WAGNER CARRUPT MACHADO

UTILIZAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA PREVISÃO DO VTEC VISANDO A GERAÇÃO DE ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA VIRTUAIS EM TEMPO-REAL

São Paulo
2012

WAGNER CARRUPT MACHADO

UTILIZAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA PREVISÃO DO VTEC VISANDO A GERAÇÃO DE ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA VIRTUAIS EM TEMPO-REAL

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do grau de doutor em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes
Ênfase:
Informações Espaciais

Orientador:
Prof. Dr. Edvaldo Simões da Fonseca Junior

São Paulo
2012

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de agosto de 2012.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Machado, Wagner Carrupt
Utilização de redes neurais artificiais na previsão do VETC visando a geração de estações de referência virtuais em tempo-real / W.C. Machado. -- ed.rev. -- São Paulo, 2012.
184 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1. Sistema de posicionamento global 2. Redes neurais 3. Geodésia espacial 4. Atmosfera I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, esposa e filhos.

EPÍGRAFE

"Não é preciso entrar para a história
para fazer um mundo melhor".
(Gandhi)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de externar os meus mais sinceros agradecimentos à Fundação Instituto Brasileiro de Geográfica e Estatística (IBGE) por me conceder o afastamento em tempo integral para a realização desta pesquisa, em especial aos colegas Marcos Ferreira dos Santos, Mario Alexandre de Abreu, Ulisses Pastore, Paulo Roberto Guimarães Leal, Sonia Maria Alves Costa, Jardel Aparecido Fazan, Luiz Paulo Souto Fortes, Luiz Gustavo Vieira, Donato Paulo da Silveira, Luiz Felipe d'Alberto Louzada, Gláucia da Silva e Ricardo dos Santos Matei.

Aos funcionários da seção de pós-graduação da escola politécnica da USP (EPUSP) e aos professores e funcionários do programa de pós-graduação em engenharia de transportes da EPUSP, em especial ao Edson, à Luciana Cecília Araújo Nascimento, à Simone Rocha Santos, à Patrícia Santana e ao meu orientador, Edvaldo Simões da Fonseca Junior, pela confiança, incentivo e orientação. À assessora de linha inglesa da EPUSP, Maria Cristina Vidal Borba, pelos ensinamentos e revisões.

Aos amigos do Laboratório de Topografia e Geodésia (LTG), Ana Cristina de Oliveira Cancoro Matos, Gabriel Guimarães do Nacimento, Adalberto Moreira Mariano, Augusto César Barros Barbosa, Flávio Vaz de Almeida Filho, Arildo Fernades de Moraes, Fernando César Ribeiro, Daniel Silva Costa e Jhonnes Vaz, pela troca de informação, apoio e coleguismo.

Aos amigos do Grupo de Investigação em Geomática Aplicada à engenharia (GIGA), Julio Yoshinobu Missao e Luiz Felipe Sartori Gonçalves pelas contribuições no desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos do Grupo de Estudo em Geodésia Espacial (GEGE) João Francisco Galera Mônico, Paulo de Oliveira Camargo, Haroldo Antonio Marques, Daniele Barroca Marra Alves, William dal Poz e Claudinei Rodrigues Aguiar, pelas proveitosas discussões e pelo compartilhamento do conhecimento científico.

Ao Luiz Fernando Sapucci, do CPTEC/INPE, pela ajuda na utilização do serviço de previsão do atraso troposférico zenital oferecido por esta instituição e pelas valiosas conversas.

Ao Mark Schenewerk, da agência de levantamentos geodésicos dos Estados Unidos da América (NGS - *National Geodetic Survey*), pelos esclarecimentos acerca do algoritmo de interpolação de órbita dos satélites a partir das efemérides precisas.

Ao Hao Yu, da Universidade de Auburn, pela ajuda na utilização e implementação da versão do método Levenberg-Marquardt sem retropropagação, utilizado para treinar as redes neurais artificiais.

Ao Constantino de Mello Motta, da coordenação de geofísica do Observatório Nacional, pelas coordenadas geográficas do equador geomagnético.

À empresa Alezi Teodoline, pelo empréstimo dos equipamentos utilizados no levantamento de campo.

À minha família, pelo esforço destinado à minha formação e por toda a ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Alex Sander Dias Machado, Rosemberg Ferracini e Thais Gaiad Machado, pela troca de experiência e pelo companheirismo.

RESUMO

Dentre as técnicas de posicionamento utilizando os sistemas de navegação por satélite globais (GNSS - *Global Navigation Satellite Systems*), merece destaque a que utiliza dados de uma rede de estações GNSS para gerar estações de referência virtuais. Desde que as estações da rede não estejam separadas por mais de 100 km e o receptor do usuário esteja dentro da região interna à rede de referência, esta técnica de posicionamento pode proporcionar posicionamento com precisão melhor que 10 cm a usuários de receptores de uma frequência. No entanto, o posicionamento em tempo-real pode ser inviabilizado caso ocorra problema de comunicação com as estações da rede de referência. Tendo em vista a relação do conteúdo total de elétrons (TEC - *Total Electron Content*) com o atraso ionosférico de primeira ordem, esta pesquisa apresenta uma forma de se prever 72 horas do TEC na direção vertical (VTEC - *Vertical Total Electron Content*) regionalmente com a arquitetura de redes neurais artificiais (RNA) denominada perceptrons de múltiplas camadas (MLP – *MultiLayer Perceptrons*). A metodologia de previsão do VTEC proposta foi empregada na geração de estações de referência virtuais, onde arquivos de previsão do atraso troposférico zenital, produzidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), foram utilizados para considerar o atraso provocado pela atmosfera neutra e as efemérides preditas pelo serviço internacional do GNSS (IGS - *International GNSS Service*) foram empregadas para calcular a posição dos satélites. As RNA foram treinadas e avaliadas com dados de VTEC extraídos dos mapas da ionosfera globais (GIM - *Global Ionospheric Map*) produzidos pelo IGS e dos arquivos produzidos com o software Mod_Ion, ambos no formato IONEX (*IONosphere Map EXchange*), mostrando que o VTEC pode ser previsto por 72 horas com diferença média quadrática (RMS – *Root Mean Square*) que varia de 1,2 unidades de TEC (TECU - TEC *Units*) a 12,5 TECU, em baixa e alta atividade solar, respectivamente. Dezoito linhas de base, localizadas no oeste do Estado de São Paulo, foram calculadas utilizando estações de referência virtuais e estações de referência reais, verificando-se que o posicionamento relativo tridimensional empregando a metodologia proposta apresentou RMS de aproximadamente 46 cm. Quando avaliada no posicionamento absoluto preciso

(PPP – *Precise Point Positioning*), o RMS relacionado com o posicionamento tridimensional foi de 26 cm.

Palavras-chave : GNSS, redes neurais artificiais, estação de referência virtual, ionosfera, atmosfera neutra

ABSTRACT

The positioning technique that uses data from a network of GNSS reference stations to generate virtual reference stations should be detached among the Global Navigation Satellite Systems (GNSS) positioning techniques. Since the inter reference station distances are up to 100 km and the user receiver is within the internal region of the network, this technique can provide single frequency receiver users positioning with better accuracy than 10 cm. However, real-time positioning can be impracticable if communication breakdown involving such reference stations occurs. Given the relation between the Total Electron Content (TEC) and the first-order ionospheric delay, this research presents a way to predict 72 hours of vertical TEC (VTEC) regionally using the Artificial Neural Networks (ANN) architecture called MultiLayer Perceptorns (MLP). The proposed VTEC prediction methodology was employed in the generation of virtual reference stations, where files of prediction of zenithal tropospheric delay, produced by the National Institute For Space Research (INPE – *Instituto de Pesquisas Espaciais*), were used to take the neutral atmospheric delay into account and the precise ephemeris predicted by the GNSS International Service (GNSS) were employed to compute satellites positioning. ANN were trained and assessed using VTEC data from the Global Ionospheric Maps (GIM) produced by IGS and the files produced by Mod_Ion software, both in IONEX (*IONosphere Map EXchange*) format, showed VTEC can be predicted for 72 hours with Root Mean Square difference (RMS) of about 1.2 TEC units (TECU) and 12.5 TECU, respectively, in low solar activity and high solar activity. Eighteen baselines, in the west region of Sao Paulo State, were computed using virtual reference stations and real reference stations, verifying that the three-dimensional relative positioning using the proposed methodology showed RMS of 46 cm. When assessed by precise point positioning (PPP), the three-dimensional RMS positioning was of 26 cm.

Keywords : GNSS, artificial neural networks, virtual reference station, ionosphere, neutral atmosphere

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Modelo de um neurônio artificial	8
Figura 2.2	Funções de ativação tangente hiperbólica e logística	10
Figura 2.3	Comportamento da função bipolar	11
Figura 2.4	Fluxo de processamento da MLP	12
Figura 2.5	Comportamento da derivada das funções de ativação bipolar e logística	17
Figura 2.6	Padrão da matriz jacobiana	17
Figura 2.7	Fluxograma do método Levenberg-Marquardt	20
Figura 2.8	Efeito da quantidade de neurônios na camada oculta sobre o treinamento	23
Figura 2.9	Comportamento da diferença média quadrática dos conjuntos de estimação e validação	24
Figura 3.1	Efeito da refração atmosférica na trajetória dos sinais GNSS	28
Figura 3.2	Densidade de elétrons livres x altitude	39
Figura 3.3	Série histórica das médias mensais do número de manchas solares	40
Figura 3.4	Influência da atividade solar e do movimento aparente do Sol sobre o VTEC da estação BRAZ	41
Figura 3.5	Regiões da ionosfera	42
Figura 3.6	Variação global do VTEC	43
Figura 3.7	Distribuição dos observatórios utilizados na derivação do índice Dst	44
Figura 3.8	Comportamento do índice Dst na ocorrência de tempestade geomagnética	45
Figura 3.9	TEC calculado pela pseudodistância original e pela pseudodistância filtrada pela fase da portadora	52
Figura 3.10	Elementos envolvidos no modelo do ponto ionosférico	53
Figura 4.1	Princípio da VRC e da VRS semi-cinemática	70
Figura 5.1	Fluxograma do programa VRSgen	73
Figura 5.2	Atraso da componente hidrostática das estações NAUS, POLI e RIOD nas quatro estações do ano	77
Figura 5.3	Atraso da componente úmida das estações NAUS, POLI e	78

RIOD nas quatro estações do ano
Figura 5.4 Comparação entre os atrasos calculados pelo modelo de PNT e o modelo de Hopfield 79
Figura 5.5 Efeito da elevação dos satélites sobre o atraso troposférico 80
Figura 5.6 Diferença de atraso troposférico em função do ângulo de elevação dos satélites 81
Figura 5.7 Rede neural artificial desenvolvida 82
Figura 5.8 Área de abrangência dos modelos 83
Figura 5.9 Fluxograma do treinamento da RNA 84
Figura 5.10 Histórico do fluxo solar 10,7 cm 85
Figura 5.11 Índice Dst nos dois períodos 86
Figura 5.12 RMS do conjunto de validação para diferentes quantidades de neurônios ocultos utilizando GIM do IGS 87
Figura 5.13 Duração do processamento do treinamento em função da quantidade de neurônios ocultos (IGS) 88
Figura 5.14 Comportamento da RMS do conjunto de estimação (IGS) 89
Figura 5.15 $VTEC_{GIM}$ x $VTEC_{RNA}$ 90
Figura 5.16 Dispersão entre o $VTEC_{GIM}$ e o $VTEC_{RNA}$ 91
Figura 5.17 Comportamento da diferença entre $VTEC_{GIM}$ e $VTEC_{RNA}$ 92
Figura 5.18 Distribuição da dVTEC 93
Figura 5.19 Variação da RMS da dVTEC 94
Figura 5.20 Série temporal do erro relativo (GIM) 95
Figura 5.21 Distribuição espacial do erro relativo durante o dia 90 do ano de 2001 97
Figura 5.22 RMS do conjunto de validação para diferentes quantidades de neurônios ocultos utilizando o Mod_Ion 98
Figura 5.23 Duração do processamento do treinamento em função da quantidade de neurônios ocultos (Mod_Ion) 99
Figura 5.24 Comportamento da RMS do conjunto de estimação (Mod_Ion) 100
Figura 5.25 $VTEC_{Mod}$ x $VTEC_{RNA}$ 101
Figura 5.26 Dispersão entre o $VTEC_{Mod}$ e o $VTEC_{RNA}$ 102
Figura 5.27 Comportamento da diferença entre $VTEC_{Mod}$ e $VTEC_{RNA}$ 103

Figura 5.28 Distribuição da $dVTEC_{Mod}$ 104
Figura 5.29 Variação da RMS da $dVTEC_{Mod}$ 105
Figura 5.30 Série temporal do erro relativo (ε_{Mod}) 106
Figura 6.1 Distribuição das estações de referência 109
Figura 6.2 Comprimento das linhas de base dos pontos de controle 111
Figura 6.3 Deslocamento entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões dos pontos de controle determinados a partir de estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (DG) 113
Figura 6.4 Deslocamento entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões dos pontos de controle determinados a partir de estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop) 115
Figura 6.5 Deslocamento entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões dos pontos de controle determinados a partir de estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (RNA_{Mod}) 117
Figura 6.6 Deslocamento entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões dos pontos de controle determinados a partir de estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop+ RNA_{Mod}) 119
Figura 6.7 Deslocamento entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões dos pontos de controle determinados a partir de estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (RNA_{GIM}) 121
Figura 6.8 Deslocamento entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões dos pontos de controle determinados a partir de estações de referência virtuais 123

geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop+RNA_{GIM})

Figura 6.9 Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões das estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (DG) 126

Figura 6.10 Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões das estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop) 128

Figura 6.11 Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões das estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (RNA_{Mod}) 130

Figura 6.12 Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões das estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop+ RNA_{Mod}) 132

Figura 6.13 Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões das estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (RNA_{GIM}) 134

Figura 6.13 Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões das estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop+RNA_{GIM}) 136

Figura A.1 Diferença de deslocamento das estações de controle calculadas utilizando-se máscara de elevação de 5° com os deslocamentos obtidas empregando máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (DG) 168

Figura A.2 Diferença de deslocamento das estações de controle calculadas utilizando-se máscara de elevação de 5° com os deslocamentos obtidas empregando máscara de elevação 169

de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop)

Figura A.3 Diferença de deslocamento das estações de controle calculadas utilizando-se máscara de elevação de 5° com os deslocamentos obtidas empregando máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (RNA_{Mod}) 170

Figura A.4 Diferença de deslocamento das estações de controle calculadas utilizando-se máscara de elevação de 5° com os deslocamentos obtidas empregando máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop+ RNA_{Mod}) 172

Figura A.5 Diferença de deslocamento das estações de controle calculadas utilizando-se máscara de elevação de 5° com os deslocamentos obtidas empregando máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (RNA_{GIM}) 173

Figura A.6 Diferença de deslocamento das estações de controle calculadas utilizando-se máscara de elevação de 5° com os deslocamentos obtidas empregando máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop+RNA_{GIM}) 174

Figura B.1 Diferença de deslocamento das estações de referência virtuais calculadas utilizando-se máscara de elevação de 15° com os deslocamentos obtidos empregando máscara de elevação de 5°, 10° e 20° (DG) 177

Figura B.2 Diferença de deslocamento das estações de referência virtuais calculadas utilizando-se máscara de elevação de 15° com os deslocamentos obtidos empregando máscara de elevação de 5°, 10° e 20° (Trop) 178

Figura B.3 Diferença de deslocamento das estações de referência virtuais calculadas utilizando-se máscara de elevação de 15° com os deslocamentos obtidos empregando máscara de elevação de 5°, 10° e 20° (RNA_{Mod}) 179

Figura B.4 Diferença de deslocamento das estações de referência virtuais calculadas utilizando-se máscara de elevação de 15° com os deslocamentos obtidos empregando máscara de elevação de 5°, 10° e 20° (Trop+ RNA_{Mod}) 181

Figura B.5 Diferença de deslocamento das estações de referência virtuais calculadas utilizando-se máscara de elevação de 15° com os deslocamentos obtidos empregando máscara de elevação de 5°, 10° e 20° (RNA_{GIM}) 182

Figura B.6 Diferença de deslocamento das estações de referência virtuais calculadas utilizando-se máscara de elevação de 15° com os deslocamentos obtidos empregando máscara de elevação de 5°, 10° e 20° ($Trop+RNA_{GIM}$) 183

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Classificação da intensidade das tempestades geomagnéticas a partir do índice Dst	45
Tabela 3.2	Coordenadas geodésicas das estações rastreadas	47
Tabela 3.3	Atraso ionosférico de primeira, segunda e terceira ordens na fase da portadora	48
Tabela 3.4	Atraso provocado por 1 TECU nas três frequências civis do GPS	49
Tabela 3.5	GIM produzidos pelo IGS	56
Tabela 4.1	Disponibilidade e acurácia das efemérides e erro do relógio dos satélites produzidos pelo IGS	62
Tabela 5.1	Estatísticas da dVTEC	93
Tabela 5.2	Estatísticas do ε	96
Tabela 5.3	Estatísticas da $dVTEC_{Mod}$	104
Tabela 5.4	Estatísticas do ε_{Mod}	107
Tabela 5.5	Resumo da avaliação do treinamento das RNA	108
Tabela 6.1	Data, horário e duração dos rastreios	110
Tabela 6.2	Comprimento das linhas de base formadas entre as estações adotas como mestras e as estações de referência virtuais	112
Tabela 6.3	Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes planimétrica, altimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10°, 15° e 20°(DG)	114
Tabela 6.4	Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes planimétrica, altimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10°, 15° e 20°(Trop)	116
Tabela 6.5	Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes planimétrica, altimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10°, 15° e 20°(RNA_{Mod})	118
Tabela 6.6	Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes planimétrica, altimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10°, 15° e 20°(Trop+ RNA_{Mod})	120
Tabela 6.7	Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes planimétrica, altimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10°, 15° e 20°(RNA_{GIM})	122
Tabela 6.8	Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes planimétrica, altimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10°, 15° e 20°(Trop+ RNA_{GIM})	124
Tabela 6.9	Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° (DG)	127
Tabela 6.10	Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° (Trop)	129
Tabela 6.11	Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° (RNA_{Mod})	131

Tabela 6.12 Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° (Trop+ RNA_{Mod}) 133
Tabela 6.13 Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° (RNA_{GIM}) 135
Tabela 6.14 Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° (Trop+ RNA_{GIM}) 137
Tabela 6.15 Resumo dos resultados obtidos com as estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5° no posicionamento relativo 138
Tabela 6.16 Resumo dos resultados obtidos com as estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 15° no PPP 139

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANTEX	ANTenna Exchange
AGW	Atmospheric Gravity Wave
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
CDMA	Code Division Multiple Access
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
CME	Coronal Mass Ejection
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estados Climáticos
CPU	Central Processing Unit
CUDA	Compute Unified Device Architecture
DD	Dupla Diferença
DCB	Differential Code Biases
DG	estação de referência virtual gerada sem modelagem dos efeitos da deslocamento geométrico
DGNSS	Differential GNSS
dVTEC	diferença entre o VTEC contido no GIM e o VTEC calculado pela RNA
$dVTEC_{Mod}$	diferença entre o VTEC contido no mapa produzido pelo ModIon e o VTEC calculado pela RNA
ESOC	European Space Operations of Center ESA
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FOE	Funções Ortogonais Empíricas
GIM	Global Ionospheric Map
GDC	GNSS Data Center
GMF	Global Mapping Functions
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
GPL	General Public License
GPU	Graphics Processing Unit
GRAPHIC	GRoup And PHase Ionospheric Combination
IAAC	IGS Ionosphere Associate Analysis Center

IBGE	Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGS	International GNSS Service
IMF	Isobaric Mapping Functions
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IONEX	IONosphere Map EXchange format
IPP	Ionospheric Piercing Point
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LM	método de Levenberg-Marquardt
MDE	Modelo Digital de Elevação
MLP	MultiLayer Perceptrons
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
Mod_Ion	programa computacional utilizado para gerar mapas do VTEC
NMF	Niell Mapping Functions
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
OTF	On-The-Fly
PNT	Previsão Numérica do Tempo
PPP	Precise Point Positioning
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
RINEX	Receiver Independent EXchange format
RMS	Root Mean Square
RNA	Rede Neural Artificial
RNA_{Mod}	Estação de referência virtual gerada com previsão do $VTEC_{Mod}$
RNA_{GIM}	Estação de referência virtual gerada com previsão do $VTEC_{GIM}$
RTCM	The Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematic
sfu	Solar Flux Units ($10^{-22}Wm^{-2}Hz^{-1}$)
SVD	Single Value Decomposition
TEC	Total Electron Content
TECU	Total Electron Content Unit
TID	Travelling Ionospheric Disturbance
Trop	Estação de referência virtual gerada com modelagem dos efeitos da atmosfera neutra (PNT)
Trop+*GIM*	estação de referência virtual gerada com modelagem dos efeitos

	da atmosfera neutra e da ionosfera aplicando RNA treinadas com GIM do IGS
Trop+Mod	estação de referência virtual gerada com modelagem dos efeitos da atmosfera neutra e da ionosfera aplicando RNA treinadas com mapas do VTEC produzidos com o Mod_Ion
TU	Tempo Universal
TUC	Tempo Universal Coordenado
Unesp	Universidade Estadual Paulista
UPC	Polytechnical University of Catalonia
VMF1	Vienna Mapping Functions
VRC	Virtual Reference Cell|
VTEC	Vertical Total Electron Content
$VTEC_{GNSS}$	VTEC calculado com dados GNSS
$VTEC_{GIM}$	VTEC contido nos arquivos dos GIM
$VTEC_{Mod}$	VTEC contido nos arquivos dos mapas do VTEC do Mod_Ion
$VTEC_{RNA}$	VTEC calculado pela RNA

LISTA DE SÍMBOLOS

y_k	saída produzida por um neurônio artificial *k*
Γ	Função de ativação ou de transferência do neurônio artificial
v_k	soma das entradas do neurônio artificial *k* multiplicadas pelos pesos sinápticos, incluindo o *bias*, denominado de campo local induzido ou potencial de ativação do referido neurônio
w_{kj}	peso sináptico entre o neurônio, ou entrada, *j* e o neurônio *k*. Quando *j* é igual a zero, este parâmetro se refere ao *bias*
x_i	i-ésima entrada
Δw	vetor de correção aos graus de liberdade da MLP
C	quantidade de neurônios na camada de saída
se	sinal de erro da RNA
D	saída contida no conjunto de treinamento
A	matriz jacobiana
η	parâmetro da taxa de aprendizagem
I	matriz identidade
$\delta_{m,j}$	ganho do sinal entre a entrada do neurônio *j* e a saída da rede *m*
$F'_{m,j}$	derivada parcial da função não linear que liga o neurônio *j* à saída *m* com relação ao potencial de ativação
W	número de parâmetros da MLP a serem estimados
δAtm	refração provocada pela passagem do sinal através da atmosfera
S	refração sofrida pelo sinal é igual à diferença entre a distância medida pelo receptor
N	índice de refração do meio
dS	parte infinitesimal do comprimento da trajetória do sinal
$d\rho$	parte infinitesimal da distância geométrica
n_{Ion}	índice de refração da ionosfera
n_{Trop}	índice de refração da atmosfera neutra
N_{Trop}	refratividade do ar da atmosfera neutra
P	pressão do ar (hPa)
T	temperatura (Kelvin)
E	pressão parcial do vapor d'água (hPa)

C_1	constante da refratividade atmosférica determinada empiricamente
$C_2^{'}$	constante da refratividade atmosférica, determinada empiricamente
C_3	constante da refratividade atmosférica determinada empiricamente
R_h	constante específica para os gases hidrostáticos
ρ_{ar}	densidade do ar
Z_w	constante de compressibilidade do vapor d'água
N_h	componente hidrostática da refratividade do ar
N_u	componente úmida da refratividade do ar
$Trop_h^Z$	atraso da componente hidrostática na direção vertical
m_h	função de mapeamento da componente hidrostática
$Trop_u^Z$	atraso da componente úmida na direção vertical
m_u	função de mapeamento da componente úmida
P_s	Pressão atmosférica na superfície
h_s	Altitude da estação em quilômetros
H_h	altura da camada atmosférica da componente hidrostática (m)
H_u	altura da camada atmosférica da componente úmida (m)
φ_{Hu}	Módulo da latitude em unidade de arco
UR	umidade relativa do ar (%)
$Trop_{\mathrm{mod}}^z$	atraso troposférico zenital interpolado dos quatro pontos da grade do modelo de PNT
H_{ant}	Altitude da estação
H_{mod}	Altitude do modelo de PNT
S_1, s_2 e s_3	coeficientes referentes aos efeitos de primeira, segunda e terceira ordem da ionosfera
N_e	densidade de elétrons livres no percurso do sinal
B	Módulo do vetor de indução geomagnética
θ	ângulo entre B e a direção de propagação do sinal
f	frequência do sinal
$Ion_{PD,i}$	atraso devido à refração ionosférica na pseudodistância da frequência *i*

$Ion_{\phi,i}$	atraso devido à refração ionosférica na fase da portadora da frequência *i*
LG_{PD}	combinação linear livre da geometria entre pseudodistâncias de duas frequências
γ	termo que visa compatibilizar os atrasos ionosféricos de diferentes frequências para uma frequência em comum
IF_r	erro provocado pelo hardware do receptor da combinação livre da geometria entre as pseudodistâncias
IF^s	erro provocado pelo hardware do satélite da combinação livre da geometria entre as pseudodistâncias
MC_r^s	multicaminho da combinação livre da geometria entre as pseudodistâncias
ε_{PD1-2}	resíduo da combinação livre da geometria entre as pseudodistâncias
LG_ϕ	combinação linear livre da geometria entre as observações de fase de batimento da portadora de duas frequências
N_{1-2}	ambiguidade resultante da combinação livre da geometria
if_r	erro provocado pelo hardware do receptor da combinação livre da geometria entre as observações de fase da portadora
if^s	erro provocado pelo hardware do satélite da combinação livre da geometria entre as observações de fase da portadora
mc_r^s	multicaminho da combinação livre da geometria entre as observações de fase da portadora
$\varepsilon_{\phi 1-2}$	resíduo da combinação livre da geometria entre as observações de fase da portadora
Rm	raio médio da Terra
z	ângulo zenital do satélite com relação à estação
z'	ângulo zenital do satélite com relação ao IPP
H_{IPP}	Altitude da camada ionosférica
fm	Função de mapeamento que projeta o TEC observado para a direção vertical
$PD_{r,i}^s$	pseudodistância na frequência *i* entre o satélite *s* e o receptor *r* (m)

$\phi_{r,i}^{s}$	fase da portadora na frequência *i* entre o satélite *s* e o receptor *r* (número de ciclos)
λ_i	comprimento de onda (m)
N_i	ambigüidade na frequência *i* (número de ciclos)
ρ_r^s	distância geométrica entre o receptor *r* e o satélite *s* (m)
c	a velocidade da luz no vácuo (m/s^2)
dt^s	erro do relógio do satélite *s* (s)
dt_r	erro do relógio do receptor *r* (s)
$Ion_{r,i}^{s}$	erro provocado pela refração ionosférica na frequência *i* entre o satélite *s* e o receptor *r* (m)
$Trop_r^s$	erro provocado pela refração troposférica entre o satélite *s* e o receptor *r* (m)
$IF_{r,i}$	erro provocado pelo hardware do receptor na pseudodistância
$if_{r,i}$	erro provocado pelo hardware do receptor na fase da portadora (m)
IF_1^s	erro provocado pelo hardware do satélite na pseudodistância
if_i^s	erro provocado pelo hardware do satélite na fase da portadora (m)
Orb^s	erro de órbita do satélite (m)
$MC_{r,i}^{s}$	multicaminho na pseudodistância (m)
$mc_{r,i}^{s}$	multicaminho na fase da portadora (m)
ε_{PDi}	resíduo na pseudodistância da frequência (m)
$\varepsilon_{\phi i}$	resíduo na fase de batimento da portadora
$\rho_{VRS}^{s}(t)$	distância geométrica entre a estação de referência virtual e o satélite *s* no instante *t*
$\rho_{BAS}^{s}(t)$	distância geométrica entre a estação de referência mestra e o satélite *s*
X^s	coordenada X do satélite *s*
Y^s	coordenada Y do satélite *s*
Z^s	coordenada Z do satélite *s*
X_{VRS}	coordenada X da estação de referência virtual

Y_{VRS}	coordenada Y da estação de referência virtual
Z_{VRS}	coordenada Z da estação de referência virtual
X_{BAS}	coordenada X da estação de referência base
Y_{BAS}	coordenada Y da estação de referência base
Z_{BAS}	coordenada Z da estação de referência base
$\Delta\rho^s(t)$	deslocamento geométrico referente ao satélite *s*
$PD^s_{r,i,VRS}$	pseudodistância da estação de referência virtual
$\phi^s_{r,i,VRS}$	fase de batimento da portadora da estação de referência virtual
Si	característica de frequência calculada através da multiplicação de 2π pela razão entre a duração do dia solar e o dia sideral
N	matriz das equações normais
t_r^{GPS}	tempo de recepção no sistema de tempo GPS
τ	tempo de propagação do sinal no sistema de tempo GPS
t_t^{GPS}	tempo de transmissão no sistema de tempo GPS
t_r	Instante de recepção na escala de tempo do receptor
ρ_{atm}	distância percorrida pelo sinal durante a travessia da atmosfera
α	ângulo de rotação da Terra em torno do eixo Z durante a propagação do sinal
w_e	velocidade de rotação da Terra
X_c^s	coordenada X do satélite corrigida da rotação da Terra
Y_c^s	coordenada Y do satélite corrigida da rotação da Terra

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	1
1.1	**OBJETIVOS**	4
1.2	**JUSTIFICATIVA**	5
1.3	**ORGANIZAÇÃO DA TESE**	6
2	**REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**	8
2.1	**CONCEITO**	8
2.2	**PRECEPTRONS DE MÚTIPLAS CAMADAS (MLP)**	12
2.2.1	APRENDIZADO	13
2.2.1.1	Método Levenberg-Marquardt	15
2.2.1.2	Mínimo local	21
2.2.1.3	Treinamento e generalização	21
2.2.1.4	Processamento paralelo	25
2.2.1.5	Simuladores	26
3	**MODELAGEM DA ATMOSFERA**	28
3.1	**ATMOSFERA NEUTRA**	30
3.1.1	MODELAGEM	31
3.1.2	MODELOS DE PREVISÃO NUMÉRICA DO TEMPO	34
3.1.3	FUNÇÕES DE MAPEAMENTO	36
3.1.4	OBTENÇÃO DAS GRANDEZAS METEOROLÓGICAS NA SUPERFÍCIE	37
3.2	**IONOSFERA**	38
3.2.1	DESCRIÇÃO	38
3.2.2	MODELAGEM	46
3.2.3	MODELAGEM DOS EFEITOS DE PRIMEIRA ORDEM	49
3.2.3.1	Modelo do ponto ionosférico	53
3.2.3.2	Modelagem em três dimensões	55
3.2.3.3	Mapas da ionosfera	56
3.2.3.4	Utilização de RNA na determinação do TEC	57
4	**ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA VIRTUAL**	60
4.1	**CONCEITO**	60
4.2	**DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO**	61
4.3	**MODELAGEM DA ATMOSFERA**	66
4.4	**INTERPOLAÇÃO PARA A POSIÇÃO DA ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA VIRTUAL**	67
4.5	**CONSIDERAÇÕES FINAIS**	68
5	**CÁLCULO DA ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA VIRTUAL**	71
5.1	**DESCRIÇÃO**	71
5.2	**DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO**	74
5.2.1	CÁLCULO DAS COORDENADAS DOS SATÉLITES	74
5.2.2	CÁLCULO DO DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO	75
5.3	**ATRASO DEVIDO À REFRAÇÃO ATMOSFÉRICA**	75

5.3.1 CÁLCULO DO ATRASO CAUSADO PELA ATMOSFERA NEUTRA 75
5.3.2 CÁLCULO DO ATRASO CAUSADO PELA IONOSFERA 81
5.3.2.1 Treinamento das RNA 82
5.3.2.2 Avaliação do treinamento das RNA 85

6 AVALIAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA VIRTUAIS 108
6.1 CONJUNTO DE DADOS 108
6.2 AVALIAÇÃO NO POSICIONAMENTO RELATIVO 111
6.2.1 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO 112
6.2.2 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA (Trop) 115
6.2.3 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DOS EFEITOS DA IONOSFERA (RNA_{Mod}) 116
6.2.4 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO, MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA E DA IONOSFERA (Trop+RNA_{Mod}) 118
6.2.5 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DA IONOSFERA (RNA_{GIM}) 120
6.2.6 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO, MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA E DA IONOSFERA (Trop+ RNA_{GIM}) 122
6.3 AVALIAÇÃO NO POSICIONAMENTO ABSOLUTO PRECISO 125
6.3.1 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO 125
6.3.2 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA (Trop) 127
6.3.3 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DOS EFEITOS DA IONOSFERA (RNA_{Mod}) 129
6.3.4 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO, MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA E DA IONOSFERA (Trop+ RNA_{Mod}) 131
6.3.5 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DA IONOSFERA (RNA_{GIM}) 133
6.3.6 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO, MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA E DA IONOSFERA (Trop+ RNA_{GIM}) 135
6.4 **CONSIDERAÇÕES FINAIS** 138

7 CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES 141
7.1 **CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS** 141
7.2 **RECOMENDAÇÕES** 145

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 148

APÊNDICE A Diferença de deslocamento no 167

	posicionamento relativo	
A.1	**DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO**	167
A.2	**DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA (Trop)**	168
A.3	**DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DA IONOSFERA (RNA_{Mod})**	170
A.4	**DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO, MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA E DA IONOSFERA (Trop+ RNA_{Mod})**	168
A.5	**DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DA IONOSFERA (RNA_{GIM})**	172
A.6	**DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO, MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA E DA IONOSFERA (Trop+ RNA_{GIM})**	174
A7.	**CONSIDERAÇÕES FINAIS**	175
APÊNDICE B	**Diferença de deslocamento no PPP**	176
B.1	**DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO**	176
B.2	**DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA (Trop)**	177
B.3	**DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DA IONOSFERA (RNA_{Mod})**	179
B.4	**DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO, MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA E DA IONOSFERA (Trop+ RNA_{Mod})**	180
B.5	**DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DA IONOSFERA (RNA_{GIM})**	181
B.6	**DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO, MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA E DA IONOSFERA (Trop+ RNA_{GIM})**	183
B.7	**CONSIDERAÇÕES FINAIS**	184

1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, as técnicas de posicionamento utilizando os sistemas de navegação por satélite globais (GNSS - *Global Navigation Satellite Systems*) vêm se desenvolvendo no sentido de proporcionar resultados precisos em tempo real.

Nos anos 90 ocorreu o desenvolvimento e a operacionalização do posicionamento relativo cinemático em tempo real (RTK – *Real Time Kinematic*), o qual proporciona precisão centimétrica (LANGLEY, 1998a).

O posicionamento RTK com este nível de precisão é restrito a um raio máximo de aproximadamente 15 km da estação de referência. O sistema de comunicação é um dos fatores que deve ser analisado com critério para se explorar ao máximo a área de atuação do sistema. Porém, os principais limitadores são os erros sistemáticos dependentes da distância: o atraso devido à refração ionosférica e troposférica, bem como incerteza da órbita dos satélites. Cabe ressaltar que dependendo da atividade solar e da localização da estação, o raio de restrição pode variar de 5 km para mais ou para menos (ZHANG et al., 2007).

Em um país com dimensões territoriais como a do Brasil seriam necessárias cerca de 190.000 estações para se estabelecer uma rede de estações ativas para proporcionar o posicionamento através do RTK em todo o território. Neste sentido, o estudo acerca das soluções aqui denominadas de RTK em rede torna-se atraente, visto utilizarem informações de uma rede regional de receptores GNSS para modelar os erros dependentes da distância e gerar correções válidas para a região em questão ou dados de uma estação de referência virtual.

Tais soluções, que começaram a ser desenvolvidas em meados dos anos 90, visam manter o nível de precisão do posicionamento em tempo real e reduzir a restrição espacial imposta ao posicionamento RTK (WANNINGER, 1995, HAN; RIZOS, 1998; RAQUET, 1998, FORTES, 2003). Por conseguinte, o número de estações de referência a serem implantadas pode ser reduzido sem prejuízo na

qualidade do posicionamento. Uma comparação entre os métodos desenvolvidos pode ser encontrada em Fotopoulos; Cannon (2001), Dai et al. (2001) e Alves (2008), Dabove e Agostino (2011).

Para que o posicionamento seja executado em tempo-real, as correções, ou dados, gerados pela técnica de RTK em rede adotada, além de serem calculados continuamente, devem ser enviados para o receptor móvel, que procederá com o cálculo das coordenadas.

Dentre as soluções propostas, a que utiliza estações de referência virtuais se destaca devido à qualidade do posicionamento e à compatibilidade com o *hardware* da maioria dos receptores. Por outro lado, esta solução requer comunicação bidirecional com os receptores dos usuários (LANDAU; VOLLATH; CHEN, 2002; DABOVE; AGOSTINO, 2011).

Durante o cálculo das observações da estação de referência virtual, a incerteza da órbita dos satélites pode ser reduzida de forma satisfatória através da utilização das efemérides precisas ultra-rápidas, produzidas pelo Serviço Internacional do GNSS (IGS - *International GNSS Service*), restando a modelagem da refração ionosférica e troposférica.

Nos métodos mais rigorosos, o vetor das ambiguidades das estações da rede deve ser solucionado para posterior cálculo do atraso provocado pela refração ionosférica e troposférica (van der MAREL, 1998; HU et al., 2003; WANNINGER, 2006; WEI et al, 2007).

Alves, Monico e Dalbelo (2007) apresentam uma solução onde os efeitos da ionosfera são calculados através de um modelo regional baseado em dados GNSS de dupla frequência, enquanto que a refração da atmosfera neutra é modelada com a utilização do modelo de Previsão Numérica do Tempo (PNT), disponibilizado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Portanto, verifica-se que a refração provocada pela atmosfera neutra não requer dados da rede GNSS de referência. Posicionamento com precisão melhor que 10 cm pode ser alcançado com a utilização deste método (ALVES; MONICO; DALBELO, 2007; ALVES, 2008).

Como visto, os métodos desenvolvidos estão baseados nas informações da rede GNSS de referência para calcular as correções aos erros causados pela refração ionosférica. Portanto, falha de comunicação com os receptores das estações de referência ou perda de sinal em tais receptores, podem inviabilizar a solução em tempo-real. Para superar esta dificuldade, formas alternativas para se obter as correções são necessárias.

Uma forma de se calcular correções para o atraso ionosférico em tempo-real é prever o conteúdo total de elétrons (TEC – *Total Electron Content*). Neste sentido, encontram-se na literatura várias pesquisas realizadas em âmbito internacional envolvendo a utilização de RNA para calcular ou prever tal quantidade (HERNÁNDEZ-PAJAREZ; JUAN; SANZ, 1997; CANDER et al.,1998; TULUNAY et al., 2006; LEANDRO; SANTOS, 2007; HABARULEMA; MCKINNELL; CILLIERS, 2007; ACHARYA et al., 2011). Ressalta-se que a maioria destes modelos utiliza informações pretéritas do TEC como entrada e a qualidade das previsões se deteriora conforme o instante da previsão se afasta da sua origem. Uma exceção é o modelo desenvolvido por Habarulema, McKinnell e Cilliers (2007). Porém, este modelo não tem abrangência regional. O modelo proposto por Leandro e Santos (2007) não considera parâmetros de variação do tempo nem das condições geomagnéticas e atividade solar, não sendo capaz de realizar previsões do TEC na direção vertical (VTEC). Por outro lado, esta solução não é capaz de calcular o VTEC regionalmente.

Esta pesquisa apresenta uma forma de se reduzir os efeitos da ionosfera sem depender dos dados da rede de referência em tempo-real, a qual está baseada na utilização de redes neurais artificiais (RNA) para prever 72 horas do VTEC.

A arquitetura de RNA adotada foi a perceptrons de múltiplas camadas (MLP - *MultiLayer Perceptrons*) com uma única camada oculta. As RNA foram treinadas com a versão do método Levenberg-Marquardt sem retropropagação, aplicando-se regularização estrutural para definir a topologia (HAYKIN, 1999; WILAMOWSKI; YU, 2010b).

Os arquivos, em formato IONEX (*IONosphere Map Exchange*), dos mapas globais do VTEC (GIM – *Global Ionospheric Map*) produzidos pelo IGS (HERNANDÉZ-PAJAREZ et al., 2009) e dos mapas do VTEC calculados com o

programa Mod_Ion (CAMARGO, 1999, MATSUOKA, 2003; AGUIAR, 2005) foram utilizados como fonte de informação espaço-temporal sobre o VTEC. Em ambos os casos, verificou-se uma concordância de cerca de 80% entre o VTEC contido nos arquivos IONEX e o VTEC calculado pelas RNA. Exceções ocorrem quando há distúrbios de curto período na ionosfera, como o causado por tempestades geomagnéticas.

Foi desenvolvida e avaliada uma metodologia para geração de estações de referência virtuais utilizando: as previsões do VTEC calculadas com RNA, as previsões do atraso troposférico zenital produzidas pelo INPE e as efemérides ultra-rápidas produzidas pelo IGS (IGU). Destaca-se que esta metodologia permite gerar estações de referência virtuais em tempo-real a partir de dados de apenas uma estação da rede de referência.

Experimentos realizados com dados de dezoito linhas de base rastreadas na região oeste do estado de São Paulo, em junho de 2009, mostram diferenças entre as coordenadas tridimensionais calculadas com estações de referência reais e com as estações de referência virtuais variaram de 14 cm a 80 cm, com diferença média quadrática (RMS – *Root mean Square*) de 47 cm, utilizando-se informações dos GIM. Estes valores mudam para o intervalo de 10 cm a 78 cm, com RMS de 47 cm, quando os arquivos IONEX do Mod_Ion são empregados.

As sete estações de referência envolvidas no levantamento foram submetidas ao serviço de Posicionamento Absoluto Preciso (PPP) do IBGE (Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) (IBGE-PPP), bem como as estações de referência virtuais geradas. Os resultados mostraram as diferenças de coordenadas tridimensionais variaram de 45 cm a 10 cm, com RMS de 26 cm, quando se utilizou os GIM do IGS. Valores alterados para o intervalo de 42 cm a 10 cm e 26 cm quando se utilizou o Mod_Ion.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é estabelecer e avaliar uma metodologia baseada em redes neurais artificiais para prever o atraso devido à refração ionosférica regionalmente, visando a geração de estação de referência virtual em tempo-real.

Estão envolvidos com o principal objetivo da pesquisa:

- estudo dos modelos e desenvolvimento de um programa computacional para a interpolação das coordenadas dos satélites GNSS através das efemérides precisas do IGS;
- estudo dos modelos e desenvolvimento de um programa computacional para o cálculo do atraso devido à refração troposférica em locais pré-estabelecidos;
- definição, implementação e avaliação de um modelo de redes neurais artificiais que seja capaz de possibilitar o cálculo do atraso devido à refração ionosférica em tempo-real;
- avaliação da qualidade do posicionamento utilizando as estações de referência virtuais geradas com a metodologia desenvolvida tanto no posicionamento relativo como no PPP.

1.2 JUSTIFICATIVA

A Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), estabelecida e mantida pelo IBGE, é uma das principais infra-estruturas geodésicas do Brasil. Os dados da mesma são utilizados como referência para o posicionamento com GNSS, bem como na realização de diversos estudos científicos nas áreas de Geodésia, Geodinâmica e Ciências Atmosféricas.

A primeira estação desta rede geodésica, localizada em Curitiba/PR, entrou em operação em 1996. Desde então o número de estações vem aumentando e em maio de 2012 a RBMC contava com 84 estações (FORTES, 1997; FORTES et al., 2007; IBGE, 2011). No entanto, devido às dimensões do Brasil, implantar uma rede de estações GNSS com distância que atenda o posicionamento relativo para usuários de receptores de uma frequência é um grande desafio. Neste sentido, a utilização de estações de referência virtuais torna-se um assunto de interesse visto permitir uma redução na quantidade de estações de referência necessárias para proporcionar o posicionamento relativo com precisão melhor que 10 cm em tempo-real.

Os métodos desenvolvidos para geração de estações de referência virtuais dependem totalmente dos dados da rede de referência, o que pode inviabilizar

o posicionamento em tempo-real em situações de falha de comunicação. Portanto, a investigação sobre formas de se modelar os erros dependentes da distância sem a necessidade de dados GNSS em tempo-real torna-se importante. No caso da atmosfera neutra, o atraso troposférico zenital disponibilizado pelo INPE é uma solução satisfatória para a América do Sul. No entanto, a modelagem do atraso devido à refração ionosférica pesquisada até o momento ainda está totalmente dependente dos dados da rede GNSS em tempo-real, sendo um assunto a ser desenvolvido.

Embora as metodologias de geração de estações de referência virtuais estejam sendo desenvolvidas desde meados da década de 1990, a investigação sobre este tipo de posicionamento no Brasil ainda é incipiente, se restringindo a poucos trabalhos (FORTES et al., 2000; WILLGALIS et al., 2002; SEJAS et al., 2003; RAMOS, 2007; ALVES, 2008, MORETT NETTO, 2008, ALVES; MONICO, 2011).

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

O capítulo 2 apresenta a teoria sobre RNA, iniciando com uma breve explanação sobre alguns conceitos básicos. Na sequência, a teoria envolvida na arquitetura MLP é descrita, onde são apresentados o aprendizado a partir do algoritmo Levenberg-Marquardt, o problema de mínimo local, a relação entre o aprendizado e a generalização, bem como o benefício do processamento em paralelo. Este capítulo é encerrado com uma descrição sobre alguns simuladores de redes neurais.

No capítulo 3, uma revisão acerca dos efeitos da atmosfera sobre os sinais e posicionamento GNSS é apresentada. Este capítulo se inicia com uma revisão sobre os efeitos da atmosfera nos sinais GNSS. Em seguida se apresenta a teoria sobre a modelagem da atmosfera neutra e da ionosfera. O capítulo é finalizado com uma revisão sobre o uso de redes neurais artificiais no cálculo e previsão do TEC.

O capítulo 4 traz uma revisão teórica sobre cálculo de estação de referência virtual, iniciando com sua definição e as etapas necessárias para sua geração. Em seguida, discorre-se acerca da etapa de deslocamento geométrico e a

modelagem do atraso devido à refração ionosférica e da atmosfera neutra. Este capítulo é finalizado com uma revisão sobre alguns modelos desenvolvidos para interpolação das correções.

O capítulo 5 apresenta a descrição da metodologia utilizada no programa em desenvolvimento. Inicialmente, apresenta-se a metodologia empregada no cálculo da posição dos satélites utilizando as efemérides IGU. Em seguida, descreve-se a estratégia empregada no cálculo do atraso devido à atmosfera neutra. Ainda nesta seção, uma análise acerca da função de mapeamento utilizada para reduzir o atraso da direção zenital para a direção receptor-satélite é conduzida. Para finalizar o capítulo, uma descrição do modelo de RNA desenvolvido para o cálculo do VTEC em tempo-real, bem como uma avaliação de seu desempenho, são apresentadas.

O capítulo 6 contém a descrição dos experimentos realizados e os resultados obtidos. Inicialmente se apresenta o conjunto de dados utilizado nos experimentos, seguido por uma avaliação das estações de referência geradas no posicionamento relativo. Este capítulo é finalizado por uma avaliação da qualidade da estação de referência virtual no posicionamento PPP.

A tese é encerrada no capítulo 7, onde as conclusões, as considerações finais e as recomendações são apresentadas.

2 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

2.1 CONCEITO

Redes neurais artificiais são sistemas desenvolvidos de forma a imitar as habilidades computacionais do sistema nervoso biológico, visando armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível (HERTZ: KROGH: PALMER, 1991; HAYKIN, 1999). A RNA se espelha nas estruturas de armazenamento e de processamento do sistema nervoso, incluindo os sistemas nervosos central e periférico.

O primeiro estudo relacionado com o desenvolvimento de um modelo matemático de forma a imitar o sistema nervoso biológico através de redes neurais foi publicado em 1943 (McCULLOCH; PITTS, 1943).

Similarmente ao sistema nervoso, as RNA são compostas de unidades de processamento, chamadas de neurônios artificiais, as quais são interligadas através de pesos sinápticos adaptáveis. Uma representação gráfica dos elementos básicos envolvidos em um neurônio artificial *k*, recebendo *m* entradas, pode ser vista na figura 2.1.

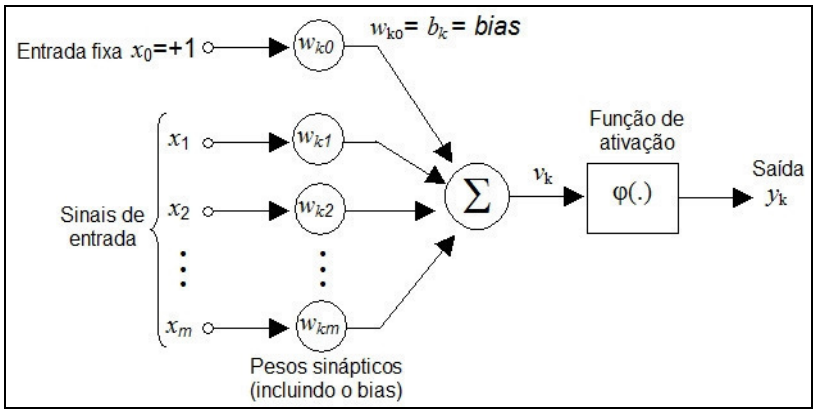

Figura 2.1 – Modelo de um neurônio artificial (Adaptado de: HAYKIN, 1999)

Podendo ser provenientes da camada de entrada ou de outro neurônio artificial, os sinais de entrada de um neurônio artificial são propagados através dos pesos sinápticos. O resultado da soma de todas as entradas multiplicadas pelos respectivos pesos sinápticos, incluindo o *bias*, se propaga através da

função de ativação, que restringe a amplitude da saída do neurônio, ou seja, transforma os sinais de entrada em estado de ativação. O estado de ativação do neurônio pode assumir valores binários (0 e 1), bipolares (–1 e 1) e reais ([-1,1] ou [0,1]). O termo b_k representa o *bias*, que é um fator de escala que visa aumentar ou diminuir o valor da entrada da função de ativação (HAYKIN, 1999).

O neurônio *k* produz uma saída y através da seguinte expressão:

$$y_k = \Gamma(v_k) \tag{2.1}$$

com Γ sendo a função de ativação ou de transferência e

$$v_k = \sum_{j=0}^{m} w_{kj} y_j \tag{2.2}$$

sendo v_k denominado de campo local induzido ou potencial de ativação.

As funções de ativação utilizadas com mais frequência são do tipo degrau, linear e não linear. Atenção especial deve ser dada a esta última, a qual é apropriada para casos que envolvem modelagem de natureza não linear. Salienta-se, ainda, que os neurônios de uma única RNA podem possuir função de ativação diferentes.

As funções sigmoidais tangente hiperbólica e logística são funções de ativação bastante difundidas na literatura, cujas expressões podem ser escritas, respectivamente, como (HAYKIN, 1999).

$$\Gamma(v) = b\tanh(av) = b\frac{e^{av} - e^{-av}}{e^{av} - e^{-av}} \tag{2.3}$$

$$\Gamma(v) = \frac{1}{1 + e^{-av}} \tag{2.4}$$

onde a e b são constantes maiores do que zero. A constante a determina a declividade da forma da curva e b é um fator de escala.

A figura 2.2 traz o comportamento das funções tangente hiperbólica e logística para a e b iguais a 1.

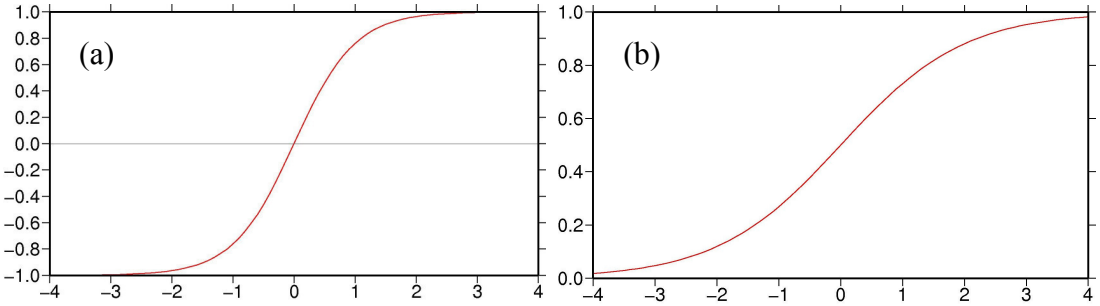

Figura 2.2 – Funções de ativação tangente hiperbólica e logística
((a) - tangente hiperbólica, (b) - logística)

Verifica-se que ambas funções de ativação se tornam saturadas quando seus argumentos se afastam do zero. Como será visto adiante, isto tem impacto no desempenho da aprendizagem.

A escolha da função de ativação deve estar relacionada com o benefício que suas características trazem para o treinamento. No caso da rede MLP, a adoção de uma função de ativação antissimétrica para os neurônios da camada oculta é mais indicada, visto que o resultado produzido pode ser positivo ou negativo.

Uma função é antissimétrica quando satisfaz a seguinte propriedade:

$$\Gamma(-v) = -\Gamma(v) \tag{2.5}$$

Como visto na figura 2.2, a função de ativação que satisfaz a propriedade dada pela expressão (2.5) é a tangente hiperbólica. Le Cun (1993) sugere a utilização dos seguintes parâmetros para esta função: b=1,7159 e a= 2/3.

Uma alternativa à tangente hiperbólica é a seguinte função (WILAMOWSKI et al., 2001):

$$\Gamma(v) = bip = \frac{2}{1+e^{-av}} - 1 \tag{2.6}$$

O comportamento desta função, denominada neste texto de bipolar, é bem parecido com o da tangente hiperbólica, como visto na figura 2.3.

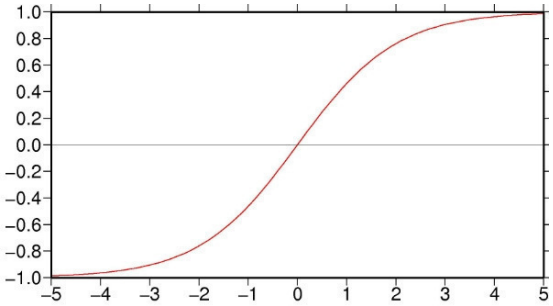

Figura 2.3 – Comportamento da função bipolar

Embora o neurônio seja a unidade de processamento do sistema nervoso, estudos mostram que ele, por si só, não é capaz de gerar nem se quer um pensamento. Portanto, a unidade funcional de tal sistema é caracterizada por populações de neurônios, sendo conhecida como redes neuronais (NICOLELIS, 2011), sendo este o princípio do desenvolvimento das RNA.

As arquiteturas são caracterizadas pela forma como os neurônios de uma RNA estão estruturados. Existem três classes de arquitetura: perceptrons de uma única camada, MLP e redes recorrentes. No primeiro caso, a camada de entrada, que é formada pelas entradas da rede neural, está ligada diretamente com a camada de neurônios destinada a produzir os resultados, denominada de camada de saída. A diferença entre a primeira e a segunda classe de arquitetura está no fato desta última possuir pelo menos uma camada intermediária entre a camada de entrada e a camada de saída, conhecida como camada oculta. A última classe de arquitetura se distingue das demais por apresentar pelo menos um laço de realimentação (HAYKIN, 1999).

Assim como a rede neuronal, as RNA precisam ser alimentadas por conhecimento prévio para “aprender”. No contexto de RNA, o aprendizado está relacionado com a habilidade do algoritmo de treinamento determinar um conjunto de pesos sinápticos e *bias* de tal forma que as RNA produzam respostas próximas das desejadas. Portanto, diz-se que o conhecimento que a RNA adquiri é armazenado em tais parâmetros.

A aprendizagem pode ser supervisionada ou não supervisionada. No primeiro

caso é necessário dispor de um conjunto de dados contendo entradas e saídas conhecidas, enquanto que na aprendizagem não supervisionada o algoritmo determina o conjunto de parâmetros sem a apresentação de exemplares.

As RNA possuem habilidade de produzir respostas adequadas para entradas que não foram utilizadas no treinamento, a qual é denominada de generalização. Portanto, tais redes são capazes de extrapolar (realizar previsão) ou de interpolar grandezas (PATTERSON, 1995, HAYKIN, 1999).

A RNA vem sendo aplicada com bastante êxito nas aplicações que envolvem regressão linear ou processamento de imagens, sendo aplicada em pesquisas das mais variadas áreas: clima espacial (BOBERG; WINTOFT; LUNDSTEDT, 2000), radio-astronomia (MANCINI; BRESCIA; SCHIPANI, 2003) TALLAM; HABETLER; HARLEY, 2003), medicina (SEIDEL; SEIDEL; HERBATH, 2007; GOMES; SIQUEIRA; SILVEIRA, 2009) energia nuclear (BUENO; TING; GONÇALVES, 2007), engenharia (GOMES; SIQUEIRA; SILVEIRA, 2009; ZANETTI, 2008; NASCIMENTO et al., 2010). Em Geodésia, destaca-se a sua utilização na previsão dos parâmetros de orientação da Terra (SCHUH et al., 2002) e na modelagem do geóide (MAIA, 2003; KAVZOGLU; SAKA, 2005). No posicionamento por satélites artificiais, as RNA foram aplicadas na previsão de correções DGPS (GPS diferencial) (JWO; LEE; TSENG, 2004; MOSAVI, 2006) e na previsão da portadora GPS L2 (LEANDRO et al., 2007).

2.2 PERCEPTRONS DE MÚLTIPLAS CAMADAS (MLP)

Esta arquitetura também é conhecida como rede alimentada adiante de múltiplas camadas, devido ao fluxo da informação ser em um único sentido. As entradas são propagadas da camada de entrada para a camada de saída, passando por uma ou mais camadas ocultas. A figura (2.4) mostra um exemplo desta arquitetura com duas entradas, uma camada oculta contendo dois neurônios e uma camada de saída, com apenas um neurônio.

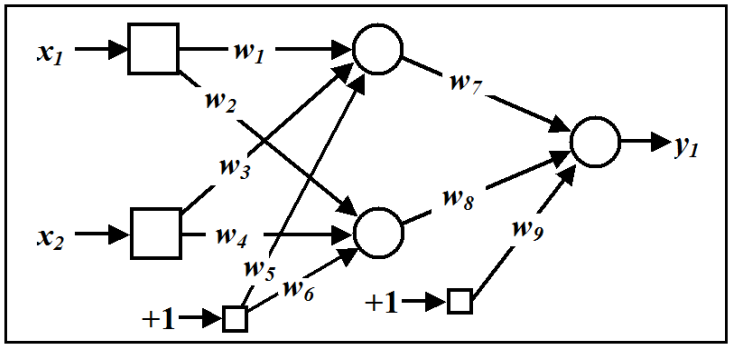

Figura 2.4 – Fluxo de processamento da MLP

Adotando-se a tangente hiperbólica como função de ativação de todos os neurônios da RNA representada pela figura 2.4, a saída é calculada por:

$$\begin{aligned} y_1 = \tanh\{&[w_7 \times \tanh((x_1 w_1) + (x_2 w_3) + w_5)] + \\ &+ [w_8 \times \tanh((x_1 w_2) + (x_2 w_4) + w_6)] + w_9\} \end{aligned} \tag{2.7}$$

As camadas ocultas são denominadas desta forma devido ao fato dos neurônios contidos nelas apenas receberem entradas e produzirem saídas internas à RNA.

Destaca-se que Cybenko (1989), Funahashi (1989) e Hornik; Stinchcombe e White (1989) mostraram que uma rede MLP com apenas uma camada oculta é capaz de aproximar qualquer função contínua dentro de uma precisão pré-estabelecida, desde que a camada oculta possua quantidade adequada de neurônios. Portanto, o desafio é determinar a quantidade de neurônios ideal.

2.2.1 APRENDIZADO

Os algoritmos de treinamento têm como objetivo determinar parâmetros (graus de liberdade ou pesos sinápticos e *bias*) que minimizem uma função de custo, a qual é escolhida de forma adequada para se avaliar a solução.

O aprendizado da MLP é realizado em um processo iterativo de busca no espaço dos pesos sinápticos e *bias*, requerendo sucessivas atualizações a tais parâmetros.

O cálculo das atualizações é realizado através de:

$$w^{(it+1)} = w^{(it)} + \Delta w^{(it)} \tag{2.8}$$

onde w representa o vetor dos parâmetros, it é o passo de atualização e Δw sendo o vetor de correção aos parâmetros.

O algoritmo para treinamento da MLP utilizado com grande frequência é denominado de *back-propagation*. Trata-se de um algoritmo de aprendizado supervisionado que utiliza o conceito de gradiente descendente, onde os parâmetros são atualizados na direção oposta ao do gradiente da função de custo (RUMELHART; HINTON: WILLIAMS, 1986).

A utilização do gradiente descendente proporciona uma aproximação linear da função de custo e adotá-lo tem como principal vantagem o baixo custo computacional. Por outro lado, esta solução possui uma taxa de convergência ruim.

A utilização de informação de ordem mais elevada acelera a convergência do processo de minimização (HAYKIN, 1999). Uma forma grosseira de se introduzir informações de segunda ordem é inserir o termo momento na expressão do cálculo da atualização aos graus de liberdade da MLP, resultando no algoritmo *back-propagation*. Este artifício produz dois efeitos positivos no processo de aprendizagem: aumenta o valor da correção quando as derivadas parciais possuem mesmo sinal algébrico entre iterações consecutivas e causa o efeito contrário quando tais derivadas possuem sinais opostos. Como consequência, a aprendizagem é acelerada sem perda de estabilidade.

Há ainda algoritmos como o *quickprop* e o Rprop, que utilizam outras regras para a atualização dos graus de liberdade considerando informações da atualização anterior (FAHLMAN, 1988; RIEDMILLER; BRAUN, 1993; BISHOP, 2006).

No entanto, mesmo com estes artifícios os métodos de otimização, como o gradiente conjugado, o Levenberg-Marquardt e o Gauss-Newton, são mais eficientes do que utilizar apenas o gradiente descendente. Battitti (1992) faz uma comparação entre os métodos, destacando que a inclusão de informações

de segunda ordem melhora a taxa de convergência. Por outro lado, ocorre aumento no esforço computacional.

Charalambous (1992) apresenta um método baseado no gradiente conjugado utilizando algoritmo de busca em linha, Moller (1993) propõe a utilização do método do gradiente conjugado com o algoritmo Levenberg-Marquardt. Hagan e Menhaj (1994) sugerem a utilização do algoritmo Levenberg-Marquardt.

2.2.1.1 Método Levenberg-Marquardt

Dentre os métodos de otimização citados, o Levenberg-Marquardt (LM) é aceito como o mais eficiente, visto reunir vantagens complementares do método de Gauss-Newton, taxa de convergência, e o do gradiente descendente, estabilidade (WILAMOWSKI et al., 2001).

Neste caso, a função de custo deve ser igual à soma dos sinais de erro ao quadrado. No caso de uma RNA contendo N exemplares e C neurônios na camada de saída, tal função de custo é dada por:

$$\mathcal{E} = \sum_{p=1}^{N}\left[\sum_{c=1}^{C}\left(se_{p,c}\right)^2\right] \tag{2.9}$$

onde se é o sinal de erro, dado pela subtração entre a saída calculada pela MLP e seu correspondente do conjunto de treinamento, conforme:

$$se_{p,c}(n) = d_{p,c} - y_{p,c}(n) \tag{2.10}$$

com $d_{p,c}$ sendo a saída contida no conjunto de treinamento e n representando a iteração, que neste caso, é definida como sendo o processamento de todos os exemplares.

Considerando uma RNA com W parâmetros a serem estimados, a correção aos graus de liberdade da MLP é calculada através de:

$$\Delta w = -\left[A^T A + \eta I\right]^{-1} A^T se \tag{2.11}$$

sendo A a matriz jacobiana de ordem (CN x W), η o parâmetro da taxa de aprendizagem e I a matriz identidade.

Os elementos da matriz A são iguais às derivadas parciais do sinal de erro com relação aos parâmetros da MLP, sendo necessário repetir a etapa de retropropagação C x W vezes para cada exemplar. Os elementos da matriz A são calculados através de (WILAMOWSKI; YU, 2010b):

$$\frac{\partial e_{p,m}}{\partial w_{j,i}} = y_{j,i}\delta_{m,j} \tag{2.12}$$

com p e m sendo índices relacionados, respectivamente, com o exemplar e com o neurônio de saída, i e j sendo índices referentes aos neurônios, e $\delta_{m,j}$ podendo ser interpretado como o ganho do sinal entre a entrada do neurônio j e a saída da rede m. $\delta_{m,j}$ é calculado por:

$$\delta_{m,j} = \Gamma_j^{'}(\upsilon_j)F_{m,j}^{'} \tag{2.13}$$

onde $\Gamma_j^{'}(\upsilon_j)$ é a derivada parcial da função de ativação com relação ao campo local induzido e F' é a derivada parcial da função não linear que liga o neurônio j à saída m com relação ao potencial de ativação.

As derivadas parciais das funções bipolar e logística com relação ao campo local induzido são escritas, respectivamente, como:

$$\Gamma_j^{'}(v_j) = 0.5(1 - bip^2) \tag{2.14}$$

$$\Gamma_j^{'}(v_j) = ay_j(1 - y_j) \tag{2.15}$$

A figura 2.5 mostra o comportamento das derivadas das funções bipolar e logística com a constante a igual a 1.

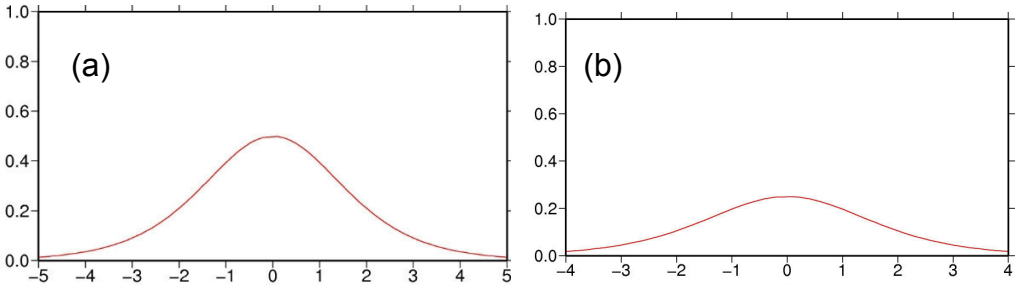

Figura 2.5 - Comportamento da derivada das funções de ativação bipolar e logística ((a) bipolar e (b) logística)

O padrão da matriz A é apresentado na figura 2.6.

$$
A = \begin{array}{c}
\begin{array}{cccccc} \text{Neurônio 1} & & & \text{Neurônio j} & & \end{array} \\
\left[\begin{array}{cccccc}
\frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_{1,2}} & \cdots & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_{j,1}} & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_{j,2}} & \cdots \\
\frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_{1,2}} & \cdots & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_{j,1}} & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_{j,2}} & \cdots \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
\frac{\partial e_{1,C}}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_{1,C}}{\partial w_{1,2}} & \cdots & \frac{\partial e_{1,C}}{\partial w_{j,1}} & \frac{\partial e_{1,C}}{\partial w_{j,2}} & \cdots \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
\frac{\partial e_{p,1}}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_{p,1}}{\partial w_{1,2}} & \cdots & \frac{\partial e_{p,1}}{\partial w_{j,1}} & \frac{\partial e_{p,1}}{\partial w_{j,2}} & \cdots \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
\frac{\partial e_{p,m}}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_{p,m}}{\partial w_{1,2}} & \cdots & \frac{\partial e_{p,m}}{\partial w_{j,1}} & \frac{\partial e_{p,m}}{\partial w_{j,2}} & \cdots \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
\frac{\partial e_{N,1}}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_{N,1}}{\partial w_{1,2}} & \cdots & \frac{\partial e_{N,1}}{\partial w_{j,1}} & \frac{\partial e_{N,1}}{\partial w_{j,2}} & \cdots \\
\frac{\partial e_{N,2}}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_{N,2}}{\partial w_{1,2}} & \cdots & \frac{\partial e_{N,2}}{\partial w_{j,1}} & \frac{\partial e_{N,2}}{\partial w_{j,2}} & \cdots \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
\frac{\partial e_{N,C}}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_{N,C}}{\partial w_{1,2}} & \cdots & \frac{\partial e_{N,C}}{\partial w_{j,1}} & \frac{\partial e_{N,C}}{\partial w_{j,2}} & \cdots
\end{array}\right]
\end{array}
\begin{array}{l}
c = 1 \\ c = 2 \\ \cdots \\ c = C \\ \cdots \\ c = 1 \\ \cdots \\ c = m \\ \cdots \\ c = 1 \\ c = 2 \\ \cdots \\ c = C
\end{array}
\left.\begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array}\right\} p = 1
\left.\begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array}\right\} p = p
\left.\begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array}\right\} p = N
$$

Figura 2.6 - Padrão da matriz jacobiana

A taxa de aprendizagem é ajustada automaticamente a cada época, visando assegurar a convergência. Quanto menor o valor de η mais a solução se aproxima do método Gauss-Newton. Caso contrário, o método se torna similar ao gradiente descendente (HAGAN; MENHAJ,1994).

Para iniciar este algoritmo, devem ser atribuídos valores iniciais aos parâmetros. Inicia-los com valores altos pode tornar o neurônio saturado. Por outro lado, escolher parâmetros iniciais com valores pequenos também traz inconveniências, pois nesta condição o algoritmo pode operar em uma região plana da superfície de erro. Em ambas as situações o processo de aprendizado se torna mais lento. O ideal é determinar tais parâmetros de forma que eles possuam distribuição normal com média zero e variância escolhida de forma que os desvios-padrão dos campos locais induzidos dos neurônios se encontrem na transição entre as partes linear e saturada da função de ativação (Le CUN, 1993).

A execução deste método pode ser dividida em quatro etapas principais. Na primeira, apresentam-se as entradas, calculam-se as saídas e a função de custo. Em seguida calcula-se a matriz jacobiana. Na terceira etapa, atualizam-se os parâmetros da MLP usando a expressão (2.11). Na última etapa, calcula-se a função de custo com a atualização. Caso ocorra um aumento com relação à função de custo calculada na primeira etapa, deve-se multiplicar a taxa de aprendizado por um fator de escala escolhido, normalmente 10, e voltar para a etapa 3. Caso contrário, mantém-se a atualização, divide-se η pelo fator de escala e se retorna à etapa 1. O processo é repetido até que um critério de parada seja atendido.

Os critérios para finalizar o processo podem estar em função do valor da função de custo, que neste caso deve ser reduzido até um valor pré-determinado, ou em função de uma quantidade máxima de iterações. É importante salientar que o critério de parada deve considerar a qualidade de generalização produzida pela RNA.

Ao fim do processo de aprendizado, os parâmetros são fixados e a RNA pode ser utilizada para se calcular novas saídas a partir de entradas desconhecidas.

Como visto, este método requer o cálculo e armazenamento dos elementos da matriz jacobiana a cada época, bem como a inversão de uma matriz de ordem (W x W), envolvendo grande esforço computacional quando a quantidade de parâmetros livres é superior a 100 e o conjunto de treinamento possui milhares de exemplares.

Com objetivo de melhorar o desempenho deste método, Wilamowski et al. (2001) propuseram alteração na função de custo e utilizam o lema de inversão de matrizes para chegar a uma atualização onde a matriz a ser invertida é de ordem (C x C). Além disso, estes autores sugerem que a propagação do sinal de erro seja executada em função da distância entre o valor desejado e o valor calculado ao invés de empregar a derivada da função de ativação.

Visando diminuir oscilações, Suratgar; Tavakoli; Hoseinabadi (2005) sugerem que a atualização da taxa de aprendizagem seja calculada através da função de custo, ao invés do uso de um fator de escala pré-definida.

A multiplicação entre a transposta da matriz jacobina e a matriz jacobina ($A^T A$), na expressão 2.11, realizada pelo método tradicional requer que todos os elementos da matriz A sejam previamente calculados e armazenados, exigindo esforço computacional. No entanto, a referida operação pode ser realizada através da multiplicação dos elementos das linhas da primeira matriz (A^T) pelas colunas correspondentes da segunda matriz (A). A cada operação envolvendo uma determinada linha e a coluna correspondente, obtém-se uma matriz parcial, sendo necessário somar as matrizes parciais para se obter a matriz resultante (WILAMOWSKI; YU, 2010a).

Um método que usa esta propriedade foi proposto, verificando-se que o custo de armazenamento (memória) é praticamente eliminado. Além disso, observou-se que o método proposto também reduz o tempo de processamento. Em experimentos realizados se chegou a uma economia de aproximadamente 99% para o caso de 63.000 exemplares e 95% para o caso com 16.000 exemplares. Além disso, chegou-se a uma economia de tempo que variou de 58% a 93% (WILAMOWSKI; YU, 2010a).

Wilamowski e Yu (2010b) apresentam um algoritmo que não requer a etapa de retropropagação para o cálculo dos elementos da matriz A. Neste caso, a expressão (2.13) é desenvolvida em função de informações calculadas para os neurônios anteriores e é expandida para qualquer par de neurônios da MLP, j e k, resultando em:

$$\delta_{k,j} = \delta_{k,k} \sum_{i=1}^{k-1} w_{i,j} \delta_{i,j} \tag{2.16}$$

com $\delta_{k,k} = \Gamma_k^{'}(\upsilon_k)$

A porcentagem de diminuição do tempo de execução entre o algoritmo original e o que não usa retropropagação depende da quantidade de exemplares, bem como do número de parâmetros e de saídas. Nos experimentos conduzidos por Wilamowski e Yu (2010b), esta porcentagem variou de aproximadamente 94% a um pouco mais de 30%, verificando-se melhor eficiência para RNA que possuem maior número de saídas.

A figura 2.7 traz um fluxograma deste método.

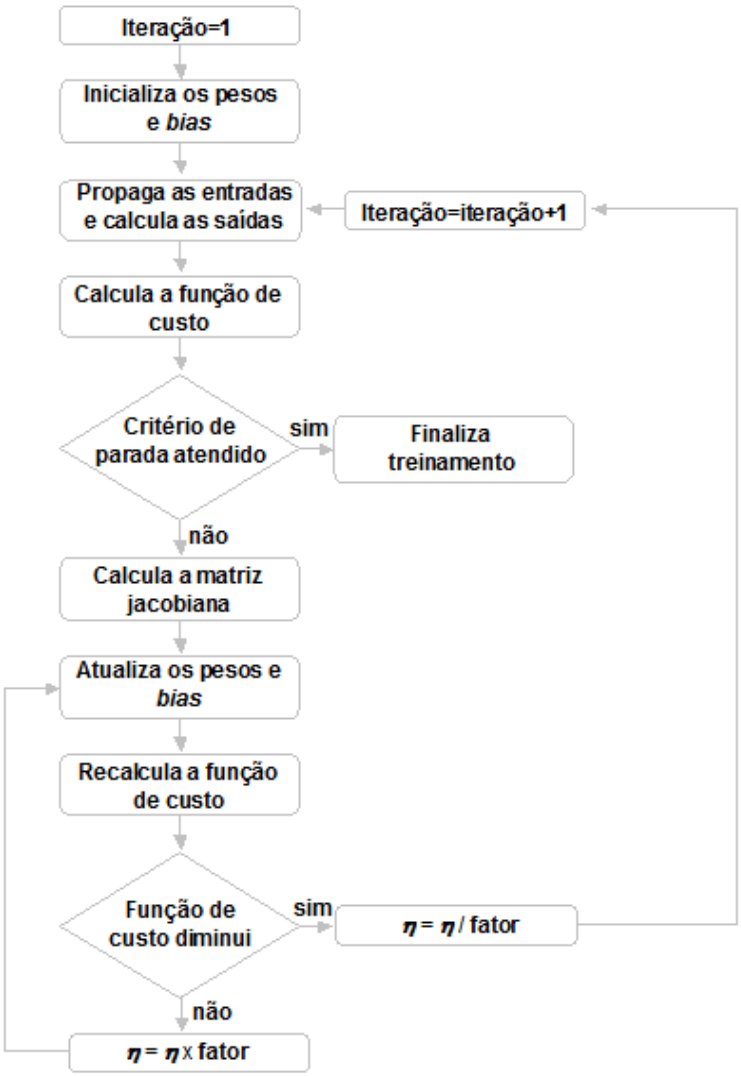

Figura 2.7 – Fluxograma do método Levenberg-Marquardt

2.2.1.2 Mínimo local

Um problema dos algoritmos de treinamento apresentados é o fato da possibilidade deles convergirem para um mínimo local, o que limita a qualidade da aprendizagem. Alguns procedimentos podem ser adotados para evitar este tipo de inconveniência (HAYKIN, 1999; Le CUN, 1993):

- apresentar os exemplares de treinamento em uma sequência diferente a cada época, fazendo com que o percurso a ser realizado na busca do mínimo global seja aleatório;
- normalizar as entradas para evitar que os neurônios se tornem saturados. Nesta condição a derivada da função de ativação com relação aos parâmetros tende a zero e pequenas correções são calculadas;
- iniciar os pesos sinápticos e *bias* com valores adequados, pois, conforme descrito anteriormente, valores iniciais altos tendem a saturar os neurônios;
- reescalar os valores alvo (valores desejados) contidos no conjunto de treinamento para o intervalo, e afastados de uma determinada quantidade, dos limites superior e inferior da função de ativação, pois, caso contrário, o algoritmo tende a levar os parâmetros da MLP para o infinito, provocando saturação dos neurônios ocultos. Este procedimento pode ser eliminado quando o(s) neurônio(s) de saída possuir(em) função de ativação linear.

Além de favorecer a convergência deste método de treinamento para um mínimo local, os fatores que saturam os neurônios também tornam o aprendizado mais lento.

Visando diminuir a dimensão dos dados de entrada, pode-se utilizar análise de componentes principais. No entanto, devido a este método não considerar os resultados desejados, a RNA pode gerar resultados bem aquém do ótimo (BISHOP, 2008).

2.2.1.3 Treinamento e generalização

Uma boa generalização só é possível se o conjunto de dados de treinamento contiver informações suficientes sobre a classe a ser aprendida e a complexidade do modelo for a ideal.

A complexidade do modelo pode ser controlada através da regularização estrutural, a qual é conseguida através da determinação da quantidade de parâmetros mínima para a RNA (BISHOP, 2008).

Uma forma de executar a regularização estrutural na prática é comparar o resultado proveniente de RNA com quantidades diferentes de neurônios ocultos. Este processo pode ser iniciado adotando-se uma quantidade reduzida de neurônios ocultos e adicionar tais unidades até chegar à topologia ideal (BISHOP, 2008). Outra opção é iniciar com quantidade grande de neurônios e diminui-la até chegar à quantidade ideal. Neste último caso ainda é possível adotar alguma técnica de poda, onde conexões menos significantes são eliminadas (HAYKIN, 1999).

Como visto, estabelecer uma metodologia para avaliar a generalização da RNA é essencial, sendo a validação cruzada, (STONE, 1978), uma ferramenta muito útil. Neste contexto, o conjunto de dados de treinamento pode ser dividido em dois:

- estimação: utilizado na estimação dos parâmetros;
- validação: empregado para testar ou validar a estimação.

Quando o número de exemplares for maior que o número de parâmetros multiplicado por 30, 80% do conjunto de dados de treinamento pode ser destinado para o conjunto de estimação e os 20 % restantes para o conjunto de validação. Caso contrário, a porcentagem destinada para o conjunto de estimação pode ser calculada através de (HAYKIN, 1999):

$$c_{est} = \frac{\sqrt{2W-1}-1}{2(W-1)} \tag{2.17}$$

com W sendo o número de parâmetros a serem estimados.

Para W grande, a expressão pode ser simplificada para:

$$c_{est} = \frac{1}{\sqrt{2W}} \tag{2.18}$$

O objetivo da validação cruzada é estimar os parâmetros da MLP utilizando o conjunto de estimação e avaliar o desempenho de generalização a partir de informações que não foram utilizadas no treinamento, contidas no conjunto de validação.

O erro do conjunto de estimação representa o quanto o resultado produzido pela RNA se ajusta ao conjunto de estimação, independentemente dos dados deste conjunto estarem eivados de ruídos.

A quantidade de neurônios da camada oculta permite controlar o nível de aproximação entre os resultados produzidos pela RNA e o conjunto de estimação. Como ilustração considere o caso onde 18 pontos simulam a função seno. O conjunto de treinamento foi dividido em 14 pontos para o conjunto de estimação e 4 pontos para o conjunto de validação. Para explorar a questão do ruído no conjunto de treinamento, alguns deslocamentos foram inseridos propositalmente. A figura 2.8 mostra o efeito da quantidade de neurônios sobre o treinamento. Neste caso, o valor desejado é aquele que consta no conjunto de estimação, enquanto que o calculado é o resultante da MLP.

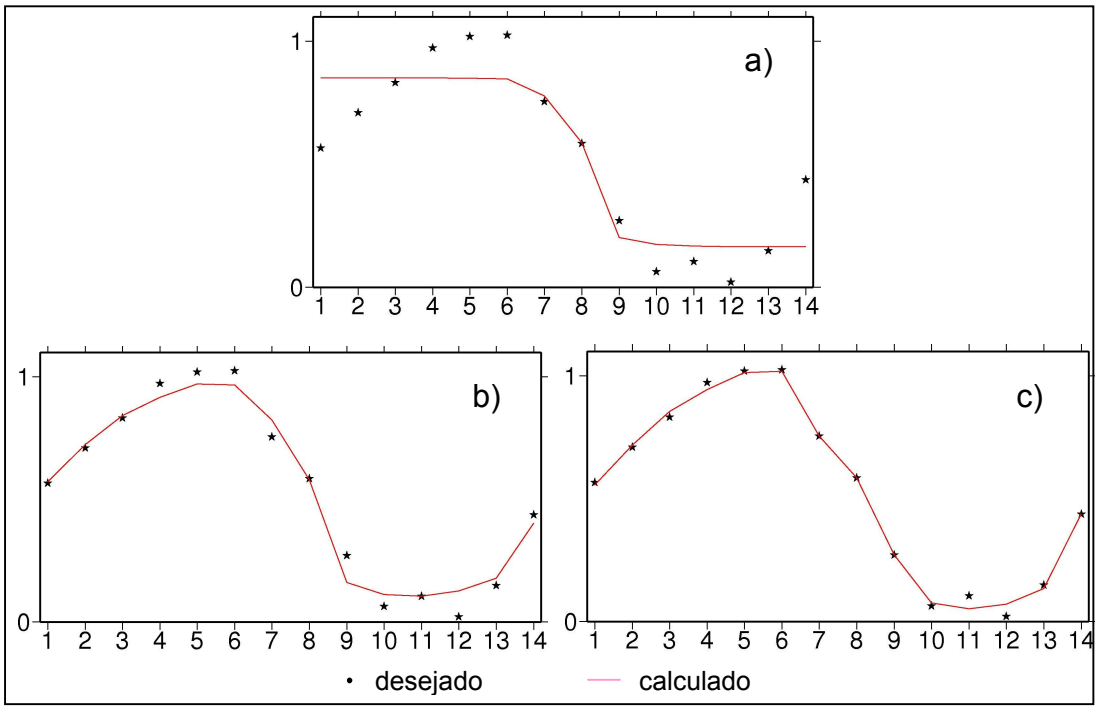

Figura 2.8 - Efeito da quantidade de neurônios na camada oculta sobre o treinamento
(a) 1 neurônio, b) 2 neurônios e c) 22 neurônios)

Verifica-se que quanto maior o número de neurônios da camada oculta, melhores ajustados ao conjunto de estimação são os resultados produzidos pela MLP.

Uma análise do comportamento das diferenças médias quadráticas (RMS) calculadas entre os valores calculados pela RNA e os valores contidos no conjunto de estimação, doravante denominado como RMS do conjunto de estimação, bem como da RMS das diferenças calculadas em função dos valores calculados pela RNA e os valores contidos no conjunto de validação, denominado como RMS do conjunto de validação no decorrer do texto, é essencial na avaliação da RNA. A figura 2.9 mostra o comportamento da RMS dos conjuntos de estimação e validação para o caso representado na figura 2.8.

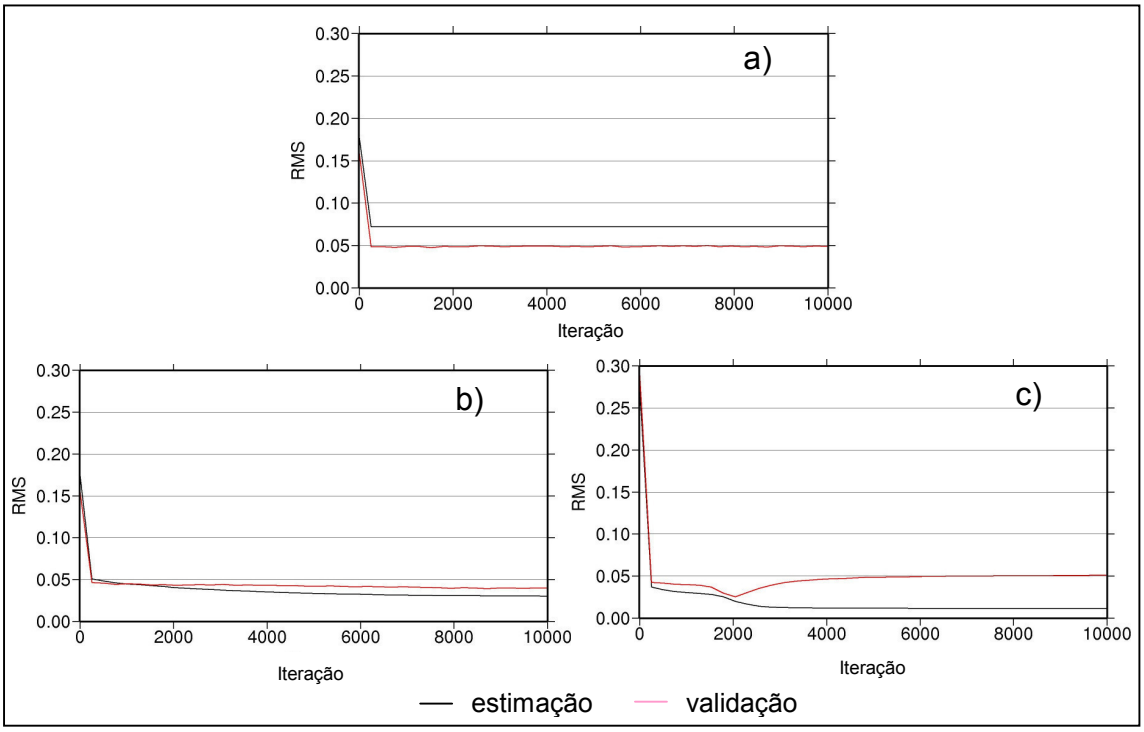

Figura 2.9 – Comportamento da diferença média quadrática dos conjuntos de estimação e validação (a) 1 neurônio, b) 2 neurônios e c) 22 neurônios)

Observa-se que no início do treinamento, a RMS do conjunto de estimação possui valor elevado, a qual vai diminuindo conforme as épocas vão sendo processadas. Verifica-se que quanto maior a quantidade de neurônios, menor o valor da RMS.

A curva da RMS do conjunto de validação para o caso a) apresenta comportamento similar à curva da RMS do conjunto de estimação, mas com menor valor. Verifica-se ainda que após um determinado número de épocas, a RMS permanece em um patamar. No caso b), a curva da RMS do conjunto de validação melhora com relação ao caso a), sendo o caso assumido como ideal. No caso c), a RMS do conjunto de validação diminui até atingir um mínimo e começa a aumentar. Esta inflexão da curva mostra que os resultados da RNA estão se ajustando aos ruídos do conjunto de treinamento, o que é denominado de *overfitting*.

Portanto, desde que se esteja adotando a topologia mínima, o processo pode ser encerrado quando o valor da RMS do conjunto de validação for menor do que um determinado limite ou a quantidade de épocas de processamento for igual a um determinado valor.

Outro procedimento que pode ser adotado é iniciar o treinamento com um número de neurônios acima do ideal e encerrar o treinamento no ponto em que a curva de validação atingir o mínimo, evitando o treinamento excessivo (*over training*). Este procedimento se chama parada antecipada.

Além de auxiliar na definição de um critério para encerrar o processamento, verifica-se que a validação cruzada possibilita a definição da quantidade de neurônios ocultos que produz a melhor generalização.

A complexidade do modelo também pode ser controlada através da adição de um termo de penalização à função de custo. Neste caso, o grau de regularização é controlado aplicando-se uma escala através de um parâmetro ajustável (BISHOP, 2008).

2.2.1.4 Processamento paralelo

Dependendo do problema a ser tratado, o treinamento da MLP pode ser um processo que demora horas ou, até mesmo, dias. Visando acelerar este processo, o algoritmo de treinamento pode ser programado de forma a realizar processamento paralelo.

As unidades de processamento gráfico (GPU – *Graphics Processing Unit*) são projetadas para processamentos de alto desempenho, onde operações repetidas são comuns. Portanto, tais *hardwares* possuem arquitetura de processamento paralelo, tornando-os mais eficientes que a unidade central de processamento (CPU – *Central Processing Unit*) (STEINKRAU; SIMARD; BUCK, 2005; JANG; PARK; JUNG, 2008).

Uma comparação entre o tempo de treinamento usando e não usando GPU mostra economia de aproximadamente 80% no primeiro caso, comprovando a eficiência deste tipo de processamento (LOPES; RIBEIRO, 2009).

2.2.1.5 Simuladores

Simuladores de RNA são programas desenvolvidos com objetivo de treinar RNA. Há diversos simulares disponíveis na internet, sendo alguns gratuitos e outros não.

Dentre os simuladores mais conhecidos estão o Stuttgart Neural Network Simulator (SNNS). Trata-se de um simulador de RNA desenvolvido na universidade de Sttutgart, cuja licença é do tipo GNU GPL (*General Public License*) (ZELL et al., 1998). O Wilhelm-Schickard-Institute for Computer Science da universidade de Tübingen, Alemanha, desenvolveu uma interface gráfica programada em Java para a versão 4.2 do kernel do SNNS. Esta versão do SNNS é denominada de JavaNNS (FISCHER et al., 2001).

O *back-propagation* original, bem como outros métodos que utilizam o gradiente descendente, tais como o Rprop e o *quickprop*, estão implementados no JavaNNS. No entanto, nenhum dos métodos utiliza informações de segunda ordem.

O *neural network toolbox* é um módulo do Matlab que permite simular RNA. Esta ferramenta possui diversos métodos para treinamento de MLP, incluindo alguns baseados no gradiente descendente, bem como métodos que utilizam informações de segunda ordem, tais como gradiente conjugado e Levenberg-Marquardt. No entanto, trata-se de um produto comercial e não possui licença livre.

Outro simulador que merece destaque é o *Multiple Back-Propagation*, desenvolvido na Universidade de Coimbra. Trata-se de um simulador sob licença GPL que utiliza o *back-propagation* como algoritmo de treinamento. A interface gráfica deste simulador permite acompanhar o desenvolvimento do treinamento no momento em que este está sendo executado. Mas a maior vantagem oferecida por este simulador é que ele possui a opção de utilizar a arquitetura de computação paralela denominada de CUDA (*Compute Unified Device Architecture*), o que permite a utilização de placas de vídeo da fabricante nvidia para realizar o processamento (LOPES; RIBEIRO, 2009).

Pesquisadores do departamento de engenharia elétrica e da computação da Universidade de Auburn, EUA, mantêm uma página na rede mundial de computadores[1] onde são disponibilizadas seis versões de simuladores de RNA desenvolvidos naquele departamento, sendo três delas desenvolvidas em Matlab e as demais, em linguagem C^{++}. Os simuladores de MLP possuem o *back-propagation* e o Levenberg-Marquardt originais, bem como versões modificadas destes algoritmos, visando treinar redes neurais conectadas aleatoriamente, acelerar o processo do treinamento e eliminar o problema de armazenamento, no caso do Levenberg-Marquardt (WILAMOWSKI; YU, 2010a; WILAMOWSKI; YU, 2010b). O simulador de MLP mais recente recebe a denominação de NBN 2.10.

[1] Disponível em:<http://www.eng.auburn.edu/~wilambm/nnt/index.htm>. Acesso em 03 de junho de 2012.

3 MODELAGEM DA ATMOSFERA

As observáveis utilizadas no posicionamento com GNSS são obtidas em função da velocidade e do tempo de propagação dos sinais emitidos pelos satélites. Se tais sinais se propagassem no vácuo, a velocidade de propagação seria igual à velocidade da luz neste meio, cujo valor é encontrado em Petit e Luzum (2010).

No entanto, durante a propagação entre a antena dos satélites e a antena do receptor, os sinais GNSS interagem com partículas eletricamente carregadas, bem como com moléculas e átomos neutros, presentes na atmosfera. Isto causa refração e distúrbios na potência do sinal que provocam variação na velocidade e direção de propagação (LANGLEY, 1998b, SEEBER, 2003).

No vácuo, a trajetória dos sinais GNSS é uma reta, enquanto que em um meio refratário eles fazem uma trajetória curva, conforme mostra, de forma exagerada, a figura 3.1.

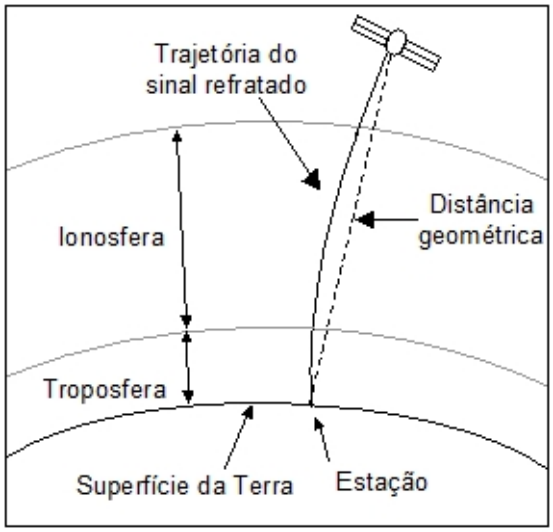

Figura 3.1 – Efeito da refração atmosférica na trajetória dos sinais GNSS

A refração sofrida pelo sinal GNSS é igual à diferença entre a distância medida pelo receptor (S) e a distância geométrica (ρ) entre a antena do satélite s e a antena do receptor r, possuindo o efeito de propagação, que altera a velocidade do sinal, e o efeito de curvatura, que modifica a direção de propagação. Portanto, a refração devido à atmosfera pode ser escrita como:

$$\delta Atm = S - \rho = \int_r^s n dS - \int_r^s d\rho \tag{3.1}$$

onde: n é o índice de refração do meio, dS é uma parte infinitesimal do comprimento da trajetória e $d\rho$ é uma parte infinitesimal da distância geométrica.

A atmosfera terrestre pode ser dividida de várias formas. No caso do posicionamento com GNSS interessa saber se há presença de partículas eletricamente carregadas ou não. Seguindo este critério a atmosfera pode ser dividida em duas camadas: uma neutra e outra eletricamente carregada.

Próximo da superfície da Terra se encontra a camada neutra, que é composta pela troposfera, tropopausa e estratosfera, sendo comum sua designação apenas como troposfera. Acima da camada neutra existe a camada que contém partículas eletricamente carregadas, denominada de ionosfera. Esta última é a camada da atmosfera que mais deteriora o posicionamento por satélites (KLOBUCHAR, 1996).

Portanto, a refração sofrida pelo sinal GNSS ao atravessar a atmosfera pode ser decomposta em refração ionosférica e refração troposférica, conforme a expressão:

$$\delta Atm = Ion + Trop = \left(\int_r^s n_{Ion} dS - \int_r^s d\rho \right) + \left(\int_r^s n_{Trop} dS - \int_r^s d\rho \right) \tag{3.2}$$

com Ion e $Trop$ sendo a refração ionosférica e troposférica, respectivamente e n_{Ion} e n_{Trop} representando o índice de refração da ionosfera e atmosfera neutra.

No intervalo de frequência dos sinais GNSS, a ionosfera se comporta como um meio dispersivo, onde ondas eletromagnéticas com frequências diferentes se propagam com velocidade diferente, o que não ocorre na camada neutra (SEEBER, 2003).

É importante salientar que se por um lado a atmosfera afeta negativamente o posicionamento por satélites, por outro, os sinais GNSS vem sendo utilizados como sensores deste meio.

3.1 ATMOSFERA NEUTRA

A camada da atmosfera mais próxima da superfície terrestre, até aproximadamente 12 km, é caracteriza pela presença de vapor d'água, o qual é responsável pelo atraso troposférico úmido. Além da presença do vapor d'água, a atmosfera neutra é constituída de uma mistura de gases secos, tais como nitrogênio, oxigênio, argônio e dióxido de carbono, dentre outros, que são responsáveis pelo atraso troposférico hidrostático (SPILKER Jr, 1996).

A camada neutra da atmosfera também provoca uma atenuação dos sinais GNSS, principalmente devido ao oxigênio. Além do atraso e da atenuação, irregularidades e turbulências do índice de refração que ocorrem nos primeiros quilômetros de altitude podem causar cintilação (SPILKER Jr, 1996).

Os efeitos da camada neutra da atmosfera podem provocar erros na medida da distância entre as antenas do receptor e do satélite que variam de 2 m a 25 m, dependendo do ângulo de elevação (SPILKER Jr, 1996).

Enquanto a componente seca possui comportamento uniforme, o vapor d'água varia bastante no tempo e no espaço e seu comportamento é de difícil modelagem. No entanto, o vapor d'água é responsável por aproximadamente 10% dos efeitos causados pela troposfera (SPILKER Jr, 1996).

O fato da atmosfera neutra se comportar como um meio não dispersivo no intervalo de frequência dos sinais GNSS implica que seu efeito é o mesmo em qualquer frequência, bem como na pseudodistância ou na fase de batimento da onda portadora, doravante denominada apenas como fase da portadora. A desvantagem dessa característica é que não é possível aproveitar dados de mais de uma frequência para eliminar tal efeito (SEEBER, 2003; HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008).

3.1.1 MODELAGEM

Os efeitos provocados pela passagem dos sinais GNSS pela atmosfera neutra dependem do índice de refração deste meio (n_{Trop}) ao longo da trajetória do sinal. No entanto, devido ao n_{Trop} ser muito próximo da unidade, é mais conveniente expressá-lo por outra quantidade, a refratividade do ar (N_{Trop}), dada por:

$$N_{Trop} = \left(n_{Trop} - 1\right)10^6 \tag{3.3}$$

A refratividade da atmosfera neutra pode ser empiricamente descrita em função da pressão do ar (P) (hPa), temperatura (T) (Kelvin) e da pressão parcial do vapor d'água (e) (hPa) (DAVIS et al., 1985):

$$N_{Trop} = \left(C_1 R_h \rho_{ar}\right) + \left(C_2^{'} \frac{e}{T} Z_w^{-1} + C_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}\right) = N_h + N_u \tag{3.4}$$

onde C_1 = 77,6 KhPa^{-1}, $C_2^{'}$ = 22,10 KhPa^{-1} e C_3 = 3,739 x 10^5 são constantes da refratividade atmosférica, determinadas empiricamente, R_h = 287,0538 J kg^{-1} K^{-1} é a constante específica para os gases hidrostáticos, ρ_{ar} é a densidade do ar, Z_w é a constante de compressibilidade do vapor d'água e N_h e N_u representam as componentes hidrostática e úmida, respectivamente.

A integração da refratividade do ar ao longo do caminho percorrido pelo sinal GNSS nesta camada atmosférica fornece seu efeito na medida de distância, conforme (SEEBER, 2003):

$$Trop = 10^{-6} \int_r^s N_{Trop} dS - \int_r^s d\rho = 10^{-6} \int_r^s N_h dS + 10^{-6} \int_r^s N_u dS \tag{3.5}$$

sendo $N_h = C_1 R_h \rho_{ar}$ e $N_u = C_2^{'} \frac{e}{T} Z_w^{-1} + C_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}$.

Portanto, a componente úmida do atraso troposférico zenital ($Trop_u^Z$) é determinada através da integração numérica da N_u, resultando em:

$$Trop_u^Z = 10^{-6}\int_r^s \left(C_2^{'}\frac{e}{T}Z_w^{-1} + C_3\frac{e}{T^2}Z_w^{-1} \right) dS \tag{3.6}$$

Devido à dificuldade de se medir a refratividade ao longo da trajetória de propagação do sinal, ou até mesmo ao longo da direção zenital, foram desenvolvidos modelos empíricos visando o cálculo do atraso troposférico.

Dentre os modelos empíricos desenvolvidos se destaca o de Hopfield (HOPFIELD, 1969), onde dados de pressão (P_s), temperatura (T_s) e umidade relativa à superfície são necessários. Este modelo é dado por (SEEBER, 2003):

$$Trop_h^Z = 155{,}2 \times 10^{-7}\frac{P_s}{T_s}H_h \tag{3.7}$$

$$Trop_u^Z = 155{,}2 \times 10^{-7}\frac{4810e_s}{T_s^2}H_u \tag{3.8}$$

onde o índice "s" indica que a medida é realizada na superfície terrestre. H_h e H_u representam, respectivamente, a altura das camadas atmosféricas das componentes hidrostáticas e úmida em unidade métrica, dadas por:

$$H_h = 40136 + 148{,}72(T_s - 273{,}16) \tag{3.9}$$

$$H_u = 11000 \tag{3.10}$$

Como pode ser visto na expressão (3.10), a altura da camada úmida é considerada constante no modelo. No entanto, a altura desta camada diminui quanto mais próximo dos pólos, onde pode chegar à aproximadamente 7000 m. Baseado nesta informação, Sapucci (2001) sugere a utilização de uma correção para considerar a variação em latitude, conforme:

$$H_u = 11000 - 44{,}44\,\varphi_{Hu} \tag{3.11}$$

com φ_{Hu} sendo o módulo da latitude em unidade de arco.

Uma aproximação para o termo e_s da expressão (3.8) pode ser obtida através da seguinte expressão (LEICK, 2004):

$$e_s \cong \frac{UR \times e^{-37,2465+0,213166T-0,000256908T^2}}{100} \tag{3.12}$$

onde UR é a umidade relativa do ar (%).

O atraso troposférico hidrostático na direção zenital ($Trop_h^Z$) também pode ser calculado em função da pressão atmosférica na superfície, bem como da latitude e da altitude da estação (h_s), em quilômetros (DAVIS et al., 1985; SAPUCCI; MACHADO; MONICO, 2006):

$$Trop_h^Z = \frac{\left(2,27683157 \times 10^{-3}\right)P_s}{\left(1 - 0,00266\cos 2\varphi - 0,00028h_s\right)} \tag{3.13}$$

$Trop_h^Z$ depende apenas da densidade do ar e a qualidade de sua determinação está diretamente vinculada com a qualidade da medida da pressão atmosférica na superfície. Se a mesma for realizada com precisão de 0,5 hPa, o $Trop_h^Z$ é determinado com 1 mm de precisão (SAPUCCI; MONICO, 2001).

Mendes e Langley (1998) avaliaram alguns modelos empíricos em um conunto de estações distribuídas globalmente e chegaram à conclusão de que o modelo de Saastamoinen é o mais acurado. Além disso, estes pesquisadores verificaram que, com exceção da região equatorial, o modelo de Hopfield original tende a superestimar o atraso zenital. Este resultado foi confirmado por Schüller (2001).

Sapucci e Monico (2001) realizaram um experimento onde o atraso zenital calculado com os modelos de Hopfield e Saastamoinen foram comparados com o calculado a partir de dados GPS no município de Bauru, no interior do estado de São Paulo. Informações meteorológicas observadas na superfície terrestre

foram utilizadas nos cálculos. Ambos os modelos forneceram resultados similares.

Devido à alta variabilidade, no espaço e no tempo, da pressão parcial do vapor d'água, a componente úmida é determinada com qualidade limitada ao se utilizar medidas meteorológicas na superfície, mostrando uma limitação na utilização de modelos empíricos para este fim.

O emprego de algum modelo empírico para estimar o $Trop^z$ não é capaz de modelar totalmente tal atraso. Portanto, para se obter resultados mais acurados, o resíduo resultante pode ser estimado através das medidas GNSS na forma de um escalar ou de resíduo do atraso zenital utilizando dados de várias horas, uma estimação por hora ou estimação estocástica com Filtro de Kalman (LANGLEY, 1998b).

Outra opção é incluir o $Trop^z$ como um parâmetro adicional a ser estimado no ajustamento das observações GNSS, juntamente com os demais parâmetros de interesse. Neste caso, o atraso troposférico pode ser escrito como (PETIT; LUZUM, 2010):

$$Trop = Trop_h^Z m_h(ele) + Trop_u^Z m_u(ele) + m_g(ele)(G_N \cos(az) + G_E \operatorname{sen}(az)) \quad (3.14)$$

na qual m_h, m_u e m_g representam as funções de mapeamento das componentes hidrostática e úmida e do gradiente do atraso horizontal, respectivamente, G_N e G_E são as componentes do gradiente e az é o azimute em que o sinal está sendo recebido

3.1.2 MODELOS DE PREVISÃO NUMÉRICA DO TEMPO

Bons resultados vem sendo obtidos com a utilização de modelos de PNT para prever o $Trop^z$. A grande vantagem de se utilizar esta opção é que ela pode ser empregada em tempo-real (SCHUELER; HEIN; EISSFELLER, 2000; SAPUCCI; MACHADO; MONICO, 2006; ALVES et al., 2006; ALVES, MONICO, DALBELO, 2009, ALVES e MONICO, 2011).

Esta modelagem permite estimar as quantidades meteorológicas necessárias para calcular o $Trop^z$ em uma grade pré-definida considerando todos os níveis verticais adotados pelo modelo. O CPTEC/INPE tem disponibilizado, desde meados de 2004, um serviço de previsão do $Trop^z$ para a América do Sul.

Inicialmente tais previsões foram calculadas utilizando um modelo global com resolução espacial de 100 km x 100 km e 28 níveis verticais (SAPUCCI; MACHADO; MONICO, 2006; INPE, 2011). Desde o início de 2008, as previsões estão sendo determinadas a partir de um modelo regional com resolução espacial de 20 km x 20 km e 42 níveis verticais, proporcionando melhorias de até 55% na previsão (SAPUCCI et al., 2008).

A componente hidrostática do $Trop^z$ disponibilizada pelo CPTEC/INPE é calculada através da expressão (3.13). Neste caso, a P_s é obtida do modelo de PNT. Quanto à componente úmida, sua determinação é realizada através da integração numérica da expressão (3.6) considerando os 42 níveis (SAPUCCI et al., 2008, INPE, 2011).

Os atrasos são atualizados duas vezes ao dia. Enquanto a primeira atualização, calculada com dados do modelo das 00:00 h (TUC – Tempo Universal Coordenado), ocorre entre 7:30 h e 8:30 h da manhã, a segunda atualização é realizada entre 19:30 h e 20:30 h, onde dados do modelo das 12:00 h (TUC) são utilizados (INPE, 2011). É importante destacar que os atrasos calculados estão referenciados ao mesmo sistema de tempo do modelo.

O CPTEC/INPE mantém um acervo histórico com arquivos binários que contêm os valores das componentes hidrostática e úmida do $Trop^z$ para todos os pontos da grade no domínio do modelo, o qual se encontra disponível para os usuários em <http://satelite.cptec.inpe.br/zenital/>.

Neste caso, para se obter o $Trop^z$ em uma posição qualquer pode-se adotar a interpolação bilinear do atraso dos quatro pontos da grade do modelo mais próximos do local desejado. Os atrasos calculados para a grade do modelo estão referenciados a um modelo digital de elevação (MDE). Portanto, o atraso

a ser interpolado deve ser reduzido para a altitude da estação através da equação hipsométrica, dada por (SAPUCCI et al., 2008):

$$Trop_{ant}^{z} = Trop_{\mathrm{mod}}^{z} \times e^{\left(-\frac{H_{ant}-H_{\mathrm{mod}}}{H_u}\right)} \tag{3.15}$$

onde $Trop_{\mathrm{mod}}^{z}$ é o $Trop^{z}$ interpolado dos quatro pontos da grade do modelo e H_{ant} e H_{mod} representam, respectivamente, a altitude da estação e a altitude do modelo. Esta última pode ser obtida através de uma interpolação bilinear do valor das altitudes contidas nos quatro pontos mais próximos da grade do MDE empregado pelo modelo de PNT.

Um programa, com código fonte escrito em Fortran, que realiza a interpolação bilinear para uma lista de estações de interesse incluindo a redução para a altitude das estações também é disponibilizado pelo CPTEC/INPE. Tal programa utiliza os arquivos binários de atraso das componentes úmida e seca como entradas e pode ser copiado a partir da página da internet do referido serviço <http://satelite.cptec.inpe.br/zenital/>.

3.1.3 FUNÇÕES DE MAPEAMENTO

Diversas funções de mapeamento foram desenvolvidas nas últimas décadas, tais como Chao (1974), Herring (1992) e a *Niell Mapping Functions* (NMF) (NIELL, 1996). Estas funções de mapeamento são independentes do azimute da observação e estão fundamentadas na fração contínua em termos de 1/sen(ele), introduzida por Marini (1972), conforme expressão (3.16).

$$m(ele) = \frac{1 + \dfrac{a_1}{1 + \dfrac{a_2}{1 + a_3}}}{\mathrm{sen}(ele) + \dfrac{a_1}{\mathrm{sen}(ele) + \dfrac{a_2}{\mathrm{sen}(ele) + a_3}}} \tag{3.16}$$

sendo a_1, a_2 e a_3 os coeficientes ajustados a uma atmosfera padrão ou a dados de radiossonda. Conjuntos diferentes de coeficientes são necessários para as componentes hidrostática e úmida.

Mais recentemente foram desenvolvidas algumas funções de mapeamento cujos coeficientes são ajustados aos dados de modelos numéricos do tempo, sendo elas a *Isobaric Mapping Functions* (IMF) (NIELL, 2000) e a *Vienna Mapping Functions* (VMF1) (BOEHM; SCHUH, 2004; BOEHM; WERL; SCHUH, 2006).

Outra função de mapeamento desenvolvida recentemente é a *Global Mapping Functions* (GMF). Trata-se de uma função de mapeamento empírica obtida a partir da expansão em série de funções harmônicas esféricas até grau e ordem 9 do valor médio do coeficiente a_1 e de sua amplitude anual. Os coeficientes foram calculados através da técnica denominada *raytrace* a partir de 3,3° de elevação e reduzidos ao nível do mar. Dados de médias mensais de perfis de pressão, temperatura e umidade de uma grade global de 15° x 15° de três anos (setembro de 1999 a agosto de 2002) foram empregados neste processo. As entradas do modelo são latitude, longitude e altitude da estação e dia do ano (BOEHM et al., 2006).

Comparações entre as funções de mapeamento NMF, GMF, IMF e VMF1 com as obtidas com dados de perfis de radiossonda revelaram que a função de mapeamento que produz melhores resultados é a VMF1 (NIELL, 2006). Por outro lado, é mais fácil se desenvolver um programa de computador para a GMF e ela é mais consistente com a VMF1 do que a NMF.

3.1.4 OBTENÇÃO DAS GRANDEZAS METEOROLÓGICAS NA SUPERFÍCIE

As grandezas meteorológicas na superfície, necessárias para a modelagem do atraso troposférico, podem ser obtidas a partir de medições provenientes de equipamentos meteorológicos, da redução de grandezas padrão no nível médio dos mares, de modelos de PNT ou de modelos empíricos (SAPUCCI, 2001; SAPUCCI; MACHADO; MONICO, 2006; BOEHM; HEINKELMANN; SCHUH, 2007).

Dentre os métodos citados, a utilização de modelos empíricos se destaca, pois proporciona medidas de pressão e temperatura com precisão melhor do que utilizar a redução de grandezas padrão e maior facilidade de uso, se comparado com a utilização de equipamentos meteorológicos ou modelos de PNT.

Recentemente, um modelo empírico global visando o cálculo da pressão e temperatura, denominado de GPT (*Global Pressure and Temperature*) foi desenvolvido na Universidade de Viena. Na determinação deste modelo foram utilizados dados de médias mensais de perfis de pressão e temperatura de uma grade global de 15° x 15° de três anos (setembro de 1999 a agosto de 2002). Tais dados foram reduzidos ao nível médio dos mares e tiveram suas médias e amplitudes anuais calculadas com deslocamento de fase fixada em 28 de janeiro. As quatro grades resultantes foram expandidas em uma série de funções harmônicas esféricas de grau e ordem nove (BOEHM; HEINKELMANN; SCHUH, 2007).

3.2 IONOSFERA

3.2.1 DESCRIÇÃO

A ionosfera é a camada da atmosfera terrestre onde pode existir ionização suficiente para alterar a propagação de ondas de rádio. A existência de íons e elétrons livres na atmosfera se deve, principalmente, ao processo de fotoionização dos gases provocada pela incidência de radiação solar no espectro do ultravioleta extremo e ao processo de recombinação dos elétrons e íons que ocorre na parte da atmosfera não iluminada pelo Sol (DAVIES, 1990).

De maneira simplificada, a ionosfera é delimitada entre as altitudes de 50 km e 1000 km. Contudo, as partículas ionizadas se estendem ao espaço interplanetário. Portanto, o efeito da ionosfera nos sinais GNSS é igual à combinação do efeito resultante das partículas presentes na atmosfera e no espaço interplanetário (SEEBER, 2003).

A densidade de elétrons livres é proporcional ao conteúdo total de elétrons livres contidos em uma coluna de seção transversal de 1 m^2 que se estende ao

longo do caminho entre o satélite e o receptor, denominado de TEC. A unidade de medida do TEC é el/m^2.

O TEC possui magnitude superior à 10^{16} el/m^2, sendo conveniente a adoção de uma unidade de medida compatível, denominada de TECU. Para converter o TEC para TECU divide-se o valor do primeiro por 10^{16}.

A modelagem regional da ionosfera pode se valer do conhecimento do TEC na direção vertical (VTEC). Neste caso, é necessário empregar uma função de mapeamento para converter o TEC de direções inclinadas para a vertical.

A densidade de elétrons livres varia conforme a altitude e seu valor de pico normalmente ocorre entre 200 km e 400 km de altitude (DAVIES, 1990; HÉRNANDEZ-PAJARES et al., 2011). A figura 3.2 mostra a variação da densidade de elétrons livres com relação à altitude para o município de Assis, localizado na região oeste do estado de São Paulo (latitude=-22,664° e longitude=-50,404°), às 14:00 h (horário local) do dia 24/06/2009 utilizando o modelo IRI 2007.

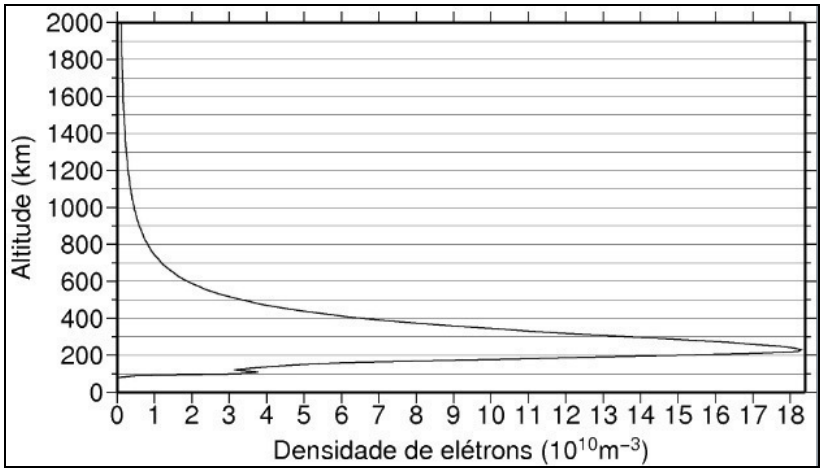

Figura 3.2 - Densidade de elétrons livres x altitude (IRI 2007)

A atividade solar, a estação do ano, a hora do dia e o campo geomagnético também são responsáveis pela variação da densidade de elétrons livres na ionosfera, que ainda está sujeita a uma série de distúrbios irregulares e aleatórios (DAVIES, 1990; KOMJATHY, 1997; SCHAER,1999; CAMARGO,1999; ODIJK, 2002; FONSECA Jr, 2002).

A atividade solar vem sendo monitorada através da observação das manchas solares (BERGHMANS et al., 2002), cuja variação mais significativa ocorre em ciclos de aproximadamente 11 anos. A figura 3.3 traz uma série histórica do número de manchas solares.

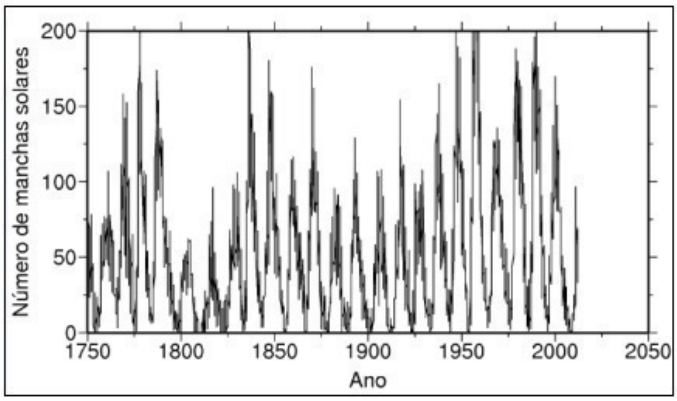

Figura - 3.3 Série histórica das médias mensais do número de manchas solares (NOAA, 2012a)

Além do ciclo de 11 anos, é possível perceber a variação em intensidade de cada ciclo. Verifica-se, também, que o último pico de atividade solar ocorreu por volta de 2001. O próximo pico de atividade solar deve ocorrer em meados de 2013 e a previsão sugere que sua intensidade será menor que a do último ciclo solar (JENSEN; MITCHEL, 2011).

A observação das manchas solares representa o maior conjunto de informação sobre a atividade solar, possuindo grande valor histórico, mas vem sendo substituído pela medida do fluxo solar na frequência de 2800 MHz, mais conhecida pelo comprimento de onda, que, nesta frequência é de 10,7 cm (IPS, 2011). A medida do fluxo solar é dada em unidades de fluxo solar (sfu – *solar flux units)*, onde 1 sfu é igual a $10^{-22}Wm^{-2}Hz^{-1}$ (NRCAN, 2012).

A Administração Nacional do Oceano e Atmosfera dos Estados Unidos da América (NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*) mantém um serviço onde séries históricas do índice 10,7 cm são disponibilizadas (NOAA, 2012b).

A inclinação do eixo de rotação da Terra com relação ao plano da eclíptica faz com que a incidência dos raios solares varie conforme a estação do ano. No

Brasil, o pico ocorre nos equinócios de outono e primavera e apresenta valores mais modestos durante o solstício de inverno (FONSECA Jr, 2002).

A densidade de elétrons livres em um determinado local apresenta variações diárias em função do movimento aparente do Sol. A máxima produção no território brasileiro ocorre por volta das 14:00 h (horário local) (FONSECA Jr, 2002).

A figura 3.4 mostra o comportamento do VTEC de todos os satélites rastreados pela estação BRAZ, da RBMC, para os dias 19 de março de 2001 (alta atividade solar) e 22 de junho de 2009 (baixa atividade solar).

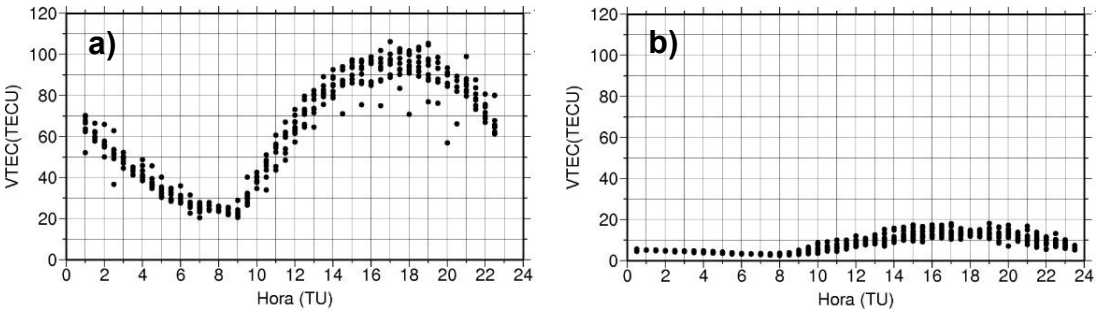

Figura 3.4 – Influência da atividade solar e do movimento aparente do Sol sobre o VTEC da estação BRAZ (a) = alta atividade solar e b) = baixa atividade solar)

Além de mostrar a variação do VTEC em alta e baixa atividade solar, a figura 3.4 exemplifica o comportamento desta grandeza em função do movimento aparente do Sol.

A variação em latitude da densidade de elétrons livres está vinculada ao campo geomagnético. Neste caso, três regiões geográficas podem ser definidas em função do equador geomagnético, as quais são conhecidas como de altas latitudes (auroral), de latitudes médias e equatorial, conforme ilustra a figura 3.5.

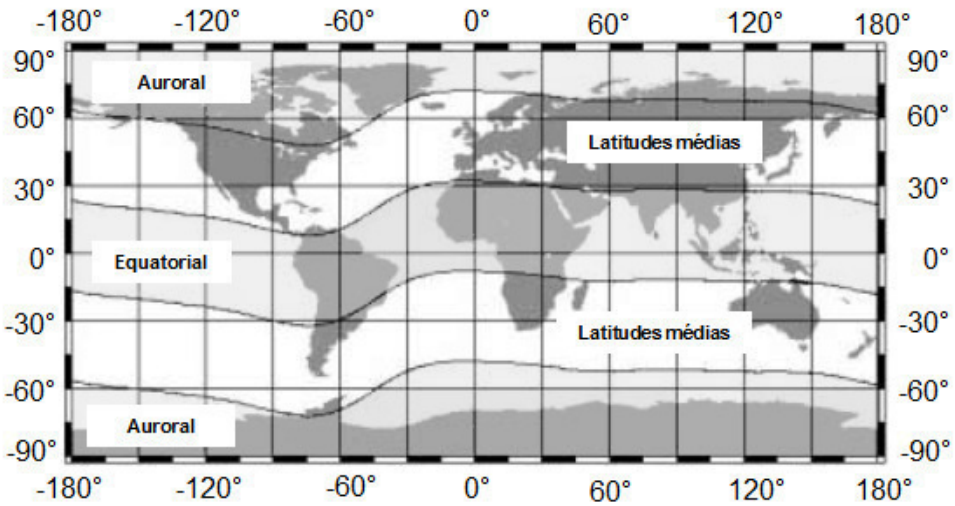

Figura 3.5 - Regiões da ionosfera (Adaptado de Fonseca Jr. 2002)

Especial atenção deve ser dada à região equatorial, pois, conforme visto na figura 3.5, o território brasileiro está quase que totalmente inserido nela. Esta região está localizada entre as latitudes 30° sul e 30° norte do equador geomagnético. Entre as latitudes 15° e 20° de cada lado do equador geomagnético ocorre a anomalia equatorial, onde, normalmente, se encontra a maior densidade de elétrons livres (LEICK, 2004).

Na região equatorial ocorrem o eletrojato equatorial, que é uma corrente forte localizada em uma faixa estreita do equador geomagnético, e a cintilação, provocada por irregularidades nas características físicas da ionosfera que causam variações na fase e amplitude do sinal. A cintilação na amplitude causa degradação na potência do sinal e pode provocar perda de ciclos, o que prejudica o processo de estimação das coordenadas (ODIJK, 2002; HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGER; WASLE, 2008).

Se for considerado um determinado instante, será verificada uma variação da densidade de elétrons livres em longitude causada principalmente pela posição aparente do Sol. A figura 3.6 mostra um mapa global do VTEC extraído do GIM produzido pelo IGS para o dia 21/03/2011 às 18 horas TU.

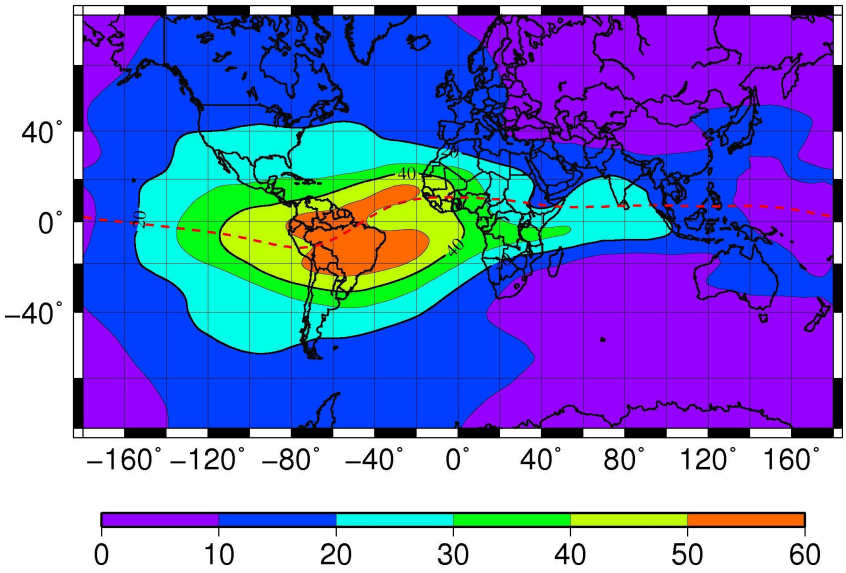

Figura 3.6 – Variação global do VTEC

Verifica-se que a maior concentração de elétrons livres ocorre na região da Terra iluminada pelo Sol e próxima da linha do equador geomagnético. Além disso, é possível perceber a ocorrência da anomalia equatorial sobre o oceano atlântico próximo à América do Sul.

A presença de partículas eletricamente carregadas na ionosfera também está ligada ao fato do Sol emitir um fluxo contínuo das mesmas em direção ao espaço interplanetário, conhecido como vento solar. Normalmente o vento solar sofre uma deflexão ao entrar em contato com o campo geomagnético (magnetosfera) e não exerce muita influência na ionosfera.

No entanto, a ejeção de massa coronal (CME – *Coronal Mass Ejection*) provoca alterações no vento solar que podem causar uma “re-conexão” entre o campo magnético do Sol e o campo geomagnético. Este fenômeno é conhecido como tempestade geomagnética, o qual facilita a entrada de partículas eletricamente carregadas na região auroral. Esta situação provoca a formação de ventos na direção da região equatorial e ondas de gravidade de grande amplitude que ajudam no transporte de energia para a região equatorial, provocando variações irregulares na densidade de elétrons livres de forma global (DAVIES, 1990; LEICK, 2004).

As variações regulares do campo geomagnético são provocadas por alterações regulares do vento solar. Enquanto que as variações irregulares são causadas

pela interação do vento solar com a magnetosfera, da magnetosfera com ela mesma, da magnetosfera com a ionosfera e da ionosfera com ela mesma (NOAA, 2011).

Diversos índices foram criados para descrever as variações irregulares do campo geomagnético (MAYAUD, 1980). Dentre os diversos índices estabelecidos o Dst (*Disturbance Storm Time*) se destaca na identificação e na quantificação de tempestades geomagnéticas. Este índice é derivado a partir de medições realizadas em quatro observatórios localizados perto da região do equador geomagnético, conforme ilustra a figura 3.7 (IAGA, 1991).

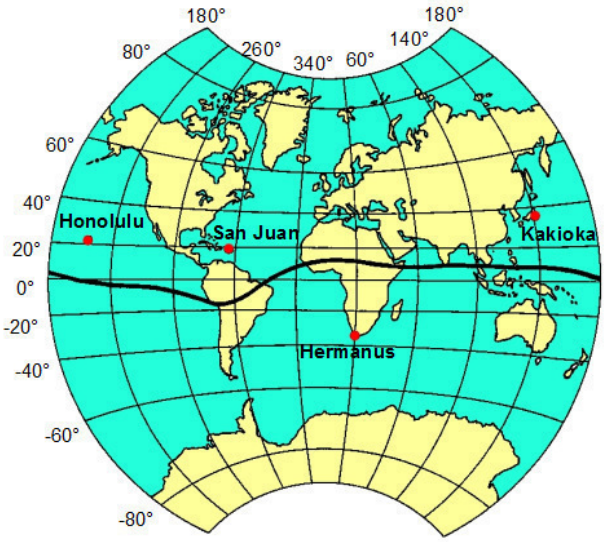

Figura 3.7 – Distribuição dos observatórios utilizados na derivação do índice Dst (Adaptado de IAGA (1991))

A unidade de medida deste índice é nano tesla (nT). A Universidade de Kyoto possui um serviço de distribuição de dados para fins de estudos relacionados com o campo geomagnético onde o índice Dst, dentre outros, pode ser obtido (KYOTO UNIVERSITY, 2012).

Na ausência de tempestades geomagnéticas os valores do índice Dst permanecem em um intervalo padrão perto de 0 nT. Quando ocorrem tempestades geomagnéticas este índice apresenta um comportamento típico, onde três fases podem ser identificadas: a inicial, a principal e a de recuperação. A primeira fase é caracterizada pelo aumento no valor do índice Dst até um pico. Após este pico, ocorre uma queda brusca no valor deste

índice até um determinado valor mínimo, o que distingue a fase principal. Nesse período os valores do TEC normalmente são reduzidos abaixo dos seus valores médios (FEDRIZZI, 2003[2] *apud* Dal POZ; CAMARGO, 2006). Durante a fase de recuperação, os valores do índice Dst começam a aumentar até que o valor se aproxime de 0 nT novamente (MAYAUD, 1980). A figura 3.8 ilustra o comportamento do índice Dst, obtido de Kyoto University (2012), na ocorrência de uma tempestade geomagnética entre os dias 330 e 335 de 1990.

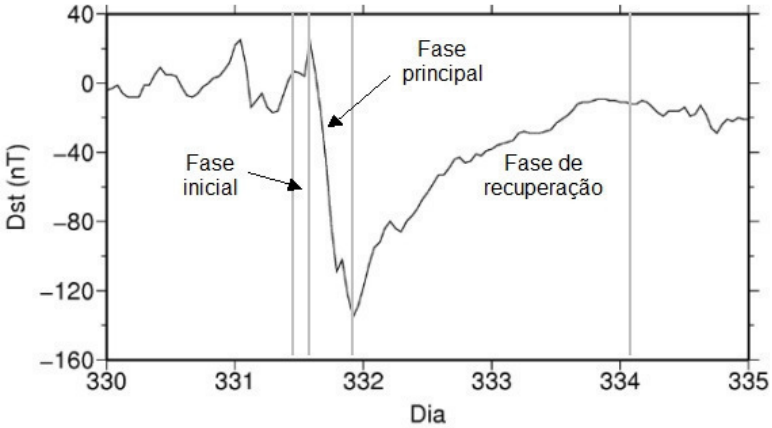

Figura 3.8 – Comportamento do índice Dst na ocorrência de tempestade geomagnética

A intensidade das tempestades geomagnéticas pode ser classificada em função do índice Dst. Loewe e Prölss (1997) propõem a classificação conforme tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Classificação da intensidade das tempestades geomagnéticas a partir do índice Dst

Classificação	Dst (nT)
Fraca	–50 a –30
Moderada	–100 a –50
Forte	–200 a –100
Severa	–350 a –200
Muito severa	< 350

Uma escala descrevendo os possíveis efeitos das condições geomagnéticas, dentre outros, sobre sistemas tecnológicos pode ser encontrada em (POPPE, 2000). Avaliações sobre a influência de tempestades geomagnéticas no

[2] FEDRIZZI, M. **Estudo do efeito das tempestades magnéticas sobre a ionosfera utilizando dados do GPS.** 2003. 223p. Tese (Doutorado) - Pós-graduação em Geofísica Espacial, Divisão de Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003.

posicionamento relativo e absoluto no Brasil podem ser encontradas em (Dal POZ; CAMARGO, 2006; MATSUOKA, CAMARGO; BATISTA, 2008).

Outros fenômenos que ocorrem na ionosfera estão associados com ondas de gravidade atmosféricas (AGW - *Atmospheric Gravity Wave*), as quais podem ser classificadas de acordo com seus períodos como: distúrbios ionosféricos em movimento (TID – *Travelling Ionospheric Disturbance*) com períodos de alguns minutos até várias horas, ondas globais com período de 24 horas e ondas planetárias com períodos mais longos. Os TID ainda são subdivididos em TID de larga e média escala, com períodos de 10 minutos a 60 minutos e de 60 minutos a várias horas, respectivamente (HOCKE; SCHLEGEL, 1996). Estudos realizados durante tempestades geomagnéticas revelaram que os distúrbios podem alcançar amplitude de 15 TECU a 45 TECU na região equatorial (WANG et al., 2007).

3.2.2 MODELAGEM

Conforme mostra a expressão (3.2), a refração causada pela ionosfera depende do índice de refração deste meio. Desenvolvendo a fórmula de Appleton-Hartree até terceira ordem, obtém-se uma aproximação do índice de refração para a ionosfera. Integrando o resultado deste desenvolvimento no intervalo da distância percorrida pelo sinal ao atravessar a ionosfera, na direção satélite-receptor, com relação à S, obtém-se o atraso devido à refração ionosférica. Os atrasos devido à refração ionosférica na pseudodistância e na fase da portadora são, respectivamente, representados por (PETIT; LUZUM, 2010):

$$Ion_{PD,i} = \frac{s_1}{f_i^2} - 2\frac{s_2}{f_i^3} - 3\frac{s_3}{f_i^4} \tag{3.17}$$

$$Ion_{\phi,i} = -\frac{s_1}{f_i^2} - \frac{s_2}{f_i^3} - \frac{s_3}{f_i^4} \tag{3.18}$$

onde f é a frequência do sinal em Hz e s_1, s_2 e s_3 são os coeficientes referentes aos efeitos de primeira, segunda e terceira ordens, respectivamente, dados por:

$$s_1 = 40{,}3\int_s^r N_e dS \tag{3.19}$$

$$s_2 = 1{,}1284 \cdot 10^{12}\int_s^r N_e B\cos\theta dS \tag{3.20}$$

$$s_3 = 812\int_s^r N_e^2 dS \tag{3.21}$$

com N_e representado a densidade de elétrons livres existente no percurso do sinal, B, o módulo do vetor de indução geomagnética e θ sendo o ângulo entre B e a direção de propagação do sinal.

Das expressões (3.17) e (3.18), verifica-se que os efeitos de primeira ordem possuem a mesma magnitude tanto para a pseudodistância quanto para a fase da portadora. No entanto, o sinal negativo da expressão (3.18) mostra que a fase da portadora sofre um avanço, enquanto que a velocidade da pseudodistância, dada pela velocidade de grupo, é reduzida.

Odijk (2002) realizou um experimento para avaliar o atraso provocado pelos efeitos ionosféricos de primeira, segunda e terceira ordens na fase da portadora das frequências L1, L2 e L5 transmitidas por quatro satélites GPS, com ângulo de elevação menor que 15°, rastreados por quatro estações, cujas coordenadas geodésicas são apresentas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Coordenadas geodésicas das estações rastreadas

Estação	Latitude	Longitude
1	54°	5°
2	50,5°	5°
3	52,5°	3,5°
4	52,5°	3,5°

Neste experimento, os dados foram coletados durante o dia e em um período de alta atividade solar, com valor do VTEC médio de aproximadamente 100 TECU. A tabela 3.3 traz o atraso provocado pelos efeitos ionosféricos de

primeira, segunda e terceira ordens na fase da portadora das frequências L1, L2 e L5 para o caso em questão.

Tabela 3.3 - Atraso ionosférico de primeira, segunda e terceira ordens na fase da portadora (Fonte: ODIJK, 2002)

Satélite	Estação	1ª ordem (m)			2ª ordem (mm)			3ª ordem (mm)		
		L1	L2	L5	L1	L2	L5	L1	L2	L5
1	1	-36,710	-60,460	-64,831	-3	-7	-8	-1	-2	-2
1	2	-47,013	-77,428	-84,307	0	-1	-1	-1	-2	-2
2	1	-40,396	-66.530	-72.441	-18	-38	-43	-1	-2	-3
2	2	-30,697	-50,556	-55,048	-15	-32	-36	0	-1	-2
3	3	-38,526	-63,509	-69,152	-5	-10	-11	-1	-2	-2
3	4	-43,705	-71,979	-78,374	-4	-8	-9	-1	-2	-2
4	3	-40,396	-66,530	-72,441	-13	-28	-31	-1	-2	-2
4	4	-35,404	-58,308	-63,488	-13	-27	-30	-1	-2	-3

A justificativa para os efeitos de 2ª ordem serem maiores nas observações envolvendo os satélites 2 e 4 está associado à latitude magnética do ponto ionosférico (IPP – *Ionospheric Piercing Point*) deles ser de aproximadamente 45°, enquanto que a latitude magnética do IPP dos satélites 1 e 3 é em torno de 60°.

A redução dos efeitos da ionosfera nos sinais GNSS pode ser realizada através de combinações lineares entre as observações de uma ou de duas frequências, denominadas de GRAPHIC (*GRoup And PHase Ionospheric Combination*) e livre da ionosfera (*ion-free*), respectivamente. O desempenho da primeira é limitado devido aos ruídos da pseudodistância (YUNCK, 1996).

No caso da estação de referência virtual, é necessário que os efeitos provocados pela ionosfera sejam estimados por modelos apropriados. No entanto, a combinação livre da ionosfera é utilizada com frequência no processo de estimação do efeito causado pela refração da atmosfera neutra das estações da rede de referência (WANNINGER,1997; HU et al., 2003).

3.2.3 MODELAGEM DOS EFEITOS DE PRIMEIRA ORDEM

Conforme visto na tabela 3.3, os efeitos de primeira ordem são responsáveis por mais de 99,9% do atraso provocado pela passagem do sinal GNSS através da ionosfera, sendo proporcional à densidade de elétrons livres no caminho percorrido pelo sinal e inversamente proporcional à frequência.

A modelagem dos efeitos de segunda e terceira ordem, bem como seus efeitos no posicionamento com GNSS, é um assunto que vem despertando interesse de vários pesquisadores (FRITSCHE et al., 2005; HERNÁNDEZ-PAJARES et al 2007; MARQUES et al., 2009; PIREAUX et al., 2010). Porém, Odijk (2002) mostra que na geração de estações de referência virtuais tal modelagem pode ser desprezada.

Considerando apenas os efeitos de primeira ordem, as expressões (3.17) e (3.18) podem ser simplificadas em:

$$Ion_{PD,i} = \frac{40{,}3TEC}{f_i^2} \tag{3.22}$$

$$Ion_{\phi,i} = -\frac{40{,}3TEC}{f_i^2} \tag{3.23}$$

A tabela 3.4 traz o valor do atraso provocado por 1 TECU nas três frequências civis do GPS.

Tabela 3.4 - Atraso provocado por 1 TECU nas frequências civis do GPS

Frequência	Atraso (m)
L1	-0,163
L2	-0,267
L5	-0,291

O TEC pode ser calculado através de modelos empíricos, como o *International Reference Ionosphere* (IRI), o *Low-latitude IONosphere model* (LION), o *Parameterized Ionospheric Model* (PIM) e o *Sheffield University Plamasphere Ionosphere Model* (SUPIM) (BILITZA, 1990; BILITZA, 2001; BILITZA; REINISCH, 2007; BAILEY; BALAN; SU, 1997; BITTENCOURT et al., 2007; DANIELL et al., 1995).

Dentre os modelos empíricos destaca-se o modelo desenvolvido por Klobuchar (1987), cujos coeficientes são enviados através da mensagem de navegação dos satélites GPS. Uma avaliação deste modelo durante alta atividade solar mostrou que ele reduz em cerca de 53 % os efeitos da ionosfera na pseudodistância para a estação da RBMC localizada em Presidente Prudente (AGUIAR et al., 2003).

Além dos modelos empíricos, o TEC pode ser calculado regionalmente através de observações de uma rede de estações GNSS equipada com receptores capazes de rastrear os sinais GNSS em duas frequências.

Considerando um receptor r rastreando um determinado satélite s, as expressões das observações pseudodistância e fase da portadora, podem ser representadas por:

$$PD_{r,i}^{s} = \rho_r^s + c\left(dt^s - dt_r\right) + Ion_{r,i}^{s} + Trop_r^s + IF_{r,i} + IF_i^s + Orb^s + \varepsilon_{PDi} \tag{3.24}$$

$$\lambda_i \phi_{r,i}^{s} = \lambda_i N_i + \rho_r^s + c\left(dt^s - dt_r\right) - Ion_{r,i}^{s} + Trop_r^s + if_{r,i} + if_i^s + Orb^s + \varepsilon_{\phi i} \tag{3.25}$$

onde:

i	–	índice relacionado com a portadora;
$PD_{r,i}^{s}$ e $\phi_{r,i}^{s}$	–	pseudodistância (m) e fase da portadora (número de ciclos), respectivamente;
λ_i	–	comprimento de onda (m);
N_i	–	ambiguidade (número de ciclos);
ρ_r^s	–	distância geométrica entre o receptor e o satélite (m);
c	–	velocidade da luz no vácuo (m/s^2);
dt^s e dt_r	–	erro do relógio do satélite e receptor, respectivamente (s);
$Ion_{r,i}^{s}$	–	erro provocado pela refração ionosférica (m);
$Trop_r^s$	–	erro provocado pela refração da atmosfera neutra (m);
$IF_{r,i}$ e $if_{r,i}$	–	erro provocado pelo hardware do receptor na pseudodistância e na fase da portadora (m), respectivamente;
IF_1^s e if_i^s	–	erro provocado pelo hardware do satélite na pseudodistância e na fase da portadora (m), respectivamente;

Orb^s – erro de órbita dos satélites (m);

ε_{PDi} e $\varepsilon_{\phi i}$ – resíduo (inclui o multicaminho) na pseudodistância e fase da portadora (m), respectivamente.

Para a modelagem regional da ionosfera é mais conveniente utilizar a combinação linear obtida através da subtração das observações simultâneas das duas frequências, denominada de livre da geometria (LG), no lugar das observações originais. Fazendo PD_1-PD_2, obtém-se:

$$LG_{PD} = PD_1 - PD_2 = (1-\gamma)Ion_{PD,1} + IF_r + IF^s + MC_r^s + \varepsilon_{PD1-2} \tag{3.26}$$

onde: $\gamma = (f_{L1} / f_{L2})^2 \cong 1{,}6469$, $IF_r = IF_{r,1} - IF_{r,2}$, $IF^s = IF_1^s - IF_2^s$,

$MC_r^s = MC_{r,1}^s - MC_{r,2}^s$ e $\varepsilon_{PD1-2} = \varepsilon_{PD1} - \varepsilon_{PD2}$

Verifica-se que, além do atraso devido à ionosfera, comparecem termos relacionados com os erros interfrequencia (DCB – *Differential Code Biases*) dos satélites e dos receptores, sendo necessário estima-los para se obter valores de TEC não tendenciosos. Destaca-se, ainda, que estes erros apresentam variação muito lenta e podem ser considerados como constantes durante horas (SCHAER; STEIGENBERGER, 2006).

O termo γ visa compatibilizar os atrasos das diferentes frequências para uma frequência em comum. No caso da expressão (3.26) o atraso causado pela ionosfera na frequência L2 foi compatibilizado para a frequência L1. Para compatibilizar o erro da ionosfera na frequência L5 para a frequência L1, este termo é dado por $\gamma = (f_{L1} / f_{L5})^2 = (154/115)^2 \cong 1{,}7933$.

Similarmente, fazendo-se a diferença entre as observações da fase da portadora em L1 e L2 (ϕ_1-ϕ_2), chega-se a:

$$LG_\phi = \lambda\phi_1 - \lambda\phi_2 = \lambda N_{1-2} - (1-\gamma)Ion_{\phi 1} + if_r + if^s + mc_r^s + \varepsilon_{\phi 1-2} \tag{3.27}$$

com: $\lambda N_{1-2} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$, $if_r = if_{r,1} - if_{r,2}$, $if^s = if_1^s - if_1^s$, $mc_r^s = mc_{r,1}^s - mc_{r,2}^s$ e $\varepsilon_{\phi 1-2} = \varepsilon_{\phi 1} - \varepsilon_{\phi 2}$

No caso da fase da portadora, além do atraso devido à ionosfera e dos erros interfrequência dos satélites e dos receptores, existe o termo que contém as ambiguidades em L1 e L2.

A principal desvantagem de utilizar as observações de pseudodistância é o fato delas possuírem ruído cerca de 100 vezes maior que as da fase da portadora. Por outro lado, a necessidade de se determinar as ambiguidades da fase da portadora dificulta a sua utilização. Encontram-se na literatura soluções que combinam os dois tipos de observações através da filtragem da pseudodistância pela fase da portadora ou pelo processo de nivelamento da fase (*phase leveling*) (KOMJATHY, 1997; CAMARGO, 1999). A figura 3.9 mostra uma comparação entre o TEC calculado pela pseudodistância original e pela pseudodistância filtrada pela fase da portadora.

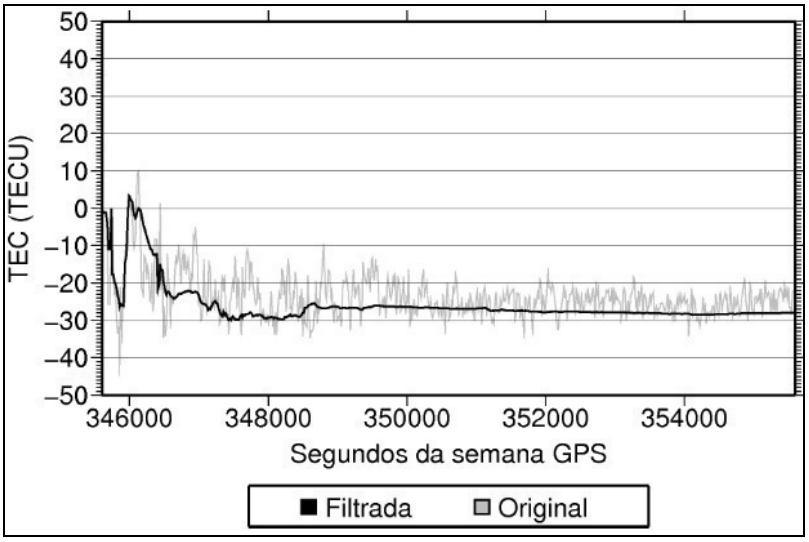

Figura 3.9 - TEC calculado pela pseudodistância original e pela pseudodistância filtrada pela fase da portadora

Ressalta-se que os valores do TEC da figura 3.9 estão contaminados pelos DCB do satélite e do receptor.

O recente advento dos métodos de solução da ambiguidade no PPP (GE et al., 2008; BLEWIT, 2008; LAURICHESSE et al., 2009; COLLINS et al., 2010) permite que as ambiguidades não diferenciadas estimadas no PPP sejam

introduzidas nas observações da fase da portadora, eliminando a necessidade de se utilizar a pseudodistância (BANVILLE; LANGLEY, 2011).

Diversos modelos podem ser adotados para se calcular os efeitos de primeira ordem com dados GNSS. Embora neste trabalho sejam apresentados o modelo do ponto ionosférico e alguns modelos tridimensionais, existem trabalhos que descrevem outros modelos (KOMJATHY, 1997; CAMARGO, 1999; FONSECA Jr, 2002).

3.2.3.1 Modelo do ponto ionosférico

Neste modelo, assume-se que o TEC esteja totalmente concentrado em uma camada esférica infinitesimalmente fina e de altitude pré-definida, normalmente entre 300 km e 450 km. O TEC é calculado na intersecção do vetor satélite-receptor com esta camada, denominado de ponto ionosférico. A figura 3.10 traz uma representação dos elementos envolvidos nesta modelagem.

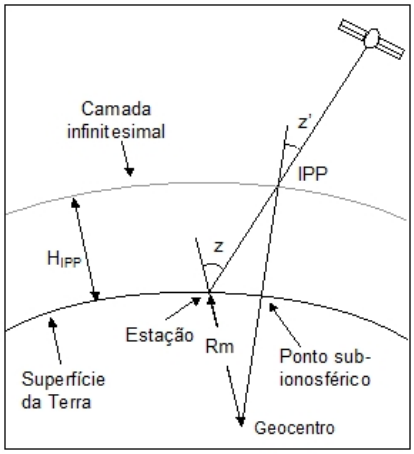

Figura 3.10 – Elementos envolvidos no modelo do ponto ionosférico

Na figura 3.10, Rm representa o raio médio da Terra, z é o ângulo zenital do satélite com relação à estação (90° - elevação), z' é o ângulo zenital do satélite com relação ao IPP, e H_{IPP} é a altitude da camada ionosférica.

Para remover a dependência da inclinação do trajeto do sinal e manter a consistência entre todas as observações calcula-se o VTEC, onde as observações oriundas da combinação livre da geometria, expressões (3.26) e (3.27), são utilizadas no processo de estimação, conforme:

$$L_{LG} = fm \times VTEC + IF_{LG}^{s} + IF_{LG}^{r} + \varepsilon_{LG} \tag{3.28}$$

onde: L_{LG} representa a observação do TEC, ε_{LG} é o ruído da observação do TEC (contendo o multicaminho e demais erros não modelados), fm é a função de mapeamento que projeta o TEC observado para a direção vertical, IF_{LG}^{s} e IF_{LG}^{r} representam os erros interfrequência do satélite e do receptor, respectivamente.

A função de mapeamento relaciona o TEC com o VTEC conforme:

$$TEC = fm \times VTEC \tag{3.29}$$

Algumas funções de mapeamento para este fim foram propostas (MANNUCCI; WILSON; EDWARD, 1993; SARDÓN; RIUS; ZARROA, 1994; KLOBUCHAR, 1997; KOMJATHY, 1997). Experimentos comparando resultados de três funções de mapeamento utilizando dados da RBMC durante alta atividade solar foram conduzidos. Os resultados se mostraram similares, com leve superioridade da função geométrica padrão (MATSUOKA, 2003).

A posição do IPP pode ser definida adotando um sistema de coordenadas geográficas (latitude e longitude), a qual é calculada em função da posição do satélite, da posição do receptor e da altitude da camada ionosférica (SKONE, 1998). Também se pode adotar um sistema de coordenadas vinculado ao campo magnético da Terra (DAVIES, 1990; von BIEL, 1990; HAPGOOD, 1992) ou utilizar um sistema solar-geomagnético (ICD-GPS-200C, 2003 p. 127).

O cálculo do VTEC com o modelo do ponto ionosférico pode ser realizado a partir da estimação dos coeficientes da expansão em série de Taylor, em série de funções harmônicas esféricas ou em série de Fourier (KOMJATHY,1997; SCHAER, 1999; CAMARGO, 1999; LIAO, 2000).

No Brasil, encontra-se em desenvolvimento, na FCT/UNESP, o programa de modelagem regional da ionosfera denominado Mod_Ion, o qual inicialmente empregava série de Fourier unidimensional na modelagem do atraso

ionosférico e apenas dados dos satélites GPS (CAMARGO, 1999). Posteriormente, foram implementadas outras funções de modelagem (MATSUOKA, 2003), bem como a possibilidade de se estimar os coeficientes com Filtro de Kalman, cuja versão foi denominada de Mod_Ion_FK (AGUIAR, 2005). O referido programa também foi modificado para utilizar dados dos satélites GPS e GLONASS (CAMARGO, 2009).

A solução dos modelos apresentados pode ser obtida com a utilização de dados de uma rede de estações GNSS. Neste caso, além dos coeficientes do modelo, os erros interfrequência dos satélites e dos receptores devem ser estimados, resultando em um sistema de equações que apresenta deficiência de característica. Uma estratégia muito utilizada para resolver este problema é introduzir o erro interfrequência de um satélite ou de uma estação como injunção (CAMARGO, 1999; LIU, 2004).

O Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) em lote e o Filtro de Kalman são duas opções que podem ser adotadas no processo de estimação de tais parâmetros (CAMARGO, 1999; AGUIAR, 2005).

Durante períodos de baixa atividade solar, resultados com valores negativos para o VTEC podem ser produzidos, o que é impossível. Uma forma de se evitar este inconveniente é utilizar o MMQ com injunção de desigualdade (CAMARGO, 2010).

3.2.3.2 Modelagem em três dimensões

Como visto na figura 3.2 a densidade de elétrons livres varia de acordo com a altitude. Portanto, o TEC determinado a partir de modelos bidimensionais, tais como o do ponto ionosférico, possui qualidade limitada. Visando uma representação mais fiel do TEC foram propostos alguns modelos tridimensionais, denominados de tomografia.

Dentre os modelos tridimensionais destacam-se o que divide a ionosfera em células, ou elementos de volume (*voxels*), de 3° x 5° em latitude e longitude, respectivamente, em duas camadas limitadas pelas altitudes 60 km -740 km - 1420 km, e que utiliza a expansão em série de funções harmônicas esféricas

em conjunto com funções ortogonais empíricas (FOE), onde a expansão em funções harmônicas esféricas é utilizada para modelar a parte bidimensional e as FOE, a parte vertical do atraso, e, por fim, o que emprega o perfil de Chapman (FELTENS, 1998; HERNANDEZ-PAJARES et al., 2000; COLOMBO et al., 2002; LIU, 2004).

Um experimento comparando a modelagem que utiliza o conceito de ponto ionosférico com a tomografia utilizando FOE, em uma rede de estações com interdistância de aproximadamente 200 km, revelou melhores resultados para a modelagem tridimensional (GAO; LIU, 2002).

3.2.3.3 Mapas da ionosfera

O grupo de trabalho de ionosfera do IGS produz e disponibiliza mapas globais da ionosfera (GIM – *Global Ionospheric Maps*) regularmente, os quais são resultantes da combinação da solução de quatro centros de processamento (IAAC – *Ionosphere Associate Analysis Center*), sendo eles: CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*), ESOC (*European Space Operations of Center* ESA), UPC (*Polytechnical University of Catalonia*) e JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) (HERNANDÉZ-PAJAREZ et al., 2009). As soluções utilizadas em cada IAAC são apresentadas em (SCHAER, 1999; FELTENS et al., 1999).

Duas soluções são disponibilizadas para os usuários, conforme tabela 3.5 (IGS, 2011).

Tabela 3.5 – GIM produzidos pelo IGS

Solução	Latência	Acurácia (TECU)	Atualização
Rápida	< 24 h	2-9	Diária
Final	11 dias	2-8	Semanal

Os mapas da ionosfera produzidos pelo IGS contém valores de VTEC e são disponibilizados no formato IONEX (*IONosphere Map EXchange*) (SCHAER; GURTNER; FELTENS, 1998). O intervalo de tempo entre mapas subsequentes é de 2 horas e a grade possui 2,5° em latitude e 5° em longitude.

Portanto, para a utilização de tais mapas é necessário realizar interpolação no tempo e no espaço. No que se refere à interpolação no tempo, a interpolação

linear com rotação em torno do eixo Z, para compensar a correlação existente entre a posição do Sol e a ionosfera, é indica. A interpolação espacial pode ser realizada a partir da interpolação bilinear dos quatro valores de VTEC mais próximos do local de interesse (SCHAER; GURTNER; FELTENS, 1998).

Uma análise da qualidade do posicionamento absoluto da estação da RBMC de Porto Alegre (POAL) utilizando GIM produzido pelo CODE durante alta atividade solar foi realizada, chegando-se a melhorias em torno de 77% na altimetria e 44% em planimetria (ARMENDARIS; MATSUOKA; CAMARGO, 2009).

3.2.3.4 Utilização de RNA na determinação do TEC

Além dos modelos citados, encontram-se pesquisas sobre a utilização de RNA na estimação ou previsão do TEC. Da revisão realizada verifica-se que o interesse neste assunto vem ganhando atenção, visto que a maioria dos trabalhos foi realizada dentro dos últimos seis anos.

Visando estimar o TEC em escala global com utilização de dados do IGS, o mapa auto-organizável de Kohonen foi empregado para definir o tamanho de *pixels* localizados na camada ionosférica de forma adaptativa em função da quantidade de raios (pontos formados pela intersecção da propagação do sinal entre o satélite e receptor e cada *pixel* nas altitudes pré-estabelecidas do modelo), evitando problema de mal condicionamento devido à possibilidade da existência de *pixels* com poucos raios. Definidos os tamanhos dos *pixels*, a estimação do TEC foi realizada a partir do MMQ (HERNÁNDEZ-PAJAREZ; JUAN; SANZ, 1997).

Leandro e Santos (2007) apresentam um modelo regional do VTEC utilizando a arquitetura MLP com duas camadas ocultas com cinco neurônios cada. As entradas da RNA são as coordenadas do IPP e a saída é o VTEC. VTEC de um subconjunto das estações da RBMC em cinco dias de alta e baixa atividade solar foram calculados através de dados GNSS e da RNA proposta em três instantes: 12 h, 14 h e 16 h (hora local). Observa-se que o modelo desenvolvido não considera as variações temporais do VTEC e o desempenho da RNA foi testado de forma discreta. O erro relativo, representado pela

proporção entre o VTEC calculado com dados GNSS ($VTEC_{GNSS}$) e o módulo da diferença entre o $VTEC_{GNSS}$ e o VTEC calculado pela RNA ($VTEC_{RNA}$), denominada de dVTEC, foi analisado, chegando-se a uma porcentagem de similaridade entre o $VTEC_{GNSS}$ e o $VTEC_{RNA}$ de aproximadamente 85%. Neste caso, o erro relativo foi calculado através de:

$$\varepsilon = 100 \frac{|dVTEC|}{VTEC_{GNSS}} \tag{3.30}$$

Encontram-se na literatura, algumas pesquisas visando a previsão do TEC utilizando RNA. Cander et al. (1998) empregaram MLP para prever a frequência crítica foF2 ou o TEC por uma hora em Roma e Veneza. Os dados de entrada são o histórico da média da foF2 e índices de atividade solar (número de manchas solares) e geomagnética (Dst). Tais experimentos foram conduzidos durante alta atividade solar e condição geomagnética considerada fraca (Tabela 3.1). Os resultados mostraram que os índices não exerceram papel decisivo na previsão, a qual apresentou boa concordância com valores conhecidos.

Um modelo utilizando RNA foi desenvolvido para prever o TEC em uma grade de 104 pontos sobre a Europa. Tal modelo é composto de 104 módulos com seis neurônios cada e uma saída. Como entradas, foram utilizados parâmetros que descrevem o instante, bem como um histórico do TEC. Experimentos realizados durante período de alta atividade solar e condições geomagnéticas severas mostraram diferenças que variaram de aproximadamente 1 TECU a 2 TECU, para previsão de dez minutos, e de 2,3 TECU a 4,5 TECU, para previsão de uma hora (TULUNAY et al., 2006).

Habarulema, McKinnell e Cilliers (2007) utilizaram MLP em três estações localizadas na África do Sul. Foram empregadas a variação sazonal (dia do ano), a atividade solar (média de quatro meses do número de manchas solares) e a condição do campo geomagnético (média dos oito índices k mais recentes) como entradas das RNA. Neste caso, o TEC foi previsto para as 12 h (horário local). Em duas estações, a variação diária (hora local) foi incluída como entrada, permitindo a previsão do TEC para qualquer horário do dia.

Foram utilizados dados do período de 2000 a 2004 e os resultados obtidos com as RNA foram comparados com o modelo IRI e com o TEC calculado a partir de observações GNSS. Os resultados produzidos pelas RNA se mostraram mais coincidentes com os resultados provenientes de dados GNSS do que com o do modelo IRI. A diferença entre os TEC calculados pela RNA e através de dados GNSS variou de 15,4 TECU, durante o equinócio de primavera, a 1,68 TECU, durante o solstício de inverno.

Utilizando dados de três estações na Índia, as quais estão localizadas no equador geomagnético, na região da anomalia equatorial e outra fora da área das anomalias, Acharya et al. (2011) utilizaram uma rede neural recorrente adaptativa para prever o TEC por até dez minutos. As entradas desta RNA são informações pretéritas do TEC. Os experimentos foram realizados durante baixa atividade solar e condição geomagnética considera fraca. Os resultados mostraram RMS do conjunto de validação entre 1 TECU e 1,5 TECU.

Como visto, a maioria dos modelos propostos para prever o TEC perde qualidade conforme o instante da previsão se afasta da sua origem. Uma exceção é o modelo desenvolvido por Habarulema, McKinnell e Cilliers (2007). Porém, ele não permite a modelagem regional do TEC. O modelo proposto por Leandro e Santos (2007) não considera parâmetros de variação do tempo nem das condições geomagnéticas e atividade solar, não sendo capaz de realizar previsões do VTEC. Por outro lado, ele é capaz de modelar o VTEC regionalmente. Nesta pesquisa, foi desenvolvido um modelo baseado em RNA que permite prever o VTEC regionalmente por 72 horas, o qual é apresentado no capítulo 5.

4 ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA VIRTUAL

4.1 CONCEITO

Os erros contidos nas expressões (3.24) e (3.25) limitam a qualidade do posicionamento GNSS e devem ser modelados quando se deseja obter posicionamento com precisão melhor do que 1 m.

Uma opção para reduzir os erros é utilizar diferenças entre as observáveis coletadas simultaneamente pelo receptor localizado onde se deseja determinar as coordenadas e pelo receptor de uma estação, ou rede de estações, de referência, conhecida como posicionamento relativo.

Os dados das redes GNSS de referência vem sendo utilizados para modelar os erros dependentes da distância regionalmente. Esta modelagem possibilita uma redução de cerca de 50% na quantidade de estações de referência necessárias para a obtenção de posicionamento com precisão melhor que 10 cm em tempo-real (FOTOPOULOS, 2000, HU et al, 2003, DABOVE; AGOSTINO, 2011).

Visando o posicionamento relativo em rede em tempo-real (RTK em rede) alguns métodos foram propostos (FOTOPOULOS; CANNON, 2001; DAI et al., 2001; ALVES, 2008). Dentre as soluções desenvolvidas, a que está baseada na geração de estações de referência virtuais se destaca devido à qualidade do posicionamento e ao fato de ser compatível com a maioria dos hardwares dos receptores, permitindo que seus dados sejam distribuídos com a utilização de padrões como o RTCM (*Radio Technical Comission for Maritime Services*). Por outro lado, é necessário manter um canal de comunicação bidirecional com os receptores dos usuários (LANDAU; VOLLATH; CHEN, 2002; DABOVE; AGOSTINO, 2011).

As observáveis da estação de referência virtual são geradas sinteticamente e devem simular as observáveis de uma estação de referência real localizada na mesma posição (van der MAREL, 1998).

Portanto, a distância geométrica entre os satélites e a estação de referência virtual deve ser determinada e os demais termos contidos nas expressões 3.24 e 3.25 devem ser modelados de forma apropriada.

Existem diversas formas de se calcular as observações da estação de referência virtual (Van der MAREL, 1998; HU et al, 2003; WANNINGER, 2006; WEI et al., 2007; ALVES, 2008; MORETT NETTO, 2008). De modo geral são necessárias três etapas: deslocamento geométrico (DG), modelagem da atmosfera a partir das estações da rede de referência e interpolação dos erros calculados para a posição da estação de referência virtual.

4.2 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO

O deslocamento geométrico, também conhecido como correção geométrica, consiste no cálculo das observáveis da estação virtual em função das observáveis de uma das estações da rede de referência, denominada de estação de referência mestra, e do conhecimento da posição tridimensional dos satélites e das estações de referência mestra e virtual.

A estação de referência mestra pode ser definida como a estação da rede de referência mais próxima da posição da estação de referência virtual, sendo necessário calcular a distância das estações da rede de referência com relação à estação virtual.

Definida a estação de referência mestra, calcula-se, em um dado instante t, a distância geométrica entre a estação de referência virtual e os satélites ($\rho_V^s(t)$) e entre a estação de referência mestra e os satélites ($\rho_M^s(t)$), conforme:

$$\rho_V^s(t) = \left[\left(X^s(t) - X_V(t)\right)^2 + \left(Y^s(t) - Y_V(t)\right)^2 + \left(Z^s(t) - Z_V(t)\right)^2 \right]^{1/2} \tag{4.1}$$

$$\rho_M^s(t) = \left[\left(X^s(t) - X_M(t)\right)^2 + \left(Y^s(t) - Y_M(t)\right)^2 + \left(Z^s(t) - Z_M(t)\right)^2 \right]^{1/2} \tag{4.2}$$

onde X^s, Y^s, e Z^s representam as coordenadas cartesianas tridimensionais do satélite, X_V, Y_V e Z_V, o terno cartesiano da estação de referência virtual e X_M, Y_M e Z_M, são as coordenadas da estação de referência mestra.

Em seguida, calcula-se a diferença entre as distâncias geométricas dadas pelas expressões (4.1) e (4.2), conforme:

$$\Delta\rho^s(t) = \rho_V^s(t) - \rho_M^s(t) \tag{4.3}$$

As observações da estação de referência virtual são calculadas por:

$$PD_{V,i}^s(t) = PD_{M,i}^s(t) + \Delta\rho^s(t) \tag{4.4}$$

$$\lambda_i\phi_{V,i}^s(t) = \lambda_i\phi_{M,i}^s(t) + \Delta\rho^s(t) \tag{4.5}$$

As coordenadas das estações e dos satélites são necessárias no cálculo da distância geométrica entre eles. A posição de ambas as estações são conhecidas, enquanto que as coordenadas dos satélites podem ser calculadas através das efemérides transmitidas ou de alguma das efemérides produzidas pelo IGS, disponibilizada no formato SP3 (SPOFFORD; REMONDI, 1994; HILLA, 2007).

Três tipos de efemérides são disponibilizados pelo IGS: a final (IGS), a rápida (IGR) e a ultra-rápida (IGU). A disponibilidade e a acurácia de tais efemérides são apresentadas na tabela 4.1 (IGS, 2012).

Tabela 4.1 – Disponibilidade e acurácia das efemérides e erro do relógio dos satélites produzidos pelo IGS

Produto		Acurácia	Latência	Atualização	Intervalo de amostra
IGS	Órbita Relógio	2,5 cm 75 ps RMS	12 –18 dias	Quintas-feiras	15 min 30 s
IGR	Órbita Relógio	2,5 cm 75 ps RMS	17-41 horas	17 h (UTC)	15 min 5 min
IGU (metade observada)	Órbita Relógio	3 cm 150 ps RMS	3-9 horas	03 h, 09 h, 15 h e 21 h (UTC)	15 min
IGU (metade predita)	Órbita Relógio	5 cm 3 ns RMS	tempo-real		

Enquanto as efemérides IGS e IGR possuem 24 horas de informação determinadas apenas com dados observados, as efemérides IGU possuem 48 horas de informação, sendo metade calculada a partir de dados observados e metade resultado de previsão.

A interpolação das coordenadas dos satélites utilizando as efemérides do IGS pode ser realizada a partir da utilização do polinômio de Chebychev, polinômios com função trigonométrica e polinômios com função linear (NETA et al, 1996; SCHENEWERCK, 2003; FENG; ZHENG, 2005; HOREMUZ; ANDERSON, 2006).

Feng e Zheng (2005) obtiveram resultados similares ao utilizar o polinômio de Chebychev e um polinômio com função trigonométrica. Além disso, eles constataram que adotar um polinômio com função linear gera resultados com qualidade inferior, confirmando os resultados obtidos por Schenewerck (2003).

O polinômio com função trigonométrica é descrito por (SCHENEWERCK, 2003):

$$\begin{aligned} X^s &= c_0 + c_1 \operatorname{sen}(SiT) + c_2 \cos(SiT) + c_3 \operatorname{sen}(2SiT) + \\ &+ c_4 \cos(2SiT) + \ldots + c_N \cos(NSiT/2) \end{aligned} \tag{4.6}$$

onde: c_i ($i=1,N$) são os coeficientes a serem estimados, Si é uma característica de frequência e T é o instante. O termo Si é calculado através da multiplicação de 2π pela razão entre a duração do dia solar e o dia sideral, cujo valor pode ser encontrado em Petit e Luzum (2010).

Não é possível aplicar o MMQ paramétrico na estimação dos coeficientes deste polinômio, pois a matriz das equações normais (N) é quase singular. Ao invés disso, pode-se adotar a decomposição em valores singulares (SVD – *Single Value Decomposition*) (PRESS et al., 2001).

Vale destacar que as coordenadas dos satélites devem ser calculadas no instante de transmissão do sinal no sistema de tempo GNSS, sendo necessário determinar tal instante e corrigir as coordenadas da rotação que o referencial sofre durante a propagação do sinal da antena do satélite para a antena do receptor.

Considerando que o sistema de tempo GNSS seja igual ao sistema de tempo GPS, o instante de transmissão do sinal neste sistema de tempo pode ser calculado em função do instante de recepção (t_r^{GPS}) e do tempo de propagação do sinal (τ), ambos no sistema de tempo GPS, conforme:

$$t_t^{GPS} = t_r^{GPS} - \tau \tag{4.7}$$

O instante de recepção do sinal é dado por:

$$t_r^{GPS} = t_r - dt_r \tag{4.8}$$

onde t_r é o instante de recepção na escala de tempo do receptor.

O tempo de propagação é proporcional à distância percorrida pelo sinal e inversamente proporcional à sua velocidade. No vácuo, τ é calculado em função da distância geométrica (ρ) e da velocidade da luz no vácuo (c), conforme:

$$\tau_v = \frac{\rho}{c} \tag{4.9}$$

No entanto, o sinal GNSS sofre um atraso ao se propagar através da atmosfera. Por conseguinte, os erros provocados pela ionosfera (Ion) e pela atmosfera neutra ($Trop$) devem ser considerados na expressão (4.9), resultando em:

$$\tau = \frac{\rho + Ion + Trop}{c} = \frac{\rho_{atm}}{c} \tag{4.10}$$

ρ_{atm} pode ser calculado através da pseudodistância (expressão 3.24), bem como dos erros do relógio do receptor e satélite:

$$\rho_{atm} = PD_{r,i}^{s} - c\left(dt_r - dt^s\right) - \varepsilon \tag{4.11}$$

onde ε contém os demais erros, tais como multicaminho e os atrasos devido ao hardware do satélite e do receptor.

Substituindo a expressão (4.11) na (4.10), obtém-se o tempo de propagação do sinal:

$$\tau = \left(\frac{PD_{r,i}^{s}}{c}\right) - \left(dt_r - dt^s\right) \tag{4.12}$$

Finalmente, o instante de transmissão do sinal, no sistema de tempo GPS, é obtido substituindo-se as expressões (4.8) e (4.12) na expressão (4.7), resultando em:

$$t_t^{GPS} = t_r - \frac{PD_{r,i}^{s}}{c} - dt^s \tag{4.13}$$

Fora o dt^s, todos os outros elementos da expressão 4.13 são conhecidos.

O dt^s pode ser calculado por meio de um dos produtos disponibilizados pelo IGS (KOUBA, 2009). Neste último caso, a interpolação linear é a mais indicada (MONTENBRUCK; GILL; KROES, 2005). Como o dt^s deve ser calculado no instante de transmissão no sistema de tempo GPS e sendo tal instante que se deseja calcular, a solução deve ser obtida iterativamente.

A correção devido à rotação da Terra é aplicada através de uma rotação no eixo Z, de um ângulo α, do referencial terrestre em que as coordenadas dos satélites estão referenciadas.

O ângulo α é obtido através da multiplicação entre o τ e a velocidade de rotação da Terra (w_e). Portanto, as coordenadas dos satélites corrigidas da rotação da Terra são calculadas por (SEEBER, 2003):

$$X_c^s = X^s \cos(\alpha) + Y^s \operatorname{sen}(\alpha) \tag{4.14}$$

$$Y_c^s = Y^s \cos(\alpha) - X^s \operatorname{sen}(\alpha) \tag{4.15}$$

4.3 MODELAGEM DA ATMOSFERA

Como visto, todos os erros das observações da estação de referência mestra são transferidos para as observações virtuais durante o cálculo do DG. O erro do relógio do receptor da estação virtual pode possuir qualquer valor, pois tal erro é minimizado no processo de diferenciação ou estimado com os demais parâmetros. Portanto, pode-se assumir que os erros do relógio e de hardware do receptor da estação de referência virtual sejam iguais ao da estação de referência mestra. Além disso, o erro do relógio e de hardware dos satélites não estão em função dos receptores envolvidos, sendo iguais para ambos os receptores e não precisam ser modelados.

Adicionalmente, os deslocamentos do centro de fase eletrônico com relação ao ponto de referência da antena (PCO – *Phase Center Offsets*), e suas variações (PCV – *Phase Center Variation*), em função da elevação e azimute do satélite, devem ser considerados. O formato padrão utilizado na distribuição dos dados de PCO e PCV é denominado ANTEX (*ANTenna Exchange*) (ROTHACHER; SCHMID, 2010). Até o dia 5 de novembro de 2006, era utilizada a calibração relativa das antenas. A partir desta data, o uso da calibração absoluta para as antenas dos receptores e satélites (arquivo ANTEX igs05.atx) foi recomendado (KOUBA, 2009).

Verifica-se, portanto, que o cálculo dos dados da estação de referência virtual está em função da modelagem dos erros dependentes da distância (atmosfera e órbita) na sua posição e na posição da estação de referência mestra.

Nos métodos convencionais, a modelagem é realizada a partir dos resíduos das observações das estações da rede de referência cuja ambiguidade foi corretamente determinada (van der MAREL, 1998; HU et al., 2003; WANNINGER, 2006; WEI et al., 2007).

Alves, Monico e Dalbelo (2007) propõem a utilização da previsão do atraso troposférico zenital disponibilizado pelo CPTEC/INPE (SAPUCCI; MACHADO;

MONICO, 2006) e do modelo regional da ionosfera desenvolvido na Universidade Estadual Paulista (UNESP) (Mod_Ion) (CAMARGO, 1999; MATSUOKA, 2003; AGUIAR, 2005 e AGUIAR, 2010). Esta proposta tem como maior vantagem a eliminação da etapa de solução das ambiguidades das observações da rede de referência.

4.4 INTERPOLAÇÃO PARA A POSIÇÃO DA ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA VIRTUAL

A interpolação dos erros dependentes da distância para a posição da estação de referência virtual é uma etapa necessária na sua geração. Com este fim, diversos modelos foram propostos, incluindo o que utiliza uma superfície bilinear (WANNINGER, 1995; WANNINGER, 1999; WÜBBENA et al, 1996; VOLLATH et al., 2000), modelo de combinação linear (HAN; RIZOS, 1998), modelo linear baseado na distância (GAO; LI, 1998), superfície de baixa ordem (WÜBBENA et al, 1996, FOTOPOULOS; CANNON, 2001) e colocação por mínimos quadrados (RAQUET, 1998; Van der MAREL; 1998; FORTES, 2003).

Dai et al. (2003) mostram uma revisão sobre os modelos citados, bem como os resultados de experimentos realizados durante alta atividade solar nas regiões dos municípios de Sydney (Austrália) e Taiwan (China). Tais resultados revelaram que o desempenho dos métodos de interpolação é similar, com uma pequena deficiência para o método de interpolação linear baseado na distância.

Nesta pesquisa, a modelagem da atmosfera neutra é realizada através do modelo de Hopfield ou das previsões do atraso troposférico zenital do CPTEC/INPE. No primeiro caso, o atraso troposférico é calculado diretamente na posição das estações envolvidas, não havendo a necessidade de se interpolar o atraso. Quando se utiliza o modelo do CPEC/INPE, são necessárias interpolações no tempo e no espaço. Neste caso, utiliza-se interpolação linear no tempo, bilinear para interpolar o atraso dos quatros vértices do modelo mais próximos e a equação hipsométrica para considerar a diferença de altitude (seção 3.1.2). A seção 5.3.1 apresenta uma descrição mais detalhada sobre a solução adotada.

No que diz respeito à ionosfera, sua modelagem é realizada com a utilização de RNA, onde a arquitetura MLP com uma única camada oculta foi adotada (seção 2.2). Esta solução permite que o atraso ionosférico seja calculado na posição de cada estação envolvida, não sendo necessário realizar interpolação. Mais detalhes sobre o modelo adotado são apresentados na seção 5.3.2.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estação de referência virtual pode ser gerada em qualquer posição, o que possibilita ao usuário utilizar o conceito de posicionamento relativo em linhas de base curtas, cujo modelo matemático praticamente elimina os efeitos dependentes da distância através da diferenciação entre observações (GOAD, 1998). Neste caso, o usuário pode empregar receptores de uma frequência.

No caso da estação de referência virtual ser utilizada em tempo-real, deve-se implantar um centro de processamento equipado com sistema de comunicação adequado, visando receber as observações das estações da rede de referência e disseminar o resultado do processamento.

Os dados da estação de referência mestra podem ser obtidos em tempo-real através do NTRIP (*Network Transport of RTCM via Internet Protocol*). Trata-se de um protocolo de transmissão de arquivos desenvolvido para transmissão de correções diferenciais e outros tipos de dados GNSS, através da rede mundial de computadores (WEBER et al., 2005).

Para copiar os dados da rede GNSS de referência utilizando o NTRIP, os usuários precisam de um programa cliente para estabelecer comunicação com o NTRIP *caster*, que é o ambiente onde está instalado o programa servidor que concentra os dados dos receptores da rede GNSS e os tornam disponíveis para os usuários. O centro de dados GNSS (GDC – *GNSS Data Center*) da agência federal de Cartografia e Geodésia da Alemenha (BKG - *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*) mantém uma página com uma relação de programas clientes do NTRIP disponíveis (BKG, 2012).

Destaca-se que o IBGE possui um serviço denominado de RBMC-IP, o qual tem por objetivo disponibilizar os dados GNSS de algumas estações da RBMC em tempo-real utilizando o NTRIP (COSTA et al., 2008). Neste caso, os dados são difundidos no formato RTCM (*The Radio Technical Commission for Maritime Services*) (RTCM, 2012).

O receptor do usuário também precisa estabelecer comunicação com o centro de processamento para obter os dados da estação de referência virtual que está sendo gerada (WANNINGER, 2006). Como visto, a questão de comunicação é primordial na utilização de estações de referência virtuais em tempo-real. No entanto, ela não será analisada nesta tese.

Hu et al (2003) obtiveram posicionamento com acurácia da ordem de 5 cm utilizando uma rede de cinco estações distantes de aproximadamente 20 km em Singapura durante alta atividade solar. No Brasil, experimentos utilizando modelos atmosféricos em período de baixa atividade solar mostram concordância da ordem de 5 mm entre se utilizar uma estação de referência real e uma estação virtual (ALVES; MONICO; DALBELO, 2007; ALVES; MONICO, 2011).

É importante destacar que a solução se deteriora conforme a antena do receptor do usuário se afasta da estação virtual, pois os erros dependentes da distância, principalmente a ionosfera, tornam-se menos correlacionados e não se cancelam durante a diferenciação das observações.

Para sanar o problema do deslocamento da antena do receptor usuário, ao invés de gerar apenas uma estação de referência virtual, o centro de processamento pode gerar uma grade de estações virtuais de modo a cobrir toda a área formada pela rede de referência. Assim, o usuário utiliza a estação virtual mais próxima de sua posição. Esta solução é chamada de célula de referência virtual (VRC - *Virtual Reference Cell*) (RETSCHER, 2002). Nesta solução o aplicativo utilizado pelo usuário deve reinicializar o processo de solução do vetor das ambiguidade a cada troca de estação de referência virtual, sendo conveniente utilizar métodos OTF (*On-The-Fly*).

Uma alternativa à VRC é manter a posição da estação de referência virtual durante todo o rastreio e calcular a correção dos erros dependentes da

distância acompanhando o deslocamento do receptor do usuário. Portanto, não é conveniente que a estação virtual gerada a partir desta metodologia seja utilizada por mais de um usuário. Esta solução é denominada de VRS semi-cinemática (WANNINGER, 2002). A figura 4.1 ilustra o princípio da VRC e da VRS semi-cinemática.

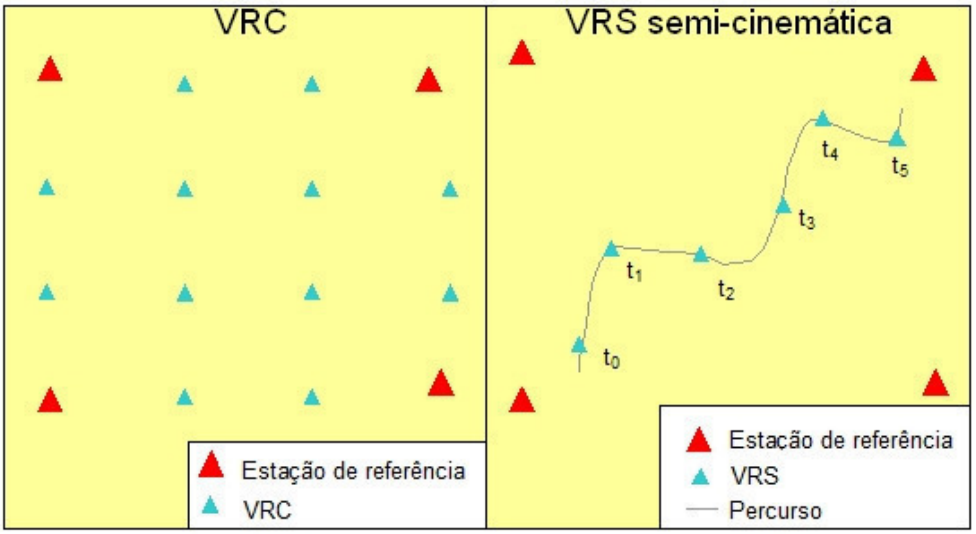

Figura 4.1 – Princípio da VRC e da VRS semi-cinemática

5 CÁLCULO DA ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA VIRTUAL

5.1 DESCRIÇÃO

Para calcular as observações da estação de referência virtual foi desenvolvido o programa denominado de VRSgen, utilizando-se a linguagem de programação Fortran 77 e o ambiente de desenvolvimento FORCE 2.0.

O primeiro passo para calcular a estação de referência virtual é definir a sua posição. Além de serem utilizadas para calcular o deslocamento geométrico, as coordenadas da estação virtual são utilizadas para calcular o ângulo de elevação e azimute dos satélites, informações necessárias nas outras etapas do cálculo.

Conhecendo-se a posição da estação de referência virtual é necessário ler as observações da estação de referência mestra. A leitura do arquivo de observações da estação de referência mestra fornece três elementos necessários para o cálculo da estação de referência virtual, sendo eles: as observações, as coordenadas e o instante de recepção do sinal. No estágio atual, o arquivo de observações da estação de referência mestra deve estar no formato RINEX 2.11 ou anteriores.

As coordenadas dos satélites são utilizadas para os mesmos fins que as coordenadas da estação de referência virtual. No cálculo de tais coordenadas optou-se por utilizar as efemérides IGU, produzidas pelo IGS. Neste caso, a interpolação é realizada através de um polinômio com função trigonométrica (expressão 4.6).

Determinadas as coordenadas dos satélites, são calculados o ângulo de elevação, o ângulo zenital e o azimute das estações de referência mestra e virtual, bem como DG (seção 4.2).

O atraso troposférico zenital, em cada estação, pode ser calculado a partir dos modelos de Hopfield ou dos arquivos de previsão do atraso troposférico zenital produzidos pelo CPTEC/INPE. O modelo empírico pode ser utilizado quando não houver disponibilidade dos arquivos do CPTEC/INPE. O modelo

apresentado por Davis et al (1985) também foi implementado, o qual apresentou resultados muito similares ao do modelo de Hopfield.

O atraso troposférico zenital contido nos arquivos de previsão do CPTEC/INPE possui intervalo de seis horas entre uma previsão e outra, sendo necessário realizar uma interpolação. Neste caso, devido à baixa variação temporal do atraso troposférico aplica-se uma interpolação linear para se obter o referido atraso no instante de interesse.

A função de mapeamento GMF é utilizada para mapear o atraso troposférico zenital para a elevação dos satélites. Neste caso, o código em Fortran 77, disponível em <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY>, foi utilizado.

Calculando-se o atraso troposférico na direção entre a antena do satélite e a antena dos receptores das estações de referência virtual e mestra e, posteriormente, a diferença de atraso troposférico entre estas estações (dtrop), as observações de fase da portadora e pseudodistância da estação de referência virtual são calculadas somando-se dtrop às observações resultantes do DG.

O atraso provocado pela ionosfera é calculado a partir do VTEC obtido com a utilização de RNA, onde a arquitetura MLP com uma única camada oculta foi adotada. Neste caso, o treinamento da MLP deve ser executado diariamente. Para se obter o atraso na direção receptor-satélite a função de mapeamento geométrica padrão é utilizada.

Assim como no caso do atraso troposférico, calcula-se a diferença entre o atraso ionosférico nas estações envolvidas (dion) e soma-se esta diferença às observações da estação de referência virtual.

Os parâmetros da RNA e os atrasos troposféricos zenitais interpolados espacialmente, no caso da adoção dos arquivos de previsão do CPTEC/INPE, devem ser atualizados com frequência de vinte e quatro horas. No programa em desenvolvimento, a leitura dos arquivos contendo estas informações ocorre sempre quando o instante de recepção for 0 h (TU).

Destaca-se que além de possibilitar o posicionamento em tempo-real, a modelagem da atmosfera não depende dos dados GNSS da rede de referência em tempo-real e podem ser utilizadas quando estes não estão disponíveis.

A figura 5.1 traz o fluxograma com as principais etapas executadas pelo programa VRSgen.

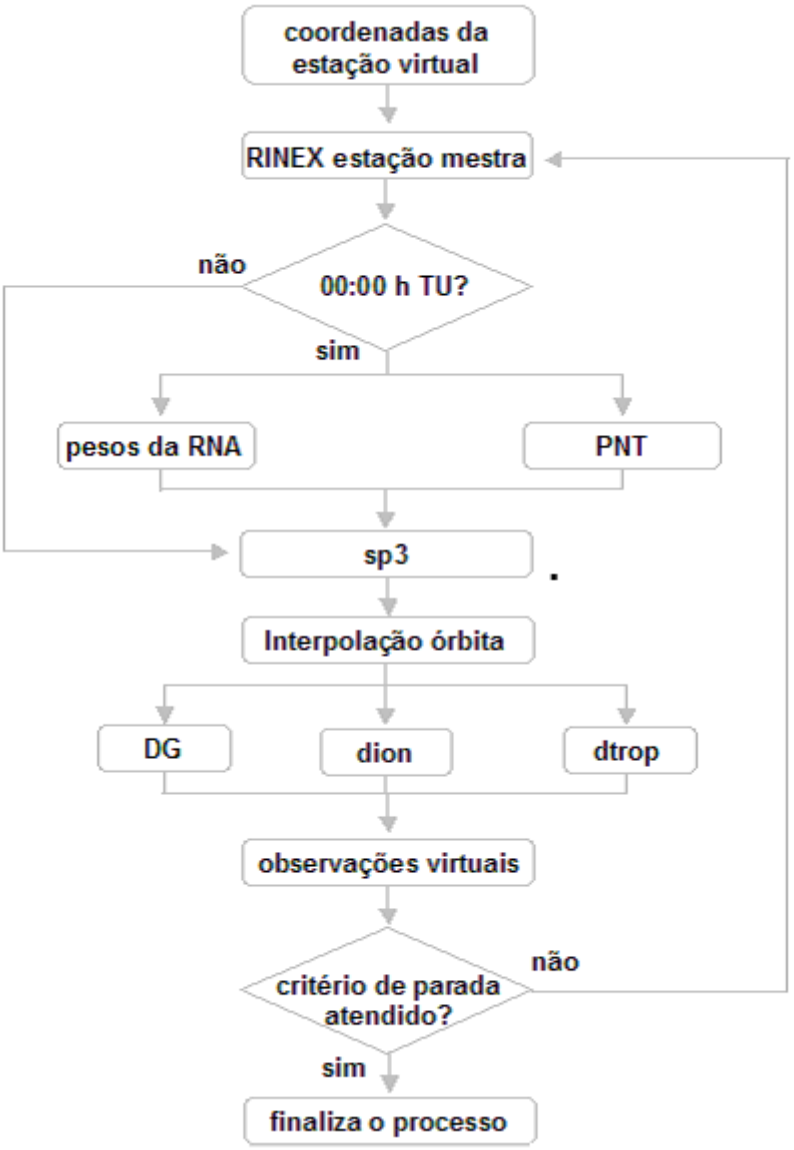

Figura 5.1 – Fluxograma do programa VRSgen

Testes preliminares visando a obtenção dos dados da estação mestra em tempo-real foram conduzidos. Para tanto, o código fonte do programa cliente do NTRIP chamado rtcm3torinex, versão 1.37, copiado de BKG (2012), e uma versão preliminar do programa VRSGen foram compilados em ambiente linux.

Os dados foram obtidos com sucesso através do serviço RBMC-IP do IBGE. Este programa cliente do NTRIP converte os dados GNSS para o formato RINEX 2.11, que servem de entrada para o programa VRSGen.

5.2 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO

5.2.1 CÁLCULO DAS COORDENADAS DOS SATÉLITES

As coordenadas dos satélites devem ser calculadas no instante de transmissão no sistema de tempo GNSS de referência, sendo necessário calcular o erro do relógio dos satélites. Nesta pesquisa, o sistema de tempo GPS foi empregado como referência.

O erro do relógio dos satélites é calculado a partir da interpolação linear dos elementos contidos nas efemérides IGU. O instante de transmissão é obtido em um processo iterativo conforme descrito na seção 4.2, onde se assume que o processo convergiu quando a diferença entre o erro do relógio do satélite entre duas iterações sucessivas varia menos do que 1 *ps*.

Salienta-se que as efemérides IGU referentes ao GLONASS não contêm o erro do relógio dos satélites, impedindo que o instante de transmissão seja obtido. Por este motivo, as observações dos satélites GLONASS foram excluídas do cálculo das estações de referência virtuais.

Além de determinar o instante de transmissão, é necessário corrigir as coordenadas do efeito de rotação que a Terra realiza durante a propagação do sinal da antena do satélite até a antena do receptor, a qual é realizada conforme descrito na seção 4.2.

As coordenadas dos satélites são calculadas através da interpolação adotando-se o polinômio com função trigonométrica descrito na seção 4.1, com ordem nove. Além disso, a decomposição em valores singulares foi utilizada no processo de estimação dos coeficientes e a data Juliana foi definida como referência de tempo.

5.2.2 CÁLCULO DO DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO

Conhecendo-se as coordenadas das estações envolvidas e calculando-se as coordenadas dos satélites no instante de transmissão, o deslocamento geométrico é calculado a partir da soma das observações de fase da portadora e pseudodistância da estação de referência mestra com a diferença entre as distâncias geométricas desta estação e da estação de referência virtual, conforme descrito no capítulo 4.

5.3 ATRASO DEVIDO À REFRAÇÃO ATMOSFÉRICA

A geração de estações de referência virtuais em tempo-real envolve a modelagem regional do atraso provocado pela passagem dos sinais GNSS através da atmosfera neutra e ionosfera de forma contínua. As soluções desenvolvidas para este fim requerem o uso contínuo das observações das estações GNSS da rede de referência. No entanto, problemas com abastecimento de energia para o receptor e/ou de comunicação podem interromper o recebimento de tais observações e o processo de cálculo da estação de referência virtual é inviabilizado.

Nesta pesquisa, o atraso provocado pela atmosfera pode ser calculado sem a necessidade de se observar dados GNSS em tempo-real, onde atraso provocado pela atmosfera neutra pode ser calculado através do modelo de Hopfield ou dos arquivos de previsão do atraso troposférico zenital do CPTEC/INPE, enquanto que o da ionosfera é calculado utilizando RNA. Destaca-se que, embora a modelagem da atmosfera não precise de dados GNSS em tempo-real, a geração da estação virtual requer dados GNSS da estação mestra.

5.3.1 CÁLCULO DO ATRASO CAUSADO PELA ATMOSFERA NEUTRA

O atraso provocado pela atmosfera neutra, na direção zenital, pode ser calculado a partir dos modelos empíricos apresentados na seção 3.1.1 ou dos arquivos de previsão do atraso troposférico zenital do CPTEC/INPE. Além de

possibilitar o posicionamento em tempo-real estas opções não dependem dos dados GNSS.

A temperatura e a pressão atmosférica, necessárias para o modelo de Hopfield, são obtidas com a utilização do modelo GPT. Neste caso, o código escrito em fortran, disponível em: <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY>, foi adaptado ao programa computacional em desenvolvimento. Além disso, adotou-se a correção com relação à variação de latitude para o cálculo da altura da camada úmida e a pressão parcial do vapor d'água foi calculada assumindo-se a umidade relativa como sendo igual a 50%.

Quanto aos arquivos de previsão do atraso troposférico zenital do CPTEC/INPE, utilizaram-se os arquivos binários disponibilizados por este instituto, onde o código escrito em fortran, disponível em: <http://satelite.cptec.inpe.br/zenital/>, foi adaptado ao programa computacional para interpolar os atrasos espacialmente. Para a obtenção dos atrasos no instante de interesse uma interpolação linear entre os dois instantes mais próximos da previsão é aplicada.

A figura 5.2 mostra o comportamento da componente hidrostática do atraso zenital provocado pela atmosfera neutra calculado através do modelo de PNT para as estações POLI, RIOD e NAUS em quatro dias: 05/05/2010, 05/08/2010, 05/11/2010 e 05/02/2011, abrangendo todas as estações do ano.

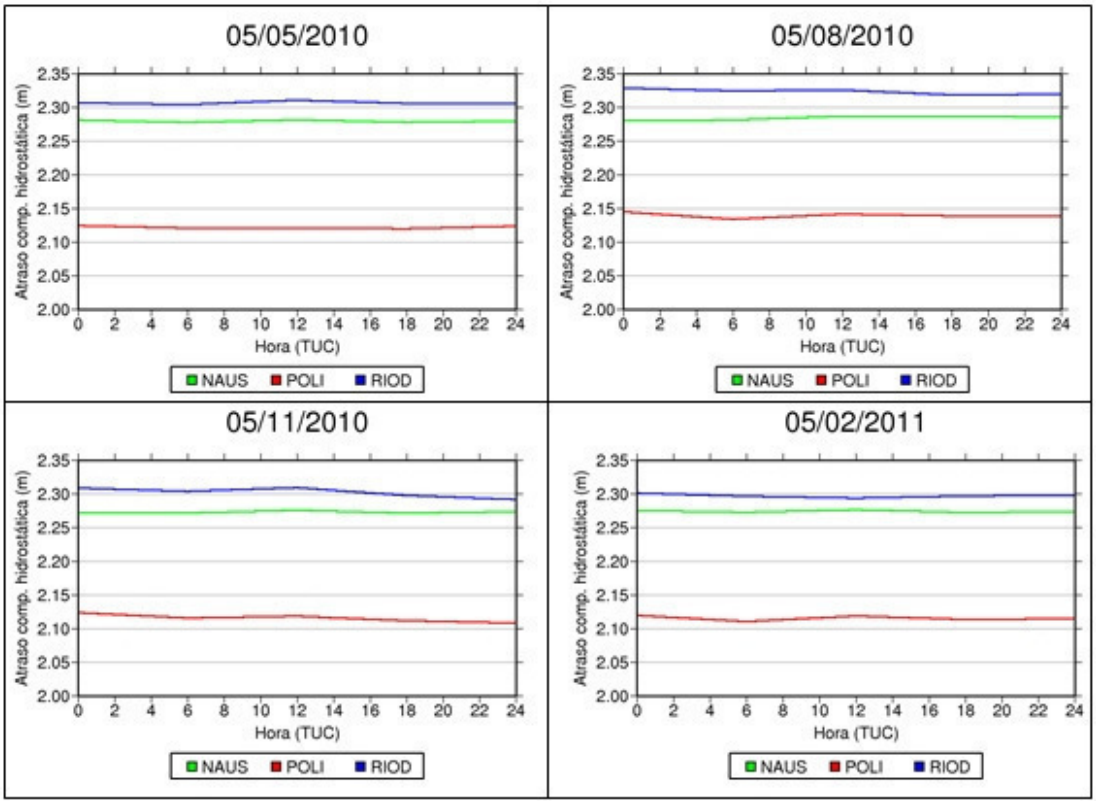

Figura 5.2 – Atraso da componente hidrostática das estações NAUS, POLI e RIOD nas quatro estações do ano

Observa-se, da figura 5.2, que a componente hidrostática do atraso devido à refração da atmosfera neutra no zênite variou entre aproximadamente 2,11 m e 2,33 m em todos dias e no local das estações em questão. Além disso, verifica-se que a magnitude do atraso é inversamente proporcional à altitude da estação, sendo maior na estação RIOD e menor na estação POLI.

A figura 5.3 traz o comportamento da componente úmida do atraso zenital provocado pela atmosfera neutra calculado através dos arquivos de previsão do atraso troposférico zenital para as mesmas estações e mesmos dias citados anteriormente.

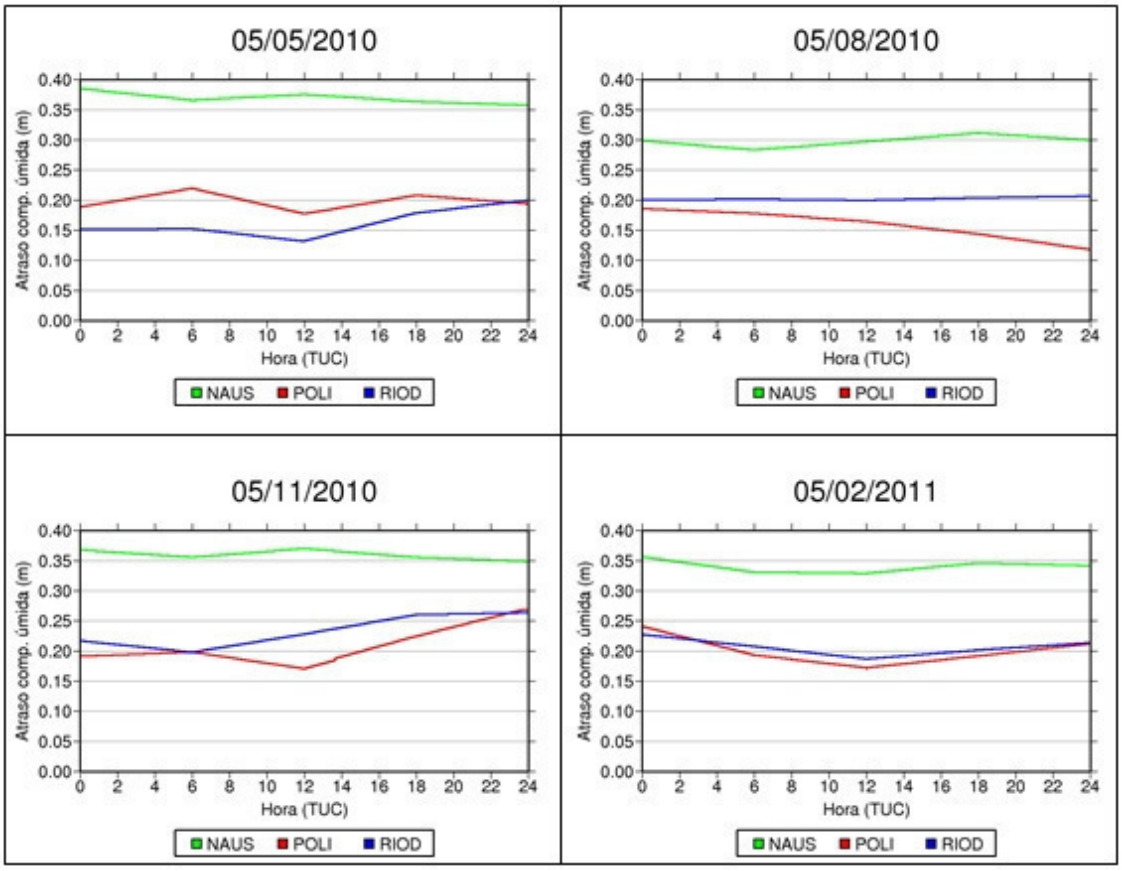

Figura 5.3 – Atraso da componente úmida das estações NAUS, POLI e RIOD nas quatro estações do ano

Verifica-se que a componente úmida do atraso provocado pela atmosfera neutra no zênite varia de 0,17 m a 0,38 m, possuindo maior magnitude na estação NAUS.

Comparando a figura 5.2 com a figura 5.3, constata-se que o valor médio da componente úmida é cerca de 11% do valor médio da componente hidrostática, confirmando a teoria (seção 3.1).

Visando avaliar a qualidade dos atrasos calculados através do modelo de Hopfield, este foi comparado com os atrasos calculados com os arquivos de previsão do atraso troposférico zenital do CPTEC/INPE utilizando os mesmos dados das estações NAUS, POLI e RIOD. A figura 5.4 mostra os casos onde a diferença entre os atrasos das componentes hidrostática e úmida calculados pelo modelo de PNT e os atrasos calculados através do modelo de Hopfield foram máximos e mínimos.

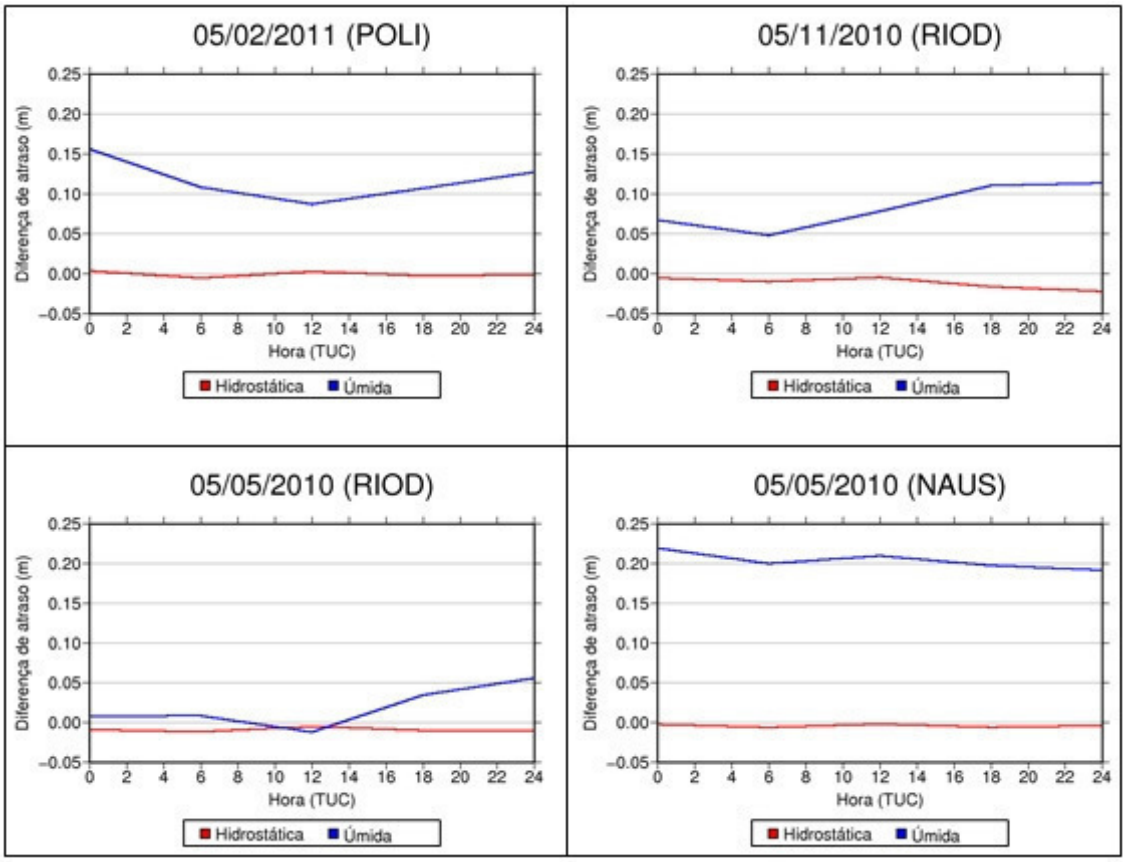

Figura 5.4 – Comparação entre os atrasos calculados pelo modelo de PNT e o modelo de Hopfield

Dos dados processados, verifica-se que a menor diferença para a componente hidrostática ocorreu na estação POLI no dia 05/02/2011, com RMS de 0,002 m, enquanto que a maior diferença para esta componente foi verificada na estação RIOD no dia 05/11/2010, com RMS de 0,012 m.

A menor e maior diferenças para a componente úmida ocorreram na estação RIOD no dia 05/05/2010, com RMS de 0,025 m, e na estação NAUS no dia 05/05/2010, com RMS de 0,203 m.

Portanto, os resultados obtidos com o processamento dos dados indicam que o atraso da componente hidrostática é cerca de 10 vezes melhor modelada do que a componente úmida ao se utilizar o modelo de Hopfield. Além disso, ressalta-se que o modelo de Davis (1985) proporcionou resultados similares ao do modelo de Hopfield e por isso foi suprimido da análise.

Para exemplificar o efeito causado pela elevação dos satélites, o atraso troposférico zenital das componentes hidrostática e úmida, obtidas através dos arquivos de previsão do atraso troposférico zenital do CPTEC/INPE, bem como

o atraso total, foram mapeados para diversos valores de elevação empregrando a função GMF. O resultado é apresentado na figura 5.5.

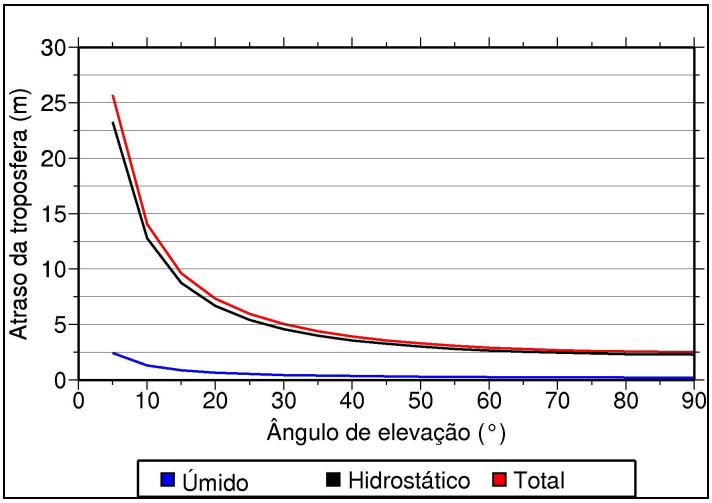

Figura 5.5 – Efeito da elevação dos satélites sobre o atraso troposférico

Verifica-se que o valor do atraso troposférico total na direção zenital atinge cerca de dez vezes a sua magnitude quando mapeado para elevação de 5°. Os atrasos troposféricos mapeados para elevações menores que 5° apresentam valores muito elevados e foram suprimidos da análise.

No cálculo dos dados da estação de referência virtual a diferença entre o atraso troposférico na posição da estação virtual e o atraso troposférico na posição da estação mestra é necessária. A figura 5.6 mostra um exemplo do efeito da elevação dos satélites sobre a diferença de atraso troposférico, calculado através do modelo de PNT e a função de mapeamento GMF, entre duas estações localizadas no estado de São Paulo e distantes de aproximadamente 80 km. Ressalta-se que, neste caso, o atraso troposférico zenital variou de aproximadamente 2,13 m até cerca de 2,40 m.

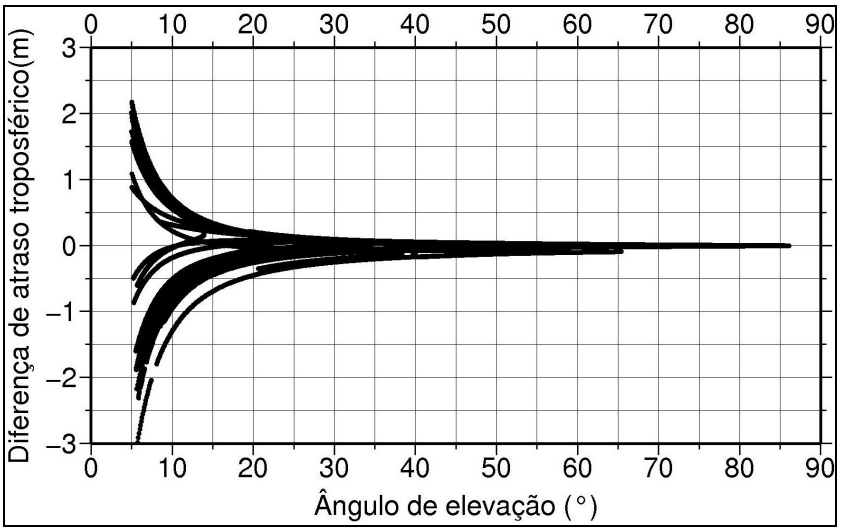

Figura 5.6 – Diferença de atraso troposférico em função do ângulo de elevação dos satélites

Verifica-se que quanto menor o ângulo de elevação do satélite, maior a diferença de atraso troposférico. Destaca-se que a presença de diferenças com sinais positivos e negativos está relacionada com a variação espacial do atraso troposférico e o caminho que os sinais dos satélites percorrem até as estações mestre e virtual.

5.3.2 CÁLCULO DO ATRASO CAUSADO PELA IONOSFERA

Visando proporcionar uma forma de se estimar o atraso provocado pela passagem dos sinais GNSS pela ionosfera que independa de dados GNSS em tempo-real, foi desenvolvido um modelo para previsão regional do VTEC a partir de arquivos no formato IONEX utilizando MLP com uma camada de neurônios ocultos.

É de suma importância que as entradas possuam correlação com a saída. No caso desta pesquisa, deseja-se calcular o VTEC, cuja variação está principalmente relacionada com a atividade solar, a posição geográfica e a estação do ano.

O modelo tem como entradas as coordenadas do IPP e o instante do dia (TU), como ilustra a figura 5.7.

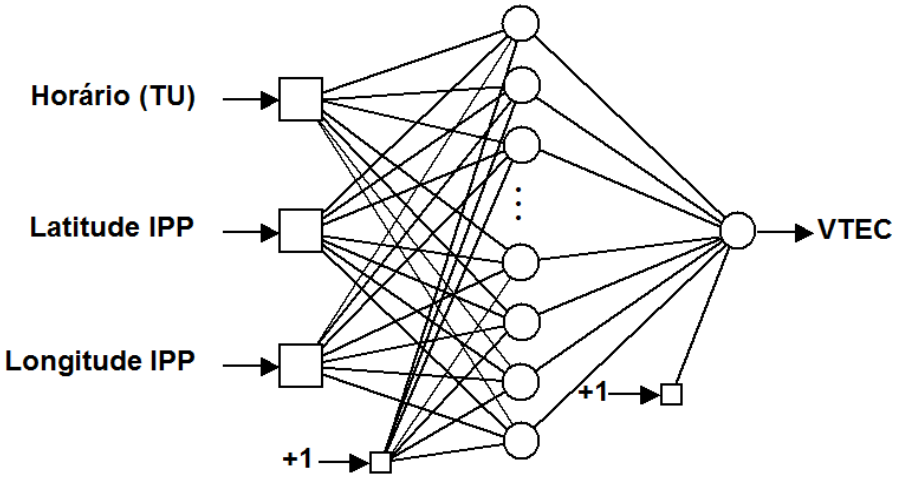

Figura 5.7 - Rede neural artificial desenvolvida

Salienta-se que no modelo proposto, as variações de curto período estão relacionadas com o horário, enquanto que as variações de longo período são consideradas através da realização de um treinamento recursivo, com taxa de atualização de 24 horas. Embora não tenham sido utilizados, índices de atividade solar e condição geomagnética, tais como o fluxo solar 10,7 cm e Dst, podem ser utilizados.

5.3.2.1 Treinamento das RNA

O conjunto de estimação foi estabelecido com dados de 72 horas anteriores ao do instante de início da previsão, onde o instante do dia, as coordenadas do IPP e o VTEC foram obtidos dos arquivos IONEX produzidos tanto pelo IGS como pelo programa Mod_Ion.

O GIM do IGS foi delimitado entre as latitudes +15° e –40° e as longitudes –30° e –85°, resultando em 39 grades com 276 vértices (10.764 amostras). Os arquivos IONEX produzidos pelo Mod_Ion foram delimitados entre as latitudes +14° e –40° e longitudes –32° e –88°, resultando em 75 grades com 420 vértices (31.500 amostras). A figura 5.8 ilustra as grades resultantes das duas opções consideradas.

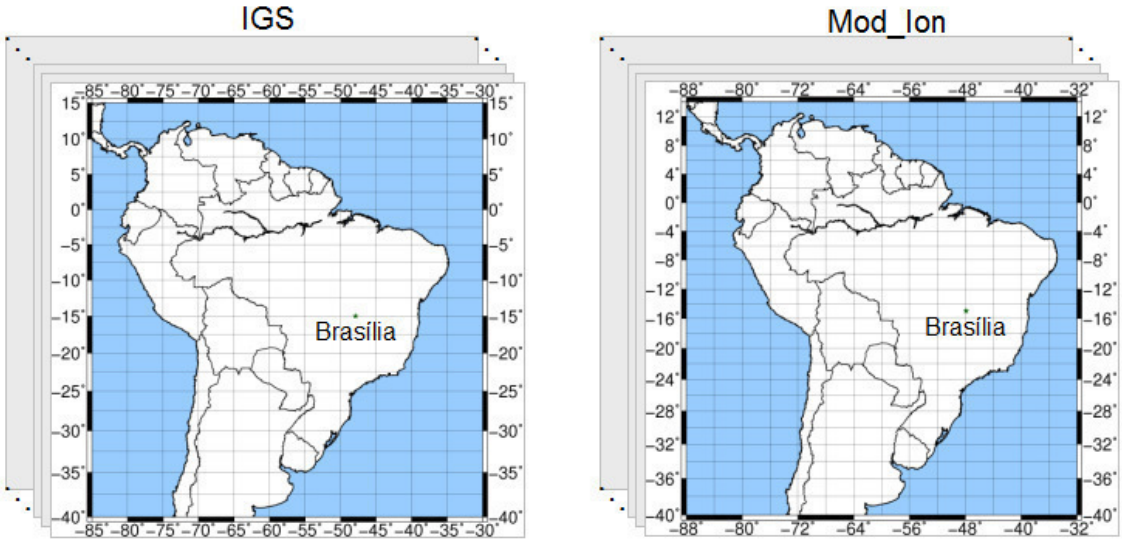

Figura 5.8 – Área de abrangência dos modelos

Conforme pode ser visto na figura 5.8, a área de abrangência dos modelos contém a região equatorial, o que torna a previsão do VTEC um desafio, visto as anomalias que ocorrem nesta região.

Os arquivos IONEX são lidos e as entradas do modelo são individualmente normalizadas através da divisão da diferença entre a entrada e a seu valor médio pelo desvio-padrão correspondente. Este procedimento visa acelerar o processo de aprendizado e diminuir a probabilidade do algoritmo convergir para um mínimo local.

Visando a realização de validação cruzada (seção 2.2.1.3), o conjunto de validação foi definido como sendo composto pelos dados dos arquivos IONEX das 72 horas subsequentes à do treinamento.

Um programa em linguagem Fortran 77, denominado de RNAIONEX, foi desenvolvido para ler os arquivos IONEX e escrever os arquivos dos conjuntos de estimação e validação no formato de entrada do programa utilizado no treinamento.

Para treinar as RNA, foi desenvolvido um programa em Fortran 77, denominado NBN_LTG. Este programa emprega a versão sem retropropagação do método LM para estimar os parâmetros da RNA.

No primeiro dia de treinamento, os parâmetros da MLP são inicializados aleatoriamente entre –1 e +1. Caso contrário os parâmetros estimados no

treinamento do dia anterior são utilizados. Com esta prática, o processo de inicialização destes parâmetros é otimizado e a taxa de convergência do algoritmo de treinamento é melhorada, conforme figuras 5.14 e 5.24.

A figura 5.9 traz o fluxograma do treinamento com a utilização destes dois programas, onde o termo "rand" representa uma função que gera números aleatórios entre o intervalo especificado (-1 e +1), o índice i representa o dia e o termo $Peso_i$ se refere ao vetor dos parâmetros da MLP do dia i.

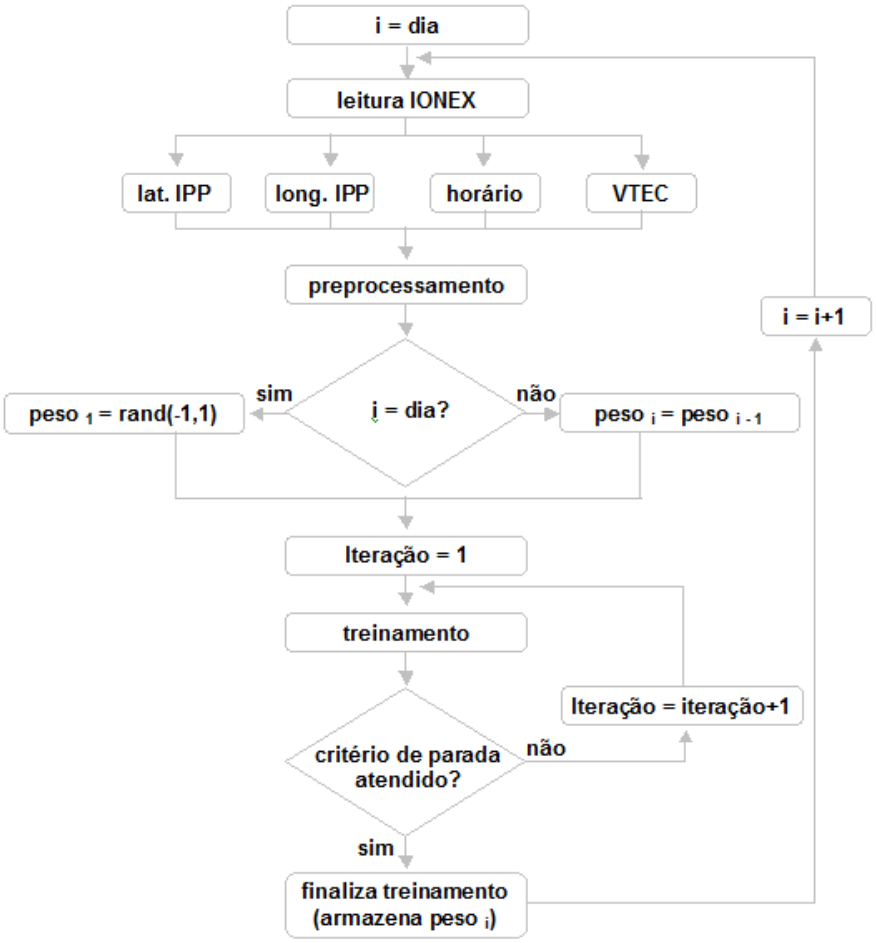

Figura 5.9 – Fluxograma do treinamento da RNA

A função de ativação dos neurônios da camada oculta foi definida como sendo a do tipo bipolar (expressão 2.6), a qual diminui a incidência de saturação do neurônio da camada de saída.

Para o neurônio da camada de saída, a função de ativação escolhida é do tipo linear. Com esta prática, evita-se de se re-escalar a saída e os resultados podem ser utilizados diretamente.

5.3.2.2 Avaliação do treinamento das RNA

Na avaliação das redes neurais artificiais, foram treinadas RNA com dados de dezoito dias do último período de alta atividade solar, incluindo uma tempestade geomagnética muito severa (de 21 de março a 4 de abril de 2001), e de baixa atividade solar (de 16 a 30 de junho de 2009). As RNA treinadas foram utilizadas para calcular o VTEC para 72 horas posteriores à do treinamento.

A atividade solar é o fator que mais influencia na quantidade de elétrons livres, sendo conveniente mensurá-la. A figura 5.10 traz os valores do fluxo solar 10,7 cm medidos na estação Penticton, Canadá, para os dias considerados nas análises, os quais foram obtidos de NOAA (2012).

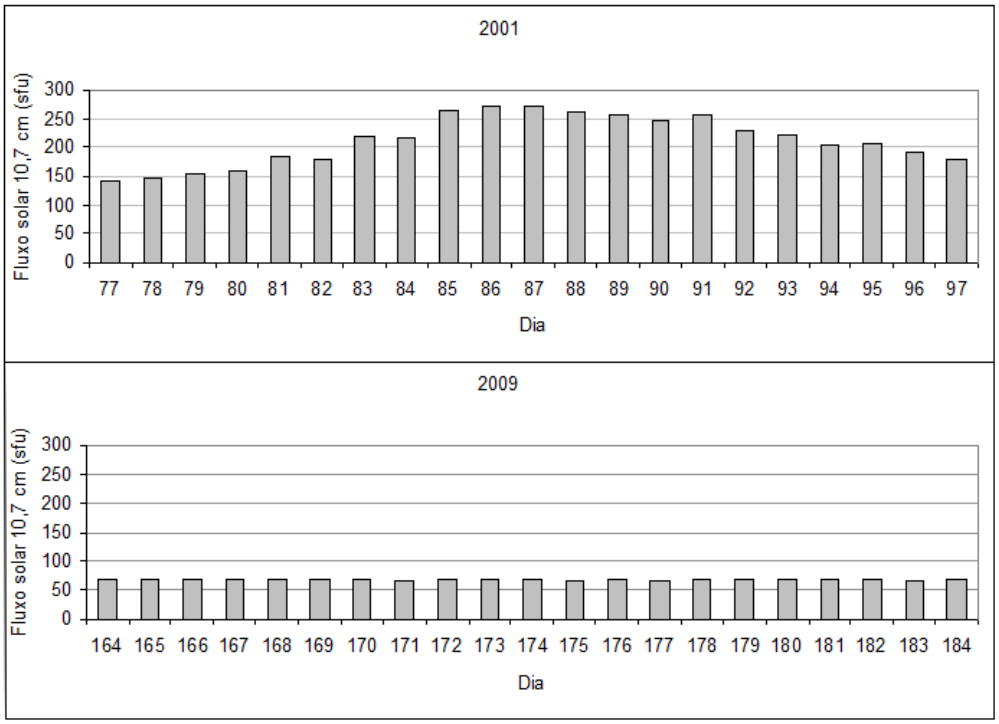

Figura 5.10 – Histórico do fluxo solar 10,7 cm

Durante o período de alta atividade solar considerado nesta pesquisa, a medida do fluxo solar 10,7 cm variou de 139,8 sfu a 273,5 sfu, apresentando valor médio de cerca de 212,6 sfu. No período de baixa atividade solar, esta grandeza variou de 66,5 sfu a 68,5 sfu, com média de 67,5 sfu.

Outra grandeza de interesse a ser mensurada é a condição geomagnética, visto que ela está relacionada com variações de curto período na densidade de elétrons livres. A figura 5.11 contém o histórico do índice Dst para os dois períodos do experimento.

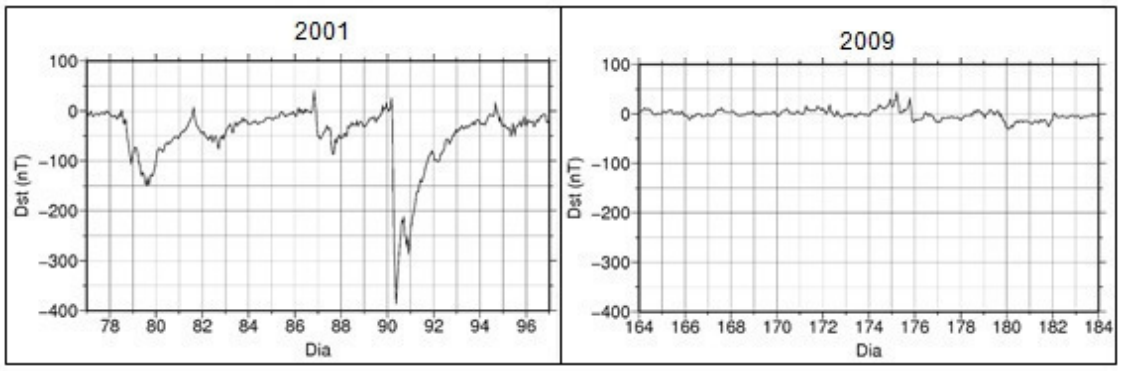

Figura 5.11 – Índice Dst nos dois períodos

No período de alta atividade solar, o índice Dst apresentou variações maiores do que no período de baixa atividade solar, atingindo o valor de -400 nT no dia 90 (29/03/2001), quando ocorreu a tempestade geomagnética. Durante o período de baixa atividade solar este índice não chegou a –50 nT.

Nas análises, quatro casos foram considerados:

- caso 1: período de alta atividade solar sem influência de tempestade geomagnética;
- caso 2 : previsão para o dia em que a tempestade geomagnética ocorreu;
- caso 3 : período em que a previsão do VTEC foi realizada utilizando dados influenciados pela tempestade geomagnética e o
- caso 4 : período de baixa atividade solar.

Visando a regularização estrutural da RNA, a quantidade de neurônios da camada oculta foi determinada através da comparação da RMS do conjunto de validação produzida por RNA treinadas com quantidades diferentes de neurônios ocultos para os dias 21/03/2001 (alta atividade solar), 30/03/2001 (tempestade geomagnética) e 19/06/2009 (baixa atividade solar), conforme mostram as figuras 5.12 e 5.22.

Definida a quantidade de neurônios ocultos, os dados do período de 21 de março (dia 83) a 4 de abril (dia 98) de 2001 e de 19 a 27 de junho de 2009 (dia

173 a dia 182) foram processados. Análises acerca da diferença entre o VTEC calculado pela RNA e o calculado pelo IGS ou Mod_Ion, na grade de cada modelo, foram conduzidas. O erro relativo, dado pela expressão (3.30), também foi avaliado.

A seguir são apresentados os resultados obtidos com a utilização dos arquivos IONEX do IGS e em seguida com os arquivos produzidos pelo Mod_Ion.

a) GIM do IGS

Na avaliação acerca da quantidade de neurônios ocultos foram treinadas RNA com diferentes quantidades de neurônios ocultos e a RMS do conjunto de validação de cada solução foi analisada. A figura 5.12 mostra o valor da RMS do conjunto de validação das três situações em função da quantidade de neurônios da camada oculta quando se utilizaram os arquivos IONEX produzidos pelo IGS.

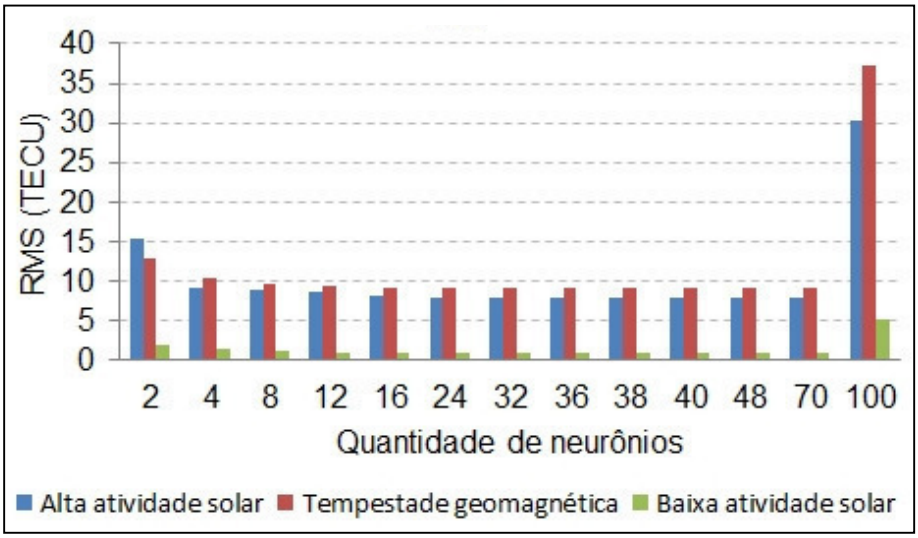

Figura 5.12 – RMS do conjunto de validação para diferentes quantidades de neurônios ocultos utilizando GIM do IGS

Da figura 5.12, verifica-se que durante o período de alta atividade solar a RMS do conjunto de validação atinge o valor mínimo quando se utilizaram 16 neurônios na camada oculta. Além disso, verifica-se que o valor da RMS permanece em um patamar no intervalo de 16 neurônios a 70 neurônios ocultos e que ocorreu *overfitting* quando 100 neurônios ocultos foram

empregados. Portanto, neste caso, a quantidade de neurônios ocultos adotada para as previsões do VTEC a partir de RNA treinada com GIM do IGS foi 16. No caso dos dias de baixa atividade solar e tempestade geomagnética, observa-se que o valor mínimo da RMS do conjunto de validação é atingido com 8 neurônios ocultos, permanecendo neste patamar até 70 neurônios ocultos. Portanto, adotar a mesma quantidade de neurônios ocultos utilizada durante alta atividade solar não deve causar prejuízo na qualidade das previsões, sendo a quantidade de neurônios ocultos utilizada.

A figura 5.13 mostra a duração do processamento do treinamento em função da quantidade de neurônios ocultos. Na avaliação foram executadas 200 iterações utilizando uma máquina do Laboratório de Topografia e Geodésia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, a qual possui processador i7 e 12 Gb de memória RAM. O sistema operacional instalado é windows 7 de 64 bits.

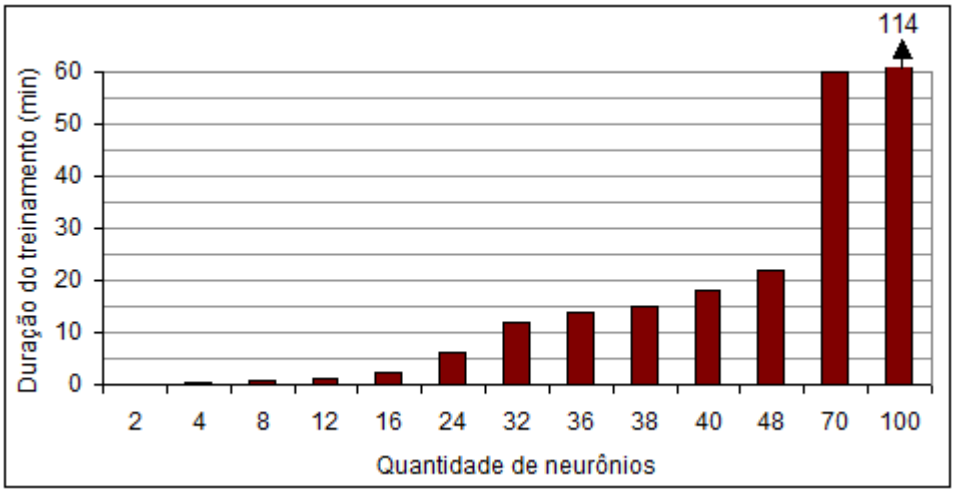

Figura 5.13 – Duração do processamento do treinamento em função da quantidade de neurônios ocultos (IGS)

Observa-se que a duração do treinamento aumenta conforme a quantidade de parâmetros a se estimar também aumenta. Destaca-se que o treinamento é executado em 2,5 min quando se utilizam 16 neurônios na camada oculta. Tempo este aumentado para 114 min quando 100 neurônios ocultos foram utilizados.

O comportamento da RMS do conjunto de estimação obtida com a utilização de 16 neurônios ocultos para todos os dias dos dois períodos considerados foi analisado, o qual pode ser visto na figura 5.14.

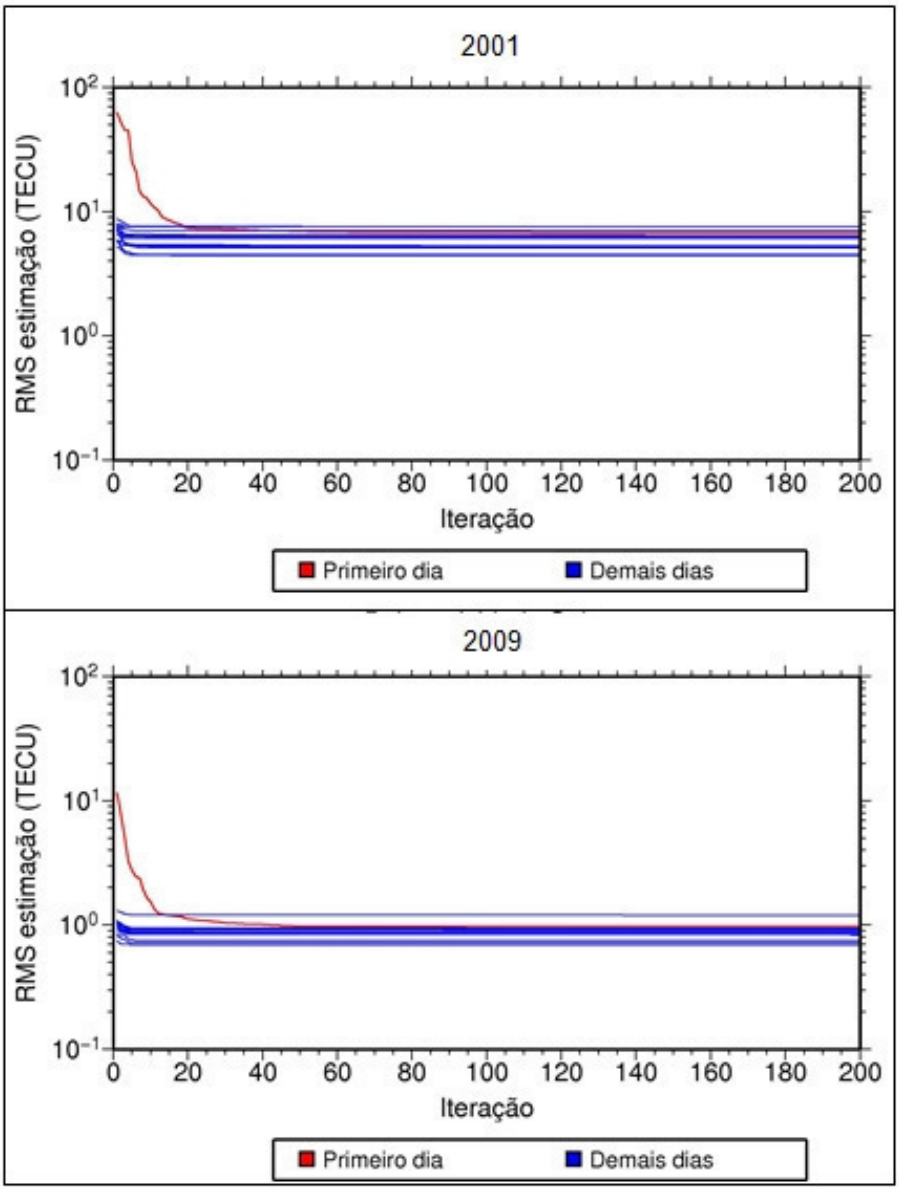

Figura 5.14 – Comportamento da RMS do conjunto de estimação (IGS)

Observa-se que durante alta atividade solar a RMS do conjunto de estimação é cerca de 10 vezes maior que a RMS do conjunto de estimação do período de baixa atividade solar. Além disso, pode ser visto que, em geral, o processo converge com menos de 55 iterações. Verifica-se, também, que iniciar os parâmetros da RNA com os parâmetros estimados no treinamento do dia anterior diminuiu a quantidade de iterações para aproximadamente 5.

A figura 5.15 traz os valores do VTEC contido nos GIM ($VTEC_{GIM}$) e o VTEC calculado pela RNA ($VTEC_{RNA}$) para todas as coordenadas da grade durante os dois períodos.

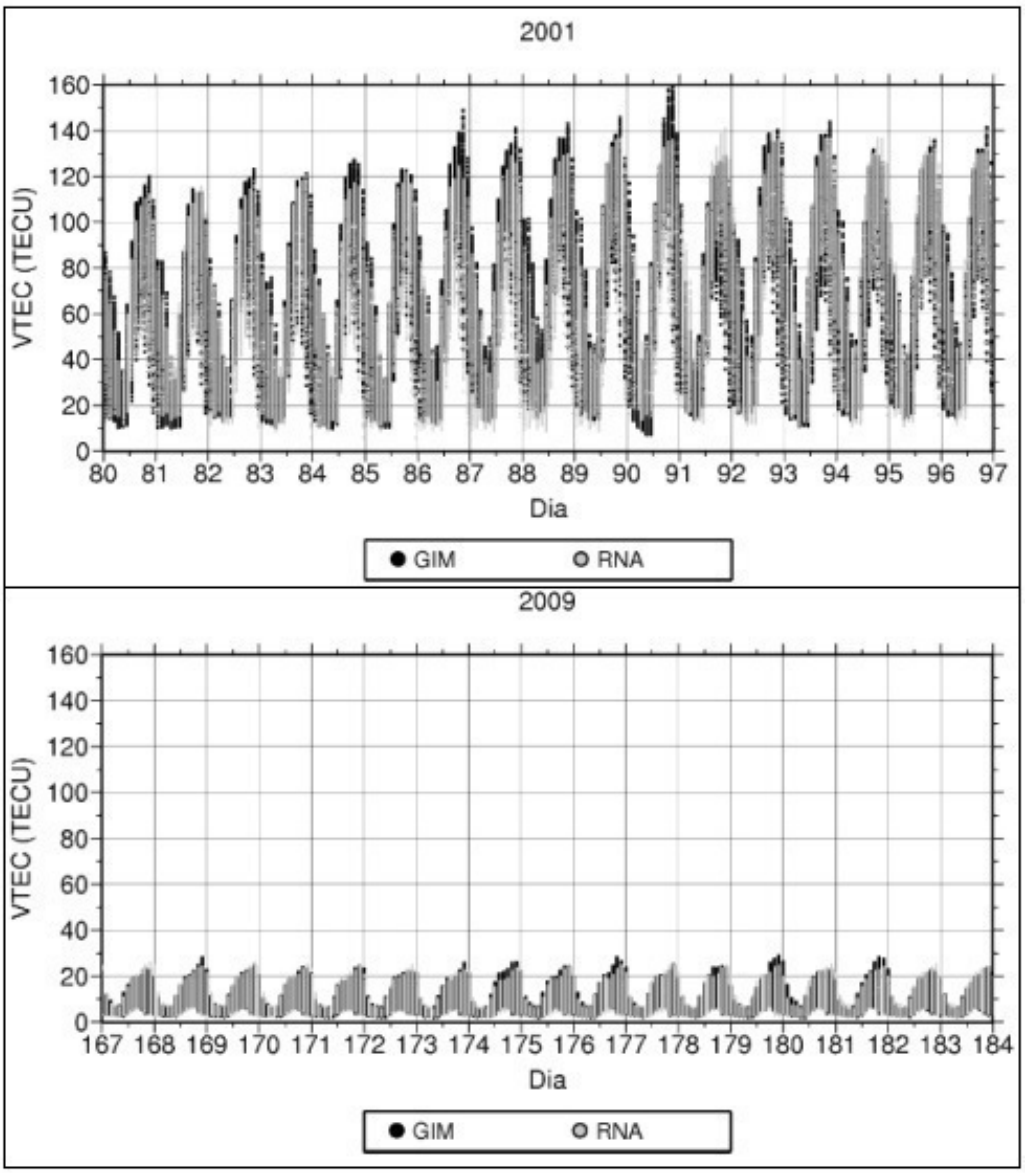

Figura 5.15 – $VTEC_{GIM}$ x $VTEC_{RNA}$

Observa-se, da figura 5.15, que os valores máximos do $VTEC_{GIM}$ durante alta atividade solar são cerca de 8 vezes maiores do que em baixa atividade solar e que ocorre uma variação de curto período em ambos os períodos. Comparando o $VTEC_{GIM}$ com o $VTEC_{RNA}$ observa-se que a RNA é auto-adaptativa. Porém, como os parâmetros da MLP são calculados com dados dos três dias anteriores a RNA não é capaz de se adaptar às variações do $VTEC_{GIM}$ com períodos menores, como pode ser visto do dia 89 para o 90 e do dia 179 para o 180.

As dispersões entre o $VTEC_{GIM}$ e o $VTEC_{RNA}$ para os 4 casos foram investigadas e os coeficientes de correlação foram calculados, como pode ser

visto na figura 5.16. É importante notar que a escala do gráfico do caso 4 é diferente dos demais para que seja possível visualizar maiores detalhes da dispersão obtida durante o período de baixa atividade solar.

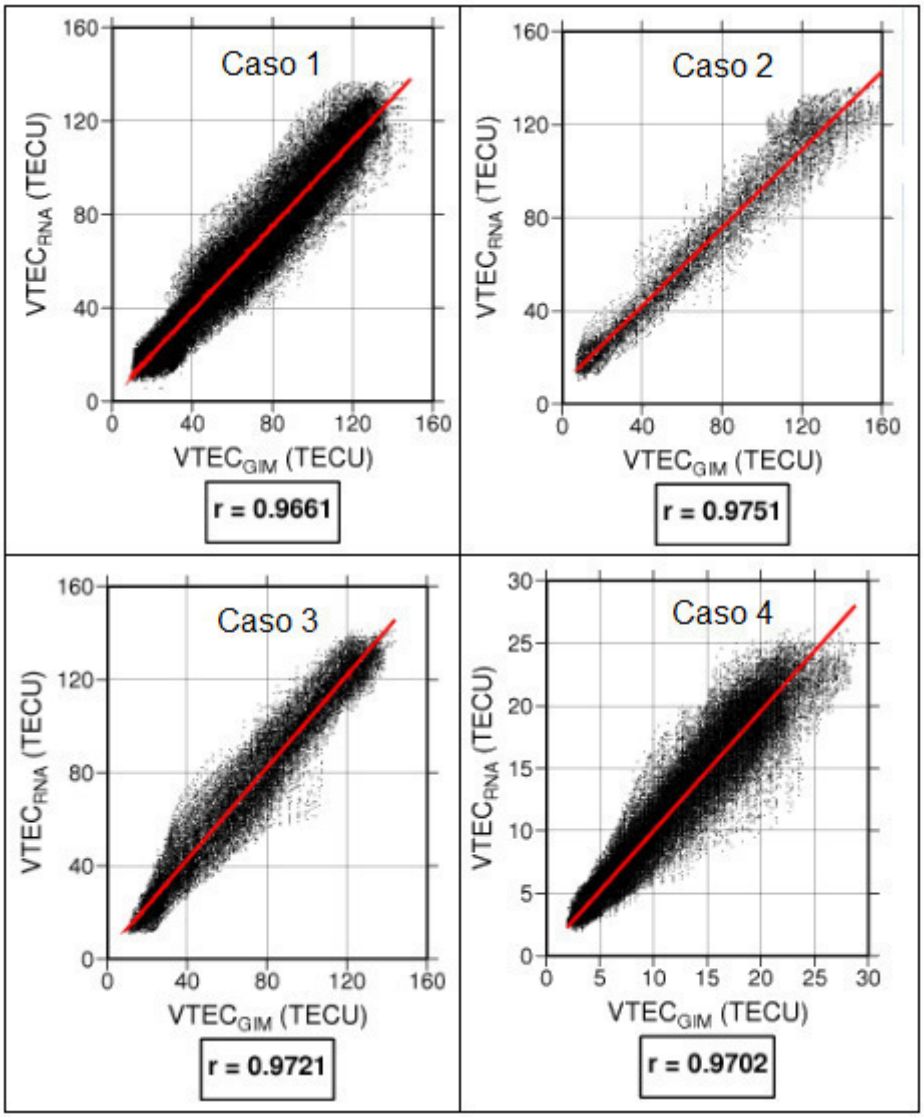

Figura 5.16 – Dispersão entre o $VTEC_{GIM}$ e o $VTEC_{RNA}$

Analisando a figura 5.16, verifica-se que a dispersão tende a aumentar proporcionalmente ao valor do VTEC até a aproximadamente 50 TECU e depois disso a dispersão se estabiliza. Um comportamento diferente pode ser visto no caso 3, onde a dispersão aumentou até aproximadamente 100 TECU e depois diminuiu até um determinado patamar. O coeficiente de correlação revela uma forte correlação entre o $VTEC_{GIM}$ e o $VTEC_{RNA}$.

A diferença entre o $VTEC_{GIM}$ e $VTEC_{RNA}$ (dVTEC) durante os dois períodos foi analisada e seu comportamento é apresentado na figura 5.17.

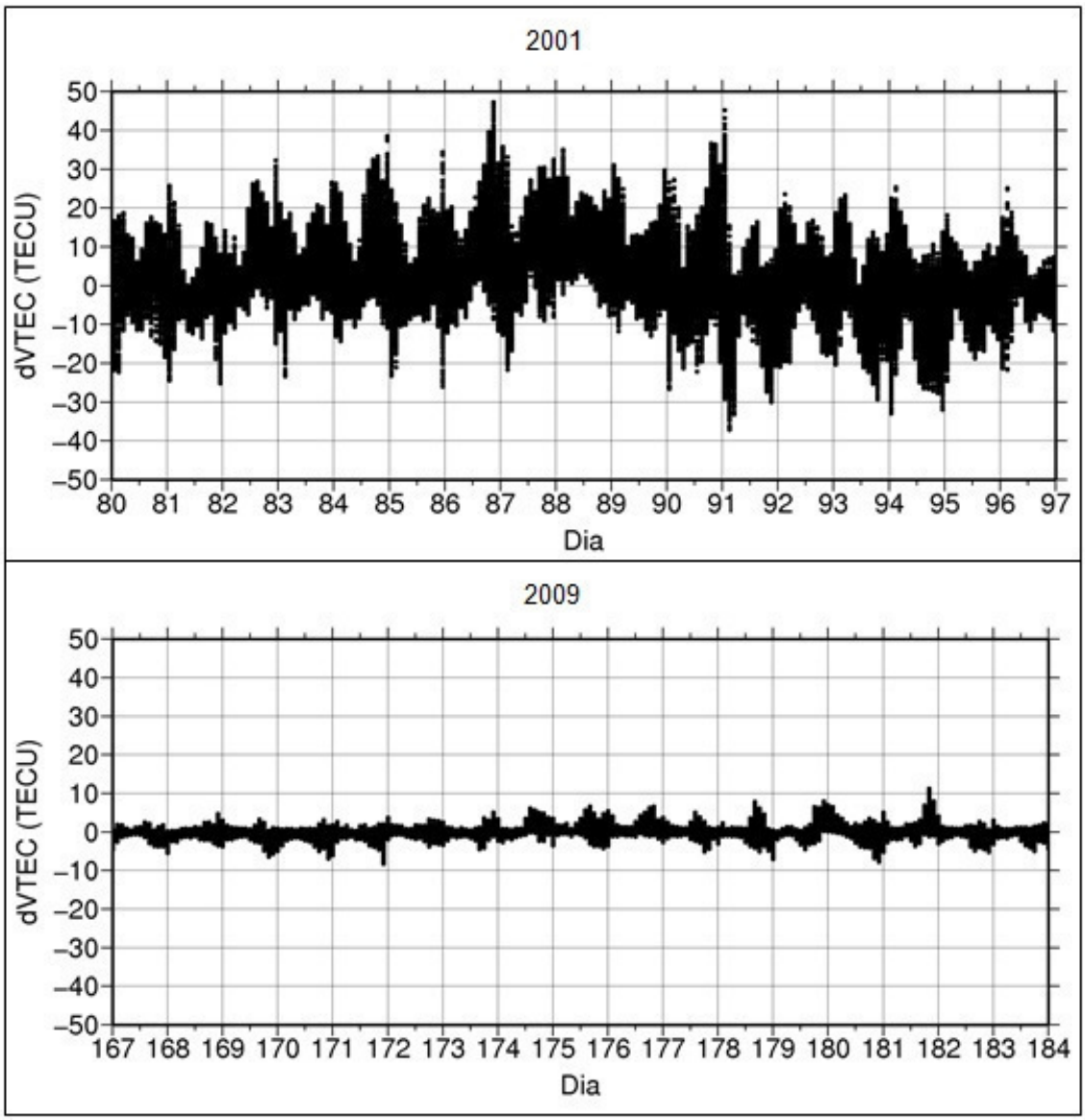

Figura 5.17 – Comportamento da diferença entre $VTEC_{GIM}$ e $VTEC_{RNA}$

Constata-se que a dVTEC possui um comportamento cíclico em ambos os períodos, onde os valores máximos são atingidos quanto mais próximo dos valores máximos diários do VTEC.

A distribuição da dVTEC para os quatro casos pode ser vista na figura 5.18.

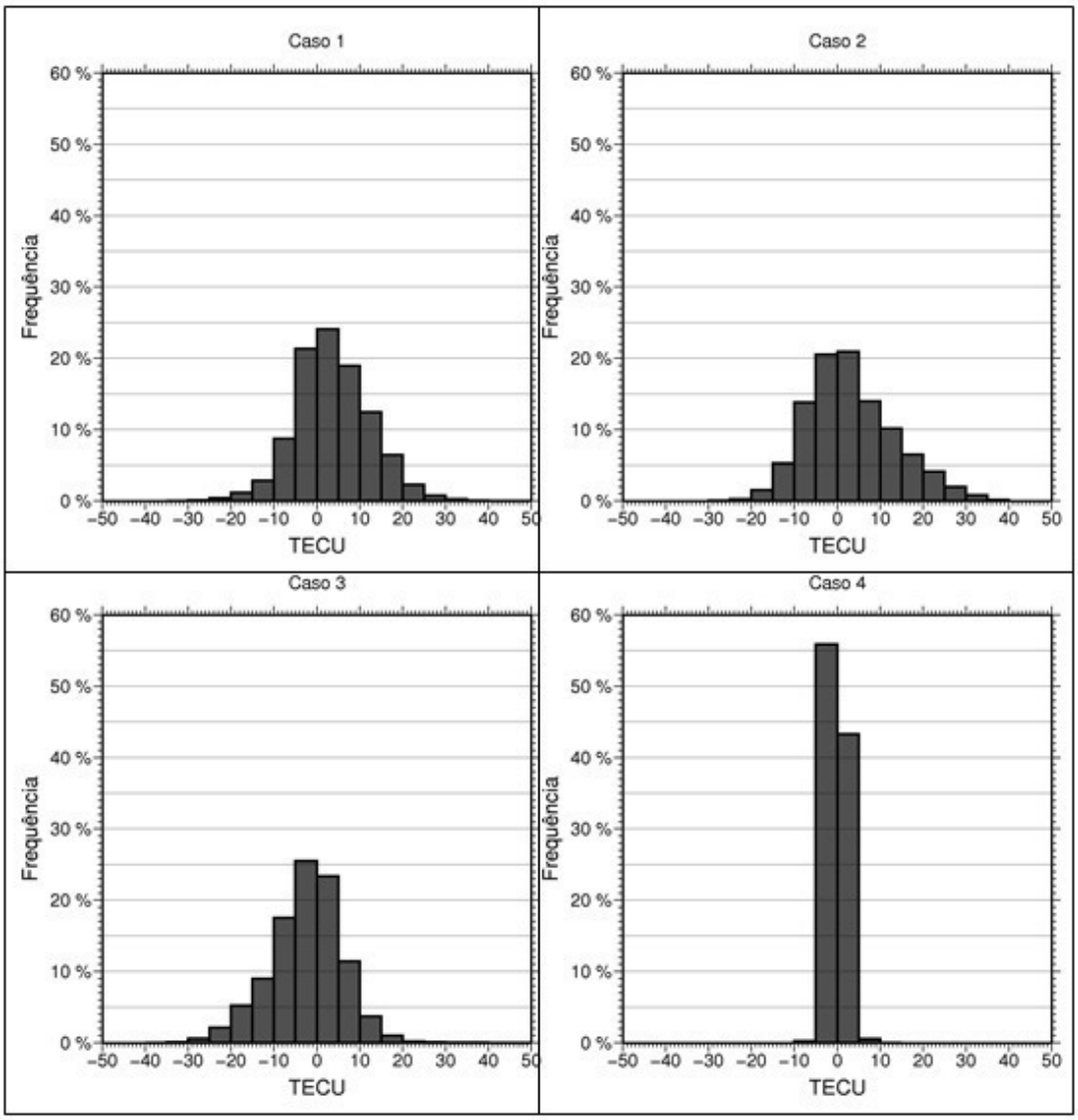

Figura 5.18 – Distribuição da dVTEC

Para os casos 1 e 3, cerca de 88% das dVTEC estão entre +15 TECU e –15 TECU. No caso 2, esta porcentagem diminui de aproximadamente dois pontos percentuais. Para o caso 4, 99% das diferenças estão entre +5 TECU e –5 TECU.

A tabela 5.1 contém os valores máximos, médios e mínimos, bem como a RMS e o desvio-padrão da dVTEC considerando todos os resultados para os quatro casos.

Tabela 5.1 – Estatísticas da dVTEC (TECU)

Caso	Max	Med	Min	RMS	Desvio-padrão
1	44,6	3,7	-34,2	9,5	8,8
2	38,4	3,2	-29,8	10,7	10,2
3	43,0	-2,5	-35,0	8,8	8,5
4	11,1	-0,1	-8,3	1,4	1,4

Observa-se que a dVTEC pode chegar a aproximadamente 47 TECU durante alta atividade solar, valor este reduzido para 11 TECU durante baixa atividade solar. Por outro lado, a RMS indica que estas diferenças devem permanecer, na maior parte do tempo, abaixo de 11 TECU durante alta atividade solar e de 1,5 TECU caso contrário. O atraso provocado por tais diferenças varia de 1,79 m a 0,24 m em L1 e de 3,2 m a 0,44 m em L5.

A figura 5.19 contem a variação diária da RMS da dVTEC para os períodos considerados no experimento.

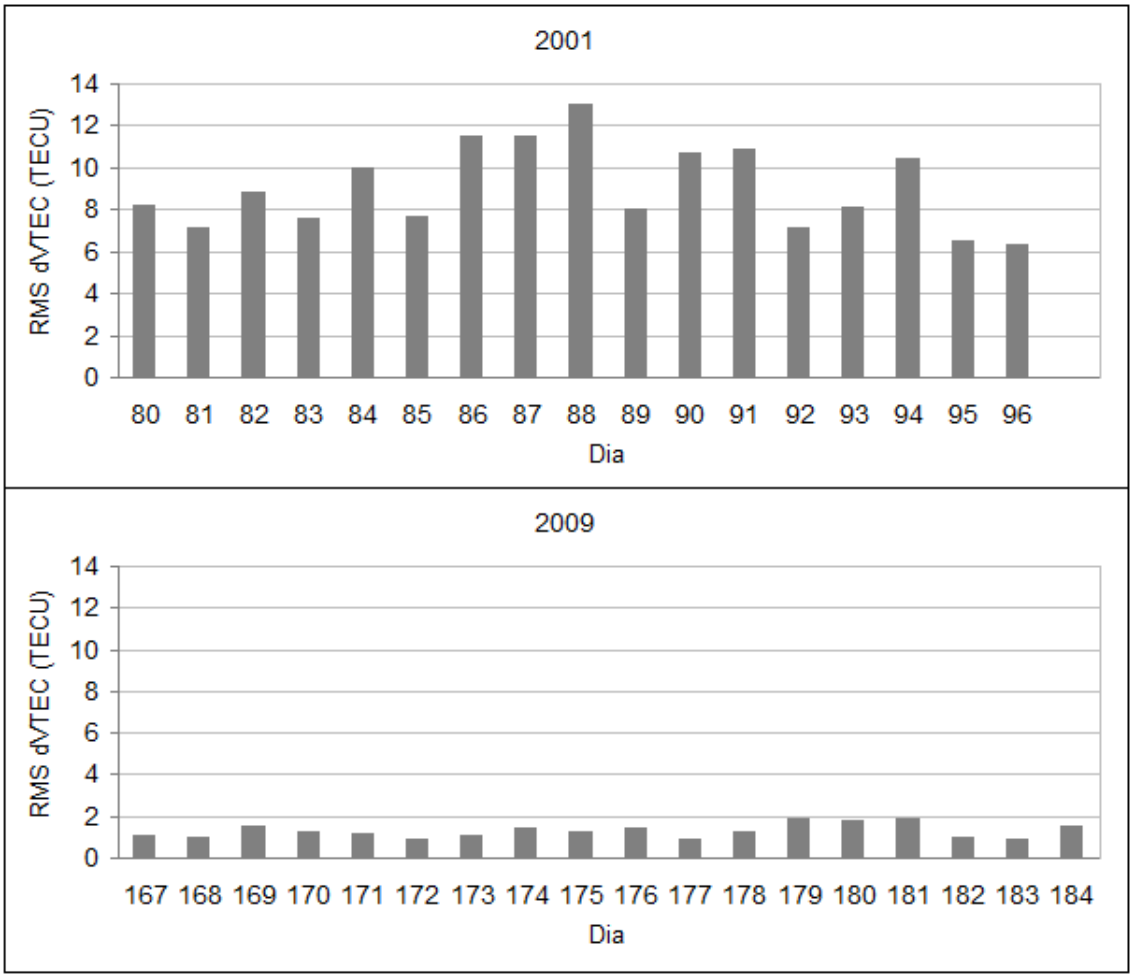

Figura 5.19 – Variação da RMS da dVTEC

Verifica-se que durante alta atividade solar, o valor da RMS é cerca de 5 a 12 vezes maior do que no período de baixa atividade solar. As variações da dVTEC são mais estáveis para o caso 4 (2009), variando de 1 TECU a aproximadamente 2 TECU. Comparando-se a figura 5.19 com as figuras 5.10 e

5.11, observa-se a relação do valor da RMS com a atividade solar e com a condição geomagnética, justificando o pior resultado ter ocorrido para o dia 88, dois dias antes da tempestade geomagnética. Além disso, também pode ser observado que a tempestade geomagnética não deteriora a solução de forma significativa.

Deve-se ressaltar também, que em 2001 os arquivos IONEX do IGS foram produzidos com dados de apenas 3 estações localizadas em território brasileiro, ao passo que em 2009, 10 estações foram utilizadas.

O erro relativo (ε), calculado através da expressão (3.30), foi analisado e sua série temporal pode ser vista na figura 5.20.

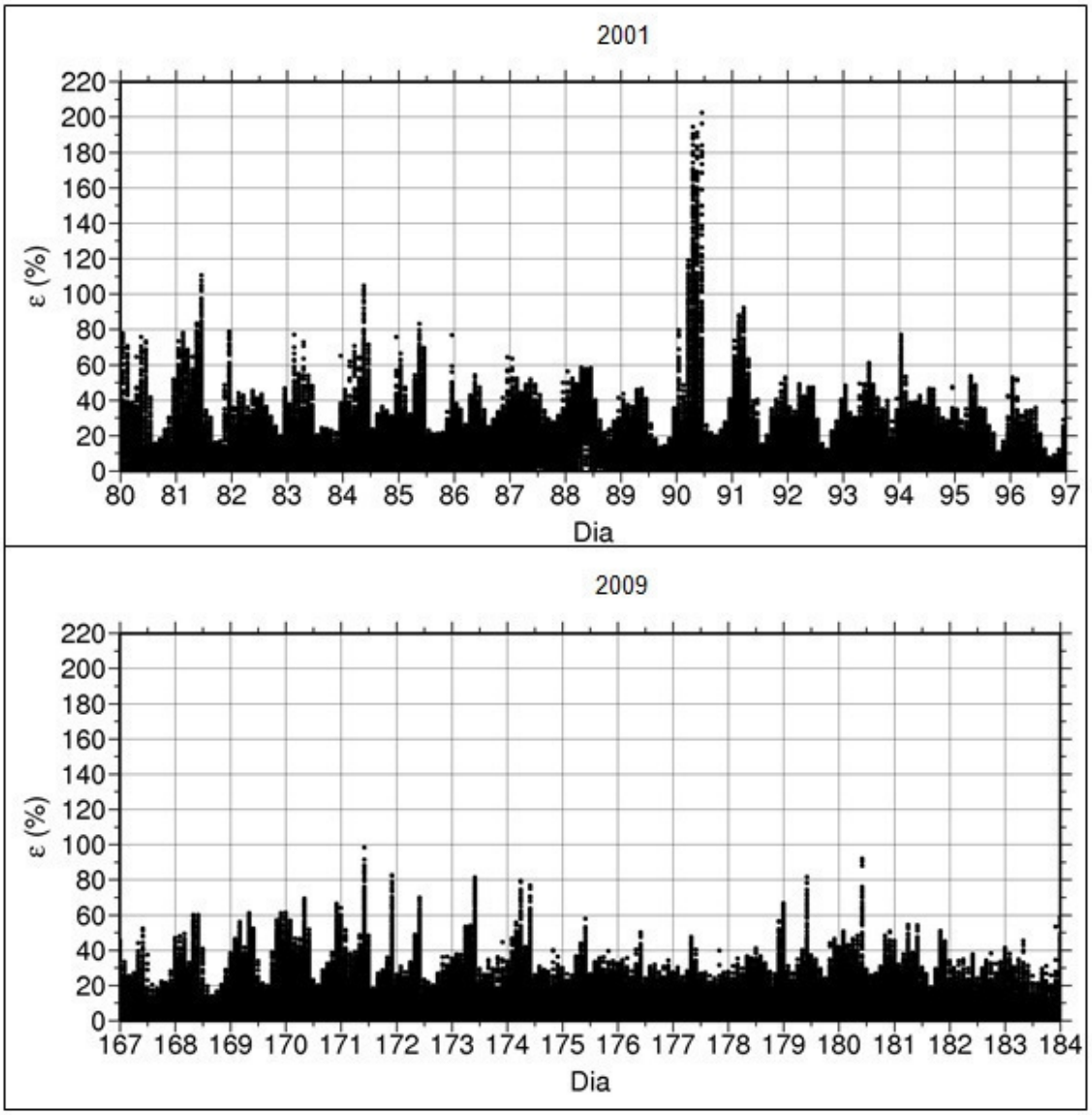

Figura 5.20 – Série temporal do erro relativo (GIM)

A figura 5.20 mostra que os erros relativos possuem a mesma magnitude para ambos os períodos, variando de aproximadamente 0% a 20% durante maior parte do tempo. Uma exceção ocorreu no dia 90 (caso 2) onde o erro relativo alcançou mais de 200% entre as 2 h e 5 h (horário local). Tal efeito ocorreu por que o valor do $VTEC_{GIM}$ sofreu um decréscimo devido à tempestade geomagnética. Além disso, um reflexo da tempestade geomagnética pode ser visto no dia 91, mas em uma escala menor. Os erros relativos dos dias 92 e 93 têm o mesmo nível do caso 1, mostrando que a utilização de dados afetados pela tempestade geomagnética não deteriora a predição do VTEC de forma significativa. A tabela 5.2 mostra os valores máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão do ε para os 4 casos.

Tabela 5.2 – Estatísticas do ε (%)

Caso	Max	Média	Min	RMS	σ
1	110,7	13,2	0,1	17,3	11,2
2	202,4	17,1	0,1	30,0	24,7
3	92,3	12,3	0,1	17,4	12,3
4	98,4	11,3	0,1	14,8	9,6

A RMS do ε variou de 30% (caso 2) até aproximadamente 15% (caso 4) mostrando que a RNA teve a qualidade de sua predição degradada pela tempestade geomagnética, visto que a RMS permaneceu em torno de 17% nos casos 1 e 2.

A variação espacial de ε da 1 h até as 23 h (TU) do dia 90 é apresentada na figura 5.21.

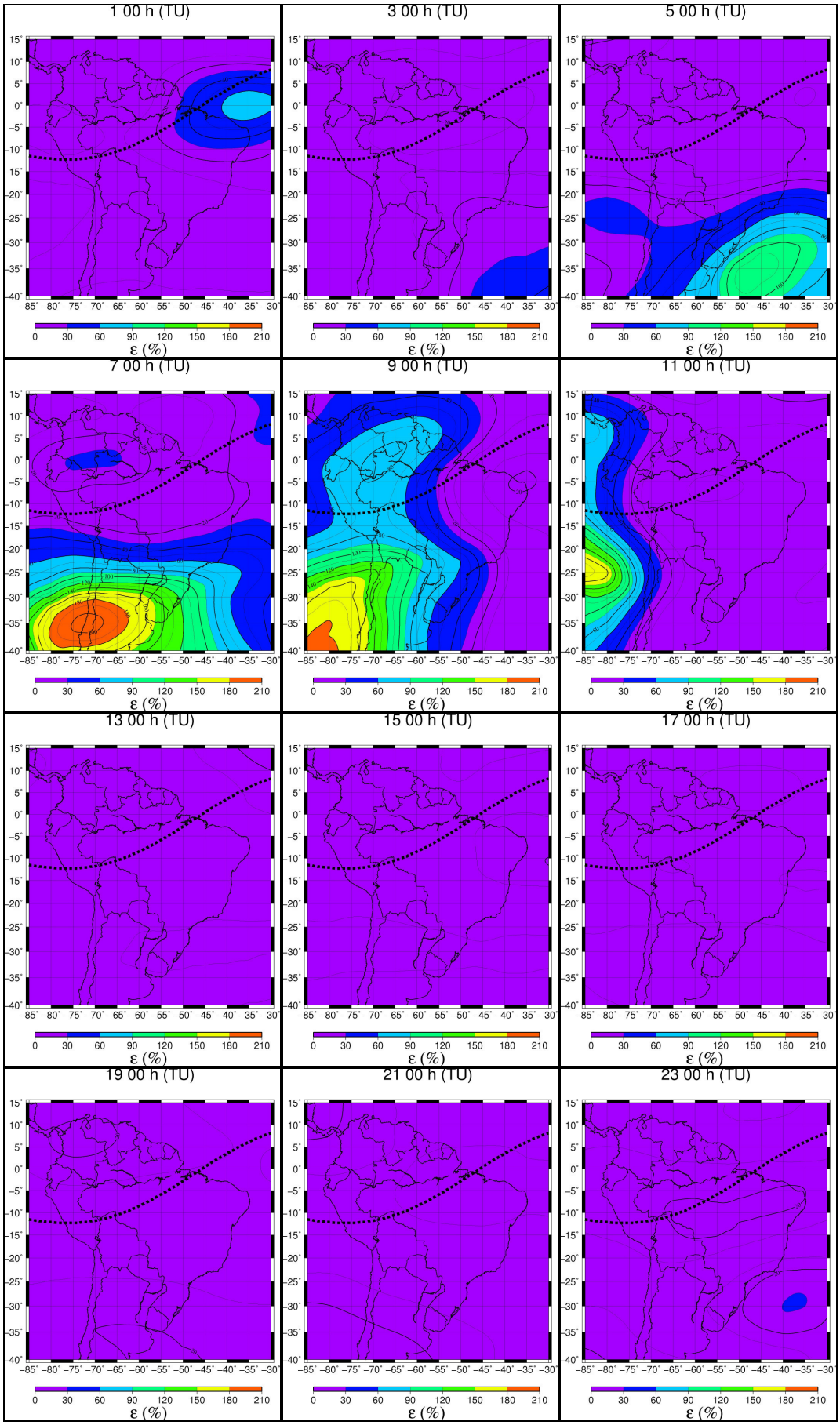

Figura 5.21 – Distribuição espacial do erro relativo durante o dia 90 do ano de 2001

A avaliação acerca da distribuição especial do erro relativo durante o dia 90 do ano de 2001 revelou a ocorrência de uma anomalia com comportamento dinâmico, produzida pela tempestade geomagnética. Como pode ser visto na figura 5.21, os valores mais altos, que ocorreram no período das 7 (TU) às 11 (TU), foram provocados por uma diminuição no valor do VTEC naquela região. O movimento aparente desta anomalia foi na direção oeste, acompanhando o movimento de rotação da Terra.

b) Mod_Ion

A figura 5.22 traz a RMS do conjunto de validação considerando quantidades de neurônios ocultos diferentes para os dias de alta atividade solar, baixa atividade solar e ocorrência de tempestade geomagnética selecionados.

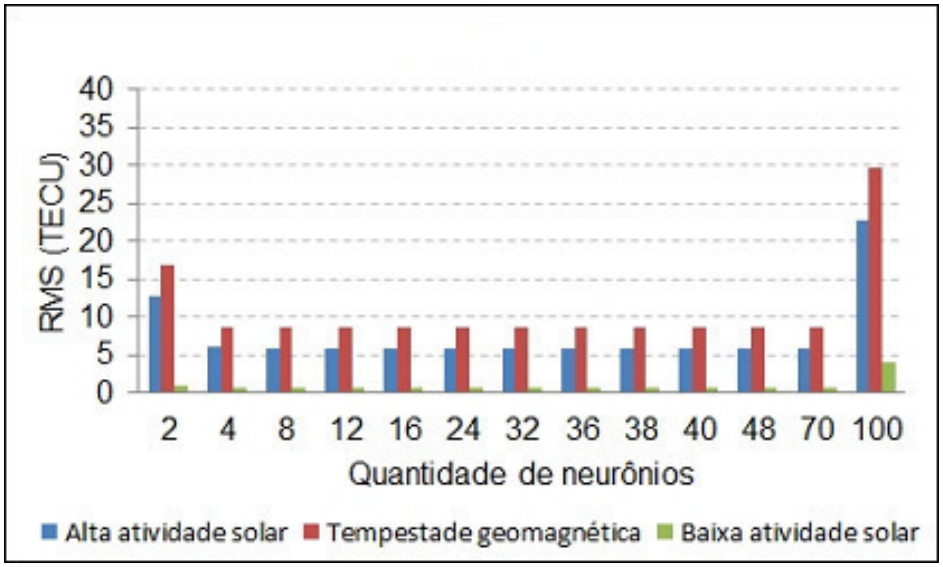

Figura 5.22 – RMS do conjunto de validação para diferentes quantidades de neurônios ocultos utilizando o Mod_Ion

Da figura 5.22, observa-se que a RMS do conjunto de validação apresenta um comportamento similar ao do apresentado na figura 5.12. Entretanto, durante o período de alta atividade solar a RMS do conjunto de validação atinge um patamar quando a camada oculta possui 8 neurônios. No caso dos períodos de baixa atividade solar e da tempestade geomagnética, a quantidade de neurônios pode ser reduzida para 4. Além disso, verifica-se que adotar a mesma quantidade de neurônios utilizada durante alta atividade solar não

causa prejuízo na qualidade das previsões. Assim como no caso dos arquivos IONEX do IGS, verifica-se que ocorreu *overfitting* quando 100 neurônios foram utilizados. A quantidade de neurônios ocultos adotada para as previsões do VTEC neste caso foi 8.

A figura 5.23 mostra a relação entre a quantidade de neurônios ocultos e o intervalo de tempo necessário para executar o treinamento com 200 iterações.

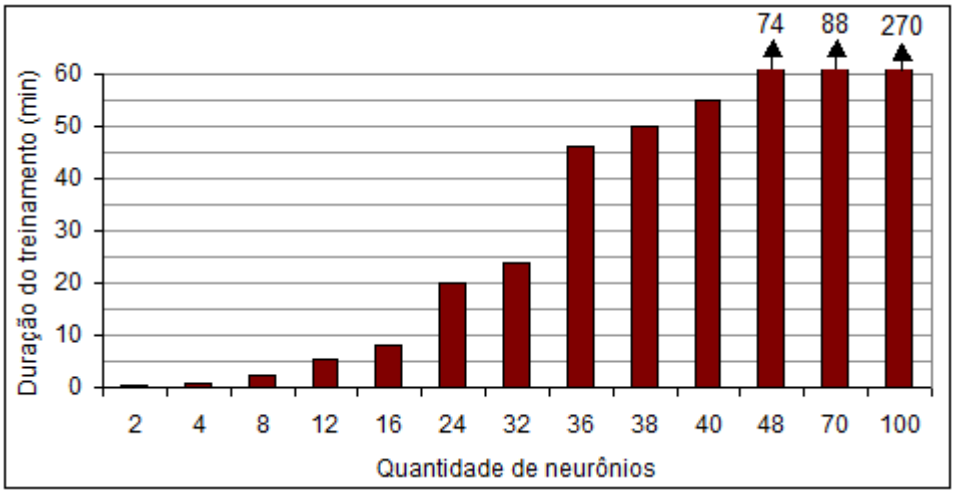

Figura 5.23 – Duração do processamento do treinamento em função da quantidade de neurônios ocultos (Mod_Ion)

Verifica-se, da figura 5.23, que a duração do treinamento quando se adota 8 neurônios na camada oculta é de 2,5 min. Com 16 neurônios, a duração do treinamento aumenta para cerca de 8 min. Comparando com os resultados apresentados na figura 5.13, observa-se que o aumento da quantidade de amostras aumenta o tempo de processamento proporcionalmente.

Com a quantidade de neurônios ocultos definida, verificou-se a qualidade do treinamento da RNA, bem como a quantidade de iterações necessárias para a convergência do algoritmo. Portanto, foram treinadas 15 RNA considerando dados do mesmo período da seção anterior. A figura 5.24 mostra o comportamento da RMS do conjunto de estimação obtido quando se utilizou o conjunto de dados citado.

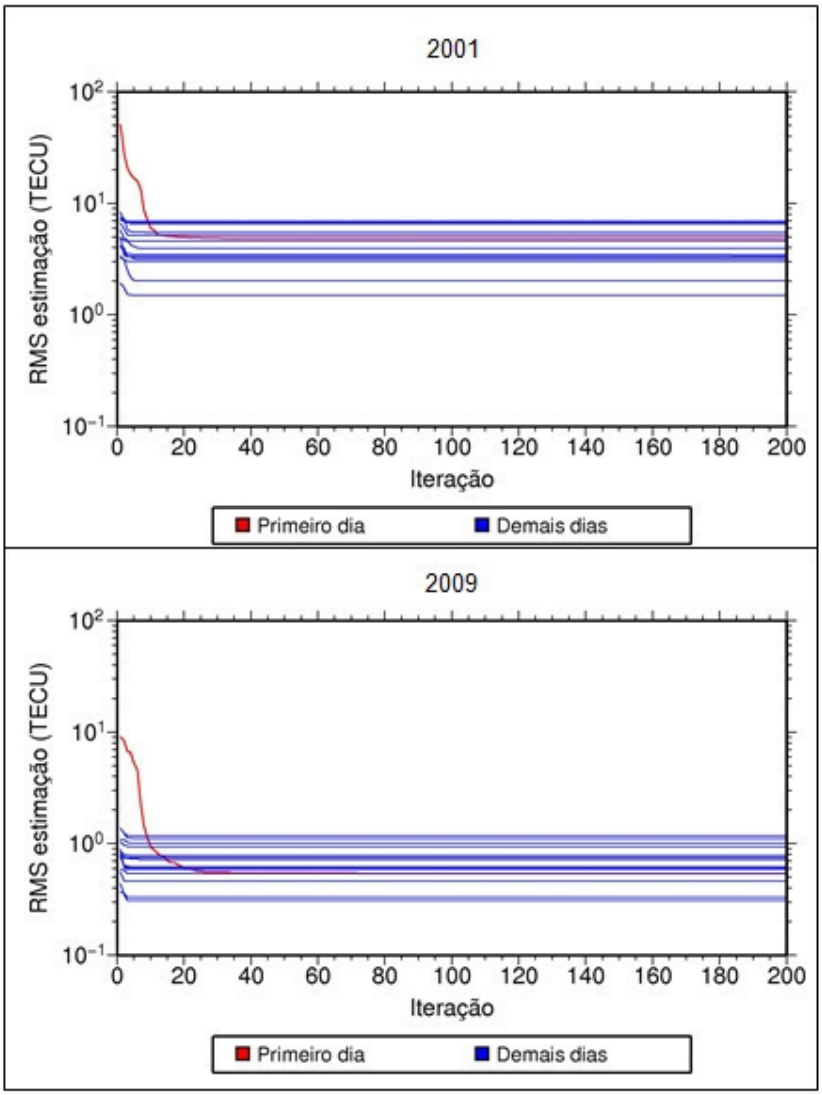

Figura 5.24 – Comportamento da RMS do conjunto de estimação (Mod_Ion)

Verifica-se que, similarmente ao que ocorreu quando se utilizaram os GIM produzidos pelo IGS, a RMS do conjunto de estimação é cerca de 10 vezes maior em alta atividade solar. A redução na quantidade de iterações necessárias para a convergência do algoritmo quando os parâmetros estimados no dia anterior foram utilizados também pode ser observada. Neste caso, a quantidade de iterações foi reduzida de aproximadamente 25 para 5 no período de alta atividade solar e cerca de 35 para 5 em baixa atividade solar.

A figura 5.25 mostra o comportamento do VTEC produzido pelo Mod_Ion ($VTEC_{Mod}$) e o $VTEC_{RNA}$ durante os dois períodos considerados.

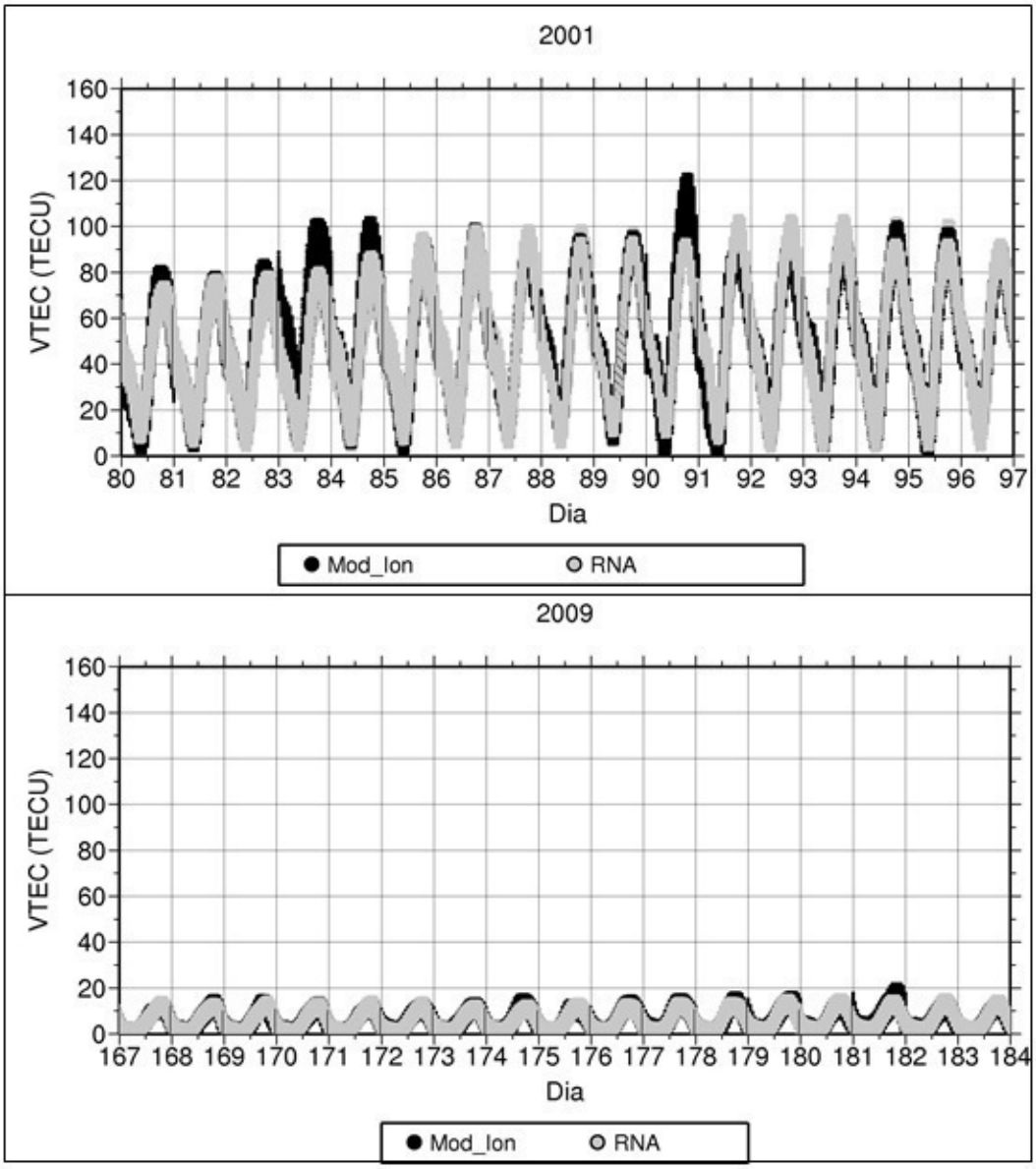

Figura 5.25 – $VTEC_{Mod}$ x $VTEC_{RNA}$

Comparando os gráficos da figura 5.15 com os gráficos da figura 5.25, verifica-se que há um efeito sistemático (translação), onde os $VTEC_{Mod}$ possuem valores menores que os $VTEC_{GIM}$, apresentando várias situações onde o primeiro é igual a zero. Constata-se também, que o $VTEC_{Mod}$ apresenta variações relacionadas com a condição geomagnética de intensidade semelhante às das apresentadas na figura 5.15. Similarmente, observa-se que a RNA não é capaz de se ajustar instantaneamente a estas variações. A diferença entre as soluções se deve à modelagem empregada em cada uma, bem como a altitude do IPP, que no caso dos arquivos IONEX do Mod_Ion foi de 400 km e do IGS, 450km.

A figura 5.26 traz um gráfico da dispersão entre o $VTEC_{Mod}$ e o $VTEC_{RNA}$. É importante destacar que a escala do gráfico referente ao caso 4 foi alterada para ajudar na análise.

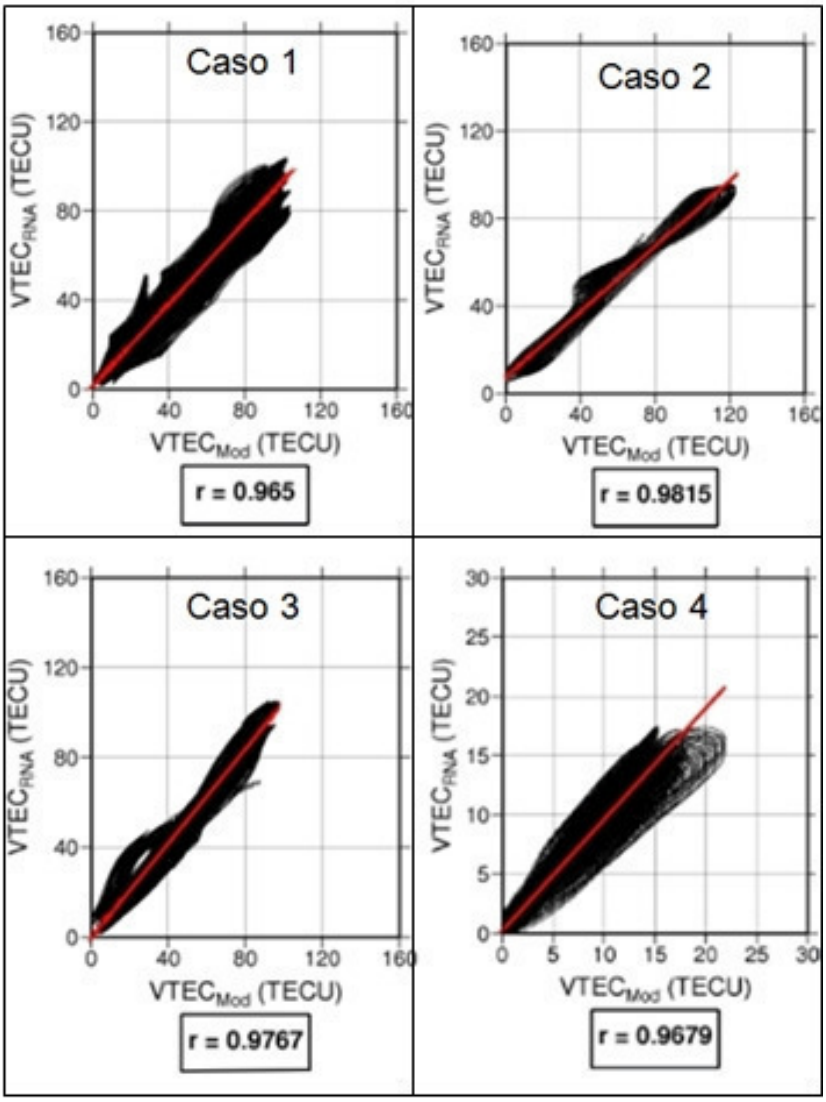

Figura 5.26 – Dispersão entre o $VTEC_{Mod}$ e o $VTEC_{RNA}$

De acordo com a figura 5.26, nos casos 1, 2 e 3, a dispersão tende a aumentar proporcionalmente ao valor do VTEC até aproximadamente 30 TECU, se estabilizando para valores maiores. Verifica-se uma variação na dispersão nos casos 2 e 3, os quais estão relacionados com a tempestade geomagnética. Em baixa atividade solar, verifica-se que, salvo algumas exceções, a dispersão aumenta proporcionalmente ao valor do $VTEC_{Mod}$ até este atingir aproximadamente 10 TECU, se estabilizando para valores maiores. O

coeficiente de correlação mostra que há uma forte correlação entre o $VTEC_{Mod}$ e o $VTEC_{RNA}$ em ambos os períodos de atividade solar.

O comportamento da diferença entre o $VTEC_{Mod}$ e o $VTEC_{RNA}$ ($dVTEC_{Mod}$) para ambos os períodos de atividade solar é apresentado na figura 5.27.

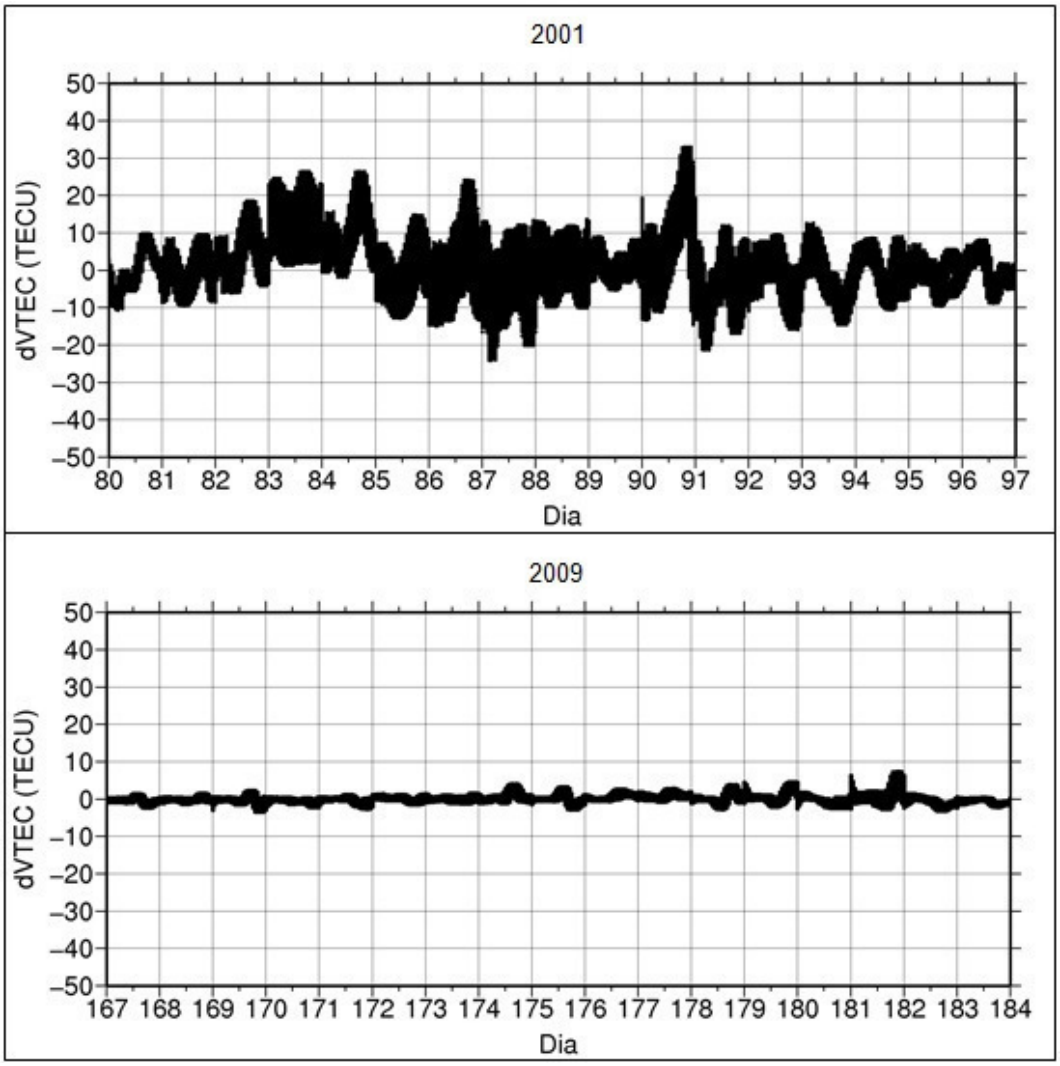

Figura 5.27 – Comportamento da diferença entre $VTEC_{Mod}$ e $VTEC_{RNA}$

Como pode ser verificado na figura 5.27, a $dVTEC_{Mod}$ apresenta comportamento com ciclo de aproximadamente 24 horas, apresentando valores máximos quando próxima do pico do valor do VTEC do dia em questão.

A figura 5.28 mostra a distribuição da $dVTEC_{Mod}$.

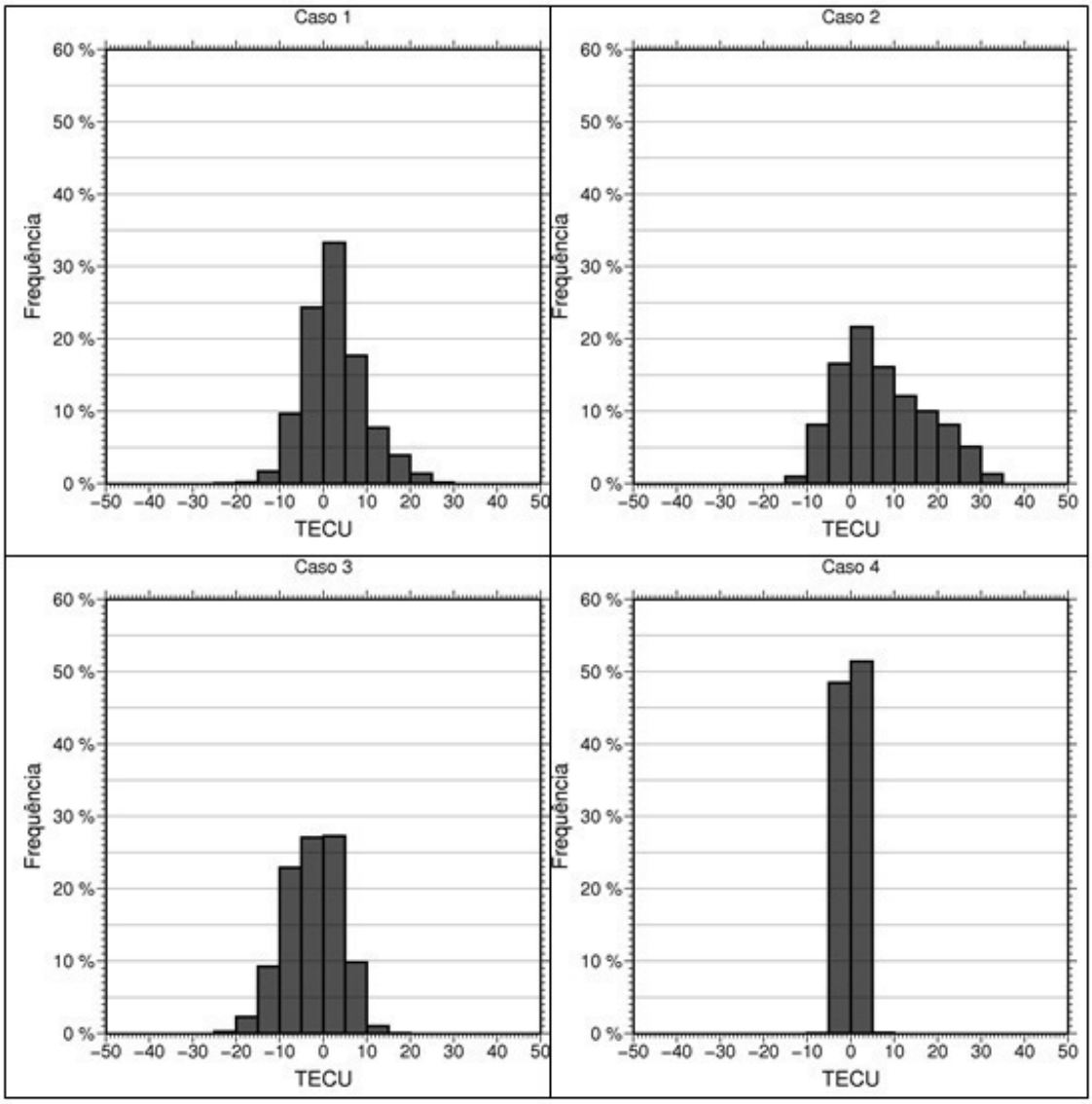

Figura 5.28 – Distribuição da $dVTEC_{Mod}$

Destaca-se, da figura 5.28, que no caso 1 cerca de 96% da $dVTEC_{Mod}$ ficou entre –10 TECU e 20 TECU. No caso 2, cerca de 98% ficou no intervalo de –10 e 30 TECU. No caso 3, 96% das diferenças ficou entre -15 TECU e 10 TECU. No caso 4, 99% das diferenças ficou de –5 TECU a 5 TECU.

A tabela 5.3 apresenta os valores máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão da $dVTEC_{Mod}$ nos 4 casos considerados.

Tabela 5.3 – Estatísticas da $dVTEC_{Mod}$ (TECU)

Caso	Max	Med	Min	RMS	Desvio-padrão
1	26,4	2,2	-24,1	6,9	6,5
2	33,0	7,5	-14,6	12,5	10,0
3	19,4	-2,4	-21,3	6,6	6,2
4	7,3	0,1	-3,4	1,2	1,1

Embora tenha ocorrido um caso onde a $dVTEC_{Mod}$ é da ordem de 33 TECU durante a tempestade geomagnética, a RMS da $dVTEC_{Mod}$ no caso 2 é de 12,5 TECU. Este valor decresce para 7 TECU nos casos 1 e 3 e para 1,2 TECU no caso 4, mostrando que a RNA é capaz de produzir VTEC com incerteza de 1,2 TECU a 12,5 TECU, dependendo da atividade solar e da condição geomagnética.

A figura 5.29 mostra a variação da RMS da $dVTEC_{Mod}$ por dia nos dois períodos considerados.

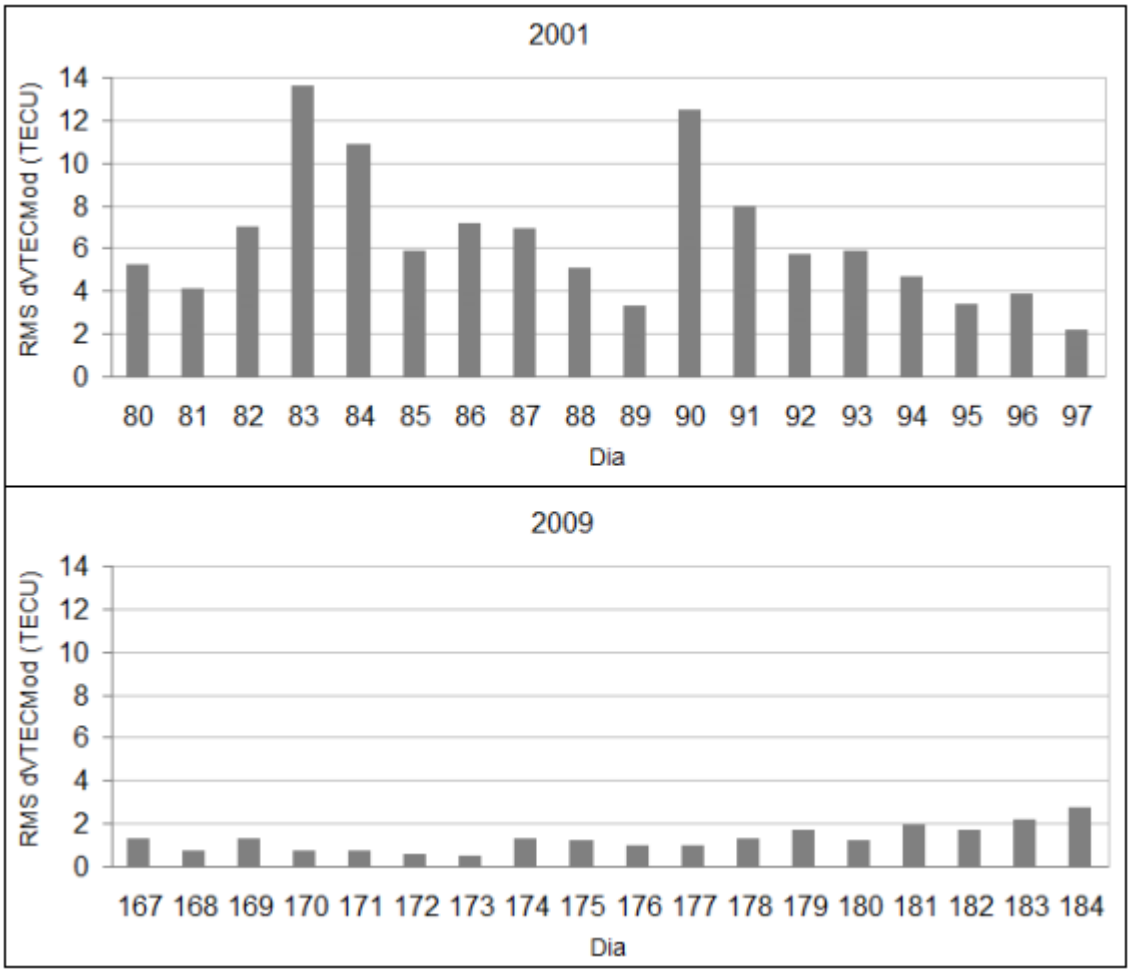

Figura 5.29 – Variação da RMS da $dVTEC_{Mod}$

Verifica-se que a RMS da $dVTEC_{Mod}$ está mais relacionada com a variação das condições geomagnéticas do que com a atividade solar, apresentando um pico no dia 90.

A figura 5.30 traz o comportamento do erro relativo (ε_{Mod}) para os dois períodos de atividade solar.

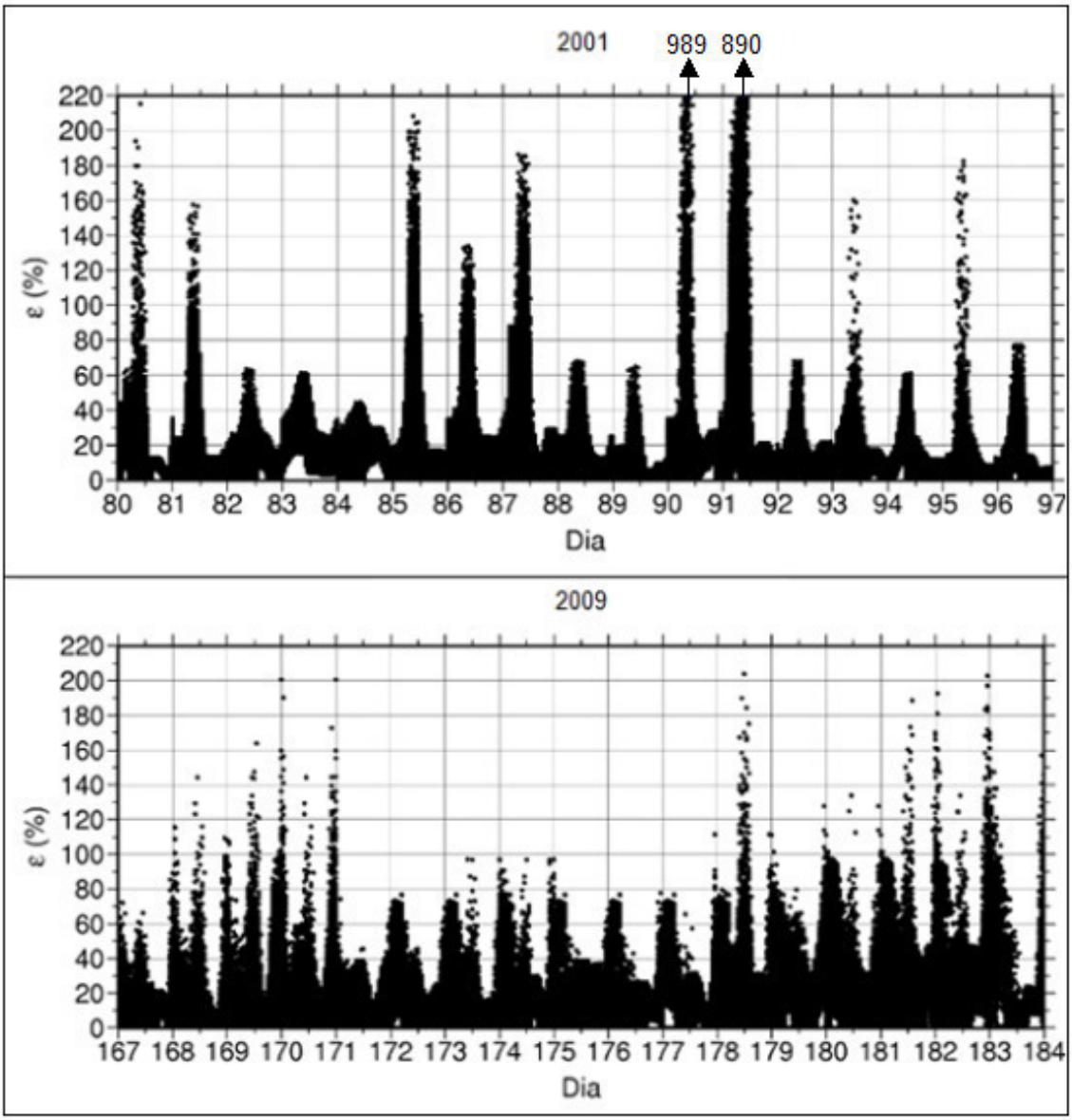

Figura 5.30 – Série temporal do erro relativo (ε_{Mod})

No período de alta atividade solar, o ε_{Mod} apresenta um pico diário entre as 7 e 11 horas da manhã (TU). O valor máximo do ε_{Mod} ocorreu no dia em que ocorreu a tempestade geomagnética. O reflexo da tempestade geomagnética sobre o valor do ε_{Mod} do dia seguinte também pode ser observado. Em baixa atividade solar, o valor do ε_{Mod} apresenta três picos por dia, os quais estão relacionados com períodos e locais onde os valores do VTEC são pequenos.

Ressalta-se que nesta análise, valores de VTEC menores que 0,9 TECU não foram considerados por apresentarem valor de ε_{Mod} muito alto.

A tabela 5.4 apresenta os valores máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão do ε_{Mod} nos quatro casos considerados.

Tabela 5.4 – Estatísticas do ε_{Mod} (%)

Caso	Max	Med	Min	RMS	Desvio-padrão
1	340,2	13,5	0,1	7,2	6,8
2	988,8	20,6	0,1	44,3	39,2
3	889,6	18,8	0,1	45,1	41,0
4	203,7	14,5	0,1	19,8	13,5

Destaca-se que, embora tenha ocorrido ε_{Mod} com valor de 989 %, a RNA foi capaz de prever o VTEC com cerca de 55% de coincidência com relação ao $VTEC_{Mod}$ durante os casos 2 e 3. No caso 4 esta porcentagem sobe para 80% e no caso 1 para cerca de 93%.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram desenvolvidos programas computacionais para calcular estações de referência virtuais, onde as coordenadas dos satélites são calculadas através das efemérides IGU. Isto limita o modelo à utilização somente dos satélites GPS, visto as efemérides dos satélites GLONASS não possuírem erro do relógio dos satélites. O modelo de Hopfield ou os arquivos de previsão do atraso troposférico zenital do CPTEC/INPE podem ser utilizados para se calcular a diferença de atraso troposférico entre as estações de referência mestra e virtual.

Um modelo de RNA para prever o VTEC por 72 horas foi desenvolvido, implementado e avaliado. A arquitetura utilizada foi a MLP com uma única camada de neurônios ocultos. A quantidade de neurônios ocultos foi definida visando a regularização estrutural (seção 2.2.1.3). O treinamento da RNA é realizado com a utilização da versão do método de Levenberg-Marquardt sem retropropagação.

Arquivos IONEX do IGS e do Mod_Ion calculados durante alta atividade solar e baixa atividade solar foram utilizados para treinar e avaliar a qualidade da

previsão proporcionada pelo modelo. A tabela 5.5 traz um resumo dos principais resultados obtidos.

Tabela 5.5 – Resumo da avaliação do treinamento das RNA

Modelo do arquivo IONEX		GIM do IGS	Mod_ION
Neurônios ocultos		16	8
Número de amostras		10.764	31.500
Duração do treinamento (min)		2,5	2,5
Erro absoluto (TECU)	**caso1**	9,5	6,9
	caso2	10,7	12,5
	caso3	8,8	6,6
	caso4	1,4	1,2
Erro relativo (%)	**caso1**	17,3	7,2
	caso2	30,0	44,3
	caso3	17,4	45,1
	caso4	14,8	19,8

6 AVALIAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA VIRTUAIS NO POSICIONAMENTO

6.1 CONJUNTO DE DADOS

Visando avaliar a qualidade do posicionamento utilizando as observações das estações de referência virtuais geradas com a metodologia descrita no capítulo 5, uma campanha de rastreio de dados GNSS foi realizada entre os dias 22/06/2009 e 28/06/2009. Os rastreios foram conduzidos nos municípios de Marília, Tupã, Osvaldo Cruz e Assis, na região oeste do estado de São Paulo. Foram utilizados receptores capazes de armazenar dados das frequências L1 e L2.

Sete estações de referência foram implantadas em locais pré-estabelecidos. A figura 6.1 mostra a distribuição das estações de referência existentes nas proximidades da área do levantamento, bem como das estações de referência implantadas.

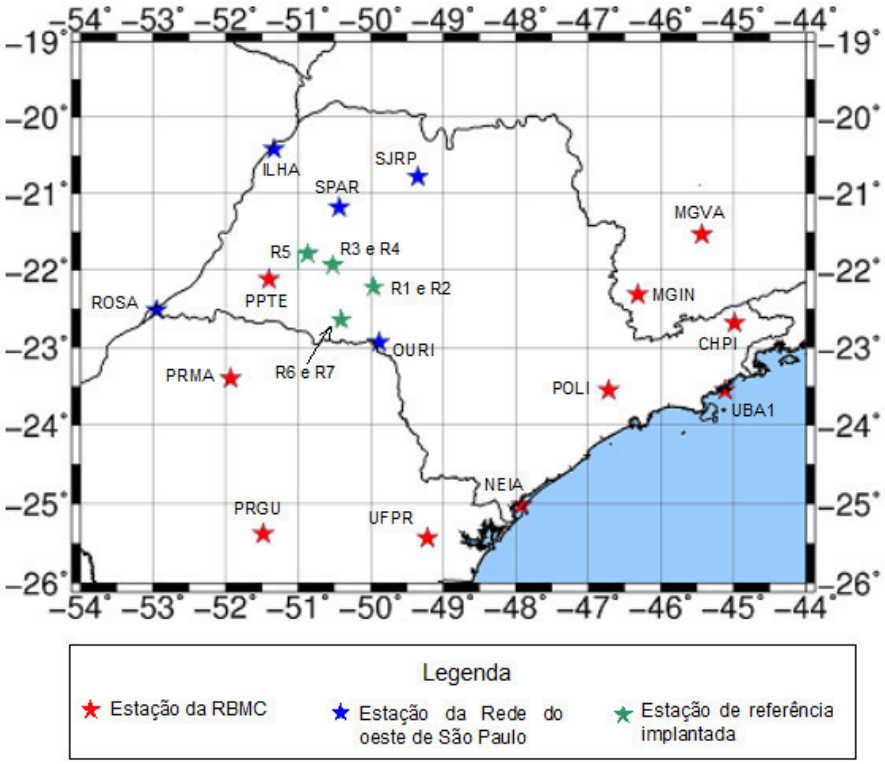

Figura 6.1 - Distribuição das estações de referência

Nas imediações das estações de referência implantadas, foram determinados 18 pontos de controle, todos formando linhas de base com comprimento menor que 20 km, conforme figura 6.2. Isto permite realizar uma verificação do desempenho das observações das estações de referência virtuais no posicionamento relativo em linhas de base curtas, envolvendo apenas as observações da fase da portadora e pseudodistância da frequência L1.

A tabela 6.1 contém a data, o horário e a duração dos rastreios realizados.

Tabela 6.1 - Data, horário e duração dos rastreios

Estações de referência					
Data	Dia do ano	Identificação	Hora local		Duração (min)
			Início	Fim	
22/06/2009	173	R1	15,20	18,55	201
23/06/2009	174	R2	8,69	11,79	186
24/06/2009	175	R3	8,79	15,59	408
25/06/2009	176	R4	8,72	12,55	230
25/06/2009	176	R5	14,25	17,15	174
27/06/2009	178	R6	17,00	18,22	73
28/06/2009	179	R7	9,67	12,87	192
Estações de controle					
Data	Dia do ano	Identificação	Hora local		Duração (min)
			Início	Fim	
28/06/2009	179	1	11.84	12.82	59
25/06/2009	176	2	16.39	17.10	43
24/06/2009	175	3	13.80	14.35	33
27/06/2009	178	4	17.22	18.09	52
23/06/2009	174	5	9.19	9.77	35
24/06/2009	175	6	14.55	15.19	38
25/06/2009	176	7	14.45	15.04	35
22/06/2009	173	8	16.59	17.15	34
22/06/2009	173	9	17.35	18.17	49
24/06/2009	175	10	9.59	10.14	33
28/06/2009	179	11	10.00	10.69	41
25/06/2009	176	12	15.49	16.17	41
23/06/2009	174	13	10.97	11.45	29
24/06/2009	175	14	11.27	11.77	30
25/06/2009	176	15	9.59	10.15	34
28/06/2009	179	16	11.02	11.52	30
23/06/2009	174	17	10.12	10.74	37
25/06/2009	176	18	10.42	11.09	40

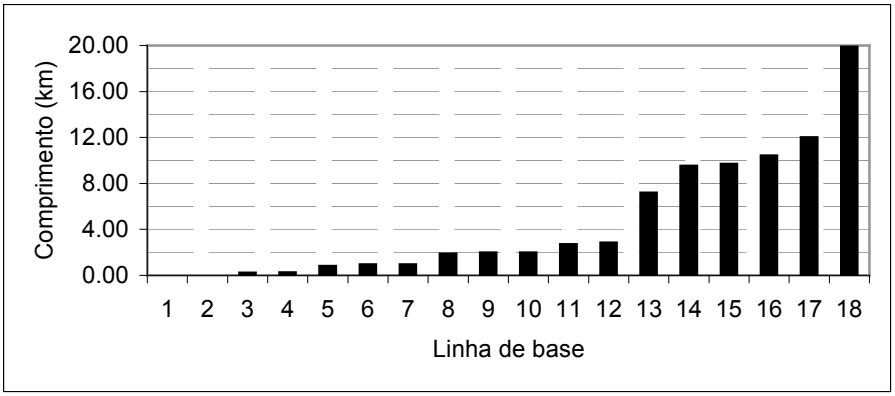

Figura 6.2 – Comprimento das linhas de base dos pontos de controle

6.2 AVALIAÇÃO NO POSICIONAMENTO RELATIVO

Para realizar uma avaliação da qualidade das observações das estações de referência virtuais no posicionamento relativo, as coordenadas das estações R1, R2, R3, R4, R5, R6 e R7 foram determinadas com a utilização dos dados das estações PPTE, SPAR e OURI como referência. Neste processamento, a observável utilizada foi a resultante da combinação linear conhecida como livre da ionosfera. O software de processamento de dados GNSS denominado de *Leica Geo Office*, versão 5 foi utilizado nos processamentos.

Foram calculadas sete estações de referência virtuais (V1, V2, V3, V4, V5, V6 e V7) com a mesma duração e nas mesmas posições das estações de referência implantadas. Visando avaliar o impacto da modelagem da atmosfera neutra e ionosfera separadamente, as estações virtuais foram calculadas aplicando-se seis níveis de modelagem diferentes, sendo eles:

1) somente deslocamento geométrico (DG);
2) DG e modelagem dos efeitos da atmosfera neutra (Trop);
3) DG e modelagem dos efeitos da ionosfera determinados com as previsões usando os arquivos IONEX do Mod_Ion (RNA_{Mod});
4) DG, modelagem dos efeitos da atmosfera neutra e da ionosfera com as previsões usando os arquivos IONEX do Mod_Ion (Trop+RNA_{Mod});
5) DG, modelagem dos efeitos da ionosfera com as previsões usando os arquivos IONEX do IGS (RNA_{GIM});
6) DG, modelagem dos efeitos da atmosfera neutra e da ionosfera com as previsões usando os arquivos IONEX do IGS (Trop+RNA_{GIM}).

As estações de referência virtuais também foram calculadas com máscaras de elevação de 05°, 10°, 15° e 20°, onde as observações de satélites com ângulos de elevação menores do que o da máscara foram desconsiderados. Isto permite verificar a influência da elevação dos satélites na qualidade dos dados das estações de referência virtuais, bem como o impacto da redução do número de satélites nas soluções.

Utilizando o mesmo software de processamento de dados GNSS, as coordenadas dos pontos de controle foram calculadas com os dados das estações de referência implantadas e com os dados das estações de referência virtuais. As diferenças entre as coordenadas obtidas com dados reais e virtuais foram calculadas e avaliadas. Visando facilitar a leitura, as referidas diferenças de coordenadas serão designadas como deslocamento. Neste processamento, utilizaram-se apenas as observações da portadora L1 e nenhuma opção de modelagem da atmosfera oferecida pelo software foi empregada.

A avaliação foi realizada considerando um sistema de coordenadas planialtimétrico local, onde foram calculadas as diferenças de coordenadas (deslocamentos) entre as coordenadas altimétrica (h), resultante planimétrica (E e N) e a resultante tridimensional (3-D). A tabela 6.2 contém a relação das estações da rede de referência assumidas como mestras e o comprimento da linha de base formada com as estações de referência virtuais.

Tabela 6.2 - Comprimento das linhas de base formadas entre as estações adotas como mestras e as estações de referência virtuais

Estação da rede de referência	Estação de referência Virtual	Distância (km)
OURI	V1 e V2	81
PPTE	V3 e V4	94
PPTE	V5	66
OURI	V6 e V7	63

6.2.1 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO

A figura 6.3 mostra os deslocamentos planimétricos, altimétricos e tridimensionais das coordenadas obtidas com estações de referência virtuais geradas com a solução DG considerando as máscaras de elevação de 5°, 10°, 15° e 20°.

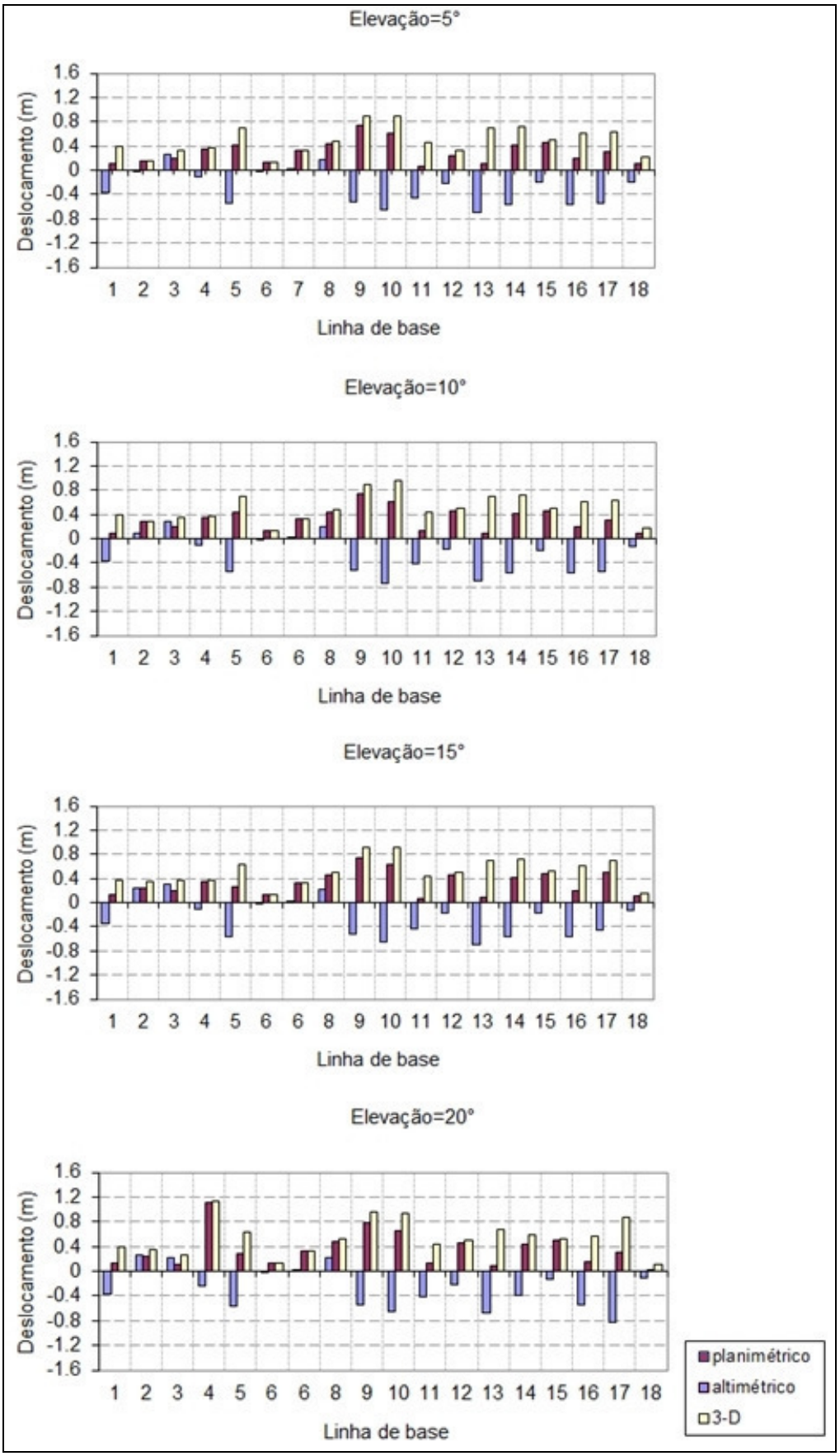

Figura 6.3 - Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões dos pontos de controle determinados a partir de estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (DG)

Observa-se que as soluções com diferentes máscaras de elevação são similares quando a solução DG é aplicada. Uma exceção ocorreu para a linha de base 4, onde o deslocamento tridimensional aumentou de aproximadamente 0,36 m para 1,13 m, quando comparadas as soluções obtidas com estações de referência virtuais geradas com máscaras de elevação de 5° e 20°, respectivamente. Verifica-se, também, que não há relação entre a magnitude do deslocamento das coordenadas e o comprimento das linhas de base, nem com o horário e duração do rastreio.

A tabela 6.3 traz os deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão planimétrico, altimétrico, e tridimensional das soluções obtidas com estações de referência virtuais geradas com 5°, 10, 15° e 20° de máscara de elevação.

Tabela 6.3 - Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes planimétrica, altimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° (DG)

Deslocamento altimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,27	-0,29	-0,69	0,41	0,29
10°	0,28	-0,28	-0,74	0,41	0,30
15°	0,31	-0,26	-0,69	0,41	0,31
20°	0,25	-0,28	-0,82	0,42	0,32
Deslocamento planimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,73	0,29	0,06	0,35	0,18
10°	0,73	0,32	0,09	0,37	0,18
15°	0,74	0,32	0,06	0,37	0,19
20°	1,10	0,35	0,02	0,44	0,27
Deslocamento tridimensional (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,90	0,49	0,12	0,54	0,23
10°	0,96	0,50	0,12	0,55	0,22
15°	0,91	0,51	0,12	0,55	0,22
20°	1,13	0,55	0,10	0,61	0,28

Da tabela 6.3, observa-se que as melhores soluções tridimensionais ocorreram com máscaras de elevação de 10° e 15°, com RMS de 0,55 m, enquanto que a pior solução tridimensional ocorreu com 20°, devido à redução do número de observações.

6.2.2 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA (Trop)

O impacto da inclusão da modelagem da atmosfera neutra nas estações de referência virtuais sobre os deslocamentos dos pontos de controle pode ser visto na figura 6.4.

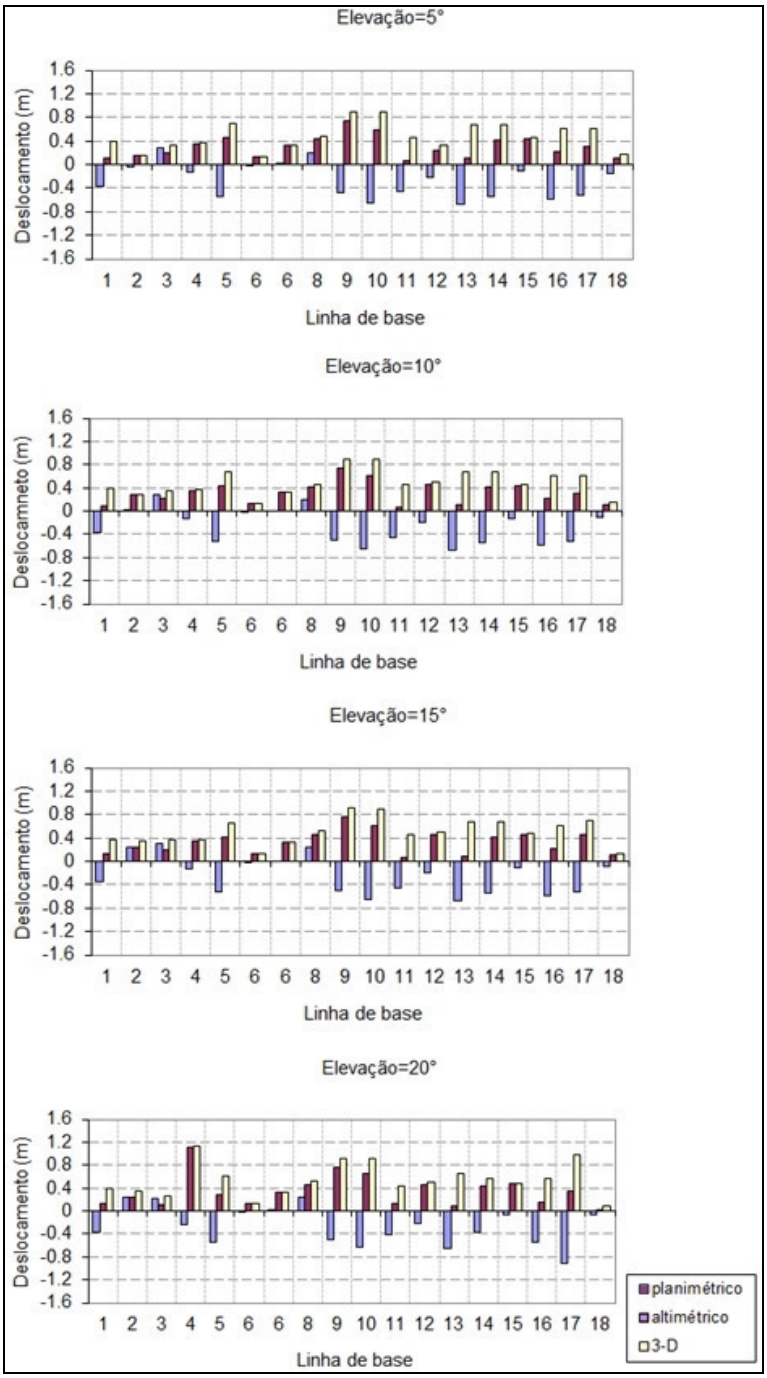

Figura 6.4 - Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões dos pontos de controle determinados a partir de estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop)

Verifica-se que a inclusão da modelagem da atmosfera neutra não apresentou um impacto significativo nos deslocamentos dos pontos de controle quando comparado com os resultados obtidos com a solução DG.

Os deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão planimétrico, altimétrico, e tridimensional das coordenadas podem ser vistos na tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° (Trop)

Deslocamento altimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,28	-0,28	-0,68	0,40	0,29
10°	0,29	-0,27	-0,68	0,40	0,29
15°	0,31	-0,25	-0,67	0,40	0,31
20°	0,24	-0,27	-0,92	0,42	0,33
Deslocamento planimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,74	0,30	0,06	0,35	0,18
10°	0,75	0,31	0,06	0,36	0,18
15°	0,76	0,33	0,06	0,38	0,19
20°	1,10	0,35	0,02	0,44	0,27
Deslocamento tridimensional (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,89	0,48	0,12	0,53	0,23
10°	0,90	0,50	0,12	0,54	0,22
15°	0,92	0,51	0,12	0,55	0,22
20°	1,13	0,54	0,08	0,61	0,28

A tabela 6.4 revela que a melhor solução tridimensional ocorreu com máscara de elevação de 5°, com RMS de 0,53 m, mostrando um bom desempenho da função de mapeamento GMF. Constata-se, também, que a pior solução ocorreu quando se utilizou máscara de elevação de 20°.

6.2.3 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DOS EFEITOS DA IONOSFERA (RNA_{Mod})

A figura 6.5 mostra os deslocamentos das coordenadas dos pontos de controle calculados com estações de referência virtuais geradas com a modelagem RNA_{Mod}.

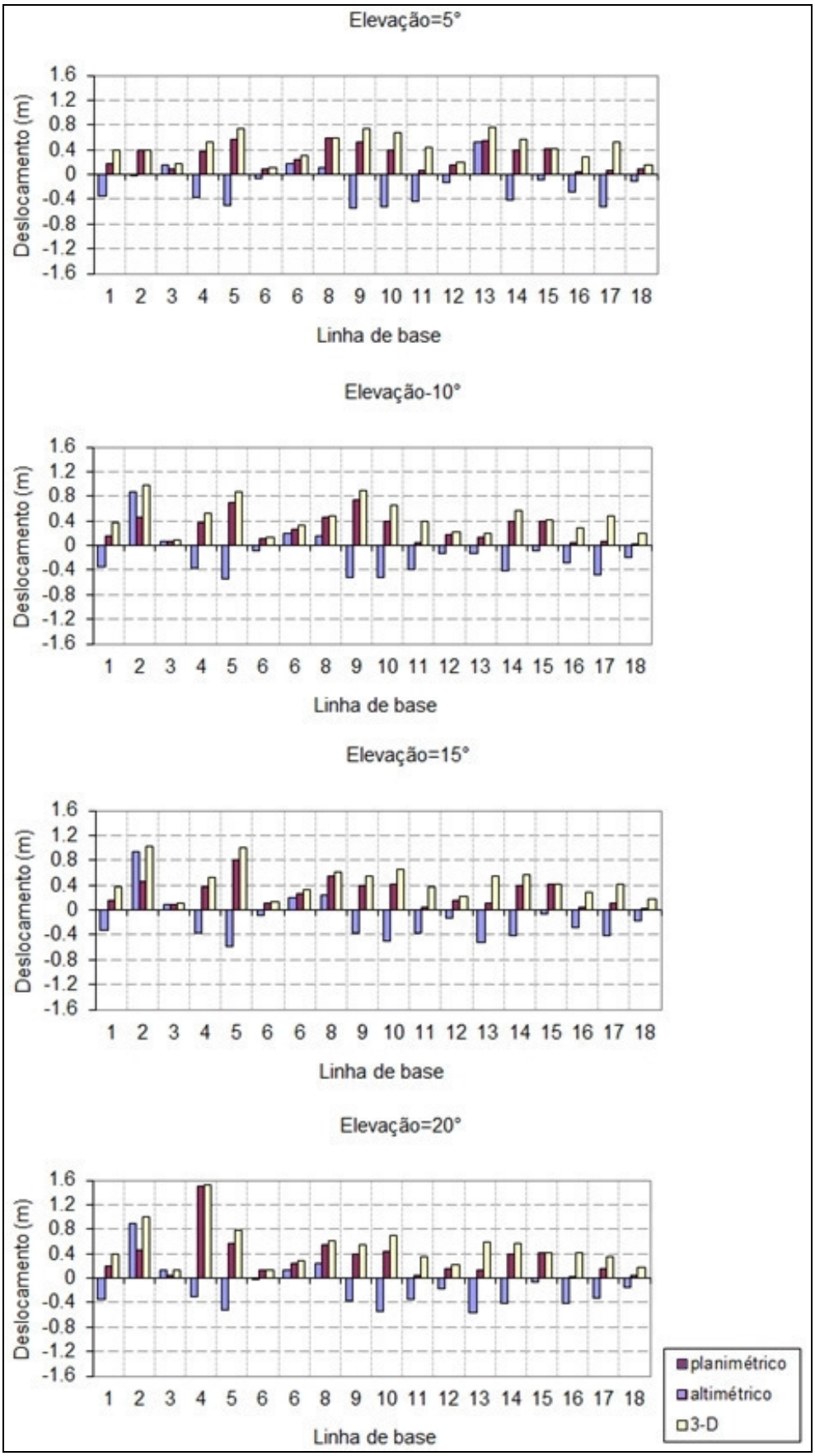

Figura 6.5 - Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões dos pontos de controle determinados a partir de estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (RNA_{Mod})

Constata-se que a referida modelagem proporciona uma redução nos valores de deslocamento para a maioria das linhas de base, quando comparado com os deslocamentos obtidos com as soluções DG e Trop.

A tabela 6.5 traz os deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e tridimensional das linhas de base em função da máscara de elevação.

Tabela 6.5 - Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° (RNA_{Mod})

Deslocamento altimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,53	-0,19	-0,53	0,35	0,29
10°	0,88	-0,18	-0,54	0,38	0,34
15°	0,93	-0,18	-0,59	0,40	0,36
20°	0,89	-0,18	-0,57	0,39	0,35
Deslocamento planimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,59	0,29	0,04	0,34	0,19
10°	0,73	0,27	0,02	0,35	0,22
15°	0,81	0,27	0,02	0,34	0,21
20°	1,50	0,33	0,03	0,47	0,34
Deslocamento tridimensional (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,76	0,44	0,10	0,49	0,21
10°	0,99	0,45	0,09	0,52	0,26
15°	1,03	0,46	0,11	0,52	0,25
20°	1,53	0,51	0,13	0,61	0,34

Verifica-se que o melhor resultado é obtido com máscara de elevação de 5°, com RMS de 0,49 m e desvio-padrão de 0,21 m. Além disso, observa-se uma redução de 5 cm na RMS do deslocamento tridimensional quando comparada com a solução DG. Constata-se, ainda, que a melhora ocorre principalmente na componente altimétrica, onde a RMS foi reduzida de 40 cm para 35 cm.

6.2.4 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO, MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA E DA IONOSFERA (Trop+RNA_{Mod})

O impacto da inclusão da modelagem da atmosfera neutra ao modelo da seção 6.2.3 é analisado nesta seção. Os deslocamentos das coordenadas dos pontos

de controle calculadas com as estações de referência virtuais geradas aplicando a modelagem Trop+RNA_{Mod} são mostrados na figura 6.6.

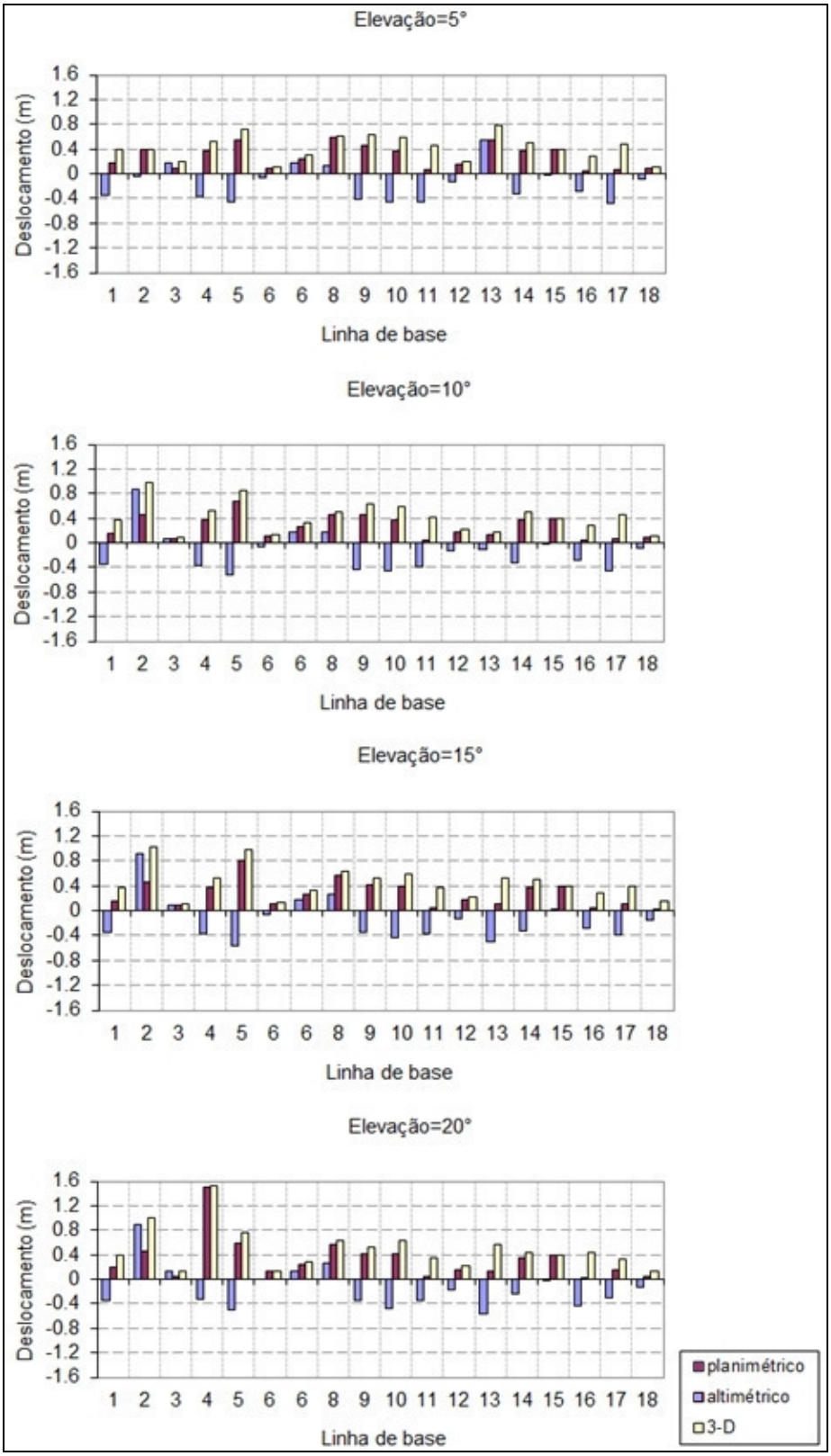

Figura 6.6 - Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões dos pontos de controle determinados a partir de estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop+RNA_{Mod})

Observa-se que os deslocamentos praticamente permanecem os mesmos da solução RNA_{Mod} e que ocorrem pequenas melhorias principalmente na componente altimétrica.

A tabela 6.6 mostra os deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica, e tridimensional das coordenadas obtidas com a solução Trop+RNA_{Mod}.

Tabela 6.6 - Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° (Trop+RNA_{Mod})

Deslocamento altimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,55	-0,16	-0,47	0,32	0,28
10°	0,86	-0,15	-0,52	0,36	0,33
15°	0,92	-0,16	-0,56	0,38	0,35
20°	0,89	-0,15	-0,56	0,37	0,34
Deslocamento planimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,58	0,28	0,04	0,33	0,18
10°	0,67	0,26	0,04	0,32	0,18
15°	0,81	0,27	0,02	0,34	0,21
20°	1,50	0,32	0,03	0,47	0,34
Deslocamento tridimensional (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,78	0,42	0,10	0,47	0,19
10°	0,98	0,42	0,09	0,48	0,24
15°	1,02	0,45	0,12	0,51	0,25
20°	1,53	0,49	0,13	0,60	0,34

Verifica-se que a melhor solução tridimensional ocorreu com máscara de elevação de 5°, onde se constata uma redução de 2 cm na RMS do deslocamento tridimensional, quando comparada com a solução RNA_{Mod}, e de 6 cm, quando comparado com a solução Trop.

6.2.5 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DA IONOSFERA (RNA_{GIM})

Esta seção apresenta os resultados obtidos com estações de referência virtuais geradas com a modelagem RNA_{GIM}. Os deslocamentos das coordenadas obtidos com utilização desta modelagem são apresentados na figura 6.7.

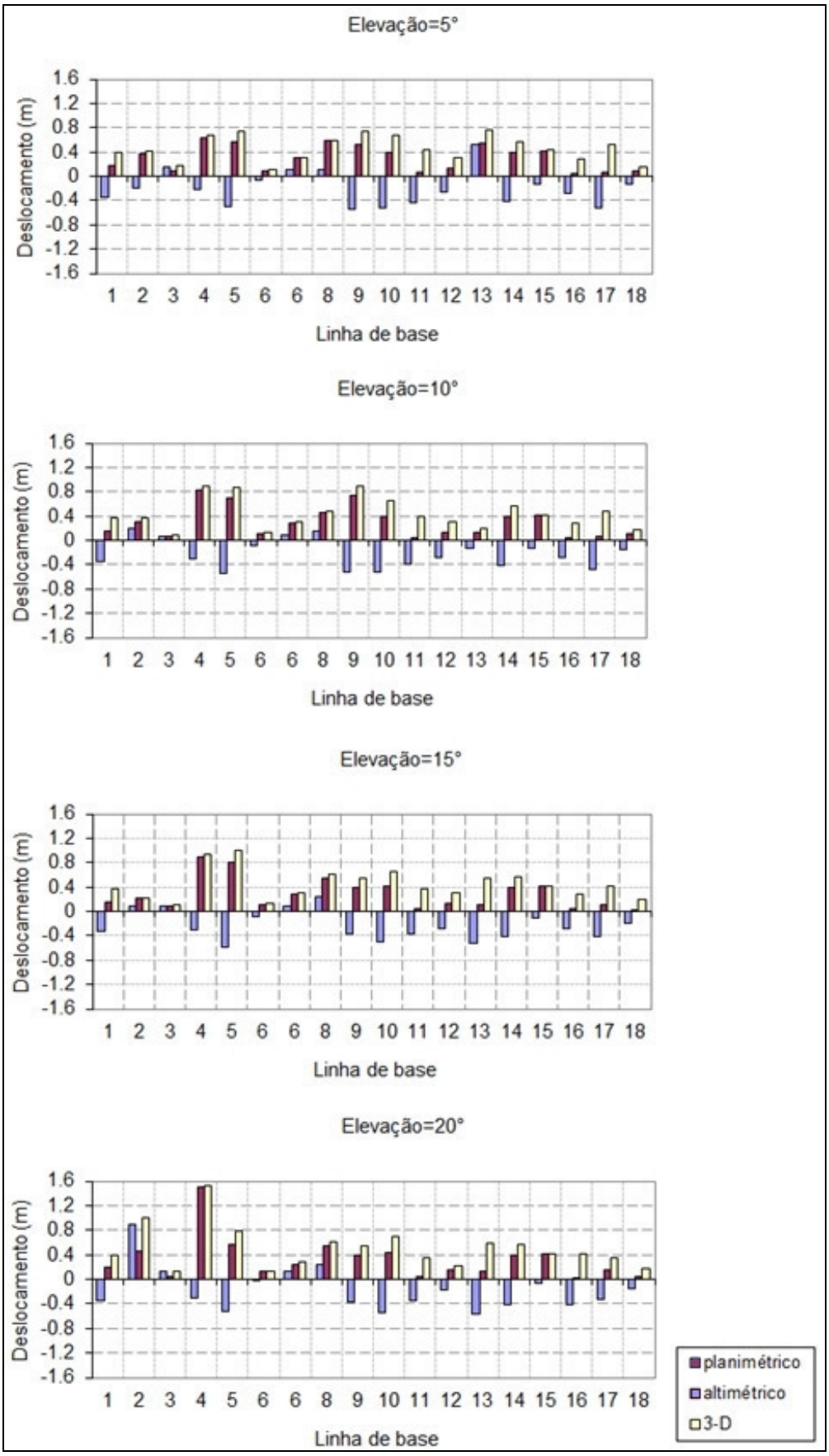

Figura 6.7 - Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões dos pontos de controle determinados a partir de estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (RNA_{GIM})

Conforme pode ser visto na figura 6.7, os deslocamentos obtidos com esta solução são similares aos obtidos na solução RNA_{Mod}, onde as maiores diferenças estão relacionadas com as linhas de base 2 e 4.

Os deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e tridimensional para as soluções em 5°, 10, 15° e 20° são apresentados na tabela 6.7.

Tabela 6.7 - Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° (RNA_{GIM})

Deslocamento altimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,53	-0,20	-0,53	0,35	0,28
10°	0,21	-0,23	-0,54	0,33	0,23
15°	0,23	-0,24	-0,59	0,33	0,23
20°	0,25	-0,23	-0,57	0,34	0,24
Deslocamento planimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,64	0,30	0,04	0,37	0,21
10°	0,84	0,30	0,04	0,39	0,25
15°	0,88	0,29	0,02	0,38	0,25
20°	1,03	0,30	0,03	0,39	0,25
Deslocamento tridimensional (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,76	0,46	0,10	0,50	0,21
10°	0,90	0,44	0,09	0,50	0,25
15°	1,00	0,44	0,11	0,51	0,24
20°	1,07	0,46	0,13	0,52	0,24

Verifica-se que os melhores resultados tridimensionais ocorreram quando se utilizou estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação 5° e 10°. Além disso, observa-se que estas soluções apresentaram RMS dos deslocamentos tridimensionais 1 cm pior do que o proporcionada pela solução RNA_{Mod}.

6.2.6 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO, MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA E DA IONOSFERA (Trop+RNA_{GIM})

Os resultados obtidos com as estações de referência virtuais geradas com a modelagem Trop+RNA_{GIM} são apresentados nesta seção. A figura 6.8 mostra os deslocamentos das coordenadas obtidos com esta modelagem.

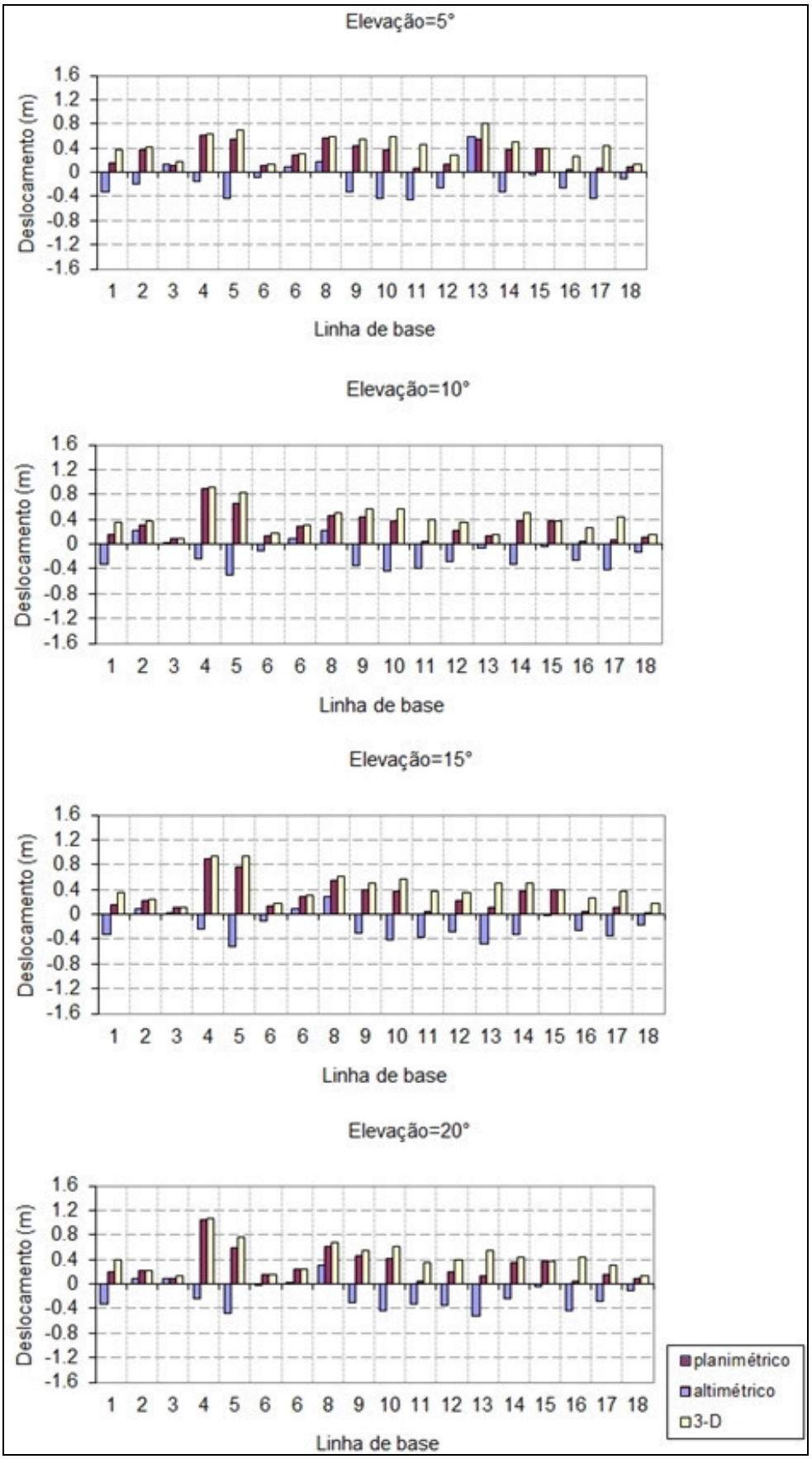

Figura 6.8 - Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões dos pontos de controle determinados a partir de estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop+RNA_{GIM})

Observa-se, da figura 6.8, que os deslocamentos são similares aos obtidos na com a solução RNA_{GIM}. Semelhantemente ao que ocorreu na solução $Trop+RNA_{Mod}$, pequenas melhorias ocorreram, principalmente, na componente altimétrica.

A tabela 6.8 traz os deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e tridimensional das coordenadas obtidas com a solução $Trop+RNA_{GIM}$ e com máscaras de elevação consideradas.

Tabela 6.8 - Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° ($Trop+RNA_{GIM}$)

Deslocamento altimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,59	-0,16	-0,46	0,31	0,27
10°	0,21	-0,19	-0,49	0,28	0,21
15°	0,29	-0,20	-0,53	0,30	0,22
20°	0,30	-0,20	-0,53	0,30	0,23
Deslocamento planimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,62	0,29	0,04	0,35	0,19
10°	0,88	0,28	0,04	0,36	0,22
15°	0,89	0,29	0,02	0,37	0,24
20°	1,04	0,30	0,03	0,39	0,25
Deslocamento tridimensional (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,80	0,43	0,14	0,47	0,19
10°	0,91	0,40	0,10	0,46	0,21
15°	0,93	0,42	0,10	0,48	0,23
20°	1,07	0,43	0,12	0,49	0,24

Conforme pode ser visto, a melhor solução ocorreu quando as estações de referência virtuais foram geradas com máscara de elevação de 10°, apresentando RMS do deslocamento tridimensional de 0,46 m. Além disso, observa-se que o impacto da eliminação de observação por causa da máscara de elevação é menor do que a observada com a solução $Trop+RNA_{Mod}$.

6.3 AVALIAÇÃO NO POSICIONAMENTO ABSOLUTO PRECISO

Utilizando o serviço de PPP do IBGE[1], uma avaliação acerca da qualidade dos dados das estações de referência virtuais, geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20°, é realizada nesta seção. Os efeitos da ionosfera são considerados através da utilização da observação resultante da combinação linear livre da ionosfera, enquanto que o atraso zenital troposférico é estimado no ajustamento das observações, juntamente com os demais parâmetros de interesse. Destaca-se que a máscara de elevação empregada por este serviço é de 10°.

Na avaliação, as coordenadas das sete estações de referência reais (tabela, 6.1), consideradas como conhecidas, foram comparadas com as coordenadas determinadas com as estações de referência virtuais. Similarmente ao que foi realizado na seção 6.2, as comparações foram executadas de forma a proporcionar uma avaliação do impacto da máscara de elevação, bem como da modelagem da atmosfera neutra e da ionosfera separadamente.

6.3.1 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO

A figura 6.9 mostra os deslocamentos planimétricos, altimétricos e tridimensionais das coordenadas obtidas com as estações de referência virtuais geradas com máscaras de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° aplicando a solução DG.

Observa-se que, na maioria dos casos, quanto maior a máscara de elevação, maiores são os deslocamentos. Exceções ocorreram com as estações R1 e R6, cujos menores deslocamentos foram obtidos com máscara de elevação de 15°, e a estação R5, com máscara de elevação de 20°.

[1] Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/default.shtm>

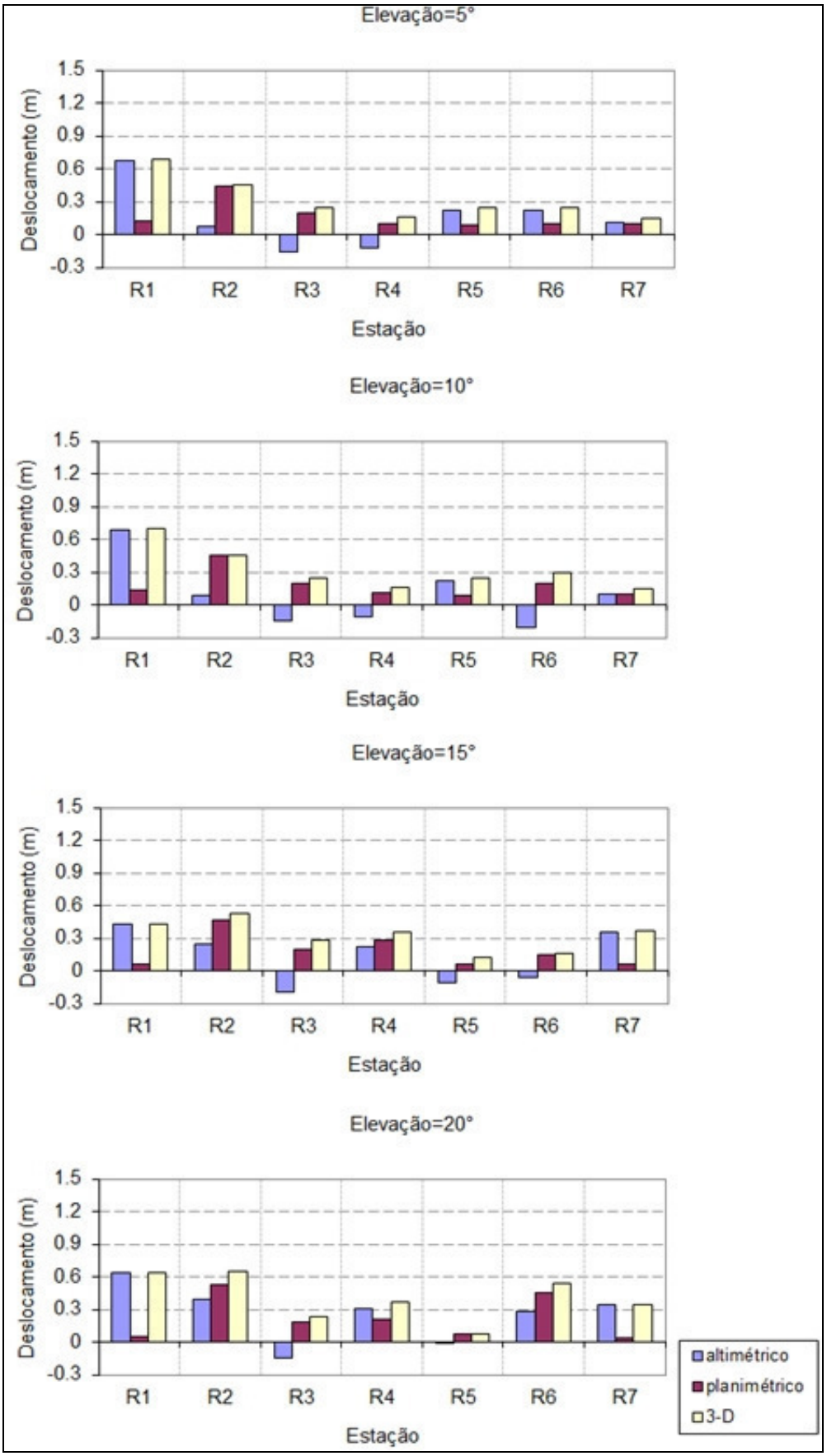

Figura 6.9 - Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões das estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (DG)

A tabela 6.9 mostra os deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão altimétrico, planimétrico e tridimensional das soluções obtidas com estações virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10, 15° e 20°.

Tabela 6.9 - Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes planimétrica, altimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° (DG)

Deslocamento altimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,68	0,15	-0,16	0,30	0,26
10°	0,68	0,09	-0,21	0,30	0,28
15°	0,43	0,13	-0,20	0,26	0,23
20°	0,52	0,22	0,04	0,28	0,18
Deslocamento planimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,44	0,16	0,08	0,20	0,12
10°	0,45	0,18	0,08	0,22	0,12
15°	0,47	0,18	0,06	0,23	0,14
20°	0,52	0,22	0,04	0,28	0,18
Deslocamento tridimensional (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,69	0,31	0,15	0,36	0,18
10°	0,70	0,32	0,14	0,37	0,18
15°	0,53	0,32	0,12	0,35	0,13
20°	0,65	0,41	0,08	0,45	0,20

Verifica-se que a melhor solução tridimensional ocorreu com máscara de elevação de 15°, com RMS de 35 cm. Destaca-se que as soluções com máscara de elevação de 5° e 10° apresentam RMS da resultante tridimensional de 36 cm e 37 cm e que a pior solução ocorreu com as estações virtuais geradas com máscara de 20°.

6.3.2 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA (Trop)

Os deslocamentos planimétricos, altimétricos e tridimensionais das coordenadas das estações de referência virtuais geradas com a solução Trop podem ser vistos na figura 6.10.

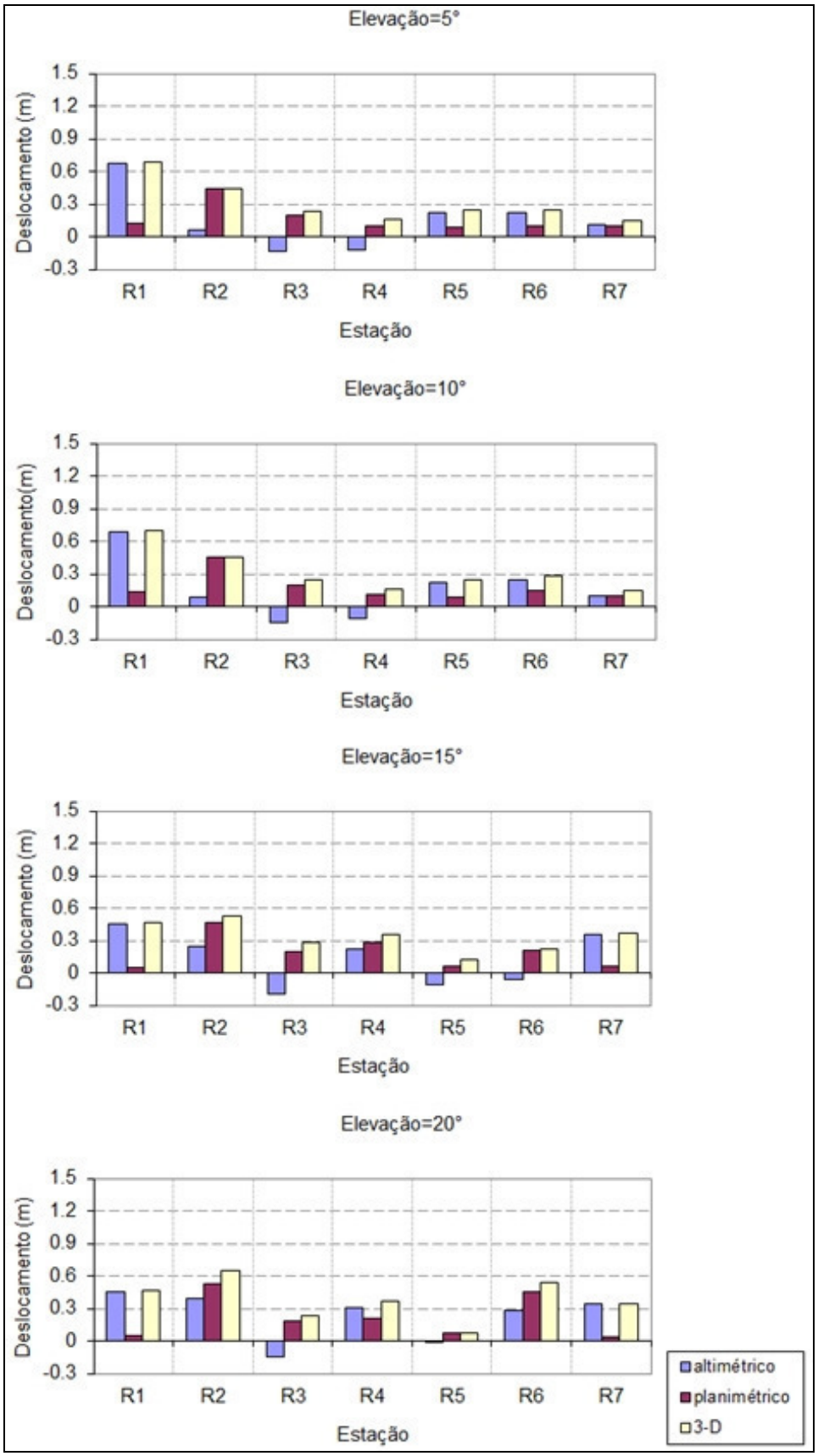

Figura 6.10 - Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões das estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop)

Verifica-se que a inclusão da modelagem da atmosfera neutra não proporcionou melhora nos deslocamentos das estações de referência, quando comparados com os resultados obtidos com a solução DG.

Os deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão planimétrico, altimétrico e tridimensional das estações de referência geradas com a modelagem da atmosfera neutra podem ser vistos na tabela 6.10.

Tabela 6.10 - Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° (Trop)

Deslocamento altimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,68	0,15	-0,14	0,30	0,26
10°	0,68	0,16	-0,14	0,30	0,26
15°	0,46	0,13	-0,20	0,27	0,23
20°	0,46	0,23	-0,15	0,31	0,21
Deslocamento planimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,44	0,16	0,08	0,20	0,12
10°	0,45	0,17	0,08	0,21	0,12
15°	0,47	0,19	0,05	0,24	0,14
20°	0,52	0,22	0,04	0,28	0,18
Deslocamento tridimensional (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,69	0,31	0,15	0,36	0,18
10°	0,70	0,32	0,14	0,36	0,18
15°	0,53	0,33	0,12	0,36	0,13
20°	0,65	0,38	0,08	0,42	0,18

De acordo com a tabela 6.10, o conjunto de estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10° e 15° proporcionaram os melhores resultados, com RMS do deslocamento tridimensional de 36 cm. Constata-se, também, que a pior solução ocorreu quando se utilizou máscara de elevação de 20°.

6.3.3 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DOS EFEITOS DA IONOSFERA (RNA_{Mod})

O efeito da inclusão da modelagem dos efeitos da ionosfera nas estações de referência virtuais pode ser visto na figura 6.11, a qual mostra os

deslocamentos das coordenadas das estações de referência calculados com as estações virtuais geradas com a solução RNA_{Mod}.

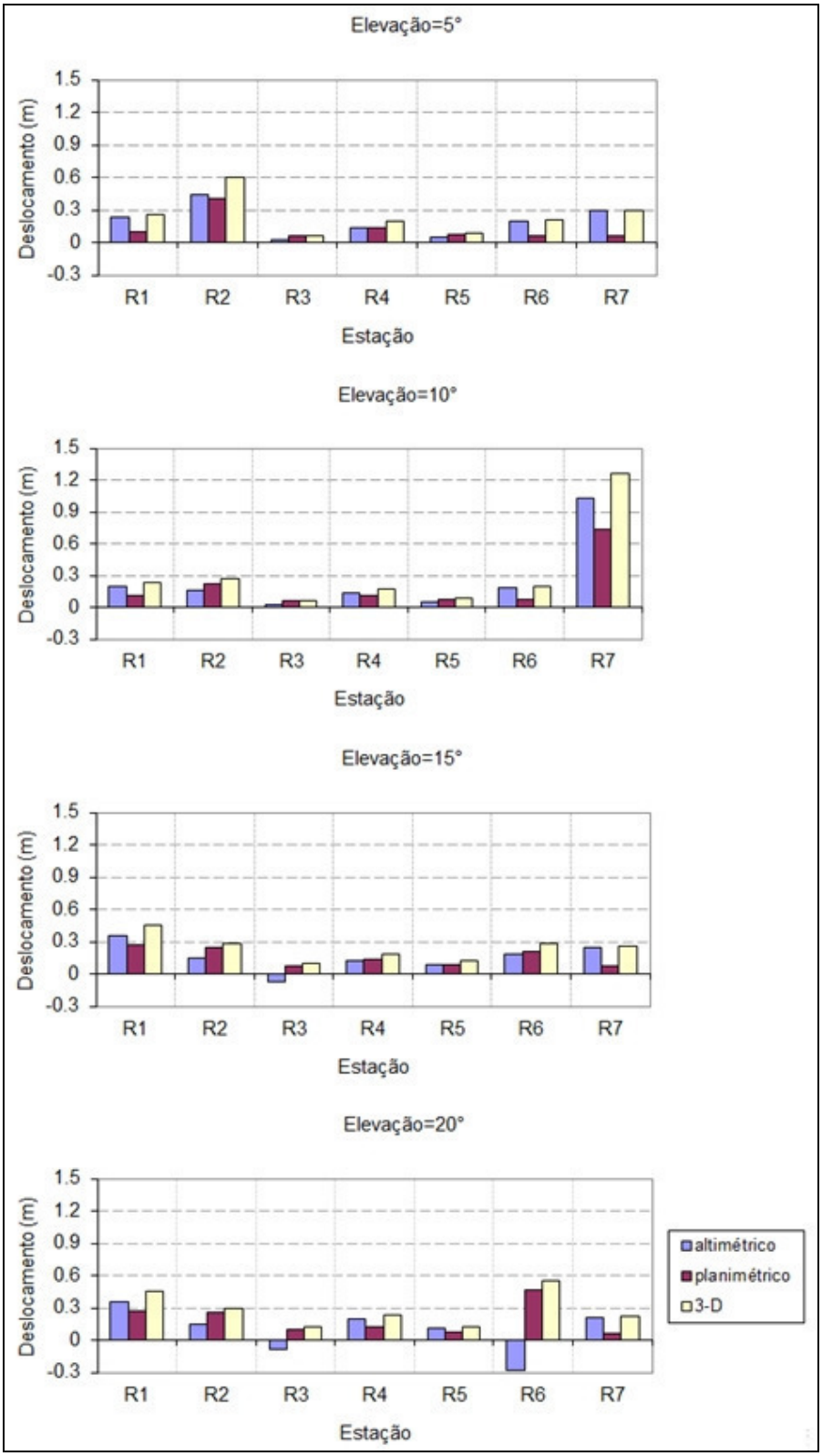

Figura 6.11 - Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões das estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (RNA_{Mod})

Constata-se que a referida modelagem proporciona uma redução dos valores do deslocamento tridimensional para a maioria das linhas de base, quando comparado com a solução DG. Uma exceção ocorreu para a estação R7 quando se utilizou máscara de 10°, onde a RMS aumentou de 0,3 m para 1,2 m.

A tabela 6.11 contém os deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e tridimensional das estações virtuais.

Tabela 6.11 - Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° (RNA_{Mod}).

Deslocamento altimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,44	0,20	0,03	0,24	0,13
10°	1,03	0,25	0,03	0,41	0,32
15°	0,36	0,15	-0,07	0,20	0,12
20°	0,36	0,09	-0,28	0,22	0,20
Deslocamento planimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,41	0,13	0,06	0,17	0,12
10°	0,73	0,20	0,06	0,30	0,22
15°	0,27	0,16	0,08	0,17	0,08
20°	0,47	0,19	0,06	0,24	0,14
Deslocamento tridimensional (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,60	0,24	0,06	0,29	0,16
10°	1,26	0,33	0,07	0,51	0,39
15°	0,45	0,24	0,10	0,26	0,11
20°	0,55	0,29	0,13	0,32	0,15

Verifica-se que o melhor resultado foi obtido com máscara de elevação de 15°, com RMS de 26 cm, podendo-se observar uma redução de 9 cm na RMS do deslocamento tridimensional quando comparada com a solução DG.

6.3.4 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO, MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA E DA IONOSFERA (Trop+RNA_{Mod})

Os deslocamentos das coordenadas planimétricas, altimétricas e tridimensionais dos pontos de controle obtidos com as estações de referência

virtuais geradas com a modelagem dos efeitos da atmosfera neutra e da ionosfera (Trop+RNA_{Mod}) são apresentados na figura 6.12.

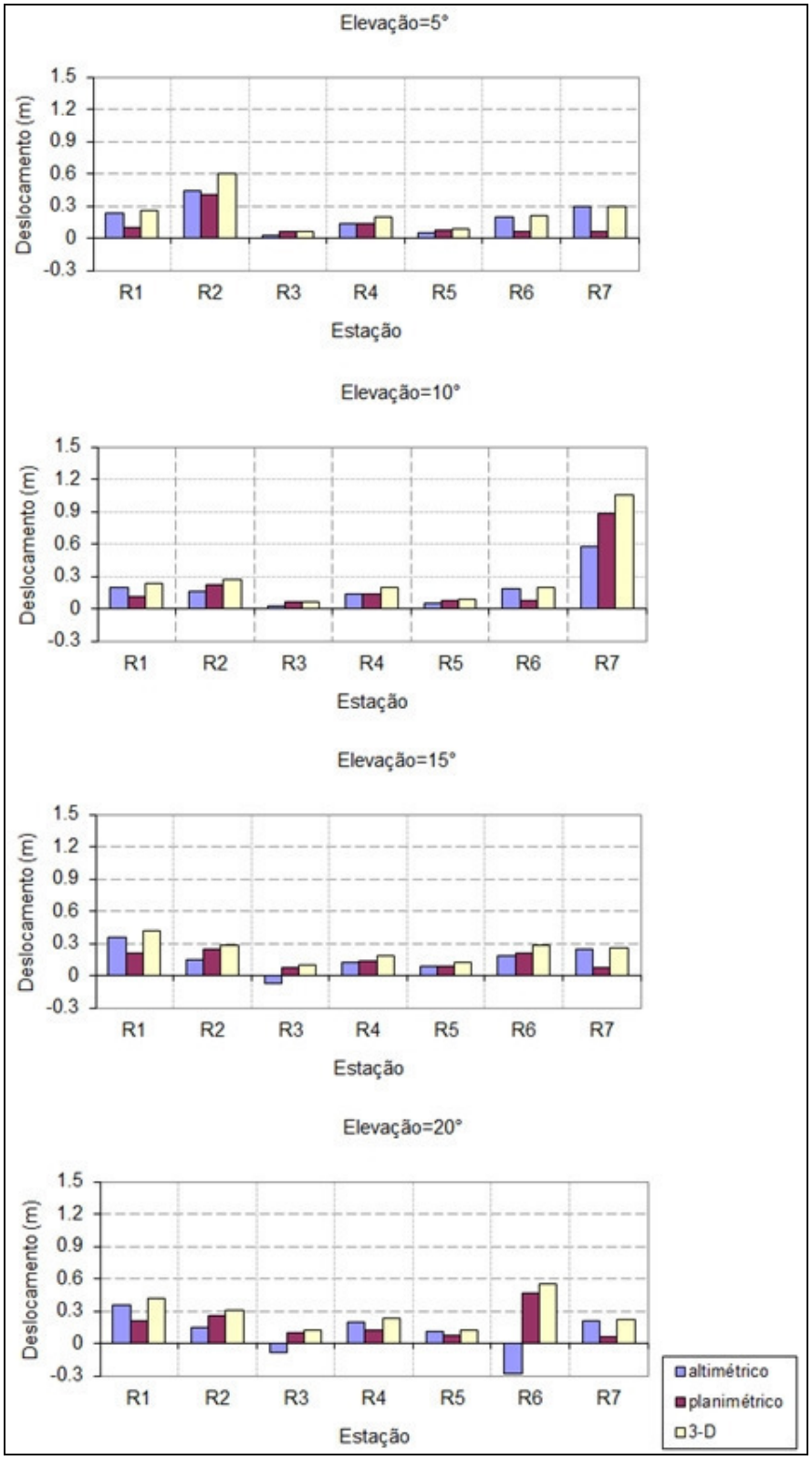

Figura 6.12 - Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões das estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop+RNA_{Mod})

Verifica-se que, fora a melhoria na componente altimétrica da estação R7 quando se utilizou máscara de elevação de 10°, os resultados praticamente permanecem os mesmos dos obtidos com a solução RNA_{Mod}, o que era de se esperar, visto a modelagem da atmosfera neutra ter pouco impacto na solução.

A tabela 6.12 mostra os deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica, e tridimensional das coordenadas das estações obtidas com a solução $Trop+RNA_{Mod}$

Tabela 6.12 - Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° ($Trop+RNA_{Mod}$)

Deslocamento altimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,44	0,20	0,03	0,24	0,13
10°	0,58	0,19	0,03	0,26	0,17
15°	0,36	0,15	-0,07	0,20	0,12
20°	0,36	0,09	-0,28	0,22	0,20
Deslocamento planimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,41	0,13	0,06	0,17	0,12
10°	0,88	0,22	0,06	0,35	0,27
15°	0,25	0,15	0,08	0,16	0,07
20°	0,47	0,18	0,06	0,23	0,14
Deslocamento tridimensional (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,60	0,24	0,06	0,29	0,16
10°	1,05	0,30	0,07	0,43	0,31
15°	0,42	0,24	0,10	0,26	0,10
20°	0,55	0,28	0,13	0,32	0,14

Da tabela 6.12 constata-se que a melhor solução tridimensional ocorreu com máscara de elevação de 15°, a qual possui o mesmo valor de RMS tridimensional que o da solução que aplicou apenas a modelagem dos efeitos da ionosfera ($DG+RNA_{Mod}$).

6.3.5 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DA IONOSFERA (RNA_{GIM})

Esta seção apresenta os resultados obtidos com estações de referência virtuais geradas com a solução RNA_{GIM}, onde os deslocamentos planimétricos,

altimétricos e tridimensionais das coordenadas dos pontos de controle são mostrados na figura 6.13.

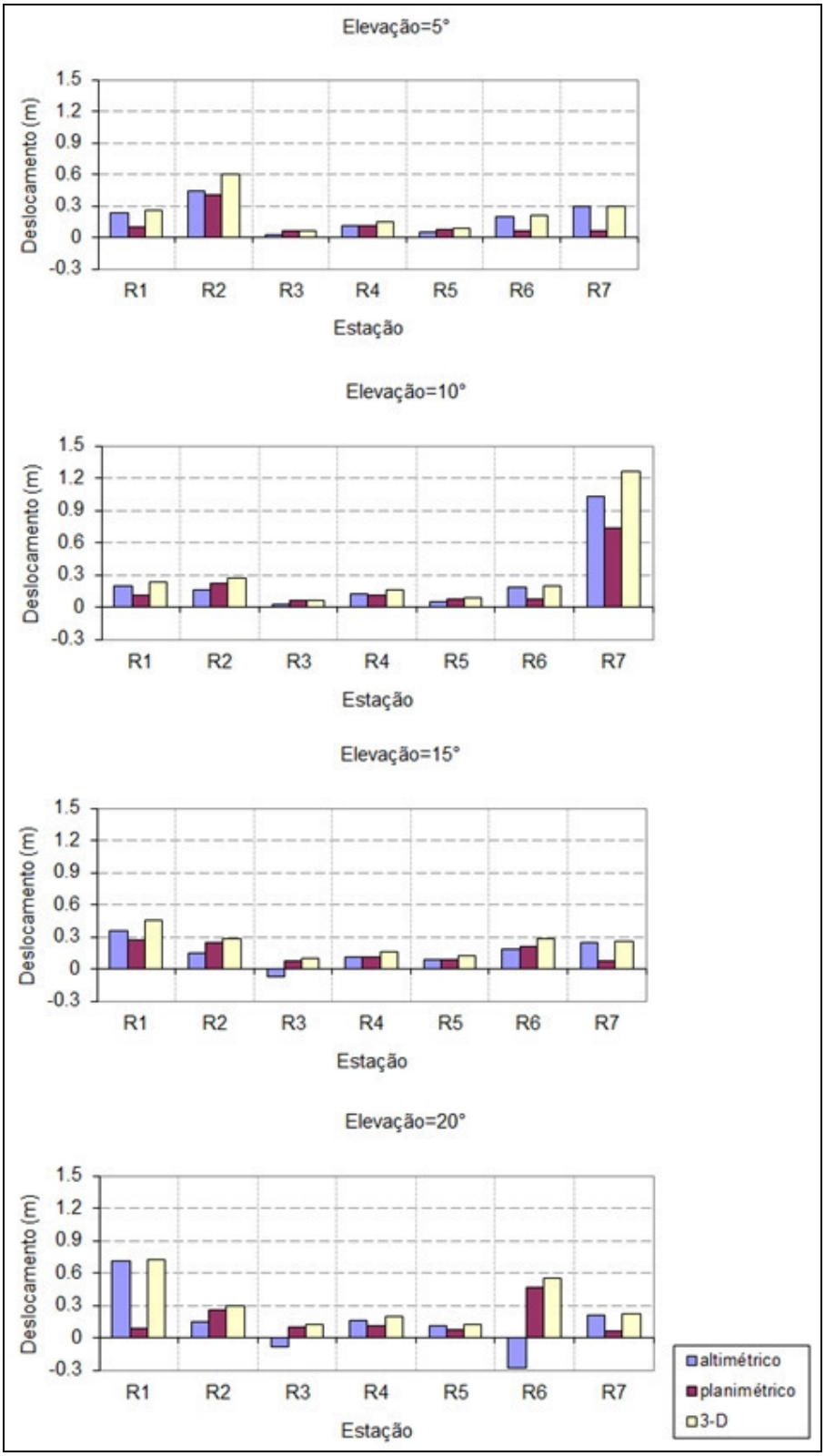

Figura 6.13 - Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões das estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (RNA_{GIM})

Conforme pode ser visto na figura 6.13, os deslocamentos obtidos com esta solução são similares aos obtidos com a solução RNA_{Mod}.

Os deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e tridimensional para as soluções em 5°, 10, 15° e 20° são apresentados na tabela 6.13.

Tabela 6.13 - Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° (RNA_{GIM})

Deslocamento altimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,44	0,19	0,03	0,23	0,14
10°	1,03	0,25	0,03	0,41	0,32
15°	0,36	0,15	-0,07	0,20	0,13
20°	0,71	0,14	-0,28	0,32	0,28
Deslocamento planimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,41	0,12	0,06	0,17	0,12
10°	0,73	0,20	0,06	0,30	0,22
15°	0,27	0,15	0,08	0,17	0,08
20°	0,47	0,17	0,06	0,22	0,14
Deslocamento tridimensional (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,60	0,24	0,06	0,29	0,17
10°	1,26	0,33	0,07	0,51	0,39
15°	0,45	0,24	0,10	0,26	0,11
20°	0,72	0,32	0,13	0,38	0,21

Observa-se que o melhor resultado tridimensional ocorreu quando se utilizaram estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 15°, com RMS e desvio-padrão dos deslocamentos tridimensionais iguais aos proporcionados pela solução RNA_{Mod}.

6.3.6 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO, MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA E DA IONOSFERA (Trop+RNA_{GIM})

A figura 6.14 mostra os deslocamentos obtidos com as estações de referência virtuais geradas com modelagem Trop+RNA_{GIM}.

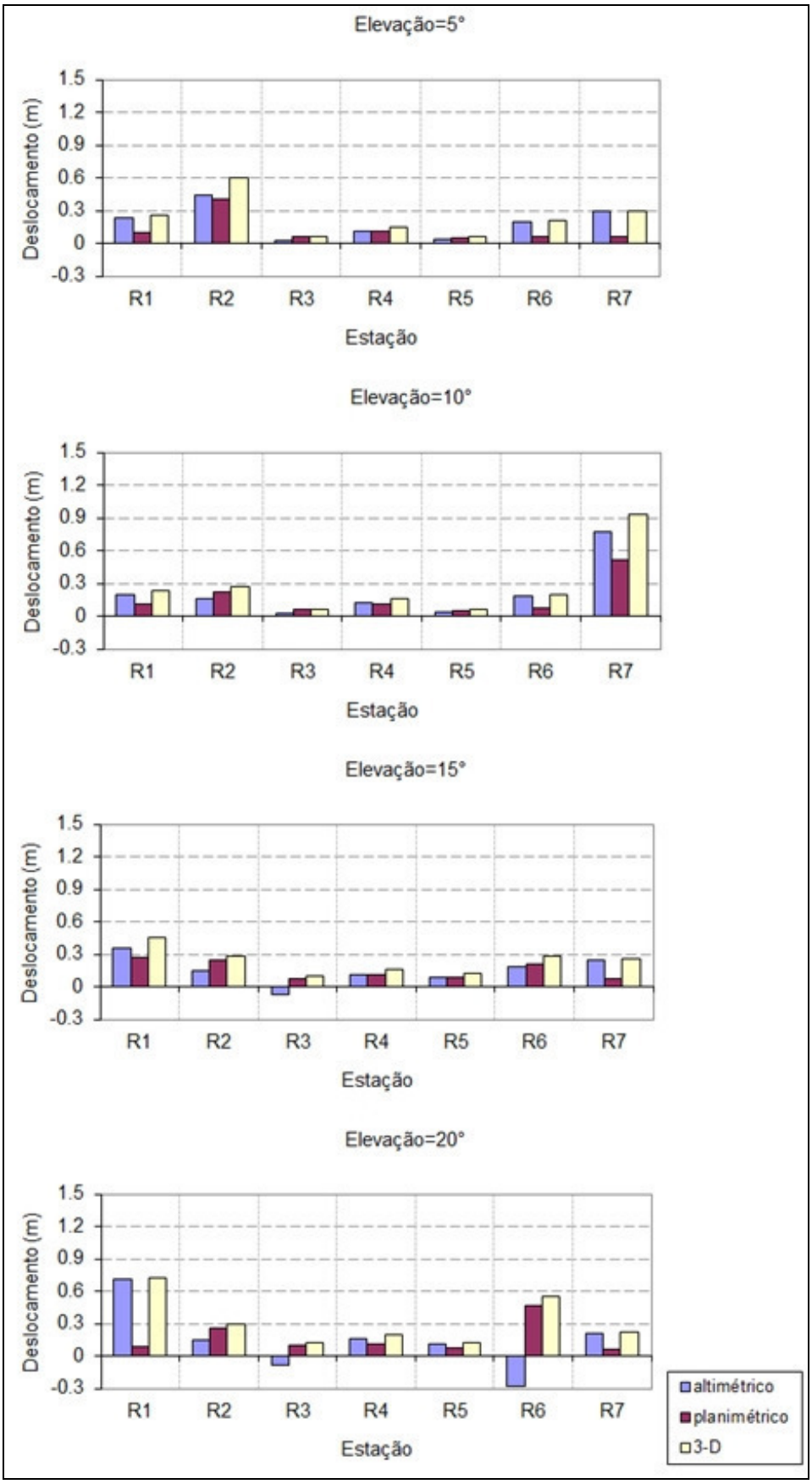

Figura 6.14 - Deslocamentos entre as coordenadas planimétricas, altimétricas e nas três dimensões das estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop+RNA_{GIM})

Observa-se, que os deslocamentos são similares aos obtidos sem a modelagem dos efeitos da atmosfera neutra (RNA_{GIM}), semelhantemente ao que ocorreu com a solução Trop+RNA_{Mod} em relação à solução RNA_{Mod}, evidenciando pouca contribuição da modelagem da atmosfera neutra mais uma vez.

Os deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e tridimensional dos deslocamentos obtidos com a solução Trop+RNA_{GIM} em 5°, 10, 15° e 20° são apresentados na tabela 6.14.

Tabela 6.14 - Deslocamentos máximos, médios, mínimos, RMS e desvios-padrão das componentes altimétrica, planimétrica e 3-D das soluções em 5°, 10, 15° e 20° (Trop+RNA_{GIM})

Deslocamento altimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,44	0,19	0,03	0,23	0,14
10°	0,77	0,21	0,03	0,32	0,24
15°	0,36	0,15	-0,07	0,20	0,13
20°	0,71	0,14	-0,28	0,32	0,28
Deslocamento planimétrico (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,41	0,12	0,06	0,17	0,12
10°	0,51	0,16	0,06	0,22	0,15
15°	0,27	0,15	0,08	0,17	0,08
20°	0,47	0,17	0,06	0,22	0,14
Deslocamento tridimensional (m)					
Elevação	Máximo	Média	Mínimo	RMS	Desvio-padrão
5°	0,60	0,23	0,06	0,29	0,17
10°	0,93	0,27	0,07	0,39	0,28
15°	0,45	0,24	0,10	0,26	0,11
20°	0,72	0,32	0,13	0,38	0,21

Conforme pode ser visto, a melhor solução ocorreu quando a estação de referência virtual foi gerada com máscara de elevação de 15°. Além disso, observa-se que o impacto da eliminação de observação por causa da máscara de elevação é menor, se comparado com a solução Trop+RNA_{Mod}.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dos resultados obtidos no posicionamento relativo verifica-se que a modelagem dos efeitos da atmosfera neutra exerceu pouca influência na qualidade do posicionamento relativo utilizando as estações de referência virtuais. Por outro lado, a contribuição da modelagem dos efeitos da ionosfera pode ser observada, mesmo o experimento tendo sido realizado em um período de baixa atividade solar.

Também é possível verificar que não há relação entre a magnitude do deslocamento das coordenadas com o comprimento das linhas de base, nem com o horário e duração do rastreio. Além disso, constata-se que soluções similares foram obtidas com máscara de elevação de 5°, 10° e 15°, com uma ligeira superioridade para a primeira.

A tabela 6.15 mostra um resumo dos resultados obtidos na avaliação das estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5° no posicionamento relativo.

Tabela 6.15 – Resumo dos resultados obtidos com as estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5° no posicionamento relativo

Modelo	**Deslocamento Planimétrico**		**Deslocamento Altimétrico**		**Deslocamento Tridimensional**	
	RMS (m)	**Desvio-padrão (m)**	**RMS (m)**	**desvio-padrão (m)**	**RMS (m)**	**desvio-padrão (m)**
DG	0,35	0,18	0,41	0,29	0,54	0,23
Trop	0,35	0,18	0,40	0,29	0,53	0,23
RNA_{Mod}	0,34	0,19	0,35	0,29	0,49	0,21
$Trop+RNA_{Mod}$	0,33	0,18	0,32	0,28	0,47	0,19
RNA_{GIM}	0,37	0,21	0,35	0,28	0,50	0,21
$Trop+RNA_{GIM}$	0,35	0,19	0,31	0,27	0,47	0,19

Comparando a solução DG com as soluções que aplicaram a modelagem dos efeitos da atmosfera neutra e da ionosfera conjuntamente verifica-se que ocorre uma melhora de aproximadamente 13% na RMS do posicionamento tridimensional. Embora esta melhora tenha ocorrido, destaca-se o fato da RMS tridimensional ser de 47 cm. Ressalta-se que as soluções onde as previsões do

VTEC foram realizadas utilizando o GIM do IGS ou os arquivos IONEX produzidas pelo Mod_Ion são bastante similares.

A tabela 6.16 mostra um resumo dos resultados obtidos na avaliação das estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 15° no PPP.

Tabela 6.16 – Resumo dos resultados obtidos com as estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 15° no PPP

Modelo	Deslocamento Planimétrico		Deslocamento Altimétrico		Deslocamento Tridimensional	
	RMS (m)	desvio-padrão (m)	RMS (m)	desvio-padrão (m)	RMS (m)	desvio-padrão (m)
DG	0,23	0,14	0,26	0,23	0,35	0,13
Trop	0,24	0,14	0,27	0,23	0,36	0,13
RNA_{Mod}	0,17	0,08	0,20	0,12	0,26	0,11
$Trop+RNA_{Mod}$	0,16	0,07	0,20	0,12	0,26	0,10
RNA_{GIM}	0,17	0,08	0,20	0,13	0,26	0,11
$Trop+RNA_{GIM}$	0,17	0,08	0,20	0,12	0,26	0,11

Observa-se que a modelagem dos efeitos da atmosfera neutra empregada no cálculo das estações de referência virtuais exerceu pouca influência na qualidade do PPP. Mais uma vez, é possível observar a contribuição da modelagem dos efeitos da ionosfera.

As melhores soluções no PPP também foram encontradas quando a modelagem dos efeitos da atmosfera neutra e da ionosfera foram aplicadas simultaneamente. Neste caso, proporcionando uma melhora de aproximadamente 25% na acurácia do posicionamento tridimensional, quando comparado com a solução DG. Salienta-se que a RMS do deslocamento tridimensional no melhor caso foi de 26 cm. Além disso, as soluções utilizando as previsões geradas com o GIM do IGS ou os arquivos IONEX produzidos pelo Mod_Ion são praticamente iguais.

Os deslocamentos obtidos com a máscara de elevação que apresentou melhor desempenho foram comparados com os deslocamentos obtidos com as demais máscaras de elevação, tanto no caso do posicionamento relativo como no PPP.

Os resultados são apresentados com detalhes nos apêndices 1 e 2, respectivamente.

Por fim, observa-se que tanto no posicionamento relativo como no PPP, os maiores deslocamentos estão, predominantemente, associados à componente altimétrica.

7 CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa foi desenvolvida uma metodologia baseada em redes neurais artificiais para prever o atraso devido à refração ionosférica regionalmente, a qual foi aplicada no cálculo de estações de referência virtuais.

Tal metodologia é capaz de prever o VTEC na região brasileira por 72 horas. Para tanto, a arquitetura de RNA denominada de MLP com uma única camada de neurônios ocultos foi utilizada. As entradas do modelo são a latitude e longitude do ponto ionosférico, bem como o instante do dia (TU). Arquivos IONEX de 72 horas anteriores à época de início da previsão foram utilizados para treinar as RNA. Os efeitos de longo período da ionosfera são considerados através de atualizações do treinamento a cada 24 horas.

Testes foram conduzidos com dois tipos de conjunto de treinamento. O primeiro é composto por informações dos GIM calculados pelo IGS limitado à região brasileira e o segundo é formado por arquivos IONEX produzidos pelo Mod_Ion. Além disso, foram utilizados dados de quinze dias em alta atividade solar e baixa atividade solar, incluindo uma tempestade geomagnética severa.

Os GIM do IGS foram copiados pela internet através do servidor de ftp do IGS, enquanto que os mapas do Mod_Ion foram calculados com a disponibilização do programa computacional pelo prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo. Foram desenvolvidos programas, em linguagem Fortran 77, para ler os arquivos em formato IONEX, realizar o preprocessamento das informações lidas e escrever um arquivo no formato apropriado para ser lido no programa utilizado no treinamento das RNA.

Também foi desenvolvido o programa denominado de NBN_LTG, em linguagem Fortran 77, visando treinar as RNA. Foi adotada a versão do método Levenberg-Marquardt sem retropropagação, na qual, de modo geral, a convergência do treinamento foi obtida com menos de 20 iterações. Constatou-

se que ao se inicializar os parâmetros da RNA com os parâmetros determinados no treinamento do dia anterior, a convergência do treinamento é obtida com cerca de 5 iterações.

A quantidade de neurônios ocultos foi determinada de modo a proporcionar a regularização estrutural. No caso dos GIM do IGS, a utilização de 16 neurônios ocultos mostrou os melhores resultados, enquanto que para os arquivos IONEX do Mod_Ion, este número foi reduzido para 8.

Foi realizada uma investigação sobre o impacto da quantidade de neurônios ocultos na duração do treinamento, constatando-se que quanto maior o número de tais neurônios mais demorado é o treinamento. Também se verificou que esta relação não é linear. Ressalta-se que a duração do treinamento das RNA treinadas com as informações do GIM do IGS e dos arquivos IONEX do Mod_Ion foi da ordem de 2,5 min, em ambos os casos. Quando se utilizaram 100 neurônios ocultos, a duração do treinamento aumentou para 114 min e 270 min, respectivamente.

Assumindo-se o VTEC contido nos GIM como referência, constatou-se que a acurácidade da previsão das RNA treinadas com os GIM do IGS variou de cerca de 1,4 TECU a 10,7 TECU, para o período de baixa atividade solar e de alta atividade solar com tempestade geomagnética, respectivamente. Valores próximos dos divulgados pelo IGS como sendo a acuracidade dos seus mapas de VTEC, que varia de 2 TECU a 8 TECU. Estas grandezas se alteram para cerca de 1,2 TECU a 12,5 TECU, quando os VTEC dos arquivos IONEX produzidos pelo Mod_Ion foram considerados.

As previsões do VTEC geradas com a utilização das informações contidas no GIM do IGS apresentaram cerca de 83% de coincidência com os VTEC dos GIM, tanto em alta como em baixa atividade solar. Este valor muda para o intervalo de 80% a 93%, quando se utilizaram informações dos arquivos IONEX calculados com o Mod_Ion. Exceções ocorrem quando há distúrbios de curto período na ionosfera, como o causado por tempestades geomagnéticas. No caso envolvido no período dos dados utilizados, a porcentagem da modelagem diminuiu para 70% quando se utilizou o GIM e 55% quando o Mod_Ion foi empregado.

Conclui-se que, devido à magnitude da acuracidade das previsões do VTEC, não é de se esperar que o vetor das ambiguidades das linhas de base envolvendo a estação de referência virtual seja solucionado corretamente, principalmente durante alta atividade solar. Por outro lado, os efeitos da ionosfera são reduzidos e a solução que considera as ambiguidades como sendo números reais (*float*) pode ser adotada.

Também foram desenvolvidos programas, em Fortran 77, para se calcular a posição dos satélites a partir das efemérides IGU, para se calcular as coordenadas dos pontos ionosféricos no sistema de coordenadas geográficas, bem como para se calcular o ângulo de elevação, o ângulo zenital e o azimute dos satélites. Conhecendo-se a altitude da camada ionosférica, tais programas permitem converter os VTEC resultantes da previsão para sinais enviados em qualquer frequência. Portanto, o modelo de previsão do VTEC proposto pode ser utilizado para corrigir as observações dos satélites de qualquer sistema GNSS.

Além do atraso ionosférico, também foram desenvolvidos programas para se calcular o atraso troposférico nas estações envolvidas através dos arquivos de previsão do atraso troposférico zenital do CPTEC/INPE ou do modelo de Hopfield associado ao modelo GPT.

Os programas desenvolvidos para calcular os atrasos ionosférico e troposférico foram reunidos em um programa para calcular dados de estações de referência virtuais denominado VRSGen, o qual se encontra em desenvolvimento no Laboratório de Topografia e Geodésia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Para reduzir o atraso troposférico zenital na direção receptor-satélite, a função de mapeamento GMF foi adotada, enquanto que o VTEC é reduzido para tal direção através da função de mapeamento padrão.

Ressalta-se que esta metodologia requer dados de apenas uma estação da rede de referência em tempo-real, podendo ser utilizada nos casos de indisponibilidade dos dados das outras estações da referida rede.

Sete estações de referência e dezoito pontos de controle foram rastreados na região oeste do estado de São Paulo em junho de 2009. Os experimentos realizados com estes dados mostram melhor desempenho quando se emprega

a modelagem dos efeitos da atmosfera neutra e da ionosfera simultaneamente, proporcionando diferenças das coordenadas tridimensionais obtidas com as estações de referência virtuais calculadas com as previsões determinadas com os GIM do IGS que variaram de 14 cm à 80 cm, com RMS de 47 cm. Estes valores são alterados para o intervalo de 10 cm à 78 cm, com RMS de 47 cm, quando se utilizam dados do Mod_Ion para produzir as previsões.

Em ambos os casos as estações de referência virtuais foram geradas com máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20°. Os melhores resultados foram obtidos utilizando máscara de elevação de 5°, 10° e 15°, com pouca superioridade para a primeira, comprovando um bom desempenho das funções de mapeamento adotadas. Os piores resultados ocorram com máscara de elevação de 20°, mostrando que a exclusão de observação é um ponto crítico na geração das estações virtuais, principalmente no caso de redes esparsas, como é o caso da RBMC em algumas regiões.

Verifica-se, portanto, que as previsões utilizando o GIM do IGS ou os arquivos IONEX do Mod_Ion são muito similares. As desvantagens de se utilizar o GIM do IGS é que sua produção depende desta instituição, as informações são disponibilizadas com latência de 24 horas, no caso do GIM rápido, e apenas as estações pertencentes à rede ativa do IGS são utilizados nos cálculos. Por outro lado, o processamento com o Mod_Ion proporciona autonomia no que diz respeito à produção dos arquivos IONEX, a latência depende da disponibilização dos dados GNSS da rede de referência e do tempo de processamento. Além disso, dados de todas as estações de referência da América do Sul são utilizados na solução.

As coordenadas das sete estações de referência virtuais geradas, bem como das sete estações de referência implantadas, foram submetidas ao serviço de PPP do IBGE. Os resultados também mostraram que as melhores soluções são proporcionadas quando se aplica a modelagem dos efeitos da atmosfera neutra e ionosfera conjuntamente. Neste caso, as diferenças de coordenadas tridimensionais variaram de 45 cm a 10 cm, com RMS de 26 cm, quando se utilizou as previsões produzidas com os GIM do IGS. Valores alterados para 42 cm, 10 cm e 26 cm quando se utilizou o Mod_Ion. Ressalta-se que neste caso

as melhores soluções foram proporcionadas quando se utilizaram 5°, 10° e 15° de máscara de elevação, com pouca superioridade com esta última.

Ressalta-se que a avaliação do desempenho da metodologia para geração de estação de referência virtual sobre o posicionamento relativo e PPP foi realizada considerando um período de baixa atividade solar, mesmo assim é possível observar que a modelagem dos efeitos da ionosfera desenvolvida melhora a solução. Resultados piores são esperados em alta atividade solar. Além disso, observa-se que esta metodologia permite gerar estações de referência virtuais em tempo-real a partir de dados de apenas uma estação da rede de referência.

7.2 RECOMENDAÇÕES

Visto a simplicidade do modelo de RNA desenvolvido, verifica-se que ele não é capaz de se ajustar a perturbações de curto período da ionosfera, os quais podem ser levados em consideração através da medida do fluxo solar 10,7 cm e do índice Dst. Portanto, recomenda-se que sejam realizadas pesquisas visando a inclusão de tais grandezas no modelo.

Neste trabalho foram adotados VTEC de arquivos IONEX para se treinar as RNA. No entanto, é importante destacar que outras fontes de VTEC podem ser utilizadas. Neste caso, seria necessário realizar uma nova avaliação sobre a quantidade de neurônios ocultos ideal.

As RNA foram treinadas com dados que englobam a região brasileira e sua vizinhança próxima. Recomenda-se estudar uma metodologia que tenha como objetivo expandir o modelo para a América do Sul.

O período de máxima atividade solar do ciclo solar 24 está previsto para ocorrer em meados de 2013. Portanto, sugere-se fazer uma avaliação do modelo durante este período.

Tendo em vista que o modelo de previsão do VTEC proposto possibilita que tal grandeza seja calculada em qualquer posição dentro da região de abrangência e horário, é possível gerar arquivos do VTEC no formato IONEX.

O desempenho do modelo desenvolvido foi testado apenas na geração de estações de referência virtuais. No entanto, o mesmo pode ser utilizado em outras técnicas de posicionamento, tais como no posicionamento por ponto convencional (através das pseudodistâncias) e no posicionamento diferencial (DGNSS – *Differential GNSS*). Portanto, sugere-se que estudos para avaliar o desempenho da modelagem proposta em tais técnicas de posicionamento sejam realizados.

Neste trabalho, as medidas de pressão e temperatura utilizadas no modelo de Hopfield são calculadas pelo GPT. Como a qualidade do atraso é diretamente proporcional aos valores de pressão e temperatura, verifica-se que é necessário fazer uma avaliação da qualidade de tais grandezas. Neste sentido, encontra-se em andamento um estudo para se comparar o atraso troposférico zenital calculado com este modelo, com o referido atraso calculado com dados de estações meteorológicas durante o ano de 2010.

O modelo da antena da estação de referência virtual é assumido como sendo igual ao da estação de referência mestra, mas nenhuma correção em função da elevação e azimute dos satélites é aplicada. Portanto, recomenda-se desenvolver um programa para corrigir as observações do deslocamento do centro de fase da antena do receptor e suas variações com relação à elevação e ao azimute dos satélites.

Para transmissão dos dados da estação de referência virtual é recomendado utilizar o formato preconizado pela RTCM, recomendando-se o desenvolvimento de um programa para escrever os arquivos das estações de referência virtuais neste formato, visando aplicações em tempo-real.

Como pode ser verificado, o modelo desenvolvido para prever o VTEC abrange uma vasta área formada por oceano. No entanto, não foi possível avaliar a qualidade do posicionamento em tal região, recomendando-se que tal avaliação seja realizada. Além disso, os testes compreenderam uma região reduzida da área de abrangência do modelo, sugerindo-se que testes envolvendo dados observados em outras regiões do Brasil sejam efetuados.

As obstruções relacionadas com as estações rastreadas não foram documentadas, o que prejudica a análise da influência da máscara de elevação

na solução, sugerindo-se a confecção de gráficos de obstrução nas investigações futuras.

REFERÊNCIAS

ACHARYA, R.; ROY, B.; SIVARAMAN, M. R.; DASGUPTA, A. Prediction of ionospheric Total Electrons Content using adaptive neural network with in-situ learning algorithm. **Advances in Space Research**, v. 47, n. 1, p. 115-123, Jan., 2011.

AGUIAR, C. R. et al. Determinação do Erro Sistemático na Pseudodistância devido à ionosfera: Avaliação da performance do Mod_Ion e do Modelo de Klobuchar. In: UFPR. (Org.). **Série em Ciências Geodésicas**. Curitiba: Imprensa Universitária da UFPR, 2003. v. 3.

AGUIAR, C. R. **Modelo regional da ionosfera (MOD_ION): implementação em tempo real**. 2005. 159 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2005.

____. **Grade ionosférica para aplicações em posicionamento e navegação com GNSS**. 2010. 256 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2010.

ALVES, D. B., M. **Posicionamento GPS utilizando o conceito de estação virtual**, 2008. 165 p., Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.

ALVES, D. B., M.; MONICO, J. F. G.; DALBELO, L. F. A. Geração de VRS a partir de modelos atmosféricos: conceito, implementação e resultados. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 13, n. 2, p. 316-336, jul./dez., 2007.

____. Análise do modelo troposférico empregado na geração de uma Estação de Referência Virtual utilizando o posicionamento por ponto preciso. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 3, p. 373-387, jul./set., 2009.

ALVES, D. B., M.; MONICO, J. F. G. GPS/VRS positioning using atmospheric modelling. **GPS Solutions**, v. 5, n. 3, p. 253 - 261, July, 2011.

ARMENDARIS, O. C.; MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Desempenho do modelo global da ionosfera do IGS: avaliação no posicionamento por ponto na região sul do Brasil em período de alta atividade solar. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 2, p.208-223, abr./jun., 2009.

BAILEY, G. J; BALAN, N.; SU, Y. Z. The Sheffiled University plasmasphere ionosphere model – a review. **Journal of Atmospheric Solar-Terrestrial Physics**, v. 59, n. 13, p. 1541-1552, Sept., 1997.

BANVILLE, S.; LANGLEY, R. Defining the basis of an "integer-levelling" procedure for estimating slant total electron content. In: ION GNSS-2011, 2011, Portland, **Proceedings…**, 2011. p. 2542 –2551.

BATTITI, R. First and second order methods for learning: between steepest descent and Newton's method. **Neural Computation**, v. 4, n. 2, p. 141-166, Mar.,1992.

BERGHMANS, D. et al. The solar influences data analysis center. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, n, 5-6, p. 757–761, Mar., 2002.

BILITZA, D. **International Reference Ionosphere 1990**, URSI/COPSAR, NSSDC/WDC-A-R&S, 1990.

____. International Reference Ionosphere 2000. **Radio Science**, v. 36, n. 2, p. 261-175, Mar., 2001.

BILITZA, D.; REINISCH, B. W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters. **Advances on Space Research**, v. 48, n. 2, p. 599-609, Aug., 2007.

BITTENCOURT, J. A. et al. LION: a dynamic computer model for the low-latitude ionosphere. **Annales Geophysicae**, v. 25, p. 2371-2392, Nov., 2007.

BISHOP, C. M. **Pattern recognition and machine learning**. Singapore: Springer, 2006. 738 p.

____. **Neural Networks for pattern recognition**. Oxford: Oxford University Press, 2008. 482 p.

BKG. **GNSS Data Center: Ntrip Downloads.** Disponível em: <http://igs.bkg.bund.de/ntrip/download>. Acesso em 15 de fev. 2012.

BLEWITT, G. Fixed point theorems of GPS carrier phase ambiguity resolution and their application to massive network processing: Ambizap. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, B12410, Dec., 2008.

BOBERG, F.; WINTOFT, P; LUNDSTEDT, H. Real time Kp predictions from solar wind data using neural networks. **Physics and Chemistry of Earth**, v. 25 n. 4, p. 275-280, Apr., 2000.

BOEHM, J.; SCHUH, H. Vienna mapping functions in VLBI analyses. **Geophysical Research Letters**, v. 31, L01603, Jan., 2004.

BOEHM, J.; NIELL, A.; TREGONING, P.; SCHUH, H. Global Mapping Function (GMF): a new empirical mapping function based on numerical weather model data. **Geophysical Research Letters**, v. 33, L07304, Apr., 2006.

BOEHM, J.; WERL, B.; SCHUH, H. Troposphere mapping functions for GPS and Very Long Baseline Interferometry from European Centre for medium-range weather forecasts operational analysis data. **Journal of Geophysical Research- Solid Earth**, v. 111, B02406, Feb., 2006.

BOEHM, J.; HEINKELMANN, R.; SCHUH, H. Short note: a global model of pressure and temperature for geodetic applications. **Journal of Geodesy**, v. 81, n. 10, p. 679-683, Oct., 2007.

BUENO, E. I.; TING, D. K. S.; GONÇALVES, I. M. P. Development of a artificial neural networks for monitoring and diagnosis of sensor fault and detection in the IEA-R1 research reactor at IPEN. In: 2007 International Nuclear Atlantic Conference (INAC 2007), 2007. Santos. **Proceedings…**, 2007.

CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma freqüência**. 1999. 191 p. Tese (Doutorado) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

____. Quality of TEC estimated with Mod_Ion using GPS and GLONASS data. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2009, p. 1-16, 2009.

____. Mínimos quadrados não negativos: solução pelo método de LEMKE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA INFORMAÇÃO, 3:, 2010, Recife, **Anais...**, 2010. p. 1-4.

CANDER, R. Lj.; MILOSAVLJEVIC, M. M.; STANKOVIC, S. S.; TOMASEVIC, S. Ionospheric forecasting technique by artifical neural network. **Eletronics Letters**, v. 34, n. 16, 1573-1574, Aug., 1998.

CHAO, C. C. **The tropospheric calibration model for Mariner Mars 1971.** JPL Technical Report 32-1587, 1974. p. 61-76.

CHARALAMBOUS, C. Conjugate gradient algorithm for efficient training of artificial neural networks. **IEE Proceedings-G**. v. 30, n. 3, p. 301-310, 1992.

COLLINS, P.; BISNATH S.; LAHAYE, F.; HÉROUX, P. Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing. **NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation**, v. 57, n. 2, p. 123-135, 2010.

COLOMBO, O. L.; HERNANDEZ-PAJARES, M. JUAN, J. M.; SANZ, J. Wide-area, carrier-phase ambiguity resolution using a tomographic model of the ionosphere. **NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation**, v. 49, n. 1, p. 61-69, 2002.

COSTA, S. M. A. et al. RBMC em Tempo Real, via NTRIP, e seus benefícios nos levantamentos RTK e DGPS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2: 2008, Recife, **Anais...**, 2008.

CYBENKO, G. Approximations by superpositions of sigmoidal functions. **Math. Control Signal Systems**, v. 2, p. 303-314, 1989.

DABOVE, P.; De AGOSTINO. M. Network RTK and reference station configuration. **Inside GNSS**, p. 24-29, Nov./Dec., 2011.

DAI, L., et al. A Study on GPS/GLONASS Multiple Reference Station Techniques for Precise Real-Time Carrier Phase-Based Positioning. In: ION GPS-2001, 2001. Salt Lake City. **Proceedings…**, 2001.

DAI, L.; HAN, S.; WANG, J.; RIZOS, C. Comparison of interpolation algorithms in network-based GPS techniques. **NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation**, v. 50, n. 4, p. 277-293, 2003.

Dal POZ; W. R; CAMARGO, P. O. Conseqüências de uma tempestade geomagnética no posicionamento relativo com receptores de simples

freqüência. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 12, n. 2, p.275-294, jul./dez., 2006.

DANIELL, R. E., et al. Parameterized Ionosphere Model: A global ionospheric parameterization based on first principle models. **Radio Science**, v. 30, n. 5, p 1499-1510, 1995.

DAVIES, K. **Ionospheric radio**. London: IEE (Institute of Electrical Engineer), 1990. 580 p. (Eletromagnetic Waves Series v. 31).

DAVIS, J. L. et al. Geodesy by radio interpherometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. **Radio Science**, v. 20, n. 6, p. 1593-1607, Nov./Dec., 1985.

FAHLMAN, S. **An empirical study of learning speed in back-propagation networks.** Pittsburgh: Carnegie-Mellon University, Pittsburgh-PA, USA, 1988. (19 p. Technical Report CMU-CS-88-162)

FELTENS, J. Chapman Profile Approach for 3-d Global TEC Representation. In: IGS ANALYSIS CENTERS WORKSHOP, 1998. Darmstadt. **Proceedings…**,1998, p. 285-297.

FELTENS, J. et al. Routine Production of Ionosphere TEC Maps at ESOC. In: IGS ANALYSIS CENTERS WORKSHOP, IGPP/SIO, 1999. La Jolla. **Proceedings…**, 1999.

FENG, Y.; ZHENG, Y. Efficient interpolations to GPS orbits for precise wide area applications. **GPS Solutions**, v. 9, n. 4, p. 273-282, May, 2005.

FISCHER, I. et al. **JavaNNS Java Neural Network Simulator User Manual, Version 1.1**, University of Tubingen Wilhelm-Schickard-Institute for Computer Science, Department of Computer Architecture, 2001. Disponível em: http://www.ra.cs.uni-tuebingen.de/software/JavaNNS/manual/JavaNNS-manual.pdf. Acesso em: 21 mar. de 2011.

FONSECA JUNIOR, E. S. **O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil**. 2002. 176 p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

FORTES, L. P. S. **Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC)**, 1997. 152 p. Dissertação (Mestrado em

Ciências em Sistemas e Computação), Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, 1997.

FORTES, L. P. S. **Optimising the use of GPS multi-reference stations for kinematic positioning.** 2003. 355p. Tese (Doutorado em Engengaria Geomática), Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, 2003.

FORTES, L. P. S.; CANNON, M. E.; LACHAPELLE, G. Testing a multi-reference GPS station network for OTF positioning in Brazil. In: ION GPS-2000, 2000, Salt Lake City. **Proceedings...**, 2000. p. 1133-1142.

FORTES, L. P. S. et al. Plano de expansão e modernização das redes ativas RBMC/RIBaC In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 23:, 2007, Rio de Janeiro, **Anais …**, 2007.

FOTOPOULOS, G. **Parameterization of DGPS Carrier Phase Errors Over a Regional Network of Reference Stations**. 2000. 185p. Dissertação (Mestrado) – Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, 2000. Disponível em: <http://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/MEC/00.20142.GFotopoulos.pdf>. Acesso em: 23 de mar. 2011.

FOTOPOULOS, G.; CANNON, M. E. An Overview of Multiple-Reference Station Methods for cm-Level Positioning. **GPS Solutions**, v. 4, n. 3, p. 1-10, Jan., 2001.

FRITSCHE, M. et al. Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates. **Geophysical Research Letters**, v. 32, L23311, Dec., 2005.

FUNAHASHI, K. On the approximate realization of continuous mappings by neural networks. **Neural Networks**, v. 2, n. 3, p. 183-192, 1989.

GAO, Y.; LI, Z. Ionosphere effect and modeling for regional area differential GPS network, In: ION GPS-98, 1998. Nashville. **Proceedings…** , 1998. p. 91-97.

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

GE, M. et al. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations. **Journal of Geodesy**, v. 82, n. 7, p. 389-399, July, 2008.

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

GOMES, M. A.; SIQUEIRA, A. A. G.; SILVEIRA, G. L. M. Gait-pattern adaptation algorithms based on neural network for lower limbs active ortheses In: 2009 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, IRSO09, 2009. **Proceedings…**, 2009. p.4475-4480.

HABARULEMA, J. B.; McKINNEL, L. A.; CILLIERS, P. J. Prediction of GPS total electron content using neural network over South Africa. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 69, n.15, p. 1842-1850, Nov., 2007.

HAGAN , M. T. e MENHAJ, M. B. Training feedforward neural networks with the Marquardt algorithm. **IEEE Transactions on Neural Networks,** v. 5, n. 6, p. 989-993,1994.

HAN, S.; RIZOS, C. Instantaneous ambiguity resolution for medium-range GPS kinematic positioning using multiple reference stations. In: IAG SCIENTIFIC ASSEMBLY, 1997. Rio de Janeiro. **Proceedings** ...., 1998.

HAPGOOD, M. A. Space physics coordinate transformations: a user guide. Planet. **Planetary and Space Science**., v. 40, n. 5, p. 711-717, May, 1992.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática.** 2ª ed. São Paulo: Prentice Hall, 1999. 900 p.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M.; SANZ. J. Neural Network modelling of the ionospheric electron content at global scale using GPS data. **Radio Science**, v. 32, n. 3, p. 1081-1089, May/June, 1997.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M. et al. Application of ionospheric tomography to real-time GPS carrier-phase ambiguities resolution, at scales of 400-1000 km and with high geomagnetic activity. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n.13, p. 2009-2012, July, 2000.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M. et al. Second-order ionospheric term in GPS: implementation and impact on geodetic estimates. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, B08417, Aug., 2007.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M. et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. **Journal of Geodesy**, v. 83, n. 3-4, p. 263-275, Mar., 2009.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M. et al. The ionosphere: effects, GPS modeling and the benefits for space geodetic techniques. **Journal of Geodesy**, v. 85, n. 12, p. 887- 907, Dec., 2011.

HERRING, T. A. Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data. In: DeMUNKAND, J. C.; SPOELSTRA, T. A. **Symposium on refraction of transatmospheric signals in geodesy**, n. 36. Netherland Geodetic Commission Series. p. 157-164, 1992.

HERTZ, J.; KROGH, A.; PALMER, R. G. **Introduction to the theory of Neural Computation**. Lecture notes, vol I, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, 1991. 327 p.

HILLA, S. **The Extended Standard Product 3 Orbit Format (SP3-c)**, 2007.

HOCKE, K; SCHLEGEL, K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982-1995. **Annales Geophysicae**, v. 14, n. 9, p. 917-940, 1996.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo & more.** 1ª ed. New York: Springer Wien/New York, 2008. 516 p.

HOPFIELD, H. S. Two-quadratic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. **Journal of Geophysical Research**, v. 74, n. 18,p. 4487- 4499, Aug., 1969.

HOREMUZ, M.; ANDERSON, J. V. Polynomial interpolation of GPS satellite coordinates. **GPS Solutions**, v. 10, n. 1, p. 67-72, Jan., 2006.

HORNIK, K.; STINCHCOMBE, M.; WHITE, H. Multilayer feedforward networks are universal approximators. **Neural Networks**, v. 12, p. 359-366, 1989.

HU, G. R. et al. Development and assessment of GPS virtual reference stations for RTK positioning. **Journal of Geodesy**, v. 77, n. 5-6, p.292-302, Aug., 2003.

IAGA. **IAGA Bulletin n. 40**, 1991.

IBGE. **Análise dos Dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – 1996 a 2000**. Relatório Técnico, 2011. 81 p.

ICD-GPS-200C. **NAVSTAR GPS space segment/ Navigation user interfaces**, 2003. p. 164.

IGS. **IGS products**, 2012. Disponível em: <http://www.igs.org/components/prods.html>. Acesso em: 11 de maio de 2012.

INPE. **Previsão do atraso zenital troposférico utilizando modelo de previsão numérica do tempo**, 2011. Disponível em <http://satelite.cptec.inpe.br/zenital/previsao.jsp>. Acesso em 20 de jun. de 2011.

JANG, H., PARK, A., JUNG, K. Neural network implementation using CUDA and OpenMP. In: 2008 DIGITAL IMAGE COMPUTING: TECHNIQUES AND APPLICATIONS - DICTA 2008, 2008. **Proceedings**…, 2008. p. 155–161.

JENSEN, A. B. 0.; MITCHEL, C. GNSS and the ionosphere. What's in store for the next maximum. **GPS World**, v.22, n. 2, p. 40-48, Feb., 2011.

JOW,D, J; LEE, T, S.; TSENG, Y, W. ARMA neural networks for predicting DGPS pseudorange correction. **The journal of Navigation**, v. 57, n. 2, p. 275-286, May, 2004.

KANG, M. S. et al. Load profile synthesis and wind-power-generation prediction for an isolated power system. **IEEE Trans. Ind. Appl.**, v. 43, n. 6, p. 1459–1464, Nov., 2007.

KAVZOGLU, T.; SAKA, H. Modeling local GPS/leveling geoid undulations using artificial neural networks. **Journal of Geodesy**, v. 78, n. 9, p. 520-527, Apr., 2005.

KLOBUCHAR J, A. Ionospheric Effects on GPS. In Parkinson B. W. e Spilker Jr. J .J. Global Positioning System: Theory and Applications, Vol. I, **Cambridge American Institute of Aeronautics and Astronautics**, v. 163, p. 485 – 515, 1996.

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

KOUBA, J. **A guide to using international GNSS service (IGS) products**, 2009. 34 p. Disponível em: <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21.pdf> Acesso em: 18 de fev. 2011.

KOMJATHY, A. **Global ionospheric Total Electron Content mapping using Global Positioning System**. 1997. 248 p. Tese (Doutorado) – Department of Geodesy and Geomatics Engineering. University of New Brunswick, Frederiction, 1997.

KYOTO UNIVERSITY **World data center for geomagnetism**. Disponível em: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>. Acesso em: 15 de maio 2012.

LANDAU, H.; VOLLATH, U.; CHEN, X. Virtual Reference Station systems. **Journal of Global Positioning Systems**, v. 1, n. 2, p-137-143, 2002.

LANGLEY, R. B. RTK GPS. **GPS World**, v. 9, n. 9, p. 70-76, Sept., 1998a.

____. Propagation of the GPS signals. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. **GPS for Geodesy**. 2.ed.: Springer Verlag, 1998b. pp. 111-149.

LAURICHESSE, D.,et al. Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination. **NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation**, v. 56, n. 2, p. 135-149, 2009.

Le CUN, Y. **Eficient learning and second-order methods**. NIPS Tutorial, 1993.

LEANDRO, R. F.; SANTOS, M. C. A neural network approach for regional vertical electron content modeling. **Studia Geophysica et Geodaetica**, v. 51, n. 2, p. 279-292, Apr., 2007.

LEANDRO, R. F.; SILVA, C. A. U.; SEGANTINE, P. C. L.; SANTOS, M. C. Brainy positioning. **GPS World**, v. 18, n. 2, p. 60-65, Sept, 2007.

LEICK, A. **GPS satellite surveying**. 3ª ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. 435 p.

LIAO, X. **Carrier phase based ionosphere recovery over a regional area GPS network.** 2000. 120 p. Dissertação (Mestrado) – Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, 2000.

LIU, G. G. **Ionosphere tomographic modeling and applications using Global Positioning System (GPS) measurements.** 2004. 304 p. Tese (Doutorado) – Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, 2004.

LOPES, N.; RIBEIRO, B. GPU implementation of the multiple back-propagation algorithm. In: INTELLIGENT DATA ENGINEERING AND AUTOMATED LEARNING – IDEAL 2009. **Proceedings…**, 2009. p. 449-456.

LOEWE, C. A.; PRÖLSS, G. W. Classification and mean behavior of geomagnetic storms. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. A7, p, 14.209-14.213, July, 1997.

MAIA, T. C. B. **Utilização de redes neurais na determinação de modelo geoidais**. 2003. 130 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

MANCINI, D.; BRESCIA, M; SCHIPANI, P. Ground-based telescope pointing and tracking optimization using a neural controller. **Neural Networks**, v. 16, n. 2-3, p. 365-374, 2003.

MANNUCCI, A. J.; WILSON, B. D.; EDWARDS, C. D. A new method for monitoring the Earths's ionosphere total electron content using the GPS global network. In: ION GPS-93, 1993. Salt Lake City. **Proceedings…**, 1993.

MARINI, J. W. Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile. **Radio Science**, v. 7, n. 2, p. 223-231, 1972.

MARQUES, H. A. et al. Efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera no posicionamento GNSS no Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 7, n. 3, p. 357-374, Set., 2009.

MATSUOKA, M. T. **Avaliação de Funções para a Modelagem do Efeito da Refração Ionosférica na Propagação dos Sinais GPS.** 2003. 164p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2003.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S. Posicionamento por GPS na região brasileira durante a intensa tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003. **Revista Pesquisas em Geociências**, v. 35, n. 1, p. 3-19, Jan./Jun., 2008.

MAYAUD, P. N. **Derivation, meaning and use of geomagnetic indices**. Geophysical Monography Seires, n. 22, American Geophysical Union, Wahsington D.C., 1980.154 p.

MENDES, V. B.; LANGLEY, R. B. Tropospheric zenith delay prediction accuracy for airbone GPS high-precision positioning. In: ION GPS-98, 1998. Denver. **Proceedings…**, 1998. p. 337-347.

McCULLOCH, W. S; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **Bulletin of Mathematical Biophysics**, v. 5, p. 115-133, 1943.

MOLLER, M. F. A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning. **Neural Networks**, v. 6, p. 525-533, 1993.

MONTEBRUCK, O.; GILL, E.; KROES, R. Rapid orbit determination of LEO satellites using IGS clock and ephemeris products. **GPS Solutions**, v. 9, n. 3, p. 226-235, Sept., 2005.

MORETT NETTO, O. C. **Geração de Estações Virtuais de Referência**. 2008. 84 p. Dissertação (mestrado em engenharia cartográfica) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

MOSAVI, M. R. Comparing DGPS corrections prediction using neural network, fuzzy neural network and kalman filter. **GPS Solutions**, v. 10, n. 2, p. 97-107, May, 2006.

NASCIMENTO, C. F. et al. Harmonic identification using parallel neural networks in single-phase systems. **Applied Soft Computing**, v. 11, n. 2, Mar., 2010.

NETA, B. et al. Fast interpolation for global positioning system (GPS) satellite orbits. In: AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference. 1996. San Diego. **Proceedings…**, 1996.

NICOLELIS, M. A. L. **Muito além do nosso eu: a nova neurociência que une cérebros e máquinas – e como ela pode mudar nossas vidas**. 2ª reimpressão, São Paulo. Ed. Companhia das Letras, 2011. p 534.

NIELL, A. E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. B2, p. 3227-3246, 1996.

____. Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS. **Earth Planet Space**, v. 52, n. 10, p. 699-702, 2000.

____. Interaction of atmosphere modeling and VLBI analysis strategy. In: 4th IVS General meeting, 2006. Concepción. **Proceedings…**, 2006. p. 252-256.

NOAA. **Geomagnetic kp and ap index**. Disponível em: <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/geomag/kp_ap.html>, Acesso em: 27 de maio de 2011.

NOAA. **Sunspot number**. Disponível em: <http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/results?t=102827&s=5&d=8,430,9>, Acesso em: 15 de maio de 2012a.

NOAA. **National Geophysical Data Center**. Disponível em: <http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=102827&s=4&d=8,22,9>, Acesso em: 10 de maio de 2012b.

NRCAN. **Space Weather Canada – About solar flux data**. Disponível em:<http://www.spaceweather.ca/sx-3-eng.php>, Acesso em: 30 de maio de 2012.

ODIJK, D. **Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delay**. 2002, 242 p. Tese (Doutorado) - Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, 2002.

PATTERSON, D. W. **Artificial neural networks**: **theory and applications**. Singapore: Prentice Hall, 1995. 477 p.

PETIT, G.; LUZUM, B. **IERS Conventions (2010)**: IERS Technical Note N° 36, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.

PIREAUX, S. et al. Higher-order ionospheric effects in GPS time and frequency transfer. **GPS Solutions**, v 14, n.3., p. 267-277, June, 2010.

POPPE, B. B. New scales help public, technicians understand space weather. **Eos, Transactions, American Geophycal Union**, v. 81, n. 29, p 322-328, July, 2000. Disponível em <http://www.swpc.noaa.gov/NOAAscales/EosNewScales.html>. Acesso em 29 de abr. 2011.

PRESS, W. et al. **Numerical recipes in fortran 77**: the art of scientific computing (Vol. 1 of Fortran Numerical Recipes). 2ª ed., 2001. 933 p.

RAMOS, A. M. **Aplicação, investigação e análise da metodologia de reduções batimétricas através do método diferencial GPS preciso**. 2007, 221 p. Dissertação (Mestrado) - Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

RAQUET, J. **Development of a method for kinematic GPS carrier-phase ambiguity resolution using multiple reference receivers**. 1998. 259p. Tese (Doutorado) – Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, 1998.

RETSCHER, G. Accuracy performance of virtual reference station (VRS) networks. **Journal of Global Positioning Systems**, v. 1 n. 1, p. 40-47, 2002.

RIEDMILLER, M.; BRAUN, H. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: the RPROP algorithm. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS (ICNN), 1993. Piscataway. **Proceedings…**, 1993. p. 586-591.

ROTHACHER, M; SCHMID, R. **ANTEX: The Antenna Exchange Format, Version 1.4**, 2010. Disponível em: <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/antex14.txt>. Acesso em 23 de jan. 2012.

RTCM. **Documents Developed by RTCM Special Committee 104 on Global Navigation Satellite Systems (GNSS) Service**, 2012. Disponível em: <https://ssl29.pair.com/dmarkle/puborder.php?show=5>. Acesso em 09 de maio de 2012.

RUMELHART, D. E.; HINTON, E.; WILLIAMS, R. J. Learning representations by back-propagating errors. **Nature**,v. 323, n. 9, p. 533-536, Oct, 1986.

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

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G. Avaliação dos modelos de Hopfield e de Saastamoinen para a modelagem do atraso zenital troposférico em território brasileiro utilizando GPS. In: MITISHITA, E. A.; FREITAS, S. R. C.; DALMOLIN, Q. **Séries em Ciências Geodésicas.** 1 ed. Curitiba: Editora UFPR, 2001. p. 47-61.

SAPUCCI, L. F.; MACHADO, L. A. T.; MONICO, J. F. G. Previsões do atraso zenital troposférico para a América do Sul: variabilidade sazonal e avaliação da qualidade. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 58/03, dez., 2006.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; MACHADO, L. A. T.; ROSA, G. P. S. Avaliação das previsões do atraso zenital troposférico para a América do Sul, obtidas usando modelo de previsão numérica do tempo com alta resolução espacial. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 14, n. 4, p. 591-605, out./dez. 2008.

SÁRDON, E.; RIUS, A.; ZARRAOA, N. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from

Global Positioning System observations. **Radio Science**, v. 29, n. 3, p. 577-586, May/June, 1994.

SCHAER, S.; GURTNER, W.; FELTENS, J. IONEX: The Ionosphere Map Exchange Format Version 1. In: IGS AC WORKSHOP, 1998, Darmstadt. **Proceedings…**, 1998.

SCHAER, S. **Mapping and predicting Earth's ionosphere using the Global Positioning System**. 1999, 205 p. Tese (Doutorado) – Naturwissenschaftçichen Fakultät. Universität Bern, Berna, 1999.

SCHAER, S.; STEIGENBERGER, P. Determination and use of GPS Differential Code Bias values. **IGS workshop 2006**, Darmstadt, 2006.

SCHENEWERK, M. A brief review of basic GPS orbit interpolation strategies. **GPS Solutions**, v. 6, n.4, p. 265-267, Mar., 2003.

SCHUH, H. et al. Prediction of Earth orientation parameters by artificial neural networks. **Journal of Geodesy**, v. 76, n. 5, p. 247-258, May, 2002.

SCHUELER, T.; HEIN, G. W.; EISSFELLER, B. Improved tropospheric delay modeling using an integrated approach of numerical weather models and GPS. In: ION GPS 2000, 2000. Salt Lake City. **Proceedings**…, 2000. p. 600-615.

SCHÜLER, T. **On ground-based GPS tropospheric delay estimation.** 2001. 364 p. Tese (Doutorado) – Fakultät für Bauingenieur, Universität der Bundeswehr München, Munique, 2001.

SEEBER, G. **Satellite geodesy**. 2ª ed. Berlim: de Gruyter, 2003. p. 589.

SEIDEL, P.; SEIDEL, A.; HERBARTH, O. Multilayer perceptron tumour diagnosis based on chromatography analysis of urinary nucleosides. **Neural Networks**, v. 20, n. 5, p. 646–651, 2007.

SEJAS, M. I.; KRUEGER, C. P.; HECK, B.; SEITZ, K. Análise da Qualidade de um Posicionamento Empregando Estações de Referência Virtuais. **In: Série em Ciências Geodésicas**. 2003. v.3. p.40-53.

SKONE, S. **Wide area ionosphere grid modeling in the auroral region**. 1998. 198 p. Tese (Doutorado) - Department of Geomatics Engineering. University of Calgary, Calgary, 1998.

SPOFFORD, P. R.; REMONDI, B. W. **The national geodetic survey standard GPS format SP3**, 1994.

STEINKRAU, D.; SIMARD, P.Y.; BUCK, I. Using GPUs for machine learning algorithms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DOCUMENT ANALYSIS AND RECOGNITION - ICDAR 2005, 8:, 2005. Seoul. **Proceedings…**, IEEE Comp. Society, v. 2, 2005. 1115–1119 p.

STONE, M. Cross-validation: a review. **Statistics**, v. 9, n. 1, p.- 127-139, 1978.

SPILKER Jr., J. J. Tropospheric effects on GPS. In Parkinson B. W. e Spilker Jr. J .J. Global Positioning System: Theory and Applications, Volume 1, **Cambridge American Institute of Aeronautics and Astronautics**, v. 163, p. 517 – 546, 1996.

SURATGAR, A. A.; TAVAKOLI, M. B. e HOSEINABADI, A. Modified Levenberg-Marquardt method for neural networks training. **Word Academy of Science Engineering, and Technology**, v. 6, 2005.

TALLAM, R. M.; HABETLER, T. G.; HARLEY, R. G. Stator winding turn-fault detection for closed-loop induction motor drives. **IEEE Trans. Ind. Appl.**, v. 39, n. 3, p. 720–724, May, 2003.

TULUNAY, E. et al. Forecasting total electron content maps by neural network technique, **Radio Science**, v. 41, RS4016, 2006.

van der MAREL, H. Virtual GPS Reference Stations in the Netherlands. In: ION GPS-98, 1998. Nashville. **Proceedings… ,**1998. p. 49-58.

VOLLATH, U. et al. Multi-base RTK positioning using virtual reference stations.In: ION-GPS 2000, 2000. Salt Lake City. **Proceedings…**, 2000. p. 121-131.

von BIEL, H. A. The geomagnetic time and position of a terrestrial station. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 52, n. 9, p. 687 - 694, Sept., 1990.

WANG, et al. Monitoring global traveling ionospheric disturbances using the worldwide GPS network during the October 2003 storms. **Earth Planets Space**, v. 59, n. 5, p. 407–419, 2007

WANNINGER, L. Improved ambiguity resolution by regional differential modelling of the ionosphere. In: ION GPS-95, 1995. Palm Springs. **Proceedings** …., 1995.

____. Real-time differential GPS error modeling in regional reference station networks. In: IAG SCIENTIFC ASSEMBLY, 1997. Rio de Janeiro. **Proceedings**…, 1997. 86-92 p.

____. The performance of virtual reference stations in active geodetic GPS-networks under solar maximum conditions. In: ION GPS-99, 1999. Nashville. **Proceedings**…, 1999. p. 1419-1427.

____. Virtual Reference Stations for Centimeter-Level Kinematic Positioning. In: ION GPS-02, 2002. Portland. **Proceedings**…, 2002. p. 1400-1407.

____. **Introduction to Network RTK**. IAG Sub-comission 4.5: Next Generation RTK, Working Group 4.5.1: Network RTK, 2006 Disponível em: <http://www.wasoft.de/e/iagwg451/intro/introduction.html>. Acesso em 04 de maio de 2011.

WEBER, G.; DETTMERING, D.; GEBHARD, H. E KALAFUS, R. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip). – IP-Streaming for Real-Time GNSS Applications In: ION GNSS 2005. Long Beach. **Proceedings …** 2005. p 2243-2247.

WEI, E.; CHAI, H.; AN, Z. On the generation algorithm of VRS virtual observations. **Geo-spatial Information Science**. v. 10, n. 2, p. 91-95, June, 2007.

WILAMOWSKI, B. M. et al. An algorithm for fast convergence in training neural networks. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS. **Proceedings…**, 2001. p. 1778-1782.

WILAMOWSKI, B. M.; YU, H. Improved computation for Levenberg Marquardt training. **IEEE Transactions on Neural Networks**, v. 21, n. 6, p. 930-937, June, 2010a.

____. Neural network learning without backpropagation. **IEEE Transactions on Neural Networks**, v. 21, n. 11, pp-1793-1803, Nov., 2010b.

WILLGALIS, S., SEEBER, G., KRUEGER, C., ROMAO, V. A Real Time GPS Reference Network for Recife, Brazil,Enabling Precise and Reliable Cadastral Surveys, IN: FIG INTERNATIONAL CONGRESS, 22: 2002, Washington, D.C., **Proceedings….**, 2002.

WÜBBENA, G. et al. Reducing distance dependent errors for real-time precise DGPS applications by establishing reference station networks. In: ION GPS-96, 1996. Missouri. **Proceedings…**, 1996. p. 1845-1852.

YUNCK, T. P. Orbit determination. In Parkinson B. W. e Spilker Jr. J .J. Global Positioning System: Theory and Applications, Volume 2, **Cambridge American Institute of Aeronautics and Astronautics**, v. 164, p. 559 – 592, 1996.

ZANETTI, F. S. **O uso de redes neurais artificiais como ferramenta para auxiliar na determinação da vida útil de pavimentos flexíveis**. 2008. 106 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

ZELL, A. et al. **SNNS - Stuttgart Neural Network Simulator**. **User Manual – Version 4.2**. University of Stuttgart, Institute for Parallel and Distributed High Performance Systems, 1998, Disponível em: http://www.ra.cs.uni-tuebingen.de/downloads/SNNS/SNNSv4.2.Manual.pdf. Acesso em 21 de mar. de 2011.

ZHANG, K. et al. The Latest Development of a state-wide GNSS network-based RTK system in Australia. In: ION GNSS-2007, 2007. Fort Worth. **Proceedings …**, 2007

APÊNDICE A - Diferença de deslocamento no posicionamento relativo

Neste apêndice, os deslocamentos dos pontos de controle calculados em função das estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 5° são comparados com os deslocamentos obtidos com máscaras de elevação de 10°, 15° e 20°. As comparações são realizadas aplicando-se as modelagens DG, Trop, RNA_{Mod}, Trop+RNA_{Mod}, RNA_{GIM} e Trop+RNA_{GIM}.

A.1 – DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO

A figura A.1 mostra a diferença de deslocamento entre a solução utilizando-se máscara de elevação de 5° com os deslocamentos obtidos empregando as demais máscaras de elevação e aplicando-se a solução DG. A diferença média da resultante tridimensional dos deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 5° com relação aos deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 10°, 15° e 20° é de -1,6 cm, -2,1 cm e -5,9 cm, com RMS de 5,3 cm, 6,6 cm e 20,5 cm, respectivamente. Como era de se esperar a menor diferença ocorreu quando se utilizou máscara de elevação de 10° enquanto que a maior ocorreu quando a comparação foi realizada com relação à solução que empregou máscara de elevação de 20°. Além disso, verifica-se que a eliminação de observação provocada pela máscara de elevação afeta mais algumas estações que outras, sendo o caso da solução obtida na linha de base 4, quando se adotou máscara de elevação de 20°.

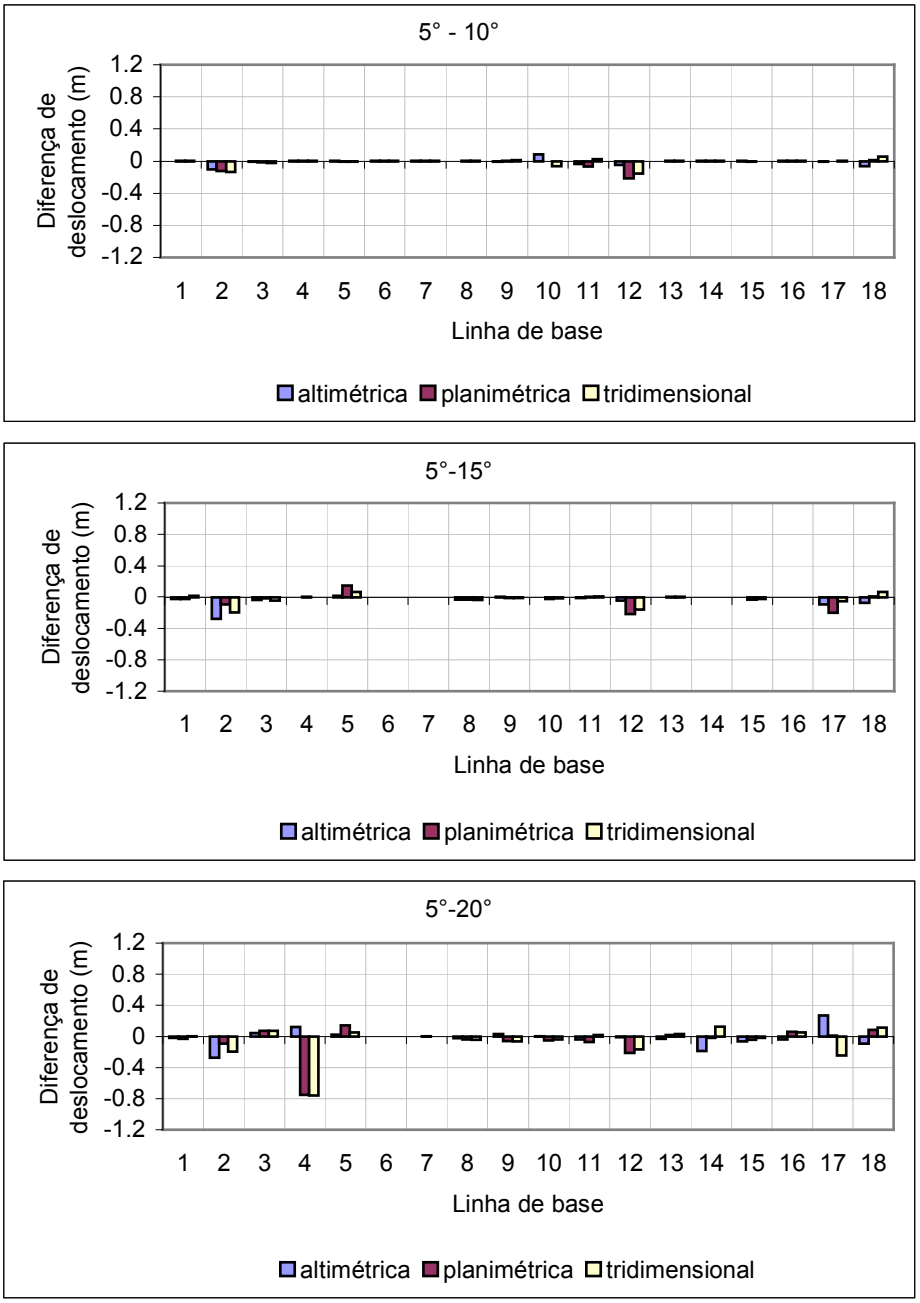

Figura A. 1 – Diferença de deslocamento das estações de controle calculadas utilizando-se máscara de elevação de 5° com os delocamentos obtidas empregando máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (DG)

A.2 – DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA (Trop)

As diferenças de deslocamento entre a solução obtida com máscara de elevação de 5° e as soluções obtidas utilizando máscaras de elevação de 10°, 15° e 20° quando se emprega a modelagem Trop são apresentadas na figura A.2.

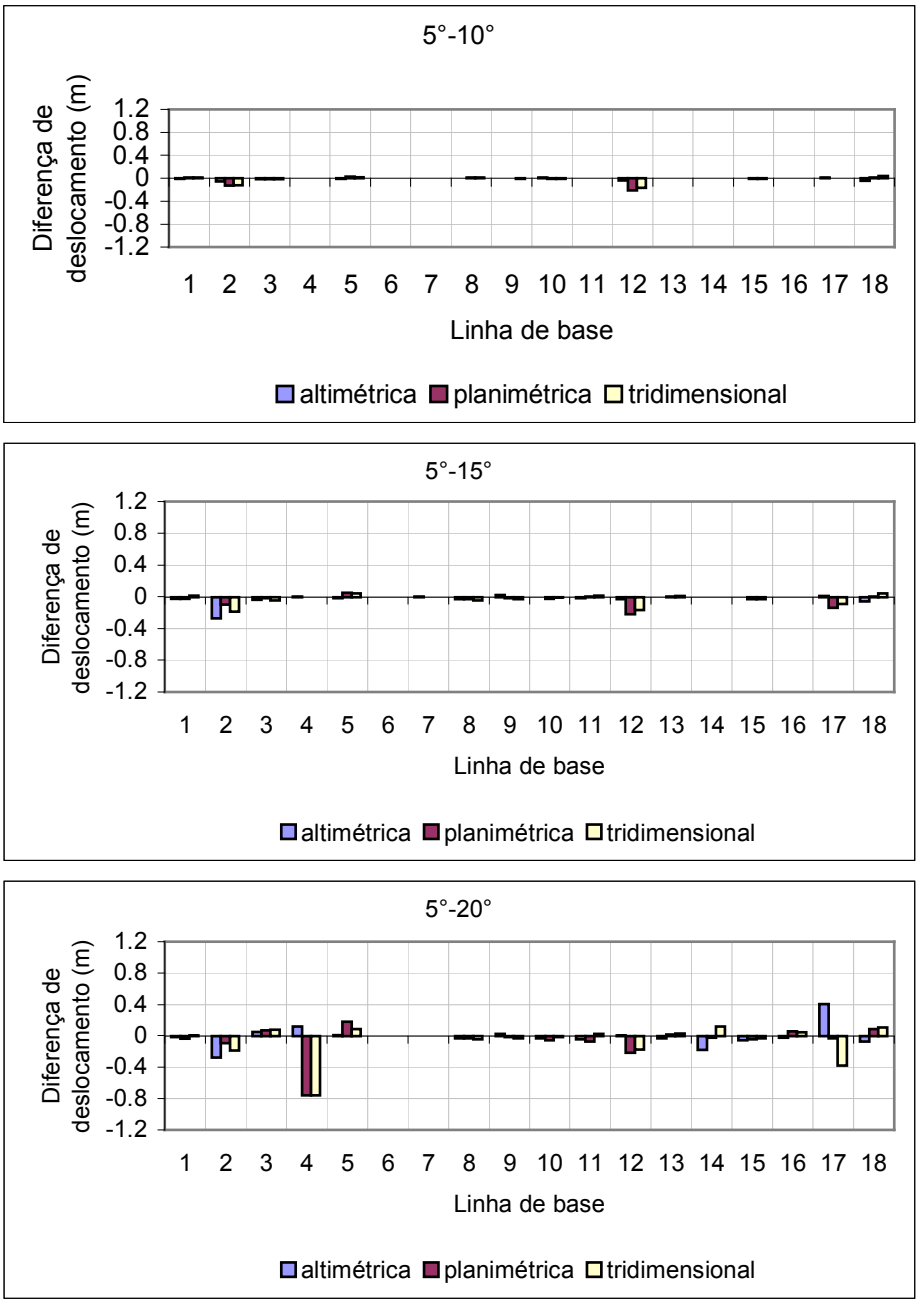

Figura A. 2 – Diferença de deslocamento das estações de controle calculadas utilizando-se máscara de elevação de 5° com os delocamentos obtidas empregando máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop)

Observa-se mais uma vez que as diferenças de deslocamento tendem a aumentar conforme a máscara de elevação aumenta. As diferenças tridimensionais médias entre a solução que utilizou máscara de elevação de 5° e as soluções utilizando máscaras de elevação de 10°, 15° e 20° são, respectivamente, -1,4 cm, -2,6 cm e -6,2 cm, com RMS de 5,0 cm, 6,7 cm e 21,5 cm. Nota-se, também, que as diferenças são muito semelhantes às obtidas com a solução DG.

A.3 – DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DOS EFEITOS DA IONOSFERA (RNA_{Mod})

As diferenças entre os deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 5° e os deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 10°, 15°, 20°, aplicando a modelagem RNA_{Mod}, são apresentadas na figura A.3.

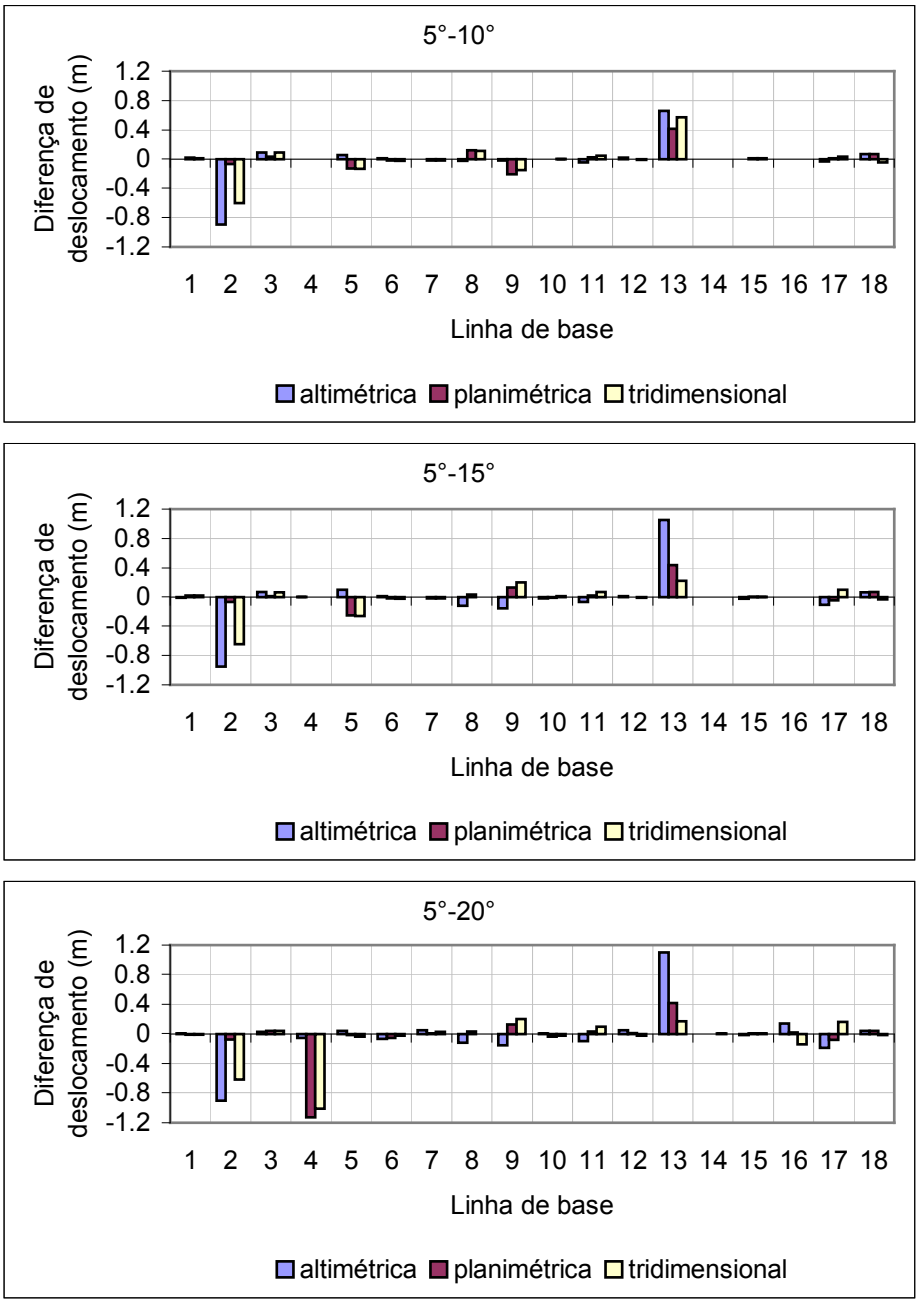

Figura A.3 – Diferença de deslocamento das estações de controle calculadas utilizando-se máscara de elevação de 5° com os delocamentos obtidas empregando máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (RNA_{Mod})

Observa-se que as menores diferenças ocorreram quando os deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 5° foram comparados com os deslocamentos nos quais a máscara de elevação de 10° foi adotada, enquanto que as maiores diferenças ocorrem quando se utilizou máscara de elevação de 20°. As diferenças tridimensionais médias para as diferenças de deslocamento em 10°, 15° e 20° são de -0,6 cm, -1,7 cm e -7,7 cm, com RMS de 20,5 cm, 18,1 cm e 29,1 cm, respectivamente. Comparando as diferenças de deslocamento determinadas com a modelagem RNA_{Mod} com as diferenças de deslocamento obtidas com as modelagens DG e Trop, observa-se que a primeira apresenta maior variação com relação à média, o que é ocasionado pelo aumento na magnitude das diferenças relacionadas com as linhas de base 2, 4 e 13.

A.4 - DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO, MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA E DA IONOSFERA (Trop+RNA_{Mod})

A figura A.4 contem as diferenças dos deslocamentos altimétricos, planimétricos e tridimensionais dos pontos de controle determinados com máscara de elevação de 5° e os deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 10°, 15° e 20° adotando a solução Trop+RNA_{Mod}.

Verifica-se que as diferenças são menores quando os deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 5° são comparados com os deslocamentos calculados com máscara de elevação de 10°, enquanto que as maiores diferenças são obtidas na comparação dos deslocamentos determinados com máscara de elevação 20°. As diferenças médias dos deslocamentos tridimensionais são, respectivamente, de 0,6 cm, -2,3 cm e -7,1 cm, com RMS de 20,5 cm, 17,8 cm e 28,9 cm, para as soluções que adotaram máscaras de elevação de 10°, 15° e 20°. Salienta-se que as diferenças de deslocamento obtidas com a solução Trop+RNA_{Mod} são bem próximas das calculadas com a solução RNA_{Mod}, mostrando que a modelagem da atmosfera neutra influenciou pouco a solução.

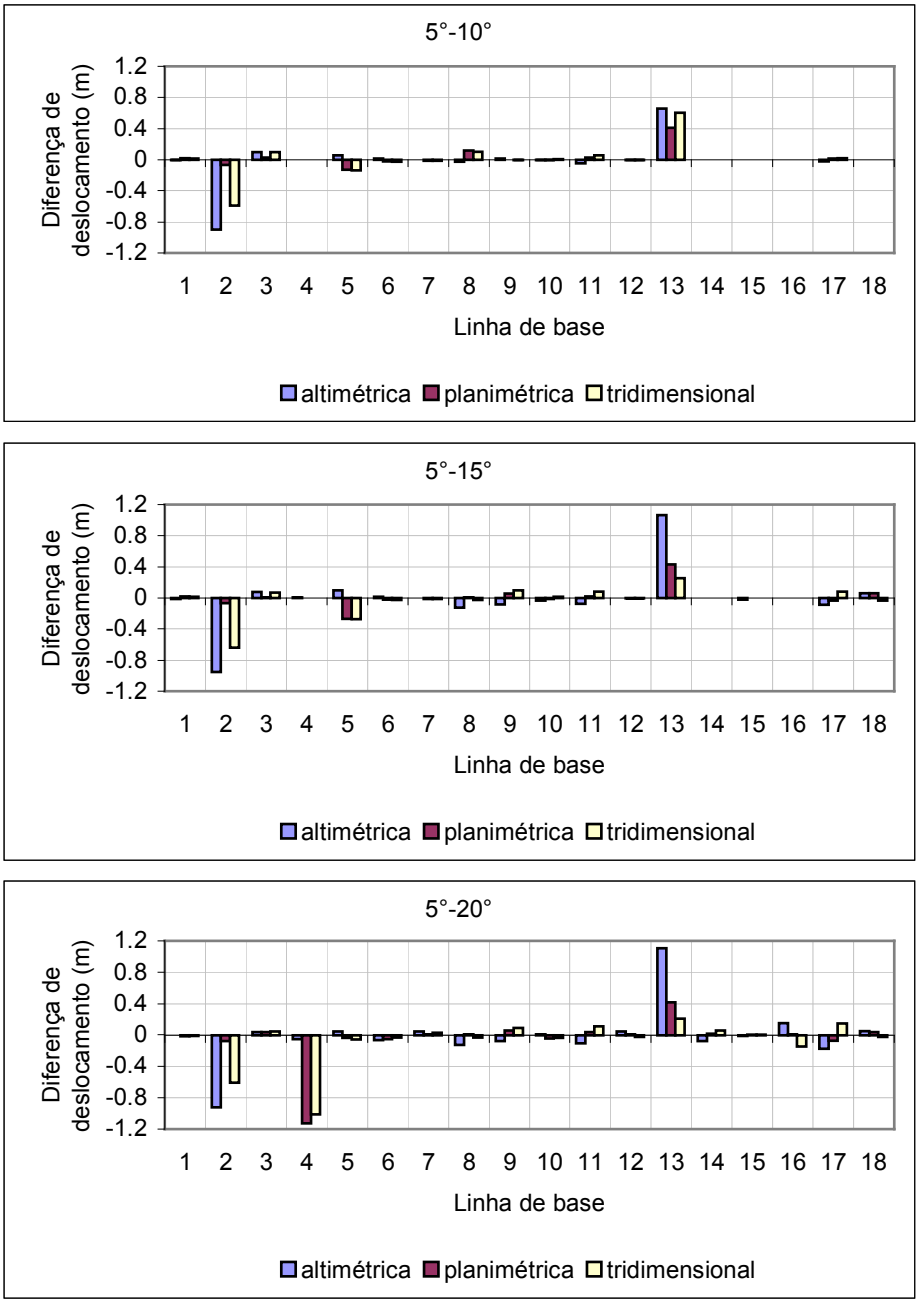

Figura A.4 – Diferença de deslocamento das estações de controle calculadas utilizando-se máscara de elevação de 5° com os delocamentos obtidas empregando máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop+RNA_{Mod})

A.5 – DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DA IONOSFERA (RNA_{GIM})

A figura A.5 mostra as diferenças entre os deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 5° e os deslocamentos calculados com máscara de elevação de 10°,15° e 20°, utilizando a solução RNA_{GIM}.

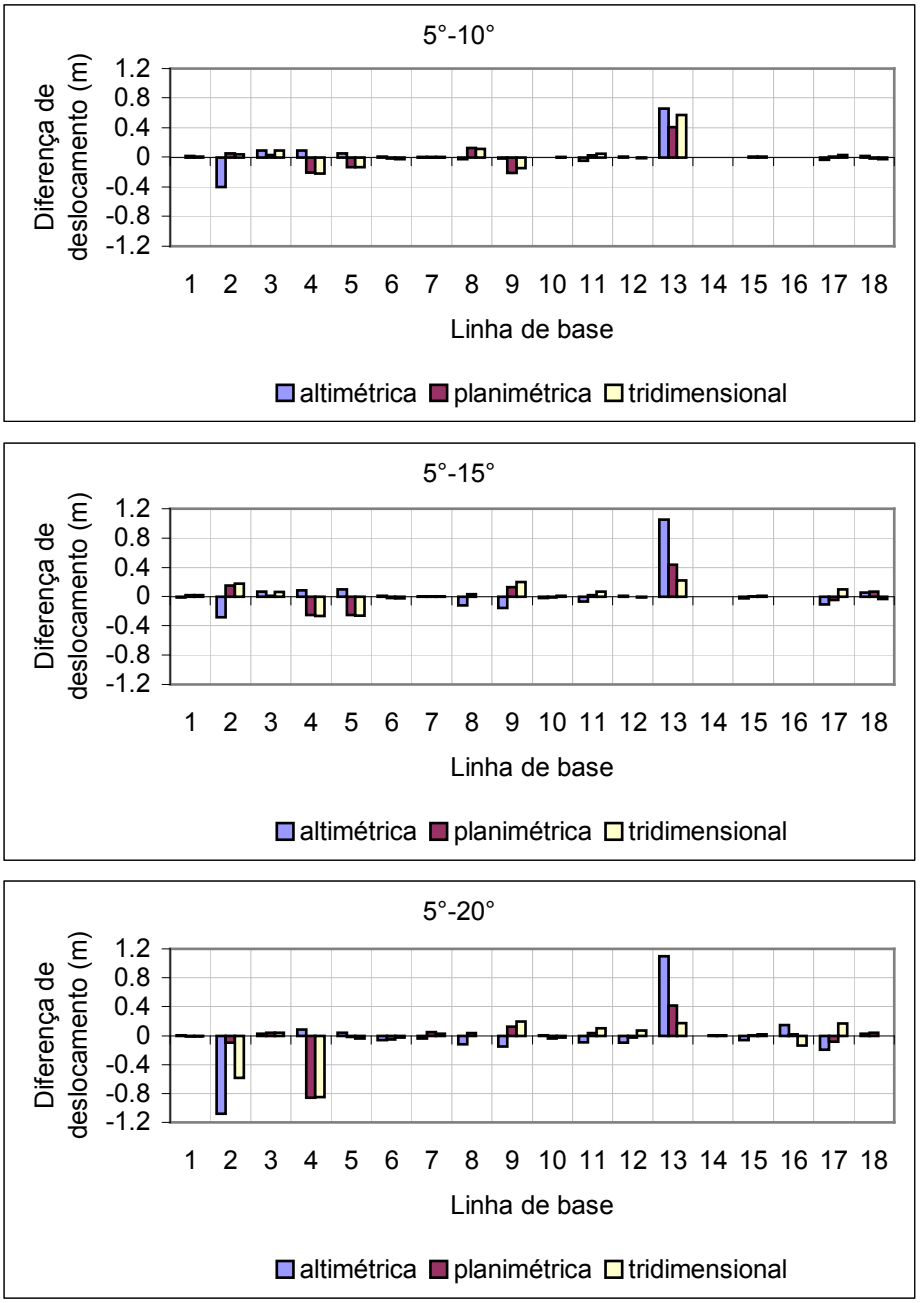

Figura A.5 – Diferença de deslocamento das estações de controle calculadas utilizando-se máscara de elevação de 5° com os delocamentos obtidas empregando máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (RNA_{GIM})

Observa-se que as maiores diferenças ocorreram quando a comparação foi realizada com relação aos deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 20°. As diferenças médias da componente tridimensional para as soluções que adotaram máscaras de elevação de 10°, 15° e 20° são de 2 cm, 1,5 cm e -4,9 cm, com RMS de 15,7 cm, 12,4 cm e 25,9 cm, respectivamente. Verifica-se que as diferenças determinadas com a modelagem RNA_{GIM} são semelhantes às obtidas com a solução RNA_{Mod}.

A.6 - DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO, MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA E DA IONOSFERA (Trop+RNA$_{GIM}$)

As diferenças entre os deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 5° e os deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 10°, 15° e 20°, aplicando-se a modelagem Trop+RNA$_{GIM}$, são mostradas na figura A.6.

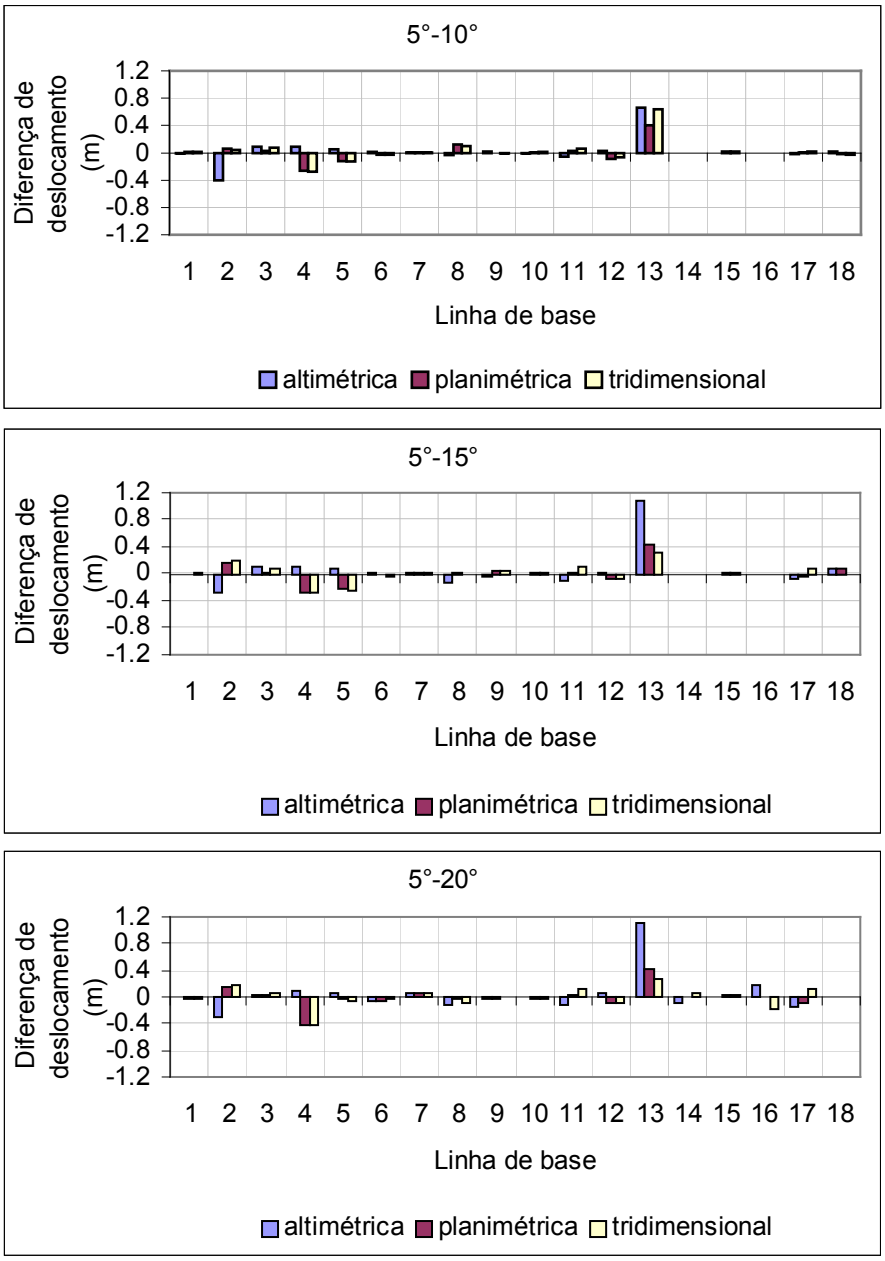

Figura A.6 – Diferença de deslocamento das estações de controle calculadas utilizando-se máscara de elevação de 5° com os delocamentos obtidas empregando máscara de elevação de 5°, 10°, 15° e 20° (Trop+RNA$_{GIM}$)

Comparando com a solução RNA_{GIM}, observa-se que a diferença de deslocamento referente à linha de base 2 diminui de 59 cm para 18 cm e da linha de base 4 é reduzida de 85 cm para 43 cm. As diferenças médias dos deslocamentos tridimensionais são, respectivamente, 2,5 cm, 0,8 cm e -0,1 cm, com RMS de 17,2 cm, 12,9 cm e 14,6 cm, para as soluções que adotaram máscaras de elevação de 10°, 15° e 20°.

A.7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Salienta-se que, de modo geral, as soluções onde se utilizou máscara de elevação de 10° apresentaram menores diferenças de deslocamento com relação às soluções determinadas com máscara de elevação de 5°. Além disso, ressalta-se que as maiores diferenças estão relacionadas com a componente altimétrica, na maioria dos casos. Nota-se, ainda, que na maioria dos casos as diferenças de deslocamento são menores que 10 cm.

APÊNDICE B - Diferença de deslocamento no PPP

Este apêndice traz uma comparação entre os deslocamentos obtidos com as estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 15° e os deslocamentos obtidos empregando máscaras de elevação de 5°, 10° e 20° para as modelagens DG, Trop, RNA_{Mod}, Trop+RNA_{Mod}, RNA_{GIM} e Trop+RNA_{GIM}. Destaca-se que o serviço de PPP do IBGE foi utilizado no processamento dos dados GNSS.

B.1 - DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO

A figura B.1 mostra a diferença de deslocamento entre as coordenadas das estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 15° e as coordenadas obtidas utilizando as demais máscaras de elevação aplicando-se a solução DG. A diferença média da resultante tridimensional dos deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 15° com relação aos deslocamentos calculados com máscara de elevação de 5°, 10° e 20° é de 1,0 cm, 0,3 cm e -8,7 cm, com RMS de 16 cm, 16,7 cm e 17,0 cm, respectivamente. Verifica-se que as menores diferenças ocorreram quando se utilizou máscara de elevação de 20°, enquanto que as maiores diferenças ocorreram quando a comparação foi realizada com relação à solução que empregou máscara de elevação de 10°. Além disso, verifica-se que as maiores diferenças são, predominantemente, associadas à componente altimétrica.

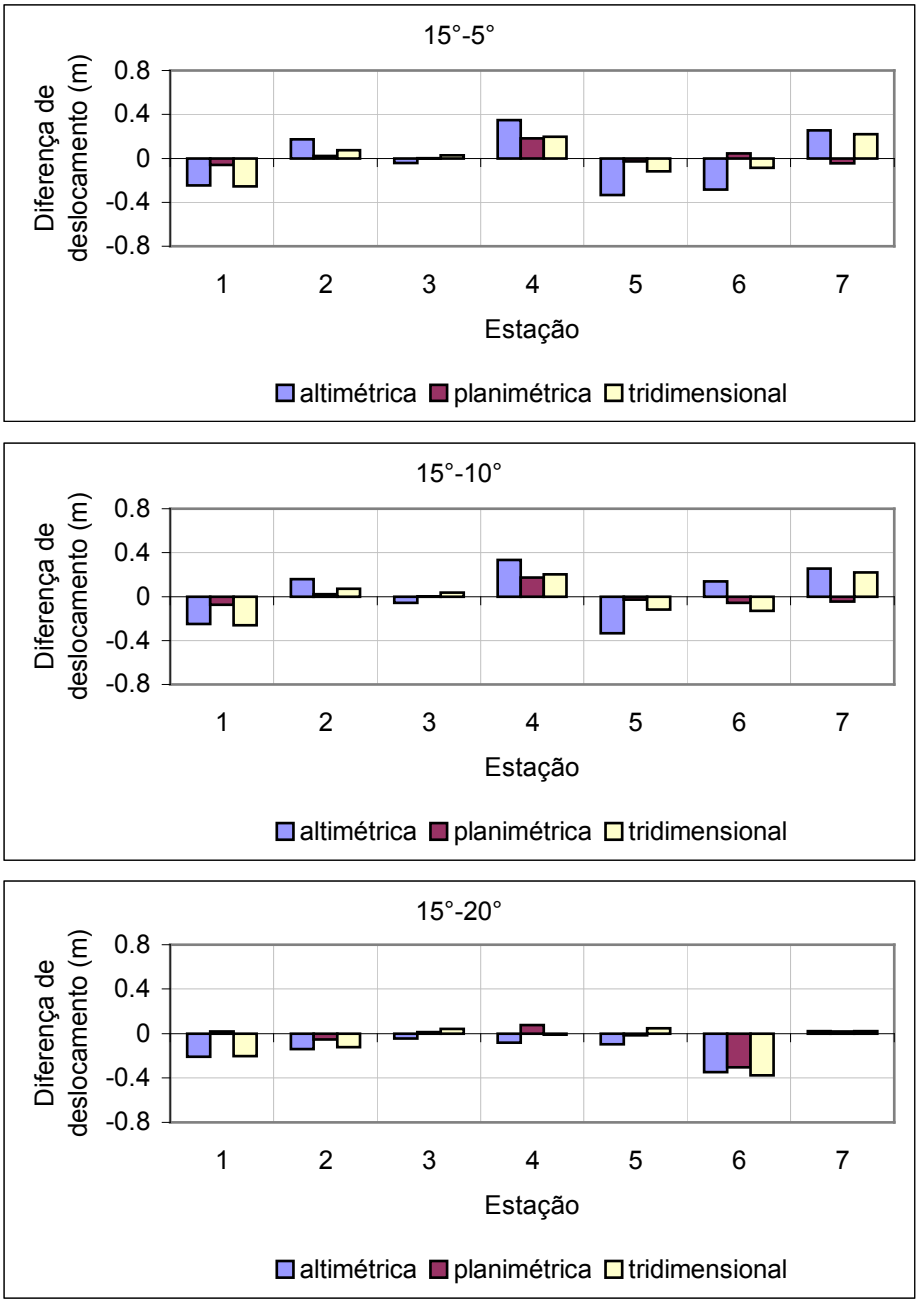

Figura B.1 – Diferença de deslocamento das estações de referência virtuais calculadas utilizando-se máscara de elevação de 15° com os deslocamentos obtidos empregando máscara de elevação de 5°, 10° e 20° (DG)

B.2 – DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA (Trop)

As diferenças entre os deslocamentos das estações de referência virtuais calculadas com máscara de elevação de 15° e os deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 5°, 10° e 20° aplicando-se a modelagem Trop são mostradas na figura B.2.

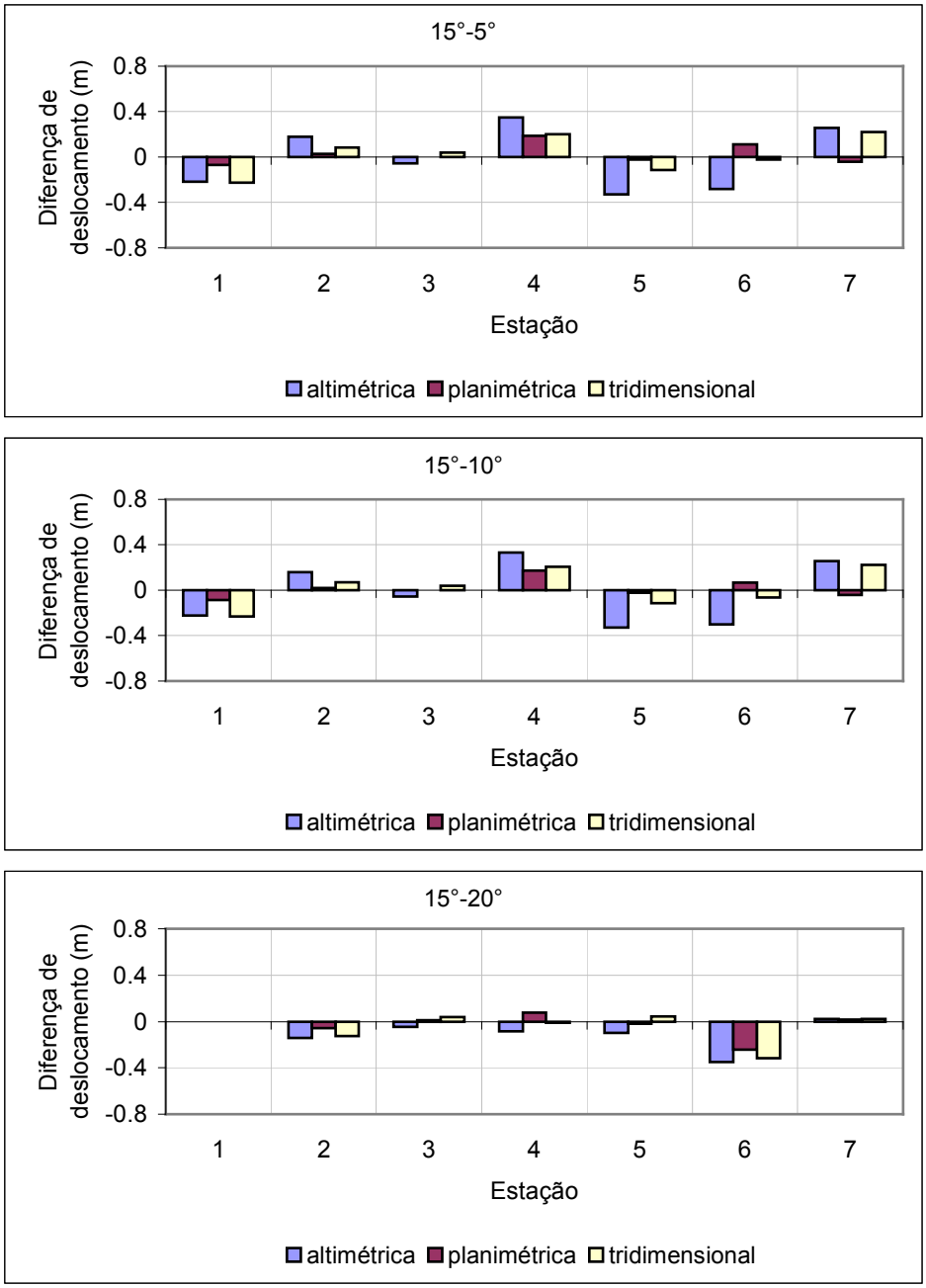

Figura B.2 – Diferença de deslocamento das estações de referência virtuais calculadas utilizando-se máscara de elevação de 15° com os deslocamentos obtidos empregando máscara de elevação de 5°, 10° e 20° (Trop)

As diferenças médias da resultante tridimensional é de 2,4 cm, 1,7 cm e -4,9 cm, com RMS de 15,2 cm, 15,6 cm e 13 cm, para as soluções que empregaram 5°, 10° e 15°, respectivamente. Observa-se, mais uma vez que as menores diferenças ocorreram quando se comparam os deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 15° com os deslocamentos determinados com máscara de elevação de 20°.

B.3 – DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DOS EFEITOS DA IONOSFERA (RNA_{Mod})

A figura B.3 traz as diferenças entre os deslocamentos obtidos com as estações de referência virtuais calculadas com máscara de elevação de 15° com os deslocamentos calculados com máscara de elevação de 5°, 10° e 20°, utilizando a solução RNA_{Mod}.

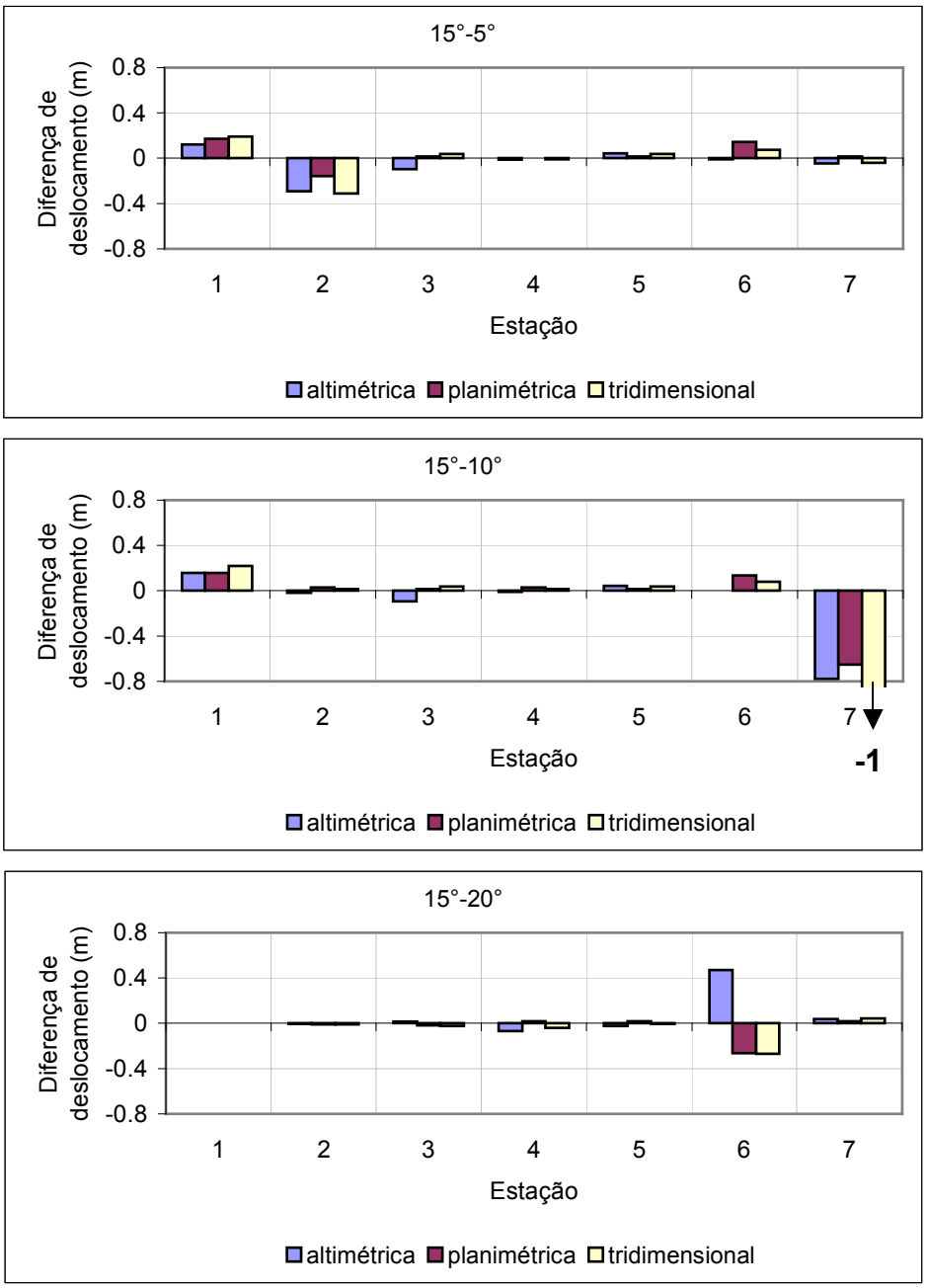

Figura B.3 – Diferença de deslocamento das estações de referência virtuais calculadas utilizando-se máscara de elevação de 15° com os deslocamentos obtidos empregando máscara de elevação de 5°, 10° e 20° (RNA_{Mod})

Verifica-se que, fora a estação 6, as diferenças dos deslocamentos obtidos com máscaras de elevação de 15° e 20° são menores que 5 cm. As diferenças médias dos deslocamentos tridimensionais são de -0,3 cm, -8,6 cm e -4,5 cm, com RMS de 14,2 cm, 38,9 cm e 10,6 cm, respectivamente para a solução que empregou máscara de elevação de 5°, 10° e 20°.

B.4 – DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO, MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA E DA IONOSFERA (Trop+RNA_{Mod})

As diferenças entre os deslocamentos das estações de referência virtuais obtidas com máscara de elevação de 15° e os deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 5°, 10° e 20°, aplicando-se a modelagem Trop+RNA_{Mod}, são apresentadas na figura B.4.

Verifica-se que as diferenças de deslocamento obtidas quando se aplicou a solução RNA_{Mod} são muito parecidas com as determinadas com a solução Trop+RNA_{Mod}. Neste último caso, as diferenças médias da resultante tridimensional com máscara de elevação de 5°, 10° e 20° são, respectivamente, de -0,8 cm, -6,3 cm e -4,6 cm, com RMS de 13,7 cm, 31,0 cm e 10,5 cm.

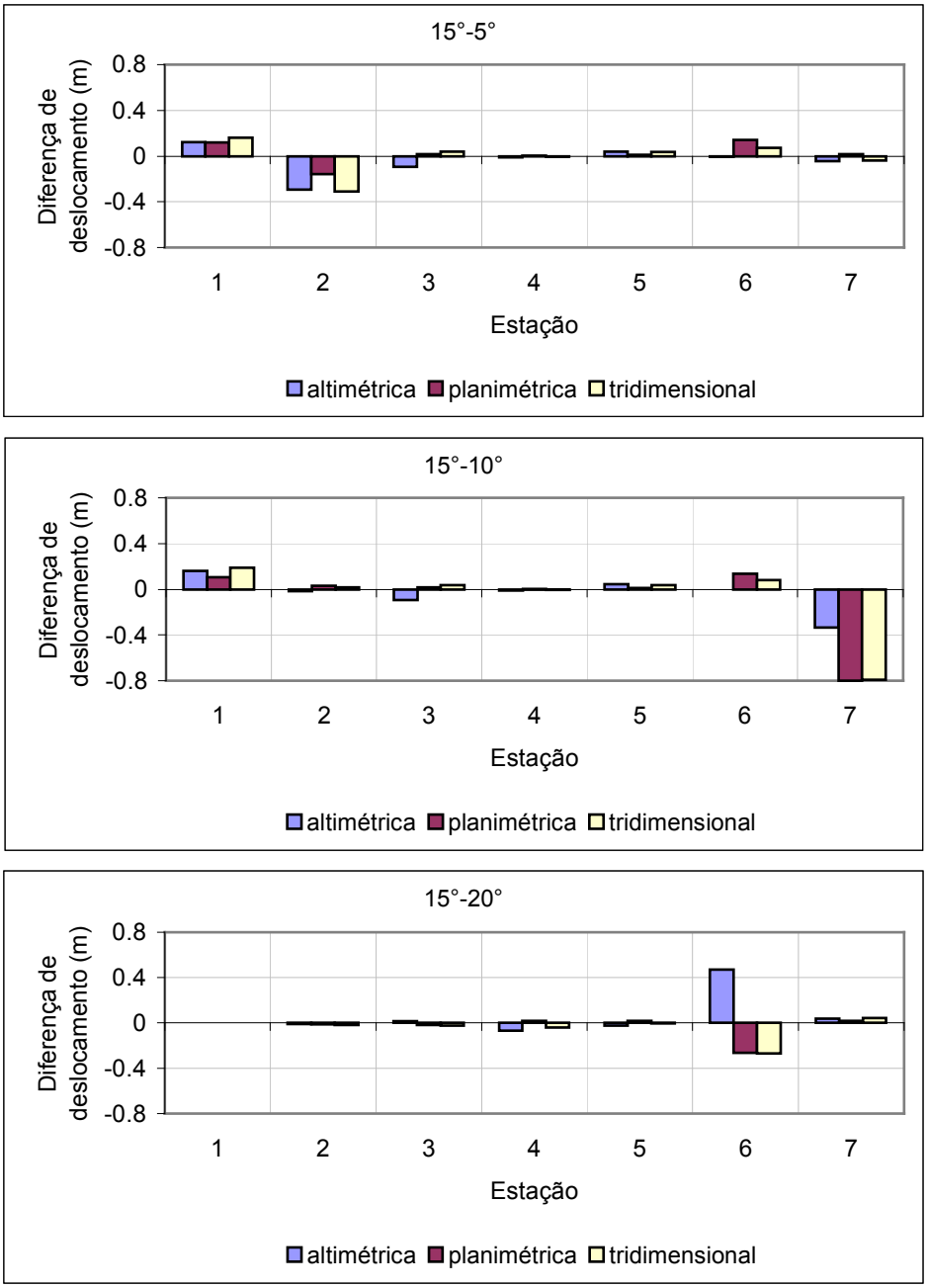

Figura B.4 – Diferença de deslocamento das estações de referência virtuais calculadas utilizando-se máscara de elevação de 15° com os deslocamentos obtidos empregando máscara de elevação de 5°, 10° e 20° (Trop+RNA_{Mod})

B.5 DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM DA IONOSFERA (RNA_{GIM})

A figura B.5 mostra as diferenças entre os deslocamentos calculados com as estações de referência virtuais geradas com máscara de elevação de 15° com os deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 5°, 10° e 20°, quando a solução RNA_{GIM} foi utilizada.

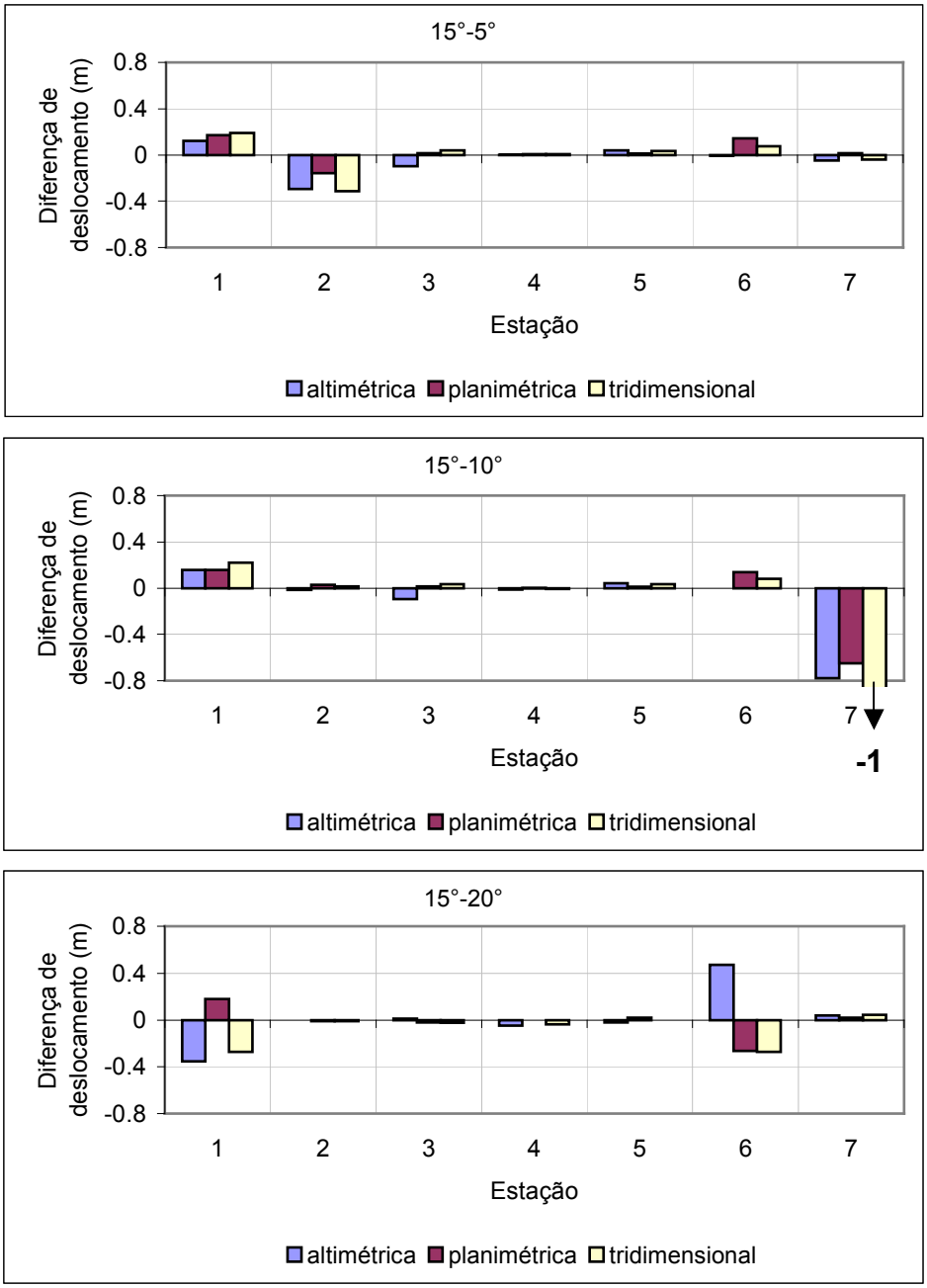

Figura B.5 – Diferença de deslocamento das estações de referência virtuais calculadas utilizando-se máscara de elevação de 15° com os deslocamentos obtidos empregando máscara de elevação de 5°, 10° e 20° (RNA_{GIM})

Comparando as diferenças de deslocamento obtidas com as soluções RNA_{Mod} e Trop+RNA_{Mod} com a solução RNA_{GIM}, verifica-se que quando se aplica máscara de elevação de 20° a estação 1 apresenta diferenças maiores, chegando a aproximadamente 35 cm na componente altimétrica, no último caso. As diferenças de deslocamento médias da resultante tridimensional são de -0,1 cm, -8,9 cm e -8,2 cm, com RMS de 14,2 cm, 38,9 cm e 14,8 cm, para as soluções que empregaram 5°, 10° e 15°, respectivamente.

B.6 – DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO, MODELAGEM DOS EFEITOS DA ATMOSFERA NEUTRA E DA IONOSFERA (Trop+RNA$_{GIM}$)

As diferenças entre os deslocamentos das estações de referência virtuais calculadas com máscara de elevação de 15° e os deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 5°, 10° e 20°, aplicando-se a modelagem Trop+RNA$_{GIM}$, são apresentadas na figura B.6.

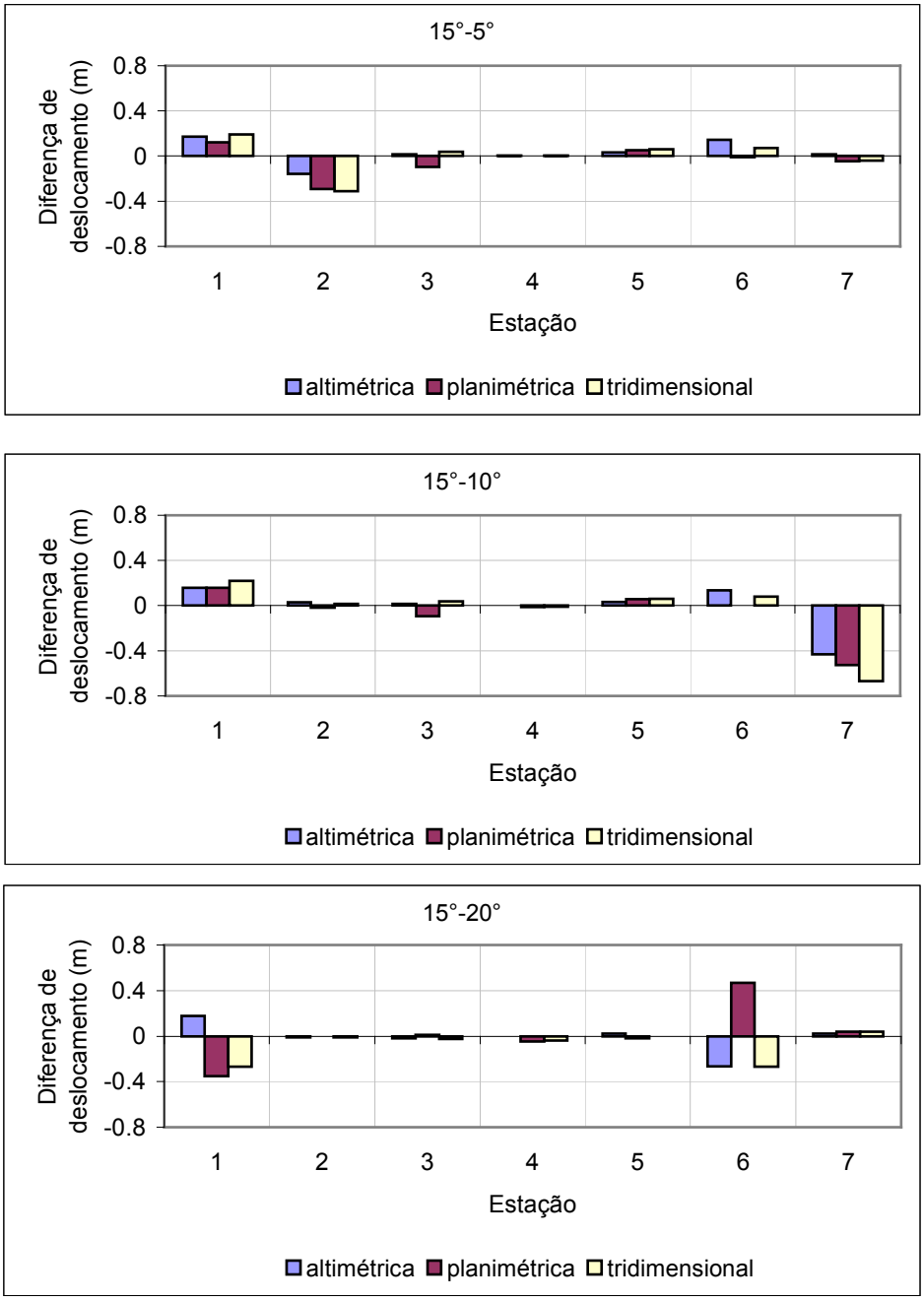

Figura B.6 – Diferença de deslocamento das estações de referência virtuais calculadas utilizando-se máscara de elevação de 15° com os deslocamentos obtidos empregando máscara de elevação de 5°, 10° e 20° (Trop+RNA$_{GIM}$)

Observa-se que as diferenças de deslocamento determinadas com as soluções RNA_{GIM} e $Trop+RNA_{GIM}$ são praticamente as mesmas, principalmente na comparação com a solução que adotou máscara de elevação de 20°. As diferenças médias da resultante tridimensional obtidas da comparação entre os deslocamentos calculados com máscara de elevação de 15° e os deslocamentos obtidos com máscara de elevação de 5°, 10° e 20° são, respectivamente, 0,2 cm, -3,8 cm e -8,2 cm, com RMS de 14,4 cm, 26,9 cm e 14,7 cm.

B.7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Destaca-se que, de modo geral, as soluções onde se utilizou máscara de elevação de 20° apresentaram menores diferenças com relação às soluções que adotaram máscara de elevação de 15°. Ressalta-se, também, que, na maioria dos casos, as maiores diferenças estão relacionadas com a componente altimétrica.