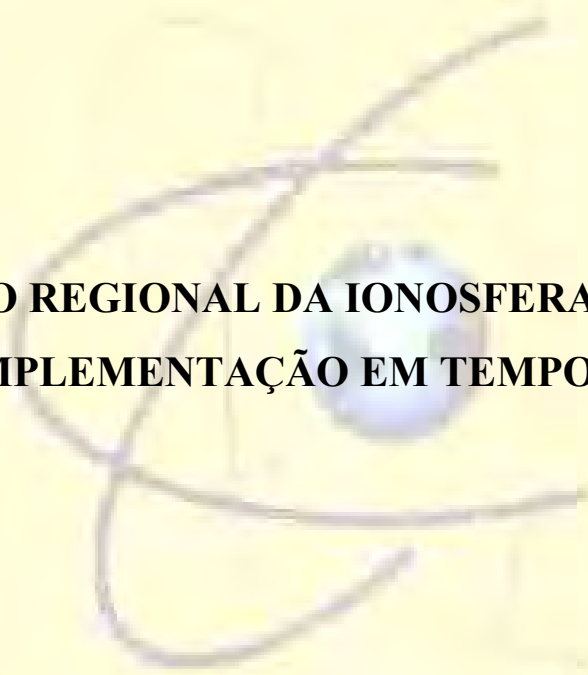


CLAUDINEI RODRIGUES DE AGUIAR



**MODELO REGIONAL DA IONOSFERA (MOD_ION):
IMPLEMENTAÇÃO EM TEMPO REAL**

Dissertação de Mestrado

**Presidente Prudente
2005**

CLAUDINEI RODRIGUES DE AGUIAR

**MODELO REGIONAL DA IONOSFERA (MOD_ION):
IMPLEMENTAÇÃO EM TEMPO REAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

**Orientador:
Prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo**

**Presidente Prudente
2005**

TERMO DE APROVAÇÃO

CLAUDINEI RODRIGUES DE AGUIAR

MODELO REGIONAL DA IONOSFERA (MOD_ION): IMPLEMENTAÇÃO EM TEMPO REAL

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas, do Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas da UNESP de Presidente Prudente, área de concentração “Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais”, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo
Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP
Presidente e Orientador

Prof. Dr. João Francisco Galera Monico
Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP
2º Examinador

Prof. Dr. Edvaldo Simões da Fonseca Junior
3º Examinador

Presidente Prudente, ____ de _____ de 2005.

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais, Sebastiana da Costa Aguiar e José Rodrigues de Aguiar, pelo incentivo e o esforço para que eu pudesse ter acesso à educação, e à minha amada esposa e amiga Michele Carvalho Leal pelo carinho, paciência e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à DEUS.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo pelo apoio, incentivo e confiança. Aos professores do Departamento de Cartografia e do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, pela competência e qualidade de ensino proporcionado a nós (alunos). Aos professores doutores João Francisco Monico Galera e Luiz Paulo Souto Fortes, por aceitarem o convite para a banca do exame de qualificação e contribuírem para a qualidade desta pesquisa através de suas críticas e sugestões. À Prof^ª. Dra. Ana Maria Osorio Araya Balan, por ter me iniciado na pesquisa científica. Aos meus orientadores de iniciação científica na graduação, Prof. Dr. Mauricio Galo e Prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo. À CAPES, pelo apoio financeiro por meio da bolsa de mestrado. Ao professor Dr. Eurico Rodrigues de Paula e ao Luiz Felipe, ambos do INPE, pela ajuda e fornecimento dos gráficos da cintilação ionosférica. Ao IBGE, pelo fornecimento dos dados das estações RBMC, ao Departamento de Recursos Naturais do Canadá (NRCan), pela cópia do software GPSPACE e sua documentação. Ao GEGE (Grupo de Estudo em Geodésia Espacial), pelos ensinamentos e pelas proveitosas discussões nas tardes de sexta-feira. Aos companheiros nos estudos sobre a ionosfera e na “dor-de-cabeça”, William Rodrigo Dal Poz (famoso Tarcisão) e Marcelo Tomio Matsuoka (Tomio). Aos amigos que conquistei na faculdade, especialmente ao Marco Aurélio de Oliveira Silva e ao Tarcisio, e às suas respectivas noivas, Sheila e Aninha (Nilcilene). Aos amigos da minha cidade, ao Nino (Tio Nino), pelos mais de 15 anos de amizade, ao pessoal que gosta de boa música e que de vez em quando me chamam pra tocar um pouquinho, ao meu afilhado Marcos Paulo pelos momentos de descontração. Não posso esquecer da Sapeca (*in memoriam*) e do Fred (*in memoriam*), pela companhia cujo interesse era apenas a amizade e o afeto.

EPÍGRAFE

*Melhor é ser humilde de espírito com os
mansos, do que repartir o despojo com os
soberbos.*

(Prov. 16, 19)

RESUMO

Os receptores GPS de uma frequência são utilizados na maioria dos trabalhos de posicionamento com GPS. Dentre as diversas aplicações, pode-se citar aquelas em que é de suma importância obter as coordenadas da antena do receptor em tempo real, tais como navegação aérea, marítima e terrestre, monitoramento da troposfera e ionosfera, monitoramento de deslocamento de estruturas e tubulações, entre outras. Porém, uma das maiores fontes de erro para estas aplicações é o efeito da refração ionosférica. A determinação deste efeito tem sido feita com observações coletadas com receptores GPS de dupla frequência, e a partir da estimativa dos valores da refração ionosférica, pode-se aplicar a correção nas medidas obtidas com receptores de uma frequência. No Departamento de Cartografia da FCT/UNESP foi desenvolvido o modelo da ionosfera (Mod_Ion), onde a ionosfera é analiticamente representada pela série do tipo Fourier. Este modelo está implementado, em linguagem de programação Fortran, para ser executado no modo pós-processado. O foco de interesse atual pela comunidade mundial é o que diz respeito à correção desses efeitos em tempo real. Um algoritmo utilizado para calcular a correção ionosférica, ou obter o TEC, em tempo real, é o filtro de Kalman. No Mod_Ion_FK foram introduzidas duas melhorias: a função de modelagem da ionosfera do Mod_Ion foi alterada; e o filtro de Kalman foi implementado. Os resultados dos experimentos realizados mostraram que a função de modelagem série de Fourier com 19 coeficientes e o processo aleatório Gauss-Markov, foram mais eficazes na correção do efeito sistemático devido à ionosfera, chegando à proporcionar uma melhora na acurácia resultante, do posicionamento por ponto em tempo real, de 90,75%, no período diário de máxima atividade da ionosfera.

palavras-chave: Ionosfera. GPS. Pseudodistância. Filtro de Kalman.

ABSTRACT

Single frequency GPS receivers have been widely used in most of the GPS projects. Among the several applications, one can mention those that require to obtain the receiver's antenna coordinates in real time, such as aerial, maritime and terrestrial navigation, ionosphere and troposphere monitoring, and structure displacement monitoring. However, one of the main drawbacks of the GPS accuracy for L_1 users is the ionospheric refraction, which affects, mainly, the point positioning. The determination of this error has been carried out with double frequency GPS measurements, and from these estimate values the corrections can be applied in the single frequency GPS measurements. In the FCT/UNESP, a regional ionosphere model (Mod_Ion) was developed for computing the ionosphere systematic error, as well as TEC (Total Electron Contents). The Mod_Ion was implemented to run in a batch processing mode. The current focus for the worldwide community is concerned to the correction of these error in real time. One of the algorithms used to calculate the ionosphere correction, as well as the TEC, in real time, is based on Kalman filtering. In the Mod_Ion_FK version two improvements were introduced: the function for ionosphere modeling in the Mod_Ion was modified; and the Kalman filter was implemented. The results of the experiments showed that the modeling function with 19 coefficient Fourier series and the Gauss-Markov process, were the most effective in the ionosphere systematic effect's corrections, providing a improvement in the accuracy of point positioning, of 90,75%, in period of the highest ionosphere activity.

key-words: Ionosphere. GPS. Pseudorange. Kalman Filter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de subdivisão da atmosfera terrestre.	26
Figura 2 - Propagação da fase e do grupo.	30
Figura 3 - Irregularidades na densidade de elétrons da ionosfera	41
Figura 4 - Representação da ionosfera a partir das mensagens transmitidas.	45
Figura 5 - Geometria para o atraso do caminho ionosférico.	49
Figura 6 - Tipos de problemas de estimação.	61
Figura 7 - Descrição do processo aleatório <i>Gauss-Markov</i> .	69
Figura 8 - Localização das Estações da RBMC do IBGE.	92
Figura 9 - Atraso ionosférico em L_1 a partir da pseudodistância e pseudodistância suavizada.	95
Figura 10 - Taxa de mudança do atraso ionosférico para o satélite 13, usando a pseudodistância suavizada (a) e a pseudodistância original (b).	97
Figura 11 - Taxa de variação do atraso ionosférico em função do ângulo de elevação, usando a pseudodistância suavizada (a) e a pseudodistância original (b).	98
Figura 12 - Distribuição dos IPPs sobre a rede de estações utilizadas no processamento em tempo real.	100
Figura 13 - Discrepâncias entre o atraso ionosférico estimado pelo Mod_Ion_FK e o atraso calculado (referência) para a Estação UEPP (Abril/2002).	102
Figura 14 - Ocorrência de cintilações no Brasil (01/04/2002).	106
Figura 15 - Discrepâncias em latitude – SCI – Julho/2001.	109
Figura 16 - Discrepâncias em latitude – SCI – Abril/2002.	109
Figura 17 - Discrepâncias em latitude – CCI- $I_{(Four19)GMS}$ – Julho/2001.	110
Figura 18 - Discrepâncias em latitude – CCI- $I_{(Four19)GMS}$ – Abril/2002.	110
Figura 19 - Discrepâncias em longitude – SCI – Julho/2001.	111
Figura 20 - Discrepâncias em longitude – SCI – Abril/2002.	112
Figura 21 - Discrepâncias em longitude – CCI- $I_{(Four19)GMS}$ – Julho/2001.	112
Figura 22 - Discrepâncias em longitude – CCI- $I_{(Four19)GMS}$ – Abril/2002.	113
Figura 23 - Discrepância planimétrica para Julho/2001.	114
Figura 24 - Discrepância planimétrica para Abril/2002.	114
Figura 25 - Discrepâncias em altitude – SCI – Julho/2001.	115
Figura 26 - Discrepâncias em altitude – SCI – Abril/2002.	116
Figura 27 - Discrepâncias em altitude – CCI- $I_{(Four19)GMS}$ – Julho/2001.	116
Figura 28 - Discrepâncias em altitude – CCI- $I_{(Four19)GMS}$ – Abril/2002.	117
Figura 29 - Atraso ionosférico vertical (Julho/2001).	128
Figura 30 - Atraso ionosférico vertical (Abril/2002).	129
Figura 31 - Atraso ionosférico vertical estimado com o Mod_Ion (Julho/2001).	130
Figura 32 - Atraso ionosférico vertical estimado com o Mod_Ion_FK (Julho/2001).	130
Figura 33 - Atraso ionosférico vertical estimado com o Mod_Ion (Abril/2002).	131
Figura 34 - Atraso ionosférico vertical estimado com o Mod_Ion_FK (Abril/2002).	131
Figura 35 - Diferença entre o atraso ionosférico vertical estimado com o Mod_Ion e o atraso ionosférico observado (Julho/2001).	132
Figura 36 - Diferença entre o atraso ionosférico vertical estimado com o Mod_Ion_FK e o atraso ionosférico observado (Julho/2001).	133
Figura 37 - Diferença entre o atraso ionosférico vertical estimado com o Mod_Ion e o atraso ionosférico observado (Abril/2002).	133
Figura 38 - Diferença entre o atraso ionosférico vertical estimado com o Mod_Ion_FK e o atraso ionosférico observado (Abril/2002).	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Efeito da ionosfera em distâncias observadas na vertical com uma frequência e erros residuais para combinação linear <i>ion-free</i> .	39
Tabela 2	- Máximo efeito sistemático vertical devido à ionosfera.	40
Tabela 3	- Siglas adotadas para as funções de modelagem do Mod_Ion em tempo real.	59
Tabela 4	- Opções de processamento no Mod_Ion tempo real.	94
Tabela 5	- Melhora obtida na correção do atraso ionosférico na pseudodistância.	105
Tabela 6	- Discrepâncias em planimetria e altimetria – UEPP.	119
Tabela 7	- Desvio-padrão em planimetria e altimetria – UEPP.	123
Tabela 8	- EMQ da planimetria e altimetria estimadas após a correção com o Mod_Ion_FK– UEPP (período de 24 horas).	125
Tabela 9	- EMQ da planimetria e altimetria estimadas após a correção com o Mod_Ion – UEPP (período de 24 horas).	126
Tabela 10	- Média do desvio-padrão em planimetria e altimetria estimadas após a correção com o Mod_Ion_FK – UEPP (período de 24 horas).	126
Tabela 11	- Média do desvio-padrão em planimetria e altimetria estimadas após a correção com o Mod_Ion – UEPP (período de 24 horas).	127
Tabela 12	- Diferença entre o atraso ionosférico vertical estimado e observado.	134

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Objetivo.....	18
1.2. Justificativa.....	19
1.3. Conteúdo do trabalho.....	21
2. IONOSFERA E SEUS EFEITOS SOBRE OS SINAIS GPS.....	23
2.1. O GPS e suas observáveis.....	23
2.2. Ionosfera.....	25
2.3. Princípios da propagação de ondas.....	27
2.4. Índice de refração da ionosfera.....	32
2.5. Impacto da ionosfera sobre os sinais GPS.....	35
2.5.1. Atraso de grupo e avanço da fase.....	35
2.5.2. Cintilação.....	40
3. TÉCNICAS DE CORREÇÃO DOS EFEITOS DA REFRAÇÃO IONOSFÉRICA PARA POSICIONAMENTO COM RECEPTORES DE UMA FREQUÊNCIA.....	44
3.1. Modelo <i>Broadcast</i>	44
3.2. Cálculo da correção ionosférica com o uso de receptores de uma frequência.....	46
3.2.1. Modelos para calcular a correção da refração ionosférica.....	47
3.3. Cálculo da correção ionosférica com o uso de receptores de dupla frequência.....	49
3.3.1. Modelagem sobre uma rede WADGPS.....	51
3.3.2. Modelo baseado em gride.....	52
3.3.3. Modelos do IGS.....	53
3.3.4. Modelo regional da ionosfera (Mod_Ion).....	55
3.3.4.1. Funções de modelagem do atraso ionosférico vertical do Mod_Ion em tempo real.....	57
4. FILTRO DE KALMAN.....	60
4.1. Formulação matemática.....	62
4.1.1. Modelo funcional e estocástico.....	62
4.1.2. Predição e filtragem.....	65
4.2. Processo aleatório.....	67
4.3. Controle de qualidade aplicado ao filtro de Kalman.....	71
4.3.1. Testes estatísticos.....	72
4.3.1.1. Validação do modelo durante o processo de filtragem (detecção de erros).....	73
4.3.1.2. Identificação das observações com erro durante o processo de filtragem.....	76
4.3.1.3. Adaptação em tempo real.....	80
5. FILTRO DE KALMAN APLICADO AO MODELO DA IONOSFERA.....	81
5.1. Estimção dos parâmetros com filtro de Kalman.....	81
5.1.1. Predição.....	82
5.1.2. Filtragem.....	86
5.2. Inicialização do filtro de Kalman.....	90
6. EXPERIMENTOS E RESULTADOS.....	91
6.1. Dados GPS da RBMC utilizados nos experimentos.....	91
6.2. Opções de processamento no Mod_Ion tempo real.....	94
6.3. Análise do atraso ionosférico obtido com a pseudodistância e com a pseudodistância suavizada pela fase.....	95
6.4. Avaliação da performance do Mod_Ion_FK na determinação do erro sistemático da ionosfera sobre a pseudodistância em L_1	99

6.5. Avaliação no posicionamento por ponto	107
6.5.1. Análise por época	118
6.5.2. Análise para o período total de observação	124
6.6. Atraso ionosférico vertical	128
7. CONSIDERAÇÕES, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	136
7.1. Considerações.....	136
7.2. Conclusões.....	138
7.3. Recomendações	140
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	142
BIBLIOGRAFIAS	151
APÊNDICE A - Fluxograma do programa Mod_Ion_FK	156
ANEXO A - Pseudodistância suavizada pela fase da onda portadora	157

1. INTRODUÇÃO

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) é um sistema de navegação por ondas de rádio, desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD - *U.S. Department of Defense*) (LEICK, 1995). Inicialmente este sistema foi criado para aplicações militares (EL GIZAWY, 2003; LIAO, 2000). Mas em razão da alta acurácia proporcionada pelo sistema e do grande desenvolvimento da tecnologia envolvida nos receptores GPS, uma grande comunidade usuária emergiu dos mais variados segmentos da comunidade civil (navegação, posicionamento geodésico, agricultura, controle de frotas, etc) (MONICO, 2000).

Para as mais diversas aplicações, os usuários têm a sua disposição vários tipos de receptores, os quais podem ser classificados, de um modo geral, como receptores de simples e de dupla frequência. Em aplicações onde se exige alto nível de precisão, é essencial o uso de receptores de dupla frequência. No entanto, devido ao elevado custo desse tipo de receptores, os de uma frequência vêm sendo amplamente utilizados na maioria dos trabalhos de posicionamento com GPS.

Contudo, o GPS está sujeito às diversas fontes de erros provenientes do satélite (órbita, relógio, atraso instrumental, etc), da propagação do sinal (refração troposférica e ionosférica, perdas de ciclo, multicaminhamento), do receptor/antena (relógio, atraso instrumental, centro de fase da antena) e da estação (coordenadas, marés terrestre, multicaminhamento, movimento do pólo, etc.) (LIAO, 2000; MONICO, 2000). Portanto, a qualidade do posicionamento com GPS é afetada por diversos efeitos sistemáticos, dentre os quais, para o caso de receptores de simples frequência, destaca-se a influência da ionosfera, que por sua vez passou a ser a principal fonte de erro na navegação e no posicionamento por GPS após a desativação da técnica SA (*Selective Availability* – Disponibilidade Seletiva) (MONICO, 2000; MONTENBRUCK, 2003; MONTENBRUCK; GILL, 2002; SKONE,

1998). A técnica SA foi desativada às 4 horas TU de 02 de maio de 2000 (IGEB, 2005). Esta técnica afetava o posicionamento absoluto com o Serviço de Posicionamento Padrão (SPS – *Standard Positioning Service*) deteriorando sua qualidade. Nesse caso, a acurácia horizontal e vertical era da ordem de 100 e 140 m, respectivamente, e 340 ns nas medidas de tempo, com nível de confiança de 95%. Segundo Matsuoka et al. (2001), após a desativação da SA, a acurácia do posicionamento GPS melhorou cerca de 5 vezes.

Como já mencionado, com a desativação da técnica SA, o efeito da refração ionosférica tornou-se a principal fonte de erro na navegação e posicionamento com GPS. A ionosfera se caracteriza, principalmente, pela produção de íons e elétrons, e compreende a região a partir de aproximadamente 50 km acima da superfície terrestre até 1000 km (CAMARGO, 1999; LEICK, 1995; LIN, 1997). Devido às propriedades de propagação dispersiva da ionosfera para os sinais de rádio, a magnitude deste efeito depende da frequência do sinal (HEISE et al., 2003; MONICO, 2000).

A magnitude do erro sistemático devido à ionosfera é diretamente proporcional ao TEC (*Total Electron Content* – Conteúdo Total de Elétrons) na camada ionosférica, ou seja, ao número de elétrons livres presentes ao longo do caminho percorrido pelo sinal, e inversamente proporcional ao quadrado da frequência. O problema principal é que o TEC varia no tempo e espaço, em razão do fluxo de ionização solar, atividade magnética, ciclo de manchas solares, estação do ano, hora do dia, localização geográfica e direção do raio vetor do satélite, sendo de difícil correção (CAMARGO, 1999; LEICK, 1995). Se o valor do TEC fosse constante, ou tivesse uma variação regular, os efeitos causados pela ionosfera seriam de fácil determinação.

Devido à ionosfera, os sinais GPS, no seu trajeto entre o satélite e a estação de rastreio, sofrem um atraso no código e um avanço na fase, resultando num aumento na medida da pseudodistância e numa diminuição na medida da fase da portadora, sendo ambos

os efeitos de mesma magnitude, mas de sinais opostos. O erro associado à refração ionosférica pode variar de alguns metros até aproximadamente 100 metros (LIAO, 2000; TEUNISSEN; KLEUSBERG, 1998).

Como a magnitude do erro sistemático devido ao efeito da ionosfera sobre o sinal GPS é inversamente proporcional ao quadrado da frequência, dispondo-se de receptores GPS de dupla frequência pode-se eliminar o efeito de primeira ordem por meio de uma combinação linear entre as observáveis em L_1 e L_2 (LIN, 1997; SEEBER, 1993), denominada *ionospheric free observable*, mais conhecida por *ion free*. Por outro lado, para receptores de uma frequência não é possível eliminar o efeito devido à ionosfera por meio deste tipo de combinação linear. Para a correção deste efeito no posicionamento por ponto e no posicionamento relativo em regiões com alto gradiente na variação do TEC, os usuários de receptores de uma frequência podem utilizar os parâmetros de modelos ionosféricos, sejam eles regionais ou globais.

O modelo de Klobuchar, também denominado modelo *Broadcast*, proporciona o erro sistemático devido à ionosfera para receptores de uma frequência (KLOBUCHAR, 1987). Esse modelo permite efetuar correções da ionosfera a partir dos coeficientes α_i e β_i ($i = 0, \dots, 3$) transmitidos nas mensagens de navegação do GPS. Porém, o modelo de Klobuchar pode remover apenas algo em torno de 50% a 60% do efeito total (NEWBY; LANGLEY, 1992; LEICK, 1995).

Com a necessidade de se ter uma estratégia mais eficiente que a aplicação do modelo global de Klobuchar para eliminar os efeitos da ionosfera, têm sido desenvolvidas algumas técnicas e modelos para a ionosfera, os quais representam com maior eficácia o comportamento da ionosfera na região de interesse (CAMARGO, 1999).

No Brasil, no Departamento de Cartografia da FCT/UNESP, Camargo (1999) desenvolveu um modelo de concepção regional denominado de Mod_Ion, que

representa, de forma analítica, o comportamento da ionosfera. O Mod_Ion permite calcular o erro sistemático devido à ionosfera na portadora L_1 , que é analiticamente representada pela série do tipo de Fourier, bem como o TEC. Os parâmetros dessa série são estimados a partir de dados de receptores GPS de dupla frequência coletados pelas estações ativas da RBMC¹ (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo), porém utilizando estimativa em lote pelo MMQ (Método dos Mínimos Quadrados) (CAMARGO, 1999). A partir dos coeficientes fornecidos pelo modelo é possível corrigir as observáveis GPS da portadora L_1 .

Vários experimentos já foram realizados com o Mod_Ion, e se encontram descritos em vários trabalhos: Camargo (1999), Camargo et al. (2000), Camargo et al. (2001), Camargo e Dal Poz (2002), Dal Poz (2002), Matsuoka (2003), Matsuoka e Camargo (2002). Em um desses experimentos, o modelo de Klobuchar foi avaliado no posicionamento por ponto, e os resultados obtidos foram comparados com os advindos do uso do Mod_Ion. Os resultados do posicionamento, obtidos utilizando as pseudodistâncias (código C/A) corrigidas do efeito da ionosfera com ambos os modelos, mostraram que o Mod_Ion foi mais eficaz que o modelo de Klobuchar, pois obteve-se uma melhora na acurácia das posições estimadas da ordem de 82,3%, com o Mod_Ion, e de 70,4%, com o modelo de Klobuchar (MATSUOKA; CAMARGO, 2002). Aguiar et al. (2003) avaliaram a performance do Mod_Ion e do modelo de Klobuchar na determinação do atraso ionosférico sobre a pseudodistância. Os resultados deste experimento comprovaram a eficácia do Mod_Ion em relação ao modelo de Klobuchar, pois os testes mostram que o Mod_Ion removeu aproximadamente 91,7% do efeito da ionosfera no código C/A, e o modelo de removeu apenas 53,7%. Camargo e Dal Poz (2002)

¹ O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), órgão responsável pela cartografia nacional, estabeleceu a RBMC do Sistema de Posicionamento Global, que efetua coletas de dados continuamente (Fortes, 1997). Atualmente a RBMC é composta de 20 estações em operação, espalhadas pelo Brasil (IBGE, 2005).

também utilizaram o Mod_Ion para produzir mapas do TEC da ionosfera para o Brasil, onde foi possível verificar as variações diurnas e sazonais da mesma.

Entretanto, o Mod_Ion não está implementado para aplicações que requerem a correção da ionosfera em tempo real. Em outras palavras, os dados GPS só podem ser corrigidos após a estimativa dos coeficientes do modelo, que se dá a cada 24 horas, quando a sessão de rastreamento é encerrada pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Porém, existem aplicações onde é de suma importância que as coordenadas da antena do receptor sejam determinadas em tempo real e, conseqüentemente, a correção do efeito da ionosfera deve atender a esse requisito. Além das aplicações de posicionamento, a estimativa do TEC em tempo real é muito importante para quem trabalha com propagação de ondas eletromagnéticas (ISAAKIDIS et al., 2003).

Nos últimos anos várias pesquisas vêm sendo realizadas para melhorar a performance do GPS em tempo real, bem como a utilização deste para estudos da dinâmica da atmosfera terrestre. Dentre os diversos trabalhos pode-se citar: El Gizawy (2003), Hajj et al. (2002), Kee e Yun (1998), Liao (2000), Lin (1997), Liu (2001), Liu (2004), Lu (1991), Moon (2004), Sapucci (2001), Scherliess et al. (2002), Skone (1998, 2000), Wu et al. (1996), entre outros.

Juntamente com os modelos de estimação do efeito sistemático devido à ionosfera em tempo real, vêm sendo desenvolvidos novos métodos para que as correções realizadas por estes modelos sejam mais eficientes, tais como modelos baseados em gride ionosférico, os Modelos Ionosféricos Globais utilizados pelas agências que contribuem com o IGS (*International GNSS Service* – Serviço GNSS Internacional), bem como os Mapas Ionosféricos Globais (GIMs – *Global Ionosphere Map*) produzidos pelo IGS.

A correção do efeito da ionosfera em tempo real, bem como de outros erros sistemáticos envolvidos no posicionamento, pode ser aplicada utilizando *Wide Area*

Differential GPS (WADGPS) (FRAILE, 1995). O WADGPS foi desenvolvido visando reduzir as deficiências inerentes ao DGPS, sem a necessidade de estabelecer um grande número de estações (MONICO, 2000). Logo, o WADGPS inclui estações de referência com linhas base longas. As medidas coletadas em cada estação são enviadas, em tempo real, para uma estação *master*, a qual estima e analisa as componentes do vetor de correções. Portanto, com um sistema WADGPS, as observações de cada estação de referência são processadas e analisadas na estação *master*, onde é estimado o valor do TEC e, um modelo ionosférico é gerado, bem como são estimados os demais erros sistemáticos envolvidos no posicionamento. Neste caso, a ionosfera é monitorada em tempo real, usando observações GPS de dupla frequência de todas as estações de referência.

Em termos computacionais, um algoritmo muito utilizado para estimação de parâmetros em tempo real é o filtro de Kalman (BROWN; HWANG, 1992; GELB et al., 1974; TEUNISSEN, 1990). Segundo Camargo (1992), o filtro de Kalman é um algoritmo empregado para estimar o vetor estado que na comunidade geodésica é conhecido como vetor dos parâmetros com variação temporal, de um sistema dinâmico a partir de observações com flutuações probabilísticas. Pode-se ainda ser classificado como um algoritmo recursivo ótimo para processamento de dados. Tal filtro é recursivo no sentido de que não há necessidade de armazenar todas informações recebidas (CAMARGO, 1992, 2000; FRAILE, 1995; MUELLER; DAVIS, 1998). Isto significa que o algoritmo trabalha com as últimas estimativas e as observações mais recentes, diminuindo, assim, o esforço computacional e otimizando todo o processo de estimação. É ótimo no sentido de que as estimativas são de variância mínima. Porém, para que as estimativas apresentem variância mínima, as observações devem ser isentas de erros grosseiros e os modelos devem ser adequados. A implementação de testes estatísticos no filtro de Kalman, para detecção e identificação de observações com erros, bem como a correção da influência destes é baseada na seqüência de

inovação, isto é, na transição entre o ciclo de propagação e o de atualização, que tem propriedades estatísticas bem definidas (CAMARGO, 1992).

Como já mencionado anteriormente, utilizando-se dados GPS das estações RBMC foi possível calcular os parâmetros do Mod_Ion, para uso em receptores GPS de uma frequência, a partir do MMQ, num ajustamento em lote. No entanto, para a aplicação em tempo real é imprescindível a utilização de um método recursivo (CAMARGO, 2000). Além disto, a aplicação do filtro de Kalman para estimação dos parâmetros do modelo da ionosfera permite um controle de qualidade das observações e informações do comportamento da ionosfera em tempo real.

Nesta pesquisa foi implementado o algoritmo do filtro de Kalman no Mod_Ion, adaptando-o para a forma recursiva visando aplicações em tempo real. Dessa forma, pôde-se estimar os valores do erro sistemático devido à ionosfera, bem como do TEC, em tempo real. Deve-se salientar que para a adaptação da variação temporal do erro devido à ionosfera no filtro de Kalman, foram realizados testes com os processos *random-walk* (RW), *random-constant* (RC) e Gauss-Markov (GM), a fim de verificar qual destes processos melhor representam tal variação. No desenvolvimento deste trabalho utilizou os dados GPS da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) (FORTES, 1997). Como estes dados não são disponibilizados em tempo real, foi feita uma simulação onde o tratamento no processamento se realizou como se assim o fosse, visando assim avaliar a implementação.

1.1. Objetivo

Este projeto de pesquisa tem como objetivo geral implementar o filtro de Kalman no Mod_Ion para permitir estimar os parâmetros do modelo da ionosfera em tempo real, ou próximo disto, bem como implementar e analisar a modelagem da variação temporal

do efeito da ionosfera por meio dos processos aleatórios *Gauss-Markov*, *Random-Walk* e *Random-Constant*. Assim, pretende-se minimizar o erro sistemático devido à ionosfera nas observações de receptores GPS de uma portadora (L_1).

Os objetivos específicos deste projeto de pesquisa são:

- Adaptar o Mod_Ion para aplicações em tempo real a partir da implementação do algoritmo do filtro de Kalman;
- Implementar o controle de qualidade em tempo real, na técnica de filtragem recursiva, com fins de detectar observações com erro grosseiro;
- Implementar no modelo dinâmico os processos *Gauss-Markov*, *Random-Walk* e *Random-Constant*, para a modelagem da variação temporal do efeito da ionosfera;
- Avaliar a eficiência do Mod_Ion na estimativa do atraso ionosférico, em tempo real.

1.2. Justificativa

Atualmente, devido ao seu baixo custo, os receptores de uma frequência são utilizados na maioria dos trabalhos de posicionamento com GPS. Logo, deve-se alertar que, para este tipo de receptor, a maior fonte de erro é a que diz respeito ao erro sistemático devido à ionosfera, que é ultrapassada somente pela SA, atualmente desativada. Devido à isto, é que a determinação do TEC e modelagem da ionosfera em tempo real, em SBAS (*Satellite Based Augmentation System*), tem sido de grande interesse internacional. A estimação dos coeficientes do modelo da ionosfera em tempo real pode ser muito útil, principalmente para

aplicações em navegação de precisão, posicionamento geodésico utilizando receptores de uma frequência, bem como mostrar o comportamento da ionosfera em tempo real. Além disso, a forma recursiva de estimação permite, à medida que novas observações são introduzidas, fazer o controle de qualidade, e assim detectar, com certa probabilidade, observações com erros grosseiros.

Para a aviação civil, é imprescindível o uso de modelos ionosféricos para correção das observações GPS para posicionamento preciso em tempo real, nas etapas da navegação aérea e, principalmente, no suporte aos procedimentos de pouso e decolagem das aeronaves. Nesse tipo de aplicação o GPS é um componente do sistema maior, que nesse caso específico é denominado WAAS (*Wide Area Augmentation System*) (MONICO, 2000).

No Brasil, a FAB (Força Aérea Brasileira) está na fase de estudos da viabilidade da implantação do WAAS na navegação aérea civil por meio de um convênio entre o CTA (Centro Técnico Aeroespacial) e o DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) (DECEA, 2003).

Além disto, informações confiáveis sobre os processos de mudança do clima global e a constante necessidade de melhorar a predição do estado atmosférico em escalas de tempo a curto e médio prazo são somente possíveis com base em registro de dados globais e regionais e em modelagem que represente os parâmetros do estado atmosférico com alta resolução espacial e temporal. Atualmente, o GPS está se tornando uma poderosa ferramenta para a meteorologia operacional e para o monitoramento de importantes parâmetros da atmosfera e ionosfera. Um exemplo desta aplicação do GPS no monitoramento da atmosfera terrestre é a rápida expansão do número de satélites LEO (*Low Earth Orbiting*) carregando instrumentos GPS para medidas de rádio ocultação, tal como os satélites das missões CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload*) (GFZ, 2005), COSMIC (*Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate*) (UCAR, 2005), IOX (*Ionosphere Occultation*

Experiment) (PICOSAT, 2005), ØRSTED (DMI, 2005), GPS-MET (GPS-Meteorológico) (UCAR, 2005) e SAC-C (*Satélite Argentino de Observación de la Tierra*) (CONAE, 2005).

E, por fim, há disponibilidade de dados coletados com receptores GPS de dupla frequência da RBMC, onde se tem a oportunidade de simular o processamento dos dados em tempo real. Neste caso, dentro do que foi exposto, a execução deste trabalho de pesquisa contribuirá com a implementação e avaliação de um algoritmo para modelar a ionosfera em tempo real e cálculo do erro sistemático devido à ionosfera nos sinais GPS, bem como do TEC para uso em aplicações que necessitem dessas informações em tempo real.

1.3. Conteúdo do trabalho

Este trabalho tem seu conteúdo dividido em 7 capítulos, de forma a facilitar o entendimento da interação entre os conceitos multidisciplinares que fazem parte da metodologia adotada para atingir os objetivos propostos. No segundo capítulo, é apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre o GPS, dando-se ênfase às observáveis pseudodistância e fase da onda portadora. A revisão sobre a ionosfera, também é apresentada, ainda neste capítulo, onde são tratadas algumas das principais características da ionosfera, os princípios da propagação de ondas e os efeitos da ionosfera sobre os sinais GPS. No terceiro capítulo, apresentam-se algumas técnicas e modelos para estimar os efeitos da ionosfera, utilizando-se receptores de uma e duas frequências. No quarto capítulo são apresentados, respectivamente, o filtro de Kalman, os processos aleatórios Gauss-Markov, *random-walk* e *random-constant*, e o controle de qualidade aplicado ao ajustamento recursivo. A metodologia utilizada para adaptar o modelo regional da ionosfera em tempo real (Mod_Ion_FK) é apresentada no capítulo quinto. No sexto capítulo são descritos os experimentos, os resultados obtidos e as

diversas análises que foram realizadas nesta pesquisa. E finalmente, no capítulo sete, são apresentadas as considerações, as conclusões e as recomendações.

2. IONOSFERA E SEUS EFEITOS SOBRE OS SINAIS GPS

2.1. O GPS e suas observáveis

Os satélites do GPS transmitem dois sinais ou frequências portadoras na banda L denominadas de L_1 e L_2 , situadas no intervalo de frequência entre 1 e 2 GHz, com polarização circular à direita (TEUNISSEN; KLEUSBERG, 1998). Estas duas portadoras são geradas simultaneamente a partir de uma frequência fundamental (f_0) de 10,23 MHz, que é produzida por osciladores (relógios atômicos de césio e rubídio) com estabilidade entre 10^{-12} e 10^{-13} segundos. L_1 e L_2 correspondem à frequência fundamental multiplicada por 154 e 120, respectivamente (MONICO, 2000; SEEBER, 1993). Desta forma, L_1 corresponde à frequência de 1575,42 MHz, enquanto que L_2 corresponde à 1227,60 MHz. As frequências portadoras têm comprimento de onda de aproximadamente 19,05 e 24,45 cm, para L_1 e L_2 , respectivamente.

O tipo de observação obtida com GPS depende do tipo de receptor que está sendo usado. Os receptores de simples frequência podem fornecer observações somente na portadora L_1 , enquanto alguns receptores *semi-codeless* ou *codeless* podem fornecer observações nas portadoras L_1 e L_2 (LIAO, 2000). Em todo caso, podem ser identificados quatro tipos básicos de observáveis que permitem determinar posição, velocidade e tempo (SEEBER, 1993):

- medidas de pseudodistâncias a partir do código;
- diferenças de pseudodistâncias a partir da contagem integrada Doppler;
- fase da onda portadora ou diferença da fase da onda portadora; e

- diferenças do tempo de viagem do sinal a partir das medições interferométricas.

Destes quatro tipos de observáveis GPS, duas são mais importantes e utilizadas em posicionamento: a pseudodistância obtida, a partir do código, e a fase de batimento da onda portadora, também referida como fase da onda portadora ou simplesmente fase da portadora. A primeira é, geralmente, usada para navegação, enquanto, em levantamentos de alta precisão, utiliza-se a fase da portadora (LEICK, 1995).

A pseudodistância representa a distância medida entre o satélite e a antena receptora, e pode ser obtida através da comparação entre os segmentos específicos dos códigos PRN (código C/A sobre a portadora L_1 e/ou código P sobre a portadora L_1 ou L_2), gerados pelos osciladores dos satélites e suas respectivas réplicas geradas internamente no receptor. A pseudodistância é dada pelo tempo que o sinal GPS leva para viajar do satélite até a antena do receptor. Este tempo é multiplicado pela velocidade da luz no vácuo, para fornecer a pseudodistância. De modo geral a equação da pseudodistância pode ser expressa por:

$$P_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_r^s + T_r^s + dm_r^s + \varepsilon_{P_r}^s, \quad (1)$$

onde as coordenadas da antena receptora e do satélite estão implícitas na distância geométrica ρ_r^s , os erros dos relógios em relação ao sistema de tempo GPS ($t_{(GPS)}$) são dados por dt^s e dt_r , I_r^s e T_r^s são os erros sistemáticos devido à refração ionosférica e à refração troposférica, respectivamente, dm_r^s representa o efeito do multicaminho e ε_p representa os erros aleatórios

e demais erros sistemáticos. A velocidade da luz é dada pela constante c ($2,99792458 \times 10^8$ m/s).

A observável fase da onda portadora (ϕ_r^s) é a diferença entre a fase do sinal de referência gerado pelo oscilador do receptor e a fase do sinal transmitido pelo satélite e recebido no receptor.

Uma expressão em unidades de comprimento e de forma completa, considerando a ambigüidade (N_r^s), os efeitos devidos ao atraso ionosférico (I_r^s), ao atraso troposférico (T_r^s), multicaminho (dm) e às demais influências aleatórias (ruídos da observação) e/ou sistemáticas ($\varepsilon_{\phi_r^s}$), é apresentada a seguir (MONICO, 2000):

$$\lambda \phi_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) - I_r^s + T_r^s + dm + \lambda N_r^s + \varepsilon_{\phi_r^s}. \quad (2)$$

Nota-se na equação 2 que devido ao avanço sofrido pela observável fase da onda portadora, ao atravessar a ionosfera, o efeito deste comporta-se de maneira oposta ao caso da equação 1 da pseudodistância, que por sua vez, sofre um retardo. Tal fato fica evidenciado pelo sinal negativo do erro sistemático (I_r^s) devido à ionosfera, pois um avanço na fase provoca uma diminuição na distância obtida a partir do mesmo.

2.2. Ionosfera

Como mencionado anteriormente o GPS está sujeito a diversas fontes de erro, dentre as quais dá-se destaque àquela referente à influência da ionosfera na propagação dos sinais GPS, quando este viaja pela atmosfera terrestre. Segundo um esquema simplificado

em Seeber (1993), a atmosfera terrestre pode ser dividida em função de fatores tais como temperatura, ionização, campo magnético, propagação de ondas eletromagnéticas e técnico (Figura 1).

Altitude (km)	Temperatura	Ionização	Campo Magnético	Propagação	Técnico
100000	Termosfera	Ionosfera	Magnetosfera	Ionosfera	Atmosfera Superior
10000					
1000					
100	Mesosfera	Neutrosfera	Dinamosfera	Troposfera	Atmosfera Inferior
10	Estratosfera				
	Troposfera				

Figura 1 - Esquema de subdivisão da atmosfera terrestre.

Fonte: Adaptada de Seeber (2003, p.48).

De acordo com o objetivo deste trabalho é apropriado considerar a divisão da atmosfera, com respeito à propagação de ondas eletromagnéticas, em troposfera e ionosfera, pois, ao se propagarem nestes meios, as ondas sofrem diferentes influências. A camada da atmosfera superior entre, aproximadamente, 50 e 1000 km, recebe o nome de ionosfera. Na realidade, a fronteira superior da ionosfera não é bem definida, pois, a mesma pode ser interpretada como uma zona de transição com a plasmasfera. O nome “ionosfera” foi proposto por R.A. Watson-watt em 1926, e tornou-se comum o seu uso a partir de 1930 (RISHBETH; GARRIOTT², 1969 apud Liao 2000). A formação da ionosfera está intimamente associada à radiação solar incidente na atmosfera terrestre e, com menor grau de importância, à radiação cósmica. Conseqüentemente, o comportamento desta região depende

² RISHBETH, H.; GARRIOTT, O.K. *Introduction to Ionospheric Physics*. New York: Academic Press. 1969.

do ângulo zenital do sol, da latitude, da estação do ano e do nível de atividade solar (FEDRIZZI, 1999). Esta camada superior da atmosfera é caracterizada por apresentar uma alta densidade de íons e elétrons capaz de afetar a propagação de ondas de rádio, tais como as transmitidas pelos satélites do GPS. Portanto, ao contrário da troposfera, a ionosfera é um meio dispersivo, ou seja, a propagação dos sinais depende da frequência.

Logo, quando ondas de rádio na banda L, de sistemas de navegação, tais como o GPS, viajam através da ionosfera, estas estão sujeitas a um atraso no tempo de propagação e mudanças na polarização, fase e amplitude. Este impacto é devido ao efeito dos elétrons livres sobre os sinais de rádio (STOLLE et al., 2003).

Com enfoque neste trabalho, um dos parâmetros mais importantes e que caracteriza a camada da ionosfera é o índice de refração. Conhecer o índice de refração da ionosfera é essencial quando se estudam os possíveis efeitos da ionosfera sobre a propagação dos sinais GPS (EL GIZAWY, 2003; LIAO, 2000). A partir do efeito de refração sobre estes sinais é possível se obter o TEC ao longo do caminho percorrido pelo sinal. Por outro lado, o efeito da cintilação ionosférica sobre um sinal transionosférico, ou seja, as variações irregulares na amplitude ou na fase do sinal após ter passado pela ionosfera, é um indicador da presença de irregularidades ionosféricas na linha de visada deste sinal.

Para facilitar a compreensão do cálculo da refração ionosférica, será apresentada uma breve descrição da teoria de propagação de ondas eletromagnéticas. Este assunto é apresentado em mais detalhes em Davies (1990) e Leick (1995).

2.3. Princípios da propagação de ondas

No que diz respeito à propagação dos sinais GPS na ionosfera, já foi citado que a fase da onda portadora sofre um avanço e o grupo de ondas sofre um retardo,

provocando uma diminuição e um aumento na distância medida pela fase e pelo código, respectivamente. Este fato é uma decorrência da natureza dispersiva da ionosfera, onde a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética depende de sua frequência. Para se entender este fenômeno, é suficiente considerar uma situação simplificada de propagação de ondas em um meio homogêneo e isotrópico (LEICK, 1995). Em um meio homogêneo o índice de refração é constante e a propriedade isotrópica faz com que a velocidade de propagação em um dado ponto no meio seja independente da direção da propagação.

Em um meio homogêneo e isotrópico uma onda harmônica com amplitude unitária é expressa por (LEICK, 1995):

$$\varphi = \cos \omega \left(t - \frac{x}{v_f} \right). \quad (3)$$

O símbolo t (s) denota o tempo, v_f (m/s) é a velocidade da fase ou velocidade de propagação da onda, e x (m) é a distância da fonte transmissora. A frequência angular ω (rad/s), a frequência f (Hz), o comprimento de onda λ_f (m), e o número da onda ou constante k (rad/m) de propagação da fase são dados, respectivamente, por:

$$\omega = 2\pi f, \quad (4)$$

$$\lambda_f = \frac{v_f}{f}, \text{ e} \quad (5)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_f}. \quad (6)$$

A partir das equações 4 a 6, a equação da onda (3) pode ser escrita para uma onda φ_1 como:

$$\varphi_1 = \cos(\omega t - kx). \quad (7)$$

Considerando-se uma outra onda φ_2 com uma pequena diferença na frequência e no número de onda, tem-se que (LEICK, 1995):

$$\varphi_2 = \cos[(\omega + \Delta\omega)t - (k + \Delta k)x]. \quad (8)$$

Estas duas ondas harmônicas, φ_1 e φ_2 , podem ser superpostas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \varphi_S &= \varphi_1 + \varphi_2, \\ \varphi_S &= 2 \cos \frac{\Delta\omega t - \Delta kx}{2} \cos \left[\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2} \right) t - \left(k + \frac{\Delta k}{2} \right) x \right], \end{aligned} \quad (9)$$

onde φ_S é a onda resultante da superposição de φ_1 e φ_2 . Na Figura 2 apresenta-se a superposição das ondas φ_1 e φ_2 e a propagação da fase e do grupo.

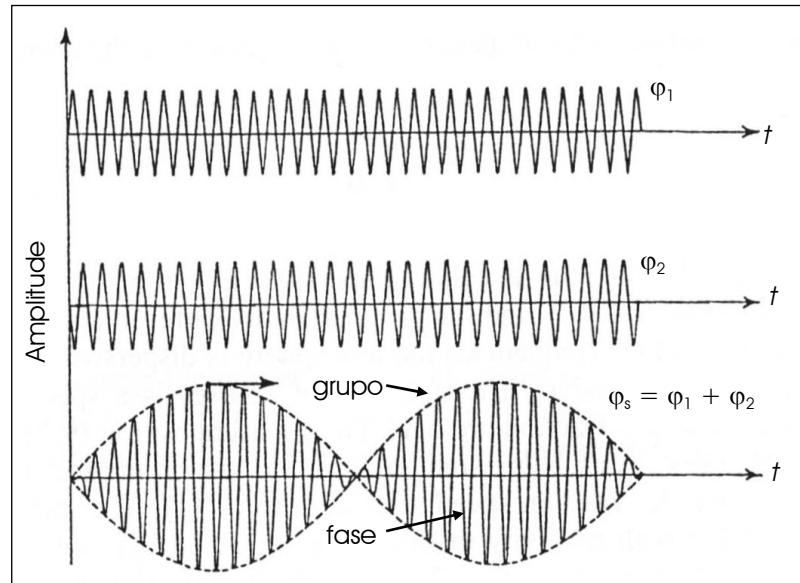


Figura 2 - Propagação da fase e do grupo.
Fonte: Leick (1995, p.293).

O sinal combinado (Figura 2) mostra duas componentes de ondas de frequência significativamente diferentes. A onda envoltória ou o batimento do sinal é dado pelo seguinte termo da equação 9:

$$\psi = 2 \cos \frac{\Delta\omega t - \Delta k x}{2}. \quad (10)$$

Analogamente à equação 3, a expressão 10 implica numa velocidade de propagação de batimento do sinal de:

$$v_g = \frac{\Delta\omega}{\Delta k}, \quad (11)$$

onde v_g é a velocidade de grupo. Esta quantidade é a velocidade pela qual a modulação ou energia viaja. Como a modulação (códigos P e C/A) é usada no posicionamento GPS em

adição à fase da portadora, é importante estabelecer uma relação entre a velocidade de grupo e a velocidade de fase.

Considerando que, no limite, $\Delta\omega \rightarrow 0$ e $\Delta k \rightarrow 0$, a equação 11 pode ser dada por:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk}. \quad (12)$$

A segunda componente na equação 9 é a portadora. A frequência desta componente aproxima-se de ω no limite (LEICK, 1995).

O produto do índice de refração da fase (n_f) e a velocidade de fase (v_f) é igual a velocidade da luz (c) no vácuo:

$$n_f v_f = c. \quad (13)$$

Seguindo uma analogia para o índice de refração e velocidade de grupo, tem-se que:

$$n_g v_g = c. \quad (14)$$

Usando as várias relações apresentadas nas equações de 3 a 14, o índice de refração de grupo pode ser expresso por:

$$\begin{aligned}
n_g &= \frac{c}{v_g} = c \frac{dk}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{2\pi c}{\lambda_f} \right) = \frac{d}{d\omega} \left(n_f \frac{v_f}{c} \frac{2\pi c}{\lambda_f} \right) \\
n_g &= \frac{d}{d\omega} \left(n_f \frac{v_f}{c} \frac{2\pi c}{\lambda_f} \frac{\omega}{2\pi f} \right) \\
n_g &= \frac{d}{d\omega} (n_f \omega) = n_f + \omega \frac{dn_f}{d\omega} \\
n_g &= n_f + f \frac{dn_f}{df}.
\end{aligned} \tag{15}$$

Segundo Leick (1995), se o índice de refração de grupo (n_g) depende da frequência (f) da fase da portadora, a derivada:

$$\frac{dn_f}{df} \neq 0, \tag{16}$$

então o meio é chamado de dispersivo. Logo, as equações 12 a 15 mostram que as velocidades de fase e de grupo são diferentes em um meio dispersivo (LEICK, 1995), pois apresentam diferentes índices de refração.

2.4. Índice de refração da ionosfera

Como já mencionado anteriormente, devido à natureza dispersiva da ionosfera, a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética depende de sua frequência. Os principais efeitos deste meio anisotrópico sobre os sinais GPS são o atraso de grupo na modulação do sinal e o avanço na fase portadora.

A propagação de onda através de um meio é caracterizada pelo índice de refração, e pode ser expresso como:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (17)$$

onde, c é a velocidade da luz no vácuo e v é a velocidade da onda no meio.

Como a ionosfera é um meio não homogêneo, o índice de refração da fase (n_f) em uma determinada localização na ionosfera pode ser expresso pela fórmula de Appleton-Hartree (EL GIZAWY, 2003; MOON, 2004; TEUNISSEN; KLEUSBERG, 1998):

$$n_f^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \pm \left[\frac{Y_T^4}{4(1 - X - iZ)^2} + Y_L^2 \right]^{1/2}} \quad (18)$$

onde:

$$X = n_e e^2 / \epsilon_0 m \omega^2 = f_N^2 / f^2;$$

$$Y_L = eB \cos \theta / m \omega = f_H \cos \theta / f;$$

$$Y_T = eB \sin \theta / m \omega = f_H \sin \theta / f;$$

$$Z = f_v / f;$$

$$\omega = 2\pi f;$$

n_e - densidade de elétrons (el/m³);

f_N - frequência de elétrons no plasma (MHz);

f - frequência da onda de rádio (MHz);

e - carga do elétron, $-1,602 \times 10^{-19}$ (coulomb);

ϵ_0 - permissividade do espaço livre, $8,854 \times 10^{-12}$ (farads/m);

B - densidade do fluxo do campo magnético da Terra (T);

M - massa do elétron, $9,107 \times 10^{-31}$ kg;

θ - ângulo entre a direção da normal da onda e o campo magnético;

f_v - frequência de colisão dos elétrons com partículas pesadas (MHz); e

f_H - girofrequência do elétron (MHz).

Na equação 18 os termos de ordens superiores a 1 podem ser desprezados (EL GIZAWY, 2003), pois a contribuição destes termos é de cerca de 1 a 2 mm para usuários GPS, durante condições de atividade solar máxima. Assim, o índice de refração da fase pode ser expresso como (EL GIZAWY, 2003; SEEBER, 1993, 2003; SKONE, 1998):

$$n_f = 1 - \frac{X}{2} = 1 - \frac{(2\pi)^2 n_e e^2}{2m\epsilon_0 (2\pi)^2 f^2}. \quad (19)$$

Substituindo os valores das constantes e , m e ϵ_0 na equação 19, o índice de refração da fase pode ser dado por:

$$n_f = 1 - \frac{40,3n_e}{f^2}, \quad (20)$$

portanto, o índice de refração da fase depende principalmente da densidade de elétrons (n_e) e da frequência (f) da onda de rádio.

O índice de refração de grupo pode ser derivado da relação apresentada na equação 15, tal que (SKONE, 1998):

$$n_g = n_f + f \frac{dn_f}{df} = \left(1 - \frac{40,3n_e}{f^2}\right) + \frac{80,6 f n_e}{f^3} = 1 + \frac{40,3n_e}{f^2} \quad (21)$$

Analisando as equações 20 e 21 nota-se que o índice de refração de grupo sempre é maior que o índice de refração da fase. Isto faz com que, na propagação dos sinais GPS, ocorra um atraso na velocidade de grupo e um avanço na fase, provocando um aumento nas distâncias obtidas a partir do código, e uma diminuição nas distâncias obtidas a partir da fase, de uma mesma quantidade, respectivamente.

2.5. Impacto da ionosfera sobre os sinais GPS

A ionosfera influencia a propagação de ondas eletromagnéticas, as quais são refratadas, refletidas e absorvidas de vários modos, de acordo com suas propriedades dispersivas. Para melhorar a acurácia no posicionamento GPS e na navegação de precisão, o erro sistemático devido aos efeitos da ionosfera devem ser determinados para o período em que as observações foram realizadas. Os efeitos ionosféricos nas medidas GPS ocorrem diretamente na forma de atraso do grupo e avanço da fase, os quais serão discutidos na seção seguinte.

2.5.1. Atraso de grupo e avanço da fase

As medidas GPS de pseudodistância e de fase da portadora são estimadas com base na suposição de que a velocidade e o comprimento de onda do sinal são iguais aos valores válidos para uma onda eletromagnética propagando-se no vácuo. Porém, devido às

propriedades físicas da ionosfera, o índice de refração da ionosfera tem um valor não unitário. As velocidades da fase e de grupo podem ser obtidas como (MOON, 2004; SEEBER, 1993, 2003; SKONE, 1998):

$$v_f = \frac{c}{n_f} = \frac{c}{1 - \frac{40,3n_e}{f^2}} \approx c \left(1 + \frac{40,3n_e}{f^2} \right), \text{ e} \quad (22)$$

$$v_g = \frac{c}{n_g} = \frac{c}{1 + \frac{40,3n_e}{f^2}} \approx c \left(1 - \frac{40,3n_e}{f^2} \right), \quad (23)$$

onde n_f e n_g são dados pelas equações 20 e 21, respectivamente.

O efeito da refração ionosférica pode ser obtido pela subtração da distância geométrica satélite-receptor (S), afetada pela refração ionosférica, da distância geométrica (ρ), livre da refração ionosférica.

A distância (S) entre o satélite (s) e a antena receptora (r), considerando apenas o erro devido à refração ionosférica, é definida por (LEICK, 1995):

$$S = \int_r^s n \, ds, \quad (24)$$

onde n representa, de forma genérica, o índice de refração para a fase ou grupo. A distância medida (S) é influenciada pelo índice de refração da ionosfera e a integral é estendida ao longo do caminho do sinal. A distância geométrica (ρ) entre o satélite e a antena receptora é obtida quando o índice de refração (n) é unitário, logo:

$$\rho = \int_r^s ds. \quad (25)$$

Assim, o erro devido à refração ionosférica (I_r^s) é dado por:

$$I_r^s = \int_r^s n \, ds - \int_r^s ds. \quad (26)$$

Substituindo os índices de refração da fase (20) e do grupo (21) na equação 26, obtém-se os erros sistemáticos devido à ionosfera para a fase da portadora ($I_{r_r}^s$) e para os sinais modulados pelo código ($I_{g_r}^s$). Desta forma, para a fase da portadora tem-se que:

$$I_{r_r}^s = \int_r^s \left(1 - \frac{40,3n_e}{f^2} \right) ds - \rho, \quad (27)$$

ou

$$I_{r_r}^s = - \frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e \, ds, \quad (28)$$

e, para os sinais modulados pelo código, tem-se:

$$I_{g_r}^s = \int_r^s \left(1 + \frac{40,3n_e}{f^2} \right) ds - \rho, \quad (29)$$

ou

$$I_{g_r}^s = \frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e \, ds, \quad (30)$$

onde a quantidade $\int_r^s n_e ds$ caracteriza a quantidade de elétrons livres em uma coluna de 1 m^2 ao longo do caminho (s) percorrido pelo sinal, e que representa o TEC. Assim, a magnitude do erro na distância é uma função do TEC ao longo do caminho do sinal (LEICK, 1995):

$$\text{TEC} = \int_r^s n_e ds. \quad (31)$$

A unidade do TEC é dada em elétrons por metro quadrado (el/m^2). Substituindo a equação 31 nas equações 28 e 30, obtém-se o erro devido à refração ionosférica para a fase da portadora e para os sinais modulados pelo código em função do TEC e da frequência:

$$I_{r_r}^s = -\frac{40,3}{f^2} \text{TEC}, \quad (32)$$

$$I_{g_r}^s = \frac{40,3}{f^2} \text{TEC}. \quad (33)$$

A refração ionosférica relacionada com o código ($I_{g_r}^s$) é usualmente denominada de atraso de grupo ou atraso ionosférico. De acordo com as equações 32 e 33, percebe-se que o erro devido à refração ionosférica, seja ela incidente sobre a fase da portadora ou sobre os sinais modulados pelo código, é inversamente proporcional ao quadrado da frequência e diretamente proporcional ao TEC. Logo, as frequências mais altas são menos afetadas pela ionosfera. Nota-se, ainda, que a magnitude do erro na distância é igual para as medidas de pseudodistância e fase, mas com sinais opostos. A Tabela 1 apresenta o efeito que

a ionosfera causa na propagação para diferentes frequências e indica o erro residual na vertical para a combinação linear *ion-free* entre duas frequências (SEEBER, 1993).

Tabela 1 - Efeito da ionosfera em distâncias observadas na vertical com uma frequência e erros residuais para combinação linear *ion-free*.

Uma frequência	400 MHz	1600 MHz	2000 MHz	8000 MHz
Efeito médio	50 m	3 m	2 m	0,12 m
90% < do que	250 m	15 m	10 m	0,6 m
Efeito máximo	500 m	30 m	20 m	1,2 m
Duas frequências	150/400 MHz	400/2000 MHz	1227/1572 MHz	2000/8000 MHz
Efeito médio	0,6 m	0,9 cm	0,3 cm	0,04 cm
90% < do que	10 m	6,6 cm	1,7 cm	0,21 cm
Efeito máximo	36 m	22 cm	4,5 cm	0,43 cm

Fonte: Adaptado de Hieber³ (1983 apud SEEBER, 1993, p.44).

Devido à aproximação na obtenção do índice de refração, a correção do erro sistemático devido à ionosfera, calculada pelas expressões 32 e 33, representa somente o efeito de primeira ordem da ionosfera, o qual pode ser modelado com dados obtidos com receptores GPS de dupla frequência. Conforme mostrado na Tabela 1, o erro remanescente representa poucos centímetros (SEEBER, 1993). A Tabela 2 apresenta o erro máximo, na direção vertical, que pode ser esperado para as portadoras L_1 , L_2 e para a combinação linear livre da ionosfera ($L_0 - ion free$). Para direções inclinadas, a influência aumenta até 3 vezes (SEEBER, 1993).

³ HIEBER, S. Satellite systems for geodesy and geodynamics. CSTG Bull. N.6, p.253-261. 1983.

Tabela 2 - Máximo efeito sistemático vertical devido à ionosfera.

Frequência	Efeito de 1 ^a ordem (1 / f ²)	Efeito de 2 ^a ordem (1 / f ³)	Efeito de 3 ^a ordem (1 / f ⁴)
L ₁	32,5 m	0,036 m	0,002 m
L ₂	53,5 m	0,076 m	0,007 m
L ₀	0,0 m	0,026 m	0,006 m

Fonte: Adaptado de Wübbena⁴ (1991 apud SEEBER, 1993, p.304).

2.5.2. Cintilação

As cintilações ionosféricas são rápidas variações na fase e amplitude do sinal GPS recebido, as quais são causadas por irregularidades na densidade de elétrons ao longo do caminho percorrido pelo sinal na ionosfera (BATISTA, 2003; CONKER, 2000; EL GIZAWY, 2003; WEBSTER, 1993).

Em 1946 foram observadas, pela primeira vez, flutuações irregulares de curto período de tempo na intensidade da radiação na banda de rádio (64 MHz) emitida pela estrela Cygnus (HEY⁵ et al., 1946 apud RODRIGUES, 2003). Após o lançamento do primeiro satélite artificial em 1957, tornou-se possível observar cintilações ionosféricas em sinais emitidos por rádio-transmissores a bordo de satélites (RODRIGUES, 2003).

Períodos de cintilação estão associados à existência de regiões com pequena escala de irregularidades na densidade eletrônica na camada ionosférica, como apresentado na Figura 3 (EL GIZAWY, 2003).

⁴ WÜBBENA, G. Zu Modellierung von GPS Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung. Wiss. Arb. Univ. Hannover, 1991.

⁵ HEY, J.S.; PARSONS, S.J.; PHILLIPS, J.W. Fluctuations in cosmic radiation at radio frequencies. *Nature (London)*. v.158, p.247, 1946.

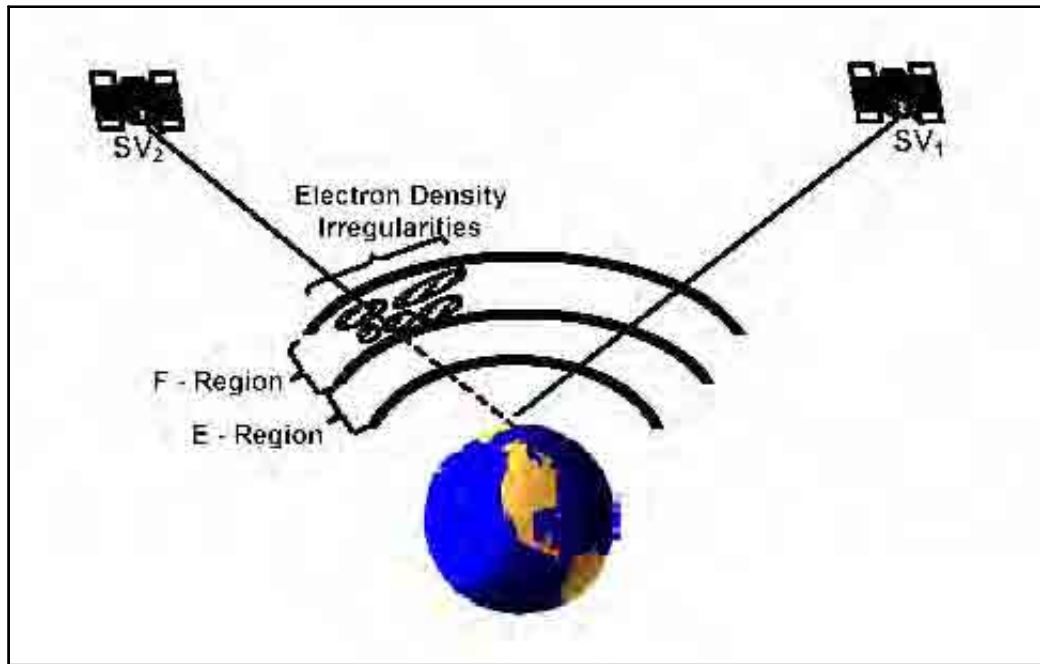


Figura 3 - Irregularidades na densidade de elétrons da ionosfera
 Fonte: Adaptada de El Gizawy (2003, p.34).

Estes padrões de irregularidades podem se mover através da ionosfera, bem como a linha de visada satélite-receptor em relação às irregularidades. A severidade dos efeitos da cintilação está relacionada à densidade e ao tamanho dos padrões de irregularidades na densidade de elétrons.

Segundo Skone (2000), os efeitos mais intensos da cintilação ionosférica ocorrem nas regiões de baixa latitude geomagnética (± 10 até ± 20 graus), nas regiões onde ocorrem as auroras (65 até 75 graus de latitude geomagnética), e na região que envolve a capa polar (latitudes geomagnéticas maiores que 75 graus). Cintilações que ocorrem nas regiões de altas latitudes (região auroral) e na região equatorial surgem de distintos fenômenos físicos. Na região auroral, a ocorrência da cintilação é devida às tempestades geomagnéticas ou magnetosféricas. No caso da região equatorial, a cintilação está relacionada mais diretamente com a anomalia equatorial. As cintilações que ocorrem na região equatorial possuem um maior impacto na performance de rastreamento dos receptores do que na região de altas latitudes (SKONE, 2000).

No Brasil, as ocorrências de cintilações são mínimas de abril até agosto, e máximas de setembro a março. Os horários diários de cintilação mais intensos são limitados a uma hora, após o pôr do Sol, até aproximadamente à meia noite local (CAMPOS et al., 1993).

A cintilação ionosférica tem o potencial de afetar todos os serviços GPS, incluindo o Serviço de Posicionamento Padrão (SPS) e o Serviço de Posicionamento Preciso (PPS), no rastreamento de receptores de simples e dupla frequência, tanto no posicionamento por ponto como no relativo (FU et al., 1999).

Devido à cintilação, a fase nas portadoras L_1 e L_2 pode mudar significativamente entre duas épocas consecutivas. A mudança rápida na frequência do sinal recebido, associada aos efeitos de cintilação na fase, pode provocar a perda do sinal pelo sistema dos receptores GPS (EL GIZAWY, 2003). A cintilação da fase pode ser detectada usando dados contínuos de dupla frequência com a série temporal da Taxa do Índice de TEC (ROTI – *Rate Of TEC Index*). Cientistas têm usado com sucesso a rede GPS do IGS para detectar as cintilações ionosféricas usando índices tais como o S4 e σ_ϕ (PI⁶ et al, 1999 apud LIAO, 2000).

Durante eventos de cintilação, a performance do rastreamento em L_1 é menos afetada que o rastreamento em L_2 . Esta relação é esperada, pois a banda L_2 é mais estreita do que L_1 . A perda do sinal em L_2 afeta fortemente aplicações onde são necessárias observações de dupla frequência. Estas aplicações dependem, portanto, da natureza dispersiva da ionosfera para detectar a refração ionosférica. Conseqüentemente, torna-se necessário monitorar as cintilações ionosféricas em períodos de alta atividade da ionosfera. No entanto, a performance de rastreamento dos receptores GPS não depende somente da magnitude da atividade da cintilação ionosférica, mas também da capacidade de rastreamento dos receptores

⁶ PI, X.Q., NANDI, S.; STOWERS, D.A.; MARCIN, M.R, LINDQWISTER, U.J., MOORE, A.W.; FORT, D.N.; KLOBUCHAR, J.A. Development of Ionospheric Scintillation Monitoring System Using Receivers of the IGS Global GPS Network, In: *ION 55th Annual Meeting*, Cambridge, MA, 28-30 June, 1999.

GPS. Recentes pesquisas têm mostrado que a performance pode variar significativamente entre receptores, sob idênticas condições de cintilação ionosférica (SKONE, 2000).

3. TÉCNICAS DE CORREÇÃO DOS EFEITOS DA REFRAÇÃO IONOSFÉRICA PARA POSICIONAMENTO COM RECEPTORES DE UMA FREQUÊNCIA

Como já mencionado, a ionosfera afeta os sinais GPS no seu trajeto entre o satélite e o receptor, provocando um atraso no grupo (código) e um avanço na fase da portadora. Isto resulta num aumento nas distâncias obtidas a partir do código e numa diminuição nas obtidas pela fase da portadora de uma mesma quantidade, mas de sinais opostos. Este efeito é proporcional ao TEC e inversamente proporcional ao quadrado da frequência.

Diferentes métodos são disponíveis para determinar o erro devido à ionosfera e então minimizá-lo nas medidas GPS. Vários métodos e modelos foram desenvolvidos para a correção da refração ionosférica na portadora L_1 dos receptores GPS de uma frequência. A quantificação desse efeito pode ser feita através de:

- coeficientes transmitidos nas mensagens de navegação, utilizando o modelo *broadcast*;
- observações coletadas com receptores GPS de uma frequência; e
- observações coletadas com receptores GPS de dupla frequência.

3.1. Modelo *Broadcast*

O modelo matemático envolvido na correção do efeito da ionosfera no GPS, cujos coeficientes são transmitidos com as mensagens de navegação, foi desenvolvido por Klobuchar (1987) para atender, especificamente, os usuários de receptores GPS de simples frequência. O modelo *broadcast* também é conhecido por modelo de Klobuchar. Esse modelo

permite calcular o atraso ionosférico, ou seja, a correção ionosférica para a pseudodistância entre o satélite e o receptor. Os coeficientes do modelo, num total de oito (α_i e β_i , $i = 0, \dots, 3$), são transmitidos pelos satélites como parte das mensagens de navegação (LEICK, 1995). Portanto, são válidos para qualquer usuário do sistema GPS, razão pela qual é considerado como um modelo global.

Para descrever a variação da ionosfera durante o dia, o modelo utiliza-se da função co-seno com amplitude máxima às 14:00 horas locais. A amplitude e o período da função co-seno são calculados em função da latitude geomagnética e dos coeficientes transmitidos pelos satélites e representados por um polinômio de terceiro grau. Durante a noite, o atraso ionosférico em L_1 é considerado constante e igual a 5 nanosegundos e que equivale, aproximadamente, a 1,5 m ou 9,24 unidades de TEC (TECU), sendo que $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$ (CAMARGO, 1999). A Figura 4 mostra uma representação da ionosfera a partir das mensagens transmitidas (NEWBY; LANGLEY, 1992).

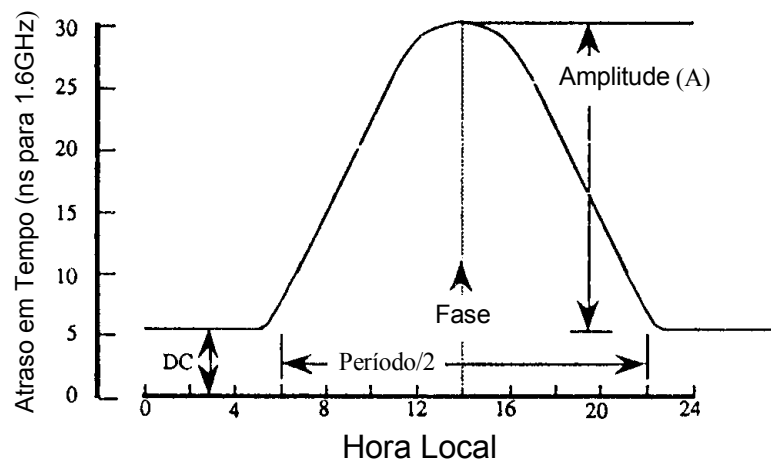


Figura 4 - Representação da ionosfera a partir das mensagens transmitidas.
Fonte: Adaptada de Newby et al. (1990).

O algoritmo empregado no modelo de Klobuchar para calcular a correção ionosférica das medidas feitas com a portadora L_1 , além dos oitos coeficientes, utiliza a

latitude, a longitude geodésica da estação, o azimute, o ângulo de elevação do satélite e o tempo GPS da época de observação. A seqüência detalhada deste algoritmo pode ser encontrada em Camargo (1999), Leick (1995), Matsuoka e Camargo (2002) e Matsuoka (2003).

De acordo com a literatura, o modelo compensa aproximadamente 50-60% do atraso ionosférico total em regiões de latitudes médias (LEICK, 1995). Este modelo pode satisfazer em geral aplicações de navegação de baixa precisão.

3.2. Cálculo da correção ionosférica com o uso de receptores de uma frequência

Alguns modelos foram desenvolvidos para calcular a correção da ionosfera com observações coletadas com receptores de uma frequência, que utilizam o código C/A e a fase da portadora L_1 . O cálculo do erro devido à ionosfera é baseado na diferença entre as observações da pseudodistância (equação 1) e da fase da portadora (equação 2), dada por (LEICK, 1995):

$$P_r^s - \lambda_1 \phi_r^s = 2I_r^s - \lambda_1 N_r^s + (S_p - S_\phi)^s + (R_p - R_\phi)_r + \varepsilon_p - \varepsilon_\phi. \quad (34)$$

Nota-se que na equação 34 os termos $(S_p - S_\phi)^s$ e $(R_p - R_\phi)_r$ representam, respectivamente, as tendências interfrequência nos satélites e receptores, nas medidas da pseudodistância (índice p) e da fase da portadora (índice ϕ).

A equação 34 é expressa em função do erro, devido à ionosfera, da ambigüidade inicial, das tendências instrumentais dos satélites e do receptor, e de outros erros, tais como o efeito do multicaminhamento, o ruído da pseudodistância e da fase da

portadora, etc. Esta equação contém muitos termos incógnitos. Mesmo desprezando aqueles referentes às tendências instrumentais e os demais erros (ε_p e ε_ϕ), o atraso devido à ionosfera e as ambigüidades não podem ser estimados separadamente, pois, a cada época t , é adicionada uma nova incógnita, a qual se refere ao efeito da ionosfera. Algumas soluções têm sido propostas para modelar as principais características da ionosfera. Porém, elas são limitadas pela baixa acurácia nas medidas das pseudodistâncias (LEICK, 1995).

Alguns modelos utilizados para calcular a correção da ionosfera com medidas feitas em L_1 serão descritos a seguir.

3.2.1. Modelos para calcular a correção da refração ionosférica

O erro sistemático na vertical, devido à refração ionosférica na portadora L_1 , pode ser modulado utilizando o modelo da lâmina ionosférica, modelo diário com função cosseno e modelo do ponto ionosférico.

O modelo da lâmina ionosférica é considerado como sendo a forma mais simples para a modelagem do efeito da ionosfera, pois não considera a curvatura da Terra. A ionosfera é considerada uma superfície plana e de igual densidade, contendo uma distribuição homogênea de elétrons livres. A refração ionosférica ao longo do caminho satélite/receptor (I_r^s), na portadora L_1 , é dado por:

$$I_r^s = \frac{I^v}{\text{sen}(el)}, \quad (35)$$

onde (el) representa o ângulo de elevação do satélite do ponto de vista do receptor. O atraso ionosférico vertical (I^v) é considerado constante no modelo e não depende do azimute do satélite.

Já o modelo diário com função co-seno leva em consideração a rotação da Terra e o movimento diário do Sol, com respeito à localização do receptor GPS. O atraso ionosférico vertical é modelado pela função co-seno:

$$I^v = I_{\max}^v \cos(h_s - 14^h), \quad (36)$$

onde h_s representa o ângulo horário do Sol. O atraso ionosférico vertical máximo (I_{\max}^v) ocorre próximo às 14:00 horas local.

O modelo do ponto ionosférico tem o mesmo princípio do modelo da camada ou lâmina ionosférica, porém utiliza uma camada ionosférica de altura média de 300 a 400 Km. O modelo dado pela equação 35 é substituído por:

$$I_r^s = \frac{I^v}{\text{sen}(el')}. \quad (37)$$

onde $el' = 90^\circ - z'^s$, representa o ângulo de elevação do satélite no ponto ionosférico IP. O valor de z'^s , que representa o ângulo zenital do caminho do sinal calculado no ponto em que este atravessa a camada ionosférica (IP) à um plano de altitude média h_m , é obtido de acordo com a seguinte equação (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; COLLINS, 2001):

$$\text{sen } z'^s = \frac{r_m}{r_m + h_m} \text{sen } z, \quad (38)$$

onde r_m é o raio médio da Terra, h_m representa a altura média da ionosfera, que varia entre 300 e 450 km, e z é a distância zenital do satélite. A Figura 5 ilustra as quantidades envolvidas na equação 38 (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; COLLINS, 2001).

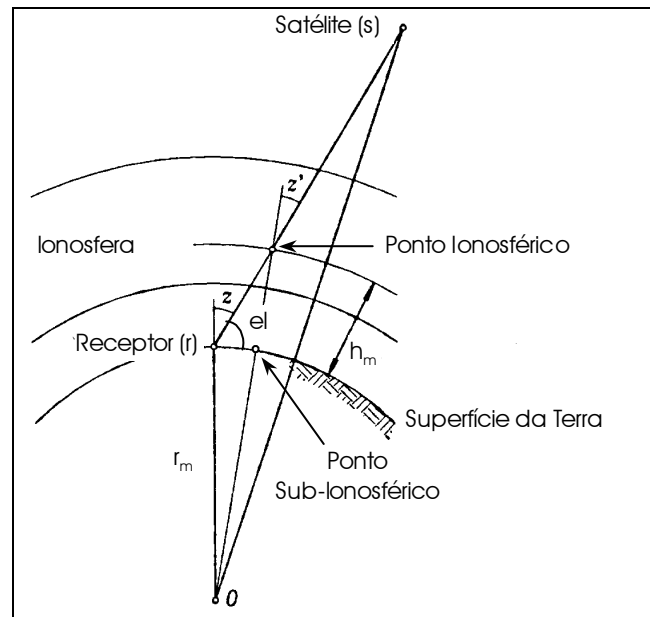


Figura 5 - Geometria para o atraso do caminho ionosférico.

Fonte: Adaptada de Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2001, p.101).

3.3. Cálculo da correção ionosférica com o uso de receptores de dupla frequência

A principal técnica para correção do efeito da refração ionosférica é baseada em medidas da pseudodistância ou da fase da portadora obtidas por receptores de dupla frequência, pois proporcionam correções mais acuradas dos efeitos da refração da ionosfera.

Os modelos a serem apresentados são baseados na combinação linear das observáveis GPS. Na derivação dos modelos, os erros devidos ao não sincronismo do relógio do satélite e do receptor, o erro das efemérides e da refração da troposfera não serão considerados, pois estes efeitos contaminam cada uma das medidas efetuadas, em ambas as

freqüências, da mesma maneira em unidades de distância. Como haverá diferenciação entre as medidas, os mesmos serão cancelados, não comprometendo o resultado do método. De modo geral, para as pseudodistâncias (P_{1r}^s, P_{2r}^s) originais ou suavizadas pela fase da portadora, o modelo é expresso por (CAMARGO, 1999; GEORGIADIOU, 1994):

$$F(P_2 - P_1)_r^s = I_{1r}^s + F[(S_{p2} - S_{p1})^s + (R_{p2} - R_{p1})] + F \varepsilon_{p21}, \quad (39)$$

com $F = f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2)$.

A equação 39 é utilizada para o cálculo do atraso ionosférico (I_{1r}^s) na portadora L_1 . As diferenças $(S_{p2} - S_{p1})^s$ e $(R_{p2} - R_{p1})_r$ respectivamente representam o erro sistemático interfrequência L_1 - L_2 dos satélites e dos receptores e ε_{p21} as diferenças dos demais erros remanescentes.

Para a fase da portadora o modelo é expresso por:

$$F(\lambda_1 \phi_1 - \lambda_2 \phi_2)_r^s = I_{1r}^s - F[(\lambda_2 N_2 - \lambda_1 N_1)^s + (S_{\phi 2} - S_{\phi 1})^s + (R_{\phi 2} - R_{\phi 1})] + F \varepsilon_{\phi 21} \quad (40)$$

No lado direito da equação 40 aparece a diferença entre as ambigüidades $(\lambda_2 N_2 - \lambda_1 N_1)^s$, sendo este termo diferente para cada passagem do satélite e para cada vez que ocorrem perdas de ciclos.

Embora o erro sistemático ionosférico estimado a partir da fase da portadora permita obter melhor precisão do que a obtida com a pseudodistância, tem-se em contrapartida que o número de incógnitas é maior, devido às ambigüidades e às perdas de ciclos (CAMARGO, 1999).

Alguns autores têm estimado o TEC da ionosfera a partir de observações GPS obtidas nas duas frequências, utilizando uma ou várias estações GPS (CAMARGO, 1999). Nesta direção, pode-se citar o trabalho desenvolvido por Georgiadiou (1994), onde estima os coeficientes de um modelo regional da ionosfera com dados GPS de um receptor de dupla frequência do Sistema Ativo de Referência GPS (AGRS) da Holanda. Lanyi e Roth (1988) basearam seus estudos a partir de dados de uma estação GPS coletados durante à noite. Coco et al. (1991) também utilizaram o mesmo procedimento. Ambos representam o TEC vertical, por meio de um polinômio. Wilson et al. (1992, apud SARDON et al., 1994) em 1992 modelam o TEC vertical por meio de harmônicos esféricos, utilizando dados de receptores GPS, coletados durante 24 horas, em uma rede global. Sardon et al. (1994) também apresentam um modelo para estimar o TEC e as tendências instrumentais, a partir de dados de uma rede GPS. Fonseca Júnior (2002) também fez uma avaliação da ionosfera no Brasil, utilizando dados da RBMC e o *software* Bernese.

Nos últimos anos várias pesquisas também vêm sendo realizadas para melhorar a performance do GPS em tempo real, bem como a utilização deste para estudos da dinâmica da atmosfera terrestre. Dentre os diversos trabalhos pode-se citar: El Gizawy (2003), Hajj et al. (2002), Kee e Yun (1998), Liao (2000), Lin (1997), Liu (2001), Liu (2004), Lu (1991), Moon (2004), Scherliess et al. (2002), Skone (1998, 2000), Wu et al. (1996), entre outros.

3.3.1. Modelagem sobre uma rede WADGPS

Como mencionado anteriormente, o WADGPS trata-se de um SBAS e é caracterizado por uma rede esparsa de estações de monitoramento. As estimativas do erro sistemático devido à ionosfera são calculadas usando observações de cada estação da rede

WADGPS e então, um *grid* de correções ionosféricas é formado e transmitido aos usuários para correção no seu posicionamento local. Vários serviços WADGPS estão em operação ou em desenvolvimento nos Estados Unidos, Europa e Japão: *Wide Area Augmentation System* (WAAS), *European Geostationary Navigation Overlay System* (EGNOS) e *Multifunction Transportation Satellite-Based Augmentation System* (MSAS). O Canadá também vem desenvolvendo um serviço WADGPS referido como *Canada Wide Differential GPS* (CDGPS) (MOON, 2004).

No Brasil, o DECEA estabeleceu as ações para a consecução do Plano Nacional de Implementação dos Sistemas CNS/ATM (Comunicação, Navegação, Vigilância / Gerenciamento do Tráfego Aéreo), visando assegurar uma transição segura e oportuna na atualização do SISCEAB (Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro). Dentre os produtos principais que compõem a estrutura do Programa de Transição, o DECEA dá destaque à implantação do SBAS e GBAS (Sistema de Aumentação Baseado em Terra), bem como a solução da ionosfera (DECEA, 2003).

Dentre os vários modelos ionosféricos existentes os mais popularmente conhecidos são o modelo baseado em *grid* e os modelos globais do IGS.

3.3.2. Modelo baseado em *grid*

O modelo de *grid* trata-se de um modelo ionosférico muito estudado: Gao e Liu (2002), Liao (2000), Liu G. (2001), Liu Z. (2004), Mueller e Davis (1998), Skone (1998), entre outros. O conceito básico de um modelo de *grid* é que a área a ser modelada seja coberta por pontos de *grid*. Como parte do monitoramento de integridade, o WAAS transmite mensagens contendo informações ionosféricas para cada ponto do *grid* ionosférico (IGP - *Ionospheric Grid Point*) ou nó de um *grid* imaginário, definido numa fina camada ionosférica.

Os IGPs estão localizados nas intersecções de linhas de latitude geodésica constante e linhas de longitude geodésica constante, espaçadas de 5 graus. Um fórmula para estimar o atraso ionosférico vertical dos IGPs é dada por (SKONE, 1998):

$$\text{TEC}_{rs}(t_j) = \frac{1}{M(\text{ele})} \sum_{i=1}^4 W_i(t_j) \times \text{VTEC}_i(t_j) + B_r + B^s + \varepsilon_{\text{TEC}}, \quad (41)$$

onde $\text{TEC}_{rs}(t_j)$ é medida de TEC obtida do receptor (r) e do satélite (s) na época t_j ; $\text{VTEC}_i(t_j)$ é o valor do atraso vertical (VTEC) dos quatro pontos do *grid* que circunvizinham o ponto sub-ionosférico (IPP), a qual é descrita em Skone (1998); $W_i(t_j)$ é a função peso que determina a contribuição de cada IGP para determinar o atraso ionosférico do IPP; $M(\text{ele})$ é a função de mapeamento; B_r e B^s são as tendências interfrequência do receptor e do satélite, respectivamente, e o termo ε_{TEC} refere-se ao ruído nas medidas de TEC.

3.3.3. Modelos do IGS

O IGS tem um grupo de trabalho para desenvolver modelos para serem utilizados na geração de Mapas Globais da Ionosfera (GIM – *Global Ionosphere Map*). Quatro centros de análise do IGS produzem estimações do GIM no formato IONEX (*IONosphere map EXchange*), um padrão desenvolvido pela comunidade IGS. As agências que contribuem com o IGS são (IGS, 2005):

- CODE – *Center for Orbit Determination in Europe* (Switzerland): no modelo do CODE, o TEC é modelado por uma

expansão em harmônicos esféricos até 12 graus e ordem 8, referido a uma estrutura de referência geomagnética solar. Os 12 parâmetros da ionosfera, a cada 2 horas, são obtidos a partir de medidas da fase da portadora da rede global do IGS (AIUB, 2005);

- ESOC – *European Space Operations Centre (Germany)*: para modelar a ionosfera o ESOC utiliza um modelo bi-dimensional considerando a ionosfera como uma única camada, bem como um modelo baseado no perfil 3-D de Chapman, com uma integração vertical usando uma função exponencial do tipo Gauss (ESA, 2005);
- JPL – *Jet Propulsion Laboratory (USA)*: no JPL os GIMs são gerados a cada hora, diariamente. A ionosfera é modelada numa estrutura de referência geomagnética solar usando *splines* bi-cúbicas num *grid* esférico. O filtro de Kalman é usado para resolver, simultaneamente, a tendência instrumental L_1 - L_2 e o atraso vertical nos pontos de um *grid* ionosférico. Os parâmetros são modelados como um processo estocástico (JPL, 2005); e
- UPC – *Polytechnical University of Catalonia (Spain)*: na UPC um modelo tomográfico estocástico é usado e a ionosfera é dividida em duas camadas. As altitudes limites são de 59-739 Km e de 739-1419 Km (UPC, 2005).

Os arquivos IONEX contêm os valores de TEC em forma de *grid*, em incrementos de 2 horas, com um espaçamento de $2,5^\circ$ em latitude por 5° em longitude.

3.3.4. Modelo regional da ionosfera (Mod_Ion)

O Mod_Ion é o modelo da ionosfera, que foi desenvolvido na FCT/UNESP, Campus de Presidente Prudente (CAMARGO, 1999). Este modelo é uma modificação do modelo de Geogiadiou (1994) aplicado na área coberta pelo Sistema Ativo de Referência GPS (AGRS) da Holanda. A modificação consistiu na separação das tendências dos equipamentos (receptores e satélites). No experimento conduzido na Holanda isto não foi possível, pois se utilizou somente uma estação (receptor) para estimar os parâmetros. No Mod_Ion, tal modelo foi alterado para processar dados de várias estações. No caso, foram utilizadas as estações GPS da RBMC. Assim como em Geogiadiou (1994), no Mod_Ion, se modela, diretamente, o erro vertical, devido à ionosfera, na portadora L_1 (I_1^v), a partir de uma série do tipo Fourier.

No Mod_Ion, o erro devido à ionosfera é obtido em função do atraso ionosférico vertical (I_1^v), por meio da equação, designada de função de mapeamento geométrico padrão:

$$I_{1r}^s = \frac{I_1^v}{\cos(z^{rs})}, \quad (42)$$

onde o valor de z^{rs} é calculado a partir da equação 38. Sendo assim, substituindo a equação 42 na 39, tem-se que:

$$F(P_2 - P_1)_r^s = \frac{I_1^v}{\cos(z^{rs})_r} + F[(S_{p2} - S_{p1})^s + (R_{p2} - R_{p1})_r] + F\varepsilon_{p21}. \quad (43)$$

De modo análogo, a partir da equação 40, o modelo baseado na diferença das fases das portadoras, em ambas as frequências, pode ser escrito como:

$$F(\lambda_1\phi_1 - \lambda_2\phi_2)_r^s = \frac{I_1^y}{\cos(z^s)} - F[(\lambda_2N_2 - \lambda_1N_1)^s + (S_{\phi_2} - S_{\phi_1})^s + (R_{\phi_2} - R_{\phi_1})_r] + F \varepsilon_{\phi 21}. \quad (44)$$

Nota-se que nas equações 43 e 44 aparece o subscrito (r), pois agora se está considerando um conjunto de receptores. Considerando que se tem um conjunto de receptores (r) para a determinação dos parâmetros, é possível, então, estimar os erros sistemáticos dos receptores e dos satélites, designados, respectivamente, de erros sistemáticos ou tendências interfrequência dos receptores e dos satélites. A tendência interfrequência do satélite, expressa em unidades de tempo (ns), é conhecida, também, como T_{GD} (*Differential Group Delay*), e é transmitida nas mensagens de navegação. Os valores do T_{GD} também podem ser encontrados nos arquivos IONEX fornecidos pelo IGS.

Devido à natureza periódica do efeito da ionosfera, Camargo (1999) utiliza a seguinte série do tipo Fourier para modelar a correção ionosférica na direção da vertical:

$$I_1^y = a_1 + a_2 B^s + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+1}}^{n=6} \{a_j \cos(i h^s) + a_{j+1} \sin(i h^s)\} + a_{n*2+3} B^s h^s. \quad (45)$$

A variável B^s representa a latitude geográfica do ponto sub-ionosférico (projeção da latitude do ponto ionosférico, na camada ionosférica de altitude média h_m , sobre a superfície da Terra) e a variável h^s é dada por:

$$h^s = \frac{2\pi}{T} (t - 14^h). \quad (46)$$

onde T representa o período de 24 horas e t a hora local do ponto sub-ionosférico.

Substituindo-se a série dada pela equação 45, que representa o erro sistemático devido à ionosfera na direção vertical, na equação 43 ou 44, podem-se estimar os coeficientes que permitem calcular o efeito da refração ionosférica. Desta forma, quando se utilizam pseudodistâncias originais ou suavizadas, para modelar o atraso ionosférico, tem-se um total $15+r+s$ parâmetros incógnitos, onde os 15 primeiros representam os coeficientes da série $(a_1, a_2, \dots, a_{15})$, r corresponde aos erros sistemáticos, devido aos receptores $(R_{p2} - R_{p1})_r$, num total igual ao número de receptores utilizados, e s corresponde aos erros sistemáticos dos satélites $(S_{p2} - S_{p1})^s$, num total igual ao número de satélites rastreados, para determinação dos parâmetros do modelo.

No entanto, com o objetivo de melhor analisar a função de modelagem do atraso ionosférico, bem como tentar detectar a anomalia equatorial, neste projeto serão feitos alguns testes com a série de Fourier.

3.3.4.1. Funções de modelagem do atraso ionosférico vertical do Mod_Ion em tempo real

Vale salientar que também podem ser encontradas outras funções matemáticas na literatura para modelar a correção ionosférica na direção vertical. Dentre essas, pode-se citar: harmônico esférico (KEE e YUN, 1998), o polinômio de quarta ordem (LIN, 2001) e a série de Taylor (SCHAER, 1999). Em Matsuoka (2003), essas funções matemáticas de modelagem, juntamente com a série de Fourier, foram testadas e comparadas. Os resultados desses experimentos no posicionamento por ponto mostraram que as funções

série de Fourier, de Taylor e a polinomial foram as mais eficazes na correção do erro sistemático devido à ionosfera na direção vertical, proporcionando uma melhora média na acurácia da ordem de 80% (MATSUOKA, 2003). Neste trabalho será implementada a função dada pela série do tipo Fourier para a estimação do erro devido à ionosfera em tempo real.

Com o intuito de modelar a anomalia equatorial e melhorar a estimação do atraso ionosférico, foram realizadas algumas alterações na série, e estas também foram implementadas no Mod_Ion tempo real. Na seqüência será mostrada como foram consideradas (em termos de ordem e número de coeficientes) as diferentes versões da série de Fourier:

a) Série de Fourier (ordem = 6; n° de coeficientes = 15):

Esta função é aquela que já estava implementada no Mod_Ion antes do início dessa pesquisa. Observa-se, na equação 47, que a função modela o atraso ionosférico em longitude, e o termo $a_{n*2+3}B^s h^s$, na mesma função, modela o atraso na direção resultante da latitude e longitude.

$$I_1^v = a_1 + a_2 B^s + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+1}}^{n=6} \{a_j \cos(i h^s) + a_{j+1} \sin(i h^s)\} + a_{n*2+3} B^s h^s. \quad (47)$$

b) Série de Fourier bidimensional (ordem = 4; n° de coeficientes = 20):

A função de modelagem apresentada na equação 48 foi implementada durante o desenvolvimento deste trabalho. Trata-se de uma alteração em relação à função apresentada anteriormente. Na equação 48, a função de modelagem é representada por duas

séries do tipo Fourier, perpendiculares entre si. Nota-se que esta função está modelando o atraso ionosférico em longitude (primeiro somatório), em latitude (segundo somatório) e na direção resultante (último termo da função).

$$I_i^v = a_1 + a_2 B^s + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+1}}^{n=4} \{a_j \cos(i h^s) + a_{j+1} \sin(i h^s)\} + a_{n*2+3} h^s \\ + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+10}}^{m=4} \{a_j \cos(i B^s) + a_{j+1} \sin(i B^s)\} + a_{(n+m)*2+4} B^s h^s \quad (48)$$

c) Série de Fourier bidimensional (ordem = 4; n° de coeficientes = 19):

A equação 49 também foi implementada durante o desenvolvimento deste trabalho e trata-se de uma alteração em relação à função apresentada na equação 48. Na equação 49 foi retirado o termo referente à modelagem na direção resultante.

$$I_i^v = a_1 + a_2 B^s + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+1}}^{n=4} \{a_j \cos(i h^s) + a_{j+1} \sin(i h^s)\} \\ + a_{n*2+3} h^s + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+10}}^{m=4} \{a_j \cos(i B^s) + a_{j+1} \sin(i B^s)\} \quad (49)$$

Para facilitar, serão adotadas no decorrer do texto as seguintes siglas (Tabela 3) para cada função de modelagem do atraso ionosférico vertical apresentadas anteriormente:

Tabela 3 - Siglas adotadas para as funções de modelagem do Mod Ion em tempo real.

Função de Modelagem do Atraso Ionosférico Vertical	Siglas
Série de Fourier (ordem = 6; coef. = 15)	$I_{i(\text{Four}15)}^v$
Série de Fourier Bidimensional (ordem = 4; coef. = 20)	$I_{i(\text{Four}20)}^v$
Série de Fourier Bidimensional (ordem = 4; coef. = 19)	$I_{i(\text{Four}19)}^v$

4. FILTRO DE KALMAN

Em certas aplicações, tais como o posicionamento cinemático por GPS e a navegação por sistema inercial, o conhecimento da variação temporal dos parâmetros torna-se importante. Um algoritmo muito empregado para processamento de sistema dinâmico ou cinemático é o chamado filtro de Kalman. Segundo Teunissen (2001), as equações de movimento para sistemas cinemáticos são usadas para relacionar posição, velocidade, aceleração e tempo, sem referenciar a causa do movimento. Por outro lado, as equações de movimento para sistemas dinâmicos são usados no estudo da relação que existe entre as forças agindo sobre um corpo, sua massa e movimento.

O filtro de Kalman é um estimador não tendencioso e de variância mínima. Segundo Drécourt (2003), o filtro é um método de estimação do vetor estado de um modelo dinâmico a partir de observações randômicas. Além disto, o filtro de Kalman produz estimadores do vetor estado com propriedades estatísticas bem definidas. Tais propriedades são ótimas no sentido de serem não tendenciosas, e de variância mínima, dentre a classe dos estimadores não tendenciosos (GELB et al., 1974; TEUNISSEN, 1990). O filtro de Kalman é um estimador que tem como entrada as observações disponíveis, bem com o vetor de estado inicial e sua MVC, e como saída as componentes do vetor estado do sistema em questão. Este filtro é recursivo no sentido de não haver a necessidade de armazenar todas informações recebidas, isto é, o algoritmo trabalha com as últimas estimativas e as observações mais recentes.

Kalman (1960) descreveu três tipos de operações com filtro nos problemas de estimação, para uma mesma época t_k , sendo que para:

- a) $t < t_k$ tem-se a estimativa predita;

- b) $t = t_k$ tem-se a estimativa filtrada; e
- c) $t > t_k$ tem-se a estimativa suavizada, onde t denota o período disponível de observações ou dados.

Na predição, utilizam-se observações na época t para estimar estado na época t_k , com $t < t_k$, ou seja, a estimação é realizada para o futuro.

Na filtragem, o vetor estado é estimado para o presente ($t = t_k$), correspondendo ao instante de recebimento das observações.

E na suavização ou interpolação utiliza-se na estimativa, observações do presente e passado para estimar num instante passado ($t > t_k$).

Os três conceitos descritos acima podem ser melhores ilustrados através da

Figura 6:

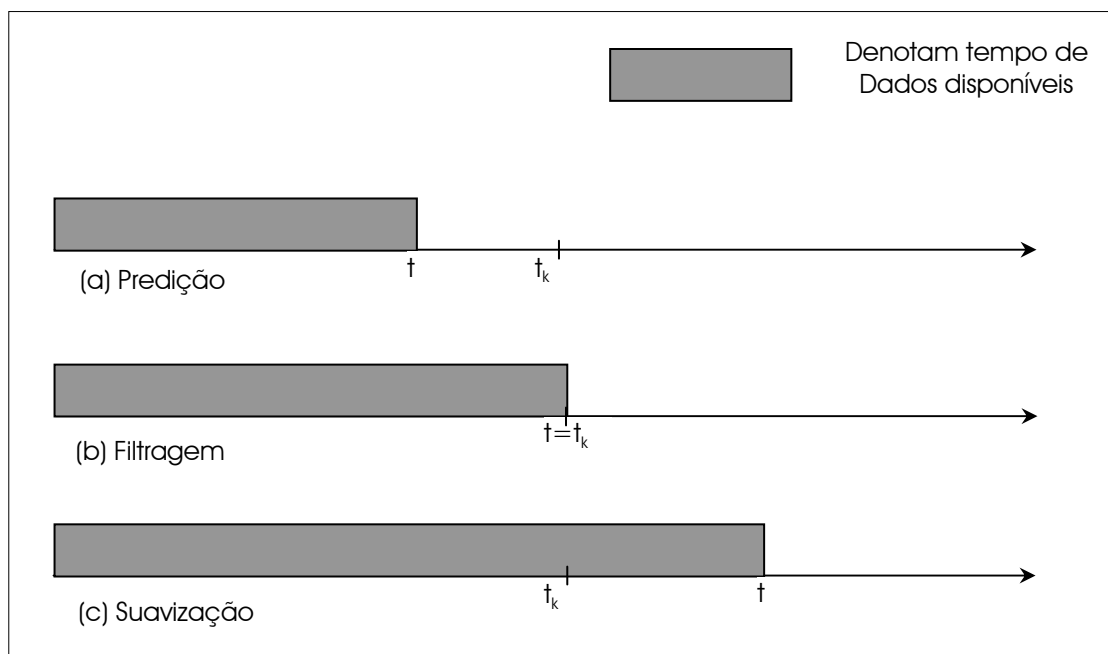


Figura 6 - Tipos de problemas de estimação.
Fonte: Adaptada de Gelb et al. (1974, p.3).

O filtro de Kalman é uma combinação da predição e filtragem. Assim, o número de medidas pode ser menor que o número de incógnitas ou parâmetros (LIU, 2001). No processo de estimação pela predição e filtragem, são usados dados do passado e presente para estimar o vetor estado.

4.1. Formulação matemática

A formulação a ser apresentada usa a notação convencional do MMQ (CAMARGO, 1992). O filtro é encontrado em várias versões (BROWN; HWANG, 1992; GELB, 1974; TEUNISSEN, 2001), porém neste trabalho será apresentada a versão discreta e linear do filtro, que foi implementada no Mod_Ion, onde o modelo dinâmico e o modelo de observações são considerados discretos e lineares.

4.1.1. Modelo funcional e estocástico

O modelo funcional consiste de duas partes que constitui a base do Filtro de Kalman. Tem-se o modelo das observações que liga as observáveis ao vetor dos parâmetros, que no caso do filtro de Kalman é conhecido como vetor estado (GELB, 1974; TEUNISSEN, 2001):

$$L_k^b = A_k X_k + V_k, \quad V_k \sim N(0, \Sigma_{V_k}), \quad (50)$$

onde L_k^b é o vetor das observações ou medidas, de dimensão $n_k \times 1$, com n_k igual ao número de observações coletadas na época k ; A_k é a matriz dos coeficientes ($n_k \times u$) que relaciona as

observações ao vetor estado, com u igual ao número de parâmetros incógnitos; X_k é o vetor estado aleatório (ux1) na época k ; e V_k é o vetor dos ruídos nas medidas, o qual é assumido que $E\{V_k\}=0$, com matriz variância-covariância (MVC) dada por Σ_{V_k} .

Em adição ao modelo observacional, também se tem um modelo dinâmico, o qual descreve o vetor estado,

$$X_k = T_{k/k-1}X_{k-1} + W_k, \quad W_k \sim N(0, \Sigma_{W_k}), \quad (51)$$

onde X_{k-1} é o vetor estado (ux1) de uma época anterior à época k , $T_{k/k-1}$ é a matriz transição (uxu) que interliga os vetores estado X_k e X_{k-1} , ou seja, a matriz transição faz a transformação linear do vetor da época t_{k-1} para a t_k . O vetor W_k , de dimensão ux1, é o ruído branco (ruído do processo ou ruído do sistema), para o qual é assumido que $E\{W_k\}=0$, com matriz MVC Σ_{W_k} . O vetor W_k das correções ao modelo dinâmico afeta o estado durante o intervalo entre as épocas t_{k-1} e t_k .

A matriz de transição T tem as seguintes propriedades (KALMAN, 1960):

$$T_{k/k} = I, \quad (52)$$

$$T_{k/s} T_{s/r} = T_{k/r}, \quad (53)$$

$$T_{k/s}^{-1} = T_{s/k}, \quad (54)$$

onde k , s e r são inteiros e indicam épocas. Se o modelo for estacionário, ou seja, tempo-invariante:

$$T_{k+1/k} = \text{constante}. \quad (55)$$

Algumas considerações são necessárias para aplicar o filtro de Kalman, tais como (BROWN; HWANG, 1992; CAMARGO, 1992; GELB, 1974):

- As matrizes variância-covariância das correções ao modelo dinâmico e ao modelo de medida, sejam positivas definidas;
- a independência estatística entre os vetores das correções do modelo dinâmico e das correções do modelo de medida, ou seja, $E\{W_k V_j^T\} = E\{V_k W_j^T\} = 0$;
- que o vetor estado inicial X_0 seja considerado um vetor de variáveis com distribuição normal e com estatística conhecida, representada por $E\{X_0\} = \hat{X}_{0|0}$ e $E\{(X_0 - \hat{X}_{0|0})(X_0 - \hat{X}_{0|0})^T\} = \Sigma_{\hat{X}_{0|0}}$;
- e independência estatística entre o estado inicial e o vetor das correções ($E\{W_k X_0^T\} = E\{V_k X_0^T\} = 0$).

Será assumido ainda que os vetores aleatórios V_k e W_k não são correlacionados e ainda que (TEUNISSEN, 1998):

$$E\{V_k V_j^T\} = \Sigma_{V_k} \delta_{k,j}, \quad E\{W_k W_j^T\} = \Sigma_{W_k} \delta_{k,j}, \quad (56)$$

onde $\delta_{k,j}$ é o delta *Kronecker*, definido por $\delta_{k,j}=1$ quando $k=j$ e $\delta_{k,j}=0$ quando $k \neq j$.

Os modelos discutidos, bem como as condições acima, proporcionam a base para a montagem das equações do filtro de Kalman

4.1.2. Predição e filtragem

Devido à natureza recursiva, o filtro de Kalman é especialmente apropriado para aplicações em tempo real. Para cada época, o procedimento recursivo consiste de duas etapas: a predição (atualização de época) e filtragem (atualização de medidas) (CAMARGO, 1992; DE JONG, 1997; MAREL, 1998; TEUNISSEN, 1998, 2001). No filtro de Kalman, a estimativa predita do vetor estado X_k com sua respectiva MVC, é dada por (BROWN; HWANG, 1992; GELB, 1974; TEUNISSEN, 2001):

$$X_{k|k-1} = T_{k,k-1} X_{k-1|k-1} + e \quad (57)$$

$$\Sigma_{X_{k|k-1}} = T_{k,k-1} \Sigma_{X_{k-1|k-1}} T_{k,k-1}^T + \Sigma_{W_k} \quad (58)$$

E a estimativa filtrada e sua respectiva MVC por (BROWN; HWANG, 1992; GELB, 1974; TEUNISSEN, 2001):

$$X_{k|k} = X_{k,k-1} + K_k [L_k^b - A_k X_{k|k-1}] \quad (59)$$

$$\Sigma_{X_{k|k}} = [I_n - K_k A_k] \Sigma_{X_{k|k-1}} \quad (60)$$

onde,

$$K_k = \Sigma_{X_{k|k-1}} A_k^T \Sigma_{V_k}^{-1} = \Sigma_{X_{k|k-1}} A_k^T [\Sigma_{L_k^b} + A_k \Sigma_{X_{k|k-1}} A_k^T]^{-1} \quad (61)$$

A matriz K_k (equação 61) é conhecida como a segunda forma da matriz ganho de Kalman, a qual é considerada a mais adequada para a solução recursiva, pois realiza-se apenas uma operação de inversão de matriz em função do número de observações na época k . As equações 57 e 58 proporcionam a atualização de época do vetor estado estimado e sua precisão (predição), respectivamente. Usando o modelo dinâmico ela propaga o vetor estado da época $k-1$ até a próxima época k , dando assim o vetor estado predito da época k . As equações 59 e 60 produzem a atualização por meio do vetor de medida ou observação, bem como sua precisão (filtragem). Estas equações combinam o vetor estado predito com as observações da época k , para produzir o vetor estado filtrado da época k e sua respectiva MVC.

As MVCs estão relacionadas, ou seja: $\Sigma_{X_{k|k-1}} \geq \Sigma_{X_{k-1|k-1}}$ e $\Sigma_{X_{k|k}} \leq \Sigma_{X_{k|k-1}}$ (TEUNISSEN, 1998, 2001). Devido à presença de ruídos do sistema, o estado predito é geralmente menos preciso que o estado filtrado anteriormente, e devido às medidas adicionais, o estado filtrado geralmente tem precisão melhor do que sua predição.

Na equação 59, a segunda parcela da soma, que é multiplicada pela matriz ganho de Kalman, representa o resíduo predito, ou seja:

$$\hat{V}_k = L_k^b - A_k X_{k|k-1}, \quad (62)$$

onde \hat{V}_k é o vetor ($n_k \times 1$) que fornece as correções ao modelo de observação. A MVC dos resíduos é dada por (MAREL, 1998):

$$\Sigma_{\hat{V}_k} = \Sigma_{L_k^b} + A_k \Sigma_{X_{k|k-1}} A_k^T. \quad (63)$$

4.2. Processo aleatório

No caso da ionosfera, seus distúrbios correlacionados com o tempo são parametrizados no vetor estado, cuja descrição escalar do comportamento linear dinâmico pode ser caracterizado por alguns modelos de correlação (STRANG; BORRE, 1997). O processo *random-walk* (RW) foi utilizado por Liao (2000) para modelar o comportamento temporal do TEC vertical em pontos de gride, sob condições ionosféricas normais. Por outro lado Skone (1998) utilizou o processo *Gauss-Markov* de primeira ordem para descrever o comportamento temporal do TEC vertical na região da aurora.

Neste trabalho, para efeito de investigação e comparação, foram implementados três tipos de processos aleatórios, o processo *random-constant*, *Gauss-Markov* e *random-walk*.

Uma classe especial de processos aleatórios, os quais podem ser gerados pela omissão do ruído branco por meio de um simples filtro, é a família do processo *Gauss-Markov*. Um processo contínuo $X(t)$ é *Markov* de primeira ordem se para todo k e $t_1 < t_2 < \dots < t_k$, é verdade que (GELB et al., 1974):

$$F[X(t_k) | X(t_{k-1}), \dots, X(t_1)] = F[X(t_k) | X(t_{k-1})]. \quad (64)$$

Isto é, a distribuição de probabilidade para o processo $X(t_k)$ é dependente somente do valor no último ponto no passado ($X(t_{k-1})$). Se o processo contínuo $X(t)$ é *Markov* de primeira ordem, este pode ser associado com a equação diferencial (GELB et al., 1974):

$$\frac{dX}{dt} + \beta(t) = W. \quad (65)$$

Se adicionar a restrição que a função densidade de probabilidade de W e, conseqüentemente, de X também são gaussianas, o processo $X(t)$ é um processo *Gauss-Markov* (GELB et al., 1974). As estatísticas de um processo *Gauss-Markov* estacionário são completamente descritas pela função de autocorrelação (BROWN; HWANG, 1992; GELB et al., 1974),

$$\phi_{xx}(\tau) = \sigma^2 e^{-\beta |\tau|}, \quad (66)$$

onde τ é o intervalo de predição (segundos). O tempo de correlação é dado por $1/\beta$. A densidade espectral do ruído branco (W) a qual gera o processo descrito pela equação 66 é dado em termos de variância de X como $2\beta\sigma^2$. Segundo Gelb et al. (1974), as autocorrelações de muitos fenômenos físicos são bem descritas pela equação 66. Uma ilustração da função de autocorrelação do processo *Gauss-Markov* é apresentada na Figura 7. O processo não é determinístico, ou seja, este processo não tem uma estrutura funcional que permite a exata predição a partir da especificação de certos parâmetros ou de seu passado. Assim uma amostra típica em função do tempo apresentaria uma estrutura não determinística e pareceria um ruído (BROWN; HWANG, 1992). A função de autocorrelação exponencial indica que a correlação dos valores amostrados torna-se menor com a separação temporal entre amostras.

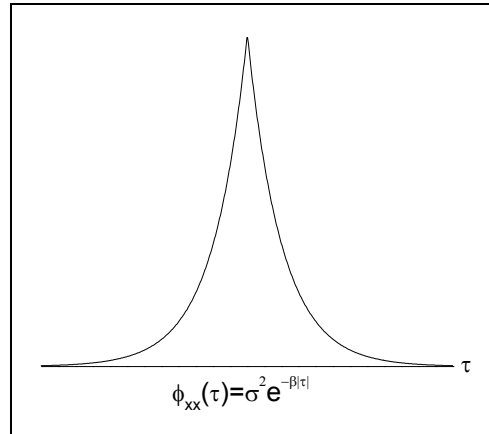


Figura 7 - Descrição do processo aleatório *Gauss-Markov*.

Observa-se que o processo *Gauss-Markov* é uma função de autocorrelação exponencial decrescente. A versão discreta do estado do modelo dinâmico correlacionado exponencialmente é descrita por:

$$X_k = e^{-\beta(t_k - t_{k-1})} X_{k-1} + W_k. \quad (67)$$

A equação 67 fornece uma descrição estatística de como o vetor estado varia no tempo. A variância de W_k é dada como (BROWN; HWANG, 1992; GELB et al., 1974):

$$E\{W_k^2\} = \sigma^2 (1 - e^{-2\beta(t_k - t_{k-1})}), \quad (68)$$

onde σ^2 é referido como a variância do processo, ou seja, é a densidade espectral do processo ($2\beta\sigma^2$) dividida por 2β . O valor assumido por σ^2 pode ser entendido como o limite superior do nível de ruído, que seria alcançado se o sistema deixasse de ser “calmo” por um tempo suficiente ($t_k - t_{k-1} \gg 1/\beta$) (GREGORIUS, 1996). Das equações 67 e 68, observa-se que o modelo dinâmico é determinado se os parâmetros β e σ^2 são conhecidos. Estes parâmetros podem ser obtidos a partir de técnicas de autocorrelação (GELB et al., 1974).

O processo *random-constant* é uma quantidade não dinâmica com uma amplitude fixa, embora aleatória. O *random-constant* contínuo é descrito pela equação diferencial do vetor estado (BROWN; HWANG, 1992; GELB et al., 1974):

$$\dot{X} = 0. \quad (69)$$

O processo discreto correspondente ao *random-constant* é descrito por:

$$X_k = X_{k-1}. \quad (70)$$

Observa-se que no processo *random-constant* a variação temporal do vetor estado não é considerado no ruído do processo. Segundo Gelb et al. (1974) o *random-constant* pode ser pensado como a saída de um integrador, o qual não acrescenta o ruído branco, mas tem uma condição inicial $X(0)$.

O processo *random-walk* resulta quando sinais não correlacionados são integrados. Seu nome deriva do exemplo de um homem que dá passos com comprimento fixo em direções arbitrárias. A equação diferencial do estado para o processo *random-walk* é dada por (GELB et al., 1974; GREGORIUS, 1996):

$$\dot{X} = W. \quad (71)$$

O processo discreto equivalente é escrito da seguinte forma (GREGORIUS, 1996):

$$X_k = X_{k-1} + \sqrt{t_k - t_{k-1}} W, \quad (72)$$

e a magnitude do ruído do processo *random-walk* sobre o tempo é dada por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_k - X_{k-1})^2}{t_k - t_{k-1}}}. \quad (73)$$

Da equação 73 pode-se notar que o desvio padrão, isto é, o ruído do processo de um *random-walk* cresce proporcionalmente à raiz quadrada do tempo de predição, ou seja, do tempo entre os instantes de processamento. O *random-walk* não tem um estado constante e pode crescer indefinidamente. Conseqüentemente, é melhor ter uma taxa de coleta de dados relativamente alta quando estimar o estado a partir de um *random-walk* (GREGORIUS, 1996).

Para resumir, os processos acima são utilizados para adicionar ruído à matriz covariância do processo de predição, e assim introduzir o comportamento temporal dos parâmetros estocásticos. Pois, o nível de confiança desta covariância diminui quando a estimativa é projetada no futuro (predição). Este crescimento do nível de incerteza é refletido junto a um gradual aumento de ruído no processo de estimação.

4.3. Controle de qualidade aplicado ao filtro de Kalman

O controle de qualidade tem o objetivo de estabelecer e assegurar a qualidade de um produto ou serviço, para certas condições de consumo ou utilização. Segundo Teunissen (1998), diferentes fatores são considerados no controle de qualidade dentre os quais cita-se a economia, a precisão e a confiabilidade. A economia é um fator importante num projeto, pois expressa o custo total, envolve operações de planejamento,

execução, coleta de dados, processamento, etc. A precisão manifesta a dispersão dos resultados na ausência de erros, sendo expressa pela matriz variância-covariância. A confiabilidade descreve a capacidade das observações redundantes em detectar erros nos modelos e ou nas observações, com certo nível de confiança. A confiabilidade é a probabilidade de um sistema, ou parte dele, ter desempenho satisfatório, sem falhas, em certas condições de uso, durante um período específico de tempo (CAMARGO, 1992). Na prática, o controle de qualidade já se inicia na fase de planejamento.

Neste trabalho será apresentado um procedimento geral do controle de qualidade para a detecção de erros nas observações, baseado na estatística Qui-quadrado (BAARDA, 1968; TEUNISSEN; KLEUSBERG, 1998; TEUNISSEN, 2000). Após a detecção de erro, é necessária a identificação ou localização da possível fonte causadora. Isto consiste numa procura entre todos os prováveis causadores de erros. No caso das observações, por exemplo, o teste estatístico *data snooping* (BAARDA, 1968; TEUNISSEN; KLEUSBERG, 1998) pode ser empregado. Finalmente, identificada a observação com erro, a adaptação é necessária, para eliminar sua influência nos parâmetros. Em resumo, os procedimentos dos testes aplicados no controle de qualidade subdividem-se em três etapas, designadas de detecção, identificação e adaptação (TEUNISSEN; KLEUSBERG, 1998).

4.3.1. Testes estatísticos

O filtro produz uma estimativa ótima do vetor estado, com propriedades estatísticas bem definidas. Entretanto, isso é garantido somente com as suposições subjacentes ao modelo matemático. A falta de especificações no modelo invalida os resultados da estimação e assim alguma conclusão baseada nele (MAREL, 1998).

O teste estatístico proposto é baseado em duas etapas, uma que consiste de um teste global, com o objetivo de detectar erros, seja nas observações ou nos modelos, e a outra num teste unidimensional, com a finalidade de localizar a possível fonte causadora. O procedimento de teste para validação das observações, em tempo real, consiste de três passos:

- Detecção: um modelo de teste global é executado para diagnosticar se um erro não especificado ocorreu.
- Identificação: Após a detecção de um erro, é necessária a identificação da fonte em potencial do erro. Isto implica em uma pesquisa entre as hipóteses candidatas para a hipótese alternativa mais provável.
- Adaptação: Após a identificação de uma hipótese alternativa, a adaptação do filtro recursivo é necessária para eliminar a presença de tendência no vetor de estado.

4.3.1.1. Validação do modelo durante o processo de filtragem (detecção de erros)

Os testes são baseados na seqüência de inovação, isto é, na transição entre o ciclo de propagação e o de atualização. Utiliza-se o resíduo predito (\hat{V}_k) (equação 67), que é definido como a diferença entre a saída atual do sistema e a predita, baseada no estado predito:

$$\hat{V}_k = L_k^b - A_k X_{k|k-1}.$$

Portanto, pode-se observar que os testes estatísticos dependem das observações realizadas na época k , da matriz A desta época, do modelo de medida, do vetor estado predito para a mesma época e da MVC do vetor estado predito (MAREL, 1998):

$$\Sigma_{V_k} = \Sigma_{L_k^b} + A_k \Sigma_{X_{k|k-1}} A_k^T. \quad (74)$$

Assim, alguma tendência no modelo do sistema dinâmico ou no modelo de observação pode provocar alterações no resíduo predito. Isto faz com que, no filtro de Kalman, o resíduo predito seja ideal para detectar um comportamento anormal no sistema (LU, 1991). Portanto, este conhecimento da distribuição do resíduo predito possibilita testar a validade do modelo matemático assumido.

Este teste, também conhecido como teste estatístico local, leva à formação de duas hipóteses, denominadas de hipótese nula e hipótese alternativa, representadas respectivamente por H_0 e H_a . Deste modo, para testar a validade local do modelo na época k atual, em termos de resíduo predito, considera-se as seguintes hipóteses:

$$H_0^k : \hat{V}_k \sim N(0, \Sigma_{\hat{V}_k}) \quad \text{versus} \quad H_a^k : \hat{V}_k \sim N(\nabla \hat{V}_k, \Sigma_{\hat{V}_k}), \quad (75)$$

ou

$$H_0^k : E\{\hat{V}_k\} = 0 \quad \text{versus} \quad H_a^k : E\{\hat{V}_k\} = C_{\hat{V}_k} \nabla,$$

sendo V_k o vetor do resíduo predito para a época k . O vetor $\nabla \hat{V}_k$ representa o erro presente na observação e pode ser parametrizado como:

$$\nabla \hat{V}_k = C_{\hat{V}_k} \nabla. \quad (76)$$

No caso do teste estar sendo aplicado apenas para a época atual, $C_{\hat{V}_k}$ é uma matriz ($n_k \times q$) que especifica onde ocorreu o erro no modelo, e ∇ é um vetor de dimensão $q \times 1$, que representa o *outlier*. O vetor $C_{\hat{V}_k}$ é assumido ser conhecido e o vetor ∇ é assumido ser desconhecido.

O teste estatístico apropriado para testar H_0 contra H_a na época k é dado por (MAREL, 1998):

$$T_{\text{LOM}}^k = \hat{V}_k^T \Sigma_{\hat{V}_k}^{-1} \hat{V}_k \sim \chi_{\alpha}^2(n_k, 0), \quad (77)$$

sendo n_k o número de observações da época em que se está realizando o teste, e o subscrito LOM (*Local Overall Model*) significa que é um teste estatístico local. Este teste estatístico é usado para realizar o teste local no modelo, com o intuito de detectar erros não especificados nas hipóteses nulas locais H_0^k . No teste LOM, erro não especificado no modelo funcional ou no estocástico não está presente na época k , se e somente se:

$$T_{\text{LOM}}^k < \chi_{\alpha}^2(n_k, 0), \quad (78)$$

onde o valor de $\chi_{\alpha}^2(n_k, 0)$ é obtido da tabela de distribuição Qui-quadrado, conhecendo-se o nível de significância α e o grau de liberdade n_k . Se a desigualdade da equação 78 for verdadeira, significa que não há presença de erro. Caso contrário, uma análise deve ser feita para verificar as possíveis razões ou circunstâncias que levaram à falha no teste, dentre as quais pode-se citar (CAMARGO, 1992):

- Erro no sistema dinâmico, isto é, erro no modelo dinâmico e/ou no modelo de medida;
- Erro na matriz variância-covariância das observações e/ou na matriz variância-covariância das correções ao modelo dinâmico;
- e
- Erro nas observações da época t_k .

Uma vez detectada a existência de erro, com o teste estatístico LOM, o próximo passo é a identificação da fonte produtora. É importante salientar que o teste apresentado é uma indicação da qualidade do ajustamento. Um detalhe é que o teste detecta a falha, mas não especifica onde esta ocorre. No caso de observação com erro grosseiro, geralmente um teste unidimensional, isto é, um teste que verifica uma observação por vez é utilizado.

4.3.1.2. Identificação das observações com erro durante o processo de filtragem

Para abordar o tópico relacionado à identificação do problema nos casos em que o LOM falhar, se está assumindo que qualquer especificação inadequada relacionada com o modelo funcional, bem como erros nos cálculos, podem ser identificadas. Estes problemas são específicos para cada caso (MONICO; CAMARGO, 2003). Neste trabalho serão apresentados detalhes para o problema relacionado com erros nas observações (*outliers*).

Os erros nas observações podem ser classificados em aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Os erros aleatórios são inevitáveis, sendo uma característica própria da observação. Estes erros são tratados como variáveis aleatórias, seguindo, portanto, funções estatísticas.

Os erros sistemáticos ou *biases* são aqueles oriundos, geralmente, de causas conhecidas; podem, na maioria das vezes serem evitados, através de técnicas especiais de observação e ou processamento, ou eliminados, mediante a aplicação de fórmulas fornecidas pela teoria. Do ponto de vista estatístico, a repetição de observações não auxiliará na detecção de erros sistemáticos, pois eles afetam as observações da mesma forma. Exagerando, pode-se dizer que, quando uma observação contém efeitos sistemáticos, não há nada de errado com a observação, mas sim com a sua interpretação, isto é, o modelo funcional não é apropriado (CAMARGO, 2000). Teoricamente é possível eliminar estes erros pelo refinamento do modelo matemático.

Do ponto de vista estatístico, observações com erros grosseiros não podem ser consideradas como pertencentes à amostra, não podendo ser usadas com as outras observações. Todas as observações contaminadas de erros grosseiros devem, simplesmente, serem rejeitadas; em alguns casos, a detecção do erro é fácil, erro de grande magnitude; em outros, somente empregando-se técnicas estatísticas. Os erros grosseiros, de forma geral, são resultantes do mau funcionamento dos aparelhos ou de falha humana (CAMARGO, 2000).

Esta descrição dos erros é muito importante para a compreensão dos modelos de ajustamento, mas não ajuda no desenvolvimento de uma estratégia para a detecção de erros. Isto se deve ao fato da impossibilidade de separar os erros no mundo real de acordo com sua classificação. O processo de estimação proporciona resíduos que possuem uma mistura de todos os tipos de erros (MONICO; CAMARGO, 2003).

As estratégias de identificação de *outliers* têm suas raízes nos trabalhos do Professor Baarda da Universidade Técnica de Delft na Holanda (BAARDA, 1968). A técnica de verificar a presença de *outliers* em uma observação por vez, foi desenvolvida por Baarda (1968) e é denominada de *Data Snooping*.

Após ser realizado o teste estatístico sobre a estimativa do resíduo predito e algum erro tenha sido detectado, a identificação da fonte potencial do erro é necessária. O próximo passo, após a detecção, é a identificação da hipótese alternativa mais provável. Para a identificação, a hipótese alternativa candidata precisa ser especificada explicitamente. Isto é feito por meio da matriz $C_{\hat{V}_k}$. Considerando a identificação local do erro no modelo de medidas, a seguinte classe de hipótese local é considerada:

$$H_0^k : E\{\mathbf{L}_k^b\} = \mathbf{A}_k \mathbf{X}_k \quad \text{versus} \quad H_a^k : E\{\mathbf{L}_k^b\} = \mathbf{A}_k \mathbf{X}_k + C_{\hat{V}_k} \nabla. \quad (79)$$

Esta classe de hipóteses nula e alternativa pode ser usada para modelar um salto no vetor das observáveis na época k . Como tal, a hipótese pode acomodar tendência no instrumento, falha do sensor, e um ou mais *outliers* nos dados. A dimensão q do vetor dos *outliers* ∇ (equação 79) depende da hipótese alternativa considerada e pode abranger, para propósitos de identificação, de 1 a n_k observações na época. No *data snooping* adota-se a convenção de que somente um *outlier* está presente em cada teste. Desta forma, é considerado $q=1$, isto é, o caso de um único erro.

Desde que a hipótese alternativa local H_a^k (equação 79) é restrita ao modelo de medida, tem-se $C_{\hat{V}_k} = C_k$. Com $q=1$, o vetor ∇ reduz a um escalar e a matriz C_k reduz a um vetor, o qual será denotado como c_k . O teste estatístico da falha local (teste estatístico LS – *Local Slippage*), tem a seguinte forma (BAARDA, 1968; TEUNISSEN, 1998):

$$t_{Lb_i}^k = \frac{\mathbf{c}_k^T \Sigma_{\hat{V}_k}^{-1} \mathbf{V}_k}{(\mathbf{c}_k^T \Sigma_{\hat{V}_k}^{-1} \mathbf{c}_k)^{1/2}}. \quad (80)$$

o subscrito Lb indica que o teste estatístico LS está sendo aplicado às observações. Se a i -ésima observação for suspeita, aplica-se o *data snooping*, onde o vetor c_k tem a seguinte forma:

$$c_k^T = (0 \dots 0 \underset{1 \dots i \dots n_k}{1} 0 \dots 0) \quad (81)$$

para $i = 1, \dots, n_k$, com i representando a observação a ser testada, o qual assume o valor 1, e zero para os demais componentes do vetor.

A equação 80 é a estatística usada para a identificação. No caso do teste de um resíduo por vez e por causa da estrutura diagonal da MVC das observações a equação 85 se reduz para (TEUNISSEN, 2000):

$$t_{Lb_i} = \frac{v_i}{\sigma_{\hat{v}_i}}, \quad (82)$$

onde v_i é o resíduo da i -ésima observação a ser testada e $\sigma_{\hat{v}_i}$ seu respectivo desvio-padrão.

A identificação prossegue agora da seguinte forma: a estatística $t_{Lb_i}^k$ é calculada para cada hipótese alternativa unidimensional candidata. A hipótese alternativa para o qual $|t_{Lb_i}^k|$ é o máximo, é considerada a hipótese mais provável de conter o erro. A verossimilhança do erro mais provável pode ser testada como segue (TEUNISSEN, 2000):

$$\text{se } |t_{Lb_i}^k| \leq N_{\alpha_0/2}(0,1), \quad (83)$$

então, a hipótese nula é verdadeira, isto é, *outlier* não está presente na observação i , a um nível de significância α_0 . Observa-se que o número de graus de liberdade neste caso é igual a 1, que corresponde ao número de *outliers* sendo testados.

A observação que tem o máximo valor t^k poderá ser considerada a mais provável de conter erros. Então no caso de múltiplas observações com erros, deve-se eliminar a que tiver o maior valor de $t_{Lb_i}^k$ e repetir os cálculos estatísticos, para um novo teste.

4.3.1.3. Adaptação em tempo real

Realizados os testes com a finalidade de detectar e identificar as observações com erro, o próximo passo, caso tenha sido identificada alguma observação, é eliminar a sua influência nos resultados. Esta etapa é conhecida como adaptação. Neste tipo de processamento a adaptação torna-se fácil. Esta consiste apenas em não considerar as observações rejeitadas pelo teste no ciclo de atualização ou nas equações atualizadas das medidas. Desta forma, obtém-se o vetor estado filtrado livre das influências dos erros, ou seja, não considera no modelo de medida as observações rejeitadas no teste estatístico *data snooping*.

5. FILTRO DE KALMAN APLICADO AO MODELO DA IONOSFERA

A qualidade do resultado do posicionamento com receptores de uma frequência é afetada pela influência da ionosfera sobre o sinal GPS. Com o intuito de oferecer uma opção para que se possa melhorar a performance do GPS para aplicações em tempo real, o modelo regional da ionosfera (Mod_Ion), que atualmente está implementado para processamento em lote, será adaptado para fornecer parâmetros de correção da refração ionosférica em tempo real (Mod_Ion_FK).

5.1. Estimação dos parâmetros com filtro de Kalman

Genericamente, o número total de parâmetros do Mod_Ion em tempo real é dado por $\text{coef}+r+s$, onde coef representa os coeficientes (estado) da função de modelagem escolhida (seção 3.4), r corresponde aos erros sistemáticos devido à interferência dos receptores $(R_{p2} - R_{p1})_r$, num total igual ao número de receptores utilizados na rede e s corresponde à interferência dos satélites $(S_{p2} - S_{p1})^s$, num total igual ao número de satélites rastreados para determinação dos parâmetros do modelo. Portanto, o vetor estado X_k terá dimensão $(\text{coef}+r+s) \times 1$.

Relembrando, o filtro de Kalman é descrito por:

- Modelo Dinâmico: $X_k = T_{k/k-1} X_{k-1} + W_k$
 - Modelo de Observação: $L_k^b = A_k X_k + V_k$
 - Equações de Predição: $X_{k|k-1} = T_{k,k-1} X_{k-1|k-1}$
- $$\Sigma_{X_{k|k-1}} = T_{k,k-1} \Sigma_{X_{k-1|k-1}} T_{k,k-1}^T + \Sigma_{W_k}$$

$$\begin{aligned}
- \text{Equações de Filtragem: } \quad X_{k|k} &= X_{k,k-1} + K_k [L_k^b - A_k X_{k|k-1}] \\
\Sigma_{X_{k|k}} &= [I_n - K_k A_k] \Sigma_{X_{k|k-1}} \\
K_k &= \Sigma_{X_{k|k-1}} A_k^T \left[\Sigma_{L_k^b} + A_k \Sigma_{X_{k|k-1}} A_k^T \right]^{-1}
\end{aligned}$$

5.1.1. Predição

Com relação ao modelo dinâmico dá-se uma atenção especial à matriz de transição e conseqüentemente ao tratamento do ruído branco envolvido no processo de estimação pelo filtro de Kalman. Como mencionado anteriormente, neste trabalho a variação temporal da ionosfera foi implementada por meio de três tipos de processos aleatórios: o *random-constant*, *random-walk* e *Gauss-Markov*. Estes processos foram implementados a fim de obter estimativas preditas mais realísticas. Deve-se enfatizar que os processos *random-constant*, *random-walk* e *Gauss-Markov* são adaptados ao filtro de Kalman pela matriz de transição e pela adição de ruídos à MVC do estado predito.

Para facilitar, a matriz transição pode ser escrita como uma matriz bloco diagonal:

$$T_k = \begin{bmatrix} I_{\text{ion}} & 0 & 0 \\ 0 & S & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}. \quad (84)$$

A matriz I_{ion} de dimensão (coefxcoef) representa a variação temporal dos coeficientes da série de Fourier de acordo com o processo aleatório adotado. As matrizes S

(sxs) e R (rxr), representam, respectivamente, o comportamento temporal das tendências interfrequência dos s satélites e dos r receptores.

As tendências interfrequência dos satélites e receptores foram modeladas temporalmente a partir do processo *random-constant*. A escolha deste processo para modelar a tendência interfrequência foi feita baseada na natureza constante de tais erros sistemáticos. Segundo Gao e Liu (2002) e Kee e Yun (1998), as tendências interfrequência permanecem constantes durante um período de aproximadamente 30 dias. Se considerarmos que estes erros são constantes por um período tempo maior que a amostragem dos dados, e que se conhece os valores das tendências para os satélites e receptores, o processo *random-constant* descreve satisfatoriamente a variação temporal destes erros. Portanto, de acordo com processo discreto correspondente ao *random-constant* (equação 70), as matrizes S e R podem ser escritas como:

$$S_{sxs} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (85)$$

$$R_{rxr} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (86)$$

A variância do ruído para as tendências será nula ($\Sigma_{w_k} = [0]$).

Considerando agora a modelagem temporal da ionosfera pelo processo *Gauss-Markov* dado pela equação 67, o modelo dinâmico é reescrito como:

$$X_k^{\text{ion}} = e^{-\beta(t_k - t_{k-1})} X_{k-1}^{\text{ion}}, \quad (87)$$

e assim pelo processo *Gauss-Markov*, a matriz I_{ion} que compõe a equação 84 pode ser escrita como:

$$\text{coef } I_{\text{ion}}^{\text{GM}} \text{ coef} = \begin{bmatrix} e^{-\beta(t_k - t_{k-1})} & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & e^{-\beta(t_k - t_{k-1})} \end{bmatrix}. \quad (88)$$

Na equação 87 e 88, $t_k - t_{k-1}$ é o período de amostragem dos dados, $1/\beta$ é a correlação temporal do atraso ionosférico em segundos, e o subscrito **ion** é para especificar que agora a modelagem é referente aos coeficientes da função de modelagem da ionosfera.

O comportamento temporal não modelado da ionosfera está presente no vetor do ruído branco do modelo dinâmico e que de acordo com o processo *Gauss-Markov* (equação 68) tem variância Σ_{w_k} ,

$$\Sigma_{w_k}^{\text{GM}} = \begin{bmatrix} E\{w_{a_1}^2\} & \vdots & 0 \\ \dots & \ddots & \dots \\ 0 & \vdots & E\{w_{a_{\text{coef}}}^2\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma^2 [1 - e^{-2\beta(t_k - t_{k-1})}] & \vdots & 0 \\ \dots & \ddots & \dots \\ 0 & \vdots & \sigma^2 [1 - e^{-2\beta(t_k - t_{k-1})}] \end{bmatrix}, \quad (89)$$

onde σ^2 é a variância do processo, e que pode ser entendida como o limite superior do nível de ruído que seria alcançado se o sistema deixasse de ser calmo por um tempo suficiente.

Considerando agora a modelagem temporal da ionosfera pelo processo *random-constant* dado pela equação 70, o modelo dinâmico é reescrito como:

$$X_k^{\text{ion}} = X_{k-1}^{\text{ion}}. \quad (90)$$

Logo, pelo processo *random-constant*, a matriz I_{ion} que compõe a equação 84 pode ser escrita como:

$$\Sigma_{\text{coef}}^{\text{RC}} I_{\text{ion}_{\text{coef}}}^{\text{RC}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (91)$$

De acordo com o processo *random-constant* a variância do ruído branco Σ_{w_k} é igual a zero,

$$\Sigma_{w_k}^{\text{RC}} = \begin{bmatrix} E\{w_{a_1}^2\} & \vdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \vdots & E\{w_{a_{\text{coef}}}^2\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \vdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \vdots & 0 \end{bmatrix}. \quad (92)$$

Observa-se que no processo *random-constant* o vetor estado predito é idêntico à última filtragem do vetor estado.

Finalmente, considerando a modelagem temporal da ionosfera pelo processo *random-walk* dado pela equação 72, o modelo dinâmico é reescrito como:

$$X_k^{\text{ion}} = X_{k-1}^{\text{ion}}, \quad (93)$$

onde pelo processo *random-walk*, a matriz I_{ion} que compõe a equação 84 pode ser escrita como:

$$\mathbf{I}_{\text{coef}}^{\text{RW}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (94)$$

De acordo com o processo *random-walk* a variância do ruído branco Σ_{w_k} (equação 73) é dada por,

$$\Sigma_{w_k}^{\text{RW}} = \begin{bmatrix} E\{w_{a_1}^2\} & \vdots & 0 \\ \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \vdots & E\{w_{a_{\text{coef}}}^2\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{(X_k - X_{k-1})^2}{t_k - t_{k-1}}} & \vdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \vdots & \sqrt{\frac{(X_k - X_{k-1})^2}{t_k - t_{k-1}}} \end{bmatrix}. \quad (95)$$

5.1.2. Filtragem

Considerando a equação 43, e as funções de modelagem do atraso ionosférico vertical (Equações 47, 48 e 49) tem-se que as matrizes e vetores envolvidos no processo de filtragem no filtro de Kalman podem ser montados de três formas diferentes, a partir dos seguintes modelos de observação:

- Para $\mathbf{I}_{i(\text{Four15})}^v$:

$$\mathbf{F}(\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1)_r^s = \mathbf{S}\mathbf{F} \mathbf{I}_{i(\text{Four15})}^v + \mathbf{F}[(\mathbf{S}_{p2} - \mathbf{S}_{p1})^s + (\mathbf{R}_{p2} - \mathbf{R}_{p1})_r] + \mathbf{F}\boldsymbol{\varepsilon}_{p21} \quad (96)$$

- Para $I_{i(\text{Four}20)}^v$:

$$F(P_2 - P_1)_r^s = SF I_{i(\text{Four}20)}^v + F[(S_{p2} - S_{p1})^s + (R_{p2} - R_{p1})_r] + F \varepsilon_{p21} \quad (97)$$

- Para $I_{i(\text{Four}19)}^v$:

$$F(P_2 - P_1)_r^s = SF I_{i(\text{Four}19)}^v + F[(S_{p2} - S_{p1})^s + (R_{p2} - R_{p1})_r] + F \varepsilon_{p21} \quad (98)$$

onde SF é a função de mapeamento geométrico padrão, dada por $1/\cos z'$.

A matriz A_k , formada pelos coeficientes do vetor estado, é constituída de n_k linhas e $\text{coef}+r+s$ colunas, onde n_k representa o número de observações de pseudodistâncias ou pseudodistâncias filtradas pela fase, na época t_k , derivadas de L_1 e L_2 simultaneamente e $\text{coef}+r+s$ é o número total de elementos do estado. Como exemplo, considere que foi escolhido como função de modelagem a série de Fourier $I_{i(\text{Four})}^v$ (equação 96). Para uma época, o padrão da matriz A_k , para cada um dos r receptores e s satélites envolvidos, é dada como (CAMARGO, 1999):

$$A_k = \begin{matrix} & \begin{matrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & \dots & a_{15} & r_1 & r_2 & \dots & r_r & s_1 & s_2 & \dots & s_s \end{matrix} \\ \left. \begin{matrix} r_1 \\ \vdots \\ r_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ r_r \end{matrix} \right\} \begin{bmatrix} SF^{S1} & SF^{S1}B^{S1} & SF^{S1} \cosh^{S1} & SF^{S1} \sinh^{S1} & \dots & SF^{S1}B^{S1}h^{S1} & F & 0 & \dots & 0 & F & 0 & \dots & 0 \\ SF^{S2} & SF^{S2}B^{S2} & SF^{S2} \cosh^{S2} & SF^{S2} \sinh^{S2} & \dots & SF^{S2}B^{S2}h^{S2} & F & 0 & \dots & 0 & 0 & F & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ SF^{Ss} & SF^{Ss}B^{Ss} & SF^{Ss} \cosh^{Ss} & SF^{Ss} \sinh^{Ss} & \dots & SF^{Ss}B^{Ss}h^{Ss} & F & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & F \\ SF^{S1} & SF^{S1}B^{S1} & SF^{S1} \cosh^{S1} & SF^{S1} \sinh^{S1} & \dots & SF^{S1}B^{S1}h^{S1} & 0 & F & \dots & 0 & F & 0 & \dots & 0 \\ SF^{S2} & SF^{S2}B^{S2} & SF^{S2} \cosh^{S2} & SF^{S2} \sinh^{S2} & \dots & SF^{S2}B^{S2}h^{S2} & 0 & F & \dots & 0 & 0 & F & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ SF^{Ss} & SF^{Ss}B^{Ss} & SF^{Ss} \cosh^{Ss} & SF^{Ss} \sinh^{Ss} & \dots & SF^{Ss}B^{Ss}h^{Ss} & 0 & F & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & F \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ SF^{S1} & SF^{S1}B^{S1} & SF^{S1} \cosh^{S1} & SF^{S1} \sinh^{S1} & \dots & SF^{S1}B^{S1}h^{S1} & 0 & 0 & \dots & F & F & 0 & \dots & 0 \\ SF^{S2} & SF^{S2}B^{S2} & SF^{S2} \cosh^{S2} & SF^{S2} \sinh^{S2} & \dots & SF^{S2}B^{S2}h^{S2} & 0 & 0 & \dots & F & 0 & F & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ SF^{Ss} & SF^{Ss}B^{Ss} & SF^{Ss} \cosh^{Ss} & SF^{Ss} \sinh^{Ss} & \dots & SF^{Ss}B^{Ss}h^{Ss} & 0 & 0 & \dots & F & 0 & 0 & \dots & F \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (99)$$

Considerando-se agora, que foi escolhido como função de modelagem a série de Fourier $I_{i(\text{Four}19)}^V$ (equação 98). Para uma época, o padrão da matriz A_k , para cada um dos r receptores e s satélites envolvidos, passa a ser escrita como:

$$A_k = \begin{matrix} & \begin{matrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & \dots & a_9 & a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{18} & a_{19} & r_1 & \dots & r_r & s_1 & \dots & s_s \end{matrix} \\ \left. \begin{matrix} r_1 \\ \vdots \\ r_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ r_r \end{matrix} \right\} \begin{bmatrix} SF^{S1} & SF^{S1}B^{S1} & SF^{S1} \cosh^{S1} & SF^{S1} \sinh^{S1} & \dots & SF^{S1} \cos 4h^{S1} & SF^{S1} \sin 4h^{S1} & SF^{S1}h^{S1} & SF^{S1} \cos B^{S1} & SF^{S1} \sin B^{S1} & \dots & SF^{S1} \cos 4B^{S1} & SF^{S1} \sin 4B^{S1} & F & \dots & 0 & F & \dots & 0 \\ SF^{S2} & SF^{S2}B^{S2} & SF^{S2} \cosh^{S2} & SF^{S2} \sinh^{S2} & \dots & SF^{S2} \cos 4h^{S2} & SF^{S2} \sin 4h^{S2} & SF^{S2}h^{S2} & SF^{S2} \cos B^{S2} & SF^{S2} \sin B^{S2} & \dots & SF^{S2} \cos 4B^{S2} & SF^{S2} \sin 4B^{S2} & F & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ SF^{Ss} & SF^{Ss}B^{Ss} & SF^{Ss} \cosh^{Ss} & SF^{Ss} \sinh^{Ss} & \dots & SF^{Ss} \cos 4h^{Ss} & SF^{Ss} \sin 4h^{Ss} & SF^{Ss}h^{Ss} & SF^{Ss} \cos B^{Ss} & SF^{Ss} \sin B^{Ss} & \dots & SF^{Ss} \cos 4B^{Ss} & SF^{Ss} \sin 4B^{Ss} & F & \dots & 0 & 0 & \dots & F \\ SF^{S1} & SF^{S1}B^{S1} & SF^{S1} \cosh^{S1} & SF^{S1} \sinh^{S1} & \dots & SF^{S1} \cos 4h^{S1} & SF^{S1} \sin 4h^{S1} & SF^{S1}h^{S1} & SF^{S1} \cos B^{S1} & SF^{S1} \sin B^{S1} & \dots & SF^{S1} \cos 4B^{S1} & SF^{S1} \sin 4B^{S1} & 0 & \dots & 0 & F & \dots & 0 \\ SF^{S2} & SF^{S2}B^{S2} & SF^{S2} \cosh^{S2} & SF^{S2} \sinh^{S2} & \dots & SF^{S2} \cos 4h^{S2} & SF^{S2} \sin 4h^{S2} & SF^{S2}h^{S2} & SF^{S2} \cos B^{S2} & SF^{S2} \sin B^{S2} & \dots & SF^{S2} \cos 4B^{S2} & SF^{S2} \sin 4B^{S2} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ SF^{Ss} & SF^{Ss}B^{Ss} & SF^{Ss} \cosh^{Ss} & SF^{Ss} \sinh^{Ss} & \dots & SF^{Ss} \cos 4h^{Ss} & SF^{Ss} \sin 4h^{Ss} & SF^{Ss}h^{Ss} & SF^{Ss} \cos B^{Ss} & SF^{Ss} \sin B^{Ss} & \dots & SF^{Ss} \cos 4B^{Ss} & SF^{Ss} \sin 4B^{Ss} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & F \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ SF^{S1} & SF^{S1}B^{S1} & SF^{S1} \cosh^{S1} & SF^{S1} \sinh^{S1} & \dots & SF^{S1} \cos 4h^{S1} & SF^{S1} \sin 4h^{S1} & SF^{S1}h^{S1} & SF^{S1} \cos B^{S1} & SF^{S1} \sin B^{S1} & \dots & SF^{S1} \cos 4B^{S1} & SF^{S1} \sin 4B^{S1} & 0 & \dots & F & F & \dots & 0 \\ SF^{S2} & SF^{S2}B^{S2} & SF^{S2} \cosh^{S2} & SF^{S2} \sinh^{S2} & \dots & SF^{S2} \cos 4h^{S2} & SF^{S2} \sin 4h^{S2} & SF^{S2}h^{S2} & SF^{S2} \cos B^{S2} & SF^{S2} \sin B^{S2} & \dots & SF^{S2} \cos 4B^{S2} & SF^{S2} \sin 4B^{S2} & 0 & \dots & F & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ SF^{Ss} & SF^{Ss}B^{Ss} & SF^{Ss} \cosh^{Ss} & SF^{Ss} \sinh^{Ss} & \dots & SF^{Ss} \cos 4h^{Ss} & SF^{Ss} \sin 4h^{Ss} & SF^{Ss}h^{Ss} & SF^{Ss} \cos B^{Ss} & SF^{Ss} \sin B^{Ss} & \dots & SF^{Ss} \cos 4B^{Ss} & SF^{Ss} \sin 4B^{Ss} & 0 & \dots & F & 0 & \dots & F \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (100)$$

No caso de pseudodistâncias, o vetor das observações L_k^b é composto da combinação linear das observáveis de mesmo tipo, de dimensão $n_k \times 1$, onde $F(P_2 - P_1)$ fornece o valor do atraso ionosférico observado em L_1 . Para os diversos receptores e satélites, o vetor L_k^b é dado para a época t_k por:

$$L_k^b = \begin{bmatrix} F(P_2 - P_1)_{r_1}^{s_1} \\ F(P_2 - P_1)_{r_1}^{s_2} \\ \vdots \\ F(P_2 - P_1)_{r_1}^{s_s} \\ F(P_2 - P_1)_{r_2}^{s_1} \\ F(P_2 - P_1)_{r_2}^{s_2} \\ \vdots \\ F(P_2 - P_1)_{r_2}^{s_s} \\ \vdots \\ F(P_2 - P_1)_{r_r}^{s_1} \\ F(P_2 - P_1)_{r_r}^{s_2} \\ \vdots \\ F(P_2 - P_1)_{r_r}^{s_s} \end{bmatrix}. \quad (101)$$

A matriz variância-covariância das observações (Σ_{Lb_k}) é composta das variâncias advindas da propagação de covariância aplicada na combinação linear, dada por:

$$L_k^b = F(P_2 - P_1). \quad (102)$$

Assim que os coeficientes do modelo são filtrados a cada época, pode-se efetuar correções nas observáveis de pseudodistâncias, advindas do código C/A, da estação em que se deseja corrigir dos efeitos da ionosfera. Os arquivos de observações utilizados para calcular os coeficientes, bem como os que serão corrigidos, devem estar no formato RINEX (*Receiver Independent Exchange format*), o que permite o processamento dos dados em qualquer *software* GPS.

5.2. Inicialização do filtro de Kalman

Além dessas matrizes e vetores, para aplicar o filtro de Kalman precisa-se conhecer o vetor estado inicial ($t_k=0$), bem como a sua precisão:

$$X_{0|0} = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_{\text{coef}} \\ r_1 \\ \vdots \\ r_r \\ s_1 \\ \vdots \\ s_s \end{bmatrix}, \quad (103)$$

e

$$\Sigma_{X_{0|0}} = \begin{bmatrix} \sigma_{a_1}^2 & \vdots & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & \vdots & 0 \\ \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & \sigma_{a_{\text{coef}}}^2 & 0 & \vdots & 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & \vdots & 0 & \sigma_{r_1}^2 & \vdots & 0 & 0 & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & 0 & 0 & \vdots & \sigma_{r_r}^2 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & \vdots & 0 & 0 & \vdots & 0 & \sigma_{s_1}^2 & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & \vdots & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & \vdots & \sigma_{s_s}^2 \end{bmatrix}. \quad (104)$$

6. EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Nesta etapa do trabalho foram realizados experimentos utilizando os três tipos de processos aleatórios apresentados anteriormente. Outro ponto que tem destaque nesta etapa experimental do trabalho foi a utilização da série de Fourier nas direções latitudinal e longitudinal, a fim de modelar a anomalia equatorial. Assim, foram realizados alguns experimentos e os resultados, bem como a análise, serão apresentados a seguir. Para facilitar, a partir deste ponto o modelo regional da ionosfera em tempo real será denominado Mod_Ion_FK.

Para se estimar os parâmetros do modelo ionosférico em tempo real, que consistem nos coeficientes da série do tipo Fourier, foi elaborado um programa usando a linguagem Fortran no ambiente PowerStation 4.0, cujo fluxograma se encontra no Apêndice A. Para o processamento e análise, novas sub-rotinas foram desenvolvidas e outras sub-rotinas foram reaproveitadas da versão anterior do Mod_Ion (CAMARGO, 1999)

6.1. Dados GPS da RBMC utilizados nos experimentos

Para estimar os coeficientes do Mod_Ion_FK foram utilizados os dados GPS das estações da RBMC, exceto UEPP. Para cada instante de observação, após a filtragem dos coeficientes, foram estimados os atrasos ionosféricos e o arquivo RINEX de observação da estação em questão foi corrigido. Os dados utilizados foram coletados durante o período de 24 horas do oitavo dia de julho de 2001 e do primeiro dia de abril de 2002 (outono), utilizando receptores de dupla frequência Trimble 4000 SSI, a uma taxa de 15 segundos e máscara de elevação de 10°, porém, para minimizar a presença de sinais evitados de ruídos e multicaminho, no processamento foi utilizada uma máscara de elevação de 15° e o valor

adotado para a altura média da camada da ionosfera foi de 400 km, assim como fez Camargo (1999) e Matsuoka (2003) em seus experimentos. A Figura 8 mostra a localização das estações da RBMC. Das estações que estão em operação, as estações BRAZ (Brasília), CUIB (Cuiabá), IMPZ (Imperatriz), PARA (Curitiba), POAL (Porto Alegre), RIOD (Rio de Janeiro), SALV (Salvador) e VICO (Viçosa) foram utilizadas nos experimentos. As demais estações não foram utilizadas devido à ocorrência de algum tipo de problema com os dados, ou porque ainda não estavam implantadas ou em funcionamento no período selecionado para o experimento.

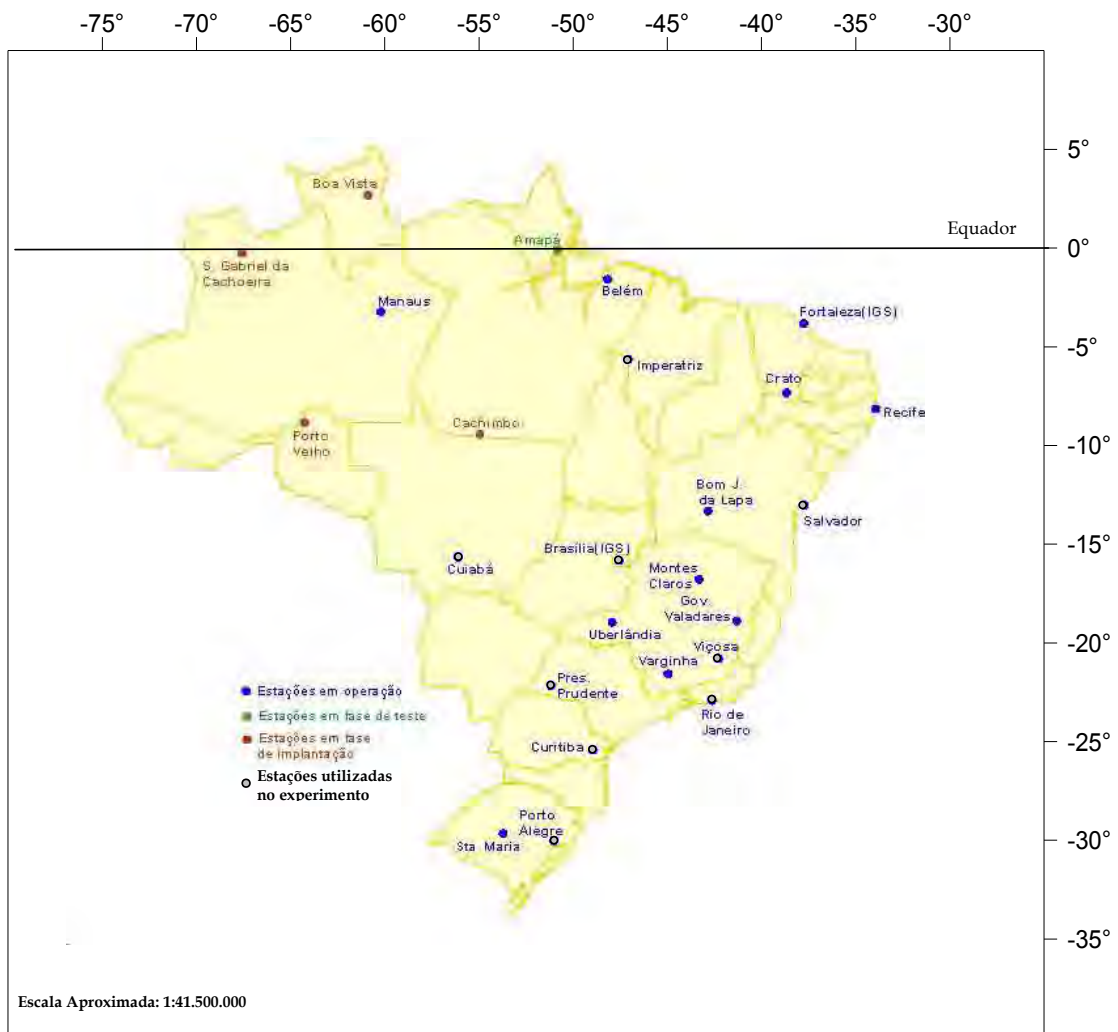


Figura 8 - Localização das Estações da RBMC do IBGE.
Fonte: Adaptado de IBGE (2005).

Para os propósitos deste trabalho, onde o foco foi a modelagem da ionosfera, no processamento dos dados foram utilizadas as efemérides precisas, disponibilizadas pelo IGS via FTP, e as estimativas de interferência dos satélites fornecidas pelo CODE nos arquivos IONEX e que também podem ser obtidas via FTP, a fim de minimizar a presença de outros erros sistemáticos. Os produtos do IGS obtidos via FTP se encontram no diretório <ftp://igs.ensg.ign.fr/pub>. Para a interferência dos receptores da RBMC, envolvidos no processamento em tempo real, foram utilizadas as estimativas obtidas a partir de um ajustamento em lote utilizando 24 horas de dados dos dias 7 de julho de 2001 e 31 de março de 2002.

Vale salientar que a escolha dos dias 8 de julho de 2001 e 1 de abril de 2002 baseou-se nos experimentos realizados em Matsuoka (2003), onde se concluiu que o menor efeito da ionosfera ocorreu no dia 8 de julho de 2001 (inverno) e o maior no dia 1 de abril de 2002 (outono), que são, respectivamente, épocas do ano de menor e maior taxa de ionização, sobre o Brasil. Deve-se dar destaque também que no ano de 2002 a atividade solar ainda estava elevada, apesar desta já estar na fase de declínio após o pico do ciclo solar de 11 anos.

A performance do Mod_Ion_FK foi avaliada por meio de uma comparação com os resultados obtidos sem a correção do atraso. Esta avaliação foi realizada em duas fases. A primeira tratou-se da diferença entre o atraso ionosférico estimado, pelo modelo Mod_Ion_FK, e o atraso ionosférico considerado como referência, calculado por meio da combinação linear da pseudodistância em L_1 e L_2 , observadas na estação UEPP. Na segunda fase foi realizada a análise da performance no resultado posicionamento por ponto em cada instante de observação, utilizando o arquivo RINEX corrigido do atraso ionosférico estimado a partir dos coeficientes do Mod_Ion_FK.

6.2. Opções de processamento no Mod_Ion tempo real

Considerando as três funções de modelagem da ionosfera utilizadas no modelo de observação e os três processos aleatórios utilizados no modelo dinâmico, são possíveis nove opções diferentes de processamento no Mod_Ion_FK. A Tabela 4 resume as combinações possíveis entre o modelo de observações e o dinâmico, bem como apresenta as siglas que serão utilizadas para melhor identificação da opção de processamento aplicada na fase experimental.

Tabela 4 - Opções de processamento no Mod_Ion tempo real.

Função de modelagem da ionosfera	Processo aleatório utilizado na predição	Siglas
$I_{i(\text{Four}15)}$	Gauss-Markov	$I_{(\text{Four}15)\text{GM}}$
	Random Walk	$I_{(\text{Four}15)\text{RW}}$
	Random Constant	$I_{(\text{Four}15)\text{RC}}$
$I_{i(\text{Four}19)}$	Gauss-Markov	$I_{(\text{Four}19)\text{GM}}$
	Random Walk	$I_{(\text{Four}19)\text{RW}}$
	Random Constant	$I_{(\text{Four}19)\text{RC}}$
$I_{i(\text{Four}20)}$	Gauss-Markov	$I_{(\text{Four}20)\text{GM}}$
	Random Walk	$I_{(\text{Four}20)\text{RW}}$
	Random Constant	$I_{(\text{Four}20)\text{RC}}$

Portanto, a Tabela 4 apresenta as nove estratégias para modelagem e correção do atraso ionosférico que foram utilizadas nos experimentos. Considerando que o processamento pode ser realizado utilizando a pseudodistância ou a pseudodistância suavizada pela fase, as opções de processamento se duplicam, isto é, passam a ser 18.

6.3. Análise do atraso ionosférico obtido com a pseudodistância e com a pseudodistância suavizada pela fase

Como os receptores das estações da RBMC são de dupla frequência, as observáveis em L_1 e L_2 de pseudodistância e fase, ou pseudodistância suavizada pela fase, podem ser utilizadas para monitorar a ionosfera. A Figura 9 mostra o erro devido ao atraso ionosférico observado em L_1 (I_1) e calculado a partir das observáveis de pseudodistância e pseudodistância suavizada (Anexo A). Para propósito de exemplo foram utilizadas as observações para o satélite PRN 13 (PRN – *Pseudo Random Noise*) coletadas na estação PARA, localizada em Curitiba. Na figura observa-se que o valor do atraso ionosférico calculado com a pseudodistância é bastante ruidoso quando comparado com aquele obtido pela pseudodistância suavizada. Deve-se salientar que os valores do erro apresentados na Figura 9 não foram corrigidos do erro sistemático da tendência interfrequência da estação em questão.

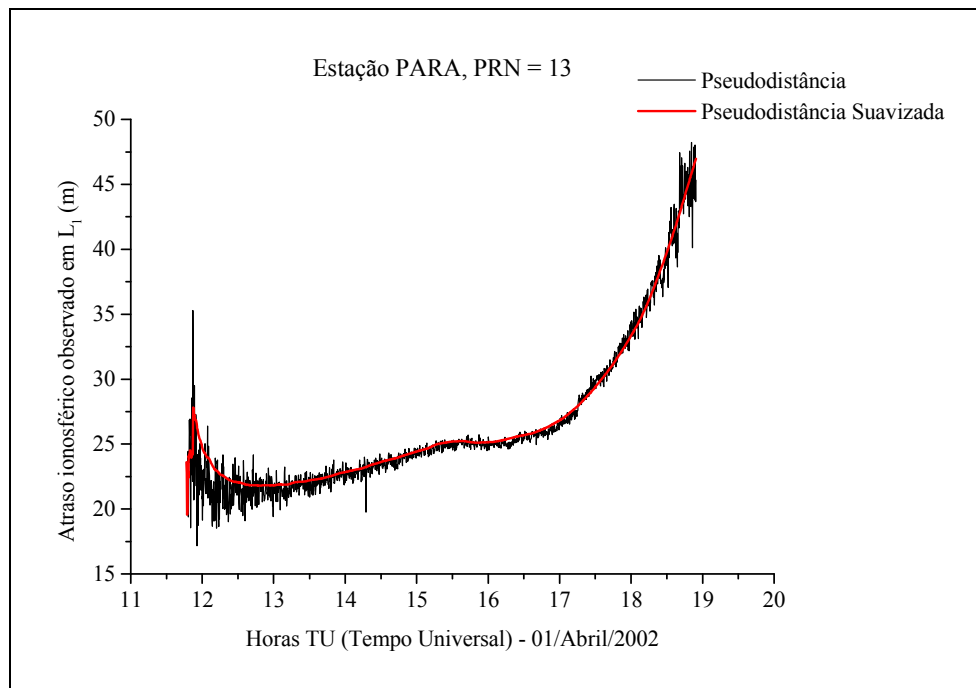


Figura 9 - Atraso ionosférico em L_1 a partir da pseudodistância e pseudodistância suavizada.

Uma análise do ruído nas observáveis apresentadas na Figura 9 também pode ser feita a partir da taxa de mudança do TEC (RTEC – *Rate of Change of TEC*). Isto também pode ser usado como medida dos distúrbios na ionosfera (EL GIZAWY, 2003). Neste trabalho o RTEC foi determinado em unidades de atraso ionosférico em metros, sendo denominado de taxa de mudança do atraso ionosférico (RID – *Rate of Change of Ionospheric Delay*). O RID foi obtido da seguinte forma:

$$\text{RID}_{t,s} = \frac{I_{t_{k+1},s} - I_{t_k,s}}{t_{k+1} - t_k}, \quad (105)$$

onde I é o atraso ionosférico observado na época t_{k+1} e t_k , e s representa o número do satélite.

Um exemplo na Figura 10 mostra dois gráficos com os valores do RID obtidos a partir da pseudodistância suavizada pela portadora (a) e da pseudodistância original (b), para o mesmo satélite (PRN 13) e estação (PARA).

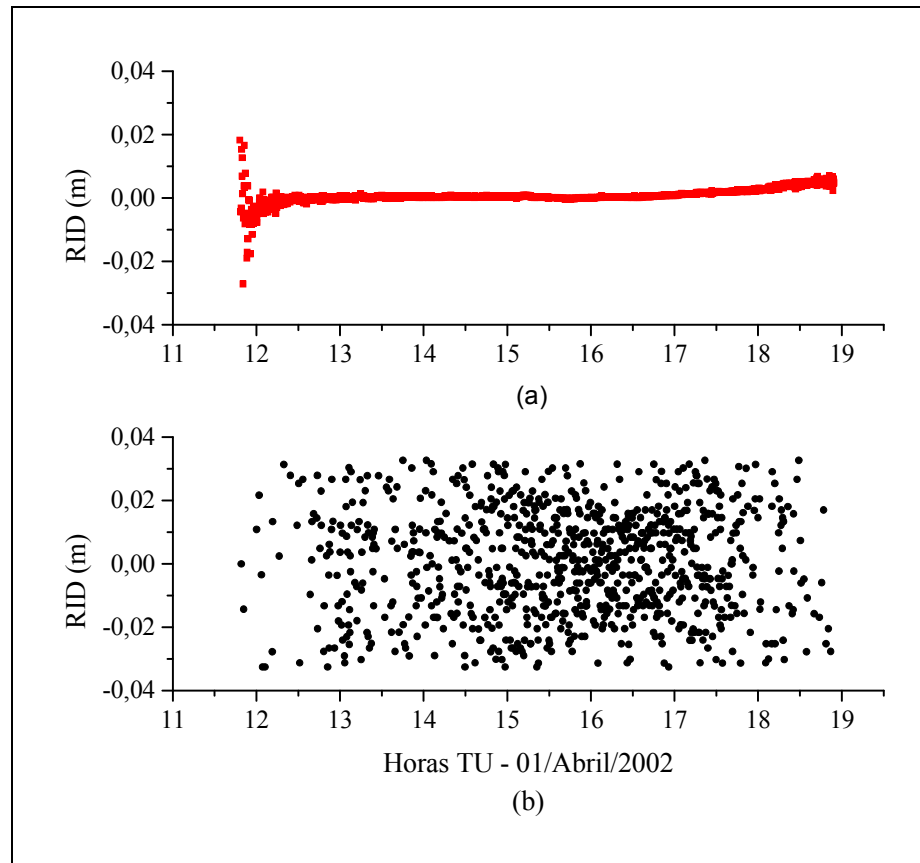


Figura 10 - Taxa de mudança do atraso ionosférico para o satélite 13, usando a pseudodistância suavizada (a) e a pseudodistância original (b).

Na Figura 10 pode-se confirmar a idéia de que os valores de TEC obtidos com a pseudodistância suavizada são mais precisos e consideravelmente menos ruidosos do que aqueles obtidos com a pseudodistância original. Na Figura 10(a) observa-se que a taxa de variação do atraso calculado com a pseudodistância suavizada permanece aproximadamente entre -0,02 e 0,02 m, nas primeiras épocas, onde se dá o início do processo de suavização da pseudodistância, e após a estabilização da suavização da pseudodistância, a taxa de variação permanece aproximadamente entre -0,005 e 0,005 m, com um desvio padrão de 0,0023 m. Por outro lado, a taxa de variação do atraso ionosférico calculado com a pseudodistância original (Figura 10(b)) é maior (-0,04 à 0,04) com um desvio-padrão de 0,016 m, isto devido à presença de ruído nesta observável. Logo, devido à presença de ruído, quando se utiliza a pseudodistância original, um número maior de observações de atraso ionosférico é rejeitado

para o processo de estimação dos coeficientes do modelo ionosférico. Para se ter uma idéia em das observações rejeitadas, durante o período de rastreamento de 7 horas, do satélite PRN 13, obteve-se um total de 1712 observações de atraso ionosférico, sendo que 84 (4,90%) foram rejeitadas quando se utilizou a pseudodistância suavizada pela fase e 845 (49,35%) quando se utilizou a pseudodistância original.

É interessante comparar os resultados apresentados na Figura 10 com relação ao ângulo de elevação do satélite PRN 13, pois a magnitude de alguns erros sistemáticos depende do ângulo de elevação do satélite. A Figura 11 mostra a RID em função do ângulo de elevação do satélite.

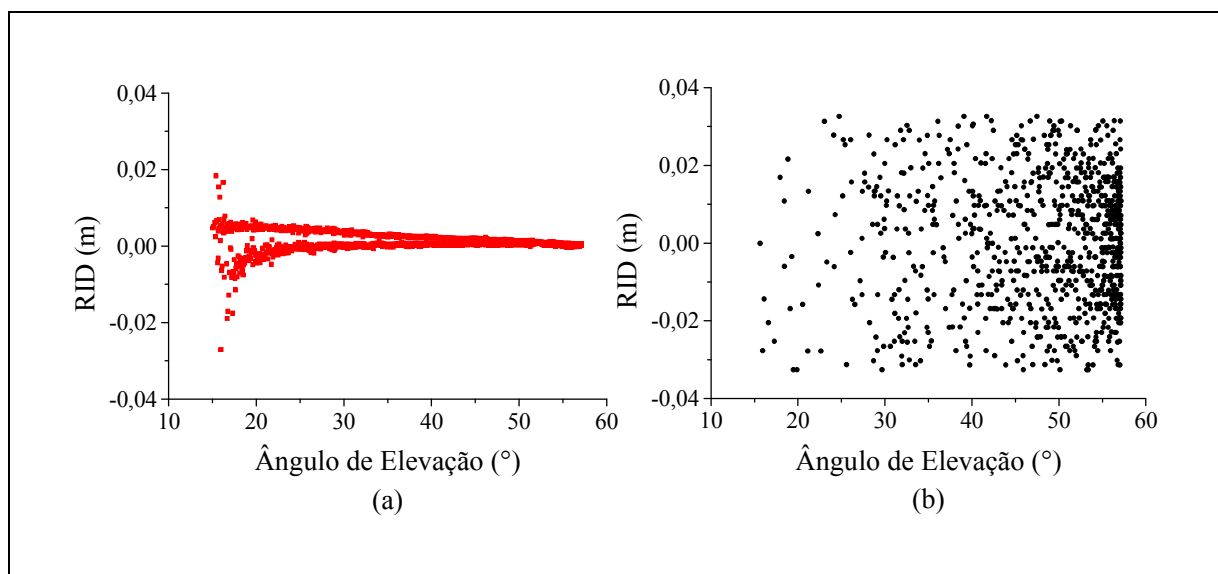


Figura 11 - Taxa de variação do atraso ionosférico em função do ângulo de elevação, usando a pseudodistância suavizada (a) e a pseudodistância original (b).

A Figura 11(a) mostra os valores da RID obtidos com a pseudodistância suavizada são maiores para ângulos de elevação menores que 20. Como podem ser observados, tais efeitos são propagados para as estimativas de TEC. Já na Figura 11(b), mostra que quando se utiliza a pseudodistância original os valores de RID são maiores durante todo o período de observação. Outra característica que pode ser confirmada na Figura

11(b) é o ruído da pseudodistância original, pois, a baixa densidade de pontos para ângulos de elevação menores do que 50° é devido à rejeição das observações de atraso ionosférico obtidas deste tipo de observável.

Com base nos resultados apresentados nesta seção, optou-se em prosseguir os experimentos utilizando a observável pseudodistância suavizada pela fase. Contudo, apesar da pseudodistância suavizada mostrar-se uma observável que apresente resultados mais precisos quando comparados com aqueles advindos da pseudodistância original, deve-se ter cuidado quando se utiliza esta observável, pois a mesma é afetada fortemente quando ocorrem perdas de ciclo, o que ocasiona instabilidades na estimação de coeficientes em tempo real utilizando o filtro Kalman.

6.4. Avaliação da performance do Mod_Ion_FK na determinação do erro sistemático da ionosfera sobre a pseudodistância em L_1

Nesta etapa do trabalho, a performance do Mod_Ion_FK foi analisada em termos de correção da observável pseudodistância do receptor do usuário, que no caso foi simulado como sendo a estação UEPP da RBMC. Utilizou-se esta estação, pois a mesma coleta dados de dupla frequência, e este fato permite analisar a discrepância entre o atraso estimado a partir dos coeficientes do Mod_Ion_FK e o atraso de referência (observado), calculado a partir da combinação linear das observações de dupla frequência coletadas na estação em questão. Neste experimento foram utilizados os dados coletados no dia de maior atividade da ionosfera (abril/2002).

A Figura 12 ilustra a cobertura dos pontos sub-ionosféricos (IPP) obtidos a partir de observações das estações utilizadas no processamento, para o dia de 1 de abril de 2002. As observações cobrem 4°N - 37°S na direção Norte-Sul e 28°W - 66°W na direção Leste-Oeste.

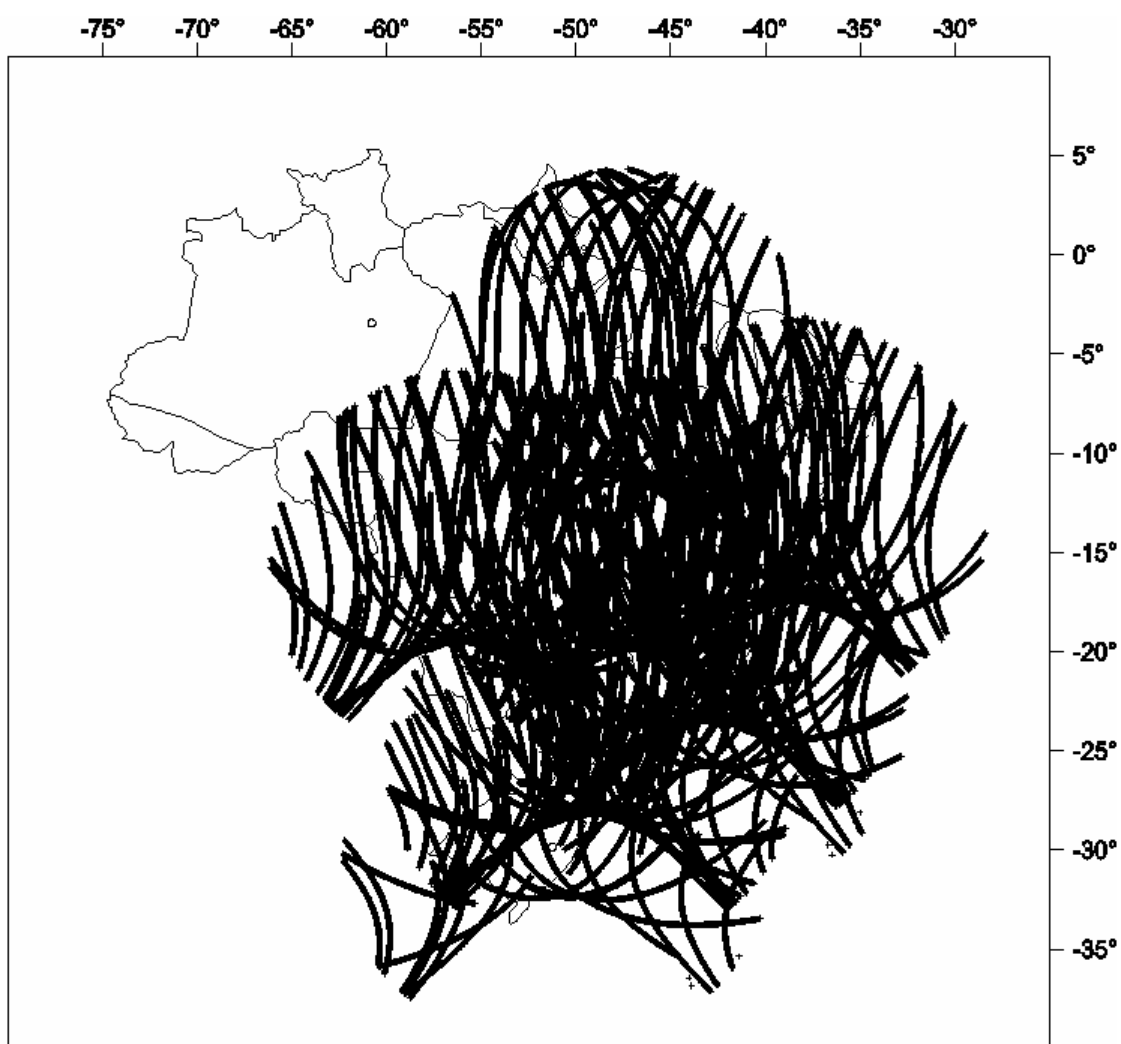


Figura 12 - Distribuição dos IPPs sobre a rede de estações utilizadas no processamento em tempo real.

A técnica utilizada para determinar o atraso ionosférico, que será tomado como referência, baseou-se na equação 39, reescrita da seguinte forma:

$$I_{(R)} = F(P_2 - P_1) - F(cT_{GD}) - F(R_{GD}), \quad (106)$$

onde $I_{(R)}$ é o atraso ionosférico verdadeiro (de referência) em L_1 , a constante F é aproximadamente igual a 1,546 m e a constante c é a velocidade da luz. Os termos (T_{GD}) e

(R_{GD}), representam, respectivamente, o erro sistemático interfrequência L_1 - L_2 dos satélites e dos receptores. Nos experimentos foram utilizados os valores de T_{GD} fornecidos nos arquivos IONEX, e o valor do R_{GD} foi estimado para o experimento em questão e corresponde a 2,602 m. Porém, o valor de R_{GD} não é absoluto, pois foi estimado conjuntamente com os coeficientes do Mod_Ion.

Assim, os valores do erro sistemático em L_1 , devido à ionosfera, estimados pelo modelo Mod_Ion_FK, são comparados com os obtidos pela equação 110, podendo-se quantificar a eficiência do modelo na estimação do atraso ionosférico. Logo, considerando as opções de processamento, o atraso ionosférico para a estação UEPP foi estimado para as opções de processamento apresentadas na Tabela 4, utilizando a pseudodistância suavizada.

A Figura 13 mostra, respectivamente, a diferença entre o atraso ionosférico estimado pelo Mod_Ion_FK (Tabela 4) e o atraso calculado ($I_{(R)}$) com as pseudodistâncias suavizadas, obtidas em ambas portadoras e corrigidas do T_{GD} e R_{GD} , para os satélites PRN 13, 14, 18 e 26, totalizando um período de aproximadamente 24 horas (Abril/2002), bem como os respectivos ângulos de elevação, para a estação UEPP.

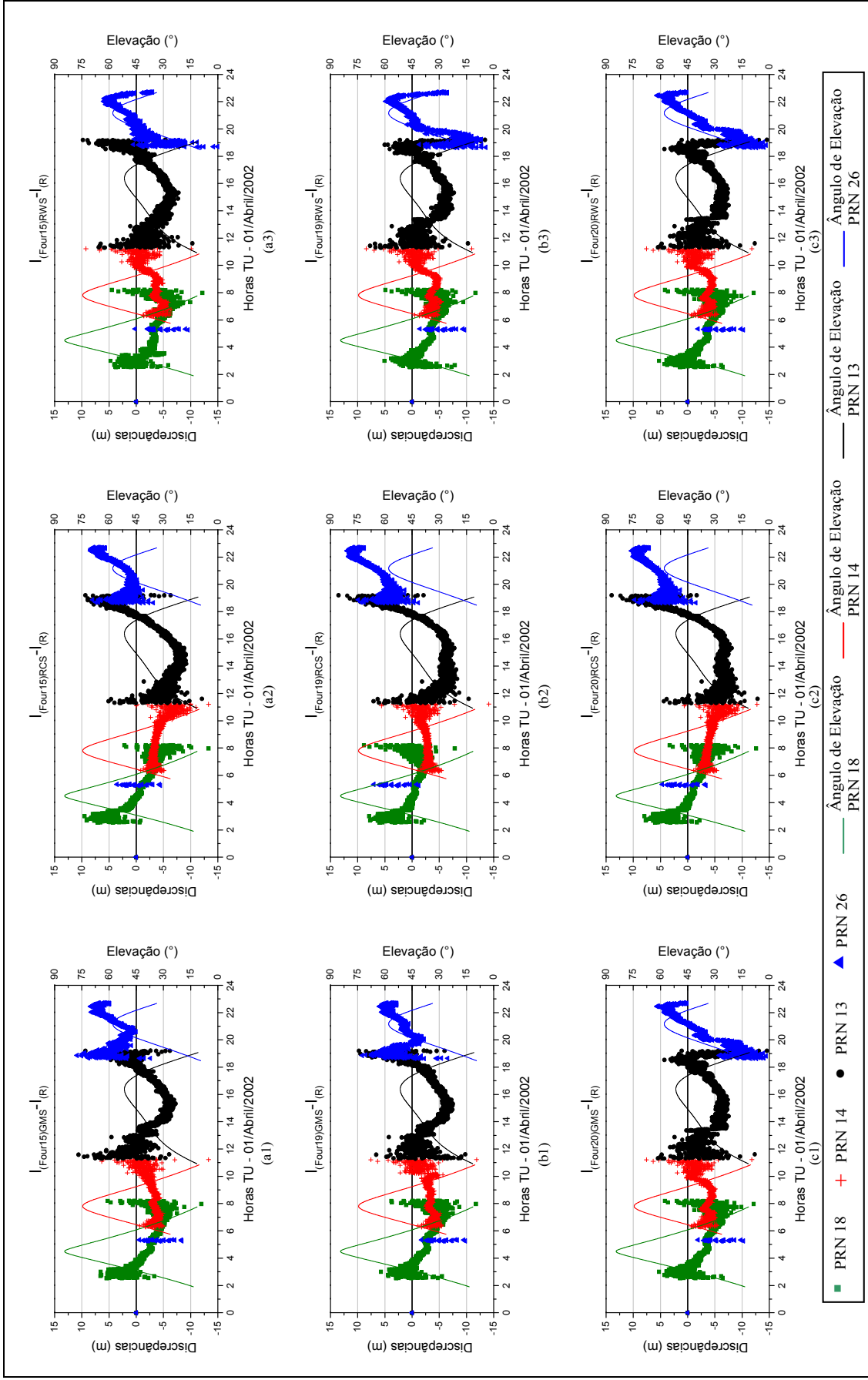


Figura 13 - Discrepâncias entre o atraso ionosférico estimado pelo Mod Ion_FK e o atraso calculado (referência) para a Estação UEPP (Abril/2002).

Na Figura 13, pode-se verificar o comportamento das discrepâncias dos valores estimados pelo modelo em tempo real em relação aos valores calculados tomados como referência. Neste momento é importante salientar que os valores de correlação temporal ($1/\beta$) e variância do ruído (σ^2) utilizados no processo *Gauss-Markov* são valores aproximados. Nos experimentos realizados em Fortes (2002) calcularam-se os valores de β e σ^2 utilizando dados coletados no Brasil. Logo, neste trabalho adotou-se esses valores. Portanto, os valores foram fixados como $1/\beta = 2156$ s e $\sigma^2 = 0,071931$ m². Deve-se esclarecer que para o caso deste trabalho, os valores adotados são aproximações, pois aqui a ionosfera é representada por coeficientes de uma série, e em Fortes (2002) a ionosfera foi parametrizada diretamente (VTEC). Neste trabalho os valores de β e σ^2 representam, respectivamente, a correlação e a variância dos coeficientes da série.

Nos gráficos a1, a2 e a3 da Figura 13 pode-se verificar as discrepâncias do atraso estimado utilizando a série de Fourier com 15 coeficientes (equação 47) com os processos aleatórios *Gauss-Markov* (GM), *random-walk* (RW) e *random-constant* (RC), respectivamente. Observando estes gráficos nota-se que os três apresentam resultados semelhantes. Quando os satélites estão com baixo ângulo de elevação (próximos ao horizonte), e conseqüentemente o sinal está atravessando uma camada ionosférica mais espessa, nota-se que os resultados obtidos pelo processo RW apresentam uma dispersão maior, principalmente no período das últimas horas. Os resultados obtidos com os processos GM e RC são muito próximos. No entanto, no período próximo às 15 horas TU os resultados obtidos com o processo GM apresentam-se um pouco melhor.

Agora nos gráficos b1, b2 e b3 da Figura 13 pode-se verificar as discrepâncias do atraso estimado utilizando a série de Fourier com 19 coeficientes (equação 49) com os processos aleatórios GM, RC e RW, respectivamente. Observando estes gráficos nota-se novamente que os três apresentam resultados semelhantes. Com relação ao processo

RW (Figura 13(b3)), agora os resultados são melhores do que os apresentados no gráfico a3, exceto no período das 19 horas. Com a alteração da série (19 coeficientes) o processo RW também apresentou melhores resultados quando comparado com os advindos do processo RC (Figura 13(b2)). Os resultados obtidos com o processo RC também melhoraram com a alteração da série de Fourier. Considerando agora o gráfico b1, observa-se que os resultados apresentaram uma melhora no período das 15 horas e principalmente no período das 22 horas TU (\cong 18 horas local), que chegou a apresentar uma discrepância máxima de 8,8 m (gráfico a1), e com a alteração da série para detectar variações ionosféricas em latitude e longitude, agora apresentou uma discrepância máxima 6,0 m.

Os gráficos c1, c2 e c3 da Figura 13 mostram as discrepâncias do atraso estimado utilizando a série de Fourier com 20 coeficientes (equação 48) com os processos aleatórios GM, RC e RW, respectivamente. Observando estes gráficos nota-se que os três apresentam resultados um pouco piores do que aqueles obtidos com a série de 19 coeficientes.

No geral, os gráficos da Figura 13 mostram que os resultados da correção do atraso ionosférico utilizando as nove opções de processamento são semelhantes. No entanto, pode-se verificar uma melhor performance nos resultados obtidos da combinação da série de Fourier de 19 coeficientes com o processo GM, principalmente, no período após o pôr-do-Sol, onde a discrepância média foi de aproximadamente 2,57 m, o que corresponde a uma melhora de 42,0% na correção do atraso ionosférico na pseudodistância em L_1 . O segundo melhor resultado para o mesmo período foi uma discrepância média de 2,8 m, com a combinação da série de 15 coeficientes com o processo RC. A Tabela 5 mostra a média da melhora obtida para cada estratégia de processamento, durante todo o período de observação dos quatro satélites analisados.

Tabela 5 - Melhora obtida na correção do atraso ionosférico na pseudodistância.

Série	15 Coeficientes			19 Coeficientes			20 Coeficientes		
Processo Aleatório	GM	RC	RW	GM	RC	RW	GM	RC	RW
Melhora (%)	64,00	59,53	64,23	67,00	58,28	62,49	58,34	51,90	58,34

Considerando os resultados apresentados na Figura 13 e na Tabela 5, observa-se então que aqueles obtidos da combinação da série de Fourier de 19 coeficientes com o processo GM foram os que apresentaram menores discrepâncias. Outra característica que pode ser verificada na Figura 13 é a correlação entre a performance da correção do atraso ionosférico e o ângulo de elevação do satélite. Nas primeiras e últimas épocas de rastreamento de cada um dos satélites, geralmente com observações próximas ao horizonte do receptor, pode-se verificar que a magnitude das discrepâncias do atraso ionosférico estimado é maior e irregular. Por outro lado, nota-se que no período em que o ângulo de elevação é maior a magnitude das discrepâncias diminui e a modelagem também se torna mais estável.

De modo geral os resultados mostram que nos instantes de observação próximos às últimas horas do dia, as discrepâncias apresentam uma grande variação. Isto pode representar indícios do efeito da cintilação, pois, no Brasil, os horários de cintilação mais intensos são limitados à uma hora após o pôr do Sol até, aproximadamente, à meia noite local e as ocorrências de cintilação são máximas de setembro a março, ou pode representar simplesmente o aumento da densidade de elétrons devido à ocorrência do pico pré-inversão. A Figura 14 mostra a ocorrência de cintilação para o dia da coleta dos dados do experimento em questão.

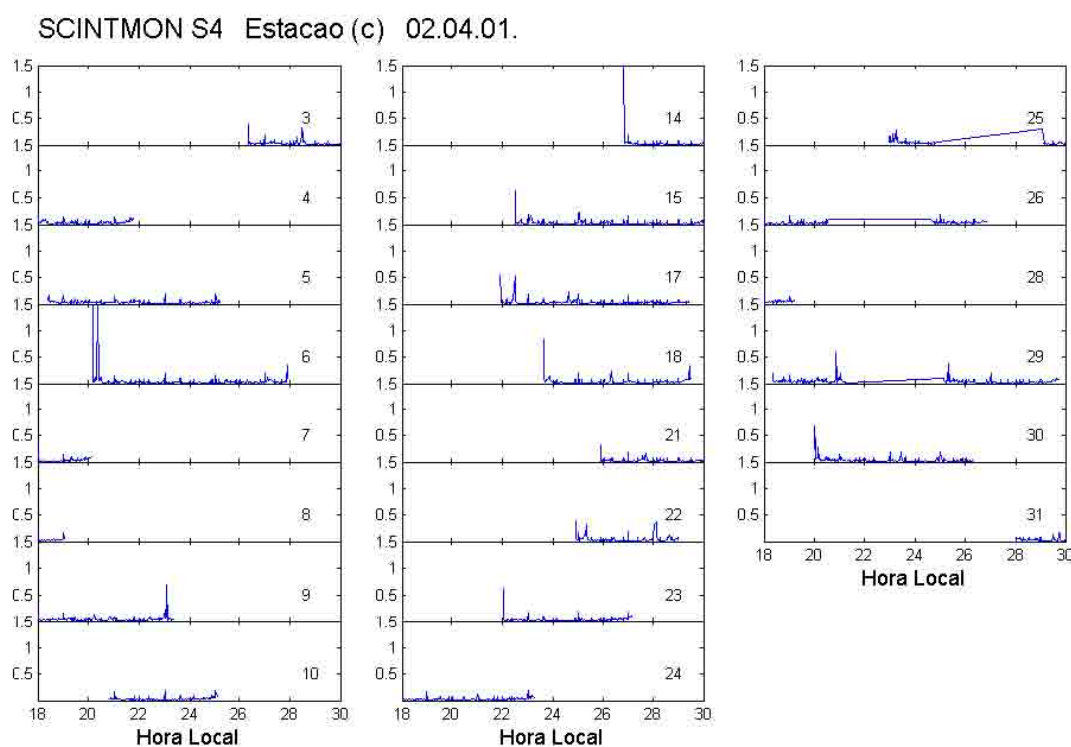


Figura 14 - Ocorrência de cintilações no Brasil (01/04/2002).
Fonte: Luiz Felipe (2005).

Segundo Luiz Felipe (2005), a Figura 14 foi gerada a partir de dados coletados na estação de São José dos Campos e mostra que não houve registro de ocorrência de cintilações no dia 1 de abril de 2004. Na Figura 14, o índice S4 quantifica a intensidade da cintilação e em cada um dos sub-quadros consta o número do satélite visível. Na figura a presença de alguns picos é devido a ruídos e não podem ser considerados como cintilação, e as linhas retas representam a ausência de dados naquele período. Portanto, de acordo com a Figura 14, as variações nas discrepâncias após o pôr-do-Sol (Figura 13) não são decorrentes da presença de cintilação ionosférica. Logo, provavelmente, este comportamento observado próximo às 22 horas TU (\cong 18 horas local) nos gráficos da Figura 13, é decorrente da ocorrência do pico pré-inversão. Porém, deve-se realizar um estudo exclusivamente direcionado a esse assunto para se avaliar com mais rigor científico as influências da cintilação ionosférica e do pico pré-inversão.

Vale salientar que esses experimentos foram realizados com dados GPS coletados durante um período de máxima atividade solar e num mês em que ocorre intensa atividade ionosférica.

6.5. Avaliação no posicionamento por ponto

Nesta etapa do trabalho a performance do Mod_Ion_FK foi avaliada no posicionamento por ponto (ou absoluto) em tempo real, utilizando a pseudodistância advinda do código C/A, com os dados GPS da estação UEPP corrigidos do efeito da ionosfera para a estratégia $I_{(Four19)GM}$. A escolha da opção utilizando a série de 19 coeficientes e o modelo GM foi baseada numa comparação dos resultados obtidos com as nove estratégias de processamento, para verificar qual estratégia de processamento em tempo real melhor representa o comportamento da ionosfera, conforme seção anterior.

Deve-se salientar que nesta fase do experimento a qualidade do posicionamento por ponto em tempo real foi avaliada num dia de alta atividade ionosférica (01 de abril de 2002) e também foi realizado um processamento para o dia 8 de julho de 2001, para verificar a performance do Mod_Ion_FK no posicionamento por ponto num dia de baixa atividade da ionosfera. As estações da RBMC utilizadas no processamento do dia da baixa atividade ionosférica são as mesmas utilizadas para o dia de máxima atividade.

Para se avaliar a melhora da qualidade no posicionamento, as coordenadas geodésicas (φ, λ, h) foram comparadas com as consideradas verdadeiras da estação UEPP, para cada instante no posicionamento por ponto. Foi realizado o posicionamento por ponto com os dados sem a correção da ionosfera e com a correção utilizando o modelo ionosférico em

tempo real, pois, dessa forma, pode-se analisar a melhora dos resultados após a correção do erro sistemático devido à ionosfera utilizando o Mod_Ion_FK.

O posicionamento por ponto foi processado com o *software* GPSPACE (*GPS Positioning from ACS Clocks and Ephemerides*) Versão 3.3, desenvolvido pelo GSD (*Geodetic Survey Division*) do NRCan (*Natural Resources Canada*) (NRCan, 2000) e disponível a todos usuários por meio da internet (NRCan, 2005). No caso em questão, adotaram-se como “verdade de terreno”, as coordenadas ITRF (IGS00) (*International Terrestrial Reference Frame 2000*). A escolha desta realização de sistema de referência foi baseada nas opções de realizações disponíveis no GPSPACE. Em resumo, os valores estimados para as coordenadas geodésicas (φ, λ, h) em cada instante de observação foram transformadas para ITRF 2000 e comparadas com os valores considerados verdadeiros, para os seguintes casos:

- sem a correção do efeito da ionosfera (SCI) e
- com a correção do efeito da ionosfera utilizando a opção $I_{(\text{Four}19)\text{GM}}$ e a pseudodistância suavizada (CCI- $I_{(\text{Four}19)\text{GMS}}$).

Para garantir uma boa geometria dos satélites, foi adotado para a diluição de precisão (GDOP) um valor menor ou igual a 7. Foram consideradas apenas as pseudodistâncias observadas com ângulo de elevação acima de 15 graus, e a precisão das mesmas foi adotada como sendo 3 m. Dessa forma, será apresentada a seguir a análise da melhora obtida na posição planimétrica e altimétrica após a correção do efeito da ionosfera com o Mod_Ion_FK e com o Mod_Ion.

As Figuras 15 a 18, mostram o comportamento diário das discrepâncias em latitude para as estratégias adotadas neste experimento, durante as 24 horas de observação de

um dia de julho de 2001 e abril de 2002, justamente nas semanas em que Matsuoka (2003) obteve os menores e maiores valores de discrepâncias, respectivamente. Deve-se relembrar que as discrepâncias, neste experimento, foram calculadas para cada instante de observação simulando assim o resultado posicional após a correção da ionosfera em tempo real.

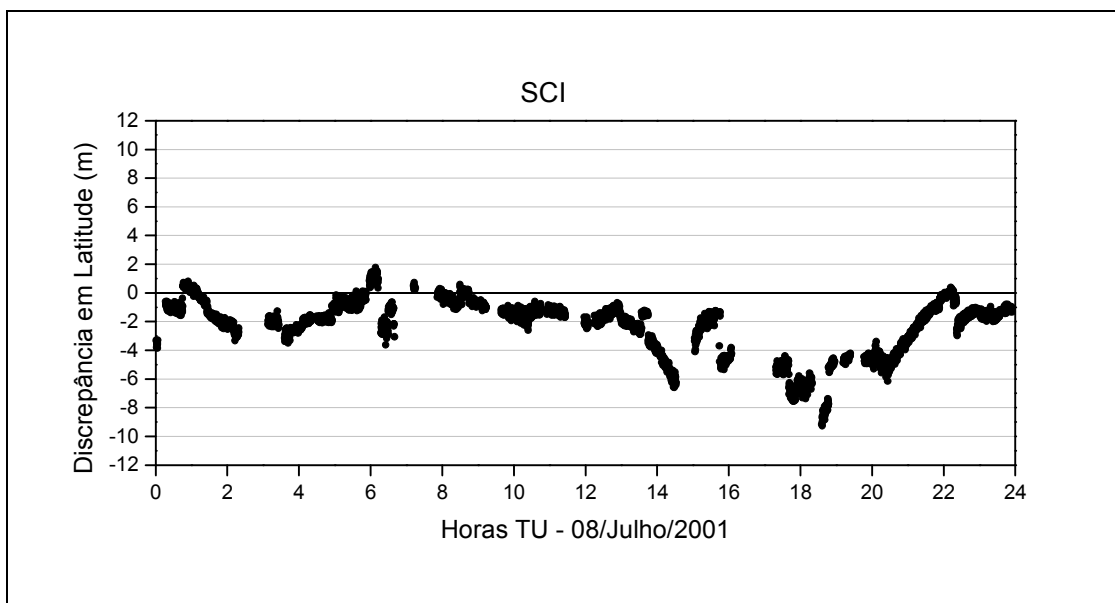


Figura 15 - Discrepâncias em latitude – SCI – Julho/2001.

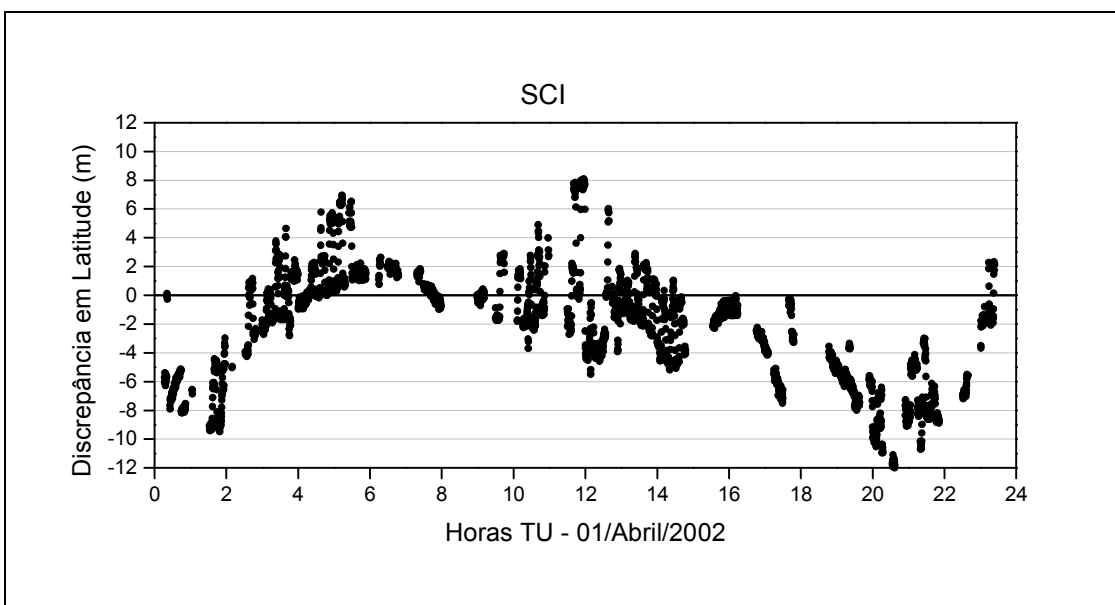


Figura 16 - Discrepâncias em latitude – SCI – Abril/2002.

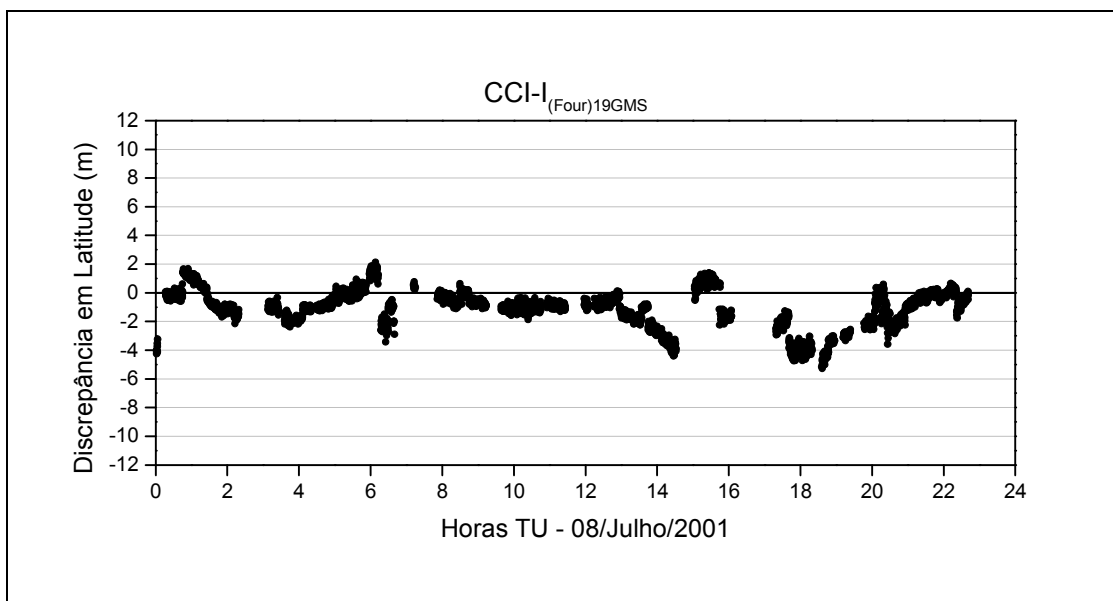


Figura 17 - Discrepâncias em latitude – CCI-I_{(Four)19GMS} – Julho/2001.

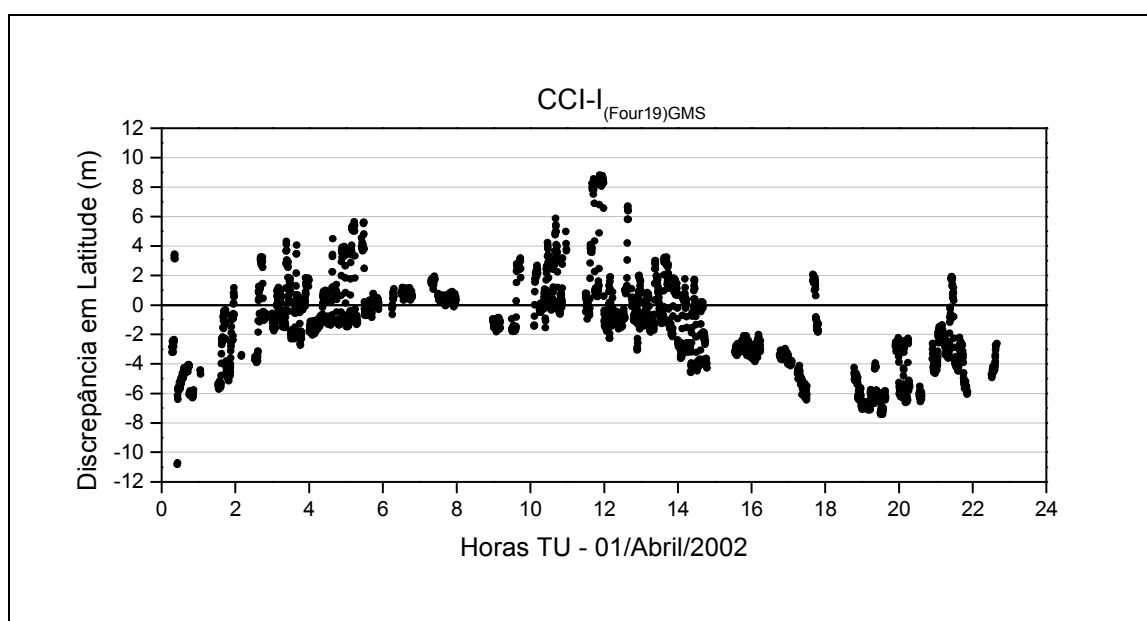


Figura 18 - Discrepâncias em latitude – CCI-I_{(Four)19GMS} – Abril/2002.

É importante salientar que os períodos sem dados de discrepâncias nas figuras acima são devido ao *software* GPSurvey não ter estimado as coordenadas da estação UEPP quando o GDOP assumiu valores acima de 7. Comparando-se as Figuras 15 e 16, verifica-se, significativamente, que o dia referente à abril/2002 (outono) proporcionou valores de discrepâncias maiores do que os de julho/2001 (inverno). Nas Figuras 17 e 18 nota-se o que acontece com as discrepâncias em latitude após a correção do erro sistemático devido à

ionosfera, ou seja, observa-se uma diminuição da magnitude das discrepâncias. Da mesma forma que para a opção SCI, se comparar as duas figuras referentes à opção CCI, verifica-se que o dia referente ao mês de abril/2002 proporciona valores de discrepância bem maiores do que julho/2001. Analisando a Figura 18, que se refere ao mês de abril, verifica-se que o efeito máximo diário da ionosfera sobre a latitude, num dia de intensa atividade da ionosfera, ocorre, aproximadamente, nos períodos de 2 às 5, de 10 às 13 e de 19 às 23 horas TU. Comparando-se agora as Figuras 16 e 18, observa-se que a discrepância máxima na opção SCI ocorreu entre 20 e 21 horas TU, e atingiu um valor de -12 m, e após a correção do erro devido à ionosfera (opção CCI), a discrepância diminuiu para -7,7 m.

A seguir, as Figuras 19 a 22, mostram o comportamento diário das discrepâncias em longitude para as estratégias adotadas.

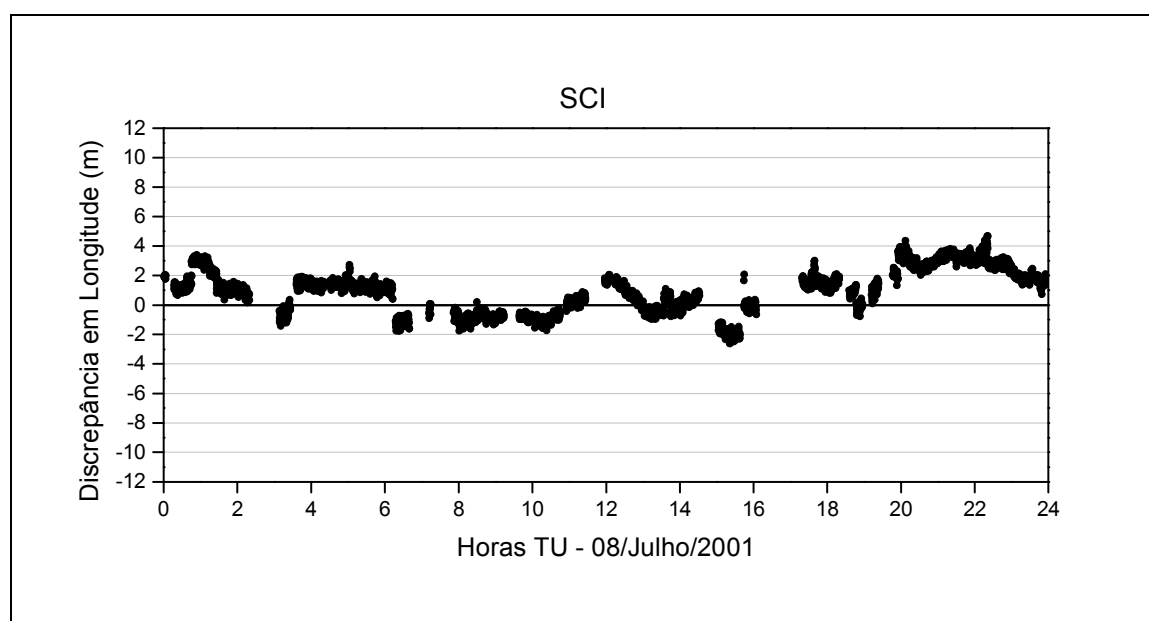


Figura 19 - Discrepâncias em longitude – SCI – Julho/2001.

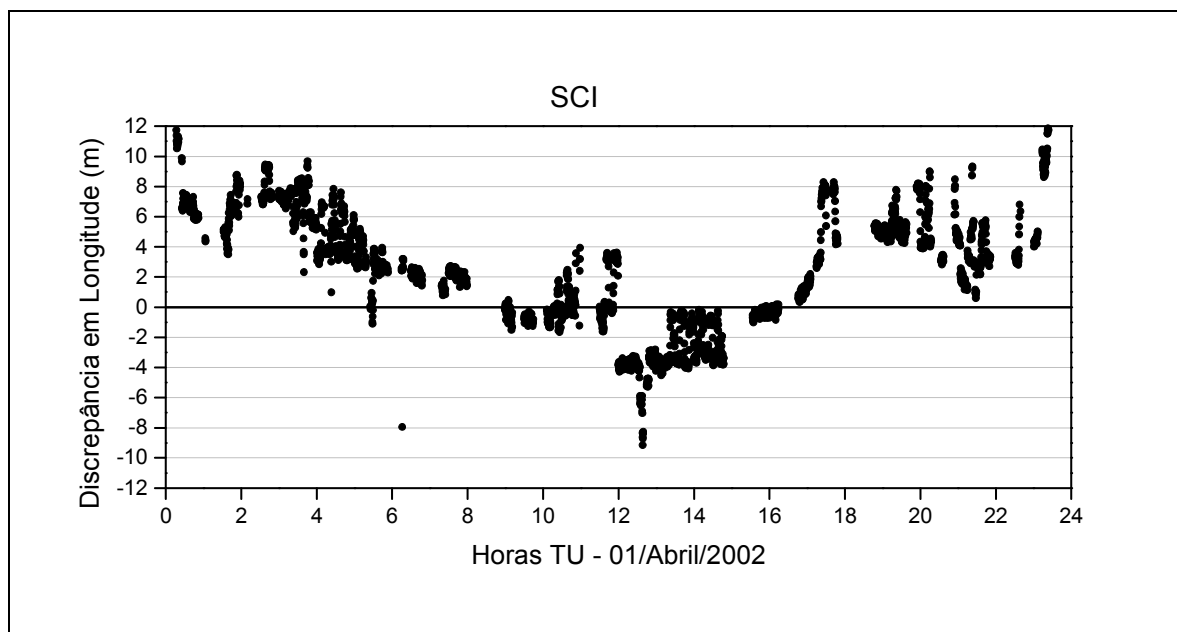


Figura 20 - Discrepâncias em longitude – SCI – Abril/2002.

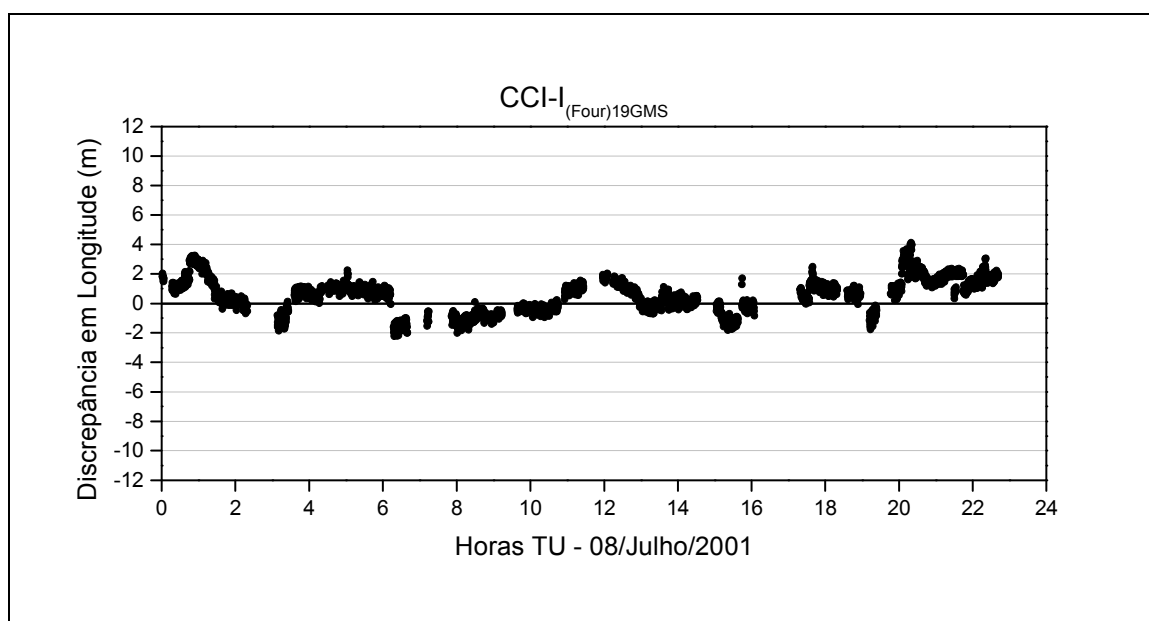


Figura 21 - Discrepâncias em longitude – CCI-I_{(Four)19GMS} – Julho/2001.

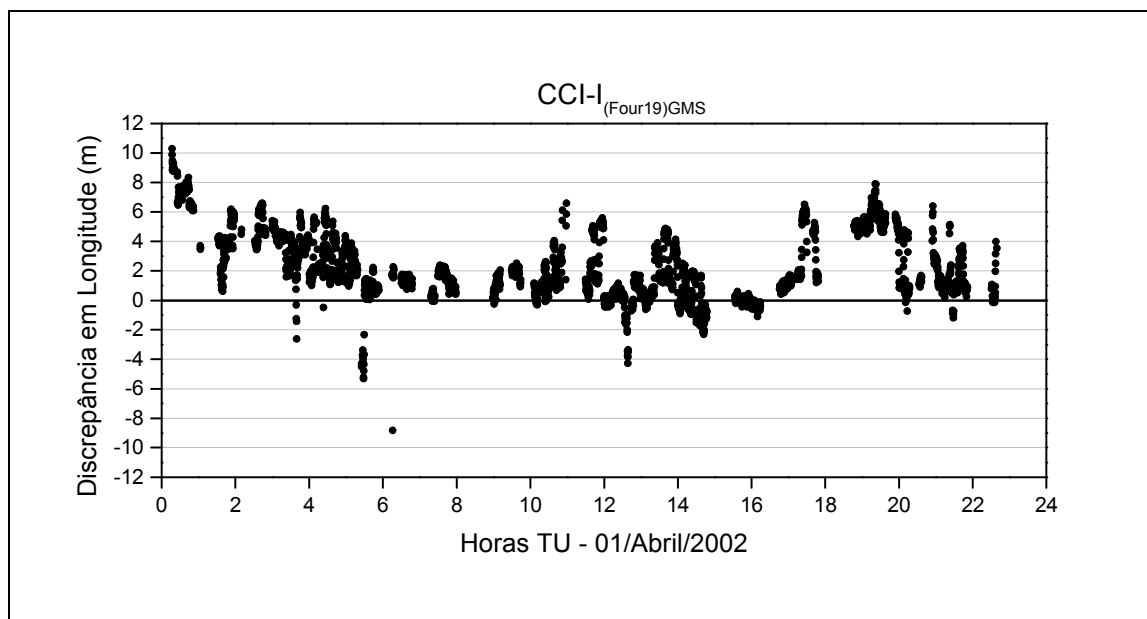


Figura 22 - Discrepâncias em longitude – CCI-I_{(Four19)GMS} – Abril/2002.

Nas Figuras 19 e 20 podem-se observar as discrepâncias em longitude em dias de baixa e alta atividade da ionosfera, respectivamente. Na Figura 20 verifica-se que o efeito máximo diário da ionosfera sobre a longitude, em um dia de alta atividade ionosférica, ocorrem, aproximadamente, nos períodos de 0 às 5, de 12 às 13 e de 18 às 23 horas TU.

Nas Figuras 21 e 22 nota-se que as discrepâncias em longitude diminuem após a correção do efeito sistemático devido à ionosfera. Ambas as opções de processamento CCI-I_{(Four19)GMS} para o dia 8/Julho/2001 e para 1/Abril/2002, apresentaram uma melhora média de 31,00% nos resultados, quando comparados com aquelas obtidos de suas respectivas opções SCI. Com relação ao dia de menor atividade da ionosfera (Julho/2001), pode-se observar, na Figura 21, que a melhora foi mais significativa (22,57%) no período após às 17 horas TU, coincidindo com o período diário de maior atividade da ionosfera. Já para o dia de maior atividade da ionosfera (Abril/2002), verifica-se, na Figura 22, que as melhoras foram mais significativas nas primeiras e últimas horas do dia, onde as discrepâncias permaneceram praticamente entre 0,0 e 6,0 m, e no mesmo período, as discrepâncias SCI permaneceram entre 0 e 10 m. Comparando-se agora as Figuras 21 e 22, observa-se que no dia de baixa

atividade da ionosfera as discrepâncias permaneceram aproximadamente entre -2,0 e 2,0 m, após a correção do erro sistemático, e para o dia de alta atividade da ionosfera, as discrepâncias permaneceram entre -6,0 e 6,0 m.

Para se ter uma idéia melhor da qualidade do posicionamento em planimetria após a correção do erro sistemático devido à ionosfera, as Figuras 23 e 24 mostram as discrepâncias planimétricas em latitude e em longitude, para as opções SCI e CCI.

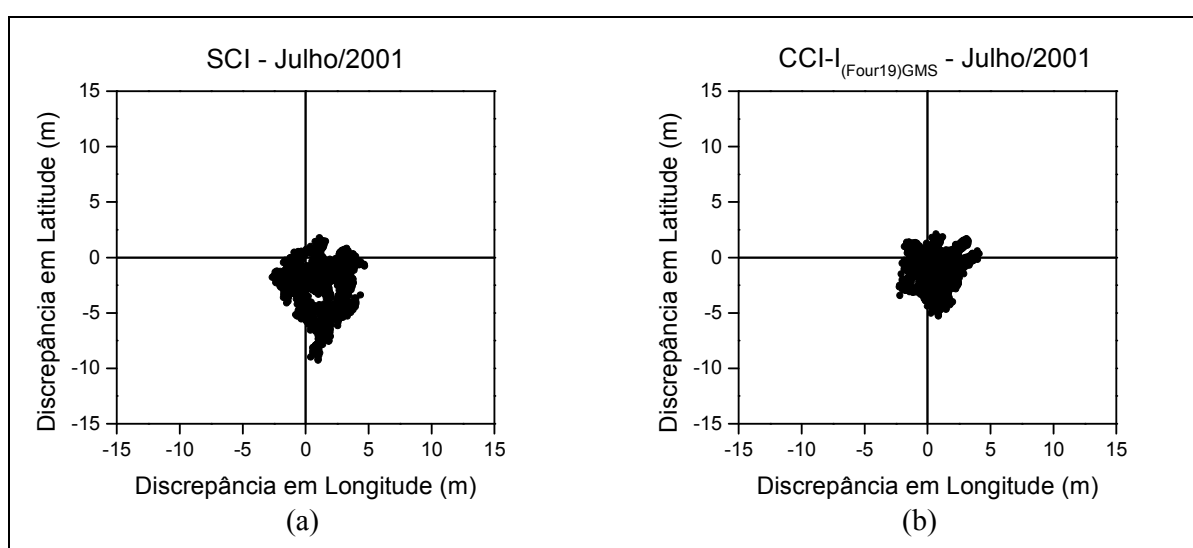


Figura 23 - Discrepância planimétrica para Julho/2001.

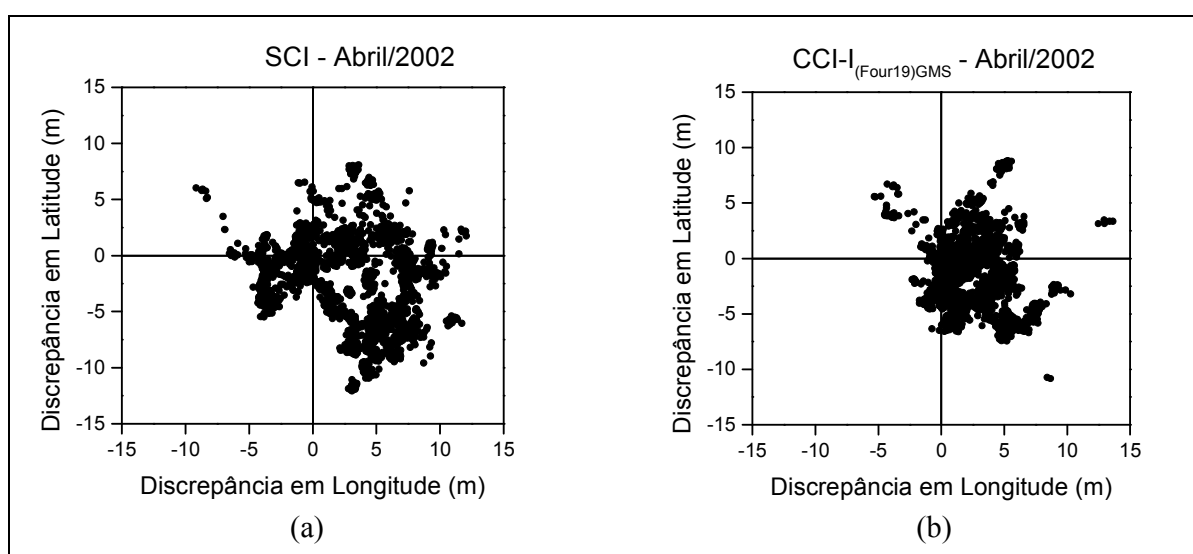


Figura 24 - Discrepância planimétrica para Abril/2002.

Comparando-se as Figuras 23 e 24 confirma-se que o erro em planimetria é menor quando se realiza o posicionamento em dias de menor atividade ionosférica. Outro fato que pode ser notado observando-se a “nuvem” de pontos nos gráficos das figuras em questão, é que há uma melhora na acurácia e dispersão dos dados.

Até aqui foram analisados os resultados obtidos em planimetria, e de modo geral pode-se afirmar que a qualidade planimétrica do posicionamento por ponto em tempo real melhorou após a correção do erro devido à ionosfera utilizando os coeficientes estimados pelo Mod_Ion_FK ($CCI-I_{(Four19)GMS}$).

Tratando agora da eficiência do modelo na altimetria, as Figuras 25 a 28, mostram o comportamento diário das discrepâncias em altitude geométrica para as estratégias adotadas.

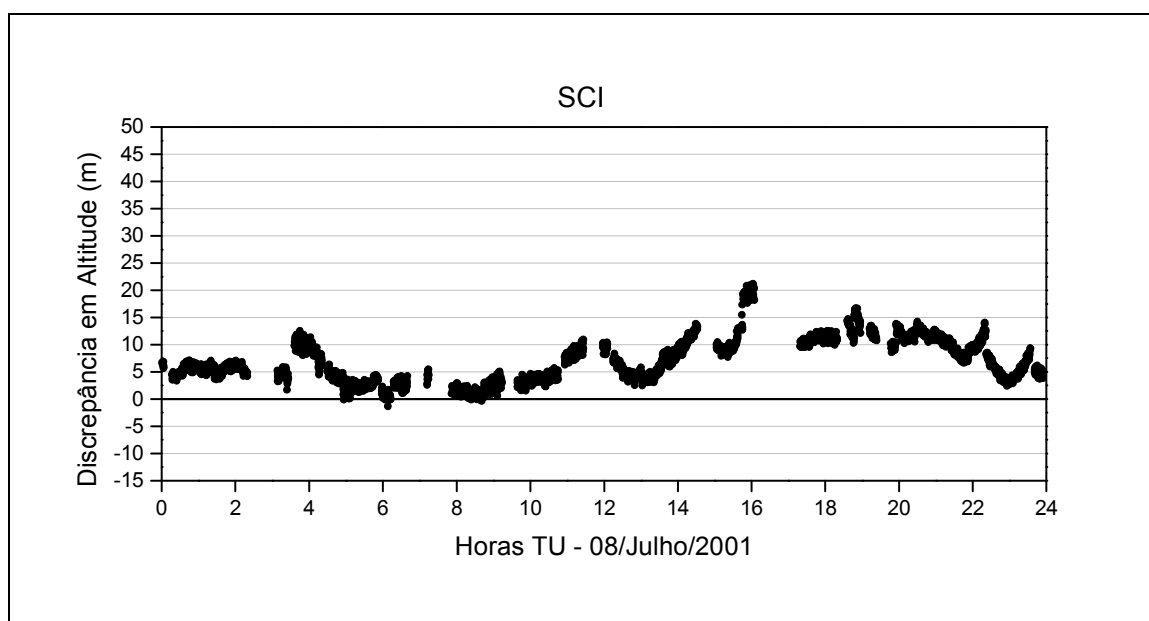


Figura 25 - Discrepâncias em altitude – SCI – Julho/2001.

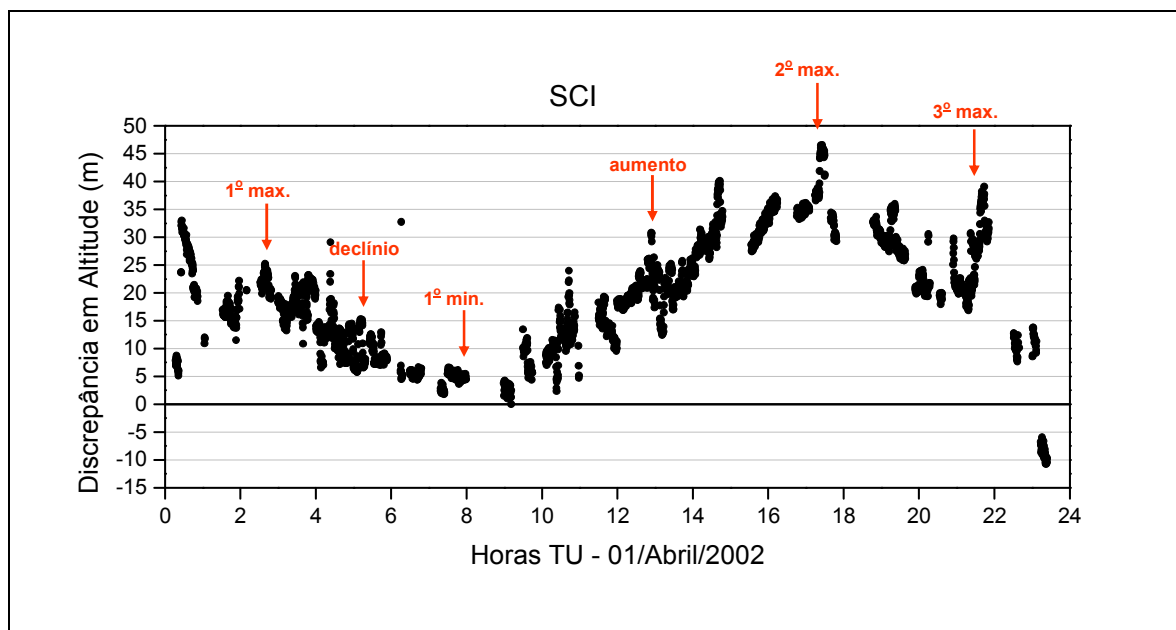


Figura 26 - Discrepâncias em altitude – SCI – Abril/2002.

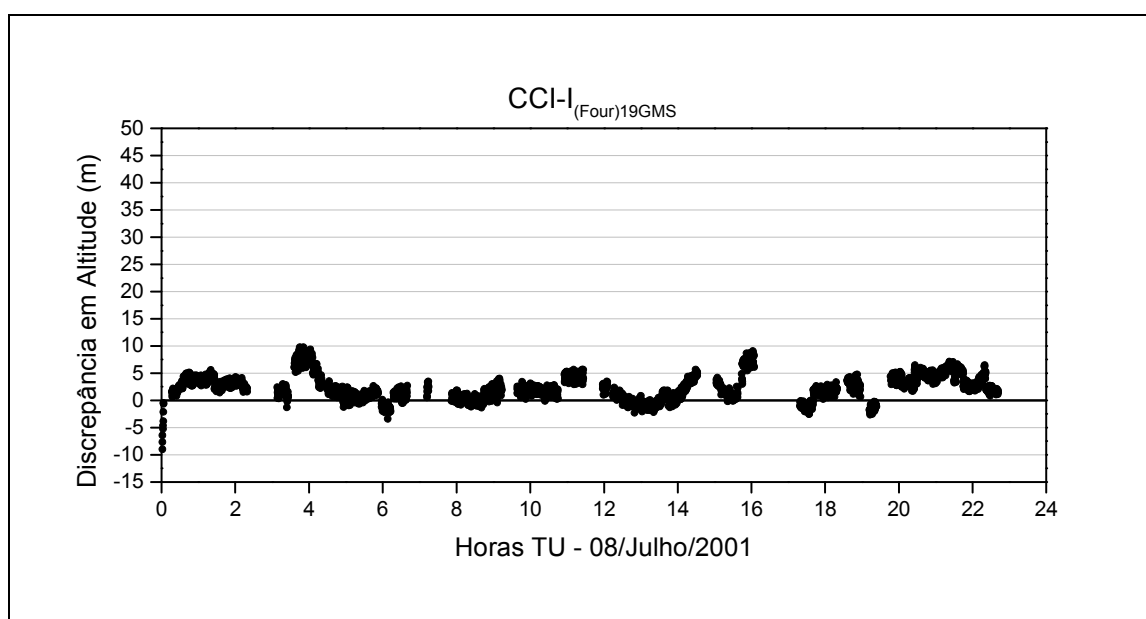


Figura 27 - Discrepâncias em altitude – CCI-I_{(Four)19GMS} – Julho/2001.

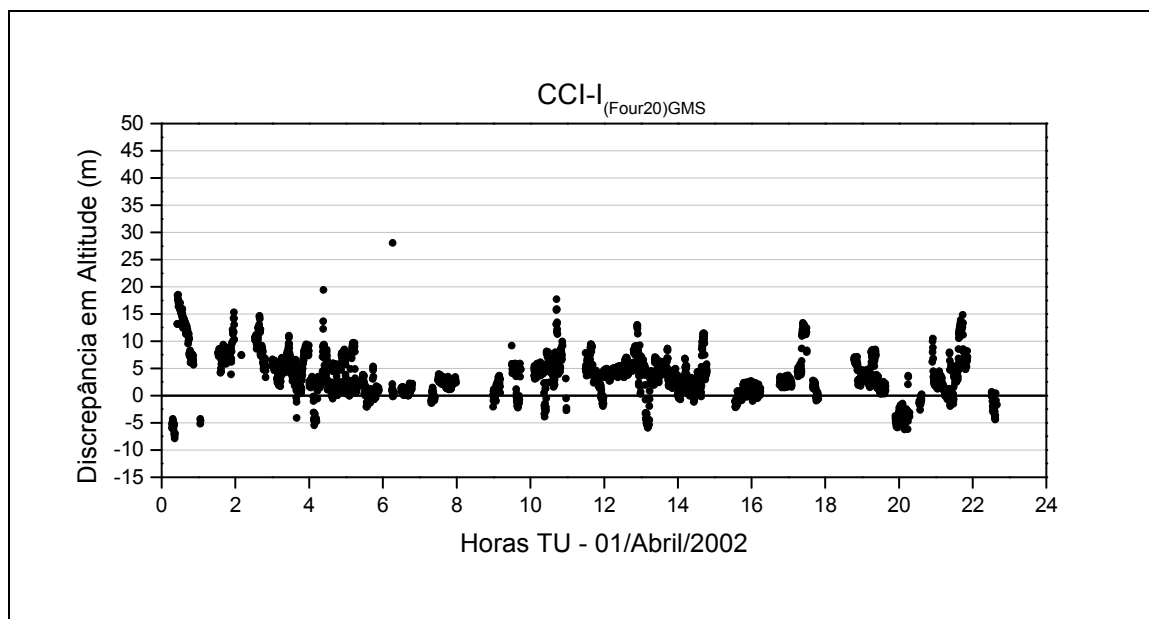


Figura 28 - Discrepâncias em altitude – CCI-I_{(Four19)GMS} – Abril/2002.

Nas Figuras 25 e 26 verifica-se que o efeito diário da ionosfera no posicionamento por ponto é bem representado pela variação da altitude geométrica, pois esta é a componente mais sensível à influência da ionosfera. Elas mostram que no efeito diário da ionosfera ocorrem três picos de máximo e dois de mínimos. O primeiro máximo ocorre, aproximadamente, às 3 horas TU. O segundo máximo, e que corresponde ao efeito máximo diário da ionosfera sobre a altitude geométrica, como é de se esperar, ocorre, aproximadamente, às 17 horas TU (\cong 14 horas local). E o terceiro máximo ocorre, aproximadamente às 21 horas TU (\cong 18 horas local), no horário do pico pré-inversão. Já, o menor efeito diário da ionosfera ocorre no primeiro mínimo, aproximadamente, às 8 horas TU (\cong 5 horas local), e no segundo mínimo, aproximadamente, às 24 horas TU (\cong 21 horas local).

Nas Figuras 27 e 28, observa-se que após a correção do efeito sistemático devido à ionosfera, as discrepâncias em altitude ficam menores. Considerando os resultados referentes à Abril/2002, pode-se verificar ainda que as correções foram mais eficientes em altimetria, pois, discrepâncias que apresentavam magnitudes de aproximadamente 45,0 m na opção SCI, passaram a apresentar valores médios em torno de 10,0 m após as correções.

Do que foi apresentado até o momento, pode-se afirmar que o efeito da ionosfera é bem menor na planimetria (latitude e longitude) do que na altimetria (altitude), e ainda, que o comportamento diário da ionosfera é quase que totalmente refletido na altimetria. Para se quantificar a eficiência do Mod_Ion_FK em termos de porcentagem de correção, a partir deste momento, a análise será realizada em dois experimentos. No primeiro, a eficiência do Mod_Ion_FK será avaliada por época, e no segundo, o Mod_Ion_FK será analisado em termos resultados obtidos da média de um período de 24 horas.

6.5.1. Análise por época

Devido a grande quantidade de dados disponíveis, para esta etapa da análise dos resultados, foram calculados valores de discrepâncias (Δ) máximo, mínimo e médio, para a planimetria e altimetria, utilizando amostras, cada uma com um conjunto de 20 instantes de correção, em períodos distintos no comportamento diário da atividade ionosférica, referente a Julho/2001 e Abril/2002. Os períodos que serão utilizados para análise da performance do Mod_Ion_FK são: 3, 5, 8, 13, 17 e 21 horas TU. Os valores estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Discrepâncias em planimetria e altimetria – UEPP.

	Julho/2001				Abril/2002			
	Δ Planimetria (m)		Δ Altimetria (m)		Δ Planimetria (m)		Δ Altimetria (m)	
	SCI	CCI- $I_{(Four19)GMS}$	SCI	CCI- $I_{(Four19)GMS}$	SCI	CCI- $I_{(Four19)GMS}$	SCI	CCI- $I_{(Four19)GMS}$
3 horas TU – 1º máximo								
Máximo	3,12	1,95	5,23	2,54	7,63	4,80	18,33	6,75
Mínimo	1,82	1,15	3,25	0,38	6,77	4,00	13,55	2,08
Média	2,47	1,53	4,61	1,86	7,17	4,33	15,95	4,34
Melhora (%)		37,77		59,66		39,65		72,82
5 horas TU – declínio								
Máximo	2,75	2,26	3,54	2,37	3,21	2,08	7,53	1,67
Mínimo	1,53	0,88	0,05	0,01	2,57	1,51	5,77	0,03
Média	1,94	1,34	1,55	0,48	2,94	1,84	6,53	0,69
Melhora (%)		31,12		69,13		37,56		89,50
8 horas TU – 1º mínimo								
Máximo	1,23	1,57	2,40	1,35	2,36	1,42	5,46	3,19
Mínimo	0,20	0,15	0,75	0,02	1,49	0,51	4,30	2,13
Média	0,67	0,66	1,56	0,54	1,87	0,92	4,78	2,52
Melhora (%)		0,95		65,29		50,71		47,26
13 horas TU – aumento								
Máximo	2,32	1,82	5,11	2,10	4,03	1,55	24,98	6,75
Mínimo	1,62	1,20	2,49	0,12	3,42	0,78	22,21	4,15
Média	2,04	1,55	3,77	0,93	3,69	1,18	23,98	5,36
Melhora (%)		23,70		75,41		68,00		77,66
17 horas TU – 2º máximo								
Máximo	7,77	4,91	12,34	2,63	8,00	5,25	33,59	1,95
Mínimo	6,60	3,63	10,80	1,04	4,90	1,59	29,27	0,10
Média	7,29	4,35	11,56	1,84	5,95	2,79	30,90	0,72
Melhora (%)		40,25		84,11		53,12		97,65
21 horas TU – 3º máximo								
Máximo	3,68	2,25	8,53	5,96	9,21	5,49	39,06	14,43
Mínimo	3,00	0,79	6,59	2,05	8,25	4,10	29,71	5,04
Média	3,21	1,65	7,39	4,51	8,79	4,74	34,78	10,14
Melhora (%)		48,55		39,00		46,08		70,85

Antes de iniciar a análise deve-se esclarecer que os resultados de discrepâncias apresentados na Tabela 6 representam o erro médio quadrático (EMQ) para a planimetria e altimetria, pois, os valores de discrepâncias foram calculados por época e em relação às coordenadas da estação fixadas como verdadeiras. Logo, o EMQ indica a acurácia da posição estimada para uma época qualquer de observação com relação à posição conhecida da estação UEPP, com uma probabilidade de 68,3%.

Na Tabela 6 podem ser observados os valores das discrepâncias para a planimetria e altimetria, obtidos sem a correção da ionosfera e com a correção utilizando o Mod_Ion_FK. As discrepâncias em planimetria representam a resultante calculada a partir das

discrepâncias em latitude e em longitude. Os valores apresentados na Tabela 6 foram calculados para horários distintos durante o dia, desse modo, pode-se analisar a eficiência do modelo em condições de alta atividade ionosférica (\cong 3 horas TU, 1º máximo, e \cong 17 horas TU, 2º máximo), de declínio da atividade ionosférica (\cong 5 horas TU), de baixa atividade ionosférica (\cong 8 horas TU – 1º mínimo), de aumento da atividade ionosférica (\cong 13 horas TU) e no período onde ocorre o pico pré-inversão (\cong 21 horas TU – 3º máximo). Comparando os valores para Julho/2001 e Abril/2002, a Tabela 6 mostra que a melhora na acurácia do posicionamento por ponto em tempo real é maior para o dia de Abril/2002, o que já era esperado, pois, como no dia de Julho/2001 a atividade ionosférica é menor, a qualidade do posicionamento por ponto também é menos afetada por este erro sistemático.

Na Tabela 6, comparando o valor médio da discrepância planimétrica com o da altimétrica, para o dia de maior atividade da ionosfera (Abril/2002), para a opção SCI, observa-se que o valor em altimetria é bem maior que a planimetria, principalmente, às 17 e 21 horas TU, 2º e 3º máximo, respectivamente, comprovando-se a maior influência da ionosfera na determinação da altitude geométrica. Neste sentido, a opção CCI apresenta valores de melhora na discrepância planimetria bem menores do que na altimetria, exceto às 8 horas TU (1º mínimo). Observa-se ainda que a maior correção em planimetria ocorreu no período em que a atividade ionosférica começa a aumentar (\cong 13 horas TU), onde a discrepância foi reduzida em 68%, e a menor correção em planimetria ocorreu no período de declínio da atividade ionosférica (\cong 5 horas TU), onde a correção melhorou 37,56%. Com a opção SCI a maior discrepância média obtida foi de 8,79 m, às 21 horas TU, e chegou a atingir 9,21 m, também às 21 horas TU, e o menor valor foi de 1,49 m, às 8 horas TU. De um modo geral, após a correção da ionosfera, esses valores atingiram magnitudes bem menores. Com a opção CCI a maior discrepância média e o valor máximo de discrepância obtido foi,

respectivamente, de 4,74 m e 5,49 m, às 21 horas TU, e menor valor foi de 0,51 m, às 8 horas TU.

Nos resultados obtidos para a altimetria (Tabela 6), pode-se verificar que a melhor performance do modelo de correção do atraso ionosférico em tempo real ocorreu no período diário de máxima atividade da ionosfera (\cong 17 horas TU), onde a melhora média foi de 97,65%. Neste período de máxima atividade da ionosfera o valor médio da discrepância sem a correção do atraso ionosférico foi de 30,9 m e após a correção este valor diminuiu para 0,72 m, e chegou a atingir um mínimo de 0,1 m. A menor melhora obtida foi de 47,26% e ocorreu no período diário de mínima atividade da ionosfera (\cong 8 horas TU), o que já era esperado, pois, como a maior influência da ionosfera está na altitude, no período de mínima atividade da ionosfera outros erros sistemáticos e aleatórios passam a ter um nível de significância maior na determinação da altitude. Nos períodos do declínio, do aumento e do pico pré-inversão, o Mod_Ion_FK também melhorou significativamente os resultados em altimetria, chegando a diminuir os valores médios de discrepância em 89,5%, 77,66% e 70%, respectivamente. Com a opção SCI a maior discrepância média obtida foi de 34,78 m, às 21 horas TU, e o máximo 39,06 m, também às 21 horas TU, e o menor valor foi de 4,3 m, às 8 horas TU, e após a correção do atraso ionosférico estes valores passaram a ser de 10,14 m, 14,43m e 2,13 m, respectivamente. Comparando-se ainda os resultados da discrepância em altimetria para Abril/2002 com os resultados para Julho/2001, observa-se que no período do pico pré-inversão há uma diferença significativa na melhora do EMQ, isto ocorre devido ao pico pré-inversão atingir magnitudes menores no período de baixa atividade da ionosfera (Julho/2001) e assim ocorre uma menor influência do erro sistemático da ionosfera sobre o sinal GPS.

De modo geral, para os resultados referentes à Abril/2002 apresentados na Tabela 6, a opção CCI-I_{(Four19)GMS} apresentou uma melhor eficiência para a planimetria no

período das 13 horas TU, onde o valor da discrepância média foi reduzida de 3,69 m para 1,18 m. Para a altimetria a opção CCI-I_{(Four19)GMS} foi mais eficiente no período das 17 horas TU. Para os resultados referentes à Julho/2001, a opção CCI-I_{(Four19)GMS} apresentou uma melhor eficiência para a planimetria no período das 21 horas TU, onde o valor da discrepância média reduziu de 3,21 m para 1,65 m. Para a altitude a opção CCI-I_{(Four19)GMS} também foi mais eficiente no período das 17 horas TU.

Outra forma de se analisar os resultados é com relação ao seu desvio-padrão. O desvio padrão, calculado neste experimento, permite medir o grau de dispersão da posição estimada para uma época qualquer de observação com relação à posição média estimada para, neste caso, a estação UEPP, e representa a precisão da posição estimada para uma época, com 68,3% de probabilidade (1σ). A precisão em planimetria e altimetria é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Desvio-padrão em planimetria e altimetria – UEPP.

	Julho/2001				Abril/2002			
	$\sigma_{\text{Planimetria (m)}}$		$\sigma_{\text{Altimetria (m)}}$		$\sigma_{\text{Planimetria (m)}}$		$\sigma_{\text{Altimetria (m)}}$	
	SCI	CCI- $I_{(\text{Four}19)\text{GMS}}$	SCI	CCI- $I_{(\text{Four}19)\text{GMS}}$	SCI	CCI- $I_{(\text{Four}19)\text{GMS}}$	SCI	CCI- $I_{(\text{Four}19)\text{GMS}}$
3 horas TU – 1^o máximo								
Máximo	0,88	0,76	2,81	1,22	1,79	1,35	2,81	2,12
Mínimo	0,42	0,06	1,20	0,11	0,72	0,31	1,20	0,56
Média	0,73	0,61	1,86	0,93	1,10	0,91	1,86	1,54
Melhora (%)	17,31		50,10		16,97		17,24	
5 horas TU – declínio								
Máximo	0,82	0,65	1,55	1,22	0,39	0,39	0,75	0,73
Mínimo	0,50	0,46	0,94	0,93	0,32	0,34	0,61	0,60
Média	0,59	0,53	1,17	1,05	0,36	0,34	0,68	0,67
Melhora (%)	10,21		10,14		4,45		1,07	
8 horas TU – 1^o mínimo								
Máximo	0,59	0,64	1,18	1,57	1,13	1,07	1,20	1,14
Mínimo	0,23	0,21	0,47	0,46	0,95	0,87	0,95	0,87
Média	0,44	0,41	0,89	0,88	1,03	0,98	1,06	1,01
Melhora (%)	7,75		1,23		5,11		5,11	
13 horas TU – aumento								
Máximo	0,82	0,77	1,47	1,35	1,10	1,02	2,42	2,25
Mínimo	0,57	0,43	1,06	0,80	0,84	0,74	1,88	1,66
Média	0,68	0,58	1,25	1,06	0,91	0,82	2,06	1,85
Melhora (%)	15,70		15,73		10,40		10,42	
17 horas TU – 2^o máximo								
Máximo	1,30	1,12	1,90	1,64	1,88	2,10	3,30	3,70
Mínimo	0,82	0,75	1,20	1,09	0,45	0,32	0,83	0,79
Média	1,13	0,95	1,65	1,40	0,91	0,88	1,64	1,59
Melhora (%)	15,29		15,30		3,11		3,18	
21 horas TU – 3^o máximo								
Máximo	0,65	0,69	1,13	1,19	3,98	1,30	1,77	1,76
Mínimo	0,36	0,40	0,59	0,60	2,71	0,90	1,05	0,99
Média	0,54	0,52	0,92	0,91	3,53	1,14	1,47	1,12
Melhora (%)	3,24		1,36		67,61		23,86	

Na Tabela 7 observa-se que com a correção do atraso ionosférico há uma redução da dispersão das posições estimadas em relação à posição média calculada. Deve-se lembrar que estes valores foram calculados para seis condições diárias de atividade da ionosfera diferentes, a partir de amostras de 20 instantes de observação a cada 15 segundos, em cada período analisado, para Julho/2001 e Abril/2002. Portanto, na Tabela 7, para os períodos que estão sendo analisados, nota-se uma melhora expressiva na precisão planimétrica no período das 21 horas TU, no dia de maior atividade da ionosfera (Abril/2002), e para o dia de menor atividade da ionosfera (Julho/2001) a melhora de maior magnitude ocorreu na precisão altimétrica no período das 3 horas TU. Com relação aos demais resultados

apresentados na Tabela 7 não se observam uma melhora tão significativa na precisão planimétrica e altimétrica do posicionamento por ponto em tempo real, comparando-se a opção CCI com a SCI. Pois, o efeito da ionosfera afeta, principalmente, a acurácia do posicionamento, e não a precisão, pois se trata de um erro sistemático.

Para finalizar esta seção, em suma, pôde-se comprovar, com base nos resultados apresentados, a potencialidade do Mod_Ion_FK, utilizando uma modelagem bidimensional da ionosfera a partir da série do tipo Fourier, a função de mapeamento geométrico padrão e o processo Gauss-Markov, na correção dos dados GPS do erro devido à ionosfera em tempo real, observando-se a melhora na precisão e na acurácia estimada em cada instante de observação, sob diferentes condições diárias da ionosfera e em dias de maior e menor atividade ionosférica.

6.5.2. Análise para o período total de observação

O objetivo desta seção não é avaliar o Mod_Ion_FK em aplicações de posicionamento por ponto no modo pós-processamento, mas ter uma idéia geral dos resultados obtidos durante o período de 24 horas de dados utilizados neste trabalho para a correção do erro da ionosfera, ou seja, pretende-se verificar se os resultados apresentados na seção anterior são refletidos nesta visão geral para o período de 24 horas de estimação.

Inicialmente, a qualidade da planimetria e altimetria no posicionamento por ponto em tempo real, durante o período de 24 horas de observações, será analisada em termos de EMQ e desvio padrão, para os dias de Julho/2001 e Abril/2002. A Tabela 8 mostra os valores máximo, mínimo e médio do EMQ, para a planimetria e altimetria da estação UEPP estimadas durante o período de 24 horas, bem como a melhora obtida após a correção dos dados GPS, utilizando o Mod_Ion_FK.

Tabela 8 - EMQ da planimetria e altimetria estimadas após a correção com o Mod_Ion_FK–UEPP (período de 24 horas).

	Julho/2001				Abril/2002			
	EMQ – Planimetria (m)		EMQ - Altimetria (m)		EMQ – Planimetria (m)		EMQ - Altimetria (m)	
	CCI-SCI	CCI- $I_{(Four19)GMS}$	CCI-SCI	CCI- $I_{(Four19)GMS}$	CCI-SCI	CCI- $I_{(Four19)GMS}$	CCI-SCI	CCI- $I_{(Four19)GMS}$
Máximo	9,32	5,35	21,20	9,74	33,67	35,46	46,53	27,91
Mínimo	0,20	0,15	0,00	0,00	0,01	0,09	0,01	0,01
Média	3,45	2,02	8,30	2,54	5,33	3,83	22,00	4,18
Melhora (%)		41,45		69,40		28,18		81,00

Na Tabela 8 verifica-se que a correção do atraso ionosférico em tempo real proporcionou uma melhora nos resultados do posicionamento por ponto tanto em planimetria, quanto em altimetria, com relação à melhora da acurácia, em comparação com a opção SCI. Comparando-se a melhora obtida para cada uma das opções de processamento, em termos da média do EMQ para o período total de observações, verifica-se que a opção CCI apresentou uma melhora para o período de 24 horas em Julho/2001, de aproximadamente 41,45% na acurácia planimétrica e de 69,40% na acurácia altimétrica, e para Abril/2002 a melhora foi de aproximadamente 28,18% na acurácia da planimetria e de 81,00% na acurácia da altimetria. Pelos resultados apresentados, verifica-se que a maior influência do efeito da ionosfera está sobre a altitude geométrica, onde as correções foram mais expressivas com uma melhora na acurácia de 22,00 m para 4,18 m, para o período de 24 horas. Já para a componente planimétrica verifica-se uma melhora menos expressiva quando comparada com a da altimetria. De modo geral, os resultados apresentados na Tabela 8 mostram que o Mod_Ion_FK proporcionou uma melhora na qualidade do posicionamento por ponto em tempo real, principalmente, na componente altimétrica, durante todo o período de observação. Pode-se afirmar também que o Mod_Ion_FK pode ser utilizado para o posicionamento por ponto no pós-processamento, e que os valores da Tabela 8 estão compatíveis com a acurácia proporcionada pelo Serviço de Posicionamento Preciso (SPS), que é de, aproximadamente, 5-10 m, com 68,3% de probabilidade.

A Tabela 9 mostra os valores máximo, mínimo e médio do EMQ, para a planimetria e altimetria da estação UEPP estimadas a partir de dados de 24 horas de observação, bem como a melhora obtida após a correção dos dados GPS, utilizando o processamento em lote com o Mod_Ion.

Tabela 9 - EMQ da planimetria e altimetria estimadas após a correção com o Mod_Ion – UEPP (período de 24 horas).

	Julho/2001				Abril/2002			
	EMQ – Planimetria (m)		EMQ - Altimetria (m)		EMQ – Planimetria (m)		EMQ - Altimetria (m)	
	SCI	CCI- I _{Mod_Ion}	SCI	CCI- I _{Mod_Ion}	SCI	CCI- I _{Mod_Ion}	SCI	CCI- I _{Mod_Ion}
Máximo	9,32	7,56	21,20	9,79	33,67	32,85	46,53	27,41
Mínimo	0,20	0,11	0,00	0,00	0,01	0,06	0,01	0,01
Média	3,45	2,01	8,30	2,31	5,33	4,24	22,00	3,40
Melhora (%)		41,73		72,16		20,45		84,54

Comparando-se os valores apresentados nas Tabelas 8 e 9, observa-se que a acurácia das posições estimadas utilizando coeficientes de modelo ionosférico estimados num ajustamento em lote (Tabela 9), é ligeiramente melhor do que quando utiliza os coeficientes estimados em tempo real. A comparação dos valores apresentados nas Tabelas 8 e 9 também validam o modelo ionosférico implementado neste trabalho e mostram que os resultados obtidos com o modelo ionosférico em tempo real são coerentes.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados da média da precisão obtida durante todo o período de observação, utilizando o Mod_Ion_FK para realizar a correção do atraso ionosférico.

Tabela 10 - Média do desvio-padrão em planimetria e altimetria estimadas após a correção com o Mod_Ion_FK – UEPP (período de 24 horas).

	Julho/2001				Abril/2002			
	$\sigma_{\text{Planimetria}}$ (m)		$\sigma_{\text{Altimetria}}$ (m)		$\sigma_{\text{Planimetria}}$ (m)		$\sigma_{\text{Altimetria}}$ (m)	
	SCI	CCI- I _{(Four19)GMS}	SCI	CCI- I _{(Four19)GMS}	SCI	CCI- I _{(Four19)GMS}	SCI	CCI- I _{(Four19)GMS}
Média	2,39	1,64	4,18	2,22	5,23	3,60	9,82	3,69
Melhora (%)		31,38		46,89		31,17		62,42

A Tabela 10 apresenta as posições altimétricas e planimétricas da estação UEPP, estimadas com a correção do atraso ionosférico, também apresentam uma melhora na precisão. Comparando-se os valores da Tabela 10 com os da Tabela 7, nota-se que para os períodos analisados na Tabela 7, a melhora na precisão não foi significativa, mas no geral, para o período de 24 horas de observação (Tabela 10), houve uma melhora considerável na precisão das posições estimadas.

Na Tabela 11 são apresentados os resultados da média da precisão obtida durante todo o período de observação, utilizando o Mod_Ion para realizar a correção do atraso ionosférico.

Tabela 11 - Média do desvio-padrão em planimetria e altimetria estimadas após a correção com o Mod_Ion – UEPP (período de 24 horas).

	Julho/2001				Abril/2002			
	$\sigma_{\text{Planimetria}} \text{ (m)}$		$\sigma_{\text{Altimetria}} \text{ (m)}$		$\sigma_{\text{Planimetria}} \text{ (m)}$		$\sigma_{\text{Altimetria}} \text{ (m)}$	
	SCI	CCI- I _{Mod_Ion}	SCI	CCI- I _{Mod_Ion}	SCI	CCI- I _{Mod_Ion}	SCI	CCI- I _{Mod_Ion}
Média	2,39	2,02	4,18	2,43	5,23	4,24	9,82	4,29
Melhora (%)		15,48		41,86		18,93		56,31

Os resultados apresentados nas Tabelas 10 e 11 mostram a melhora obtida na precisão nas componentes planimétrica e altimétrica do posicionamento após a correção do erro devido à ionosfera com o Mod_Ion_FK e o Mod_Ion, respectivamente. Os valores apresentados nas tabelas mostram que tanto para Julho/2001, como para Abril/2002, as coordenadas estimadas após a correção com o Mod_Ion_FK, apresentam-se menos dispersas em torno de um valor médio, ou seja, apresentam uma precisão melhor do que as coordenadas estimadas após a correção com o Mod_Ion.

Com base nos resultados apresentados, pode-se verificar, que com a correção do atraso ionosférico utilizando o Mod_Ion_FK consegue-se melhorar a qualidade do posicionamento por ponto em tempo real, em precisão e, principalmente, em acurácia. E,

verificou-se que houve uma melhora significativa da acurácia em altimetria quando comparada com os resultados obtidos sem a correção do atraso ionosférico, o que mostra que a maior influência da ionosfera esta na componente altimétrica.

6.6. Atraso ionosférico vertical

Com o objetivo de ilustrar o comportamento do erro sistemático, durante o período de 24 horas do dia, foram elaboradas as Figuras 29 e 30 para os dias 08/07/2001 e 01/04/2002 para os pontos ionosféricos utilizados no processamento. As figuras mostram o atraso ionosférico vertical observado em todas as estações utilizadas no processamento.

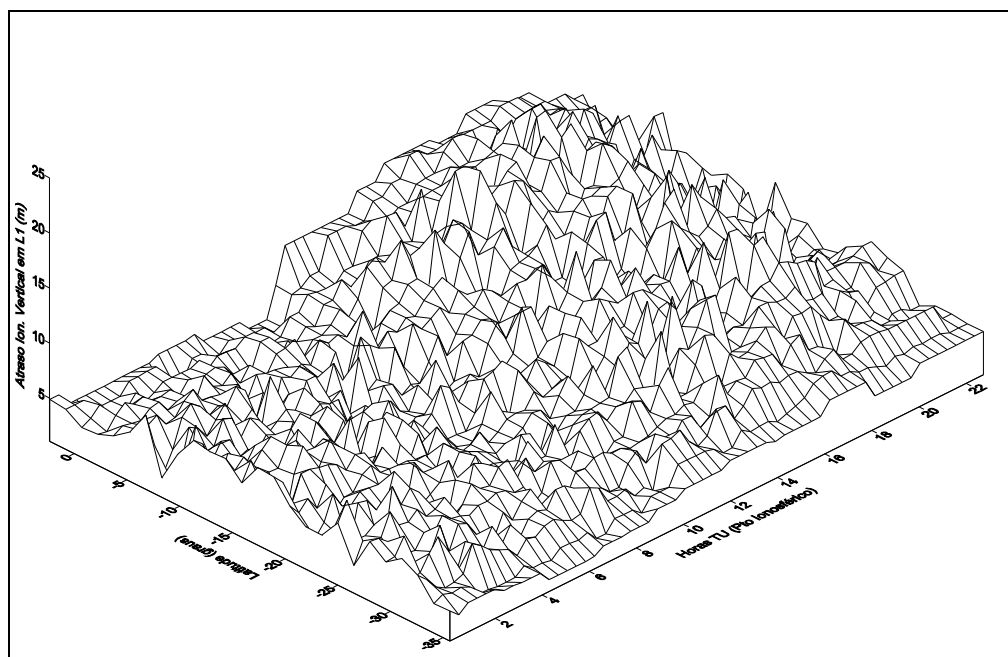


Figura 29 - Atraso ionosférico vertical (Julho/2001).

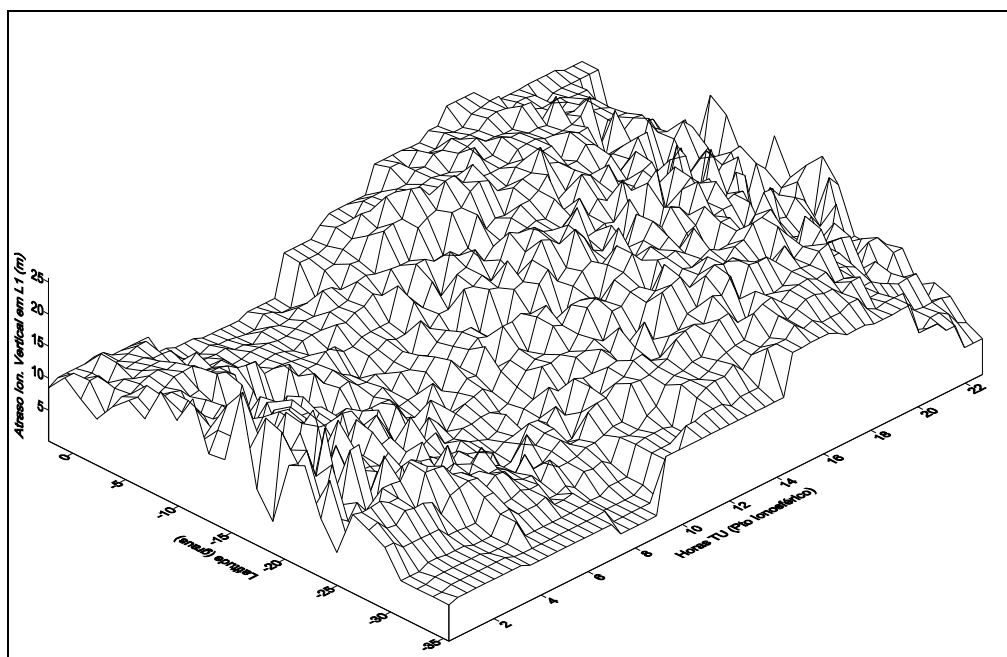


Figura 30 - Atraso ionosférico vertical (Abril/2002).

Deve-se salientar que as Figuras 29 e 30 apresentam valores relativos de atraso ionosférico vertical observado, eivados do erro sistemático devido à tendência interfrequência dos satélites e dos receptores. Logo, o eixo Z das figuras representa o atraso ionosférico acrescido do erro interfrequência em L_1 . A partir das Figuras 29 e 30 pode-se observar o comportamento irregular da ionosfera, bem como que os maiores valores de atraso ionosférico vertical estão presentes na Figura 30, a qual representa um dia de maior atividade ionosférica.

Após a estimação dos coeficientes do modelo ionosférico em tempo real, pode-se calcular as correções do atraso ionosférico em L_1 para uma estação qualquer. As Figuras 31 a 34 mostram o atraso ionosférico vertical, estimado a partir dos coeficientes do Mod_Ion e do Mod_Ion_FK ($CCI-I_{(Four19)GMS}$), para os dias 08/07/2001 e 01/04/2002.

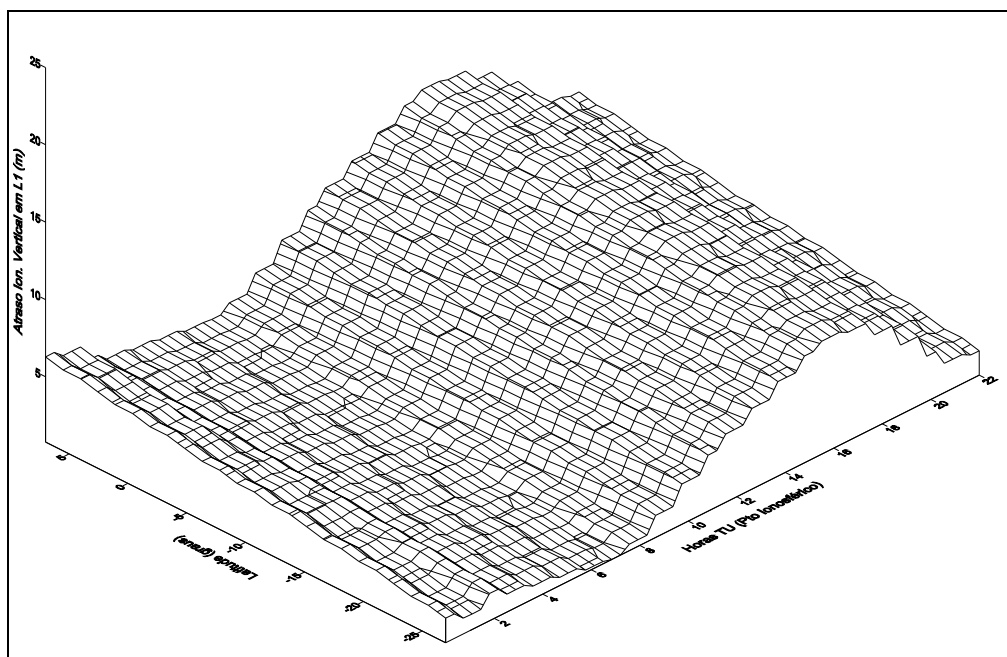


Figura 31 - Atraso ionosférico vertical estimado com o Mod_Ion (Julho/2001).

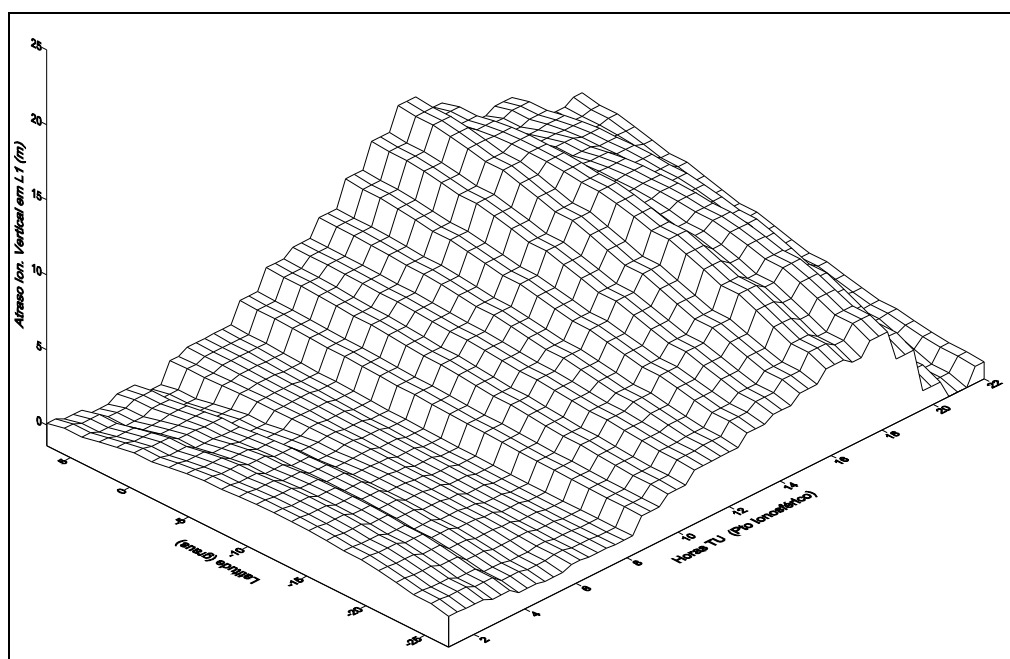


Figura 32 - Atraso ionosférico vertical estimado com o Mod_Ion_FK (Julho/2001).

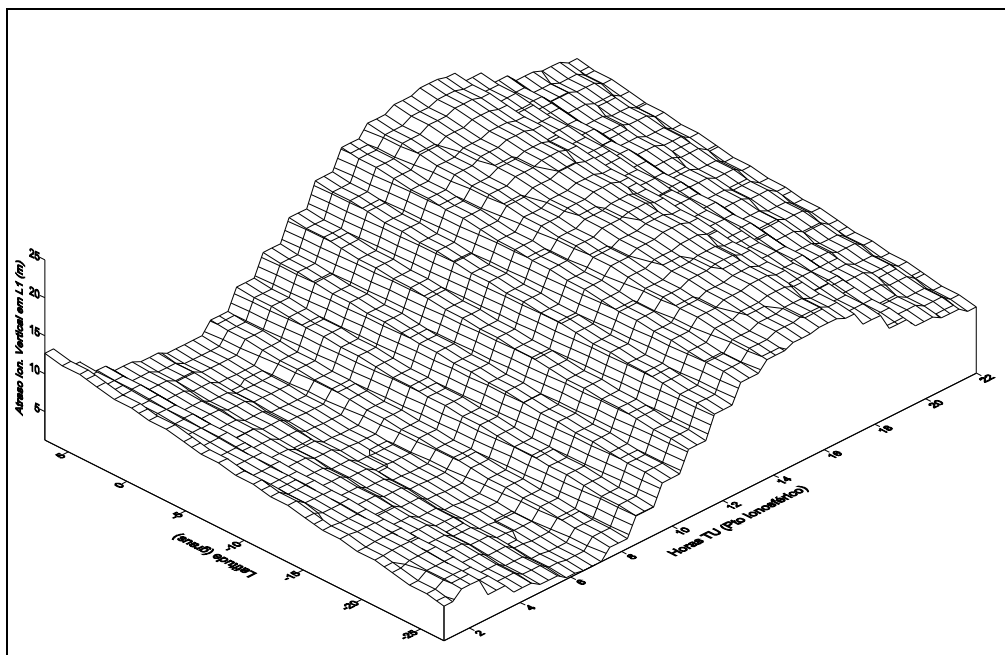


Figura 33 - Atraso ionosférico vertical estimado com o Mod_Ion (Abril/2002).

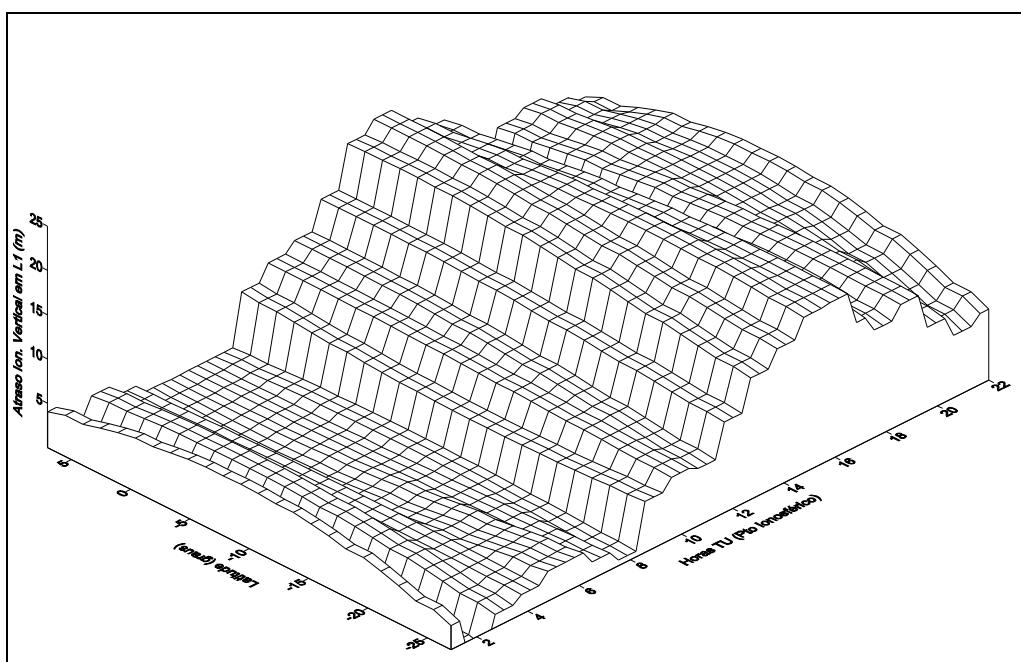


Figura 34 - Atraso ionosférico vertical estimado com o Mod_Ion_FK (Abril/2002).

As Figuras 31 a 34 representam o comportamento modelado da ionosfera e pode-se notar, por meio destas figuras, que a atividade máxima diária da ionosfera se dá próximo às 14:00 horas locais. A eficiência de cada modelo ionosférico (Mod_Ion e Mod_Ion_FK) em representar o comportamento diário da ionosfera pode ser verificada nas

Figuras 35 a 38, as quais foram geradas a partir da diferença entre o atraso ionosférico observado e o atraso estimado com Mod_Ion e o Mod_Ion_FK. Os dados utilizados para gerar as figuras abaixo foram corrigidos das tendências interfrequência dos satélites e dos receptores.

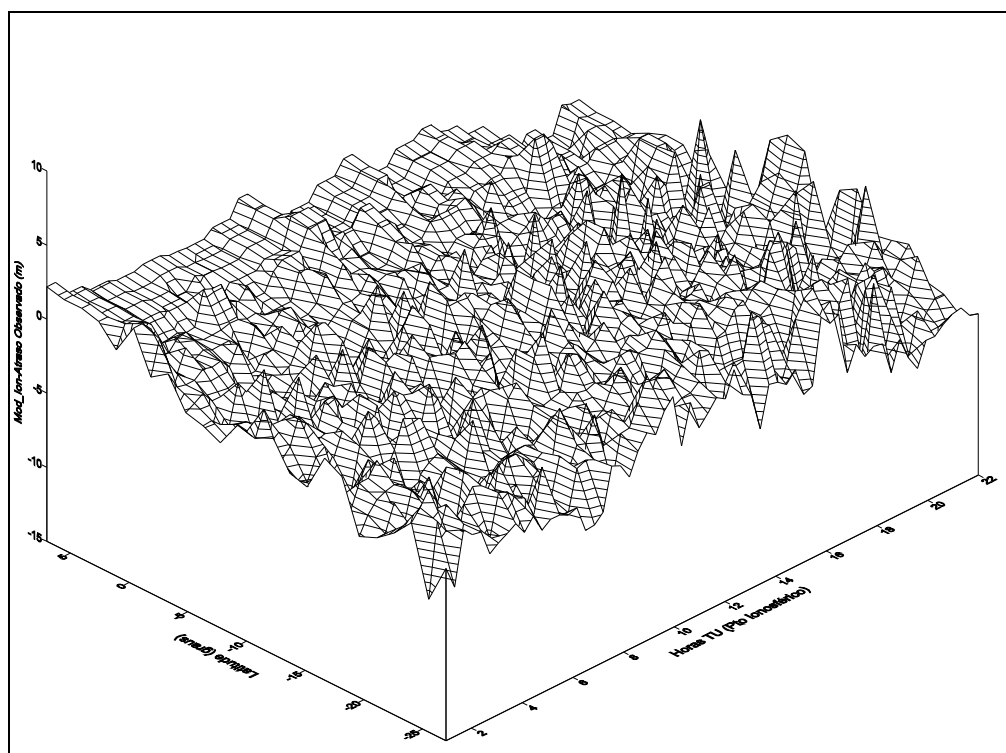


Figura 35 - Diferença entre o atraso ionosférico vertical estimado com o Mod_Ion e o atraso ionosférico observado (Julho/2001).

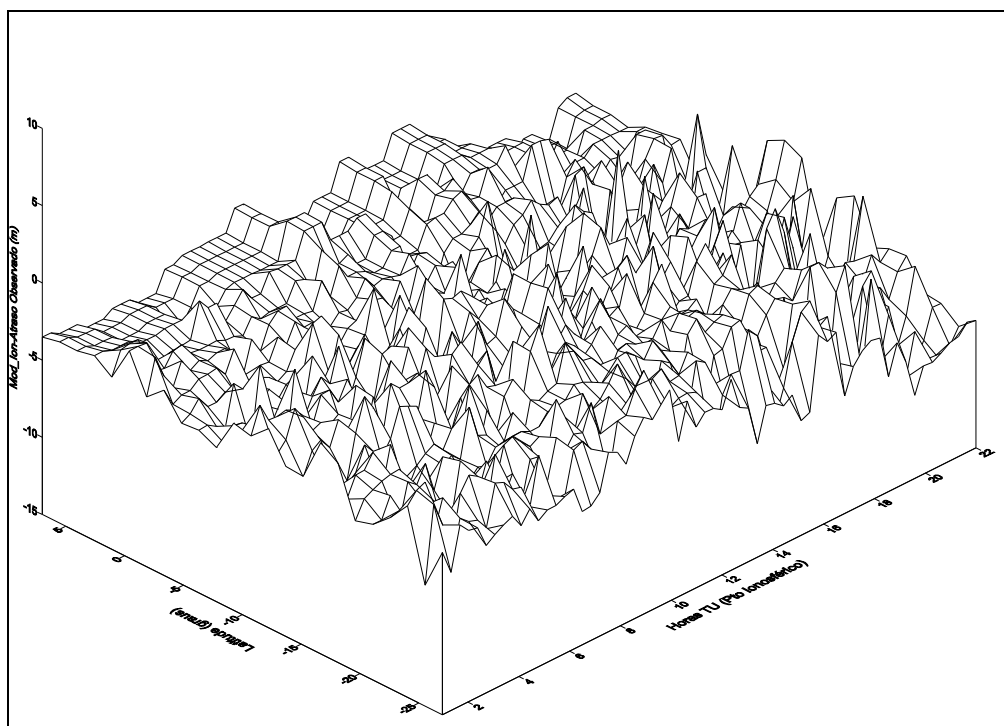


Figura 36 - Diferença entre o atraso ionosférico vertical estimado com o Mod_Ion_FK e o atraso ionosférico observado (Julho/2001).

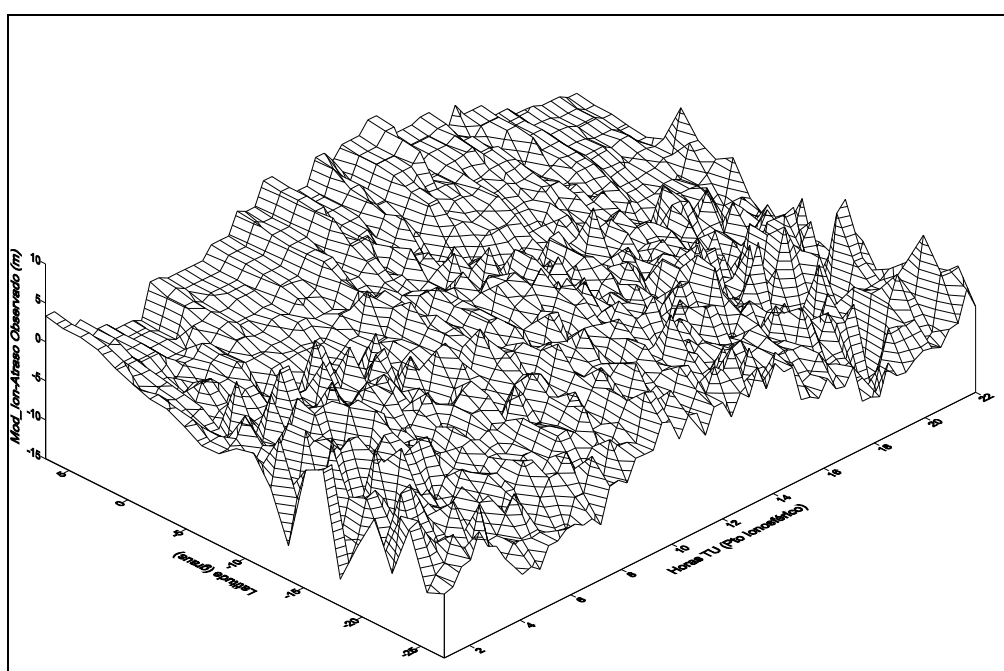


Figura 37 - Diferença entre o atraso ionosférico vertical estimado com o Mod_Ion e o atraso ionosférico observado (Abril/2002).

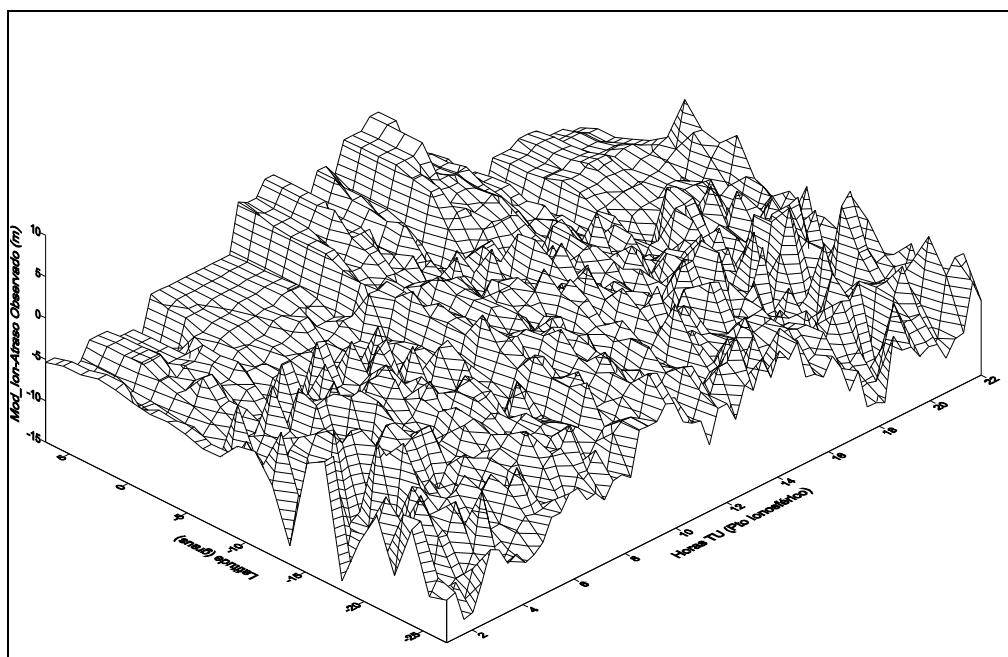


Figura 38 - Diferença entre o atraso ionosférico vertical estimado com o Mod_Ion_FK e o atraso ionosférico observado (Abril/2002).

Os valores (em módulo) máximo, mínimo e médio, das diferenças entre o atraso ionosférico estimado e o observado, para as Figuras 35 a 38, são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Diferença entre o atraso ionosférico vertical estimado e observado.

	Julho/2001 – Diferença (m)		Abril/2002 – Diferença (m)	
	Mod_Ion	Mod_Ion_FK	Mod_Ion	Mod_Ion_FK
Mínimo	0,01	0,00	0,01	0,00
Máximo	8,21	10,25	13,08	17,01
Média	1,99	3,99	2,90	4,22

Observando-se as Figuras 35 a 38 e a Tabela 12, verifica-se que tanto em dias de menor atividade da ionosfera (Julho/2001), quanto em dias de maior atividade ionosférica (Abril/2002), o cálculo do atraso ionosférico a partir de coeficientes estimados em tempo real ($CCI-I_{(Four19)GMS}$) utilizando o Mod_Ion_FK, apresentam valores próximos aos obtidos com os coeficientes estimados em lote no modo pós-processamento (Mod_Ion). Pode-se notar ainda que quando se utilizam coeficientes estimados em lote a ionosfera é

representada de uma forma mais regular, por outro lado, quando se utilizam os coeficientes estimados em tempo real, os resultados são mais sensíveis ao comportamento irregular da ionosfera, ou seja, com os coeficientes estimados em tempo real, o comportamento irregular da ionosfera é mais bem detectado.

7. CONSIDERAÇÕES, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1. Considerações

Nesta pesquisa, foi apresentada uma breve revisão sobre o GPS, contemplando as observáveis envolvidas no posicionamento, bem como a principal fonte de erro que é a ionosfera. Foi apresentada também uma descrição da divisão da atmosfera com relação a propagação de sinais GPS, destacando-se a camada ionosférica e o efeito da refração ionosférica sobre os sinais GPS. Com respeito à modelagem da ionosfera, foram apresentados alguns modelos globais e o modelo regional da ionosfera (Mod_Ion), que foi utilizado como ponto de partida para o desenvolvimento do modelo regional da ionosfera em tempo real (Mod_Ion_FK). Tratou-se também do filtro de Kalman, bem como, foi apresentada uma revisão dos processos aleatórios utilizados no modelo dinâmico para a predição do vetor estado e o procedimento de controle de qualidade aplicado ao filtro. Finalmente, antes dos experimentos, apresentaram-se as modificações realizadas no Mod_Ion.

Antes da execução dessa pesquisa, o Mod_Ion estava implementado para a estimação dos coeficientes da ionosfera, no modo pós-processamento utilizando o ajustamento em lote, para um período de 24 horas. Durante o percurso desta pesquisa, que tem o objetivo de implementar o Mod_Ion em tempo real utilizando o filtro de Kalman, foram surgindo alguns obstáculos, principalmente devido à necessidade de se adicionar um processo aleatório na predição do vetor estado, bem como a falta de referências bibliográficas sobre o tratamento da variabilidade temporal da ionosfera utilizando um processo aleatório. Nas poucas literaturas encontradas observou-se que alguns processos aleatórios são mais utilizados para modelar a variação temporal da ionosfera. Dentre estes se dá destaque ao *Gauss-Markov*. Logo, após uma revisão bibliográfica, foram realizadas modificações que

consistiram na implementação de novas funções de modelagem, baseadas na série do tipo de Fourier, foi adaptado também o algoritmo do filtro de Kalman, os processos aleatórios *Gauss-Markov*, *random-walk* e *random-constant*, e o controle de qualidade em tempo real. No entanto, as modificações são válidas somente se os parâmetros do modelo forem estimados a partir da pseudodistância ou pseudodistância suavizada pela fase. Portanto, neste trabalho, o monitoramento da ionosfera se deu utilizando o Mod_Ion_FK, que foi desenvolvido para o estudo da ionosfera na região brasileira, em tempo real. Este modelo utiliza os dados da RBMC para estimar o erro sistemático em L_1 . Deve-se esclarecer que o Mod_Ion_FK também pode ser utilizado com dados de outras regiões e até mesmo com dados de uma rede GPS global, bastando para isto apenas algumas modificações no aplicativo implementado.

Os dados GPS coletados na estação UEPP, que não participou do processo de modelagem do erro, foram corrigidos (pseudodistância em L_1 – código C/A) do efeito da ionosfera utilizando todas as combinações entre as funções de modelagem e os processos aleatórios, implementados no Mod_Ion_FK. O vetor estado do Mod_Ion_FK foi estimado utilizando os dados GPS das estações BRAZ (Brasília), CUIB (Cuiabá), PARA (Curitiba), IMPZ (Imperatriz), POAL (Porto Alegre), RIOD (Rio de Janeiro), SALV (Salvador) e VICO (Viçosa), da RBMC, cujo período abrange 24 horas do dia oito de julho de 2001, num dia de baixa atividade da ionosfera, e 24 horas do primeiro dia de abril de 2002, de alta atividade da ionosfera, ambos no período de máxima atividade solar. O vetor estado é composto pelos coeficientes da série, que modelam o erro sistemático da ionosfera, e os erros sistemáticos ou tendências dos receptores e dos satélites, todos na portadora L_1 . Como o objetivo deste trabalho é a modelagem da ionosfera, no processamento dos dados foram utilizadas as efemérides precisas, disponibilizadas pelo IGS via FTP, e as estimativas de interfrequência dos satélites fornecidas pelo CODE nos arquivos IONEX e que também podem ser obtidas via

FTP. Desta forma pôde-se minimizar a presença de outros erros sistemáticos na análise da eficiência do modelo ionosférico.

A análise do desempenho do modelo na região equatorial foi realizada, através do posicionamento por ponto, utilizando os dados GPS da estação UEPP, sem e com a correção do erro sistemático devido à ionosfera. É importante salientar que os resultados mostram o desempenho do Mod_Ion_FK em relação ao comportamento diário da ionosfera em dias de baixa e alta atividade, em um período de máxima atividade solar.

7.2. Conclusões

Com as novas implementações no Mod_Ion, foi possível testar a eficiência do modelo da ionosfera em tempo real. Além da implementação do filtro de Kalman, foram introduzidas novas funções de modelagem a partir da série do tipo de Fourier, e que consideram o comportamento bidimensional da ionosfera. As funções de modelagem implementadas foram: série de Fourier de 15, de 19 e de 20 coeficientes. O comportamento temporal da ionosfera também foi introduzido, a partir dos processos *Gauss-Markov*, *random-walk* e *random-constant*.

Numa primeira etapa dos experimentos, foi realizada uma análise sobre a qualidade das observáveis pseudodistância e pseudodistância suavizada pela fase, as quais podem ser utilizadas pelo Mod_Ion_FK para estimar os coeficientes da série em tempo real. Nesta primeira etapa pode-se confirmar a característica menos ruidosa da observável pseudodistância suavizada e concluiu-se que esta é a melhor observável a ser utilizada para a estimação dos coeficientes da série.

A performance do Mod_Ion_FK foi analisada em termos de correção sobre a observável pseudodistância do receptor do usuário, para cada época de observação. Com

base nos experimentos concluiu-se que, dentre as nove opções possíveis, o processamento que utiliza a função de modelagem de 19 coeficientes e o processo *Gauss-Markov* foi a que apresentou melhores resultados. É importante salientar que as conclusões foram baseadas em observações feitas dos satélites PRN 13, 14, 18 e 26, de modo a cobrir um período de 24 horas, e nos períodos de observação em que os satélites apresentam ângulos de elevação maiores que 20° . Quanto às épocas iniciais e finais das observações para cada satélite, verificou-se uma variação das discrepâncias dos atrasos ionosféricos estimados, devido à correlação com o ângulo de elevação dos satélites. Com relação à variação das discrepâncias após o pôr do Sol, concluiu-se que não foi consequência da ocorrência das cintilações ionosféricas, e que provavelmente deve ser devido ao pico pré-inversão.

Após a escolha da função de modelagem de 19 coeficientes e do processo GM, a performance do Mod_Ion_FK foi avaliada na qualidade do posicionamento por ponto em tempo real. Nesta etapa do experimento as conclusões foram baseadas nos resultados obtidos a partir de amostras de 5 minutos de observações em seis períodos diferentes do dia. Os períodos escolhidos foram: 3 e 17 horas TU, quando a atividade diária da ionosfera passa pelo 1° e 2° máximo, respectivamente; 5 horas TU, quando a atividade diária da ionosfera está em declínio; 8 horas TU, quando a atividade diária da ionosfera passa pelo 1° mínimo; 13 horas TU, quando a atividade diária da ionosfera está em fase de ascensão; e 21 horas TU, quando ocorre o pico pré-inversão (3° máximo).

A correção do atraso ionosférico utilizando o Mod_Ion_FK CCI melhorou a qualidade do posicionamento por ponto em tempo real. Especificamente, o Mod_Ion_FK apresentou eficiência na correção do atraso ionosférico, principalmente, no período das 17 horas TU, onde se obteve uma melhora do EMQ em altimetria em torno de 97,65%, o que representam uma melhora na acurácia de 30,9 m para 0,72 m. E com relação a planimetria o melhor resultado foi no período das 13 horas TU, onde a acurácia melhorou de 3,69 m para

1,18 m, o que representa uma redução de 68% no EMQ. Para o período de 24 horas de observação houve uma melhora significativa na acurácia do posicionamento por ponto em tempo real. Em termos de precisão, concluiu-se que todos os resultados obtidos após a correção do atraso ionosférico, tanto nos seis períodos analisados, quanto nas 24 horas de observação, foram mais precisos.

Com base nos resultados obtidos em diferentes condições da atividade diária da ionosfera, onde nos períodos de maior atividade ionosférica as correções feitas a partir do Mod_Ion_FK foram mais expressivas e em períodos de menor atividade ionosférica as correções foram menos expressivas, conclui-se que o modelo ionosférico em tempo real apresentou uma performance eficiente em diferentes condições da atividade ionosférica. Nestes experimentos também se concluiu que a maior influência do erro sistemático devido à ionosfera é na determinação da altitude geométrica. Deve-se esclarecer que os resultados e conclusões são baseados no comportamento diário da ionosfera, para um período de alta atividade solar.

Do que foi exposto, pode-se concluir que os objetivos propostos nesta pesquisa foram alcançados e cumpridos.

7.3. Recomendações

A partir da análise dos resultados e das dificuldades observadas, as seguintes recomendações, para melhorar o desempenho do Mod_Ion_FK, são feitas:

- Realizar novos experimentos, visando comparar o Mod_Ion_FK com outros modelos de estimação do atraso ionosférico em tempo real;

- Estudar uma forma de se calcular os valores de $1/\beta$ e σ^2 do processo GM, para cada coeficiente da série de Fourier, pois neste trabalho foram utilizados os valores obtidos por Fortes (2002). Deve-se estar atento que esta não será solução trivial, tendo em vista que a função de autocorrelação (GELB et al., 1974) utilizada para calcular os valores de $1/\beta$ e σ^2 é em função de parâmetros observados, e neste caso os coeficientes da série não são observados, e sim estimados;
- Adaptar ao Mod_Ion_FK um algoritmo mais eficiente para corrigir a ocorrência das perdas de ciclo, quando se utilizar a pseudodistância suavizada pela fase, proporcionando uma performance melhor do filtro de Kalman na ocorrência de tais problemas;
- Direcionar estudos exclusivamente voltados ao efeito da cintilação ionosférica, da anomalia equatorial e do pico pré-inversão, presentes na região brasileira, já que os resultados para as 21 horas TU mostraram-se promissores para o posicionamento por ponto em tempo real;
- E finalmente, talvez até como um trabalho de doutorado, recomenda-se o estudo e a implementação de um modelo de gride ionosférico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, C.R.; CAMARGO, P.O.; MATSUOKA, M.T.; DAL POZ, W.R.. Determinação do Erro Sistemático na Pseudodistância devida à Ionosfera: avaliação da performance do Mod_Ion e do modelo de Klobuchar. In: *Série em Ciências Geodésicas*. Curitiba: UFPR, 2003. vol.3, p.119-132.

AIUB (Astronomisches Institut Universität Bern). Online, 2005. Disponível em: <www.aiub.unibe.ch/igs.html>. Acesso em: 15 mar. 2005.

BAARDA, W. A testing procedure for use in geodetic networks. *Netherlands Geodetic Commission – Publication on geodesy – News Series*, Delft, v.2, n.5, 1968.

BATISTA, I.S.. Notas de aula do curso “*Introdução à ionosfera e a propagação de ondas*” ministrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, 2003.

BROWN, R.G.; HWANG, P.Y.C. *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*. 2 ed. John Wiley & Sons: USA, 1992. 502p.

CAMARGO, P. O.. *Aplicação do Filtro de Kalman na Estimção dos Parâmetros do Modelo da Ionosfera*. Relatório de pesquisa - RDIDP, Presidente Prudente/SP, FCT/Unesp, 2000, 64p.

_____; MONICO, J.F.G.; FERREIRA, L.D.D.. Application of ionospheric corrections in the equatorial region for L1 GPS users. *Earth, Planets and Space*, Japão, v.52, n.11, p.1083-1089, 2000.

_____. *Controle de Qualidade Aplicada ao Filtro de KALMAN*, Curitiba, 1992. 94 p. Tese (Mestrado) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

_____. *Modelo Regional da Ionosfera para uso em Posicionamento com Receptores de uma Freqüência*. 1999. 191 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

_____; DAL POZ, W.R.. Produção de mapas da ionosfera para o Brasil: primeiras experiências na FCT/Unesp. In: *Anais do Simpósio Brasileiro de Geomática – CD-ROM*, Presidente Prudente/SP, Brasil, 9 a 13 de julho, 2002.

CAMPOS, M.A.; WANNINGER, L.; SEEBER, G. Condições ionosféricas perturbadas e os sinais GPS. In: *3º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica – Resumos Expandidos*, Rio de Janeiro/RJ, p.601-604, 1993

COCO, D.S., COKER, C., DAHLKE,S.R., CLYNCH,J.R.. Variability of GPS satellite differential group delay biases. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v.27, n.6, p.931-938, 1991.

CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales). Online, 2005. Disponível em: <<http://orbits.conae.gov.ar/>>. Acesso em: 15 mar. 2005.

CONKER, R.S.; EL-ARINI, M.B.; HEGARTY, C.J.; HSIAO, T.Y. *Modeling the Effects of Ionospheric Scintillation on GPS/SBAS Availability*. Virginia: The MITRE Corporation, 2000. 63p.

DAL POZ, W.R.. *Análise do modelo regional da ionosfera (Mod_Ion) no período de máxima atividade solar e produção de mapa da ionosfera*. 2002. 86 f. Relatório de Bolsa de Iniciação Científica (FAPESP – IC – Processo nº 01/01260-9) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

DAVIES, K.. *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580p.

DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo). Programa de Transição do SISCEAB para os Sistemas CNS/ATM – Comando do Aeronáutica. 2003. Online. Disponível em: <www.ele.ita.br>. Acesso em: 18 out. 2004.

DE JONG, C.D. *Principles and Applications of Permanent GPS Arrays*. 1997. 104 f. PhD Dissertation – Section Surveying and Spatial Informatics, The University of Budapest, Hungary.

DMI (Danmarks Meteorologiske Institut). Onlie, 2005. Disponível em: <<http://web.dmi.dk/fsweb/projects/oerted/>>. Acesso em: 10 mar. 2005.

DRÉCOURT, J.P.. *Kalman filtering in hydrological modeling: DAIHM Technical Report 2003-1*. Denmark. may 2003. 43p.

EL GIZAWY, M.L..*Development of an Ionosphere Monitoring Technique Using GPS Measurements for High Latitude GPS Users*. 2003. 173 f. M.Sc. dissertation – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report nº 20171, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

ESA (European Space Agency). Online, 2005. Disponível em: <www.esa.int>. Acesso em: 15 mar. 2005.

FEDRIZZI, M.. *Estudo do efeito das tempestades magnéticas sobre a ionosfera utilizando dados do GPS*. 2003. 223 f. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

FORTES, L.P.S. *Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC)*. 1997. Dissertação (Mestrado), IME, Rio de Janeiro.

_____. *Optimizing the Use of GPS Multi-Reference Stations for Kinematic Positioning*. 2002. 354 f. Ph.D. dissertation – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report nº 20158, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

FRAILE, J. M.. Real-Time TEC Determination for Ionospheric Modeling in WADGPS, In: *10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation*, California, sep. 12-15, 1995.

FU, W.X.; HAN, S.; RIZOS, C.; KINGHT, M.; FINN, A.. Some Results on the Nonparametric Statistics of GPS Signal Scintillation. *Int. Symp. on GPS: Application to Earth Sciences & Interaction with Other Space Geodetic Techniques*, Tsukuba, Japan, 18-22 October, 1999.

GAO, Y.; LIU, Z.Z.. Precise Ionosphere Modeling Using Regional GPS Network Data. In: *Journal of Global Positioning Systems*, v.1,n.1, jul. 2002. p.18-24.

GELB, A.; KASPER, J.F.; NASH, R.A.; PRICE, C.F.; SUTHERLAND, A.A. *Applied Optimal Estimation*. Cambridge, Massachusetts: The M.I.T. Press, 1974. 374p.

GEORGIADIOU, Y. Modelling the ionosphere for an active control network of GPS stations. *LGR-Series - Publications of the Delft Geodetic Computing Centre*, Delft University of Technology, n.7, 1994.

GFZ (GeoForschungsZentrum Potsdam). Online, 2005. Disponível em: <http://www.gfz-potsdam.de>. Acesso em: 15 mar. 2005.

GREGORIUS, T. *How it Works... GIPSY OASIS II*, Department of Geomatics University of Newcastle upon Tyne, 1996. 109p.

HEISE, S.; JAKOWSKI, N.; WEHRENFENNIG, A.; REIGBER, C.; LÜHR, H.. Initial Results on Ionosphere/Plasmasphere Sounding based on GPS Data Obtained On Board CHAMP. 2003. Disponível em: <www.cosmic.ucar.edu/related_papers/2003_csm1_heise.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2003.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J.. *GPS Theory and Practice*. 5.ed. New York: Springer-Verlag, 2001. 382p.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Online, 2005. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 10 fev. 2005.

IGEB (Interagency GPS Executive Board). Online, 2005. Disponível em: <www.igeb.gov/>. Acesso em: 15 mar. 2005.

IGS (International GPS Service). Online, 2005. Disponível em: <www.igs.ensg.ign.fr>. Acesso em: 15 mar. 2005.

ISAAKIDIS, S.A.; XENOS, T.D.; KOUKOS, J.A. Ionospheric Radio Wave Propagation Finite Element Method Modeling. In: *Electrical Engineering*, Springer-Verlag, p.235-239, 2003.

JPL (Jet Propulsion Laboratory). Online, 2005. Disponível em: <www.jpl.nasa.gov/>. Acesso em: 15 mar. 2005.

KALMAN, R.E.. A new approach to linear filtering and prediction problems. *ASME Journal of Basic Engineering*, v.82D, Mar. 1960, p.35-45.

KEE, C.; YUN, D. Development of Real-Time SNUDGPS via Ionospheric and Tropospheric Corrections. In: *Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation – ION GPS-98* – CD ROM, Nashville, Tennessee, sept.15-18, 1998.

KLOBUCHAR, J. A.. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v.AES-23, n.3, 1987, p.325-331.

LANYI, G.E.; ROTH, T.. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations. *Radio Science*, v.23, n.4, p.483-492, 1988.

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

LIAO, X. *Carrier phase based ionosphere recovery over a regional area GPS network*. 2000. 120 f. M.Sc. dissertation – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20143, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

LIN, L. S.. A Novel Approach to Improving the Accuracy of Real-Time Ionospheric Delay Estimation Using GPS, In: *Proceedings of The 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation - ION GPS-97*, Kansas City, Sept. 16-19, 1997, p.169-178.

LIN, L.S. Remote sensing of ionosphere using GPS measurements. In: *22nd Asian Conference on Remote Sensing* – CD ROM, Singapore, nov.5-9, 2001.

LIU, G.C.. *Ionosphere Weighted Global Positioning System Carrier Phase Ambiguity Resolution*. 2001. 172 f. M.Sc. dissertation – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20155, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

LIU, Z. *Ionosphere Tomographic Modeling and Applications Using Global Positioning System (GPS) Measurements*. 2004. 342 f. Ph.D. Thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20198, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

LU, G.. Quality control for differential kinematic GPS positioning. 1991. 102 f. Ph.D. Thesis – Department Surveying Engineering, UCGE Report n° 20042, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

LUIZ FELIPE, *Publicação eletrônica* [mensagem pessoal]. Mensagem recebida <aguilar@prudente.unesp.br> em: 22 abr. 2005.

MAREL, H.V.D. Active GPS Control Stations: Theory, Implementation and Applications. In: TEUNISSEN, P.J.G.; KLEUSBERG, A. *GPS for Geodesy*. 2^a Ed. Berlin: Editora Verlag, 1998. cap.9, p.389-435.

MATSUOKA, M. T.; MACHADO, W.C.; CAMARGO, P.O.; MONICO, J.F.G.. Análise do Posicionamento por Ponto após a Desativação da Técnica SA. In: *XX Congresso Brasileiro de Cartografia*, Porto Alegre, RS, Brasil, 7 a 12 de outubro, 2001. (CD-Rom).

MATSUOKA, M.T.. *Avaliação de Funções para Modelagem do Efeito da Refração Ionosférica na Propagação dos Sinais GPS*. 2003. 164 f. Tese (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

_____; CAMARGO, P.O.. Correção ionosférica utilizando o modelo de klobuchar e o modelo regional da ionosfera: avaliação da performance no posicionamento por ponto. In: *Anais do Simpósio Brasileiro de Geomática* – CD-ROM, Presidente Prudente/SP, Brasil, 9 a 13 de julho, p.52-60, 2002.

MONICO, J.F.G.; CAMARGO, P.O. Controle de Qualidade em Levantamentos Geodésicos e Possibilidade de Metodologia para Atender a Lei 10.267. In: *Notas de aulas para o curso "Posicionamento por GNSS"*, ministrado na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, 2003.

_____. *Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS - Fundamentos, Definição e Aplicação*. São Paulo: Editora UNESP, 2000. 287p.

MONTENBRUCK, O.; GILL, E.. Ionospheric Correction for GPS Tracking of LEO Satellites. *The Journal of Navigation, United Kingdom*, v.55, n.2, p.293-304. 2002. Disponível em: <http://www.weblab.dlr.de/rbrt/pdf/JNav_02293.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2003.

_____. Kinematic GPS positioning of LEO satellites using ionosphere-free single frequency measurements. *Aerospace Science and Technology*, n.7, p.396-405. abr. 2003. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 15 nov. 2003.

MOON, Y. *Evaluation of 2-Dimensional Ionosphere Models for National And Regional GPS Networks in Canada*. 2004. 115 f. Ph.D. Thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20198, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

MUELLER, T., DAVIS, P.. Real-Time WADGPS Ionospheric Correction Filter, In: *Proceedings of the National Technical Meeting "Navigation 2000"*, Long Beach, California, January 21-23, 1998, p.753-761.

NEWBY, S.P.; LANGLEY, R.B.; JANES, H.W.. Ionospheric modelling for single frequency users of the Global Positioning System: a status report. In: *Proceedings of the Second International Symposium on Precise Positioning with Global Positioning System GPS-90*, The Institute of Navigation, Ottawa, Ontario, Canada, Sept. 1990, p.429-443.

NRCan (Natural Resources Canada). Online, 2005. Disponível em: <<http://www.nrcan-nrcan.gc.ca/>>. Acesso em: 10 mar. de 2005.

NRCan. *User's Guide – GPSPACE (GPS Positioning from ACS Clocks and Ephemerides)*, Canadian Active Control System Operations, Geodetic Survey Division, Geomatics Canada, Natural Resources Canada, 2000. 58p.

PICOSAT (Polymer Battery Experimente/Ionospheric Occultation Experiment/ Coherent Electro Magnetic Ratio Tomography/Optical Precision Platform Experiment - Satellite). Online, 2005. Disponível em: <<http://space.skyrocket.de/>>. Acesso em: 10 mar. 2005.

RODRIGUES, F.S.R.. *Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS*. 2003. 151 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

SAPUCCI, L.F.. *Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS*. 2001. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

_____, E.; RIUS, A.; ZARRAOA, N. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observation. *Radio Science*, v.29, p.577-586, 1994.

SCHAER, S.. *Mapping and predicting the earth's ionosphere using the Global Positioning System*. 1999. 205p. Ph.D. Dissertation. University of Bern, Bern, Switzerland.

SCHERLISS, L.; SCHUNK, R.W.; SOJKA, J.J.; THOMPSON, D.C.. Development of a Physics-Based Kalman Filter for the Ionosphere in GAIM. In: *Proceedings of the XXVIIth General Assembly of the International Union of Radio Science*, Maastricht, Netherlands. 2002. Disponível em: <<http://hawk.iszf.irk.ru/URSI2002/GAabstracts/papers/p1923.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2003.

SEEBER, G. *Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications*. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 1993. 531p.

_____. *Satellite Geodesy*. 2 ed. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SKONE, S. *Wide area ionosphere grid modelling in the auroral region*. 1998. 198 f. Ph.D Thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20123, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

_____, S. Wide Area Ionosphere Modeling at Low Latitudes – Specifications and Limitations. In: *13TH International Technical Meeting of Satellite Division of the Institute of Navigation – ION GPS-2000* – CD ROM, Salt Lake City, Utha, Sept. 19-22, 2000.

STOLLE, C.; RAABE, A.; JACOBI, C.; SHLÜTER, S.; JAKOWSKI, N.. Ionospheric Tomography using GPS-Data from CHAMP-Occultations. 2003. Disponível em: <www.copernicus.org/EGS/egsga/nice01/programme/abstracts/aai5679.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2003.

STRANG, G.; BORRE, K. *Linear Algebra, Geodesy, And GPS*. USA: Wellesley-Cambridge Press, 1997. 624p.

TEUNISSEN, P.J.G. *Dynamic Data Processing: Recursive Least-Squares*. 1^a Ed. Netherlands: Delft University Press. 2001. 241p.

_____. *Dynamische gegevensverwerking I (GE-44) – Inleiding Filtertheorie*. Faculteit der Geodesie - Delft. 1990.

_____; KLEUSBERG, A. *GPS for Geodesy*. 2^a Ed. Berlin: editora Verlag, 1998. 650p.

_____. Quality Control and GPS. In: TEUNISSEN, P.J.G.; KLEUSBERG, A. *GPS for Geodesy*. 2^a Ed. Berlin: Editora Verlag, 1998. cap.9, p.271-318.

_____. *Testing Theory: an introduction*. 2000. Delft: Delft University Press, Holanda.

UCAR (University Corporation of Atmospheric Research). Online, 2005. Disponível em: <www.ucar.edu/>. Acesso em: 15 mar. 2005.

UPC (Polytechnical University of Catalonia). Online, 2005. Disponível em: <www.upc.es/>. Acesso em: 15 mar. 2005.

WEBSTER, I. *A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System*. 1993. M.Sc. Thesis – Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.

WU, B., NICOLAIDES, P., UPADHYAY, T. N., JENKINS, T. R.. Ionospheric Error Compensation for GPS Receivers using Real-Time Ionospheric Model, In: *Proceedings of The 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation - ION GPS-96*, Kansas City, Missouri, Sept. 17-20, 1996, p.575-583.

BIBLIOGRAFIAS

BATISTA, I.S; ABDU, M. A.; MACDOUGALL, J.; Souza, J. R. Long term trends in the frequency of occurrence of the F-3 layer over Fortaleza, Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 64, n. 12-14, 1409-1412, Aug.-Sep. 2002.

BRUYNINX, C.. The Global Positioning System: Present Status and Modernization Plans. Royal Observatory of Belgium. GNSS Workshop, Brussels, Belgium, oct. 2002. Disponível em: < <http://www.gps.oma.be/common/2002.htm>>. Acesso em: 13 abr. 2004.

CAMARGO, P.O.; MONICO, J.F.G.; Matsuoka M.T.; Analysis of the ionosphere regional model (Mod_Ion) during the period of maximum solar activity: a case study in Brazil. In: *14TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS-2001* – CD-ROM, Salt Lake City, Utha, 2001.

_____; REDIVO, I.A.C.; FLORENTINO, C. Posicionamento com Receptores GPS de Navegação. In: *XXI Congresso Brasileiro de Cartografia* – CD-ROM, Belo Horizonte-MG, Brasil, 2003. 7p.

_____; MONICO, J. F. G.. *The use of ionospheric models for correcting single frequency receivers observations: analysis of the performance*. In: Book of Abstracts IAG 97, Rio de Janeiro/RJ, september 3-9, 1997.

CAISSY, M., HEROUX, P., LAHAYE, F., MACLEOD, K., POPELAR, J., BLORE, J., DECKER, D., FONG, R.. Real-Time GPS Correction Service of the Canadian Active Control System. In: *Proceedings os The 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation - ION GPS-96*, Kansas City, Missouri, Sept. 17-20, 1996, p.1787-1791.

CONKER, R. S., EL-ARINI, M. B., ALBERTSON, T. W., KLOBUCHAR, J. A., DOHERTY, P. H.. Description and Assessment of Real-Time Algorithms to Estimate the Ionospheric Error Bounds for WASS. In: *Journal of The Institute of Navigation*, v.44, n.1, 1997, p.77-87.

DELIKARAOGLOU, D.. On the stochastic modeling of GPS ionospheric delays. In: *Manuscripta Geodetica*, v.14, 1988, p.100-109.

DENNIS, O. *Fast Precise GPS Positioning in the Presence of Ionospheric Delays*. Netherlands: Optima Grafische Communicatie, 2002. 242p.

EL-RABBANY, A.. *Introduction to GPS: The Global Positioning System*. Boston: Artech House Publishers, 2002. 176p.

FEDRIZZI, M. *Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS*. 1999. 142 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

FONSECA JÚNIOR, E.S.. *O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil*. 2002. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

FONTANA, R.D.; CHEUNG, W.; STANSELL, T.. The Modernized L2 Civil Signal: Leaping Forward in the 21st Century. *GPS World*. p.28-34. sep. 2001. Disponível em: <<http://www.gpsworld.com/gpsworld/article>>. Acesso em: 13 abr. 2004.

FÖSTER, A.J.; ERICKSON, P.J.; RICH, F.J.. Regional GPS mapping of storm enhanced density during the 15-16 July 2000 geomagnetic storm. In: *14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation – ION GPS-2001* – CD-ROM, Salt Lake City, Utha, 11-14 September, 2001.

HAJJ, G.A.; WILSON, B.A., WANG, C.; PI, X. Ionospheric Data Assimilation by Use of the Kalman Filter. In: *Proceedings of the XXVIIth General Assembly of the International Union of Radio Science*, Maastricht, Netherlands. 2002. Disponível em: <<http://hawk.iszf.irk.ru/URSI2002/GAabstracts/papers/p1226.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2003.

_____; WILSON, B.A., WANG, C.; PI, X.; ROSEN, I.G.. Ionospheric Data Assimilation of Ground GPS TEC by Use of the Kalman Filter. 2002. Disponível em: <<http://genesis.jpl.nasa.gov/archive/200212031/>>. Acesso em: 20 fev. 2003.

ISGI (International Service of Geomagnetic Indices). Online, 2004. Disponível em: <<http://www.cetp.ipsl.fr/~isgi/indicgeo.htm>>. Acesso em: 08 mar. 2004.

JAKOWSKI, N.; WEHRENPENNIG, A.; HEISE S.; SCHLÜTER, S.; NOACK, T. Space Weather Effects in the Ionosphere and their Impact on Positioning. In: *Proceedings Space Weather Workshop: Looking Towards a European Space Weather Programme*, Noordwijk, Netherlands, dec.17-19, 2001

JOHNSON, F.S.. *Satellite Environment Handbook*. 2. ed. California : Stanford University Press, 1965.

KAPLAN, E.D.. *Understanding GPS Principles and Applications*. Boston: Artech House Publishers, 1996. 554p.

KIM, D.; LANGLEY, R.B.. Kalman-Filter-Based GPS ambiguity resolution for real-time long-baseline kinematic applications. In: *Workshop of the Central European Initiative (CEI): Working Group on "Satellite Navigation Systems"*, Poland, jul. 3-5, 2000.

KIRCHHOFF, V.W.J.H.. *Introdução à geofísica especial*. São Paulo: Nova Stella, Ed. USP/FAPESP, 1991. 149p.

KLOBUCHAR, J. A., DOHERTY, P. H., EL-ARINI, M. B.. Potencial Ionospheric Limitations to GPS Wide-Area Augmentation System (WAAS). In: *Journal of The Institute of Navigation*, v.42, n.2, 1995, p.353-370.

KOMJATHY, A.. *Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System*. 1997. 248 f. Ph.D. dissertation – Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report n° 188, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.

KUNCHES, J.M.. In the teeth of cycle 23. In: *13TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation – ION GPS-2000 – CD ROM*, Salt Lake City, Utha, Sept. 19-22, 2000.

LANGLEY, R.B.. Propagation of the GPS Signals. In: TEUNISSEN, P.J.G.; KLEUSBERG, A. *GPS for Geodesy*. 2ª Ed. Berlin: Editora Verlag, 1998. cap.3, p.111-149.

_____. Satellite Navigation: GPS Modernization and R&D in the Academic Sector. In: National Sector Team for Space Annual Meeting, Canadian Space Agency. Jul. 2001. St-Hubert. Disponível em: < <http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/csa.nsts2001.pdf> >. Acesso em: 13 abr. 2004.

LEVA, J.L.; HAAG, M.U.; DYKE, K.V.. Performance of Standalone GPS. In: KAPLAN, E.D.. *Understanding GPS Principles and Applications*. Boston: Artech House Publishers, 1996. cap.7, p.237-320.

MARSHALL, G.. Space Weather and the Ionosphere. *Dynamic Positioning Conference*, October 17-18, 2000. Disponível em: <http://www.dynamic-positioning.com/dp2000/sensors_marshall_pp.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2004.

MACNARAMA, L.F.. *The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding*. Florida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.

MATSUOKA, M. T.. *Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS*. 2000. Projeto de dissertação de mestrado (FAPESP – MS – Processo nº 01/01078-6), Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

NEWBY, S.P.; LANGLEY, R.B.. Three alternative empirical ionospheric models - are they better than GPS broadcast model?, In: *Proceeding of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning*, Columbus, OH, USA, Mar. 16-20, 1992, v.1, p.240-244.

OSÓRIO, I.M.T.V.P.. *O sistema global de posicionamento na orbitografia de satélites de baixa altitude*. 1992. 198 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Portugal.

OLIVEIRA FILHO, K.S.O; Saraiva, M.F.O.. *Astronomia e Astrofísica*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Astronomia – Instituto de Física. 2000. 708 p. Disponível em: <<http://www.astro.if.ufrgs.br>>. Acesso em: 08 mar. 2004.

PARKINSON, B. W., History and Operation of NAVSTAR, the Global Positioning System, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 30, No. 4, October 1994.

QIU, W.. *An Analysis of Some Critical Error Sources in Static GPS Surveying*. 1993. 112 f. M.Sc. dissertation – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report nº 20054, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

SARDON, E.; ZARRAOA, N. Estimation of total electron content using GPS data: how stable are the differential satellite and receiver instrumental biases. In: *Radio Science*, v.32, p.1899-1910, sept./oct. 1997.

SCHERLISS, L.; SCHUNK, R.W.; SOJKA, J.J.; THOMPSON, D.C.. Development of a Physics-Based Reduced State Kalman Filter for the ionosphere. In: *Radio Science*, v.39, fev. 2004. Disponível em: <www.agu.org/pubs/>. Acesso em: 03 mar. 2004.

SOBRAL, J. H. A.. *Sobre a Importância Estratégica da Ciência Espacial para o Brasil*. 2002. Disponível em: <<http://www.agespacial.gov.br/Artigos/revista8.pdf>>. Acesso em: 03 mar. 2002.

SOLER, T.; HOTHEM, L.D. Coordinate Systems Used in Geodesy: Basic Definitions and Concepts. In: *Journal of Surveying Engineering*, v.114, n.2, 1988, p.84-97.

TEUNISSEN, P.J.G.; SALZMANN, M.A.. A recursive slippage teste for use state-space filtering. *Manuscripta Geodaetica*, Berlin, v.14, n.6, 1989, p.383-390.

_____. Quality control in geodetic networks. In: *Optimization and design of geodetic networks*, Berlin: Springer-Verlag, 1985, p.526-547.

UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Online, 2005. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/~kepler/fis207/esol/esol.htm>>. Acesso em: 03 mar. 2004.

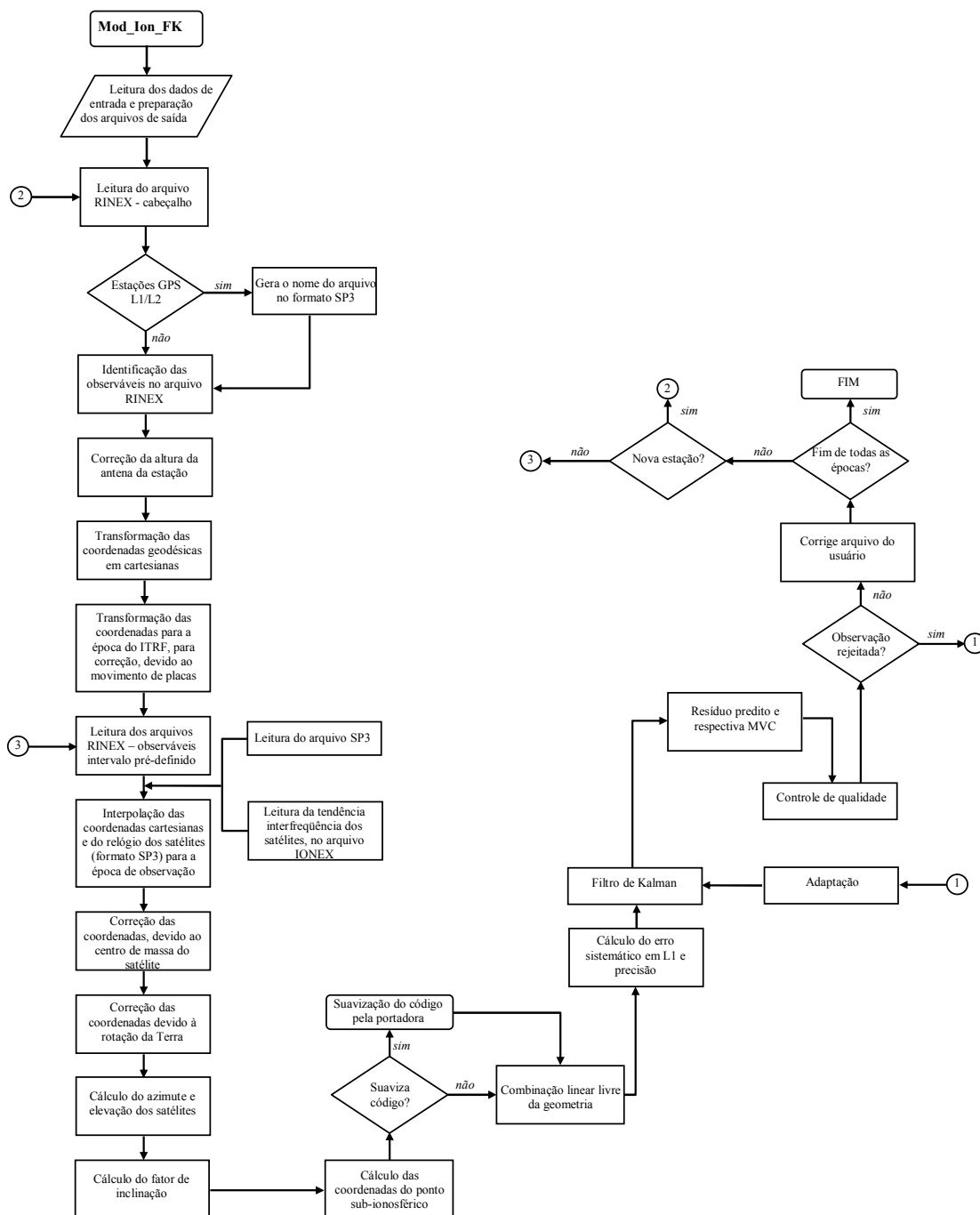
YAMASHITA, C.S.. *Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude*. 1999. 75 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

YANG, M.; LO, C.F. Real-Time Kinematic GPS Positioning for Centimeter Level Ocean Surface Monitoring. In: *Proc. Natl. Sci.* vol.24, n.1, p.79-85, 2000.

WILSON, B. D.; YINGER, C. H.; FEESS, W. A.; SHANK, C.. New and improved the broadcast interfrequency biases. *GPS World*, v.10, n.9, p.56-66, Sept. 1999.

WÜBBENA, G., BAGGE, A., SEEGER, G., BÖDER, V., HANKEMEIER, P.. Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks. In: *Proceedings os The 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation - ION GPS-96*, Kansas City, Missouri, sep. 17-20, 1996, p.1845-1852.

APÊNDICE A – Fluxograma do programa Mod_Ion_FK



ANEXO A – Pseudodistância suavizada pela fase da onda portadora

A pseudodistância filtrada pela fase da onda portadora, comumente denominada de pseudodistância suavizada, é uma combinação de muita utilidade prática (MONICO, 2000), devido à sua característica de ser uma observável com ruído reduzido.

Denotando as diferenças da fase da onda portadora (equação 2) em L_1 e L_2 , entre duas épocas ($t_k - t_{k-1}$), como $D_{k-1,k}^1$ e $D_{k-1,k}^2$, tem-se que (CAMARGO, 1999):

$$D_{k-1,k}^1 = \lambda_1 \phi_{1rk}^s - \lambda_1 \phi_{1rk-1}^s, \quad (A1)$$

e

$$D_{k-1,k}^2 = \lambda_2 \phi_{2rk}^s - \lambda_2 \phi_{2rk-1}^s. \quad (A2)$$

A partir das equações A1 e A2, uma distância relativa livre do efeito da ionosfera pode ser obtida, por meio da equação:

$$D_{k-1,k} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} D_{k-1,k}^1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} D_{k-1,k}^2. \quad (A3)$$

Segundo Camargo (1999), a diferença em distância da fase da portadora pode ser projetada em equivalente diferença em distância da pseudodistância, pela seguinte expressão:

$$M_{k-1,k}^i = 2D_{k-1,k} - D_{k-1,k}^i, \quad (A4)$$

para $i = 1, 2$.

A quantidade $M_{k-1,k}^i$ tem a importante propriedade de conter as mesmas informações que fazem parte da diferença $P_{irk}^s - P_{irk-1}^s$, porém com ruído reduzido (JIN, 1996 apud CAMARGO, 1999).

Para uma época inicial a pseudodistância suavizada pela fase da onda portadora é dada pela própria pseudodistância observada. O valor predito para a pseudodistância, para uma época t_k , pode ser obtido, através da expressão (JIN, 1996 apud CAMARGO, 1999):

$$P_{ik/k-1}^s = P_{ik-1/k-1}^s + M_{k-1,k}^i, \quad (A5)$$

para $i = 1, 2$ e $k = 1, 2, \dots, t_k$. Na equação A5, $P_{ik/k-1}^s$ representa a pseudodistância predita na época t_k .

Segundo Teunissen (1991 apud CAMARGO, 1999), a expressão teórica para a pseudodistância suavizada pela fase da portadora, para a época t_k , é dada por:

$$P_{ik/k}^s = P_{ik/k-1}^s + \frac{\sigma_{P_i}^2 + k\sigma_{\phi_i}^2}{k(\sigma_{P_i}^2 + \sigma_{\phi_i}^2)} (P_{irk}^s - P_{irk/k-1}^s) \quad (A6)$$

para $i=1, 2$. Na equação A6, $\sigma_{P_i}^2$ e $\sigma_{\phi_i}^2$ representam a variância da pseudodistância observada e da fase da onda portadora, respectivamente.

A variância da pseudodistância suavizada é dada por:

$$\sigma_{P_i^{s/k}/k}^2 = \frac{\sigma_{P_i}^2 (\sigma_{P_i}^2 + k\sigma_{\phi_i}^2)}{k(\sigma_{P_i}^2 + \sigma_{\phi_i}^2)} \quad (\text{A7})$$

para $i = 1, 2$.