modelo estocástico, verificou-se que o método do satélite base, para se calcular as DD, apresenta desvantagens com relação ao método seqüencial, recomendando-se a implementação desse último método.

Embora estivesse prevista a implementação da possibilidade de se processar dados de dupla frequência, isso não foi realizado. De acordo com a literatura, dados de dupla frequência podem proporcionar solução instantânea das ambigüidades com a utilização do método LAMBDA.

No tocante ao controle de qualidade da solução das ambigüidades, embora não tenha sido efetivamente implementado, realizou-se algumas análises iniciais. Trata-se de um tópico muito importante, sendo recomendado um estudo mais aprofundado nesse tópico.

Ao que se refere aos dados de entrada, seria interessante implementar uma rotina para a utilização das efemérides produzidas pelo IGS, proporcionando elementos para se comparar os resultados oriundos com a utilização das efemérides transmitidas e IGS.

Por fim, verificou-se que a implementação do teste de qualidade global poderia vir a ser útil, tendo em vista que os testes locais podem ser insensíveis a alguns efeitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIAN, Y. GPS Signal Selective Availability: Modeling and Simulation for FAA WAAS IV & V In: ION GPS-96, Parte I, 1996. *Proceedings of ION GPS-96*, 1996. p17-26.

BIERMAN, G.J. *Factorization Methods for discrete sequential estimation*. v. 128 in Mathematics in science and engineering. 1.ed. New York: Academic Press, 1977. 241 p.

CAMARGO, P. O. *Controle de qualidade aplicada ao Filtro de Kalman*. Curitiba, 1992. 94 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) Universidade Federal do Paraná.

CAMARGO, P.O. *Modelo regional da ionosfera para uso em receptores de uma frequência*. Curitiba, 1999. 156p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) Universidade Federal do Paraná.

CHEN, D.; LACHAPELLE, G. A comparison of the FASF and least-squares search algorithm for ambiguity resolution on the fly. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON KINEMATIC SYSTEMS IN GEODESY, GEOMATICS AND NAVIGATION, 1994, Banff, Canadá. *Proceedings of International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation - KIS94*, 1994.

COLLIN, F.; WARNANT, R. Application of the wavelet transform for GPS cycle slip correction and comparison with Kalman Filter, *Manuscripta Geodaetica* - v. 20, p.161-172, 1995.

DE JONGE, P; TIBERIUS, C. C. J. M. *The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects*, T.U. Delft - internal report, Delft, 1996.

FINN, A.; KNIGHT, M. The impact of ionospheric scintillations on GPS performance, In: 9º INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION ION GPS-96, 1996, EUA. *Proceedings of 9º International Technical Meeting Of The Satellite Division Of The Institute of Navigation ION GPS-96*, 1996. p. 555-563.

GELB, A; KASPER Jr., J.F.; NASH Jr., R.A., PRICE, C.F.; SUTHERLAND Jr., A.A. *Applied optimal estimation*. 14.ed. Massachusetts: M.I.T. PRESS, 1996. 374 p.

GEMAEL, C. *Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas*. 1.ed. Curitiba: UFPR, 1994. 319 p.

GOAD, C.C. Short distance GPS models. In TEUNISSEN, P.J.G. e KLEUSBERG, A. *GPS for Geodesy*. 2.ed.: Springer Verlag, 1998. p 457-481.

GURTNER, W.; MADER, G.M. *The Rinex format: Current status, future developments*, 1990. Disponível em <<http://ntl.bts.gov/DOCS/rinex.html>>. Acesso em: 25/06/2001.

GURTNER, W. *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2*, 1994. Disponível em <<http://www.eng.auburn.edu/~yoonseo/gpswww/documents/rinex2.txt>>. Acesso em: 16/11/2001.

HAN, S.; RIZOS, C. Comparing GPS ambiguity resolution techniques, *GPS World*, v. 8, nº 10, p. 54-61, 1997.

HAN, S. Quality control issues relating to instantaneous ambiguity resolution for real-time GPS kinematic positioning, *Journal of Geodesy* – v. 71, p. 351- 361, 1997.

HOFMANN-WELLENHOF B., LICHTENEGGER H. AND COLLINS J. *GPS Theory and Practice*. 4.ed. Wien: Spring-Verlag, 1997. 389p.

IGS – International GPS Service/Data and Products. *IGS Products*, 2001. Disponível em <http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html> Acesso em: 28/09/2001a.

IGS - International GPS Service/Data and Products. *IGS Product Availability*, 2001a. Disponível em <<http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>> Acesso em: 28/09/2001b.

KIM, D.; LANGLEY, R.B. *GPS ambiguity resolution and validations: Methodologies, trends and Issues*. 7º GNSS Workshop - International Symposium on GPS/GNS, Seul, Coreia, 2000. Disponível em <<http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/gnss2000.kim.pdf>> Acesso em 08/11/2001.

KUNCHES, J. M. Now it gets interesting: GPS and the onset of solar cycle 23, In: 10º INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION ION GPS-97, 1997, EUA. Proceedings of 10º International Technical Meeting Of The Satellite Division Of The Institute of Navigation ION GPS-97, 1997. p. 225-230.

LANGLEY, R. B. Propagation of the GPS signals. In TEUNISSEN, P.J.G. e KLEUSBERG, A. *GPS for Geodesy*. 2.ed.: Springer Verlag, 1996. p 111-149.

LANGLEY, R. B. RTK GPS, *GPS World*, v.9, nº9 p. 70 – 76, September 1998.

LEICK A. *GPS Satellite Surveying*. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 560p.

LIN, L. A novel approach to improving the accuracy of real-time ionospheric delay estimation using GPS, In: 10^o INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION ION GPS-97, 1997, EUA. *Proceedings of 10^o International Technical Meeting Of The Satellite Division Of The Institute of Navigation ION GPS-97*, 1997. p. 169-178.

MACHADO, W. C. *Solução rápida das ambigüidades GPS para posicionamento estático de bases curtas*. Relatório de iniciação científica apresentado à FAPESP (processo 97/02298-2), 1998.

MACHADO, W. C.; MONICO, J.F.G *Solução rápida das ambigüidades GPS utilizando o software GPSeq*, In: XIX Congresso Brasileiro de Cartografia, 1999, Recife/Olinda. *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Cartografia (CD-Rom)*, 1999.

MACHADO, W.C; MONICO, J. F. G.; OLIVEIRA, P. O. SA: Antes e depois de sua desativação, *A Mira* n^o 98, p.38-43, 2000;

MOHAMED, A. H; SCWARZ, K. P - A Simple and Economical Algorithm for GPS Ambiguity Resolution On The Fly Using a Whitening Filter, *Journal of The Institute of Navigation*, v. 45, p.221-231, 1998.

MONICO, J. F. G. *Double Difference Ambiguity Resolution*, T.U. Delft - internal report, Delft, 1992.

MONICO, J. F. G. Métodos para solução da ambigüidade: primeiras experiências na Unesp de Presidente Prudente In: GIS BRASIL 96, 1996, Curitiba. *Anais do GIS Brasil 96*, Curitiba, 1996. p. 465-474.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Unesp, 2000. p 287.

SALZMANN, M. Real-time adaptation for model error in dynamic systems *Bulletin Géodésique*, n^o 69, p.81-91, 1995.

SANTOS, M. C. Impacto do 3^o Sinal no GPS, *InfoGeo*, n^o15 , p.22, 2000.

SAPUCCI, L. F. *Estimativa do vapor d'água atmosférico e a avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS*, Presidente Prudente, 2001. 165 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) Unesp.

SEEBER G. *Satellite Geodesy: foundations, methods and applications*. 1.ed. New York: Walter de Gruyter, 1993. 356p.

TALBOLT, N.C. *Real -Time High Precision GPS Positioning Concepts: Modelling, Processing and Results*. Victoria, Austrália, 1991. 222 p. Tese (PhD) RMIT Centre for Remote Sensing- Royal Melbourne Institute of Technology.

TEUNISSEN, P. J. G. *Dynamische Gegevensverwerking I (GE-44) Indeiling Filtertheorie* - T.U. Delft - internal report, Delft, 1990.

TEUNISSEN, P. J. G. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation, *Journal of Geodesy* , v. 70, nº 1/2, p.65-82, 1995.

TEUNISSEN, P. J. G. Quality Control and GPS. In TEUNISSEN, P.J.G.; KLEUSBERG, A. *GPS for Geodesy*. 2.ed.: Springer Verlag, 1998a. p. 271-318.

TEUNISSEN, P. J. G. GPS carrier phase ambiguity fixing concepts. In TEUNISSEN, P.J.G. e KLEUSBERG, A. *GPS for Geodesy*. 2.ed.: Springer Verlag, 1998b. p. 319-388.

TEUNISSEN, P. J. G.; DE JONGE, P.; TIBERIUS, C. C. J. M. A new way to fix carrier-phase ambiguities, *GPS World*, v.6, nº 4, p.58 - 61, 1995a.

TEUNISSEN, P. J. G.; DE JONGE, P.; TIBERIUS, C. C. J. M. The LAMBDA method for fast GPS surveying. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM GPS TECHNOLOGY APPLICATIONS, 1995, Bucharest, Romania, *Proceedings of International Symposium GPS Technology Applications*, 1995b. p. 203-210.

TIBERIUS, C. C. J. M. *Recursive data processing for Kinematic GPS surveying*, Delft, 1998, 248 p. Tese (PhD) Delft University of Technology.

TIBERIUS, C. C. J. M.; JONKMAN, N.; KENSELAAR, F. The Stochastics of GPS Observables *GPS World*. v.10, nº 2, p. 49 - 54, 1999.

TIBERIUS, C. C. J. M.; P. J. G.; DE JONGE, P. J. Fast positioning using LAMBDA-Method, In: 4th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DIFFERENTIAL SATELITE NAVIGATION SYSTEMS, 1995, Bergen, Noruega. *Proceedings of 4th International Symposium on Differential Satellite Navigation Systems - DSNS 95*, Artigo nº 30, 1995. 8p.

TIBERIUS, C. C. J. M.; TEUNISSEN, P. J. G.; DE JONGE, P. J. Kinematic GPS: Performance and quality control, In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON KINEMATIC SYSTEMS IN GEODESY, GEOMATICS AND NAVIGATION, 1997, Banff, Canadá. *Proceedings of International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation - KIS97*, 1997. p. 289-299

TU Delft – Delft University of Technology. Faculty of Civil Engineering and Geosciences/Department of Geodesy/MGP – Mathematical Geodesy and Positioning – Software. Disponível em <<http://www.geo.tudelft.nl/mgp/>> Acesso em: 19/06/2001.

VAN GRAAS, F.; BRAASCH, M. S. Selective Availability, In: PARKINSON B. W. and SPILKER J. J., *Global Positioning System: Theory and Applications*, v. 01, Cambridge, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. p. 601-620.

WANG, J. Modeling and quality control for precise GPS and GLONASS satellite positioning, Curtin, 1999. 171 p. Tese (PhD) Curtin University of Technology.

WELLS D. et al. *Guide to GPS Positioning*. Canadian GPS Associates, Fredericton, New Brunswick, Canadá, 1986.

ZUMBERGE J. B.; BERTIGER W. I. Ephemeris and Clock Navigation Message Accuracy, In: PARKINSON B. W. and SPILKER J. J., *Global Positioning System: Theory and Applications*, v. 01, Cambridge, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. p. 585-598.