JAIME FREIBERGER JUNIOR

ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DO POSICIONAMENTO EM TEMPO REAL COM O EMPREGO DO GNRT

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Orientadora:
Profª. Drª. Cláudia Pereira Krueger

CURITIBA
2002

Freiberger Junior, Jaime
Análise da degradação do posicionamento em tempo real com o emprego do GNRT / Jaime Freiberger Junior. - Curitiba, 2002.
136 p. : il,

Orientador: Cláudia Pereira Krueger
Dissertação (Mestrado) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.
Inclui Bibliografia

1. Sistema de posicionamento global. I. Krueger, Cláudia Pereira. II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDD 20. ed. 526.982

"ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DO POSICIONAMENTO EM TEMPO REAL COM O EMPREGO DO GNRT"

POR

JAIME FREIBERGER JUNIOR

Dissertação nº 163 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

Curitiba, 11 de outubro de 2002 .

Profª. Drª. Cláudia Pereira Krueger (UFPR) - Orientadora e Presidente

Prof. Dr. Luiz Felipe Coutinho Ferreira da Silva - Membro (IME)

Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira – Membro (UFPR)

"Passarei por este
caminho uma só vez;
por isso, se houver
qualquer obra ou
gesto a ser
feito em benefício
da ciência e
do ser humano,
que eu faça já,
que eu não adie
ou negligencie,
pois por aqui jamais passarei."

Dedica-se este trabalho a

Jaime Freiberger,
Rosalina Müller Freiberger

e a todos os pais que souberam
ensinar seus filhos os gestos
de cooperação humana.

AGRADECIMENTOS

O autor deseja externar seus agradecimentos aos professores, aos profissionais de instituições e aos colaboradores abaixo relacionados.

À Dr[a]. Cláudia Pereira Krueger, Professora do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, a oportunidade de ingresso no meio científico e a orientação prestada.

Ao Dr. Silvio Rogério Correia de Freitas, Professor e Diretor do Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná.

Ao Dr. Pedro Luis Faggion, Professor e Chefe do Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná.

Ao Dr. Edson Aparecido Mitishita, Professor e Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná.

Ao Dr. Carlito Vieira de Moraes, o apoio didático e a recomendação de bibliografias sobre o conteúdo de Metodologia Científica e Geodésia.

Aos Professores Doutores do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná: Camil Gemael, Jorge Silva Centeno, Luis Augusto Koenig Veiga, Luiz Danilo Damasceno Ferreira e Romualdo Wandresen.

Aos amigos Eno Darci Saatkamp e Sandro Reginato Soares de Lima, o interesse pelo assunto e a assistência incondicional nas questões relativas à eletrônica e computação.

Aos amigos do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, os quais no período de elaboração da dissertação contribuíram para o enriquecimento do tema pesquisado: Alfonso Tierra Criollo, Alexandre do Prado, Andrea Faria Andrade, Diana Weihing, Elaine Cristine Barros de Souza, Moisés Ferreira Costa, Guataçara dos Santos Jr, Niel Nascimento Teixeira, Regiane Dalazoana, Reginaldo de Oliveira, Silvio Jacks dos Anjos Garnés e Wilson Alcântara Soares.

À Sra. Verali Mônica Kleuser Reguilin, Secretária do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná.

Aos Profissionais da Biblioteca de Ciências e Tecnologia da UFPR.

À Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL).

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), o benefício da bolsa de estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS vii
LISTA DE SÍMBOLOS viii
LISTA DE FIGURAS ix
LISTA DE QUADROS xii
RESUMO xiii
ZUSAMMENFASSUNG xiv
1 INTRODUÇÃO 1
1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES SOBRE O TEMA: DEFINIÇÃO, DELIMITAÇÃO E IMPORTÂNCIA 1
1.2 JUSTIFICATIVA 2
1.3 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS NA PESQUISA 3
1.3.1 Programa GNRT 4
1.3.2 Programa PRISM II™ 5
1.4 OBJETIVOS 6
1.5 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA 6
1.6 ESTRUTURAÇÃO 6
2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS 7
2.1 GENERALIDADES SOBRE GPS 7
2.1.1 NAVSTAR – GPS 7
2.1.2 Princípio do Posicionamento por Satélites GPS 9
2.1.3 Grandezas de Observação GPS 11
2.1.4 Erros Envolvidos Nas Determinações GPS 16
2.1.4.1 Erros relacionados com os satélites 16
2.1.4.2 Erros relacionados com o meio de propagação do sinal 17
2.1.4.3 Erros relacionados com o receptor 18
2.2 MÉTODOS E TÉCNICAS DE POSICIONAMENTO 20
2.2.1 Método Absoluto 20
2.2.2 Método Relativo 21
2.2.3 Técnicas de Posicionamento 21
2.2.4 Método GPS Diferencial (DGPS) 23
2.2.4.1 Particularidades da técnica RTK 25
2.2.4.2 Ambigüidades GPS 26
2.2.4.3 Condicionantes da precisão do técnica RTK 28
2.2.4.3.1 Comprimento da linha de base 29
2.2.4.3.2 Disponibilidade de dupla freqüência 29
2.2.4.3.3 Quantidade de satélites rastreados 29
2.2.4.3.4 Efeito multicaminho 30
2.2.4.3.5 Ocorrência de perdas de sinal 30
2.3 TRANSMISSÃO E FORMATO DAS CORREÇÕES DIFERENCIAIS 31
2.3.1 Transmissão das Correções Diferenciais 31
2.3.1.1 Faixas de freqüência de rádio 32
2.3.1.2 Considerações sobre o enlace de comunicação 34
2.3.2 Mensagens RTCM 35
3 LEVANTAMENTOS REALIZADOS 39
3.1 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS 39

3.1.1 Estações de Referência RM03 e ADMN ... 39
3.1.2 Rede Geodésica GPS/COPEL ... 40
3.1.3 Marcos Introduzidos ... 43
3.1.4 Configuração da Rede de Marcos ... 44
3.2 DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS GEODÉSICAS DOS MARCOS GPS/COPEL E MI20 ... 46
3.3 MEDIÇÕES RTK ... 49
3.3.1 Disposição das Estações GPS ... 49
3.3.2 Operação do Programa GNRT ... 50
3.3.2.1 Sistema operacional OS/2 ... 50
3.3.2.2 Módulos do programa GNRT ... 52
3.3.2.3 Produção e gerenciamento das correções diferenciais ... 52
3.3.3 Levantamentos de Campo ... 54
4 TRATAMENTO DOS DADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS ... 56
4.1 TRATAMENTO DOS DADOS ... 56
4.2 ANÁLISE DAS SOLUÇÕES ... 59
4.2.1 Soluções Obtidas com o RTK ... 59
4.2.2 Erros Planimétricos e Quantidade de Soluções com Erros Iguais ou Inferiores a 1cm +10ppm. ... 61
4.2.2.1 Linhas de base de 0 a 5 km ... 62
4.2.2.2 Linhas de base de 5 a 10 km ... 66
4.2.2.3 Linhas de base de 10 a 15 km ... 70
4.2.2.4 Linhas de base de 15 a 30 km ... 74
4.2.2.5 Análise conjunta de todas as linhas de base ... 76
4.2.3 Erros Altimétricos das Soluções com Erros Planimétricos Iguais ou Inferiores a 1cm+10ppm ... 79
4.2.4 Tempo de Fixação das Ambigüidades das Soluções com Erros Planimétricos Iguais ou Inferiores a 1cm+10ppm ... 81
4.2.5 Análise Conjunta de Alguns Parâmetros que Podem Afetar o Desempenho do Posicionamento em Tempo Real ... 84
4.2.5.1 Marco relativo TECS ... 84
4.2.5.2 Marco relativo MI20 ... 87
4.2.5.3 Marco relativo CHRI ... 90
4.2.5.4 Marco relativo FOOT ... 95
4.2.5.5 Marco relativo PIL ... 98
4.2.5.6 Marco relativo PIL2 ... 102
4.2.5.7 Marco relativo KM03 ... 104
4.2.6 Análise Radial de Alguns Marcos Relativos ... 107
4.2.6.1 Marcos relativos com comprimento de linha de base entre 3,5 e 4 km ... 107
4.2.6.2 Marcos relativos com comprimento de linha de base entre 10 e 12 km ... 109
4.2.6.3 Marcos relativos com comprimento de linha de base entre 13 e 14,5 km ... 110
4.2.6.4 Análise conjunta destes marcos relativos ... 111
4.2.7 Análise dos Erros Médios, Máximos e Mínimos ... 114
5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES ... 121
5.1 CONCLUSÃO ... 121
5.2 RECOMENDAÇÕES ... 124
REFERÊNCIAS ... 125
DOCUMENTOS CONSULTADOS ... 129
APÊNDICES ... 131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AS	–	*Anti-spoofing* (antifraude)
CTS	–	*Conventional Terrestrial System*
CLB	–	Comprimento da Linha de Base
DDF	–	Dupla Diferença de Fase
DGPS	–	*Differential Global Positioning System*
DoD	–	*Department of Defense*
DOP	–	*Dilution of Precision*
e.g.	–	lat. *exempli gratia* (por exemplo)
et al.	–	lat. *et ali* (e outros)
i.e.	–	isto é
GEONAP	–	*Geodetic Navstar Postprocessing Software*
GLONASS	–	*GLObalnaya NAvigatsionnaya Sputnikova Sistema*
GNNET	–	*Geodetic Navstar Multistation solution for PDGPS-Reference stations*
GNREF	–	*Geodetic Navstar Referenzsoftware*
GNRT	–	*Geodetic Navstar Real Time*
GNRT-K	–	*Geodetic Navstar Real Time - Kinematic*
GNSS	–	*Global Navigation Satellite System*
GPS	–	*Global Positioning System*
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ingl.	–	inglês
NAVSTAR-GPS	–	*NAVigation System with Time And Ranging - Global Positioning System*
ION	–	*Institute of Navigation*
lat.	–	latim
OS/2	–	*Operational System/2*
OTF	–	*On The Fly*
OTW	–	*On The Way*
p.	–	página
PDGPS	–	*Precise Differential Global Positioning System*
PDOP	–	*Position Dilution of Precision*

PPS	–	*Precise Positioning Service*
ppm	–	partes por milhão
RBMC	–	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RDS	–	*Radio Data System*
RTCM	–	*Radio Technical Comittee for Maritime Service*
RTK	–	*Real Time Kinematic*
SA	–	*Selective Availability* (Disponibilidade Seletiva)
SDF	–	Simples Diferença de Fase
SI	–	Sistema Internacional
SIG	–	Sistema de Informações Geográficas
SIRGAS	–	Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul
SPS	–	*Standard Positioning Service*
TDF	–	Tripla Diferença de Fase
TTFA	–	*Time To Fix Ambiguities* (Tempo de Fixação das Ambigüidades)
UERE	–	*User Equivalent Range Error*
UFPR	–	Universidade Federal do Paraná
VDOP	–	*Vertical Dilution of Precision*
UHF	–	*Ultra High Frequency*
VHF	–	*Very High Frequency*
VLF	–	*Very Low Frequency*
WADGPS	–	*Wide Area Differential Global Positioning System*
WGS 84	–	*World Geodetic System 1984*

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	–	desvio padrão
φ	–	latitude geodésica
λ	–	longitude geodésica
h	–	altitude geométrica
$=$	–	igual a
$\triangleq$	–	corresponde a
$\approx$	–	aproximado

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – GEOMETRIA DO POSICIONAMENTO POR SATÉLITES 9
FIGURA 2.2 – PRINCÍPIO DO POSICIONAMENTO POR PONTO 10
FIGURA 2.3 – SIMPLES DIFERENÇA DE FASE 13
FIGURA 2.4 – DUPLA DIFERENÇA DE FASE 14
FIGURA 2.5 – TRIPLA DIFERENÇA DE FASE 14
FIGURA 2.6 – ORGANOGRAMA SIMPLIFICADO DOS MÉTODOS E DAS TÉCNICAS DE POSICIONAMENTO COM O GPS 22
FIGURA 2.7 – PRECISÃO DO POSICIONAMENTO GPS PARA DIFERENTES COMPRIMENTOS DE LINHA DE BASE 26
FIGURA 2.8 – INTERPRETAÇÃO GEOMÉTRICA DA AMBIGÜIDADE GPS 27
FIGURA 2.9 – CABEÇALHO DAS MENSAGENS RTCM 36
FIGURA 3.1 – MARCOS DE REFERÊNCIA RM03 E ADMN 40
FIGURA 3.2 – REDE GEODÉSICA GPS/COPEL 41
FIGURA 3.3 – MARCOS DA REDE GPS/COPEL 42
FIGURA 3.4 – DISTRIBUIÇÃO GEOMÉTRICA DOS MARCOS DA REDE 44
FIGURA 3.5 – POSIÇÃO DOS MARCOS EM IMAGEM DE SATÉLITE 45
FIGURA 3.6 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA 49
FIGURA 3.7 – ESTAÇÃO MÓVEL 49
FIGURA 3.8 – ESTRUTURA DAS ESTAÇÕES GPS 50
FIGURA 3.9 – MÓDULOS DO PROGRAMA GNRT (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA) 53
FIGURA 3.10– MÓDULOS DO PROGRAMA GNRT (ESTAÇÃO MÓVEL) 54
FIGURA 4.1 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO AZMT – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 60
FIGURA 4.2 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO AZMT – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 61
FIGURA 4.3 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 0 E 5 km (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 62
FIGURA 4.4 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 0 E 5 km (SEGUNDA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 63
FIGURA 4.5 – MARCO RELATIVO PIL2 64
FIGURA 4.6 – MARCO RELATIVO FOOT 64
FIGURA 4.7 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 0 E 5 km (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 65
FIGURA 4.8 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 0 E 5 km (PRIMEIRA E SEGUNDA OCUPAÇÕES – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 65
FIGURA 4.9 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 0 E 5 km (PRIMEIRA E SEGUNDA OCUPAÇÕES – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 66
FIGURA 4.10 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 5 E 10 km (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 67
FIGURA 4.11 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 5 E 10 km (SEGUNDA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 67
FIGURA 4.12 – MARCO PIL 68
FIGURA 4.13 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 5 E 10 km (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 69
FIGURA 4.14 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 5 E 10 km (SEGUNDA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 69

FIGURA 4.15 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 5 E 10 km (PRIMEIRA E SEGUNDA OCUPAÇÕES – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 70
FIGURA 4.16 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 5 E 10 km (PRIMEIRA E SEGUNDA OCUPAÇÕES – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 70
FIGURA 4.17 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 10 E 15 km (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 71
FIGURA 4.18 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 10 E 15 km (SEGUNDA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 71
FIGURA 4.19 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 10 E 15 km (PRIMEIRA E SEGUNDA OCUPAÇÕES – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 72
FIGURA 4.20 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 10 E 15 km (PRIMEIRA E SEGUNDA OCUPAÇÕES – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 72
FIGURA 4.21 – MARCO PHO 73
FIGURA 4.22 – MARCO CCO 74
FIGURA 4.23 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 15 E 30 km (PRIMEIRA E SEGUNDA OCUPAÇÕES – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 75
FIGURA 4.24 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 15 E 30 km (PRIMEIRA E SEGUNDA OCUPAÇÕES – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 75
FIGURA 4.25 – ERROS PLANIMÉTRICOS (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 76
FIGURA 4.26 – ERROS PLANIMÉTRICOS (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 76
FIGURA 4.27 – ERRO PLANIMÉTRICO (LINHAS DE BASE DE ATÉ 16 km) 78
FIGURA 4.28 – ERRO PLANIMÉTRICO (LINHAS DE BASE DE 16 A 30,4 km) 79
FIGURA 4.29 – ERROS ALTIMÉTRICOS (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 79
FIGURA 4.30 – ERROS ALTIMÉTRICOS (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 80
FIGURA 4.31 – ERRO ALTIMÉTRICO (LINHAS DE BASE DE ATÉ 16 km) 81
FIGURA 4.32 – ERRO ALTIMÉTRICO (LINHAS DE BASE DE 16 A 30,4 km) 81
FIGURA 4.33 – TTFA (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 82
FIGURA 4.34 – TTFA (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 82
FIGURA 4.35 – TTFA (ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA RM03 E ADMN) 83
FIGURA 4.36 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO E TTFA (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO TECS – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 85
FIGURA 4.37 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO E QUANTIDADE DE SATÉLITES (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO TECS – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 86
FIGURA 4.38 – ERROS PLANIMÉTRICOS E ALTIMÉTRICOS, PDOP E VDOP (SEGUNDA OCUPAÇÃO –MARCO TECS – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 86
FIGURA 4.39 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO MI20 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 87
FIGURA 4.40 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO MI20 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 88
FIGURA 4.41 – TTFA E PDOP (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO MI20 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 88
FIGURA 4.42 – ERROS PLANIMÉTRICOS E ALTIMÉTRICOS (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO MI20 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 89
FIGURA 4.43 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO MI20 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 90

FIGURA 4.44 – TTFA E PDOP (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO MI20 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 90
FIGURA 4.45 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 91
FIGURA 4.46 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 91
FIGURA 4.47 – TTFA E PDOP (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 92
FIGURA 4.48 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 92
FIGURA 4.49 – NÚMERO DE SATÉLITES E TTFA (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 93
FIGURA 4.50 – TTFA E PDOP (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 93
FIGURA 4.51 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 94
FIGURA 4.52 – NÚMERO DE SATÉLITES E TTFA (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 94
FIGURA 4.53 – TTFA E PDOP (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 95
FIGURA 4.54 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO FOOT - ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 96
FIGURA 4.55 – TTFA E PDOP (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO FOOT - ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 96
FIGURA 4.56 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO FOOT – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 97
FIGURA 4.57 – TTFA E PDOP (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO FOOT - ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 97
FIGURA 4.58 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO PIL – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 98
FIGURA 4.59 – TTFA E PDOP (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO PIL – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 99
FIGURA 4.60 – ERROS PLANIMÉTRICOS E ALTIMÉTRICOS (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO PIL – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 99
FIGURA 4.61 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO PIL – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 100
FIGURA 4.62 – TTFA E PDOP (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO PIL – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 100
FIGURA 4.63 – ERROS PLANIMÉTRICOS E ALTIMÉTRICOS (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO PIL – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 101
FIGURA 4.64 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO PIL – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 101
FIGURA 4.65 – TTFA E PDOP (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO PIL – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 101
FIGURA 4.66 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO PIL2 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 102
FIGURA 4.67 – NÚMERO DE SATÉLITES E TTFA (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO PIL2 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 103
FIGURA 4.68 – TTFA E PDOP (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO PIL2 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 104
FIGURA 4.69 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO KM03 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 105

FIGURA 4.70 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO KM03 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 105
FIGURA 4.71 – TTFA E PDOP (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO KM03 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 105
FIGURA 4.72 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO KM03 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 106
FIGURA 4.73 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO KM03 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 106
FIGURA 4.74 – TTFA E PDOP (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO KM03 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 107
FIGURA 4.75 – PLANO RADIAL DOS MARCOS RELATIVOS TMA, UBR E FOOT 108
FIGURA 4.76 – PLANO RADIAL DOS MARCOS RELATIVOS CRSJ, KM03, PHO E BGI 109
FIGURA 4.77 – PLANO RADIAL DOS MARCOS RELATIVOS CIC E CCO 111
FIGURA 4.78 – PLANO RADIAL DOS MARCOS RELATIVOS 112
FIGURA 4.79 – PLANO RADIAL DOS MARCOS RELATIVOS 113
FIGURA 4.80 – ERRO PLANIMÉTRICO (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 114
FIGURA 4.81 – ERRO ALTIMÉTRICO (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 115
FIGURA 4.82 – TTFA (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 116
FIGURA 4.83 – ERROS PLANIMÉTRICOS (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 116
FIGURA 4.84 – ERROS ALTIMÉTRICOS (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 117
FIGURA 4.85 – TTFA (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 118
FIGURA 4.86 – CONFIABILIDADE E PRECISÃO DO POSICIONAMENO RTK (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 119
FIGURA 4.87 – CONFIABILIDADE E PRECISÃO DO POSICIONAMENO RTK (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN) 119

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1.1 – APLICAÇÕES E PRECISÕES OBTIDAS PELO GNRT 5
QUADRO 2.1 – ERROS SISTEMÁTICOS PRESENTES NAS OBSERVAÇÕES GPS 16
QUADRO 2.2 – INFLUÊNCIA DOS ERROS NO POSICIONAMENTO RELATIVO 19
QUADRO 2.3 – PRECISÃO E FREQUÊNCIA NO DGPS 31
QUADRO 2.4 – FAIXAS DE FREQÜÊNCIA DE RÁDIO 33
QUADRO 2.5 – TIPOS DE MENSAGEM RTCM v.2.2 37
QUADRO 3.1 – COORDENADAS DOS MARCOS DE REFERÊNCIA RM03 e ADMN (WGS 84). 40
QUADRO 3.2 – DESCRIÇÃO DAS ESTAÇÕES DA REDE GEODÉSICA GPS/COPEL 42
QUADRO 3.3 – COORDENADAS GEODÉSICAS DOS MARCOS INTRODUZIDOS (WGS 84).. 43
QUADRO 3.4 – DESCRIÇÃO DOS MARCOS RELATIVOS 45
QUADRO 3.5 – DURAÇÃO DO RASTREIO ESTÁTICO 46
QUADRO 3.6 – PERÍODO DE OCUPAÇÃO ESTÁTICA NOS MARCOS RELATIVOS 47
QUADRO 3.7 – CARACTERÍSTICAS DOS PROCEDIMENTOS CONDUZIDOS NO LEVANTAMENTO ESTÁTICO 47
QUADRO 3.8 – COORDENADAS GEODÉSICAS DOS MARCOS GPS/COPEL E MI20 (WGS 84) 48
QUADRO 4.1 – TRECHO DE UM ARQUIVO DE RESULTADOS RTK 57
QUADRO 4.2 – MARCOS RELATIVOS TMA, UBR E FOOT 108
QUADRO 4.3 – MARCOS RELATIVOS CRSJ, KM03, PHO E BGI 110
QUADRO 4.4 – MARCOS RELATIVOS CIC E CCO 111

RESUMO

A técnica de posicionamento conhecida pela sigla RTK (ingl. *Real Time Kinematic*) tem-se apresentado como um procedimento de medição de extrema importância em diversas aplicações da Engenharia. Programas computacionais têm sido desenvolvidos e aprimorados para viabilizar uma maior eficiência do RTK em levantamentos cadastrais e em levantamentos hidrográficos. O presente trabalho tem como objetivo a análise da degradação do posicionamento em tempo real com o emprego do programa computacional GNRT (*Geodetic Navstar Real Time*) no âmbito terrestre. Realizou-se um levantamento pela técnica RTK em 22 marcos relativos localizados em uma área teste da cidade de Curitiba-PR (Brasil) com comprimentos de linhas de base variando de 0,2 a 30,4 km, envolvendo a implantação de duas estações de referência distintas com uma diferença altimétrica de aproximadamente 14 metros, localizadas no *Campus* do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná. As coordenadas geodésicas precisas foram determinadas para servir como parâmetros de referência para a comparação com os resultados obtidos na técnica RTK. Em cada marco foram realizadas duas ocupações, cada qual composta por dez seções RTK. As coordenadas geodésicas obtidas pelo programa GNRT foram tratadas e preparadas para as análises, as quais envolveram os erros planimétricos, os erros altimétricos, o tempo de fixação das ambigüidades e a confiabilidade do sistema de transmissão das correções diferenciais mediante as limitações impostas à técnica RTK nos levantamentos cadastrais. Com a mudança da estação de referência do marco RM03 para o marco ADMN, verificou-se um ganho em confiabilidade e em precisão na maioria dos marcos relativos com comprimento de linha de base de até 14 km. A correlação espacial ficou evidente por meio das análises realizadas neste trabalho, principalmente nas linhas de base superiores a 11 km, nas quais se percebe uma tendência de aumento dos erros planimétricos e do tempo de fixação das ambigüidades.

Palavras-chave: RTK, degradação do posicionamento em tempo real, GNRT, comprimento da linha de base, tempo de fixação das ambigüidades, correlação espacial.

ZUSAMMENFASSUNG

Analyse der Verschlechterung der Echtzeitpositionierung unter Verwendung des Programms GNRT

Das Positionierungsverfahren RTK (*Real Time Kinematik)* ist eine wichtige Technologie für verschiedenen Ingenieuranwendungen. Programme für die Auswertung sind in der Weiterentwicklung und werden ständig verfeinert um effizientere Aufnahmen im Bereich des Katasters und der Hydrographie zu gewährleisten. Diese Arbeit befaßt sich mit der Analyse der Verschlechterung der Positionierungsergebnisse in Echtzeit in Abhängigkeit der Entfernung des Rovers zur Basisstation, die mit dem Programm GNRT (*Geodetic Navstar Real Time*) ausgewertet wurden. Es wurde eine RTK-Aufnahme mit 22 Punkten in einem Testgelände in der Umgebung der Stadt Curitiba (Brasilien) durchgeführt, deren Basislinien etwa zwischen 0,2 bis 30,4 km lang sind. Auf dem Campus des Politécnico der Bundesuniversität von Paraná wurden zusätzlich zwei Referenzstationen (RM03 und ADMN) eingeführt, welche einen Höhenunterschied von 14 m haben. Präzise geodätische Koordinaten wurden bestimmt und als Referenzparameter benutzt, um diese mit den Ergebnissen des RTK-Verfahren zu vergleichen. Jeder Punkt wurde zweimal besetzt, wobei bei jeder Besetzung 10 Sessions gemessen wurden. Die geodätischen Koordinaten des RTK wurden aufbereitet für die Analyse, die planimetrische und altimetrische Fehler berücksichtigt, sowie die Initialisierungszeit und die Zuverlässigkeit des Übertragungssystems, welche beschränkt ist durch andere Fehlereinflüsse, wie z. B. durch die Troposphäre und Ionosphäre. Mit dem Wechsel der Referenzstation vom Punkt RM03 zum Punkt ADMN wurde eine Steigerung der Zuverlässigkeit und der Genauigkeit in den meisten der "relativen Punkte", mit einer Basislänge von bis zu 14 km, festgestellt. Die räumliche Korrelation wird durch die Analyse in dieser Arbeit realisiert, hauptsächlich in den Basislinien, die länger sind als 11 km, in denen man eine Tendenz bemerken kann zur Steigerung der planimetrischen Fehler und der Zeit zur Festsetzung der Mehrdeutigkeiten.

Schlagwörter: RTK, Verschlechterung der Echtzeitpositionierung, GNRT, Länge der Basislinien, GNRT, Zeit der Festsetzung der Mehrdeutigkeiten, räumliche Korrelation.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES SOBRE O TEMA: DEFINIÇÃO, DELIMITAÇÃO E IMPORTÂNCIA

Degradação é o estado de redução qualitativa das características que ditam a eficácia de um determinado processo (WEBSTER'S, 1983, p. 478). Neste trabalho, a degradação do posicionamento é definida pelo afastamento das coordenadas de um determinado ponto geográfico em relação ao valor definido como verdadeiro ou adotado como padrão. Na atualidade, este é um tema para pesquisa e investigação no âmbito de todos os sistemas que envolvem as técnicas de posicionamento, em especial o GPS (*Global Positioning System*) em tempo real.

Até a década de 90, os resultados da maioria dos trabalhos de precisão executados com o GPS só eram disponibilizados após o término do levantamento e com o pós-processamento dos dados brutos armazenados na memória física dos receptores. A vantagem de se poder realizar um maior número de estimações de pseudodistâncias assim como a manipulação dos dados para um tratamento estatístico mais robusto (LEMMON e GERDAN, 1999, p. 64) não sobrepujou, no entanto, a restrição principal do pós-processamento, que é a disponibilização dos resultados em tempo real bem como a conferência e a exibição desses dados no ato da medição em campo.

Para atender às aplicações que exigem coordenadas precisas dos pontos geográficos em tempo real, foram concebidas técnicas (e.g., RTK[1] e PDGPS[2]). O princípio básico destas técnicas é o envio de correções diferenciais geradas em um receptor de referência para um receptor móvel por meio de um sistema de comunicação, viabilizando a determinação de sua posição instantânea com precisão.

---

[1] RTK: abreviatura de *Real Time Kinematic* – cinemático em tempo real. Procedimento para a determinação de coordenadas geodésicas de precisão que utiliza um enlace (*link*) de rádio entre a estação de referência e as estações móveis, para transmissão das observações (seção 2.2.4.1).

[2] PDGPS: abreviatura de *Precise Differential Global Positioning System*. Procedimento que utiliza observações de diversas estações de referência (rede RTK) para a determinação da correlação espacial e temporal no cômputo de coordenadas geodésicas de precisão (WILLGALIS et al., 2001, p. 5).

Com o emprego das observações de fase das ondas portadoras da banda L pode-se obter um posicionamento com precisão de ordem decimétrica ou melhor (GEOPP, 2002) uma vez que as ambigüidades são resolvidas em tempo real, dependendo das condições de rastreio e das características do receptor.

A execução dos levantamentos pela técnica RTK é limitada atualmente pela distância entre as estações de referência e móvel, onde os erros correlacionados (erros orbitais e erros atmosféricos) limitam a precisão da técnica (WÜBBENA et al., 1996, p. 1845). Outro problema é o alcance e a qualidade da transmissão das correções diferenciais as quais podem ser degradadas ou parcialmente interrompidas. O formato das correções diferenciais é formulado pelos padrões recomendados pela RTCM (*Radio Technical Committee for Maritime Service*) (RTCM, 1998, p. 1-1) e o enlace de comunicação é efetuado com o uso de rádios transmissores que normalmente operam nas faixas de freqüência VHF/UHF para este tipo de aplicação.

O programa computacional GNRT foi desenvolvido para a determinação de coordenadas geográficas em tempo real, podendo ser utilizado em diversos tipos de levantamentos como por exemplo: hidrográficos e oceanográficos, no monitoramento preciso de veículos, na agricultura de precisão e na atualização cartográfica. Embora este programa estenda sua aplicação no âmbito marinho, aéreo ou terrestre, este trabalho considera apenas as aplicações terrestres do sistema.

1.2 JUSTIFICATIVA

Constata-se o emprego crescente do GPS em atividades que envolvem o posicionamento preciso em tempo real. Esta tecnologia vem sendo incorporada em diversas aplicações geodésicas como por exemplo no planejamento e monitoramento de plataformas continentais, no monitoramento de estruturas, em levantamentos cadastrais, no monitoramento preciso de embarcações e outras aplicações.

A técnica RTK tem sido limitada em comprimentos de linhas de base de 10 a 15 km. Conforme LEMMON e GERDAN (1999, p. 65), há poucas informações disponíveis em literatura que definam o rendimento e as limitações que os usuários podem esperar desse sistema.

A correlação das correções diferenciais com o comprimento e a orientação da linha de base, as limitações do enlace de comunicação e as condições de rastreio são condicionantes da qualidade dos levantamentos GPS com o emprego das técnicas diferenciais. É de interesse que se disponibilizem parâmetros que sirvam para um maior domínio e entendimento desses sistemas com relação a essas limitações que permanecem ainda sem informações diligentes.

Dentre alguns projetos de pesquisa desenvolvidos na esfera deste tema pode-se apontar trabalhos na Alemanha (WÜBBENA et al., 1996; WILLGALIS et al., 2002), Brasil (KRUEGER, 2001), Austrália (LEMMON e GERDAN, 1999; EL-MOWAFY, 2000; STEWART, 2001), França (EDWARDS et al. 1999) e EUA (ABOUSALEM et al. 2001). O número de pesquisadores envolvidos com as técnicas RTK e PDGPS no Brasil é pequeno frente ao número crescente de usuários e aplicações, tornando-se imprescindível a análise das potencialidades e restrições inerentes a estas técnicas de posicionamento.

1.3 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS NA PESQUISA

Neste trabalho foi empregada a técnica de posicionamento RTK observando-se a atual constelação de satélites do NAVSTAR-GPS (*Navigation System with Time And Ranging - Global Positioning System*) e emprego do programa GNRT com transmissão dos dados de correção no formato RTCM++ por meio de um sistema de rádio UHF. Os marcos ocupados possuem coordenadas pré-determinadas por meio de um posicionamento relativo com a técnica estática e estão distribuídos em linhas de base de até aproximadamente 30 km de comprimento.

As coordenadas obtidas em tempo real são comparadas com as coordenadas precisas (pré-determinadas). As diferenças indicam a degradação de posicionamento que é analisada com relação à distância que separa a estação móvel da estação de referência (comprimento da linha de base), às condições de rastreio e às condições de transmissão das correções diferenciais. Os erros planimétricos e altimétricos, a quantidade de satélites envolvidos, o tempo de fixação das ambigüidades, a quantidade

de soluções com as ambigüidades resolvidas e os valores de PDOP (*Position Dilution of Precision*) são organizados em gráficos e tabelas.

Os equipamentos empregados para a realização dos levantamentos e das análises concernentes são:

a) dois receptores geodésicos Ashtech Z-XII;

b) um receptor Trimble 4000 SSI;

c) dois microcomputadores PC com instalação do sistema operacional OS-2;

d) programa GNRT;

e) dois rádios de comunicação VHF/UHF Pacific Crest.

Os dados brutos coletados no posicionamento relativo estático foram processados com o programa GPS comercial PRISM II™ e o posicionamento em tempo real foi realizado com o emprego do programa GNRT. Estes programas são descritos sucintamente na seqüência.

1.3.1 Programa GNRT

O programa GNREF/GNRT-K[3] (ou simplesmente GNRT), é um programa desenvolvido para gerar correções de código e da fase da portadora a partir de dados brutos de medições fornecidos por receptores GPS ou GLONASS (WÜBBENA et al. 1996, p. 1846). As correções são codificadas no formato otimizado RTCM++ e transferidas da estação de referência à estação móvel na forma serial por um sistema de comunicação. As principais características do programa são (WÜBBENA e BAGGE, 1995, p. 8; WÜBBENA et al., 1996, p. 1846):

a) possibilita a determinação de posição em tempo real mediante a combinação dos dados brutos da estação móvel com as correções transmitidas pela estação de referência;

---

[3] GNREF/GNRT-K: GNREF é o nome comercial do programa GNRT/GNNET, desenvolvido pela empresa alemã Geo++ GmbH para aplicações DGPS e PDGPS em tempo real (TEICHERT, 1999, p. 44; GEOPP, 2002). No Brasil, este sistema tem sido denominado de GNREF/GNRT-K, destinado às aplicações que exploram a fase da portadora para posicionamentos precisos a partir do emprego das correções diferenciais geradas em uma única estação de referência.

b) possui uma estrutura flexível, ou seja, seu funcionamento independe da marca de fabricante dos receptores;

c) permite que ambas as estações trabalhem com a fase das portadoras L1 e L2, resolvendo as ambigüidades em tempo real (OTW) com recurso de aviso sonoro quando estas são resolvidas, conduzindo a posicionamento preciso.

O GNRT é um programa constituído de um conjunto de módulos concebidos como programas independentes. Um deles é o módulo GNRT-K, uma alternativa para tornar viável o emprego deste programa em levantamentos que exigem precisão da ordem do milímetro (GEOPP, 2002). Alguns campos de emprego do GNRT e as suas precisões nominais estão indicados no quadro 1. Mais detalhes consultar GEOPP (1995) e GEOPP (2002).

QUADRO 1.1 – APLICAÇÕES E PRECISÕES OBTIDAS PELO GNRT

ATIVIDADE	APLICAÇÃO	PRECISÃO
Navegação	Terrestre, marítima e aérea	0,1 – 5 m
Hidrografia	Levantamento de perfis	1 – 5 m
Posicionamento e monitoramento	Máquinas Embarcações	1 cm 1 – 5 m
Medições	Cadastro, locação Deformações	1 cm 0,1 – 1 cm

FONTE: GEOPP (2002).
NOTA: traduzido e modificado pelo autor.

1.3.2 Programa PRISM II™

O PRISM II™ (*Precision GPS Surveying Software*) é um programa comercial destinado ao processamento e ajustamento de grandezas observáveis brutas (L_1, L_2 e códigos), permitindo utilizar dados de levantamentos estáticos, pseudocinemáticos, estáticos rápidos e cinemáticos. Uma vantagem deste programa é a possibilidade de se omitir do processamento os satélites que possuem poucas épocas ou dados de observações inconsistentes. O programa disponibiliza os resultados e a qualidade destes em forma de relatórios e de gráficos. Características e procedimentos intrínsecos do programa PRISM II™ podem ser encontrados em ASHTECH (1995).

1.4 OBJETIVOS

Como objetivo geral, este trabalho examina e avalia a degradação do posicionamento RTK em levantamentos com a utilização do programa GNRT por meio da análise dos resultados obtidos na determinação de linhas de base de comprimentos variados.

Como objetivos específicos, têm-se: verificar o alcance do sinal que transmite as correções diferenciais e o efeito de possíveis obstruções neste sinal; avaliar o tempo de fixação das ambigüidades com a quantidade de satélites rastreados; e analisar a qualidade do posicionamento com a mudança da estação de referência.

1.5 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Dentre as diversas contribuições que este trabalho trará a toda a comunidade técnico-científica citam-se:

a) abranger os erros e as limitações dos levantamentos RTK;
b) disponibilizar variáveis que auxiliarão na escolha do melhor local para a implantação de uma estação de referência;
c) auxiliar no monitoramento da precisão dos sistemas existentes (ou futuros);
d) prover informações que sirvam de contribuição à literatura em língua portuguesa e dados relevantes para pesquisas futuras no domínio do posicionamento em tempo real ainda escassas no Brasil.

1.6 ESTRUTURAÇÃO

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos. No capítulo 2 trata-se uma revisão da bibliografia especializada sobre os principais conceitos fundamentais do NAVSTAR-GPS. No capítulo 3 descrevem-se os levantamentos efetuados em campo. No capítulo 4 são encontrados os resultados obtidos com o processamento dos dados pelos programas computacionais, as investigações realizadas e as análises das soluções. No capítulo 5 encontram-se a conclusão e as recomendações obtidas com o presente trabalho.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 GENERALIDADES SOBRE GPS

2.1.1 NAVSTAR – GPS

O NAVSTAR - GPS (*Navigation System with Time and Ranging-Global Positioning System*) foi concebido como um sistema de navegação para fins exclusivamente militares (SEEBER, 1993, p. 209). Sua concepção foi oficializada em abril de 1973 pelo Ministério de Defesa dos EUA, a fim de prover o posicionamento tridimensional, a velocidade e informações precisas de tempo, independente de condições meteorológicas.

A partir de 1983 iniciou-se a aplicação deste sistema para soluções geodésicas e em março de 1994 o sistema foi declarado operacionalmente completo com 21 satélites (mais três satélites em reserva ativa) distribuídos em seis planos orbitais, com uma altura orbital média de 20200 km, inclinados de 55° em relação ao equador com um período orbital de 12 horas siderais, de modo que pelo menos quatro satélites sejam visíveis simultaneamente acima do horizonte, em qualquer lugar da superfície da Terra, e em qualquer instante (SEEBER, 1993, p. 209).

O GPS é estruturado em três segmentos: espacial, de controle e de usuário (LEICK, 1995, p. 60). O segmento espacial consiste na constelação de satélites GPS, que transmitem à Terra sinais modulados em duas freqüências e mensagens de navegação. O segmento de controle, responsável pela operação do sistema GPS, é constituído por estações de monitoramento distribuídas no mundo as quais recebem os sinais dos satélites a partir dos quais são formulados os dados de navegação e de tempo. Conforme CUNNINGHAM et al.[4] apud LAGO (2001, p. 7), o segmento de controle era inicialmente composto por cinco estações da Força Aérea dos Estados Unidos localizadas em Colorado Springs (estação de controle mestra), Havaí, Ilhas

[4] CUNNINGHAM, J.; SWIFT, E.; MUELLER, F. (1998). Improvement of the NIMA precise orbit and clock estimates. In: International Technical Meeting of the Satellite Division of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 11. , 1998, Nashville. **Presented paper**. Alexandria: ION, 1998, p. 1587.

Ascensão, Diego Garcia e Kwajalein. Com o desenvolvimento e aprimoramento do sistema foram integradas a este segmento sete estações pertencentes ao NIMA (*National Imagery Mapping Agency*) que estão localizadas no Equador, Argentina, Inglaterra, Bahrain, Austrália, China e USNO (*United States Naval Observatory*). O segmento de usuário compreende todas as classes de receptores GPS e seus componentes, que em geral são classificados em receptores geodésicos e de navegação (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001, p. 11-23).

Embora tenha sido propagado sob a sigla genérica GPS (*Global Positioning System*), o NAVSTAR-GPS insere-se no conceito do GNSS (*Global Navigation Satellite System*) assim como a constelação russa GLONASS e o projeto Galileu. A descrição do projeto e detalhes históricos do NAVSTAR-GPS podem ser encontrados em SEEBER (1993) e ANDRADE (1988).

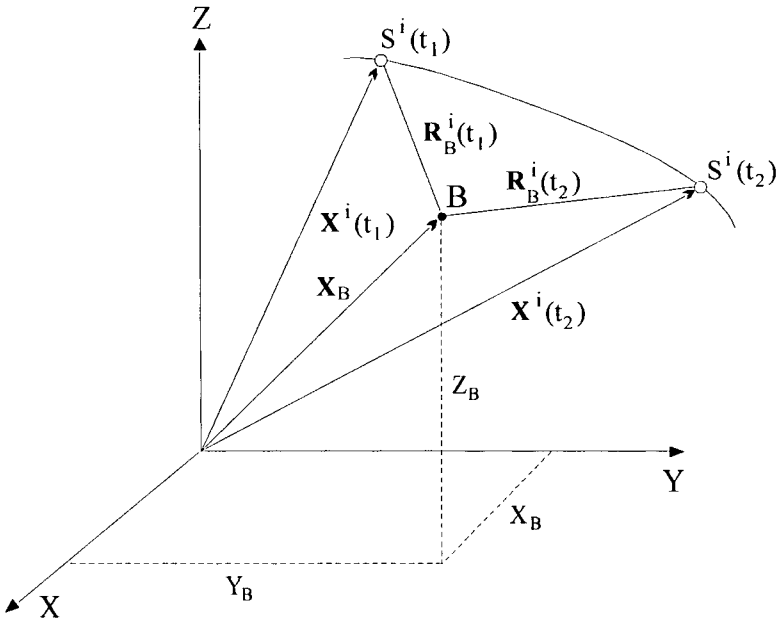
Atualmente, os usuários civis têm acesso apenas ao código C/A modulado na onda portadora L_1. As perspectivas para a modernização do GPS abrangem basicamente a implementação de novas estruturas de sinais nos novos satélites, a eliminação da SA e a inserção da SD (*Selective Denial* – proibição seletiva) (MONICO, 2000, p. 271). Conforme HOFMANN-WELLENHOF et al. (2001, p. 345), estão previstas ainda a implementação de uma nova onda portadora L_5 para a correção de efeitos ionosféricos e para a resolução das ambigüidades, a modulação de um segundo sinal civil (C/A) na portadora L_2 e a introdução de um novo código militar "M" em substituição ao código Y.

No futuro, o segmento espacial será composto por satélites do bloco IIR e por uma quarta geração de satélites denominada IIF que deverá incorporar a modernização do sistema (MONICO, 2000, p. 271). Os satélites do bloco IIF terão a capacidade de comunicação entre eles a fim de tornar o GPS cada vez mais independente do controle terrestre assim como melhorar a acurácia do posicionamento absoluto (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001, p. 346).

2.1.2 Princípio do Posicionamento por Satélites GPS

A apresentação geométrica para o posicionamento de um ponto na superfície terrestre com o GPS é observada na figura 2.1.

FIGURA 2.1 – GEOMETRIA DO POSICIONAMENTO POR SATÉLITES



FONTE: SEEBER (1993, p. 248).
NOTA: adaptado pelo autor.

O princípio para determinação de coordenadas com o GPS é baseado na medição das chamadas pseudodistâncias[5] entre a antena de um receptor e as antenas de quatro satélites. A partir das coordenadas conhecidas destes satélites, referenciadas a um sistema de referência (WGS 84), é possível determinar as coordenadas de um ponto na superfície terrestre (SEEBER, 1993, p. 209). Dados uma antena e um receptor instalados em uma estação B e um satélite i, a equação fundamental de observação para uma pseudodistância é (SEEBER, 1993, p. 247):

$$PR_B^i(t) = \left|\mathbf{X}^i - \mathbf{X}_B\right| + c\delta t_B = c\tau_B^i = ((X_i - X_B)^2 + (Y_i - Y_B)^2 + (Z_i - Z_B)^2)^{\frac{1}{2}} + c\delta t_B, \quad (2.1)$$

onde:

[5] Pseudodistância: termo que provém de *pseudorange* (ingl.) e significa a distância satélite-receptor afetada por efeitos ou erros sistemáticos (SEEBER, 1993, p. 215).

PR_B^i: pseudodistância entre a antena do satélite i e a antena do receptor em B;

$\mathbf{X}^i$: vetor posição do satélite i de componentes X^i, Y^i, Z^i no sistema geocêntrico CTS;

$\mathbf{X}_B$: vetor posição da antena do receptor em B, de componentes X_B, Y_B, Z_B no sistema geocêntrico CTS;

c : velocidade de propagação da luz no vácuo;

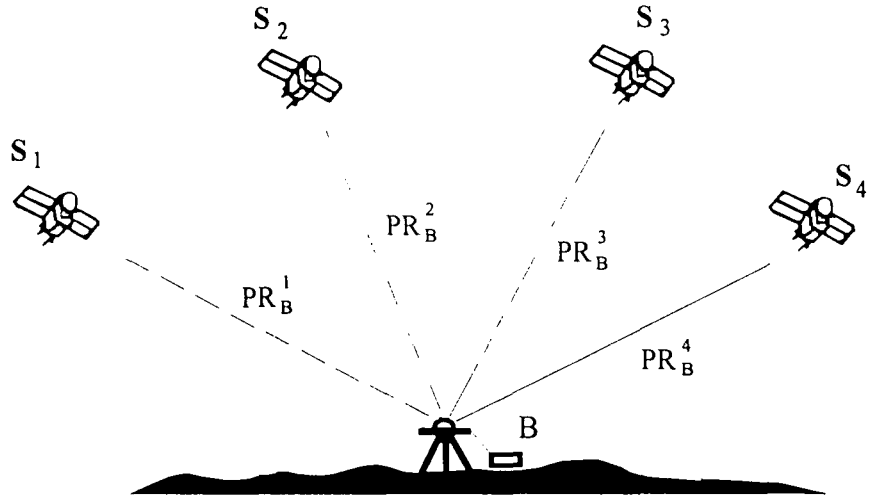
δt_B: erro de sincronização entre o sistema de tempo GPS e o relógio do receptor em B;

τ_B^i : tempo de propagação do sinal entre a antenas do satélite i e a antena do receptor em B.

Três destas observações são necessárias para se obter coordenadas tridimensionais, mas uma quarta observação é adicionada para resolver o erro de não-sincronismo entre os relógios do receptor (B) e do satélite (i) (SEEBER, 1993, p. 209).

As coordenadas da antena do receptor instalado no ponto B (estação B), representado na figura 2.1, podem ser obtidas pela observação simultânea a 4 satélites (S1, S2, S3 e S4), conforme ilustra a figura 2.2.

FIGURA 2.2 – PRINCÍPIO DO POSICIONAMENTO POR PONTO



FONTE: LEICK (1995, p. 260).
NOTA: modificado pelo autor.

2.1.3 Grandezas de Observação GPS

Cada satélite GPS transmite dois sinais com freqüências distintas: L_1, com freqüência de 1575,42 MHz, e L_2 com freqüência de 1227,60 MHz, derivadas de uma freqüência fundamental f_0 = 10,23 MHz (LEICK, 1995, p. 66). No sinal L_1, são modulados os códigos[6] C/A e P e a mensagem de navegação, enquanto que em L_2 apenas o código C/A é modulado. A mensagem de navegação é transmitida sob a forma de um quadro de dados que comporta até 1.500 bits de informação contendo os parâmetros orbitais, os dados para correção da propagação do sinal na atmosfera, os parâmetros para correção do erro dos relógios dos satélites, a "saúde" dos satélites, dentre outras informações (MONICO, 2000, p. 28).

Para a determinação das pseudodistâncias consideram-se duas observáveis fundamentais (SEEBER, 1993, p. 250): fase do código (a partir da observação dos códigos) e fase da portadora (a partir de observações das ondas portadoras). A medição de pseudodistância baseada em fase do código parte do princípio de que se for conhecido o tempo decorrido para um sinal do satélite percorrer o trajeto satélite-receptor, é possível calcular a distância entre estes. Esta medição é representada matematicamente por (SEEBER, 1993, p. 252):

$$PR^i_B = c(t_r - T_t) = R^i_B + c\delta t_B + c\delta T + c\delta t^i + \varepsilon_B, \qquad (2.2)$$

onde:

t_r : tempo em que o sinal foi recebido no receptor em B;

T_t : tempo em que o sinal foi transmitido do satélite i;

R^i_B : distância geométrica ou raio vetor entre a antena do satélite i e a antena do receptor em B;

δT : erro devido ao atraso atmosférico;

δt^i : erro do relógio do satélite i em relação ao tempo GPS;

ε_B : demais erros (ruído, efeito multicaminho, centro de fase da antena).

---

[6] Códigos: *C/A – Clear/Aquisition* (Fácil Acesso); P – *Precise* ou *Protected* (Preciso ou Protegido).

A medida da fase da onda portadora consiste na comparação da fase do sinal recebida pelo receptor com a fase da réplica do sinal gerado neste receptor. Sua formulação segundo SEEBER (1993, p. 249) pode ser descrita por:

$$\Phi_B^i = \frac{2\pi}{\lambda}(|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_B| - N_B^i\lambda + c\delta t_B), \tag{2.3}$$

onde:

Φ_B^i : diferença de fase medida da onda portadora do receptor em B a um satélite i;

λ : comprimento da onda portadora;

N_B^i : número inteiro de ciclos de onda completos (ambigüidades);

Pela multiplicação com o comprimento de onda, pode-se representar a fase relativa em pseudodistância para a fase da portadora em uma época t (KRUEGER, 1996, p. 20):

$$PR_B^i(t) = |\mathbf{R}_B^i(t)| + c\delta_B(t) + c\delta t^i(t) + c\delta T(t) + \lambda N_B^i(t) + \varepsilon_B(t), \tag{2.4}$$

Conforme SEEBER (1993, p. 254), é possível realizar combinações lineares entre as grandezas observáveis GPS a fim de que os erros presentes nas observações originais sejam cancelados ou minimizados a quantidades negligenciáveis e, com isso, facilitar a resolução das ambigüidades (seção 2.2.4.2). Para a combinação entre as fases das portadoras, a equação segundo WÜBBENA[7] apud SEEBER (1993, p. 257) é:

$$\Phi_{n,m}(t) = n\Phi_1(t) + m\Phi_2(t), \tag{2.5}$$

onde:

n, m : coeficientes inteiros e arbitrários;

$\Phi_{n,m}$: combinação linear da fase da portadora, expressa por ciclos;

Φ_1 : fase medida da onda portadora L_1;

Φ_2 : fase medida da onda portadora L_2.

As principais combinações lineares e suas propriedades podem ser encontradas em SEEBER (1993) e KRUEGER (1996).

---

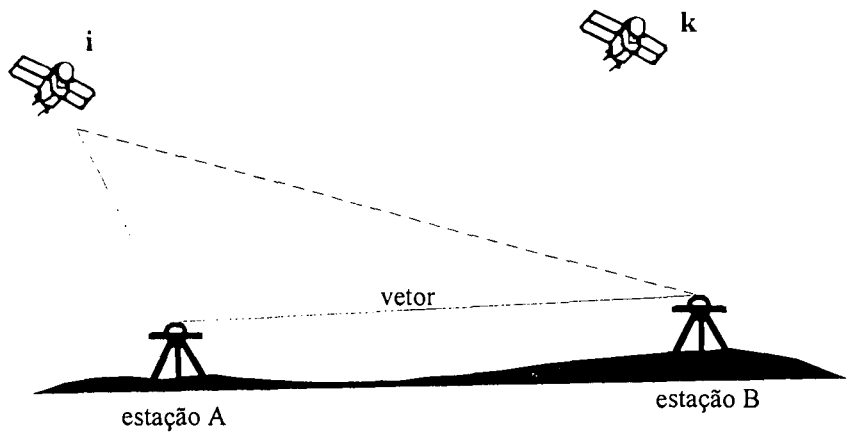
[7] WÜBBENA, G. (1989). **The GPS adjustment software package GEONAP, concepts and models.** Proc. 5th Int. Geod. Symp. Satellite Positioning, vol. 1, 452-461, Las Cruzes.

A diferença entre as grandezas observáveis das estações geram novas grandezas observáveis que são denominadas simples, dupla e tripla diferença de fase (MONICO, 2000, p. 172). Para observações de fase, a simples diferença de fase (SDF) consiste na diferença entre as fases da portadora geradas por duas estações A e B, para um satélite i em um instante t (figura 2.3). Assumindo simultaneidade das observações, o estado do relógio do satélite é eliminado; a equação é (KRUEGER, 1996, p. 22):

$$\Delta PR^{i}_{A,B}(t) = \Delta\left|R^{i}(t)\right|_{A,B} + c\Delta\delta t_{A,B}(t) + c\Delta\delta T^{i}_{A,B}(t) + \lambda\Delta N^{i}_{A,B}(t) + \Delta\varepsilon^{i}_{A,B}(t), \qquad (2.6)$$

onde Δ é um operador que representa a diferença entre receptores.

FIGURA 2.3 – SIMPLES DIFERENÇA DE FASE



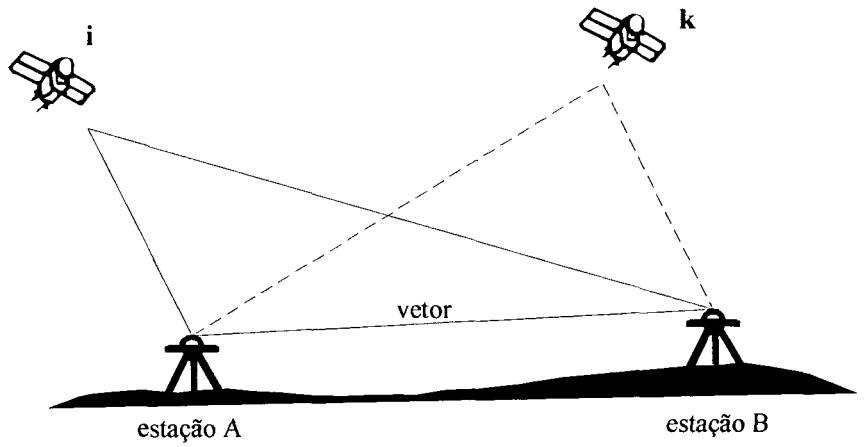
FONTE: LEICK (1995, p. 260).
NOTA: modificado e traduzido pelo autor.

A diferença entre as fases das portadoras geradas por duas estações A e B, para dois satélites i e k obtidas num mesmo instante t (figura 2.4), conduz também à eliminação da incógnita do relógio do receptor e é denominada de dupla diferença de fase (DDF):

$$\nabla\Delta PR^{i,k}_{A,B}(t) = \nabla\Delta\left|R(t)\right|^{i,k}_{A,B} + c\nabla\Delta\delta T^{i,k}_{A,B}(t) + \lambda\nabla\Delta N^{i,k}_{A,B}(t) + \nabla\Delta\varepsilon^{i,k}_{A,B}(t), \qquad (2.7)$$

onde ∇ é um operador que representa a diferença entre satélites.

FIGURA 2.4 – DUPLA DIFERENÇA DE FASE

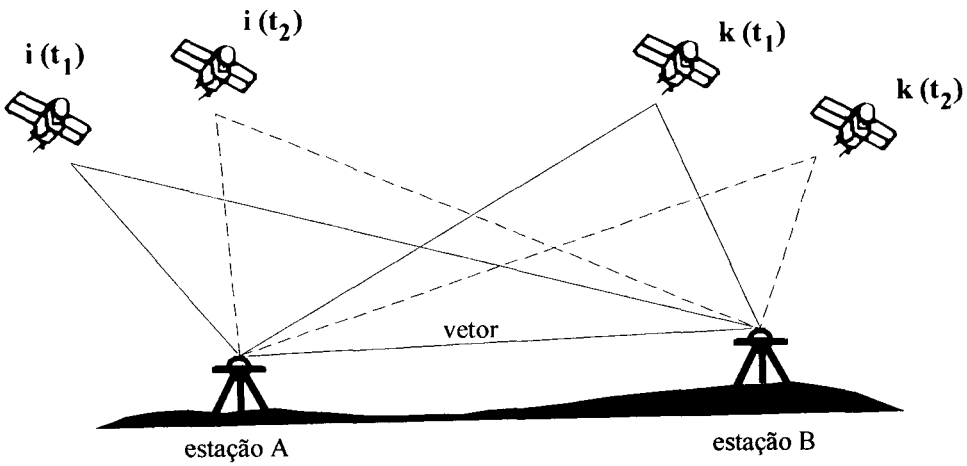


FONTE: LEICK (1995, p. 262).
NOTA: modificado e traduzido pelo autor.

A tripla diferença de fase (TDF) consiste em observações simultâneas de duas estações A e B para dois satélites i e k, em duas épocas distintas t_1 e t_2 (figura 2.5) proporcionando o cancelamento do termo $N_{A,B}^{i,k}$:

$$\delta\nabla\Delta PR_{A,B}^{i,k}(t_1,t_2) = \delta\nabla\Delta\left|R(t_1,t_2)\right|_{A,B}^{i,k} + c\delta\nabla\Delta\delta T_{A,B}^{i,k}(t_1,t_2) + \delta\nabla\Delta\varepsilon_{A,B}^{i,k}(t_1,t_2)\,. \qquad (2.8)$$

FIGURA 2.5 – TRIPLA DIFERENÇA DE FASE



FONTE: LEICK (1995, p. 262).
NOTA: modificado e traduzido pelo autor.

Em MONICO (2000, p. 169), são citadas combinações que envolvem medidas de pseudodistâncias e de fase da onda portadora, sendo a mais comum o processo de filtragem[8] do código pela fase da portadora. Segundo KRUEGER (1996, p. 57), este processo facilita a transmissão dos dados, possibilitando operar com grandes distâncias entre estações além de possibilitar precisão submétrica. A medição de uma pseudodistância baseada na fase do código suavizado pela portadora é dada por LACHAPELLE et al.[9] apud HOFMANN-WELLENHOF et al. (1994, p. 97):

$$PR_{(t_i)_{sm}} = wPR_{(t_i)} + w\Phi_{(t_i)}(PR\Phi_{(t_i-1)_{sm}} + (\Phi_{(t_i)} - \Phi_{(t_i-1)}), \qquad (2.9)$$

onde:

$PR_{(t_i)_{sm}}$: pseudodistância calculada a partir do código suavizado pela portadora no instante t_i;

$PR_{(t_i)}$: observações brutas de pseudodistâncias no instante t_i;

$PR\Phi_{(t_i-1)_{sm}}$: pseudodistância suavizada no instante (t_i-1);

w : fator de peso das observações de pseudodistâncias;

$\Phi_{(t_i)}$: medida da fase da portadora no instante t_i;

$\Phi_{(t_i-1)}$: medida da fase da portadora no instante (t_i-1).

[8] Filtragem: processo comumente denominado na literatura de suavização da pseudodistância pela portadora (MONICO, 2000, p. 169).

[9] LACHAPELLE, G.; HAGGLUND, J.; FALKENBERG, W.; BELLEMARE, P.; CASEY, M.; EATON, M. (1986): **GPS land kinematic positioning experiments**. In: Proceedings of the Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Austin, Texas, April 28 – May 2, vol. 2: 1327-1344.

2.1.4 Erros Envolvidos Nas Determinações GPS

A precisão obtida nos posicionamentos com o GPS depende da minimização ou da eliminação de erros sistemáticos e dos ruídos que afetam as medidas de pseudodistâncias baseadas na medida da fase do código e da fase da portadora. As fontes de erros podem ser classificadas em três grupos, conforme HOFMANN-WELLENHOF et al. (2001, p. 91): erros relacionados com os satélites, erros relacionados com o meio de propagação do sinal e erros relacionados com o receptor (quadro 2.1).

QUADRO 2.1 – ERROS SISTEMÁTICOS PRESENTES NAS OBSERVAÇÕES GPS

FONTE	EFEITO
Satélite	Erro dos relógios Erro orbital
Propagação do sinal	Refração ionosférica Refração troposférica
Receptor	Variação do centro de fase da antena Erro do relógio Multicaminho

FONTE: HOFMANN-WELLENHOF et al. (2001, p. 91).
NOTA: traduzido pelo autor.

2.1.4.1 Erros relacionados com os satélites

Erros dos relógios do satélite – os erros dos relógios do satélite referem-se ao não-sincronismo dos relógios dos satélites com o sistema de tempo GPS, em que a diferença pode ser, no máximo, de 1 milisegundo (MONICO, 2000, p. 124).

Erro orbital – o erro orbital ou erro de efemérides compreende as discrepâncias entre a órbita verdadeira dos satélites e as efemérides transmitidas em tempo real nas mensagens de dados de navegação (seção 2.1.3), que se propagam para a posição do usuário (BAUER, 1997, p. 249).

Relacionados com os erros do satélite estão ainda os erros devido a disponibilidade seletiva (SA). Trata-se de uma técnica implantada nos satélites do Bloco II em 25 de março de 1990 para a redução intencional da qualidade do posicionamento

dirigida aos usuários do Serviço de Posicionamento Padrão (SPS) (seção 2.2.1). A SA compreende duas técnicas: a técnica *épsilon* (ε) que é a manipulação dos dados relativos às efemérides transmitidas; e a técnica *dither* (δ) que consiste na desestabilização intencional da freqüência dos relógios dos satélites (LEICK, 1995, p. 283; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001, p. 17). A técnica *dither* encontra-se desativada desde primeiro de maio de 2000 (DIVIS, 2000, p. 16).

A distribuição dos satélites observados também tem efeito direto sobre a precisão do posicionamento. Ela é quantificada pelos fatores DOP (*Dilution of Precision*), dentre os quais, o mais utilizado, é o fator PDOP que pode ser interpretado como o inverso do volume de um tetraedro formado pelos vetores direcionados do receptor para cada um dos 4 satélites observados. Quanto mais espaçados estiverem, melhor a precisão resultante (SANTOS, 1995, p. 32). Dessa forma, a situação geométrica mais robusta é a que resultar em volumes maiores, gerando valores de PDOP menores (SEEBER, 1993, p. 293).

2.1.4.2 Erros relacionados com o meio de propagação do sinal

A determinação de distâncias com a utilização de ondas eletromagnéticas implica no estudo das influências do meio em que elas se propagam e nas formas de reduzi-las. O meio de propagação do sinal eletromagnético GPS compreende a troposfera[10] e a ionosfera, camadas da atmosfera com características diferentes.

Erro devido à refração ionosférica – a refração ionosférica causa alteração da velocidade de propagação dos sinais GPS acompanhada de uma curvatura de irradiação do sinal (WANNINGER, 2000, p. 21). Essa alteração pode ser entendida como o retardo de tempo decorrido pelas microondas em meio dispersivo que provoca um aumento no comprimento do caminho percorrido pelo sinal (CAMARGO, 1999, p. 17). As medidas de código são retardadas, acarretando pseudodistâncias maiores que as distâncias geométricas, e as medidas de fase da portadora são adiantadas, acarretando

[10] Troposfera: a estratosfera, a mesosfera e a troposfera são incluídas na terminologia troposfera pelo fato de que a refração da luz e das ondas de rádio nas duas primeiras camadas seguirem as mesmas leis físicas que na troposfera (SCHÖDLBAUER, 2000, p. 131).

pseudodistâncias menores. Estes efeitos podem ser neutralizados com a utilização de receptores com dupla freqüência (LEICK, 1995, p. 294).

Erro devido à refração troposférica – a refração troposférica afeta a modulação do código e da fase da portadora com a mesma intensidade, causando diminuição da velocidade de propagação dos sinais GPS. Com isso, as pseudodistâncias obtidas são maiores que as distâncias geométricas. Conforme LEICK (1995, p. 307), as pseudodistâncias sofrem acréscimos que variam aproximadamente com a cossecante do ângulo de elevação do satélite, podendo alcançar um erro de até 28 m com um ângulo de elevação de 5°. Como a refração troposférica não depende da freqüência, ela não pode ser eliminada com observações de dupla freqüência, mas reduzida com a introdução de modelos matemáticos (LEICK, 1995, p. 307) e com observações de satélites com ângulo de elevação superiores a 10°.

2.1.4.3 Erros relacionados com o receptor

Erro de variação do centro de fase da antena – o erro de variação do centro de fase da antena é proveniente da não coincidência do centro de fase geométrico das antenas GPS com o centro de fase eletrônico das mesmas. A distância entre o centro eletrônico e o centro geométrico pode variar da ordem de milímetros a centímetros nas antenas empregadas em levantamentos geodésicos, e por isso não pode ser desconsiderada em aplicações de precisão (WANNINGER, 2000, p. 24).

Erro devido ao multicaminho – o multicaminho é o fenômeno pelo qual o sinal que chega à antena do receptor GPS é resultado não só do sinal vindo diretamente do satélite mas também de sinais secundários, provenientes da reflexão do sinal direto em objetos mais ou menos próximos da antena ou da linha entre o receptor e o satélite (FARRET, 2000, p. 1). O multicaminho causa erros nas medidas de pseudodistância e de fase das ondas portadoras, dependendo da geometria do cenário envolvendo as antenas, os satélites e os objetos refletores e da natureza do material reflexivo.

Erro do relógio dos receptores – o erro do relógio dos receptores provém da deriva (marcha) dos osciladores internos desses relógios, que diferem do tempo GPS. Estes erros são eliminados no posicionamento relativo.

Conforme SEEBER (1993, p. 290), o efeito combinado de todos os erros que afetam a determinação da distância entre o receptor e os satélites é denominado *User Equivalent Range Error* (UERE). Este índice expressa a precisão das pseudodistâncias obtidas para cada satélite e auxilia na estimação do efeito da SA. No quadro 2.2 apresenta-se uma exposição sumária dos erros supracitados e suas influências na determinação do posicionamento relativo com GPS.

QUADRO 2.2 – INFLUÊNCIA DOS ERROS NO POSICIONAMENTO RELATIVO

ERRO	DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO
Efemérides (com SA)	1 – 5 ppm[11]
Relógio do satélite (com SA)	Ausência de erro, devido a sincronização do relógio do receptor
Ionosfera	0 – 2 ppm
Troposfera	mm – cm
Multicaminho	3 – 5 cm
Variação do centro de fase da antena	mm – cm
Ambigüidades	Dependente da solução
Influência total	mm – dm

FONTE: JAHN[12] apud TEICHERT (1999, p. 18).
NOTA: traduzido pelo autor.

[11] ppm: 1 ppm ≙ 1 cm por 10 km.

[12] JAHN, C.-H. (1992). **Untersuchungen über den Einsatz des Global Positioning System (GPS) zum Nachweis rezenter Erdkrustenbewegungen im Spaltengebiet Nordost-Islands.** Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung der Universität Hannover, Nr. 182.

2.2 MÉTODOS E TÉCNICAS DE POSICIONAMENTO

Posicionamento refere-se à determinação da posição de objetos em relação a um referencial específico. Conforme MONICO (2000, p. 181), o posicionamento GPS classifica-se em: posicionamento absoluto, se as coordenadas estão associadas ao geocentro; e posicionamento relativo, se as coordenadas são determinadas em relação a um referencial materializado por vértices de coordenadas conhecidas.

2.2.1 Método Absoluto

O método de posicionamento absoluto, também designado posicionamento por ponto, consiste na determinação de coordenadas tridimensionais utilizando-se um receptor isolado realizando medições de pseudodistâncias baseadas em observações de código ou de fase das portadoras (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1994, p.130). O resultado é um conjunto de coordenadas referenciadas no WGS 84 cujo modelo matemático pode ser dado pela equação 2.2, p. 11.

Para o posicionamento absoluto, dois padrões de precisão estão disponíveis aos usuários GPS: o Serviço de Posicionamento Padrão (SPS) e o Serviço de Posicionamento Preciso (PPS). O primeiro é destinado aos usuários civis e permite acesso somente ao código C/A em L_1, fornecendo precisão posicional de 15 a 25 metros com receptores de navegação e precisão melhor que 10 metros com receptores geodésicos em 95% do tempo (DIVIS, 2000, p. 16); e o segundo serviço, disponível apenas para usuários autorizados, disponibiliza o acesso a ambos os códigos e está sujeito a criptografia do código P quando está ativado o dispositivo de segurança AS (*anti-spoofing* ou antifraude), fornecendo precisão na ordem do metro ou melhor (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001, p.135).

Em PRADO (2001, p. 24) verifica-se que a utilização do posicionamento absoluto na Geodésia e na confecção de bases cartográficas de grande escala é imprópria; no entanto, a sua maior aplicabilidade concentra-se no apoio à navegação.

2.2.2 Método Relativo

O método relativo consiste na determinação da diferença de posição entre uma estação base (ou estação de referência) e uma estação móvel[13] (ou estação itinerante), com o objetivo de calcular o vetor entre estas duas estações (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001, p.189). A estação base possui coordenadas conhecidas com as quais se determina o vetor de posição, que representa a posição relativa entre as estações, e dessa forma são obtidas as coordenadas da estação móvel (MONICO, 2000, p. 183).

O posicionamento relativo contribui para a redução de erros, especialmente o erro dos relógios do satélite, o erro das efemérides e o erro de propagação do sinal na atmosfera. Para o cálculo das pseudodistâncias podem ser utilizadas observações da fase do código, observações da fase do código suavizado pela portadora e observações da fase da portadora (KRUEGER, 1996, p. 16).

A precisão do método relativo é condicionada pelo comprimento da linha de base[14], podendo variar de 1 a 0,1 ppm para linhas de base de até 100 km e atingir a ordem centimétrica para as linhas de base de até 20 km (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001, p.141-142).

2.2.3 Técnicas de Posicionamento

O posicionamento GPS é realizado quando a antena do receptor móvel está em repouso ou em movimento, sendo denominado posicionamento estático e cinemático, respectivamente. Têm-se o posicionamento absoluto estático e o posicionamento absoluto cinemático, e o mesmo para os posicionamentos relativos e DGPS (seção 2.2.4) (MONICO, 2000, p. 181). Conforme KRUEGER (1996, p. 16), recorre-se ao posicionamento relativo para a execução de levantamentos precisos por oferecer técnicas que permitem a redução ou a eliminação de erros envolvidos nas determinações

---

[13] Estação móvel: internacionalmente denominada *rover* (ingl.).

[14] Linha de base: vetor tridimensional entre um par de estações, calculado a partir de dados GPS coletados simultaneamente mediante o processamento da fase da portadora. Os vetores GPS se expressam normalmente no sistema de coordenadas cartesianas geocêntrico.

GPS (seção 2.1.2). Dentre elas, cita-se a técnica relativo estático com o emprego da fase da portadora, onde o tempo de ocupação do marco é função do comprimento da linha de base.

Os métodos e as técnicas do posicionamento GPS são apresentados em um organograma simplificado na figura 2.6. Mais pormenores podem ser encontrados em CARVALHO (1999, p. 32-43).

FIGURA 2.6 – ORGANOGRAMA SIMPLIFICADO DOS MÉTODOS E DAS TÉCNICAS DE POSICIONAMENTO COM O GPS

2.2.4 Método GPS Diferencial (DGPS)

O GPS Diferencial (DGPS) foi concebido para contornar a degradação da precisão do posicionamento absoluto causada principalmente pelo efeito da SA (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001, p. 136). O princípio do DGPS consiste no posicionamento de uma estação móvel com o uso de correções diferenciais geradas na estação de referência sob a hipótese de existir forte correlação entre os erros calculados na estação de referência e na estação móvel, sendo assim possível minimizá-los ou eliminá-los (MONICO, 2000, p. 220). As correções diferenciais são enviadas em tempo real por meio de um sistema de comunicação (rádio de transmissão, linha telefônica ou satélites de comunicação) e dentro de um formato apropriado, definido pela *Radio Technical Committee for Maritime Service (RTCM)* (KRUEGER, 1996, p. 52).

As correções diferenciais no DGPS podem ser de dois tipos: correções de posição e correções de pseudodistância. As correções de posição são geradas a partir do valor da diferença de posição calculada na estação de referência em relação às suas coordenadas conhecidas e então aplicadas nas coordenadas da estação móvel para efetivar a correção desta posição (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001, p. 137). Estas correções são dependentes da configuração dos satélites no instante do posicionamento e só são eficazes quando as estações de referência e móvel utilizam os mesmos satélites.

As correções de pseudodistâncias consistem na diferença entre as pseudodistâncias verdadeiras e as calculadas para cada um dos satélites rastreados na estação de referência, i.e., a partir das posições precisas dos satélites e das coordenadas de uma estação de referência, é matematicamente possível obter a distância geométrica estação-satélite. As correções são geradas na comparação desta distância com as correspondentes distâncias estimadas para aqueles satélites (BAUER, 1997, p. 235). Elas são aplicadas somente aos satélites que dispuserem de correções enviadas pela estação de referência, não havendo assim a necessidade de as estações rastrearem os mesmos satélites (MONICO, 2000, p. 220). Por conseguinte, utilizam-se estas últimas

por serem mais flexíveis, exigindo-se apenas que a constelação de satélites da estação móvel seja uma subconstelação dos satélites da estação de referência (KRUEGER, 1996, p. 52).

A precisão do DGPS pode ser influenciada por fatores como o comprimento da linha de base, a qualidade do sistema de comunicação, o cálculo das correções e a taxa de atualização e transferência dos dados (KRUEGER, 1996, p. 53). A precisão alcançada também depende das grandezas observáveis empregadas. Conforme HOFMANN-WELLENHOF et al. (2001, p.137), pode-se obter precisão horizontal de 1 a 5 metros para o posicionamento DGPS com emprego do código C/A e precisão submétrica com o emprego do código suavizado (equação 2.9).

Uma extensão do DGPS é o *Wide Area* DGPS (WADGPS), o qual utiliza um sistema de redes de estações de referência destinadas a cobrir regiões maiores e com maior precisão se comparadas com as estações de referência DGPS individuais, que têm um decréscimo da precisão em função do aumento da linha de base a uma taxa de aproximadamente 10 ppm[15] (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001, p. 137). No WADGPS, a resolução das ambigüidades não é efetivada, permanecendo estas flutuantes[16], provendo precisões na ordem do metro (GAO et al., 1997, p. 1306).

No método diferencial, outras técnicas de posicionamento em tempo real podem ser consideradas: o RTK e o PDGPS, que seguem o mesmo princípio do DGPS contudo recorrem ao uso da medida da fase da onda portadora em vez do código C/A, proporcionando a solução das ambigüidades (seção 2.2.4.2) para a determinação das pseudodistâncias (WÜBBENA e BAGGE, 1995, p. 3).

A técnica PDGPS, assim como o WADGPS, fundamenta-se no conceito de rede de estações de referência em que as correções diferenciais são válidas para uma região e não mais para uma única estação, como no caso do DGPS e RTK. Atualmente, pode-se atingir precisão decimétrica ou melhor em aplicações de

---

[15] 10 ppm: 1 centímetro por quilômetro.

[16] Ambigüidades flutuantes: em oposição ao termo "fixadas", indica que as ambigüidades inteiras não foram identificadas ou resolvidas (STEWART, 2001, p. 10). Neste caso, o programa de processamento estima as ambigüidades como valores reais, isto é, número flutuantes, resultando nas chamadas soluções flutuantes (LANGLEY, 1998, p. 7).

posicionamento em tempo real (KRUEGER et al., 2000), sendo alcançada somente por métodos diferenciais como o RTK e o PDGPS.

2.2.4.1 Particularidades da técnica RTK

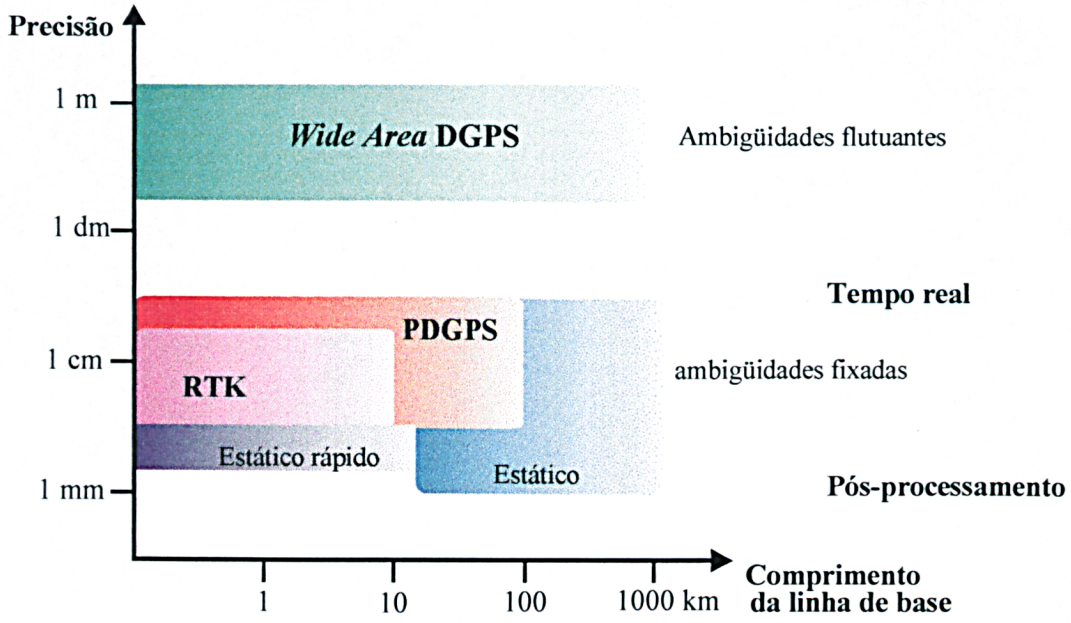
A técnica RTK de posicionamento diferencial tem sido utilizada desde 1985 em aplicações de alta precisão em tempo real. Embora utilize os mesmos fundamentos do DGPS, difere deste pelo tipo de variável observada e em conseqüência pela precisão obtida (MONICO, 2000, p. 217).

O RTK é um processo efetivado por um levantamento ou locação polar tridimensional baseado na determinação de linhas de base que visa a determinação das coordenadas de pontos geográficos (BAUER, 1997, p. 309). Seu fundamento é o cálculo do vetor tridimensional (no sistema de coordenadas cartesianas relativas ao WGS 84) que une o ponto definido pela estação de referência ao ponto ocupado pela estação móvel (STEWART, 2001, p. 3).

A estação de referência transmite informações da fase da portadora em um formato padrão por meio de um enlace (seção 2.3) à estação móvel a fim de que esta determine suas coordenadas precisas em tempo real. Estas informações são observações brutas de fase da portadora (medidas não corrigidas de quaisquer erros) ou correções diferenciais correspondentes a estas observáveis (RTCM, 1998, p. D-1). Conforme WILGALLIS et al. (2002, p. 3), o RTK limita-se a linhas de base entre 5 e 10 km em decorrência do alcance do enlace de comunicação das correções diferenciais e da utilização de apenas uma das portadoras para determinação das pseudodistâncias, ainda que a onda portadora L_2 esteja disponível para acelerar a resolução das ambigüidades.

Na figura 2.7 estão mostradas as principais técnicas de posicionamento relativo e diferencial confrontadas com as precisões obtidas para os comprimentos de linha de base correspondentes.

FIGURA 2.7 – PRECISÃO DO POSICIONAMENTO GPS PARA DIFERENTES COMPRIMENTOS DE LINHA DE BASE

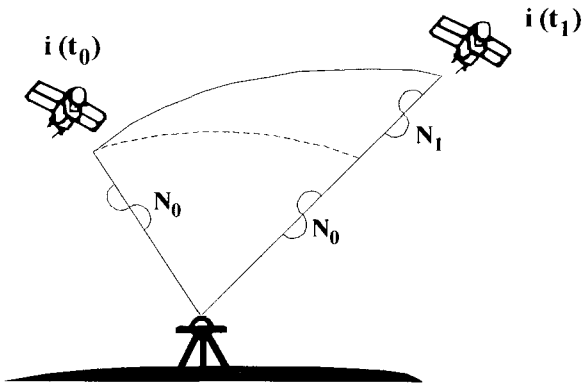


FONTE: WILLGALIS et al. (2002, p. 4).
NOTA: adaptado e traduzido pelo autor.

2.2.4.2 Ambigüidades GPS

No posicionamento GPS, a fase da onda portadora é a observável mais precisa, capaz de conduzir a um posicionamento relativo com precisão milimétrica. Conforme STEWART (2001, p. 10), o problema nas medições de fase da portadora é que elas não fornecem diretamente a informação da distância receptor-satélite, mas a medida da diferença de fase entre o sinal que chega do satélite e um sinal gerado no receptor por um oscilador interno. Estas medidas de fase são registradas no receptor a partir da primeira observação em um dado instante t_0, passando-se a monitorar a variação do número inteiro de ciclos (N_1) após o instante inicial t_0 (figura 2.8).

FIGURA 2.8 – INTERPRETAÇÃO GEOMÉTRICA DA AMBIGÜIDADE GPS



FONTE: o autor.

Contudo, o número de ciclos inteiros (comprimentos de onda) ocorridos na portadora no instante t_0 é desconhecido; logo, a contagem de ciclos obtida (N_0) é um valor ambíguo. Dessa forma, resta a determinação do número efetivo de comprimentos de onda contidos entre o centro de fase da antena do receptor e o centro de fase da antena de cada satélite no instante da primeira observação, incógnita esta denominada ambigüidade GPS (GARNÉS, 2001, p. 2).

O processo de estimação e validação das ambigüidades GPS é comumente denominado na literatura de resolução ou fixação das ambigüidades. A precisão alcançada no RTK e no PDGPS é resultante da capacidade destas técnicas de resolver as ambigüidades em tempo real por estratégias que consistem na determinação inicial das ambigüidades no modo estático e posterior movimentação cinemática da antena, para que a variação da ambigüidade seja monitorada (LANGLEY, 1998, p. 7).

A inicialização, neste método, refere-se à determinação de uma posição de modo que as ambigüidades podem ser mantidas fixadas ao longo do levantamento (ANDRADE, 2001, p. 15). Esta fase de inicialização é crucial para que se determinem as ambigüidades que, uma vez resolvidas, recebem a denominação "fixadas" o que significa que se pode dar o início de um levantamento em tempo real com alta precisão (STEWART, 2001, p. 10).

Em SEEBER (1993, p. 264), encontra-se a descrição dos principais métodos de resolução das ambigüidades GPS. Estes métodos vêm sendo pesquisados desde o

início do programa NAVSTAR-GPS no sentido de aprimorar algoritmos para a resolução confiável e rápida das ambigüidades (BAUER, 1997, p. 221). Tratam-se das técnicas *On The Fly* (OTF), que dispensam a inicialização pelo modo estático (e.g. base de coordenadas conhecidas ou intercâmbio de antenas) e permitem a resolução das ambigüidades enquanto o receptor está em movimento, como é o caso de levantamentos cinemáticos realizados no âmbito marinho (KRUEGER, 1996, p. 55).

Um fator importante nos levantamentos em tempo real é o tempo demandado por estes sistemas para realizar o processo de inicialização, principalmente durante a ocorrência de perdas de sinal[17]. Este período é denotado pela sigla TTFA (tempo de fixação das ambigüidades) e depende não apenas do desempenho do algoritmo mas principalmente das condições físicas (e.g., multicaminho e obstáculos aos sinais de correção) sob as quais as ambigüidades GPS podem ser resolvidas corretamente pelas técnicas OTF (LEICK, 1995, p. 384). Essas limitações são imperativas na precisão da técnica RTK e são comentadas na seção 2.2.4.3.

2.2.4.3 Condicionantes da precisão da técnica RTK

A precisão alcançada no posicionamento RTK é condicionada pela capacidade deste técnica em resolver as ambigüidades em tempo real, que depende dos fatores mencionados e comentados a seguir (LEICK, 1995, p. 384):

a) comprimento da linha de base;
b) disponibilidade de dupla freqüência;
c) número de satélites rastreados;
d) efeito multicaminho;
e) ocorrência de perdas de sinal.

[17] Perdas de sinal ou *cycle slips* (ingl.): é a perda do sinal do(s) satélite(s) causada por obstruções à antena do receptor ou por outros fatores associados, a qual provoca um salto repentino de um número inteiro de ciclos na onda portadora sem alterar a parte fracional (LEICK, 1995, p. 352).

2.2.4.3.1 Comprimento da linha de base

O afastamento da estação móvel em relação à estação de referência é uma circunstância operacional nos levantamentos RTK, traduzido pelo aumento do vetor linha de base. Em linhas de base curtas (não maiores que 10 km), as técnicas OTF negligenciam o efeito dos erros orbitais e ionosféricos devido à similaridade das condições observadas por ambas as estações, de modo a resolver as ambigüidades com rapidez (HAN e RIZOS, 2000, p. 17). Na medida em que o comprimento da linha de base aumenta, as condições de rastreio começam a diferir e os erros atmosféricos se acumulam, dificultando a resolução das ambigüidades (STEWART, 2001, p. 9).

Dessa forma, a precisão de vetores longos (acima de 10 km) é limitada pelos erros atmosféricos e pelos erros de efemérides (LEICK, 1995, p. 392). Conforme WÜBBENA et al. (1996, p. 1846), é possível reduzir algumas fontes de erros como os erros de relógio, os erros de efemérides e os erros da refração atmosférica; no entanto, os erros dependem do comprimento da linha de base e limitam a precisão em 1 a 10 ppm.

2.2.4.3.2 Disponibilidade de dupla freqüência

A resolução das ambigüidades é melhorada com a utilização de combinações lineares entre as grandezas observáveis L1 e L2 (WALSH et al., 1995, p. 315). Ademais, a segunda freqüência (L2) auxilia na geração de novas observáveis (e.g., L_N e L_W) úteis à neutralização do efeito da ionosfera na propagação do sinal GPS (LEICK, 1995, p. 294).

2.2.4.3.3 Quantidade de satélites rastreados

Em experiências realizadas por LEMMON e GERDAN (1999, p. 69), constatou-se que o aumento da quantidade de satélites não contribui na precisão do posicionamento, mas melhora a confiabilidade na resolução das ambigüidades. Os satélites da constelação GLONASS também podem ser usados para o posicionamento RTK em um método integrado com os satélites GPS de forma que aumenta a

quantidade de observações para melhorar a precisão e a resolução rápida das ambigüidades (EL-MOWAFY, 2000, p. 48).

2.2.4.3.4 Efeito multicaminho

O efeito multicaminho pode produzir falhas no processamento de modo que este resolva erroneamente uma ambigüidade. No algoritmo matemático para resolução de ambigüidades, parte dos testes estatísticos que aceitam um conjunto de ambigüidades como sendo corretas assume que todos os erros associados aos dados têm distribuição normal, o que não é o caso se erros sistemáticos, e.g., os erros provenientes do efeito multicaminho estiverem presentes nos dados (STEWART, 2001, p. 11). Segundo EDWARDS et al. (1999, p. 167), o TTFA fica em torno de dois minutos para operações conduzidas sob condições ótimas, i.e., ausência de efeito multicaminho ou obstruções do sinal GPS.

2.2.4.3.5 Ocorrência de perdas de sinal

A ocorrência de perdas de sinal em levantamentos de alta precisão também dificulta o cálculo e o controle das ambigüidades (LEICK, 1995, p. 384). Se ocorrer perda de sinal dos satélites, no caso de obstrução total da antena do receptor, há a necessidade da completa inicialização (KRUEGER, 1996, p. 27). Em experiências realizadas por EDWARDS et al. (1999, p. 171), constatou-se que a fixação das ambigüidades é dificultada em ambientes onde o sinal GPS é degradado ou parcialmente degradado, e.g., quando a estação móvel opera sob cobertura vegetal, conduzindo a um maior TTFA.

2.3 TRANSMISSÃO E FORMATO DAS CORREÇÕES DIFERENCIAIS

Para o estabelecimento do enlace de dados nos métodos diferenciais GPS (seção 2.2.4) foi necessário desenvolver recomendações para a transmissão das correções diferenciais aos usuários do sistema. Esta tarefa foi destinada a *Radio Technical Comission for Maritime Services* (RTCM) a serviço do *US Institute of Navigation* (ION) (KRUEGER, 1996, p. 64). A seguir são apresentadas as características da transmissão e do formato destas correções.

2.3.1 Transmissão das Correções Diferenciais

No DGPS em tempo real, as correções diferenciais têm que ser transmitidas da estação de referência para a estação móvel por meio de um enlace. São utilizados rádios transmissores operando com taxa de transmissão de pelo menos 50 bits por segundo, conforme recomendação da RTCM SC-104 (BAUER, 1997, p. 246). As operações DGPS encontram-se entre as faixas de freqüência VHF e UHF e caracterizam-se pelo baixo custo, baixa potência e taxa de transferência elevada. No quadro 2.3, observa-se a precisão obtida correspondente ao comprimento da linha de base e às freqüências de transmissão e de recepção empregadas.

QUADRO 2.3 – PRECISÃO E FREQÜÊNCIA NO DGPS

<table>
<tr><th>DISTÂNCIA</th><th colspan="5">PRECISÃO DESEJADA</th></tr>
<tr><th></th><th>100 m</th><th>10 m</th><th>10 - 3 m</th><th>3 - 1 m</th><th>< 10 cm</th></tr>
<tr><td>1000 km</td><td rowspan="4">DGPS
não
necessário</td><td>BANDA-L
(INMARSAT)
1200 bps</td><td rowspan="2">BANDA-L
(INMARSAT)</td><td rowspan="3">BANDA-L
(INMARSAT)</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td>< 700 km</td><td>BANDA-LF
ca. 50 bps</td></tr>
<tr><td>< 300 km</td><td>BANDA-MF
(BANDA HF)
200 bps</td><td>BANDA-MF
BANDA HF</td></tr>
<tr><td>20 - 50 km
sinal de
linha</td><td>BANDA
VHF/UHF
2400 bps</td><td>BANDA
VHF/UHF</td><td>BANDA
VHF/UHF</td><td>BANDA
VHF/UHF</td></tr>
</table>

FONTE: HEIMBERG[18] apud KRUEGER (1996, p. 81).
NOTA: adaptado pelo autor.

[18] HEIMBERG, F. (1994). **Untersuchungen zum operationellen Einsatz des Differential GPS.** Doktor dissertation, Nr.202. Institut für Erdmessung, Universität Hannover, Hannover.

Conforme TALBOT (1996, p. 861), as opções de enlace que podem ser usados para a transmissão de dados nas técnicas diferenciais são:

a) rádio/modem;

b) linha telefônica;

c) sub-portadora FM (RDS);

d) satélites.

O alcance que o enlace proporciona ao RTK impõe a distância que uma estação móvel pode operar de uma estação de referência (TALBOT, 1996, p. 863). A operação nas freqüências VHF e UHF limita seu uso à linha de visada "d" cujo valor aproximado pode ser dado pela equação (LANGLEY, 1998):

$$d = 3{,}57\sqrt{k}\left(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}\right), \qquad (2.12)$$

onde:

d : alcance do sinal em quilômetros;

h_t : altura em metros da antena transmissora;

h_r : altura em metros da antena receptora[19];

k : fator de influência da refração atmosférica (k = 1,33 para climas temperados).

2.3.1.1 Faixas de freqüência de rádio

As possíveis faixas de freqüência para serem utilizadas no DGPS são mostradas no quadro 2.4, e a seguir são apresentadas suas principais características (KRUEGER, 1996, p. 76).

[19] As alturas das antenas transmissora (h_t) e receptora (h_r) devem ser medidas em relação a um plano de referência, acima de um horizonte comum.

QUADRO 2.4 – FAIXAS DE FREQÜÊNCIA DE RÁDIO

FAIXA / DENOMINAÇÃO	FREQÜÊNCIAS	COMPRIMENTOS DE ONDA
ELF *(Extremely Low Frequency)*	< 3 kHz	>100000 m
VLF *(Very Low Frequency)*	3 – 30 kHz	100000 – 10000 m
LF *(Low Frequency)*	30 – 300 kHz	10000 – 1000 m
MF *(Medium Frequency)*	300 – 3000 kHz	1000 – 100 m
HF *(High Frequency)*	3 – 30 MHz	100 – 10 m
VHF *(Very High Frequency)*	30 – 300 MHz	10 – 1 m
UHF *(Ultra High Frequency)*	300 – 3000 MHz	1 – 0,1 m
SHF *(Super High Frequency)*	3 – 30 GHz	0,1 – 0,01 m
EHF *(Extremely High Frequency)*	> 30 GHz	0,01 – 0,001 m

FONTE: KRUEGER (1996, p. 75).

A **freqüência baixa** é caracterizada por ondas longas (LF) cuja energia se propaga em ondas terrestres que acompanham a curvatura da Terra. Sua energia é reduzida rapidamente tendo em vista que os obstáculos a absorvem. Logo, não são eficazes para a transmissão em grandes distâncias, chegando a 150 km sobre a água e de 20 a 100 km sobre a terra.

A **freqüência média** é caracterizada por ondas médias (MF), e nela encontram-se principalmente a transmissão de rádios AM e enlaces diferenciais em radiofaróis aeronáuticos e radiofaróis marítimos. Alcances em torno de 400 km sobre a água e 50 km em terra.

A **alta freqüência** caracteriza-se por ondas médias-curtas (HF) e opera com freqüências superiores a 25 MHz, o que permite vencer distâncias próximas a 10 km e, em freqüências de 3 MHz, o alcance supera 100 km.

Na faixa de **freqüência muito alta** (VHF) **e ultra-alta** (UHF), os sinais propagam-se ao longo da linha de visada entre as antenas transmissora e receptora, tornando o alcance dependente da distância "horizonte rádio", da potência da emissão, das condições meteorológicas e da topografia do terreno. Os enlaces que empregam estas faixas, se comparados com os das faixas LF/MF, são mais simples e baratos, requerem menos potência e possibilitam o uso de taxas de transmissão de dados mais elevadas (até 9600 bps), razão pela qual são usadas para os enlaces de dados nos métodos diferenciais GPS.

As **microondas (SHF, EHF)** são utilizadas somente em conexão com satélites de comunicação (e.g., INMARSAT[20]) para transmissão de dados em longas distâncias, exigindo taxas elevadas de transmissão e alto custo.

2.3.1.2 Considerações sobre o enlace de comunicação

Conforme RIZOS e HAN (1998, p. 13), existe uma complexa relação entre a altura de transmissão da antena, o tipo de antena usada (yagi[21] ou omnidirecional), a potência de transmissão, o comprimento do cabo, a cobertura de árvores ou outros objetos intermediários e o alcance do rádio. Em DRANE e RIZOS (1998, p. 212) são citadas algumas considerações sobre o enlace de comunicação, dentre elas:

Cobertura – depende da freqüência de transmissão usada pelo rádio, da distribuição e do espaçamento dos transmissores, da potência de transmissão, da vulnerabilidade de enfraquecimento do sinal e da interferência entre outros fatores;

Tipo de serviço – podem ser serviços fechados, disponíveis somente a usuários selecionados (serviço por assinatura) ou serviços abertos de difusão.

Funcionalidade – inclui as características do enlace, se é um enlace de comunicação de uma ou duas direções, o período de serviço, se é contínuo ou intermitente, se outros dados são também transmitidos.

Confiabilidade – compreende a aceitabilidade provida pelo enlace em face do tempo de cobertura, da degradação gradual do enlace e da ocorrência de interrupções.

Integridade – importante em aplicações críticas, pois qualquer erro em mensagens transmitidas deve ser detectado com alta probabilidade e alertar os usuários.

Custo – inclui o investimento alto, tanto ao provedor do serviço quanto aos usuários.

Taxa de dados – em geral, quanto mais rápida a taxa de dados maior é a taxa de atualização para correções diferenciais, e por isso melhor a precisão do

---

[20] INMARSAT: *International Maritime Satellite*. Sistema de transmissão de correções DGPS baseado em satélites geoestacionários (HOFMANN-WELLENHOF, 2001, p. 138).

[21] Yagi: antenas direcionais; omnidirecionais: antenas verticais, irradiam em todas as direções perpendiculares ao eixo da antena.

posicionamento. Normalmente, a transmissão de um conjunto de mensagens de correção com uma taxa de poucos segundos é aceitável. Conforme KRUEGER (1996, p. 54), para se obter uma precisão submétrica é desejável que a taxa de transferência de dados seja de 1 a 2 segundos.

Latência – refere-se ao tempo de defasagem entre o cálculo das mensagens de correção e a recepção da mensagem no receptor móvel, devendo ser o menor possível (menor que 5 segundos é sugerido) (DRANE e RIZOS, 1998, p. 212).

Com respeito ao envio dos dados de correção em tempo real ressaltam-se as seguintes distinções: *up link* e *down link* (BAUER, 1997, p. 238). Na modalidade *up link*, os valores de correção gerados na estação de referência são disponibilizados à estação usuária por telemetria em tempo real, corrigindo sua posição diferencialmente. Na modalidade *down link*, a estação móvel envia seus dados brutos à estação de referência na qual são geradas as correções para as coordenadas daquela estação, permanecendo estes dados na estação de referência. Esta aplicação pode ser exemplificada no monitoramento de patrulhas em centrais de serviços policiais.

2.3.2 Mensagens RTCM

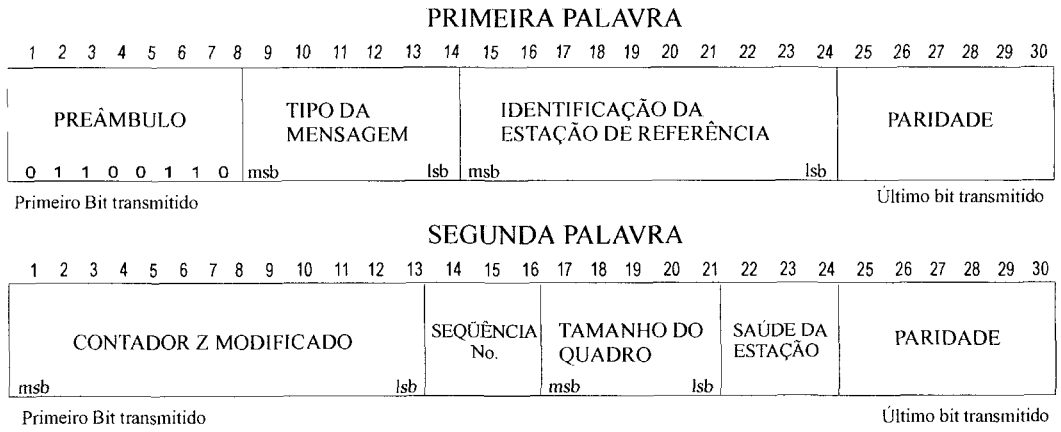
Em 1985, o Comitê Especial 104 (SC–104) da RTCM publicou a 1ª versão de suas recomendações designada RTCM v. 1.0 e posteriormente, em 1990, foi licenciada a versão RTCM 2.0 a qual foi substituída em 1994 pelo formato RTCM v. 2.1. A versão licenciada 2.2 é a atual versão em uso e, embora tenha sido desenvolvida para aplicações marítimas, é encontrada em quase todos os campos de aplicação DGPS (BAUER, 1997, p. 240).

São previstos 64 tipos de mensagens, identificadas por seus números de reconhecimento e enquadradas em três condições: algumas mensagens são definitivas ou fixas, outras têm caráter provisório ou de tentativa e outras são mensagens que foram retiradas das versões mais recentes. As demais mensagens permanecem reservadas para aplicações futuras.

O formato das mensagens RTCM segue a mesma estrutura das mensagens de navegação GPS (BAUER, 1997, p. 244), porém aquelas utilizam um comprimento variável para o formato (dependente do número de satélites rastreados), enquanto estas têm um comprimento fixo (KRUEGER, 1996, p. 65).

Cada um dos tipos de mensagem RTCM é formado por uma quantidade de N+2 palavras com tamanho de 30 bits cada, sendo N a quantidade de palavras que contém dados na mensagem. Na figura 2.9 estão representadas as duas primeiras palavras de cada mensagem que constituem o seu cabeçalho e que contêm dados de mesma natureza para todos os tipos de mensagem: as informações sobre a estação de referência, o tempo de referência e as informações necessárias à sincronização da mensagem pelo usuário (RTCM, 1998, p. 4-2).

FIGURA 2.9 – CABEÇALHO DAS MENSAGENS RTCM



FONTE: RTCM (1998, p. 4-3).
NOTA: adaptado pelo autor.

No quadro 2.5 estão listados os tipos de mensagem, a condição atual e o conteúdo de cada mensagem. A seguir são descritos alguns tipos de mensagem RTCM.

QUADRO 2.5 – TIPOS DE MENSAGEM RTCM v.2.2

TIPO DE MENSAGEM	CONDIÇÃO ATUAL	CONTEÚDO DA MENSAGEM
1	Fixa	Correções diferenciais GPS
2	Fixa	Correções delta diferenciais GPS
3	Fixa	Parâmetros da estação de referência
4	Tentativa	Datum da estação de referência
5	Fixa	Saúde da constelação GPS
6	Fixa	Quadro nulo
7	Fixa	Almanaque dos Radiofaróis – DGPS
8	Tentativa	Almanaque das estações de pseudosatélites
9	Fixa	Correções DGPS - conjunto parcial de satélites
10	Reservada	Correções diferenciais para o código P
11	Reservada	Correções delta diferenciais do código C/A para L_1, L_2
12	Reservada	Parâmetros das estações de pseudosatélite
13	Tentativa	Parâmetros da estação de transmissão
14	Tentativa	Informações da semana GPS
15	Tentativa	Informações sobre ionosfera
16	Fixa	Mensagem especial GPS
17	Tentativa	Efemérides GPS
18	Fixa	Medidas não corrigidas das fases da portadora (RTK)
19	Fixa	Medidas não corrigidas das pseudodistâncias (RTK)
20	Tentativa	Correções de fase da portadora (RTK)
21	Tentativa	Correções de pseudodistância (RTK)
22	Tentativa	Parâmetros da estação de referência
23-30	--	Indefinidas
31-36	Tentativa	Mensagens GLONASS
37	Tentativa	Parâmetros do sistema de tempo
59	Fixa	Uso privado
60 – 63	Reservada	Uso múltiplo

FONTE: RTCM (1998, p. 4-6).
NOTA: adaptado e traduzido pelo autor.

Mensagem tipo 1: Correções Diferenciais DGPS – fornece os dados para as correções das pseudodistâncias a serem aplicadas pelos usuários e contém informações para todos os satélites observados na estação de referência. É uma das mensagens mais importantes para a realização do DGPS.

Mensagem tipo 2: Correções Delta DGPS – é transmitida junto com a mensagem tipo 1 para corrigir a posição do usuário com dados antigos de navegação, no caso em que os dados recentes dos satélites já existam na estação de referência para seus cálculos diferenciais, mas não puderam ser recebidos, decodificados e implementados na estação usuária.

Mensagem tipo 3: Parâmetros da estação de referência – contém as coordenadas da estação de referência no sistema WGS84.

Mensagem tipo 5: Saúde dos satélites – fornece informações sobre a saúde e identificação dos satélites. A estação de referência pode reconhecer mais rápido perturbações nos satélites em casos isolados.

Mensagem tipo 7: Almanaque de rádio transmissão – provê informações para uma rede de transmissão, relacionadas à qualidade de transmissão de correções DGPS para estações disponíveis.

Mensagem tipo 15: Parâmetros ionosféricos e troposféricos – reservada aos parâmetros a serem definidos para os modelos ionosféricos e troposféricos.

Mensagens tipo 18 e 19: RTK – fornecem as medidas da fase das portadoras L1 e L2 e as medidas de pseudodistância, respectivamente (medidas não corrigidas de quaisquer erros); estas mensagens foram introduzidas para viabilizar as aplicações cinemáticas em tempo real de alta precisão.

Mensagens tipo 20 e 21: RTK – fornecem os valores de correção para a medida da fase das portadoras L1 e L2 e os valores de correção para a pseudodistância, respectivamente.

A versão ampliada RTCM++, compatível com as versões RTCM v. 2.0, v. 2.1 e v. 2.2, foi desenvolvida com o propósito de possibilitar a transmissão de correções diferenciais da fase da portadora de até 12 satélites em uma saída de 2400 bps de dados na forma compactada contra 9600 bps, exigidos pelas informações brutas (WÜBBENA e BAGGE, 1995, p. 5). Por meio de um mecanismo de compactação, as informações das mensagens 20 e 21 são armazenadas na mensagem tipo 59 que por sua vez é transmitida a cada segundo à estação móvel (WÜBBENA et al., 1996, p. 1847). Esta versão está implementada no programa GNRT e tem sido amplamente utilizada nos levantamentos PDGPS em tempo real (KRUEGER, 1996, p. 72).

3 LEVANTAMENTOS REALIZADOS

3.1 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

Para cumprir as metas expostas na seção 1.3, definiu-se uma área experimental no domínio urbano da cidade de Curitiba e circunscrita ao Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, local em que se encontra o Laboratório de Geodésia Espacial (LAGE) cujas instalações serviram para se efetuar o controle e a manutenção das estações de referência.

Esta área, que se extende ao longo da Rodovia BR 277 até o município de Campo Largo, é caracterizada pela presença de edifícios altos, torres, equipamentos urbanos, bem como depressões de relevo. Estes aspectos conduzem, de forma geral, à condições desfavoráveis aos sistemas de comunicação que empregam a faixa de freqüência UHF/VHF (seção 2.3.1.1) utilizados atualmente no posicionamento GPS em tempo real para efetivar os enlaces de correções diferenciais.

A rede de estações relativas utilizadas neste trabalho (descritas nas seções 3.1.2 e 3.1.3) foi composta por marcos geodésicos monumentados na região central e metropolitana da cidade de Curitiba, aproveitando-se as estruturas já existentes.

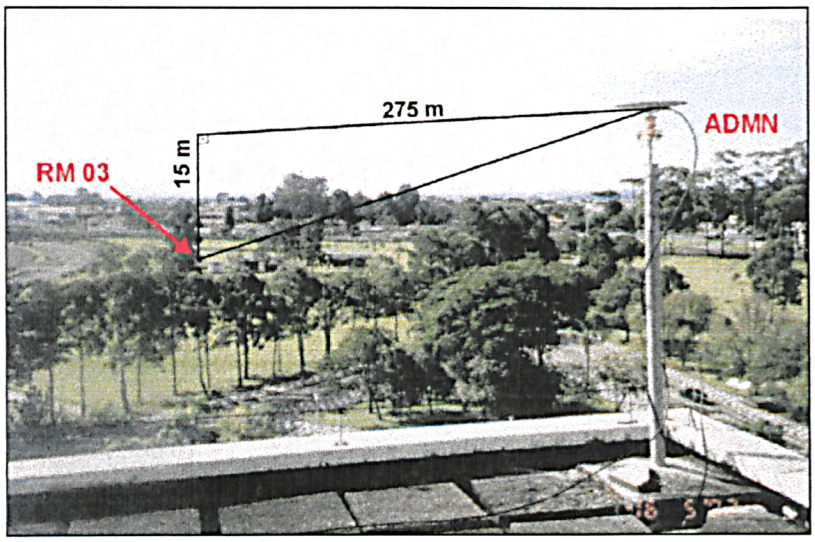
3.1.1 Estações de Referência RM03 e ADMN

Foram utilizados dois marcos definidores das estações de referência para os levantamentos pela técnica RTK: RM03 e ADMN. O marco RM03 é constituinte da rede SIRGAS e excêntrico ao marco PARA[22]. Na seqüência, o marco ADMN consiste de um ponto materializado por uma haste metálica, localizada sobre a laje de cobertura do edifício da administração do Centro Politécnico, cujas coordenadas foram determinadas conforme os procedimentos reportados na seção 3.2. Estes marcos estão

[22] PARA: estação Paraná, pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). A RBMC é uma rede ativa de coleta permanente de dados GPS composta atualmente por 11 estações. Ela faz parte do SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – que utiliza os parâmetros do elipsóide GRS 80 (IBGE, 1997, p. 1). O WGS 84 possui características muito próximas ao SIRGAS, podendo ser considerados como equivalentes para fins de cartografia (DALAZOANA, 2001, p. 43).

separados por uma distância horizontal de aproximadamente 275 metros e apresentam uma diferença altimétrica de cerca de 15 metros. A figura 3.1 ilustra a localização destes marcos cujas coordenadas referenciadas no WGS 84 e os respectivos desvios padrão estão indicados no quadro 3.1.

FIGURA 3.1 – MARCOS DE REFERÊNCIA RM03 E ADMN



QUADRO 3.1 – COORDENADAS DOS MARCOS DE REFERÊNCIA RM03 e ADMN (WGS 84)

MARCO	LATITUDE φ	σ_φ (m)	LONGITUDE λ	σ_λ (m)	h (m)	σ_h (m)
RM03[23]	-25° 26' 54,5685"	0,003	-49° 13' 52,2108"	0,003	923,785	0,004
ADMN	-25° 27' 02,22386"	0,001	-49° 13' 55,57402"	0,001	939,490	0,001

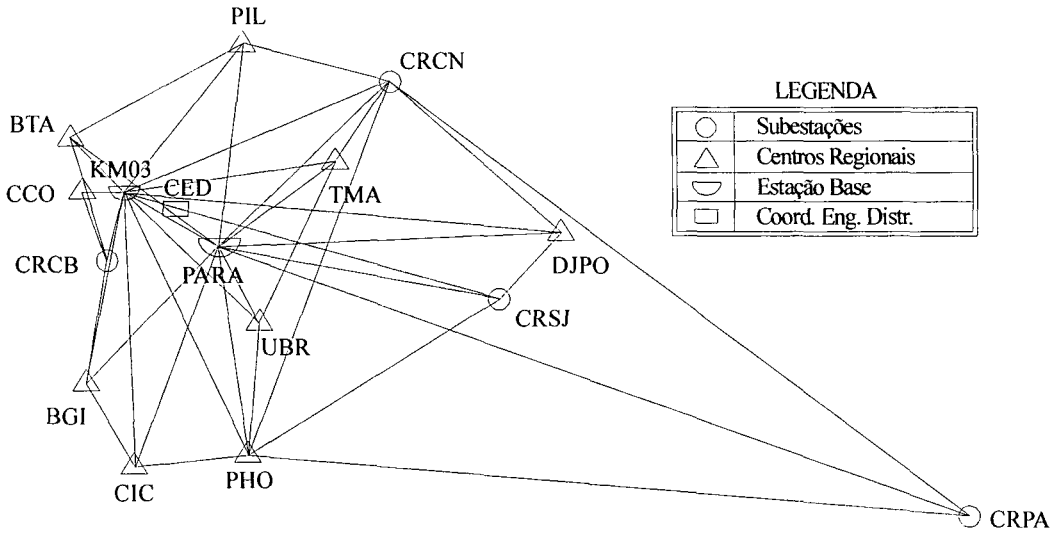
3.1.2 Rede Geodésica GPS/COPEL

A rede geodésica GPS/COPEL (figura 3.2) foi estabelecida em 1998 com o objetivo de disponibilizar à Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL) suas próprias estações base para levantamentos cadastrais de postes e de linhas de transmissão com o uso do GPS. Estas estações encontram-se nas dependências das

[23] IBGE (1997, p. 59).

subestações e dos centro regionais, monumentadas diretamente no solo e na cobertura dos edifícios ou na caixa d'água dos edifícios, respectivamente.

FIGURA 3.2 – REDE GEODÉSICA GPS/COPEL



FONTE: CUNHA (1997, p. 23).
NOTA: adaptado pelo autor.

As estações materializadas no solo constituem-se de estruturas tronco-piramidais de concreto (figura 3.3) ao passo que as estações dos centros regionais foram materializadas em pilares com sistema de centragem forçada. Todas as estações estão localizadas próximas a estruturas metálicas e a linhas de transmissão[24], o que sugere a vulnerabilidade do posicionamento GPS de alta precisão ao efeito de multicaminho dos sinais (seção 2.1.4.3), que causam erros no posicionamento.

Estas estações foram submetidas à ocupação pelo método estático para a determinação de coordenadas precisas (seção 3.2), que serviram particularmente para a realização deste trabalho. O quadro 3.2 mostra a identificação, a descrição e a localização das estações da rede geodésica GPS/COPEL.

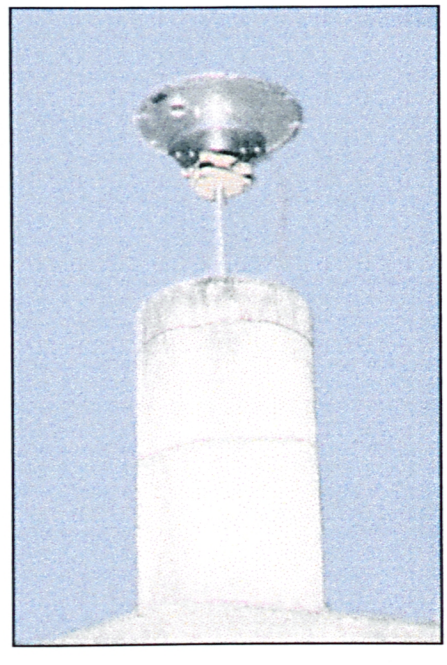
[24] Linhas de transmissão: em experimentos realizados por ALSALMAN (2001) para verificar os efeitos potenciais de linhas elétricas sobre a precisão do posicionamento com o GPS, foi constatado que os campos elétricos e magnéticos criados pela alta tensão não afetam os dados GPS, mas podem afetar os receptores. Assim, recomenda-se que, durante as observações GPS realizadas próximas a linhas de alta voltagem, mais atenção deva ser dada ao efeito multicaminho causado pelas torres e condutores do que pelo próprio efeito da alta voltagem.

QUADRO 3.2 – DESCRIÇÃO DAS ESTAÇÕES DA REDE GEODÉSICA GPS/COPEL

SIGLA	DESCRIÇÃO	BAIRRO	CIDADE
PARA	Universidade Federal do Paraná	Jardim das Américas	Curitiba
KM03	Prédio da Copel	Campo Comprido	Curitiba
UBR	Subestação Uberaba	Uberaba	Curitiba
TMA	Subestação Tarumã	Tarumã	Curitiba
PHO	Subestação Pinheirinho	Pinheirinho	Curitiba
CIC	Subestação Cidade Industrial	CIC	Curitiba
CCO	Subestação Campo Comprido	Campo Comprido	Curitiba
BGI	Subestação Barigüi	Barigüi	Curitiba
DJPO	Fábrida da Renault	Distrito Industrial	Curitiba
CRSJ	Prédio do Centro Reg. S. Jsé Pinhais	Centro	São José dos Pinhais
PIL	Subestação Pilarzinho	Pilarzinho	Curitiba
CRCN	Prédio do Centro Regional Atuba	Atuba	Curitiba
CED	Prédio da Coord. de Eng. de Distrib.	Centro	Curitiba
BTA	Subestação Bateias	Bateias	Curitiba
CRPA	Prédio do Centro Region. Paranaguá	Centro	Paranaguá
CRCB	Prédio da Superint.de Distrib. Leste	Santa Quitéria	Curitiba

FONTE: CUNHA (1997, p. 23).

FIGURA 3.3 – MARCOS DA REDE GPS/COPEL



3.1.3 Marcos Introduzidos

Em adição aos marcos da rede GPS/COPEL, optou-se pelo emprego de um conjunto de marcos implantados no ano de 2001 por PRADO (2001, p. 51), cujas coordenadas geodésicas foram determinadas em seu trabalho de dissertação. Esta estratégia visou ampliar a quantidade de estações relativas a serem ocupadas e expandir as possibilidades de estudos da técnica RTK em linhas de base com diferentes comprimentos, dispostas em intervalos sucessivos de aproximadamente 5 quilômetros.

PRADO (2001, p. 51) empreendeu o planejamento, a monumentação de alguns desses pontos e a determinação de suas coordenadas. Estes pontos encontram-se materializados por pilares de centragem forçada, marcos tronco-piramidais ou parafusos cravados no asfalto das vias de acesso. A identificação e os dados relativos a estes marcos estão indicados no quadro 3.3.

QUADRO 3.3 – COORDENADAS GEODÉSICAS DOS MARCOS INTRODUZIDOS (WGS 84)

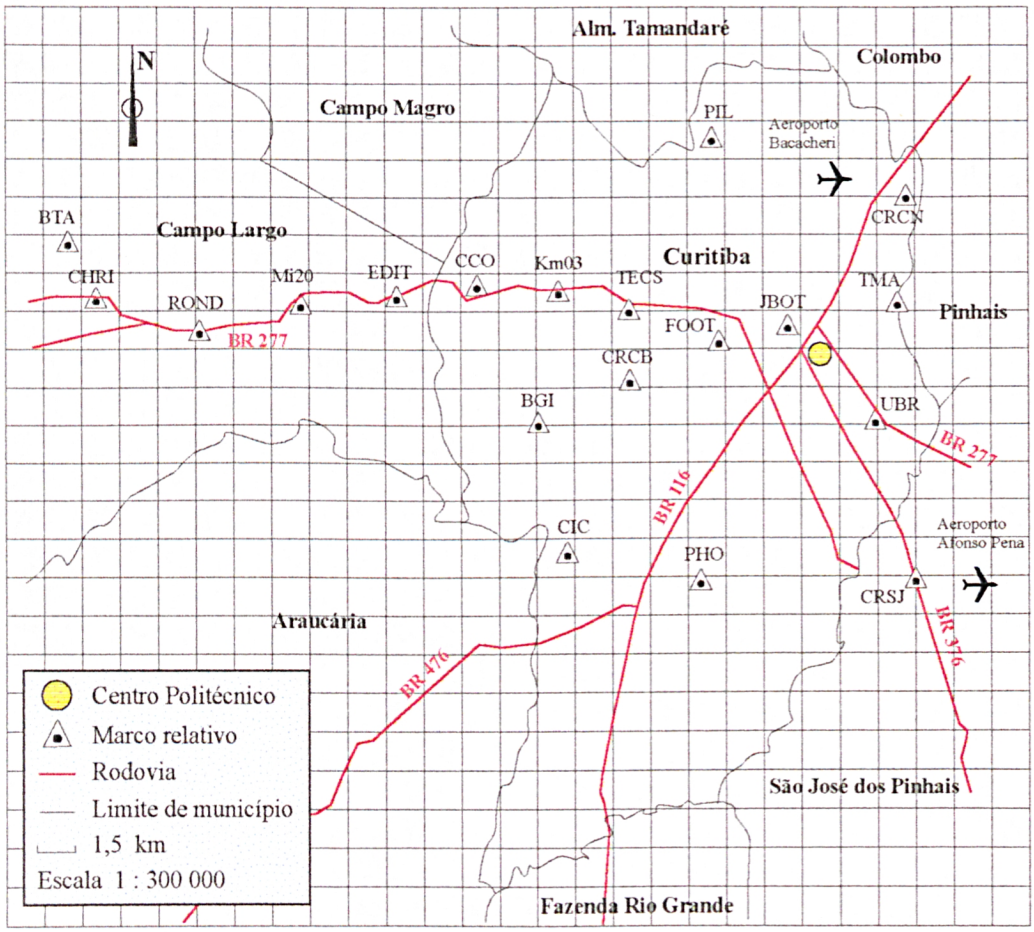
ID	φ σ (mm)	λ σ (mm)	h (m) σ (mm)	CLB (km)
AZMT	-25° 26' 48,128610" 0,3	-49° 13' 53,991092" 0,3	928,3394 0,6	0,197959
PIL2	-25° 27' 15,669427" 0,2	-49° 14' 11,549405" 0,2	912,3936 0,6	0,868968
PIL3	-25° 27' 23,735375" 0,3	-49° 14' 14,945731" 0,3	912,3819 0,7	1,123115
JBOT	-25° 26' 35,199218" 0,4	-49° 14' 41,036351" 0,5	927,9863 1,1	1,503246
FOOT	-25° 27' 00,706600" 0,3	-49° 16' 23,265242" 0,3	906,6903 0,7	4,246740
TECS	-25° 26' 14,376677" 0,3	-49° 18' 37,339822" 0,3	925,2468 0,8	8,081348
KM03	-25° 25' 50,846731" 0,4	-49° 20' 18,461702" 0,7	941,9537 1,4	10,987837
EDIT	-25° 25' 58,542683" 1,9	-49° 24' 04,905515" 13,2	956,5855 4,7	17,225975
ROND	-25° 26' 50,570655" 1,6	-49° 28' 42,254513" 6,1	964,9723 4,4	24,888963
CHRI	-25° 26' 07, 030755" 1,9	-49° 31' 09,310125" 12,3	986,8656 4,4	29,034979

FONTE: PRADO (2001, p. 55).
NOTA: CLB – comprimento da linha de base em relação ao marco RM03.

3.1.4 Configuração da Rede de Marcos

Dentre os marcos supracitados em 3.1.2 e 3.1.3, foram selecionados os que estão em conformidade com os aspectos da distribuição em relação à localização dos vértices de referência e da viabilidade de acesso aos marcos. A rede foi composta por onze marcos da rede geodésica GPS/COPEL, por 10 marcos implantados por PRADO (2001) e por um marco implantado pelo autor (MI20) para suprir a inexistência de uma linha de base de 20 km. A figura 3.4 ilustra a distribuição geométrica da malha de pontos que se encontram no quadro 3.4 dispostos em seqüência crescente das suas correspondentes linhas de base e os azimutes com relação ao marco RM03.

FIGURA 3.4 – DISTRIBUIÇÃO GEOMÉTRICA DOS MARCOS DA REDE



NOTA: Os marcos PARA, RM03, ADMN, AZMT, PIL2 e PIL3 encontram-se no *Campus* do Centro Politécnico da UFPR.

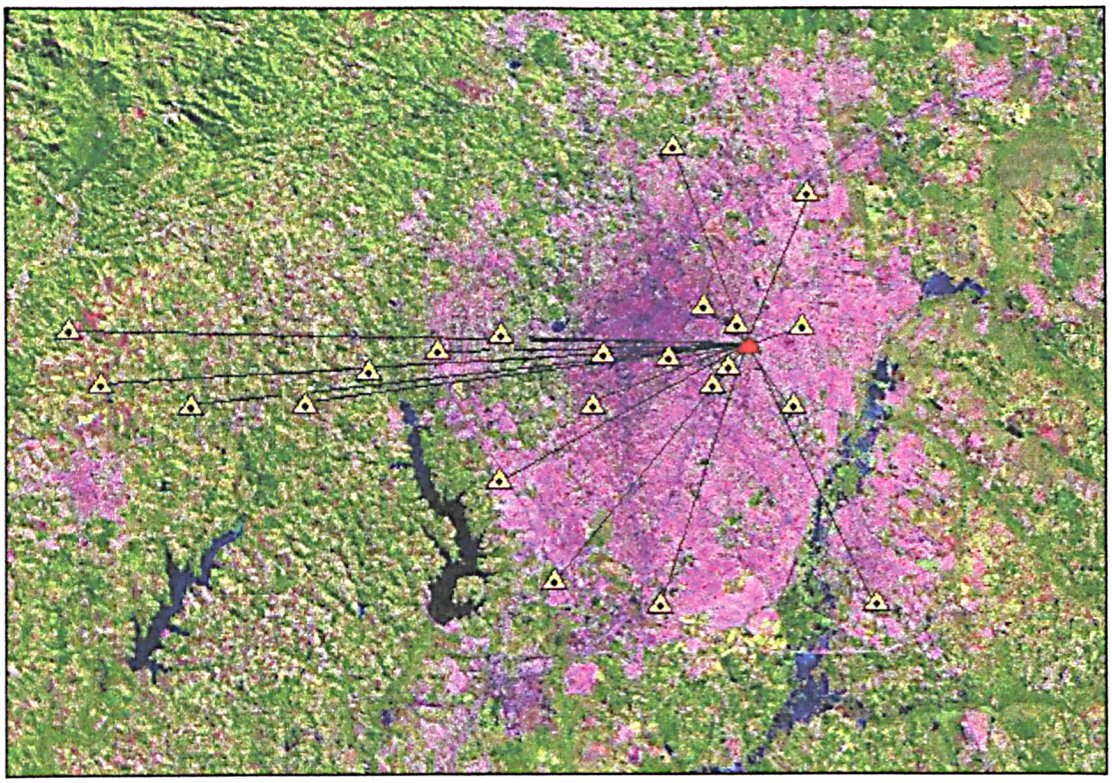
QUADRO 3.4 – DESCRIÇÃO DAS MARCOS RELATIVOS

MARCO	Az (graus)	CLB (km)	MARCO	Az (graus)	CLB (km)	MARCO	Az (graus)	CLB (km)
AZMT	310	0,2	PIL2	275	0,9	PIL3	275	1,0
JBOT	312	1,5	TMA	57	3,5	UBR	141	3,8
FOOT	276	4,2	CRCN	28	6,9	CRCB	263	7,9
TECS	289	8,1	PIL	333	9,5	CRSJ	157	10,4
KM03	283	11,0	PHO	200	11,0	BGI	255	11,8
CIC	231	13,3	CCO	280	14,1	EDIT	278	17,2
MI20	275	20,9	ROND	272	24,9	CHRI	274	29,0
BTA	278	30,4						

NOTA: CLB – comprimento da linha de base em relação ao marco RM03.

A figura 3.5 ilustra uma imagem de satélite na qual foram representados os marcos relativos e as respectivas linhas de base com relação ao marco RM03. Nota-se que estes marcos estão distribuídos pela mancha urbana da cidade de Curitiba e região metropolitana e estendem-se ao longo da BR 277 em direção ao município vizinho de Campo Largo.

FIGURA 3.5 – POSIÇÃO DOS MARCOS EM IMAGEM DE SATÉLITE



NOTA: Landsat, 2000.

3.2 DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS GEODÉSICAS DOS MARCOS GPS/COPEL E MI20

As análises realizadas neste trabalho consistem essencialmente da comparação dos valores das coordenadas obtidos em tempo real pela técnica RTK com os valores das coordenadas de referência dos marcos. Foram utilizadas as estruturas físicas dos marcos da rede geodésica GPS/COPEL e determinadas as coordenadas precisas dos marcos de interesse para uso neste trabalho.

Para isso foi realizado, em uma primeira etapa, um posicionamento relativo nas estações GPS/COPEL com a técnica estática. A campanha foi organizada de modo que se realizou pelo menos duas ocupações em cada marco, em diferentes períodos, visando garantir a repetibilidade das observações e possibilitar um ajustamento das soluções obtidas com cada uma das ocupações.

Os levantamentos estáticos foram procedidos entre 16 e 24 de julho de 2001. Foram utilizados os seguintes instrumentos: um receptor geodésico de dupla freqüência Ashtech Z-XII; um conjunto de tripé, base para antena e prumo em bolha; uma régua de dois metros, graduada em milímetros; acumulares de energia, carregadores e um verificador de carga completaram os equipamentos.

O tempo de rastreio em cada estação foi planejado em função do comprimento da linha de base. Foram utilizadas as especificações publicadas para levantamentos GPS (IBGE, 1998, p. 33) que estão indicadas no quadro 3.5.

QUADRO 3.5 – DURAÇÃO DO RASTREIO ESTÁTICO

COMPRIMENTO DA LINHA DE BASE: CLB	DURAÇÃO DO RASTREIO
CLB < 20 km	1 hora
CLB < 50 km	2 horas
CLB < 100 km	4 horas

FONTE: IBGE (1998, p. 33).

Assim, foram definidos os períodos de rastreio para as ocupações desenvolvidas nos marcos da rede geodésica GPS/COPEL e no marco implantado MI20 (quadro 3.6).

QUADRO 3.6 – PERÍODO DE OCUPAÇÃO ESTÁTICA NOS MARCOS RELATIVOS

MARCO	PERÍODO DE OCUPAÇÃO	MARCO	PERÍODO DE OCUPAÇÃO
CRSJ	120 min	PHO	90 min
CIC	90 min	BGI	90 min
CRCB	60 min	CCO	90 min
BTA	150 min	TMA	90 min
UBR	90 min	PIL	60 min
CRCN	120 min	MI20	150 min

A estação base adotada foi o marco PARA, pertencente à RBMC. Para tanto, empregou-se uma taxa de gravação de dados de 15 segundos em virtude da compatibilidade com o intervalo adotado pelo IBGE para a estação PARA, valor este que é atualmente empregado em todas as estações da RBMC. Adotou-se ângulo de elevação (máscara) de 15° para minimizar as degradações provindas da troposfera e do efeito multicaminho (seção 2.1.4). As características do levantamento estático estão indicadas sumariamente no quadro 3.7.

QUADRO 3.7 – CARACTERÍSTICAS DOS PROCEDIMENTOS CONDUZIDOS NO LEVENTAMENTO ESTÁTICO

PROCEDIMENTO	VALOR
Intervalo de gravação	15 s
Máscara de elevação	15 °
Tomada da altura da antena	TGP[25]

[25] TGP: *Top of Ground Plane* (ingl.), referente ao plano superior da superfície externa da antena do receptor GPS no qual é realizada a medida da altura inclinada da antena (distância do marco à antena), quando esta estiver devidamente nivelada.

O pós-processamento dos dados foi realizado com o programa comercial PRISM II™ (*Ashtech Precision GPS Surveying Software*), por meio do qual foram realizadas a preparação dos dados brutos, o processamento e o ajustamento deles. Os relatórios gerados pelo programa forneceram os resultados do processamento, a qualidade destes resultados e a solução final do ajustamento.

Conforme CARVALHO (1999, p. 71), para que se possa avaliar a qualidade de um ajustamento pelo programa PRISM II™, vários indicadores são fornecidos, e.g., o erro padrão por unidade de peso (*S.E. of unit weight*). Para os marcos BTA, PIL, PHO, CRCN, CRSJ e CCO constatou-se que este indicador resultou maior que 1; esta condição indica a existência de problemas nas observações (ASHTECH, 1995).

Na tentativa de se obter as coordenadas ajustadas para estes marcos, recorreu-se a um novo processamento com o emprego do programa GEONAP (*Geodetic Navstar Postprocessing Software*), um programa científico que permite a realização da combinação linear das portadoras L_1 e L_2 e ainda aplica as técnicas *Wide Lane* e *Extra-wide Lane*. Este programa possui a característica de não ser limitado ao processamento de uma única linha de base e permite o ajustamento simultâneo de estações estáticas e cinemáticas (KRUEGER, 1996, p. 42). No quadro 3.8 estão indicadas as coordenadas obtidas, o desvio padrão das componentes e o comprimento aproximado do vetor linha de base de cada marco em relação ao marco RM03.

QUADRO 3.8 – COORDENADAS GEODÉSICAS DOS MARCOS GPS/COPEL E MI20 (WGS 84)

MARCO	LATITUDE φ	σ_φ (m)	LONGITUDE λ	σ_λ (m)	h (m)	σ_h (m)	CLB (km)
TMA	-25° 25' 56,07256"	0,002	-49° 12' 02,91070"	0,003	884,779	0,003	3,5202
UBR	-25° 28' 33,90411"	0,005	-49° 12' 28,99029"	0,006	911,280	0,006	3,8388
CRCN	-25° 23' 35,63203"	0,024	-49° 11' 53,74758"	0,027	928,783	0,027	6,9383
CRCB	-25° 27' 47,93492"	0,016	-49° 18' 27,02978"	0,018	923,948	0,018	7,8765
PIL	-25° 22' 21,51893"	0,054	-49° 16' 32,72677"	0,058	985,494	0,058	9,5248
CRSJ	-25° 32' 04,78631"	0,0022	-49° 11' 28,24849"	0,0014	902,193	0,0037	10,3639
PHO	-25° 32' 15,38079"	0,013	-49° 16' 43,53791"	0,014	925,143	0,014	10,9939
BGI	-25° 28' 47,15551"	0,005	-49° 20' 34,13203"	0,005	912,841	0,005	11,7766
CIC	-25° 31' 35,74542"	0,005	-49° 19' 52,83093"	0,005	895,668	0,005	13,3054
CCO	-25° 25' 46,35839"	0,0024	-49° 22' 10,13910"	0,003	976,171	0,0063	14,0917
MI20	-25° 26' 03,61307"	0,060	-49° 26' 15,78287"	0,061	983,583	0,061	20,8589
BTA	-25° 24' 49,29309"	0,059	-49° 31' 50,39540"	0,060	969,436	0,060	30,3976

3.3 MEDIÇÕES RTK

Para a realização dos levantamentos pela técnica RTK foram estabelecidos procedimentos de campo para a execução dos trabalhos e posterior análise dos resultados, que são descritos nas seções seguintes.

3.3.1 Disposição das Estações GPS

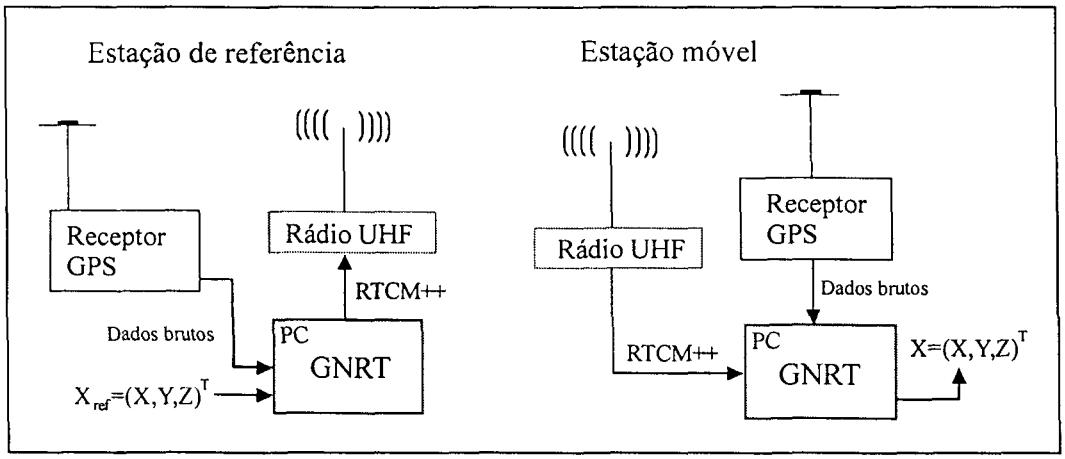
As estações de referência e móvel foram equipadas com um receptor Ashtech Z-XII, um rádio Pacific Crest com potências de 35W (transmissor) e 2W (receptor) que opera em uma freqüência próxima a 415,17 MHz (faixa de freqüência UHF) e um computador tipo PC com instalação do programa GNRT em sistema operacional OS-2. As figuras 3.6 e 3.7 ilustram estes equipamentos instalados em ambas as estações.

FIGURA 3.6 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA

FIGURA 3.7 – ESTAÇÃO MÓVEL

A estrutura funcional destes elementos em cada estação está esquematizada na figura 3.8.

FIGURA 3.8 – ESTRUTURA DAS ESTAÇÕES GPS



Observa-se na figura 3.8 que na estação de referência o programa GNRT gera as correções diferenciais no formato RTCM++ a partir das coordenadas precisas do marco de referência (X_{ref}) e dos dados brutos dos satélites fornecidos pelo receptor GPS. Por meio de um enlace de rádio, essas correções são transmitidas à estação móvel que recebe estas correções e as adiciona em suas próprias observações a fim de se obter as coordenadas precisas (X).

3.3.2 Operação do Programa GNRT

O GNRT é um programa destinado ao posicionamento em tempo real que opera sob a configuração de parâmetros específicos. Assim, torna-se útil expor algumas generalidades sobre este programa.

3.3.2.1 Sistema operacional OS/2

O GNRT trabalha no ambiente operacional OS/2 *Warp*, um sistema multitarefa preemptivo[26] capaz de processar diversos programas concomitantemente. O OS/2 Warp possibilita a automatização de tarefas com a aplicação de arquivos

[26] O sistema preemptivo distribui os recursos do processador e da memória RAM do computador entre os programas de modo que estes disponham de recursos suficientes para suas operações. Diferente do modelo cooperativo de multitarefa, os recursos são totalmente administrados pelo sistema operacional.

batch, conhecidos também como arquivos em lote ou arquivos de pilha de dados. Com eles podem ser escritos pequenos programas (*batch-job*) que permitem ao usuário controlar o processo de obtenção das coordenadas.

Em um arquivo em lote, que no ambiente OS/2 recebe o sufixo "cmd", os módulos que compõem o programa devem ser coordenados um após o outro por meio de comandos com opções de parâmetros. Cada parâmetro tem uma função específica que é efetivada quando se inicia a execução do arquivo em lote. Assim, é possível realizar inúmeros testes para se avaliar os efeitos dos parâmetros submetidos ao processo. Os principais comandos utilizados para a elaboração de um arquivo em lote são (TEICHERT, 1999, p. 37):

- REM: atribui uma linha de comentário que não é executada pelo programa;
- Set var=*caracter*: são atribuídas variáveis do sistema e variáveis definidas (var), em formato texto;
- Start *nome do módulo*: o comando Start capacita o OS/2 para operar em multitarefas, onde os módulos isolados do GNRT são iniciados em segundo plano. Mesmo após o início de um módulo, o arquivo em lote continuará ativo, o que não ocorre se o comando Start estiver ausente. Neste caso, será processado um módulo por vez.
- /PM (*presentation manager*): é escrito entre o comando Start e o *nome do módulo*. Libera a abertura de uma janela operacional, específica para cada módulo.
- Wait *valor* : interrompe a execução do arquivo em lote em um valor em milisegundos.
- >>teste.dat: registra em um arquivo "teste.dat" todas as informações, dados e resultados os quais seriam mostrados na tela.

Para exemplificar o uso dos parâmetros no programa GNRT, foi extraído um trecho do arquivo em lote que se encontra no apêndice 1:

```
:
wait 2000
REM transmissão das correções diferenciais
Start /PM rtcm_out 1 –b4800 –t59,1
```

Observa-se que o parâmetro –b fixa a taxa de transmissão dos dados em 4800 baud e o parâmetro –t determina a transmissão da mensagem RTCM tipo 59 a cada segundo.

3.3.2.2 Módulos do programa GNRT

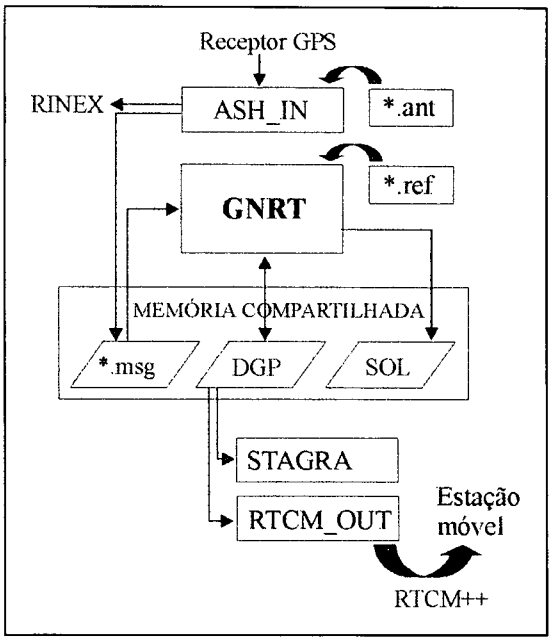
O GNRT possui uma estrutura de módulos complementares e de comandos relacionados que facilitam a avaliação dos dados em tempo real e que permitem que o processo de determinação das coordenadas seja constantemente monitorado. Os principais módulos complementares e comandos são:

a) GN_DATA: inserido no início do arquivo em lote para gerar uma pasta de trabalho, onde são registrados os arquivos de coordenadas, dados RINEX e outras informações;
b) GN_PROTO: notifica toda e qualquer informação sobre as ações executadas pelos módulos do programa GNRT em um arquivo no formato ASCII (sufixo "log") em ordem cronológica de tempo GPS, e.g., o início e o fim de operação de cada módulo, o início da transmissão das correções diferenciais e o início do registro das informações de rastreio (dados RINEX);
c) ASH_IN: módulo de suporte para os receptores Ashtech Z-XII;
d) STAGRA: processa os dados de satélites alocados na memória compartilhada (seção 3.3.2.3) para exibi-los em gráficos. Pela janela do módulo STAGRA, visualiza-se o número de satélites, o tempo GPS (semana e segundos), o módulo proprietário e a identificação do receptor. Ademais, tem-se as informações dos satélites, e.g., elevação mínima, geometria e valores de PDOP. Também são mostradas as informações de tempo e as coordenadas da estação de referência;
e) VIEW_SOL: apresenta as coordenadas calculadas pelo programa GNRT;.
f) GNSTOP: comando para a finalização de até 10 módulos.

3.3.2.3 Produção e gerenciamento das correções diferenciais

Os módulos do programa GNRT são configurados em cada estação para operar conforme a sua função (referência ou móvel). Na figura 3.9 observa-se o esquema da estação de referência, onde é ativado o modo diferencial para a geração das correções diferenciais.

FIGURA 3.9 – MÓDULOS DO PROGRAMA GNRT (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA)



O módulo do receptor (ASH_IN) recebe e disponibiliza os dados brutos do receptor na memória compartilhada[27]. A partir das coordenadas da estação de referência e das observações brutas, o módulo principal do programa GNRT gera as correções diferenciais (seção 2.2.4) e as escreve em um formato de equações lineares denominadas estruturas de correção de dados (DGP).

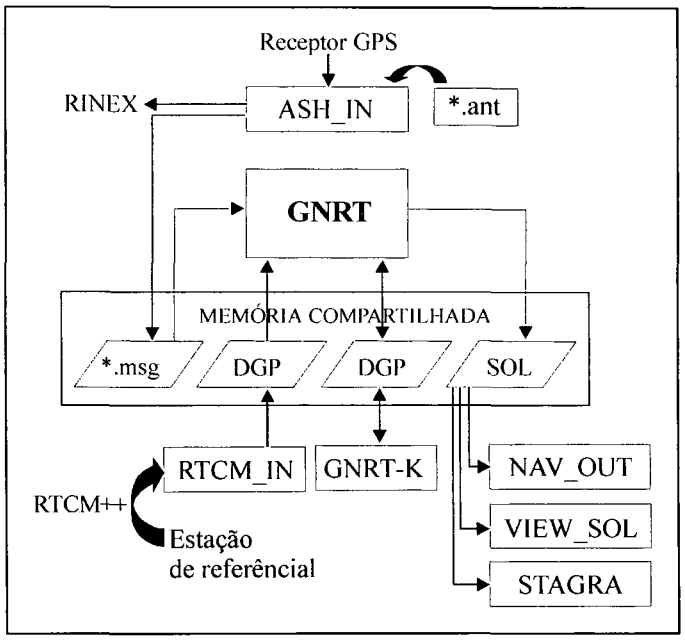
Estas informações são acessadas pelo módulo RTCM_OUT, convertidas para o formato RTCM em uma interface serial e transmitidas via rádio ou modem à estação móvel. A janela do módulo RTCM_OUT exibe informações sobre as correções diferenciais geradas, o tempo GPS e o nome da estação base, onde é possível programar as mensagens a serem transmitidas e a taxa de envio delas.

No conceito do GPS Diferencial, o módulo principal do GNRT também é inserido na estação móvel (GEOPP, 1995, p.14). Nota-se na figura 3.10 que o módulo RTCM_IN recebe os dados de correção no formato RTCM de uma interface serial, aloca-os em uma estrutura DGP da memória compartilhada e processa as informações referentes à qualidade e quantidade desses dados.

---

[27] Memória compartilhada (*shared memory*): é um campo de armazenagem interno organizado pelo programa GNRT cuja função principal é efetuar o armazenamento e o intercâmbio dos dados de processamento dos módulos, apresentando uma seção destinada às operações em tempo real para armazenar os dados brutos do receptor, efemérides e coordenadas (TEICHERT, 1999, p. 38).

FIGURA 3.10 – MÓDULOS DO PROGRAMA GNRT (ESTAÇÃO MÓVEL)



O módulo GNRT-K é um sistema RTK singular que requer a utilização de duas estruturas DGP, exigindo assim que sejam inseridos na linha de comando dois parâmetros: um que especifica a origem das correções diferencias (alimentadas pelo módulo RTCM_IN via porta serial) e outro que estabeleça uma estrutura de dados no módulo principal na qual opera o GNRT-K (GEOPP, 1995, p. 22).

O módulo GNRT-K gera, a partir dos dados de correção e dos dados brutos de um conjunto de épocas, uma solução na forma de coordenadas juntamente com os seus desvios padrão. O módulo NAV_OUT busca e apresenta a solução armazenada em uma estrutura de resultados (SOL) da memória compartilhada após especificados os parâmetros do formato de saída desses resultados.

3.3.3 Levantamentos de Campo

Os levantamentos de campo sucederam-se no período entre 20 de março e 15 de maio de 2002. Inicialmente foi utilizado o marco RM03 (figura 3.1, seção 3.1.1) como estação de referência. O módulo GNRT-K gerou e transmitiu continuamente as correções diferenciais com uma taxa de 1 segundo no formato RTCM++ para a estação móvel, esta efetuando ocupações nos marcos relativos (quadro 3.4, seção 3.1.4).

A investigação para a definição da correlação espacial contou com duas ocupações[28] em cada estação relativa, sendo que em cada ocupação foram realizadas em média dez seções de inicialização para determinação das ambigüidades. Estas ocupações foram executadas com a antena GPS estacionária, i.e., devidamente instalada no marco de interesse. Foi estabelecido um intervalo de uma hora entre a primeira e a segunda ocupação pretendendo-se rastrear os sinais de satélites quando estes se encontram em configuração geométrica diferente por conta de uma mudança significativa na geometria da constelação GPS.

Cada ocupação nos marcos demandou um determinado período de realização que variou de 15 a 60 minutos. Este tempo implica na dificuldade que o sistema encontrou para fixar as ambigüidades ao longo das seções. Foram tomadas as medidas de altura inclinada da antena visando a obtenção da altura vertical a qual foi inserida no programa. Foram ainda anotadas as informações relativas ao rastreio (número de satélites, PDOP e VDOP).

Posteriormente, a estação de referência foi transladada para o vértice ADMN (figura 3.1, seção 3.1.1) e repetido todo o procedimento descrito nesta seção.

Para o controle da execução dos levantamentos, foi elaborado um modelo de caderneta de campo simplificado (apêndices 2 e 3) onde foram registradas todas as informações do rastreio. O emprego destas planilhas permite ao operador registrar em campo das características do levantamento, i.e., a hora de início e término, as coordenadas aproximadas do marco relativo, o comprimento da linha de base, dados climáticos, o tempo de fixação das ambigüidades (TTFA), o contraste, o PDOP e o tempo GPS em que ocorreu a fixação das ambigüidades. O programa GNRT gera arquivos de texto específicos nos quais são registradas as coordenadas geodésicas obtidas em tempo real, cujas análises são tratadas no capítulo 4.

[28] Em virtude da ocorrência de problemas operacionais não foi possível realizar a segunda ocupação em algumas das estações relativas.

4 TRATAMENTO DOS DADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

As informações do rastreio bem como as anotações de campo (anotados manualmente em cadernetas de campo) foram inseridos posteriormente em planilhas eletrônicas para o tratamento e a realização das análises dos resultados.

4.1 TRATAMENTO DOS DADOS

O passo inicial foi a extração e o preparo do conteúdo dos arquivos de texto em planilhas eletrônicas do aplicativo *Microsoft Excel*. Estes arquivos (sufixo rtk) são gerados pelo programa GNRT durante o levantamento de campo e possuem os seus conteúdos organizados na forma de linhas seqüenciais de coordenadas geodésicas, o que torna simples e direto o processo de importação visto que os elementos que estabelecem os valores das latitudes e longitudes (grau, minuto e segundo) encontram-se dispostos em colunas, conforme pode-se observar no quadro 4.1.

Neste quadro visualiza-se o trecho de um arquivo de texto onde se observa que no momento da fixação da ambigüidade (em negrito), os desvios-padrão sofrem uma redução significativa e permanecem quase invariáveis até que ocorra uma perda de sinal ou uma reinicialização do processo RTK. É neste intervalo de tempo que se encontram as soluções a serem extraídas para a análise da degradação do posicionamento com a técnica RTK.

Conforme mencionado na seção 2.2.4.2, o período de tempo demandado pelo programa para fixar as ambigüidades e encontrar a solução é o tempo de fixação das ambigüidades (TTFA). Até que esta condição seja atendida, as soluções obtidas não podem ser consideradas precisas e tampouco serem tomadas como solução RTK.

QUADRO 4.1 – TRECHO DE UM ARQUIVO DE RESULTADOS RTK

Tempo GPS (s)	Latitude φ (° ' ")			Longitude λ (° ' ")			Altitude h (m)	σ_φ (m)	σ_λ (m)	σ_h (m)
391766	-25	25	56,05398	-49	12	3,0609	888,1767	42,3049	38,4207	65,3622
391767	-25	25	56,25623	-49	12	2,61527	877,0846	3,0882	3,598	8,4528
391768	-25	25	56,2512	-49	12	2,76015	867,9256	1,9335	2,2163	5,4839
391769	-25	25	56,13654	-49	12	3,00127	883,8223	1,9538	2,2245	5,5946
391770	-25	25	56,05526	-49	12	2,91309	890,4441	1,3238	1,5022	3,8051
391771	-25	25	55,99708	-49	12	2,80362	894,1429	1,1223	1,2712	3,2321
391772	-25	25	56,02761	-49	12	2,7634	891,6992	0,8813	0,997	2,5407
391773	-25	25	56,0025	-49	12	2,81821	895,6053	0,7918	0,8952	2,2844
391774	-25	25	56,04919	-49	12	2,85693	891,0653	0,6699	0,7569	1,9335
391775	-25	25	56,0601	-49	12	2,88055	890,3961	0,5953	0,6722	1,7186
391776	-25	25	56,0806	-49	12	2,88718	887,0157	0,5398	0,6094	1,5589
391777	-25	25	56,08162	-49	12	2,88131	887,508	0,4698	0,5302	1,3569
391778	-25	25	56,07503	-49	12	2,904	888,5629	0,4274	0,4823	1,2347
391779	-25	25	56,07536	-49	12	2,91161	887,7941	0,3784	0,4269	1,0932
391780	-25	25	56,06832	-49	12	2,90198	888,2614	0,3379	0,3811	0,9761
391781	-25	25	56,06387	-49	12	2,91205	887,7608	0,3138	0,3538	0,9066
391782	-25	25	56,06088	-49	12	2,91661	886,7369	0,3119	0,3516	0,9011
391783	-25	25	56,05966	-49	12	2,91005	886,6971	0,289	0,3258	0,8351
391784	-25	25	56,05743	-49	12	2,91559	886,4135	0,271	0,3054	0,7829
391785	-25	25	56,05347	-49	12	2,91224	886,3177	0,2605	0,2936	0,7528
391786	-25	25	56,0542	-49	12	2,91456	886,0716	0,2408	0,2714	0,6959
391787	-25	25	56,05605	-49	12	2,91879	885,9406	0,2262	0,2549	0,6538
391788	-25	25	56,05899	-49	12	2,92019	885,3341	0,2156	0,2429	0,623
391789	**-25**	**25**	**56,07263**	**-49**	**12**	**2,9106**	**884,774**	**0,0032**	**0,0026**	**0,0074**
391790	-25	25	56,07269	-49	12	2,91056	884,772	0,0032	0,0026	0,0074
391791	-25	25	56,07264	-49	12	2,91057	884,7734	0,0032	0,0026	0,0074
391792	-25	25	56,07267	-49	12	2,91062	884,7769	0,0032	0,0026	0,0074
391793	-25	25	56,0727	-49	12	2,91058	884,7711	0,0032	0,0026	0,0074
:										
391814	-25	25	56,05829	-49	12	3,05963	887,5085	42,3319	38,4251	65,3122
391815	-25	25	56,15595	-49	12	2,58672	880,9295	7,2478	8,3848	19,9417
391816	-25	25	55,91831	-49	12	2,51259	897,5025	3,1483	3,5747	8,9748
391817	-25	25	56,05214	-49	12	2,75467	885,0174	1,9807	2,2322	5,7002
391818	-25	25	56,01465	-49	12	2,79245	887,3219	1,3993	1,5712	4,0423
391819	-25	25	56,06115	-49	12	2,88787	885,8792	1,0644	1,1928	3,0808
391820	-25	25	56,08838	-49	12	2,92125	880,6278	0,8487	0,9499	2,459
391821	-25	25	56,11654	-49	12	2,97927	878,5553	0,7099	0,7939	2,0584
391822	-25	25	56,12655	-49	12	2,99301	876,3157	0,6017	0,6724	1,7453
391823	-25	25	56,11102	-49	12	2,9726	878,5421	0,5141	0,5743	1,4918
391824	-25	25	56,11197	-49	12	2,95613	879,9147	0,4694	0,5241	1,3622
391825	-25	25	56,11116	-49	12	2,95031	879,5478	0,4161	0,4645	1,2077
391826	-25	25	56,12419	-49	12	2,94599	878,1313	0,377	0,4208	1,0946
391827	-25	25	56,11672	-49	12	2,93823	878,8834	0,3386	0,3779	0,9831
391828	-25	25	56,12174	-49	12	2,93853	878,5441	0,3028	0,3378	0,8793
391829	-25	25	56,12677	-49	12	2,92903	877,7756	0,2889	0,3223	0,8389
391830	-25	25	56,12719	-49	12	2,94788	877,6969	0,2819	0,3144	0,8185
391831	-25	25	56,13348	-49	12	2,94593	877,2338	0,2577	0,2873	0,7483
391832	-25	25	56,13013	-49	12	2,94675	878,0286	0,2488	0,2774	0,7226
391833	-25	25	56,12514	-49	12	2,93722	878,4454	0,2352	0,2622	0,6832
391834	-25	25	56,11865	-49	12	2,9301	879,5773	0,2261	0,2521	0,6568
391835	**-25**	**25**	**56,07255**	**-49**	**12**	**2,91063**	**884,769**	**0,0028**	**0,0023**	**0,0065**
391836	-25	25	56,07261	-49	12	2,91072	884,7711	0,0028	0,0023	0,0065
391837	-25	25	56,07263	-49	12	2,91064	884,7769	0,0028	0,0023	0,0065
391838	-25	25	56,07258	-49	12	2,91067	884,7769	0,0028	0,0023	0,0065
391839	-25	25	56,07257	-49	12	2,91067	884,7732	0,0028	0,0023	0,0065

Dado que os valores das coordenadas geodésicas obtidos após a fixação das ambigüidades não sofrem variações consideráveis, tem-se que os erros planimétricos e altimétricos permanecem constantes. Assim, foi tomado de cada seção de observação um conjunto de coordenadas geodésicas correspondente ao período em que as ambigüidades foram fixadas. Estas coordenadas são a solução RTK para o posicionamento em tempo real e são empregadas nas análises apresentadas neste capítulo.

Conforme exposto na seção 3.2, as análises realizadas consistem na comparação dos valores das coordenadas geodésicas obtidos em tempo real pela técnica RTK com os valores precisos das coordenadas geodésicas dos marcos (indicados na figura 3.4). Estas comparações permitem expressar a qualidade posicional da técnica RTK, determinando-se os erros resultantes em latitude, longitude e altitude das seções de observação realizadas em cada ocupação nos marcos relativos.

Estes erros podem ser expressos pela variação em distância entre duas posições: a posição obtida com a técnica RTK e a posição de referência precisa. Na determinação dos erros planimétricos, adotou-se a equação dada por RICHARDUS e ADLER (1972, p. 41) para o cálculo do comprimento de um arco infinitesimal (ds) sobre o elipsóide:

$$ds^2 = M^2 \, d\varphi + N^2 \, \cos^2 \varphi \, d\lambda^2, \qquad (4.1)$$

onde:

ds : arco de deslocamento infinitesimal;

M : raio de curvatura da seção meridiana;

N : raio de curvatura da seção transversal;

φ : latitude geodésica local;

$d\varphi$: arco de deslocamento infinitesimal em latitude geodésica (expressa em radianos);

$d\lambda$: arco de deslocamento infinitesimal em longitude geodésica (expressa em radianos).

Para o cálculo dos valores de M e N foram adotados os parâmetros definidores do elipsóide de referência WGS84, que são: semi-eixo maior a = 6.378.137 m e o inverso do achatamento f^{-1} = 298,257223563 (NIMA, 2000, p. 3-2). Os arcos de deslocamento em latitude e em longitude foram obtidos por meio da subtração do

valor das coordenadas geodésicas obtidas no levantamento RTK do valor das coordenadas geodésicas precisas. Da mesma forma, os erros altimétricos foram obtidos por meio da subtração do valor das altitudes geométricas obtidas no levantamento RTK do valor das altitudes geométricas precisas.

No apêndice 4 encontra-se uma sinopse do tratamento do arquivo de texto referente aos dados obtidos com a primeira ocupação no marco UBR e com a estação de referência RM03. Inicialmente, executou-se a seleção das linhas de dados relativas a cada seção (item a) as quais são compostas pelo tempo GPS em que se deu a fixação das ambigüidades, as coordenadas geodésicas obtidas e os indicadores de qualidade interna (desvios-padrão). Na seqüência (item b), os erros planimétricos e altimétricos foram determinados por meio de uma planilha específica e dispostos em colunas independentes em conjunto com outras informações do levantamento (item c), visando a elaboração de gráficos (item d), que serão analisados na seção 4.2.

4.2 ANÁLISE DAS SOLUÇÕES

Com base nos dados gerados a partir das soluções de coordenadas geodésicas fornecidas pelo programa GNRT (seções 1.3.1 e 3.3.2) e das informações de rastreio (e.g., PDOP, VDOP e número de satélites) registradas durante os levantamentos (seção 3.3.3), elaborou-se um conjunto de gráficos visando as análises dos resultados RTK.

4.2.1 Soluções Obtidas com o RTK

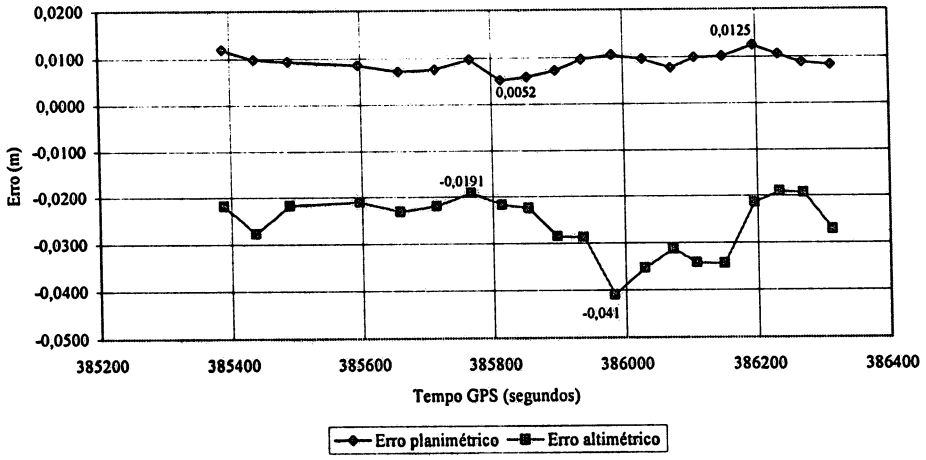
Nestas análises, adotou-se o limite de precisão igual a 1cm, que corresponde à precisão fornecida pelo programa GNRT para levantamentos cadastrais (seção 1.3.1), adicionado à limitação de 10 ppm imposta aos levantamentos em tempo real em decorrência dos erros que dependem do comprimento da linha de base (seção 2.2.4.3.1).

Para exemplificar o procedimento de análise adotado são apresentados os resultados obtidos com o posicionamento RTK para o marco AZMT empregando a estação de referência RM03, distantes de 200 m entre si. Salienta-se que para a

execução de cada seção de observação foi efetuada uma inicialização no programa GNRT (seção 2.2.4.2) objetivando o início do cálculo das ambigüidades e a obtenção de um novo conjunto de soluções de coordenadas tridimensionais no instante após elas terem sido resolvidas.

O gráfico da figura 4.1 mostra os erros planimétricos e altimétricos obtidos com as 20 seções realizadas ao longo do tempo GPS durante a primeira ocupação no marco AZMT.

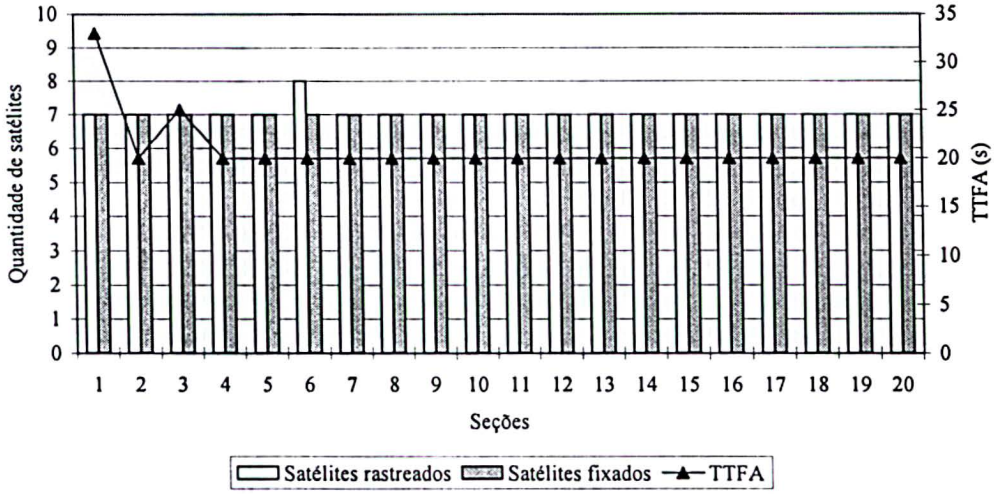
FIGURA 4.1 –ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO AZMT – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



Verifica-se na figura 4.1 que os valores mínimo e máximo na componente planimétrica foram iguais a 0,52 cm e 1,25 cm, respectivamente, e na componente altimétrica iguais a –1,90 cm e -4,10 cm, respectivamente. Constata-se que os erros altimétricos tiveram uma maior variação ao longo do tempo em relação aos erros planimétricos.

No gráfico da figura 4.2 visualiza-se a quantidade de satélites rastreados, a quantidade de satélites com as ambigüidades fixadas e o tempo de fixação das ambigüidades (TTFA) referentes a cada uma das 20 seções de observação RTK desenvolvidas durante a primeira ocupação no marco AZMT. Nota-se que na maior parte do tempo contou-se com sete satélites com as suas ambigüidades fixadas e um TTFA médio de 20 segundos.

FIGURA 4.2 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO AZMT – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



Analisando-se os gráficos 4.1 e 4.2 simultaneamente constata-se que a primeira seção apresentou um maior TTFA; contudo, os erros planimétricos e altimétricos apresentaram-se dentro do esperado. A décima segunda seção que possui o maior erro altimétrico (4,10 cm) não apresentou qualquer alteração quanto ao TTFA e à quantidade de satélites.

4.2.2 Erros Planimétricos e Quantidade de Soluções com Erros Iguais ou Inferiores a 1cm +10ppm.

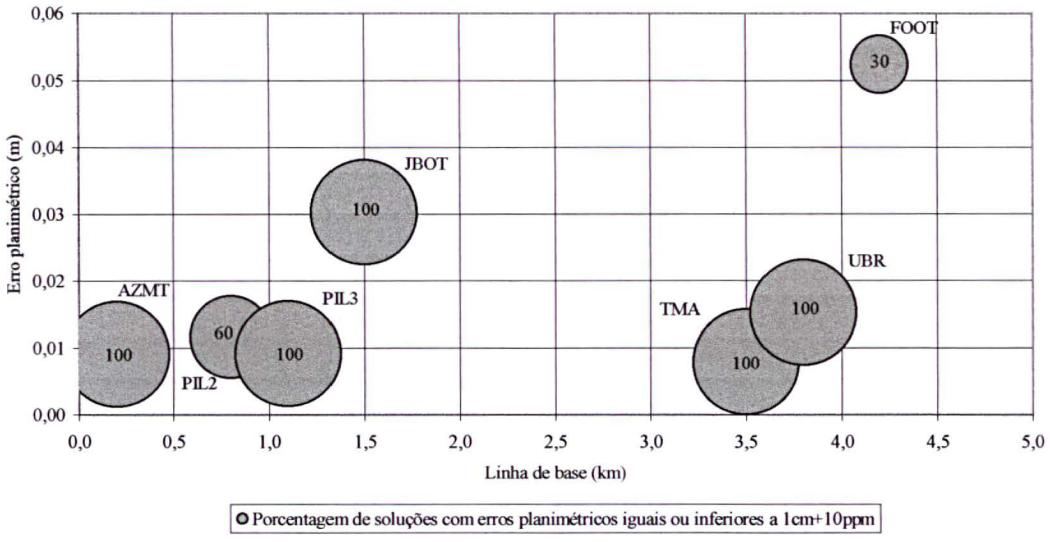
Para a realização das análises subseqüentes, foi determinado um valor do erro em cada ocupação por meio da média aritmética dos erros ocorridos nas seções enquadrados na precisão de 1cm+10ppm. Por se tratar de comprimentos de linhas de base variados, optou-se em dividir as análises em faixas tomadas a partir da posição das estações de referência.

4.2.2.1 Linhas de base de 0 a 5 km

Nas figuras 4.3 e 4.4 apresentam-se as estações relativas que distam de até 5 km da estação de referência RM03. Observam-se os círculos que representam a porcentagem das soluções cujos erros planimétricos foram iguais ou inferiores a 1cm+10ppm[29], os erros planimétricos e o comprimento das linhas de base.

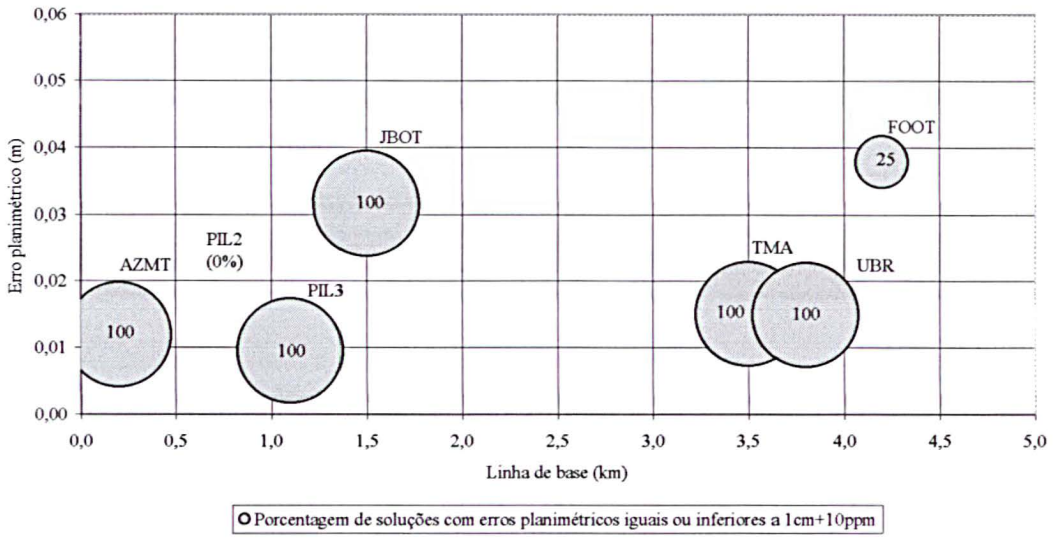
Na primeira ocupação (figura 4.3) percebe-se que os marcos PIL2 e FOOT apresentaram uma quantidade de soluções com erro igual ou inferior a 1cm+10ppm de 60% e de 30% respectivamente, mostrando uma situação diferente do ocorrido para os demais marcos. Na segunda ocupação (figura 4.4), em decorrência de algum problema (e.g., a qualidade dos sinais de transmissão de rádio, o efeito multicaminho), a qualidade do posicionamento no marco PIL2 não foi alcançada em nenhuma seção de observação e o marco FOOT apresentou apenas 25% de soluções que atenderam a condição inicial.

FIGURA 4.3 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 0 E 5 km (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



[29] A porcentagem das soluções cujos erros planimétricos ocasionados foram iguais ou inferiores a 1cm+10ppm (soluções consideradas corretas) é denominada doravante de "confiabilidade do posicionamento"; esta é dada pela quantidade de seções com solução correta em relação à quantidade total de seções realizadas.

FIGURA 4.4 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 0 E 5 km (SEGUNDA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



KRUEGER (1996, p. 80) afirma que, no DGPS Preciso, os sistemas VHF ou UHF para distâncias curtas não apresentam restrições; porém, a relação atmosférica entre as estações de referência e móvel limitarão a rápida solução das ambigüidades, pressupondo uma distância de até 20 km. Neste caso, pode ter havido problemas na transmissão dos dados de correção diferencial em função das obstruções existentes no entorno já que não se verificou uma variação significativa de temperatura e pressão atmosférica registrada durante os levantamentos.

A ocorrência do efeito multicaminho pode ter contribuído para a diminuição da qualidade do posicionamento em ambas as ocupações visto que nas proximidades do marco PIL2 existem quadras poliesportivas com cobertura metálica. KRUEGER (1996, p. 78) afirma que o efeito multicaminho também afeta a confiabilidade dos sistemas UHF/VHF.

O marco FOOT também pode ser enquadrado nestas considerações, onde resultou 30% e 25% das soluções com erros planimétricos iguais ou inferiores a 1cm+10ppm para a primeira e segunda ocupações, respectivamente. Nas figuras 4.5 e 4.6 podem-se observar os marcos relativos PIL2 e FOOT, respectivamente.

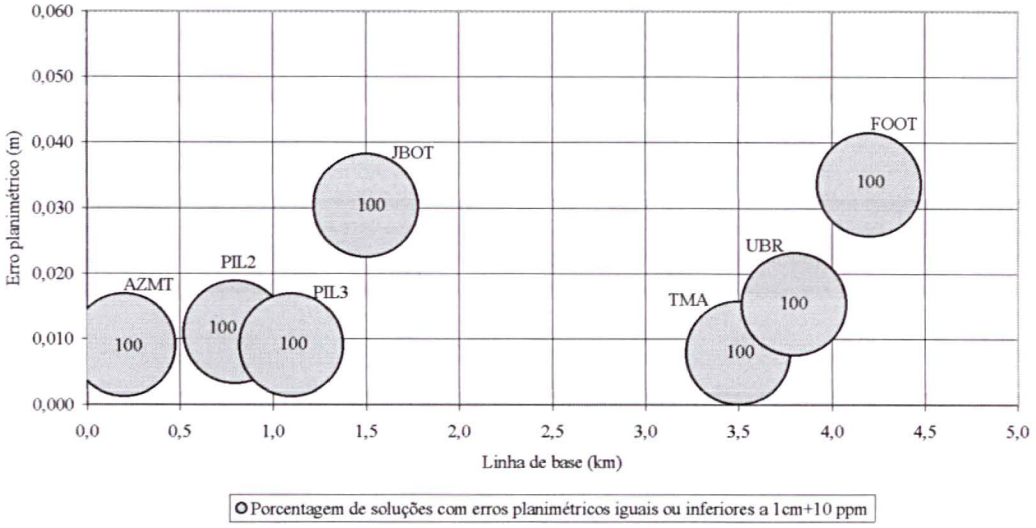
FIGURA 4.5 – MARCO RELATIVO PIL2[30]

FIGURA 4.6 – MARCO RELATIVO FOOT

Instalando-se a estação de referência no marco ADMN (seção 3.1.1) e ocupando-se os mesmos marcos (AZMT, PIL2, PIL3, JBOT, TMA, UBR e FOOT) verifica-se que as soluções obtidas com o RTK apresentaram um erro igual ou inferior a 1cm+10ppm em 100% dos casos (figura 4.7). Percebe-se também que houve uma redução nos valores dos erros planimétricos nestas estações relativas.

[30] PIL2: pilar que compõe a base para a classificação de teodolitos, construído segundo a NB 13133 no *Campus* do Centro Politécnico da UFPR.

FIGURA 4.7 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 0 E 5 km
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



Admitindo-se um valor médio para os erros obtidos nas duas ocupações, construiu-se os gráficos (figuras 4.8 e 4.9) que mostram a média dos erros planimétricos das ocupações em cada marco e a porcentagem média de soluções aceitas (1cm+10ppm) com a utilização das estações de referência RM03 e ADMN.

FIGURA 4.8 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 0 E 5 km
(PRIMEIRA E SEGUNDA OCUPAÇÕES – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)

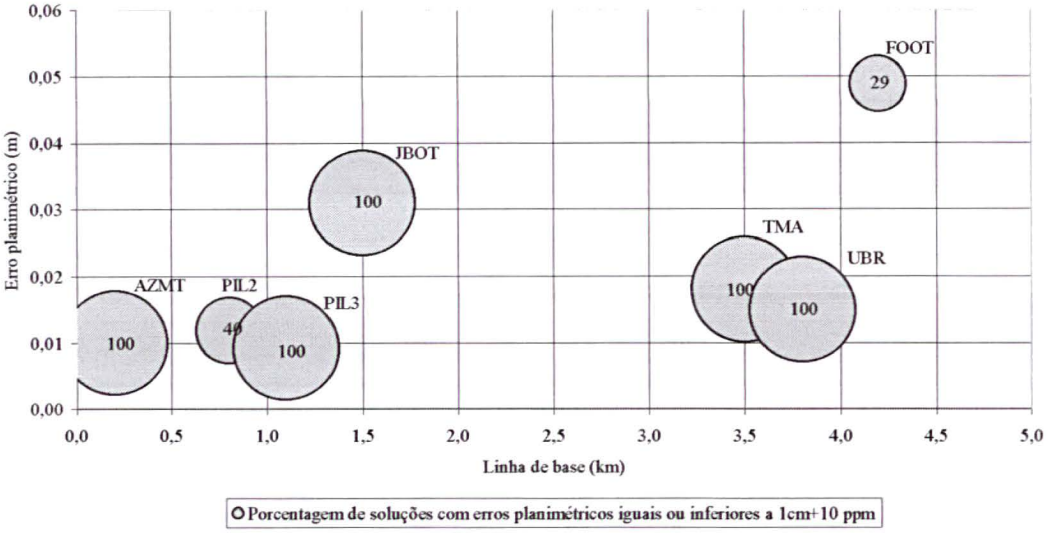
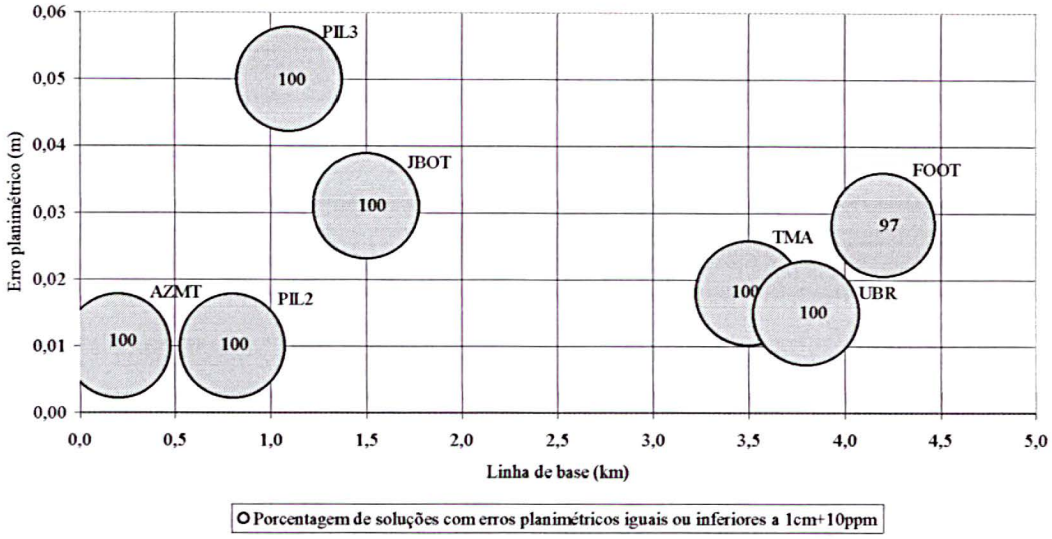


FIGURA 4.9 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 0 E 5 km (PRIMEIRA E SEGUNDA OCUPAÇÕES – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



Verifica-se que a mudança da estação de referência trouxe resultados positivos nos marcos relativos PIL2 e FOOT. No marco PIL2, os erros planimétricos foram reduzidos, de 1,2 cm para 1,0 cm, e as porcentagens de erros iguais ou inferiores a 1cm+10ppm passaram de 40% para 100%. O marco FOOT passou de 29% para 97% de erros iguais ou inferiores a 1cm+10ppm e os erros planimétricos de 5,0 cm para 2,8 cm.

Pode-se afirmar que as condições de trabalho foram praticamente similares durante os levantamentos, seja nas ocupações com o emprego da estação de referência RM03 como da estação ADMN, onde o sistema de comunicação se mostrou eficiente.

4.2.2.2 Linhas de base de 5 a 10 km

Nas figuras 4.10 e 4.11, apresentam-se os gráficos relativos à primeira e à segunda ocupações respectivamente, nos marcos compreendidos entre linhas de base de 5 e 10 km, empregando-se como referência o marco RM03. Percebe-se que a magnitude dos erros planimétricos começa a aumentar, em face do aumento da linha de base.

FIGURA 4.10 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 5 E 10 km (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)

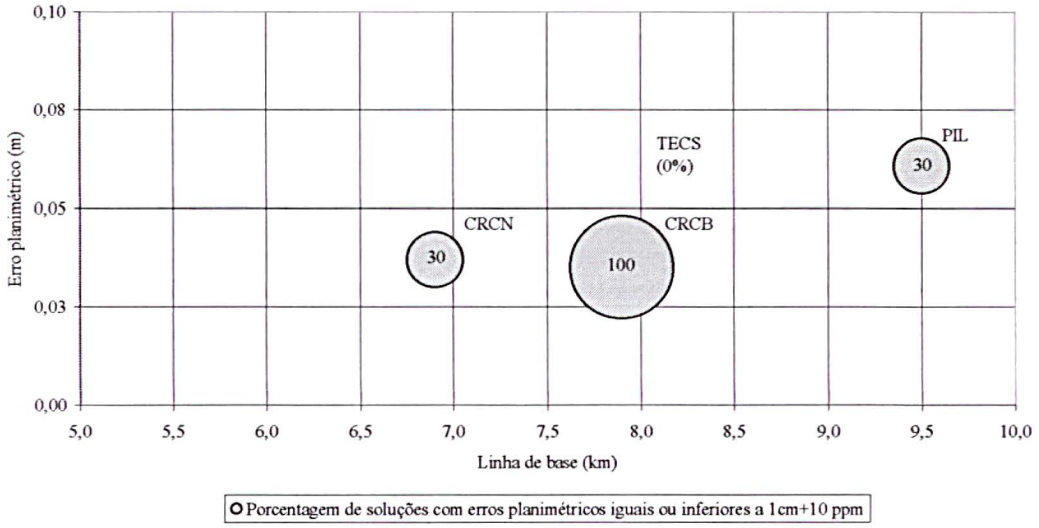
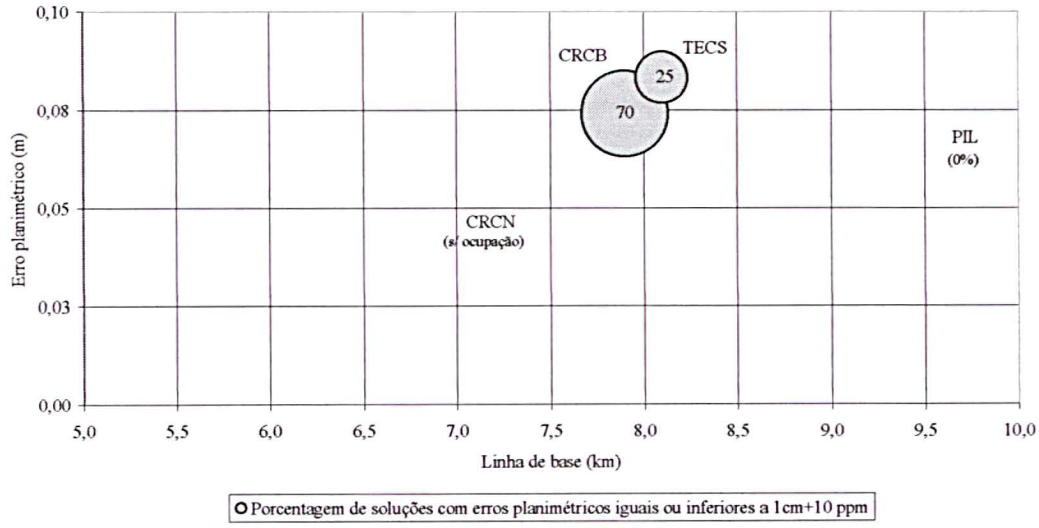


FIGURA 4.11 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 5 E 10 km (SEGUNDA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



Na figura 4.10 observa-se que no marco TECS as soluções apresentaram erros planimétricos superiores a 1cm+10ppm e que na segunda ocupação (figura 4.11) apenas 25% destas soluções atenderam a condição inicial. Supõe-se que a recepção do sinal GPS e das correções diferenciais, neste marco, pode ter sido prejudicada pelas barreiras físicas presentes no local, como taludes de morros e alta vegetação.

Não foi possível realizar a segunda ocupação nos marcos CRCN e PIL (figura 4.11). Contudo, pode-se considerar que na primeira ocupação nestes marcos não se obteve um desempenho satisfatório dado que não mais de 30% das seções realizadas atingiram a precisão almejada.

A qualidade das soluções obtidas no marco PIL pode estar associada às condições propícias para a ocorrência do efeito de multicaminho (seção 2.2.4.3.4) visto que o marco é contornado por construções, vegetação alta e uma torre metálica (figura 4.12). Ademais, as correções diferenciais podem ter sofrido interferências.

FIGURA 4.12 – MARCO PIL

As figuras 4.13 e 4.14 apresentam os erros planimétricos em metros, as porcentagens de soluções com erros iguais ou inferiores a 1cm+10ppm e a linha de base de cada estação relativa referentes à primeira e à segunda ocupações, respectivamente. Neste caso empregou-se a estação de referência ADMN. Percebe-se que no marco TECS houve uma maior quantidade de soluções que atenderam a precisão almejada quando se deu a segunda ocupação. Já o marco PIL, na segunda ocupação, apresentou uma menor percentagem de soluções com o erro planimétrico igual ou inferior a 1cm + 10ppm, contudo os erros planimétricos foram reduzidos de 7,0 cm para 3,4 cm.

FIGURA 4.13 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 5 E 10 km (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)

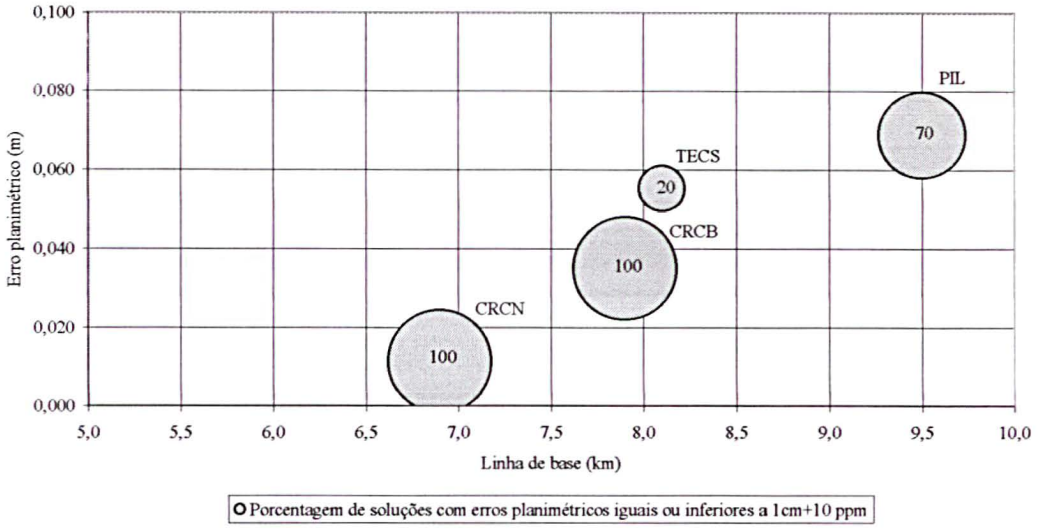
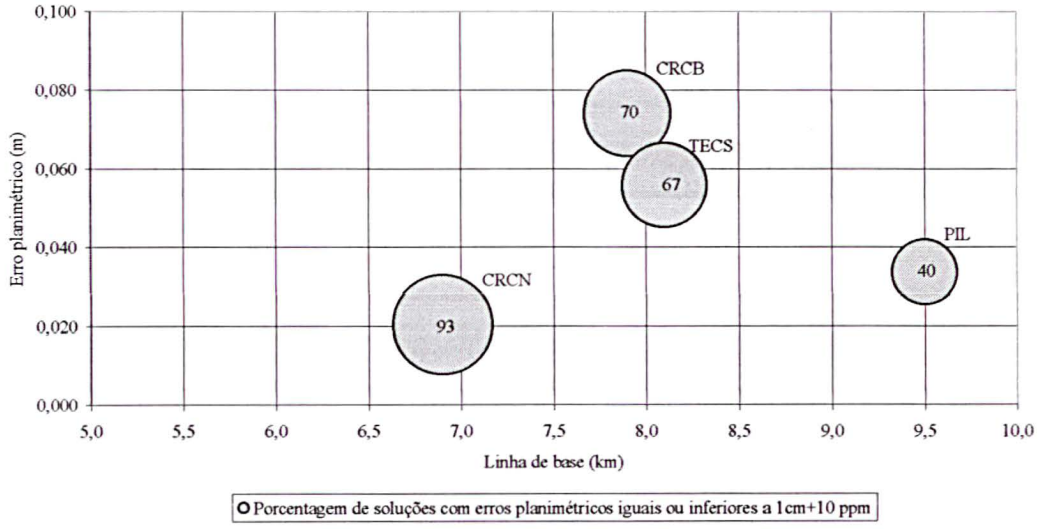


FIGURA 4.14 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 5 E 10 km (SEGUNDA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



Comparando-se os valores médios referentes às duas ocupações nos marcos relativos com o emprego da estação de referência RM03 (figura 4.15) e ADMN (figura 4.16), nota-se que houve um ganho em precisão e em confiabilidade nos marcos CRCN, TECS e PIL, indicando que o emprego da estação ADMN teve uma maior eficiência na determinação das coordenadas geodésicas destes marcos. O marco CRCB não apresentou alteração quando houve a modificação da estação de referência.

FIGURA 4.15 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 5 E 10 km (PRIMEIRA E SEGUNDA OCUPAÇÕES – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)

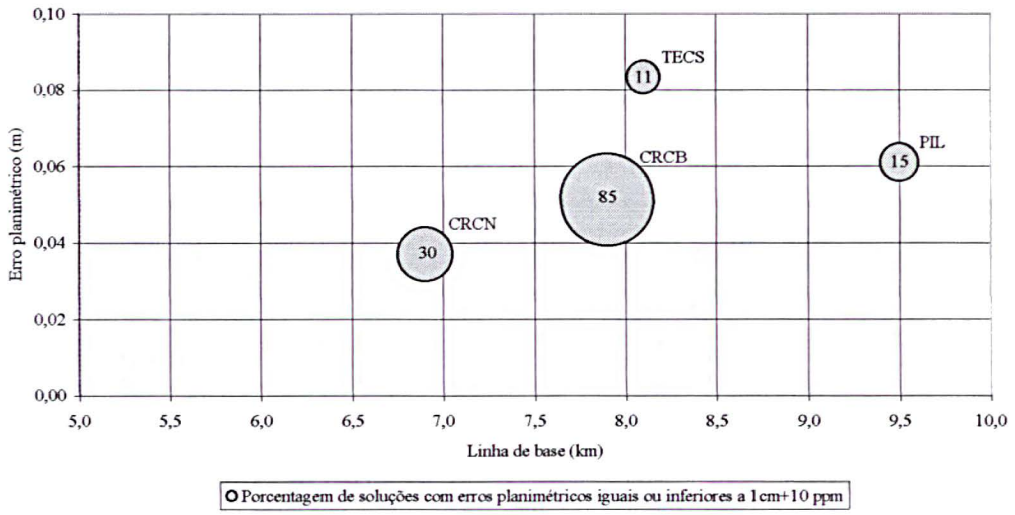
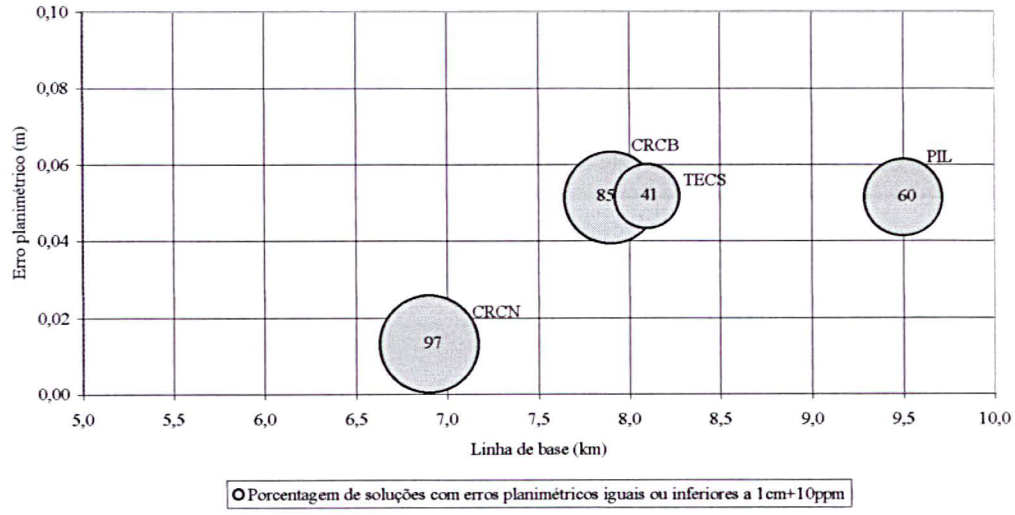


FIGURA 4.16 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 5 E 10 km (PRIMEIRA E SEGUNDA OCUPAÇÕES – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



4.2.2.3 Linhas de base de 10 a 15 km

Os resultados das ocupações nos marcos com linhas de base compreendidas entre 10 e 15 km, com o emprego da estação de referência RM03, podem ser visualizados nas figuras 4.17 e 4.18.

FIGURA 4.17 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 10 E 15 km (PRIMEIRA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)

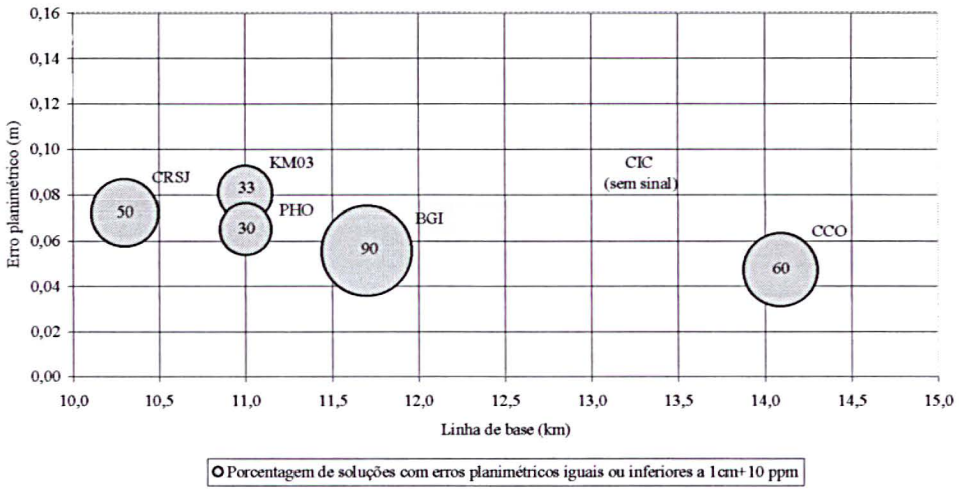
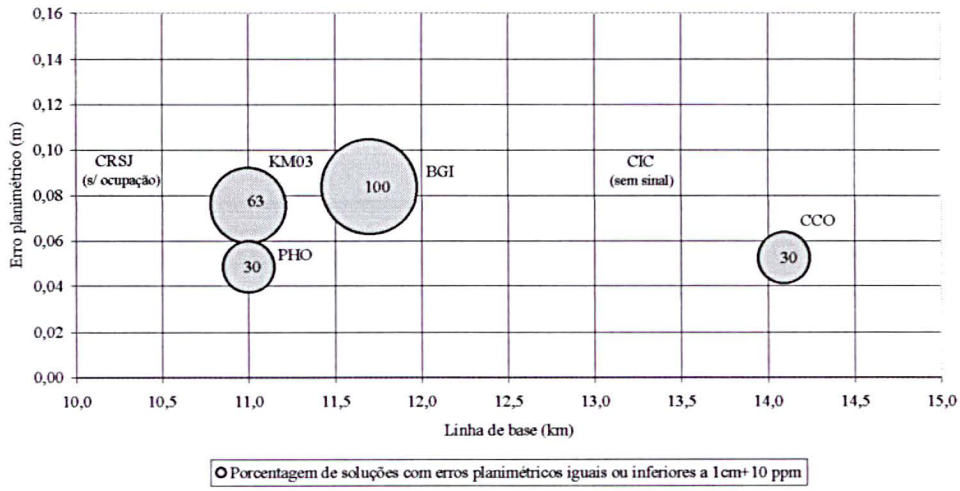


FIGURA 4.18 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 10 E 15 km (SEGUNDA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



Observa-se que durante a primeira ocupação no marco KM03 obteve-se 33% das soluções com erro planimétrico igual ou inferior a 1cm+10 ppm e 63% na segunda ocupação, havendo uma variação de 8,1 cm para 7,6 cm no valor do erro médio. O marco CCO contou com 60% das soluções na primeira ocupação e com 30% das soluções na segunda ocupação.

Na estação CIC, distante 13,3 km da estação de referência RM03 e 13,0 km da estação de referência ADMN, não se obteve sinal das correções diferenciais nas ocupações com a estação de referência RM03 (figuras 4.17 e 4.18).

Admitindo-se valores médios, construiu-se os gráficos referentes ao emprego da estação de referência RM03 (figura 4.19) e ADMN (figura 4.20).

FIGURA 4.19 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 10 E 15 km (PRIMEIRA E SEGUNDA OCUPAÇÕES – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)

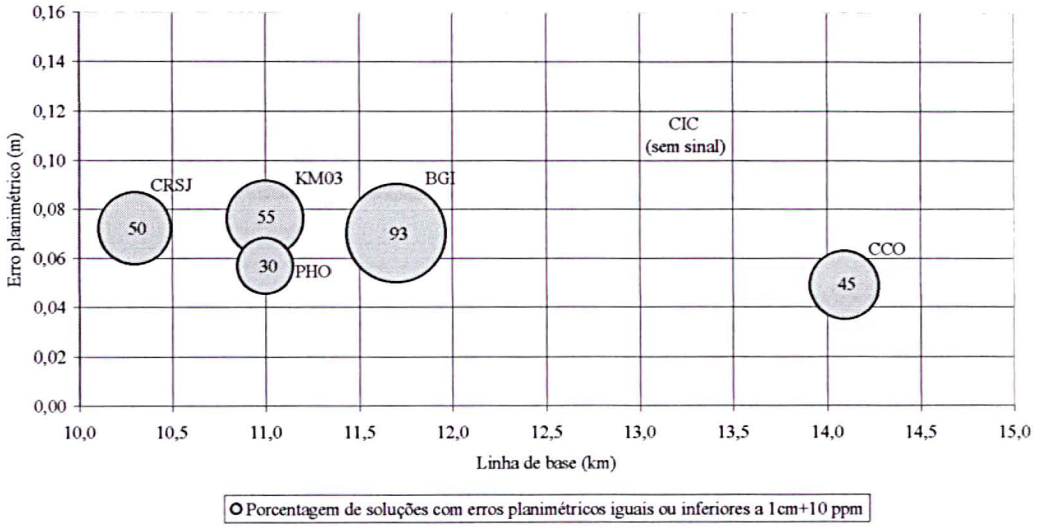
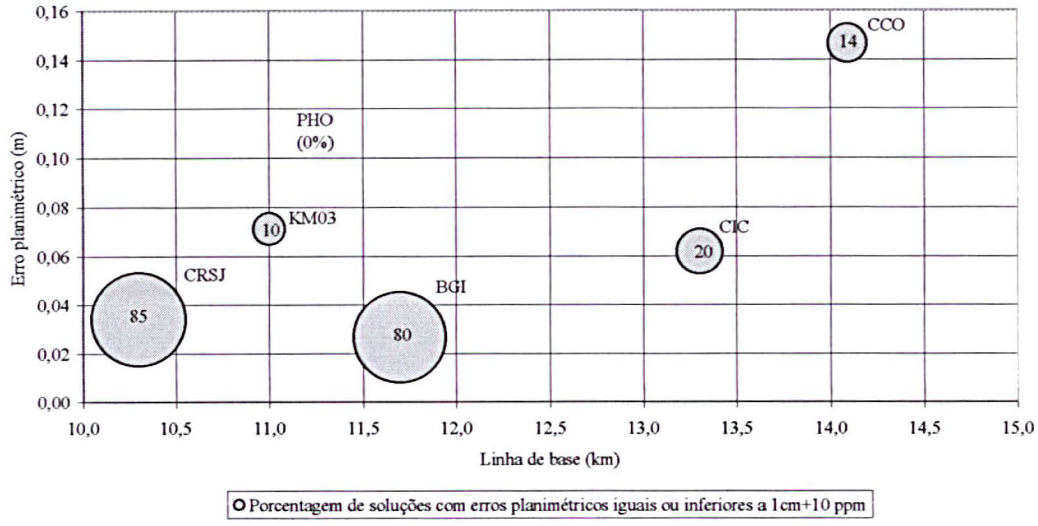


FIGURA 4.20 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 10 E 15 km (PRIMEIRA E SEGUNDA OCUPAÇÕES – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



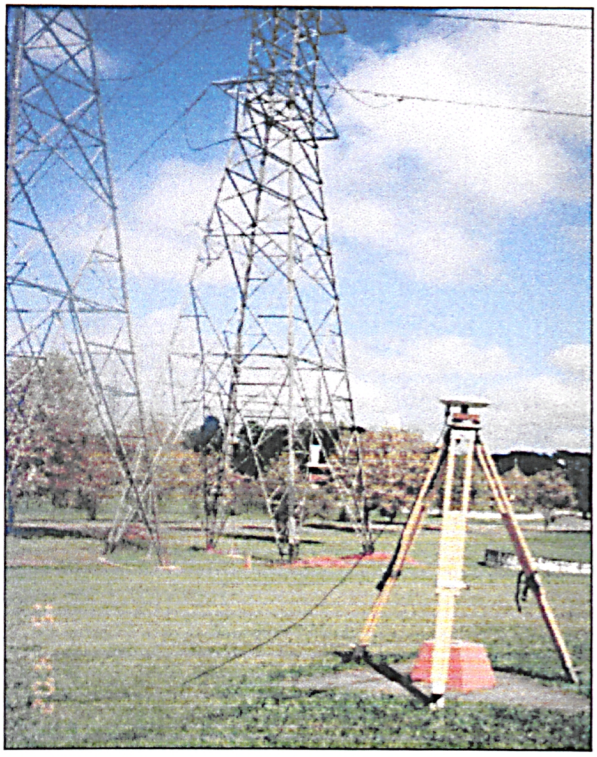
Constata-se que a mudança da estação de referência trouxe melhoria na confiabilidade do posicionamento e na qualidade da precisão das coordenadas do marco CRSJ. O marco BGI perdeu em confiabilidade, de 93% para 80%, porém ganhou em precisão, com os erros planimétricos reduzidos de 7,0 cm para 3,0 cm.

No marco PHO (figura 4.21) o emprego da estação de referência ADMN não trouxe nenhum benefício; no marco CCO (figura 4.22) houve uma redução em confiabilidade de 45% para 14% acompanhada de um aumento nos erros planimétricos de 5,0 cm para 15,0 cm.

No marco CIC verifica-se uma quantidade de 20% de soluções abaixo do erro almejado apresentando erros planimétricos da ordem de 6,2 cm, sendo este um ganho, visto que com o emprego da estação de referência RM03 não se obteve qualquer recepção de sinal.

FIGURA 4.21 – MARCO PHO

FIGURA 4.22 – MARCO CCO

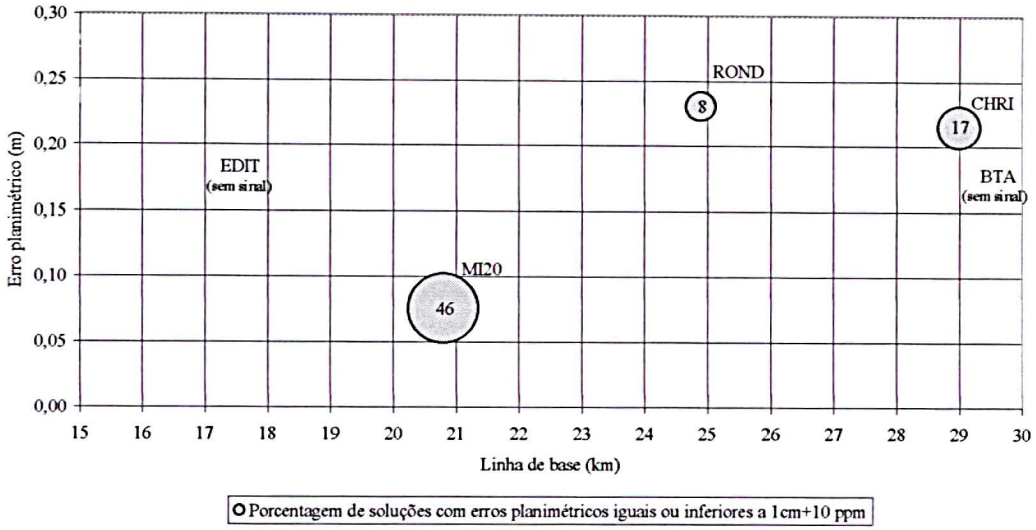


4.2.2.4 Linhas de base de 15 a 30 km

Neste trabalho, procurou-se utilizar marcos com comprimento de linha de base superior ao recomendado pela bibliografia especializada (seção 1.2) visando averiguar a distância máxima de operação da técnica RTK e a qualidade obtida.

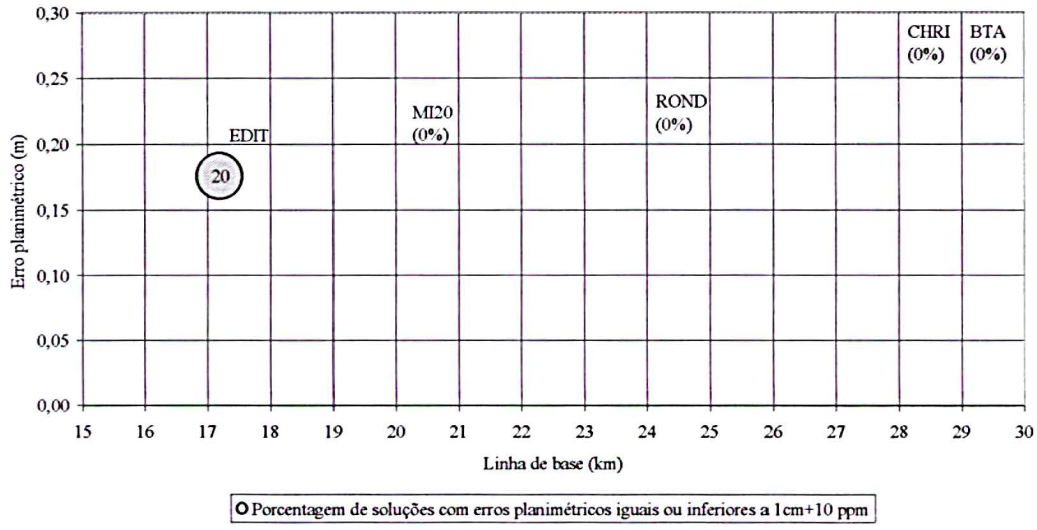
Considerando-se os valores médios dos erros obtidos nos marcos de 15 a 30 km com a utilização da estação de referência RM03 (figura 4.23), constata-se que a porcentagem das soluções obtidas com erros iguais ou inferiores a 1cm+10ppm diminuiu em relação às linhas de base curtas. Isto é um indicativo de que existe uma relação entre o aumento da linha de base com a redução da quantidade de soluções obtidas com precisão. Neste caso geralmente ocorre uma dificuldade na fixação das ambigüidades. Verifica-se também que duas estações relativas (EDIT e BTA) não receberam qualquer sinal da estação de referência RM03.

FIGURA 4.23 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 15 E 30 km (PRIMEIRA E SEGUNDA OCUPAÇÕES – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



A elevação da estação de referência (RM03 para a ADMN) permitiu que os marcos EDIT e BTA recebessem os sinais de correção diferencial. Contudo, no marco BTA não houve qualquer fixação de ambigüidades. Observa-se na figura 4.24 que apenas o marco EDIT apresentou uma porcentagem de soluções com erros planimétricos iguais ou inferiores a 1cm+10ppm. Constata-se que a troca da estação de referência praticamente não contribuiu no aumento de confiabilidade e precisão.

FIGURA 4.24 – ERRO PLANIMÉTRICO NAS LINHAS DE BASE ENTRE 15 E 30 km (PRIMEIRA E SEGUNDA OCUPAÇÕES – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



4.2.2.5 Análise conjunta de todas as linhas de base

Os gráficos de barras das figuras a seguir mostram a porcentagem de soluções RTK realizadas em cada marco com o emprego das estações de referência RM03 e ADMN (figuras 4.25 e 4.26), nas quais os erros planimétricos foram iguais ou inferiores a 1cm+10ppm. Este valor pode servir como um indicador de confiabilidade das observações.

FIGURA 4.25 –ERROS PLANIMÉTRICOS (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)

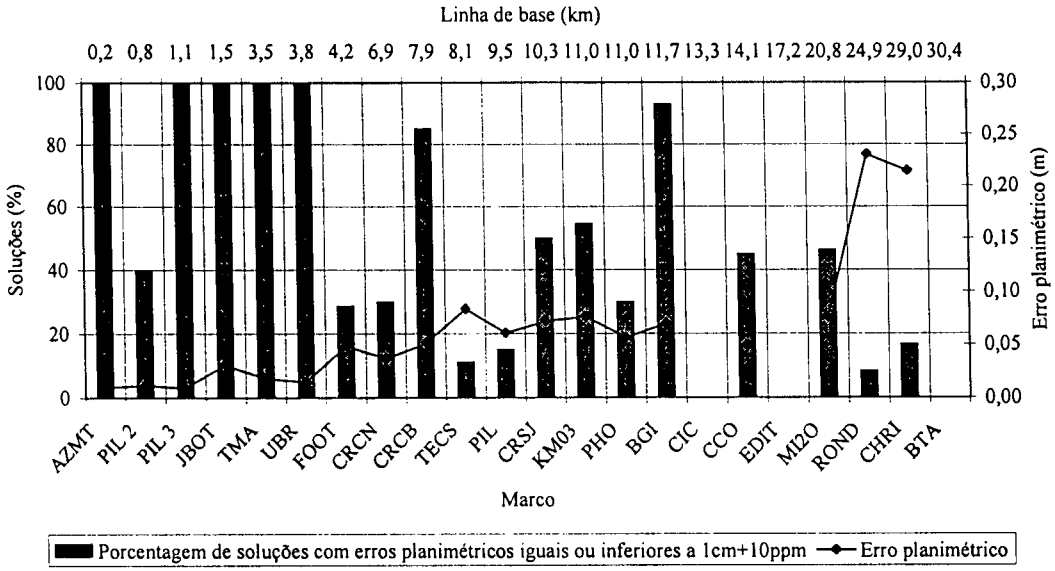
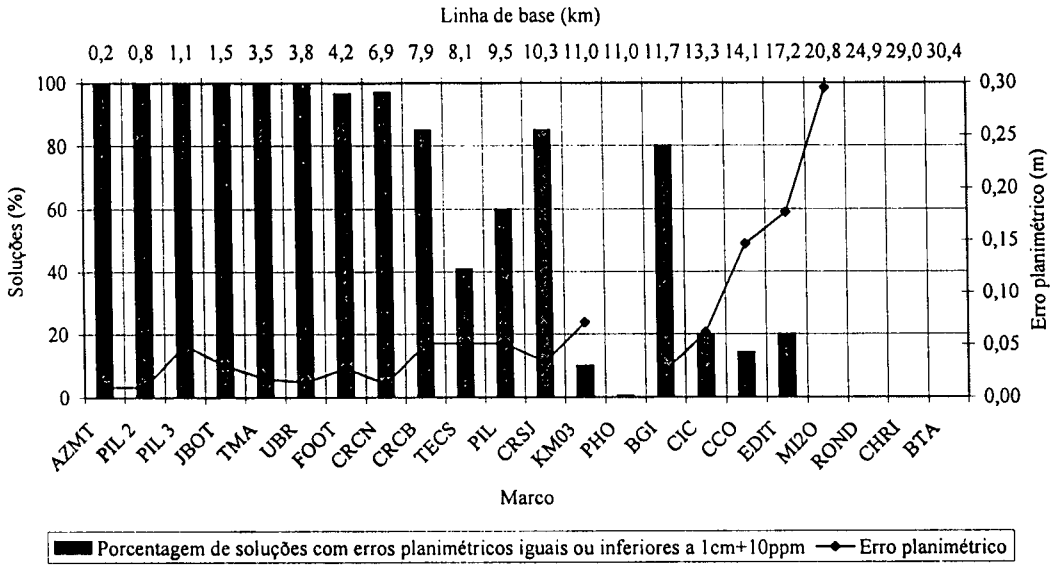


FIGURA 4.26 –ERROS PLANIMÉTRICOS (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



Pela análise das figuras 4.25 e 4.26 pode-se identificar os marcos nos quais o programa GNRT apresentou uma maior dificuldade na obtenção das coordenadas geodésicas precisas, em tempo real. As barras indicam a porcentagem de soluções que apresentaram erros iguais ou inferiores a 1cm+10ppm. Constata-se que em alguns casos este valor foi inferior a 40%, quando se deu o emprego da estação de referência RM03. Para as linhas de base de até 5 km, o erro planimétrico não ultrapassou 5,0 cm e para o intervalo de 5 a 10 km o erro planimétrico máximo foi 8,0 cm (figura 4.25).

Com o emprego da estação de referência ADMN, percebe-se que houve uma melhora nas soluções tanto em confiabilidade quanto em precisão principalmente nas linhas de base de até 10 km. Observa-se que a porcentagem de soluções com erros planimétricos iguais ou inferiores a 1cm+10ppm aumentou em todos os marcos e os erros nestes marcos apresentaram uma padronização aparente, não ultrapassando o valor de 5,0 cm.

Nas linhas de base maiores que 10 km pode-se observar uma tendência de aumento dos erros planimétricos. Contudo, observando-se as figuras 4.25 e 4.26 não foi possível estabelecer uma relação lógica entre os resultados empregando a estação de referência RM03 ou ADMN. Por exemplo, o marco BGI apresentou 93% das soluções dentro dos erros almejados com emprego da estação de referência RM03, significando que o sistema de comunicação teve um bom desempenho. Posteriormente obteve-se 80% das soluções dentro do erro almejado com o emprego da estação de referência ADMN. Contudo, verificou-se um ganho em precisão, o qual passou de 7,0 cm para 2,7 cm. Os marcos relativos PHO e CCO apresentaram uma diminuição na precisão do posicionamento RTK.

O marco EDIT, utilizado nos levantamentos DGPS (estação de referência instalada no marco RM03) apresentou problemas referentes à recepção das correções diferenciais (PRADO, 2001, p. 75), o que possivelmente prejudicou a qualidade posicional. Verifica-se que a mudança da estação de referência (RM03 para a ADMN) possibilitou a recepção dos sinais de correção diferencial neste marco relativo, obtendo-se erros planimétricos abaixo do almejado; porém, a confiabilidade não passou de 20%, comprovando de fato que a qualidade do sinal neste marco não é

satisfatória com o emprego de qualquer uma das estações de referência utilizadas (RM03 e ADMN).

Percebe-se que nas estações com linhas de base superiores a 12 km, quando se deu a mudança da estação de referência para o marco ADMN, houve uma porcentagem de soluções de caráter uniforme, apesar de se apresentar inferior a 20 %.

Nas figuras 4.27 e 4.28 apresentam-se os erros planimétricos obtidos com o levantamento RTK nos marcos relativos, com o emprego das estações de referência RM03 e ADMN, em linhas de base de até 16 km e em linhas de base entre 16 e 30 km, respectivamente. Analisando-se conjuntamente estes erros constata-se que a troca da estação de referência trouxe progressos consideráveis em precisão nas linhas de base de até 12 km. Nas linhas de base compreendidas entre 12 e 20 km, estes erros estiveram abaixo de 1cm+10ppm. Na figura 4.28 percebe-se que a estratégia não surtiu os efeitos esperados nas linhas de base com comprimentos superiores a 20 km visto que os erros planimétricos apresentam-se superiores ao almejado (1cm+10ppm).

FIGURA 4.27 – ERRO PLANIMÉTRICO (LINHAS DE BASE DE ATÉ 16 km)

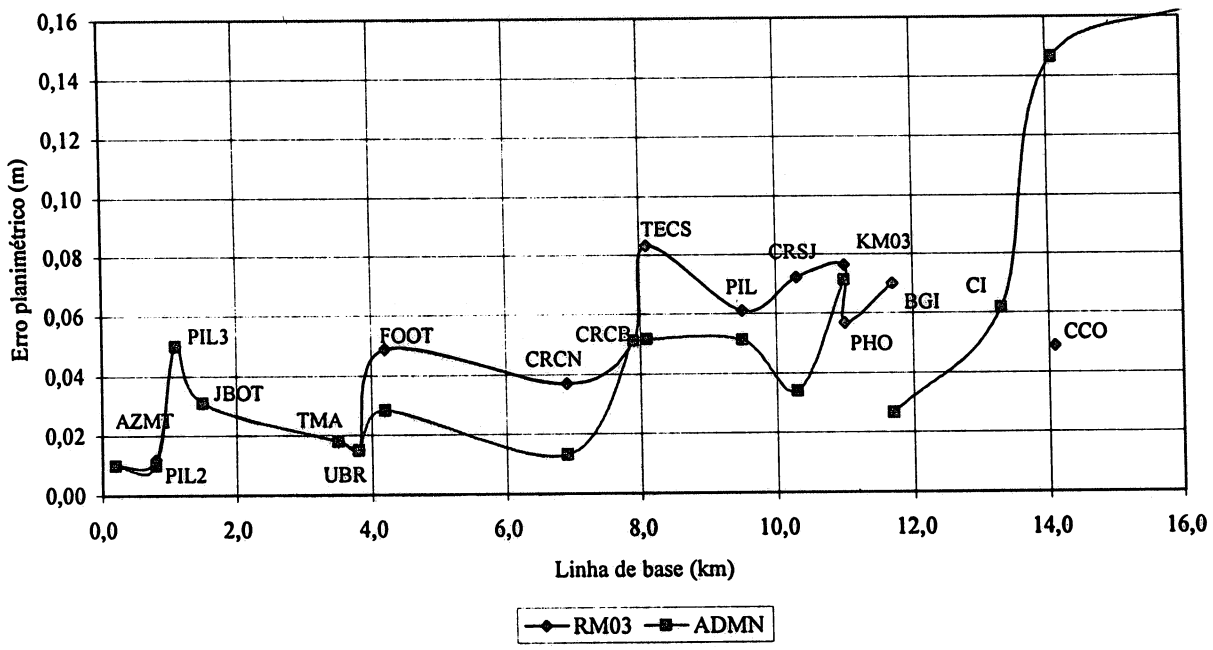
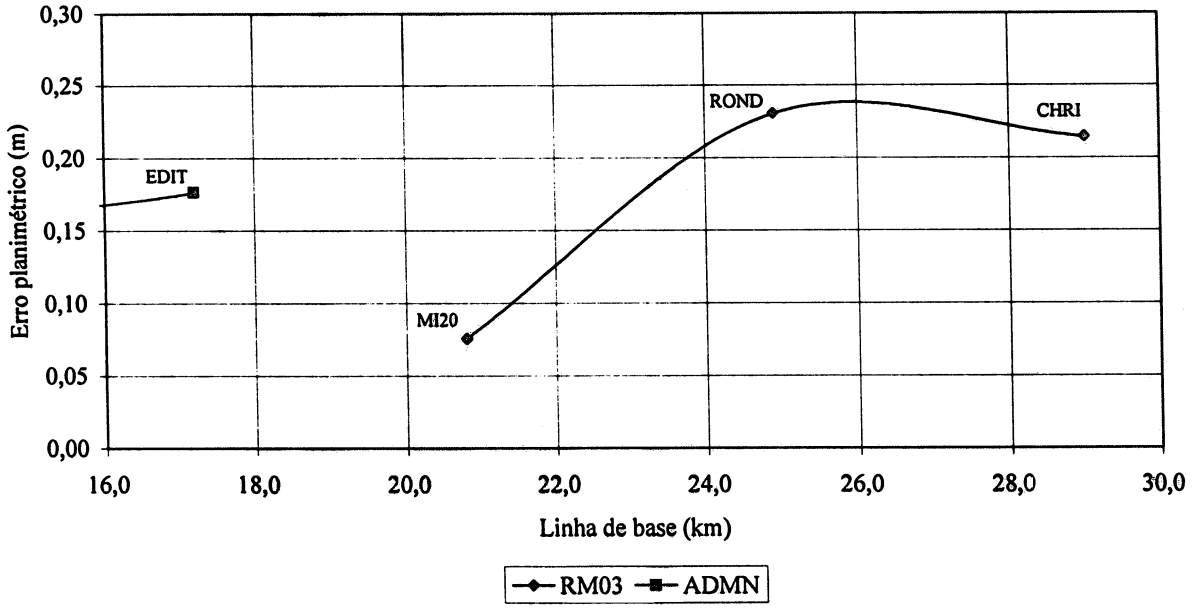


FIGURA 4.28 – ERRO PLANIMÉTRICO (LINHAS DE BASE DE 16 A 30 km)



4.2.3 Erros Altimétricos das Soluções com Erros Planimétricos Iguais ou Inferiores a 1cm+10ppm

Inseridos no contexto das análises posicionais, os erros altimétricos também foram analisados e estão dispostos nos gráficos de barras apresentados nas figuras 4.29 e 4.30 .

FIGURA 4.29 –ERROS ALTIMÉTRICOS (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)

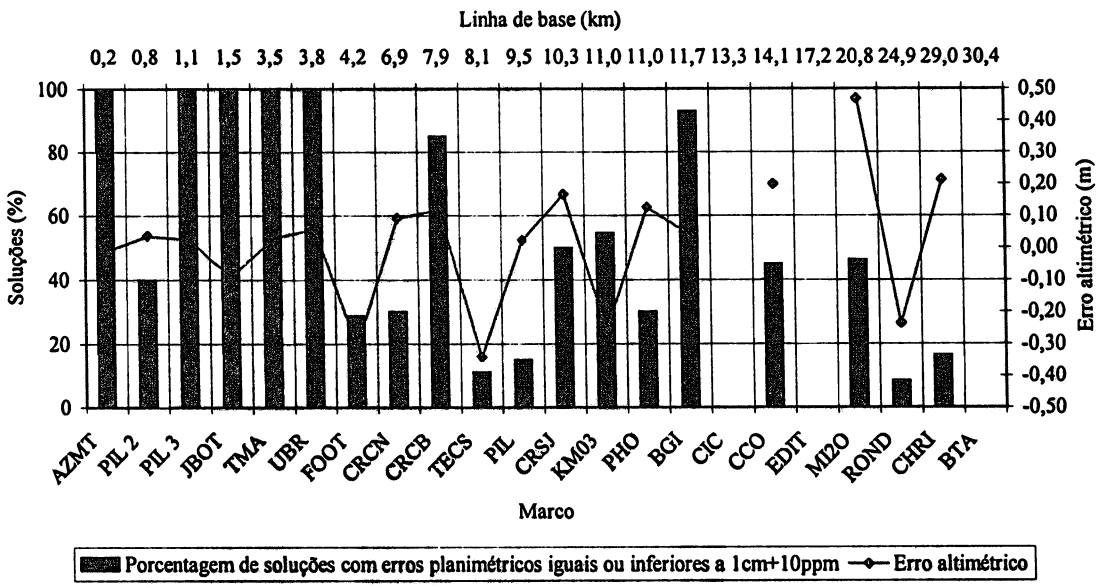
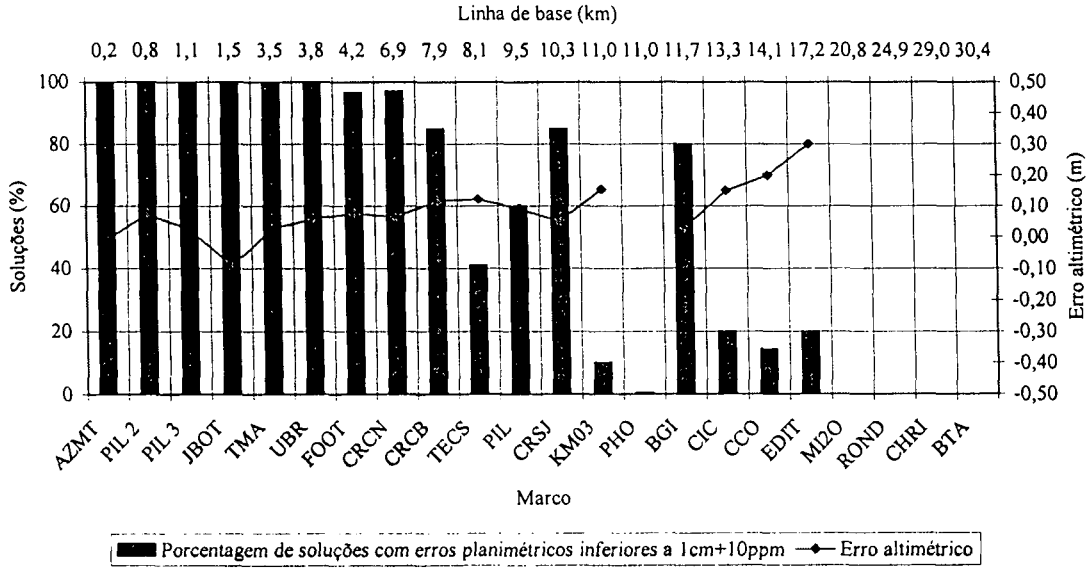


FIGURA 4.30 –ERROS ALTIMÉTRICOS (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



Percebe-se no gráfico 4.29 (estação de referência RM03) que os erros altimétricos variaram de –34,0 cm a 17,0 cm nas linhas de base de até 10 km, enquanto que no gráfico 4.30 (estação de referência ADMN) observa-se que o erro variou de -10,0 cm a 15,0 cm nestas mesmas linhas de base.

Em vista destes resultados, pode-se afirmar que a mudança da estação de referência para o marco ADMN gerou uma melhora na precisão altimétrica. Os marcos que apresentaram menor porcentagem de soluções com erros planimétricos iguais ou inferiores a 1cm+10ppm também apresentaram melhoras na precisão altimétrica, exceto no marco PIL2, onde o erro altimétrico aumentou de 3,0 cm para 7,0 cm e no marco PIL, de 2,0 cm para 9,0 cm (figuras 4.29 e 4.30).

Da mesma forma como foi realizado na seção 4.2.2.5, apresentam-se os erros altimétricos obtidos com o levantamento RTK nos marcos relativos, com o emprego das estações de referência RM03 e ADMN nas linhas de base de até 16 km (figura 4.31) e nas linhas de base entre 16 e 30 km (figura 4.32). Analisando-se conjuntamente as figuras 4.31 e 4.32 observa-se que a amplitude destes erros diminuiu com a troca da estação de referência na maioria das estações relativas ocupadas com este levantamento. Constata-se que há uma tendência de acréscimo destes erros com o aumento da distância que separa as estações de referência e móvel, comprovando a existência da correlação espacial.

FIGURA 4.31 – ERRO ALTIMÉTRICO (LINHAS DE BASE DE ATÉ 16 km)

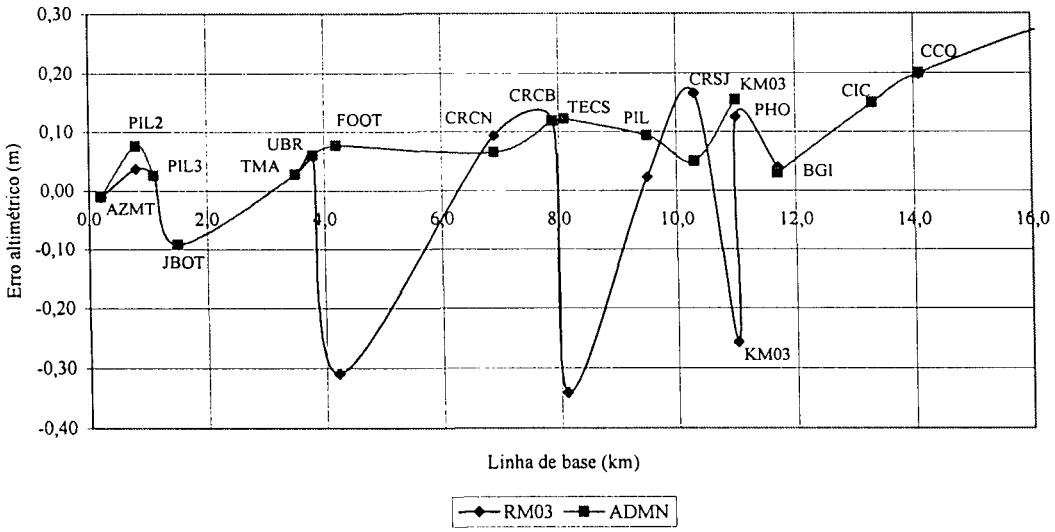
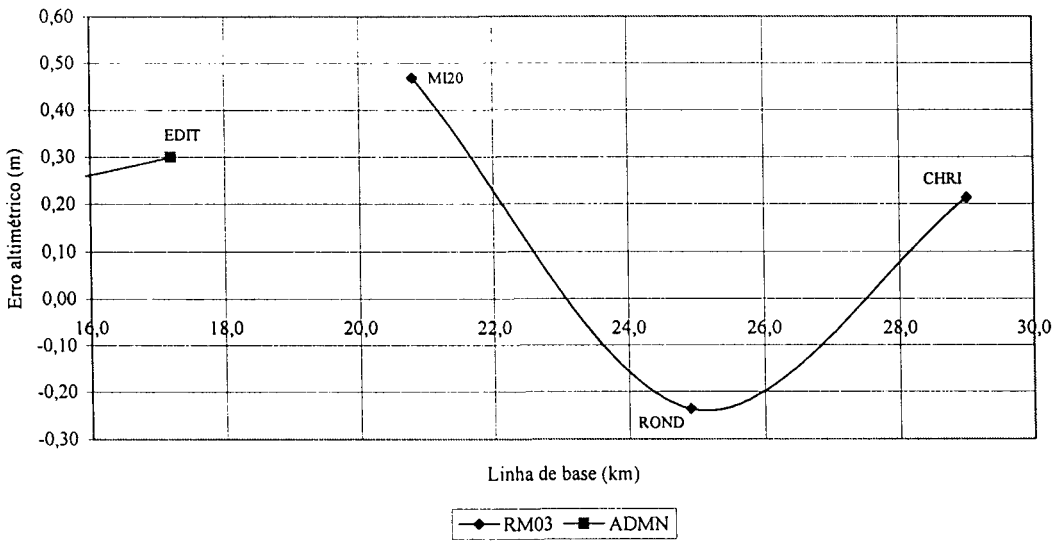


FIGURA 4.32 – ERRO ALTIMÉTRICO (LINHAS DE BASE DE 16 A 30,4 km)



4.2.4 Tempo de Fixação das Ambigüidades das Soluções com Erros Planimétricos Iguais ou Inferiores a 1cm+10ppm

Uma variável importante a ser considerada nos levantamentos RTK é o tempo de fixação das ambigüidades (TTFA) (seção 2.2.4.2). Visando relacionar a porcentagem de soluções com erro planimétrico igual ou inferior a 1cm+10ppm com o TTFA foram gerados os gráficos apresentados nas figuras 4.33 e 4.34.

FIGURA 4.33 – TTFA (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)

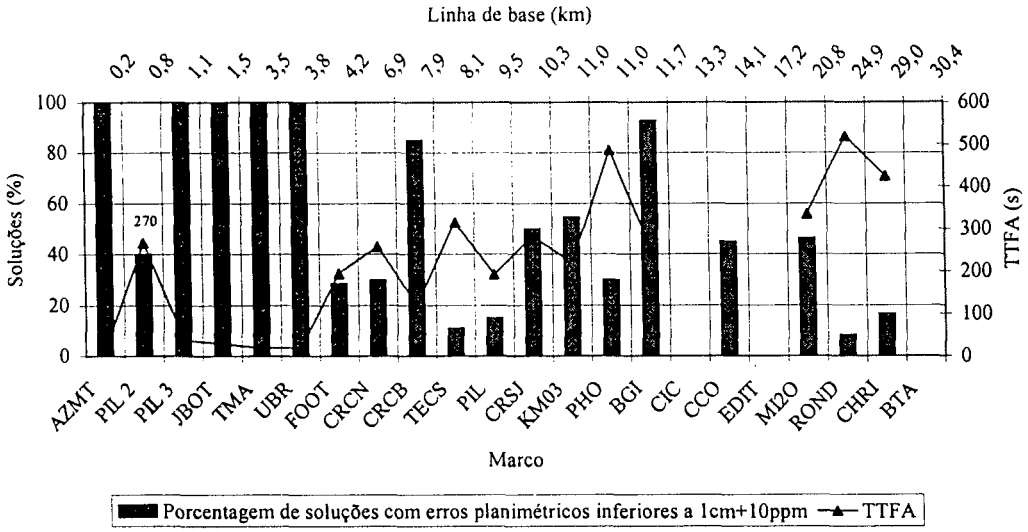
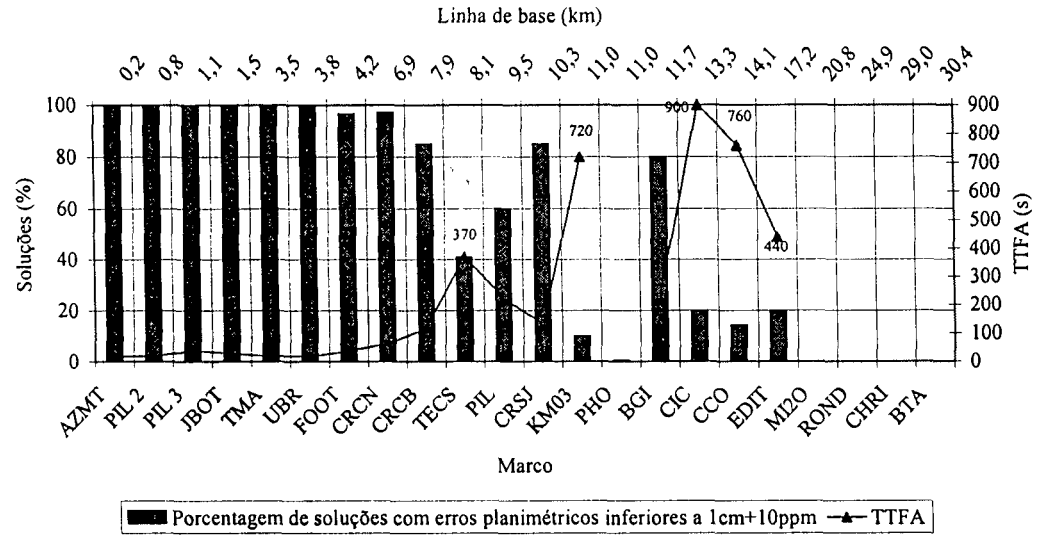


FIGURA 4.34 –TTFA (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



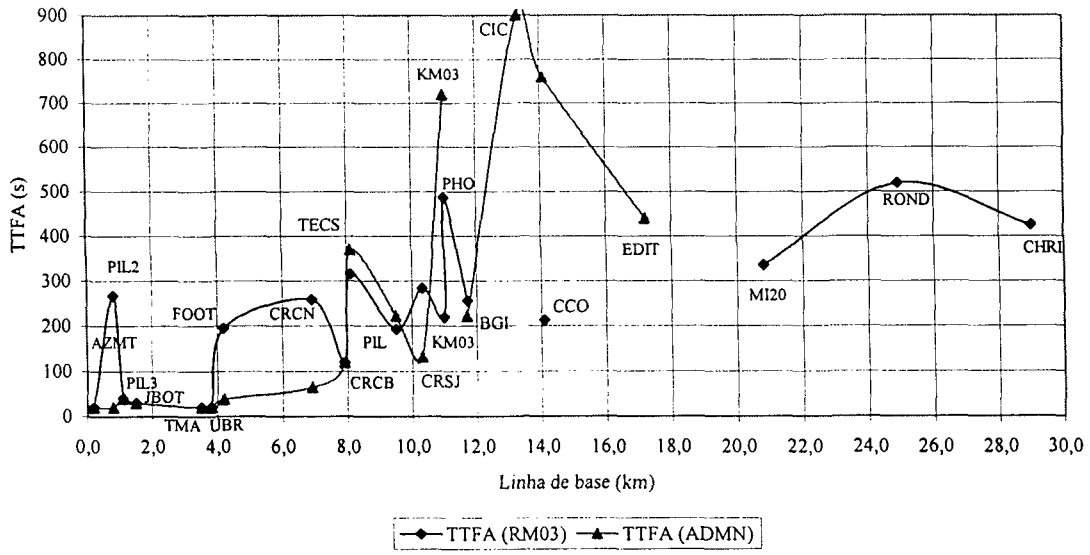
No marco PIL2 percebe-se que houve uma maior dificuldade para o programa GNRT resolver as ambigüidades (figura 4.33) visto que o TTFA foi igual a 270 segundos quando a estação de referência era a RM03. Esta dificuldade, já comentada na seção 4.2.1.1, pode ter sido provocada pelo efeito de multicaminho ou, mais provável, em função das obstruções existentes no horizonte de chegada do sinal da correção, visto que na ocupação com a estação de referência ADMN (figura 4.34), este problema não se verificou (TTFA igual a 20 segundos).

Analisando-se as porcentagens de soluções e os respectivos valores de TTFA, verifica-se que o aumento da confiabilidade pode estar relacionado com a diminuição

do TTFA (marcos relativos PIL2, FOOT, CRCN e CRSJ). A mesma relação não se verificou nos marcos TECS, PIL e KM03 visto que tiveram um ganho moderado na porcentagem de soluções com erros iguais ou inferiores ao preconizado sem contudo haver redução nos valores de TTFA.

Procurando avaliar simultaneamente os valores de TTFA ocorridos nos marcos relativos com o emprego das estações de referência RM03 e ADMN apresenta-se a figura 4.35. Nela observa-se a distribuição dos marcos relativos conforme suas respectivas linhas de base e as médias do TTFA.

FIGURA 4.35 – TTFA (ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA RM03 E ADMN)



Nota-se que houve uma homogeneização nos valores de TTFA nos marcos de linhas de base curta (até 6 km) quando se deu a mudança da estação de referência, com tempos variando de 20 a 40 segundos. Nas linhas de base entre 6 e 10 km verifica-se uma redução significativa no TTFA para os marcos CRCN e CRSJ.

Nos marcos de linhas de base entre 10 e 20 km esta estratégia não trouxe resultados otimistas, apresentando apenas uma redução nos valores do TTFA nos marcos relativos CRSJ (CLB igual a 10,3 km) e BGI (CLB igual a 11,7 km). Elas representam um total de aproximadamente 25% das estações relativas ocupadas dentro deste intervalo.

4.2.5 Análise Conjunta de Alguns Parâmetros que Podem Afetar o Desempenho do Posicionamento em Tempo Real

No posicionamento RTK, vários são os parâmetros a serem considerados para que se possam caracterizar o rendimento e o controle do processo, e.g.: a precisão, o tempo de fixação das ambigüidades (TTFA), a capacidade do sistema em manter os satélites com as ambigüidades fixadas e a distância operacional ou linha de base (EDWARDS, 1999, p. 174).

Conforme LEICK (1995, p 253), os fatores de diluição de precisão (DOP) têm sido utilizados para descrever o efeito da distribuição geométrica dos satélites sobre a acurácia do posicionamento (seção 2.1.4.1). Atualmente, o período de coleta de dados não é mais crítico haja visto que, a partir do momento em que a constelação GPS tornou-se completa em 8 de dezembro de 1993, os valores de PDOP passaram a ser relativamente baixos frente a capacidade dos receptores modernos de rastrear todos os satélites visíveis (MONICO, 2000, p. 191).

Por sua vez, a quantidade de satélites rastreados pode influenciar no sucesso da fixação das ambigüidades.

Como foi mencionado na seção 4.2.4 o TTFA é uma variável a ser considerada no levantamento RTK, a qual pode auxiliar na análise da qualidade do posicionamento.

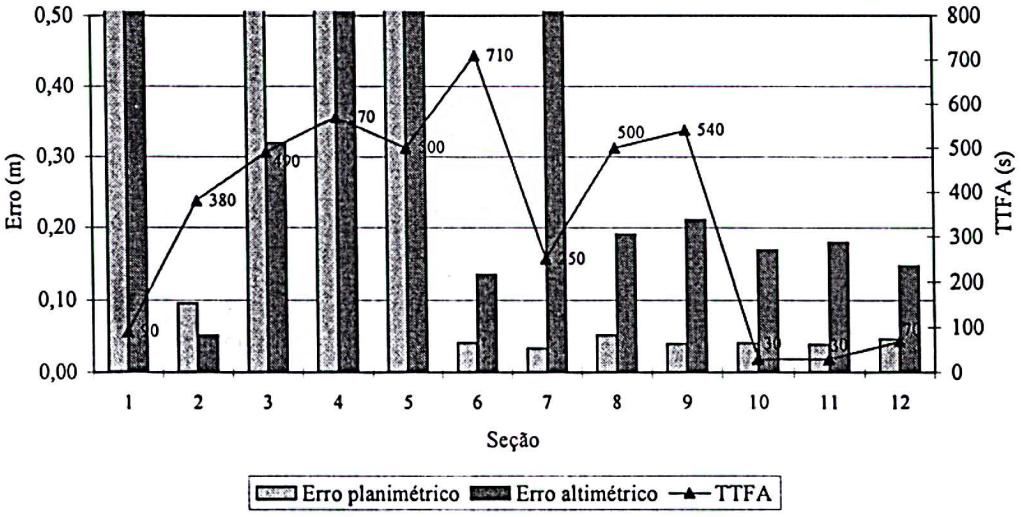
Correlacionando-se o TTFA com estas outras variáveis, e.g., o PDOP e VDOP e a quantidade de satélites buscar-se-á avaliar a precisão e a confiabilidade desta técnica de levantamento em alguns dos marcos relativos.

4.2.5.1 Marco relativo TECS

Conforme exposto na seção 3.1.4, o marco TECS dista aproximadamente 8,1 km das estações de referência RM03 e ADMN. Nas seções 4.2.2.2 e 4.2.2.5 constatou-se que este marco apresentou uma elevação da porcentagem das soluções com erros planimétricos iguais ou inferiores a 1cm+10ppm quando se deu a modificação da estação de referência do marco RM03 para o ADMN.

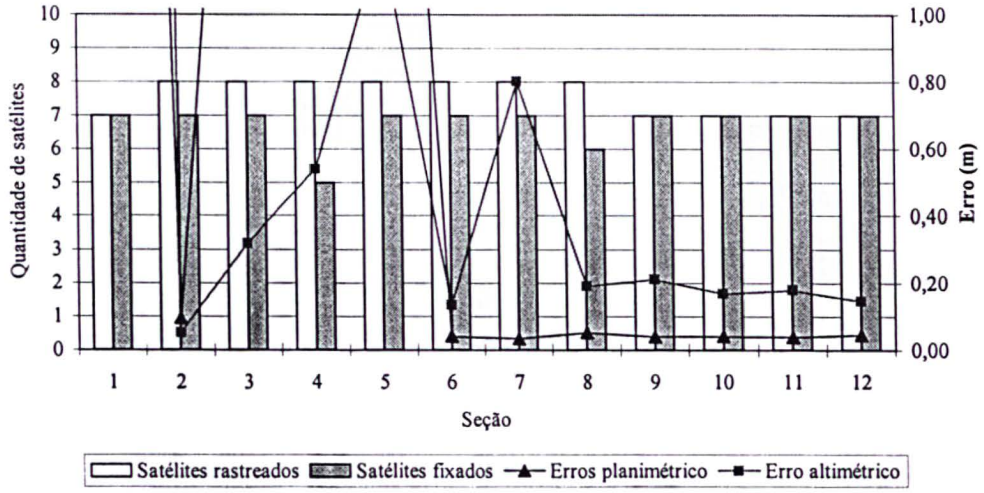
Analisando agora as cinco primeiras seções da segunda ocupação neste marco (figura 4.36) com emprego da estação de referência ADMN, percebe-se que o TTFA se mostrou crescente, atingindo valores máximos de 570 segundos com erros no posicionamento planimétrico além de 1cm+10ppm (acima de 9,0 cm). Apenas na sexta seção os erros planimétricos entram na faixa de aceite; todavia, com o TTFA atingindo um valor máximo de 710 segundos. A partir da décima seção, o TTFA assume valores inferiores a 100 segundos com os erros planimétricos dentro do almejado.

FIGURA 4.36 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO E TTFA
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO TECS – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



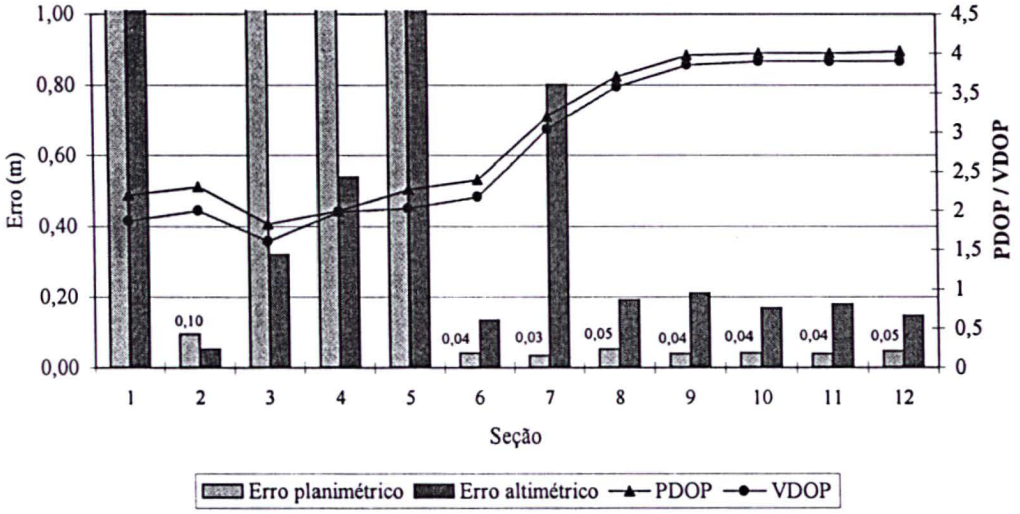
Analisando-se a figura 4.37, nota-se que existe uma diferença na quantidade de satélites rastreados com a quantidade de satélites que tiveram suas ambigüidades fixadas até a oitava seção. Estas seções apresentaram erros planimétricos superiores ao almejado (9,0 cm) e demandaram altos valores de TTFA, conforme observa-se na figura 4.36. Para as seções de 10 a 12 verificou-se uma estabilização dos erros e do TTFA, e a quantidade de satélites rastreados e fixados foi idêntica (sete satélites).

FIGURA 4.37 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO E QUANTIDADE DE SATÉLITES (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO TECS – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



Contudo, nestas seções, os valores de PDOP e VDOP foram mais elevados (da ordem de 4), conforme pode-se observar na figura 4.38.

FIGURA 4.38 – ERROS PLANIMÉTRICOS E ALTIMÉTRICOS, PDOP E VDOP (SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO TECS – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



NOTA: valores indicados referentes aos erros planimétricos.

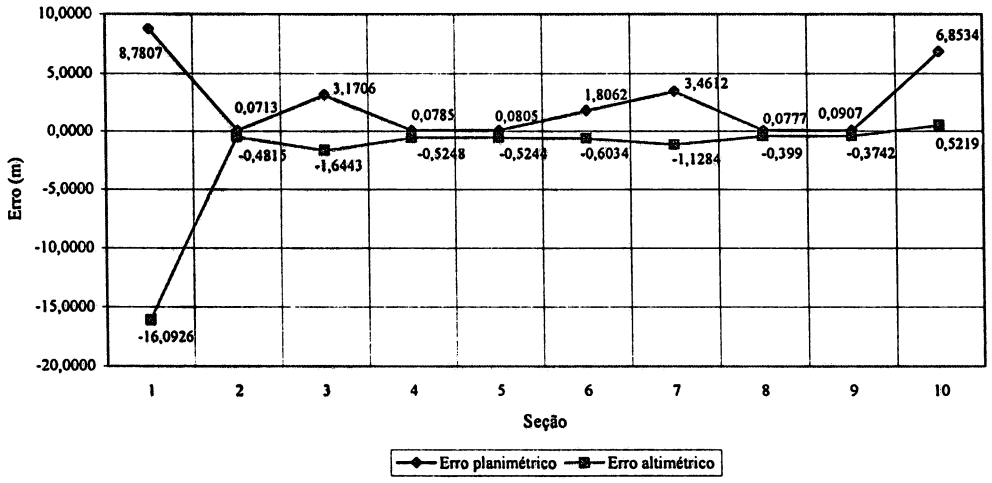
A maior diferença entre a quantidade de satélites rastreados e fixados ocorreu na quarta seção onde observam-se oito satélites rastreados; contudo, houve apenas a fixação das ambigüidades em cinco destes satélites (figura 4.37) apresentando um TTFA igual a 570 segundos (figura 4.36).

4.2.5.2 Marco relativo MI20

O marco relativo MI20 situa-se a aproximadamente 20,8 km das estações de referência RM03 e ADMN (seção 3.1.4). O levantamento RTK apresentou resultados negativos (figuras 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26) quando se deu a mudança da estação de referência do marco RM03 para o marco ADMN, sendo pertinente realizar-se a análise conjunta de alguns dos parâmetros citados na seção 4.2.5.

Na figura 4.39 observam-se os erros planimétricos e altimétricos obtidos com a segunda ocupação deste marco, quando foi instalada a estação de referência no marco RM03. Há um total de dez seções, sendo que, em cinco seções, os erros estiveram acima do limite determinado (1cm+10ppm $\triangleq$ 21,9 cm) representando 50% das soluções das observações realizadas.

FIGURA 4.39 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO MI20 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)

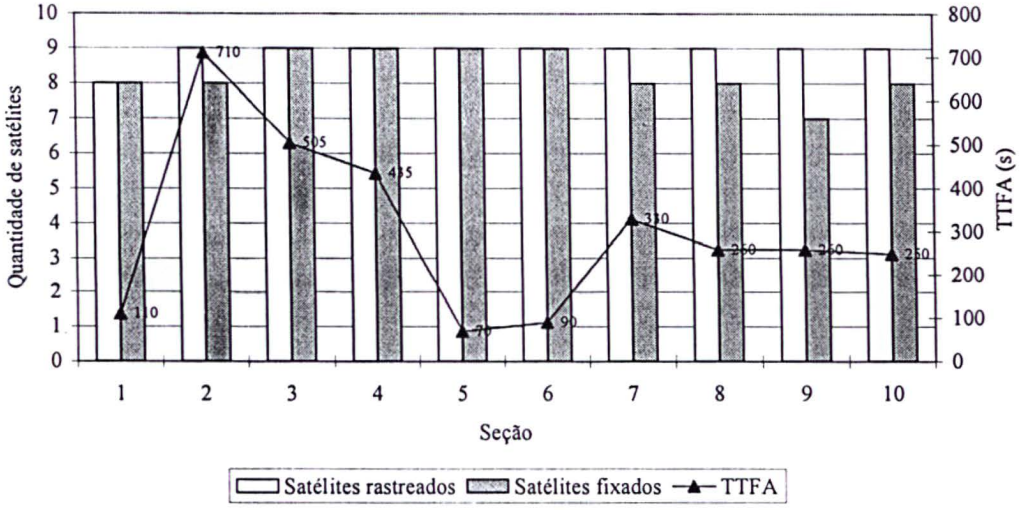


Nestas seções constata-se que o erro planimétrico alcançou 8,78 m e o erro altimétrico variou de –16,0 m a 0,5 m.

Nota-se na figura 4.40 que nas seções de observação bem sucedidas (seções 2, 4, 5, 8 e 9) tem-se valores de TTFA variando de 70 a 710 segundos. Este fato pode estar correlacionado com o comprimento da linha de base (seção 2.1.4), visto que ela é superior a 20 km (quadro 3.4).

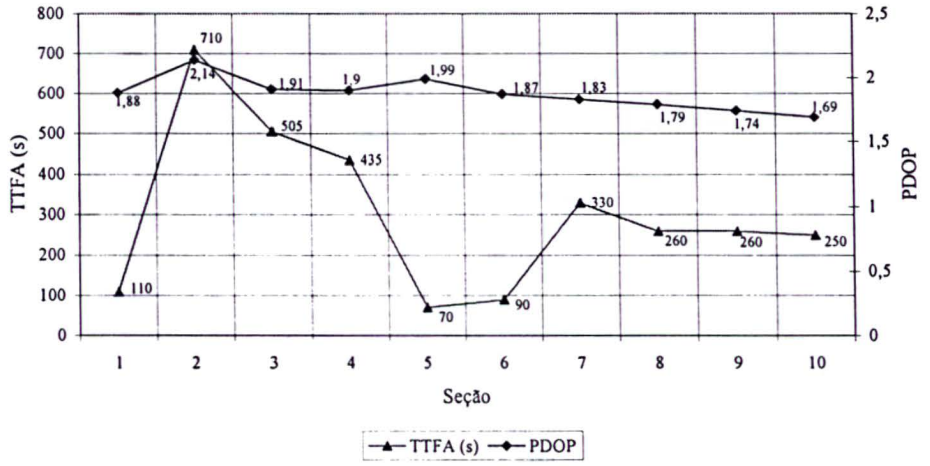
Os menores valores de TTFA (figura 4.40) ocorreram na quinta e na sexta seções contando-se com nove satélites rastreados e com as suas ambigüidades fixadas, contudo apenas na quinta seção os erros planimétricos foram inferiores ao almejado.

FIGURA 4.40 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO MI20 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



A figura 4.41 apresenta o TTFA e o PDOP das seções realizadas. Constata-se que o PDOP encontra-se dentro dos valores almejados. Percebe-se que na quinta seção o valor do PDOP é da ordem de 2,0 e na sexta seção é da ordem de 1,8.

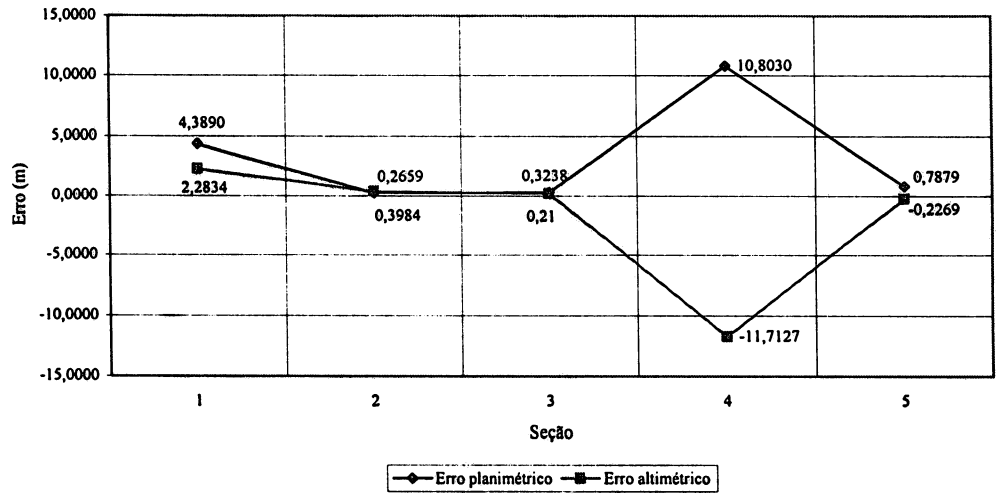
FIGURA 4.41 – TTFA E PDOP
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO MI20 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



Na figura 4.42 observam-se os erros planimétricos e altimétricos obtidos com a segunda ocupação neste marco, quando se deu a instalação da estação de referência

no marco ADMN. Realizou-se um total de cinco seções sendo que em todas elas os erros se apresentaram acima do valor requerido (21,9 cm). A segunda e terceira seções apresentaram os menores erros planimétricos e altimétricos durante esta ocupação contudo não foram aceitas como soluções válidas.

FIGURA 4.42 – ERROS PLANIMÉTRICOS E ALTIMÉTRICOS
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO MI20 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



Observa-se na figura 4.43 que apenas na primeira seção a quantidade de satélites rastreados foi igual à quantidade de satélites com as suas ambigüidades fixadas (oito satélites). Nas outras seções percebe-se uma diferença de um a dois satélites, apresentando estas seções os maiores valores de TTFA nesta ocupação.

FIGURA 4.43 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO MI20 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)

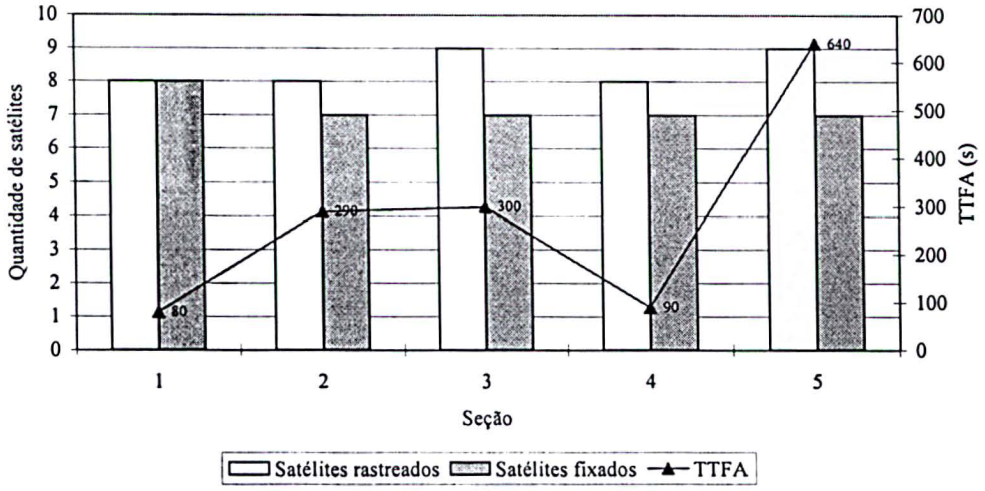
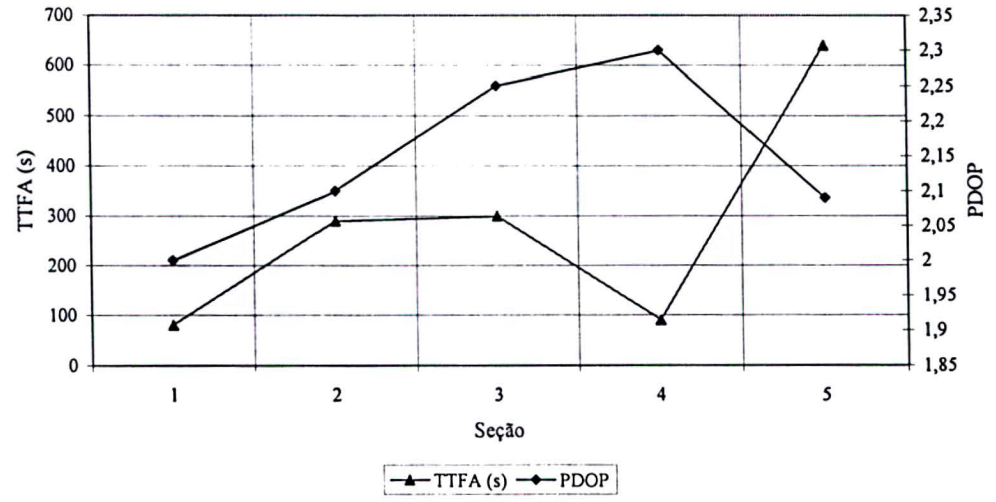


FIGURA 4.44 – TTFA E PDOP
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO MI20 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN

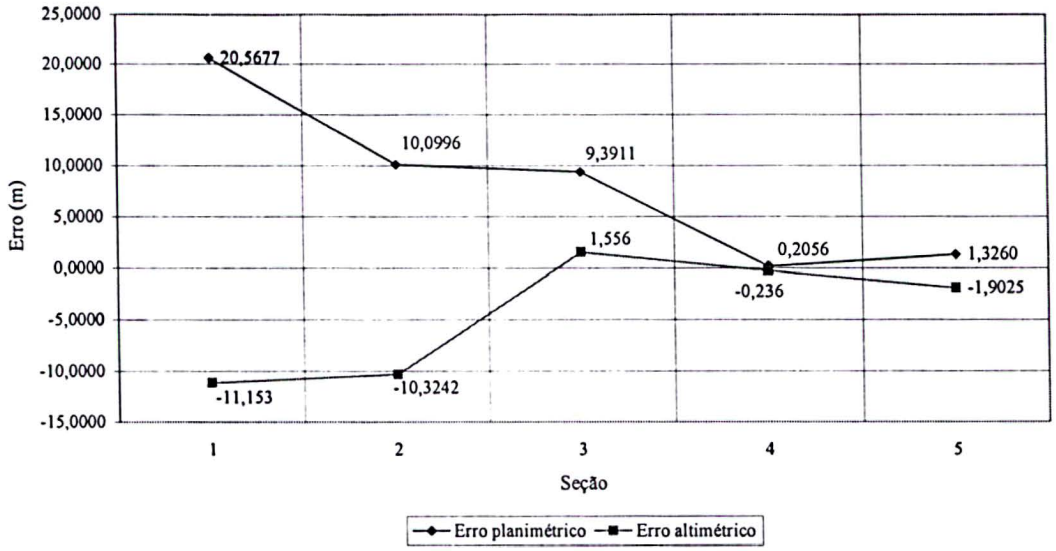


4.2.5.3 Marco relativo CHRI

Este marco relativo dista aproximadamente 29 km das estações de referência RM03 e ADMN (quadro 3.4). Na figura 4.45 apresentam-se os erros planimétricos e altimétricos resultantes das cinco seções realizadas com este levantamento RTK durante a primeira ocupação no marco relativo CHRI quando se deu a instalação da estação de referência no marco RM03.

Pela análise das observações e resultados obtidos com esta ocupação constata-se que houve um aumento na dificuldade de fixação das ambigüidades dos satélites (figuras 4.46), podendo ser explicado pela distância deste marco em relação à estação de referência. Nesta ocupação, apenas uma solução (figura 4.45, quarta seção) foi aceita com um erro igual ou inferior a 1cm+10ppm (30 cm) apresentando um TTFA igual a 145 segundos, havendo oito satélites rastreados dos quais sete satélites tiveram as suas ambigüidades fixadas (figura 4.46) e PDOP igual a 1,8 (figura 4.47).

FIGURA 4.45 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



NOTA: valores indicados referentes aos erros planimétricos.

FIGURA 4.46 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)

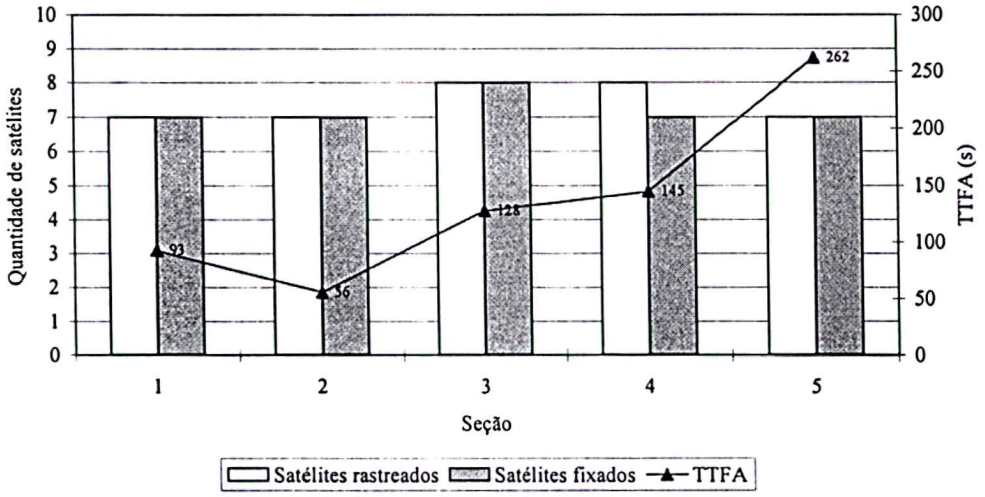
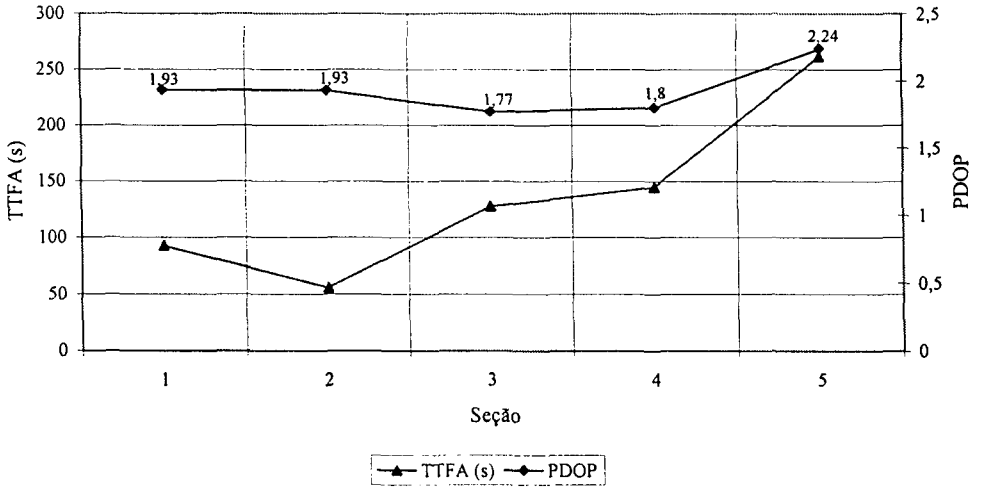


FIGURA 4.47 – TTFA E PDOP
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



Analisando-se as figuras 4.45, 4.46 e 4.47 constata-se que houve a saída de um satélite entre as seções 3 e 5, ocorrendo uma degradação da precisão da quarta para a quinta seção e uma elevação do PDOP e do TTFA.

Na segunda ocupação neste mesmo marco, o resultado satisfatório (quarta seção) demandou o maior TTFA, igual a 705 segundos, com o rastreio e a fixação das ambigüidades de oito satélites (figura 4.49), contudo o menor erro obtido neste marco foi de 22,0 cm na componente planimétrica e 19,0 cm na componente altimétrica (figura 4.48). Na figura 4.50 percebe-se que o valor do PDOP nesta seção foi o menor valor alcançado dentre todos.

FIGURA 4.48 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)

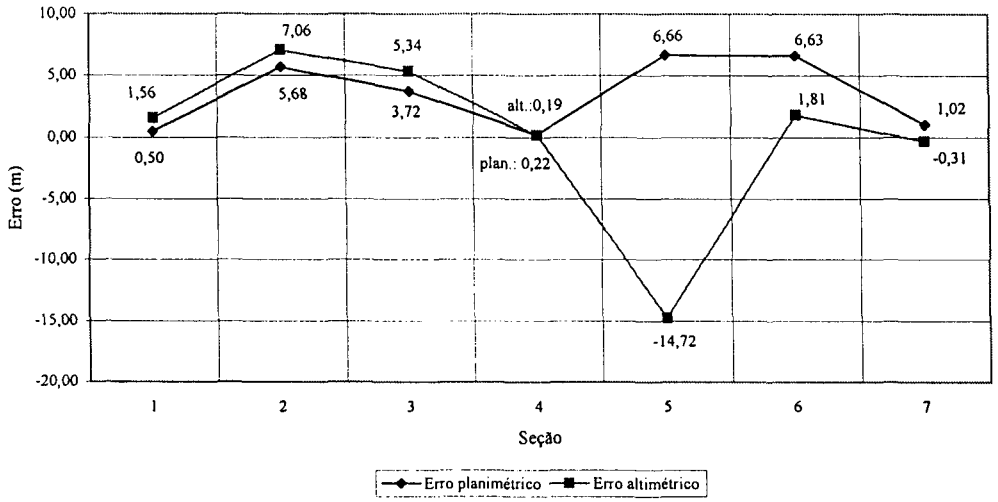


FIGURA 4.49 – NÚMERO DE SATÉLITES E TTFA
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)

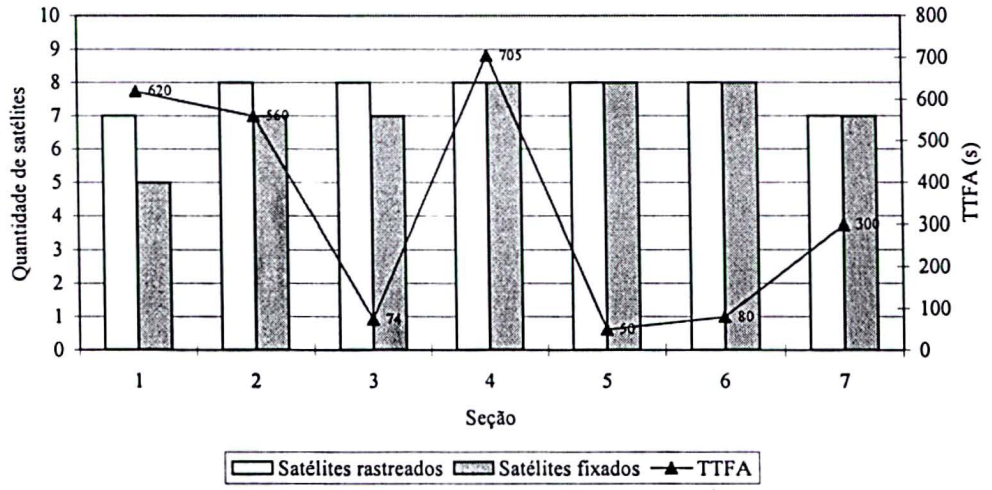
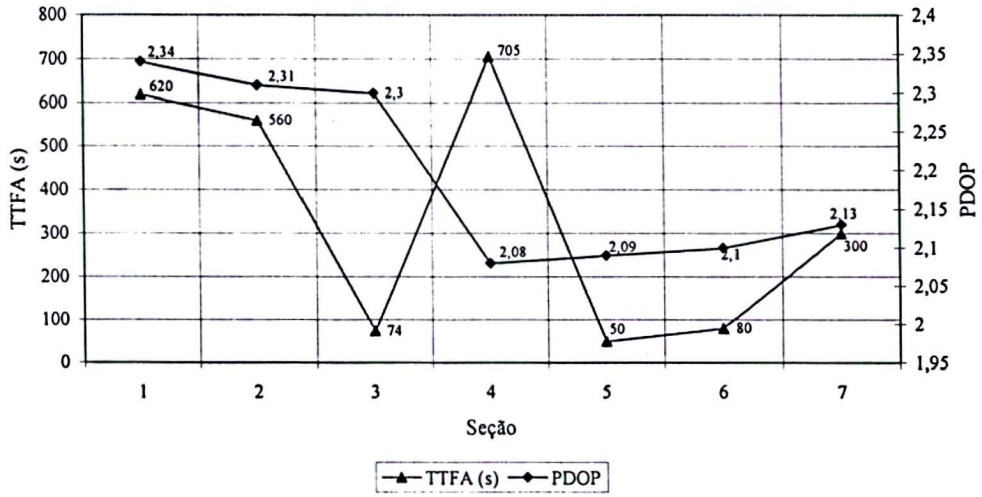


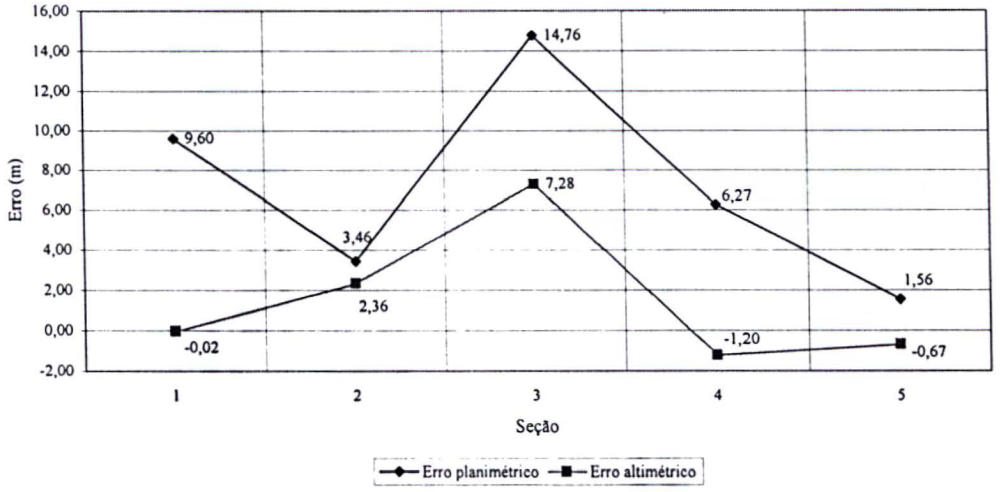
FIGURA 4.50 – TTFA E PDOP
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



A ocupação neste marco relativo com a instalação da estação de referência no marco ADMN também não foi bem sucedida. Percebe-se na figura 4.51 que em todas as seções os erros planimétricos resultaram acima de 1cm+10ppm.

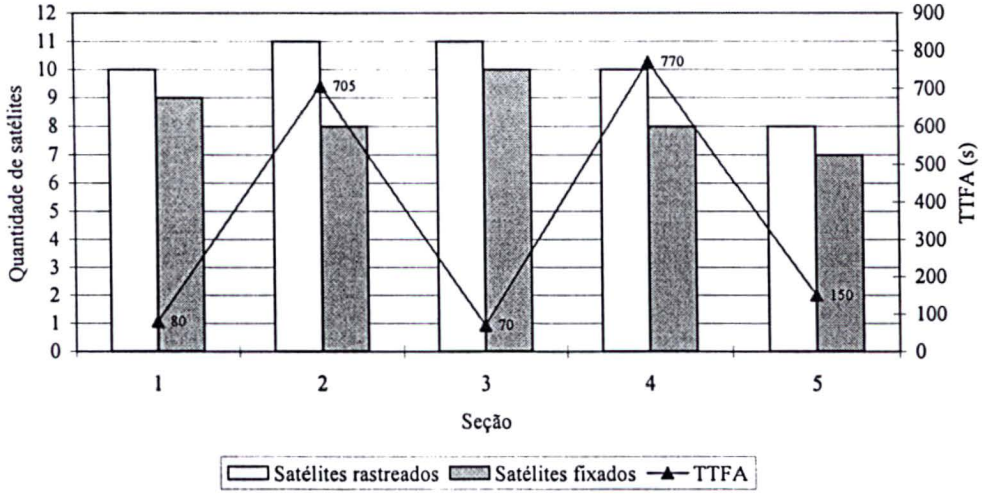
Verifica-se que nesta ocupação houve uma quantidade mínima de oito satélites rastreados; contudo, esta quantidade de satélites nunca foi igual à quantidade de satélites que tiveram as suas ambigüidades fixadas (figura 4.52).

FIGURA 4.51 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



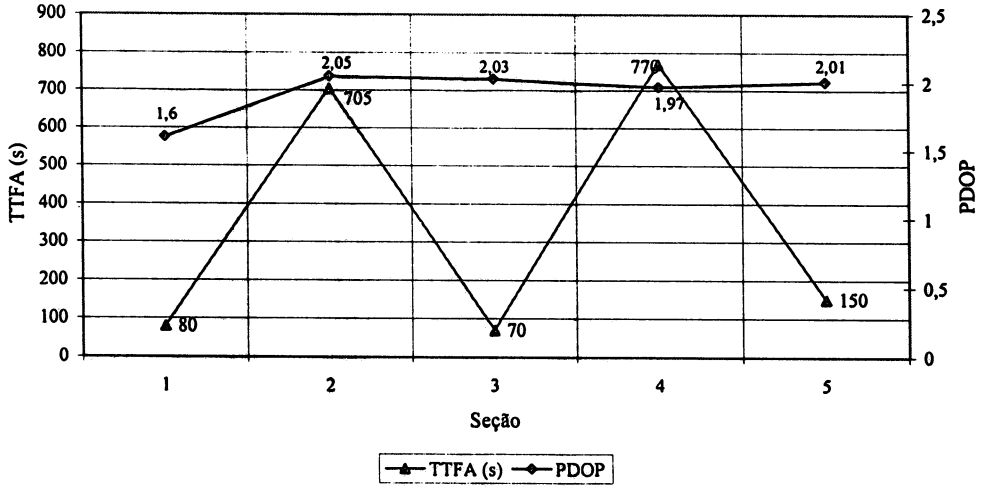
O TTFA (figura 4.52) foi variável, apresentando os maiores valores quando a diferença entre a quantidade de satélites rastreados e fixados foi superior a um (segunda e quarta seções).

FIGURA 4.52 – NÚMERO DE SATÉLITES E TTFA
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



O PDOP (figura 4.53) manteve-se inferior a 2,1 durante todo o período de ocupação. Esta instabilidade nas soluções e na qualidade destas soluções pode ser atribuída ao comprimento da linha de base (29 km) e à transmissão das correções diferenciais.

FIGURA 4.53 –TTFA E PDOP
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO CHRI – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



4.2.5.4 Marco relativo FOOT

O marco relativo FOOT, conforme exposto na seção 3.1.4, dista aproximadamente 4,2 km das estações de referência. Neste marco as soluções com a mudança da estação de referência RM03 para a ADMN foi de extrema importância, pois verifica-se um aumento da porcentagem de soluções com erros planimétricos iguais ou inferiores a 1cm+10ppm (de 29% para 97%) e uma redução do erro planimétrico (de 5,0 cm para 3,0 cm) (figuras 4.8 e 4.9).

Analisando-se a figura 4.54, referente à primeira ocupação no marco FOOT com o emprego da estação de referência ADMN, pode-se levantar a hipótese de que a variação do TTFA entre 40 e 90 segundos (seções de 4 a 10) tenha sido em virtude da variação da disponibilidade de satélites[31] com suas ambigüidades fixadas. Outra possível causa desta variação brusca dos valores do TTFA é uma interferência na transmissão das correções diferenciais. Constata-se que o PDOP (figura 4.55) apresentou uma redução do seu valor gradativamente ao longo das seções realizadas nesta ocupação.

[31] Disponibilidade de satélites: LEMMON e GERDAN (1999, p. 65) afirmam que a quantidade de satélites está relacionada com o tempo de fixação das ambigüidades (TTFA), i.e., quanto maior o número de satélites disponíveis, mais rápida é a resolução das ambigüidades na maioria dos casos.

FIGURA 4.54 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO FOOT - ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)

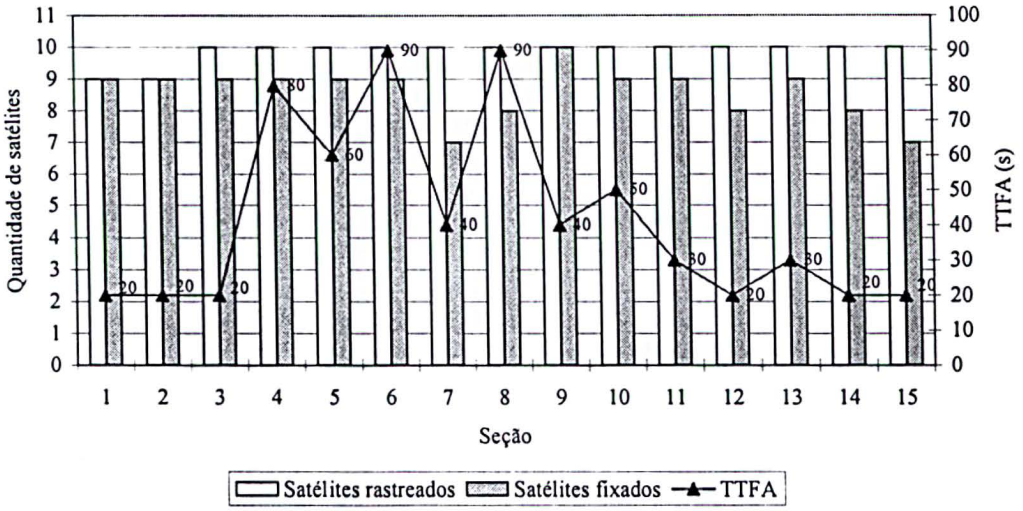
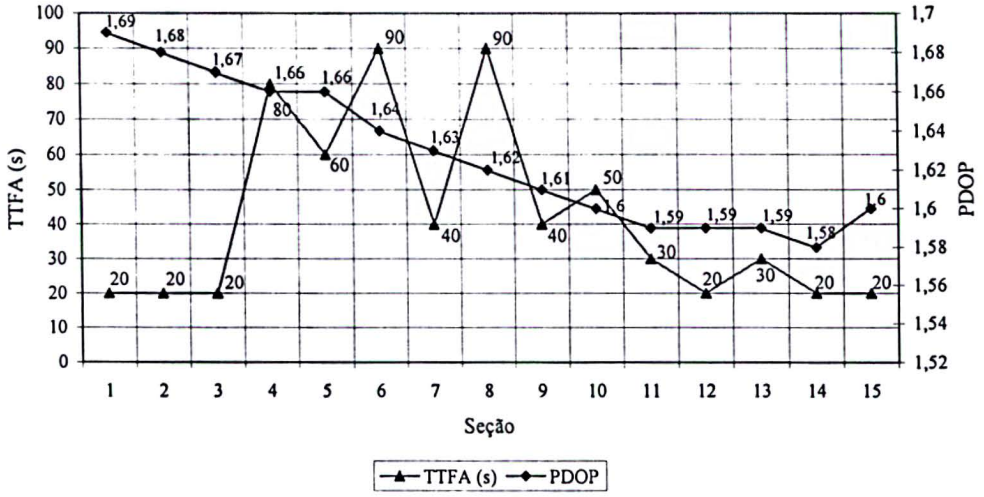


FIGURA 4.55 –TTFA E PDOP
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO FOOT - ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



Por outro lado, a quantidade de satélites na segunda ocupação se manteve praticamente constante. O TTFA variou de 20 a 30 segundos, exceto nas duas primeiras seções (figuras 4.56); o PDOP (figura 4.57) após a segunda seção manteve-se inferior a 2,2.

FIGURA 4.56 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO FOOT - ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)

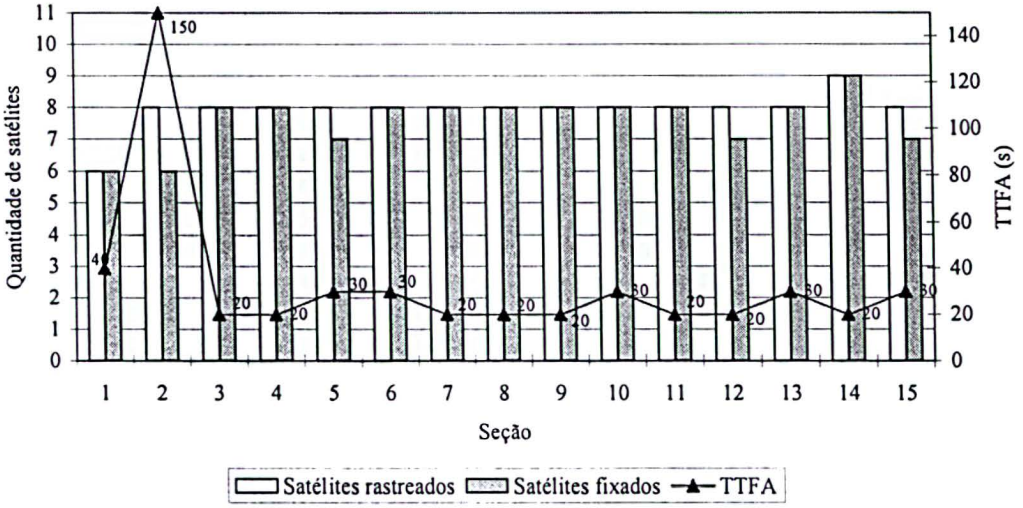
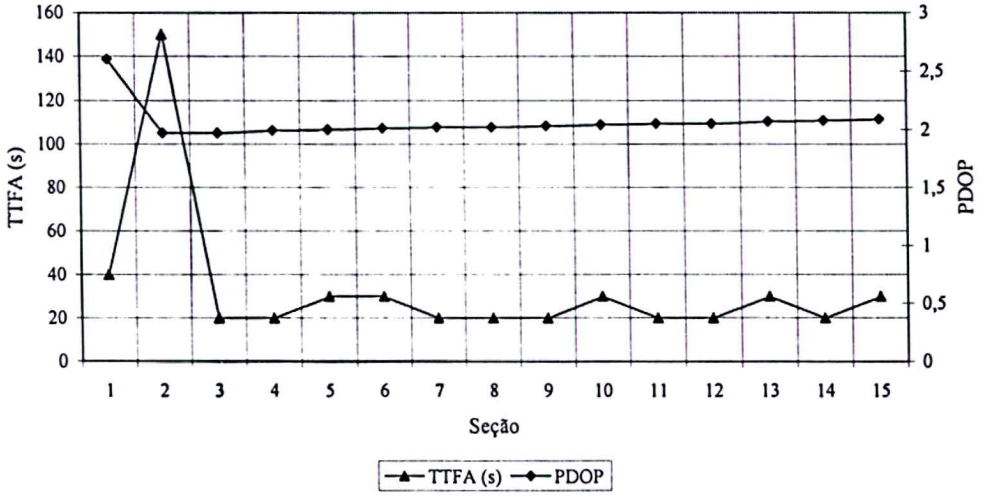


FIGURA 4.57 – TTFA E PDOP
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO FOOT - ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



Conforme exposto na seção 2.2.4.3.3, o aumento da quantidade de satélites não contribui significativamente no aumento da precisão do posicionamento RTK, mas aumenta a confiabilidade do processo de resolução das ambigüidades.

4.2.5.5 Marco relativo PIL

O marco PIL dista de aproximadamente 9,5 km das estações de referência RM03 e ADMN. A transferência da estação de referência do marco RM03 para o marco ADMN também apresentou resultados positivos. A porcentagem das soluções com erros planimétricos iguais ou inferiores a 1cm+10ppm passou de 15% para 60% e o erro planimétrico por sua vez passou de 6,0 cm para 5,1 cm (figuras 4.15 e 4.16).

Durante a primeira ocupação no marco PIL com emprego da estação de referência RM03 (figura 4.58), apenas os resultados das seções 7, 8 e 10 foram válidos. As seções 7 e 8 dispunham de oito satélites rastreados e todos com as suas ambigüidades fixadas para erros planimétricos iguais ou inferiores a 1cm+10ppm (10,5 cm) com o PDOP apresentando os menores valores alcançados durante estas seções com esta ocupação (figura 4.59). Nas demais seções (exceto a nona seção), foram fixadas as ambigüidades de cinco ou seis satélites resultando em erros planimétricos superiores ao valor requerido (10,5 cm).

FIGURA 4.58 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO PIL – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)

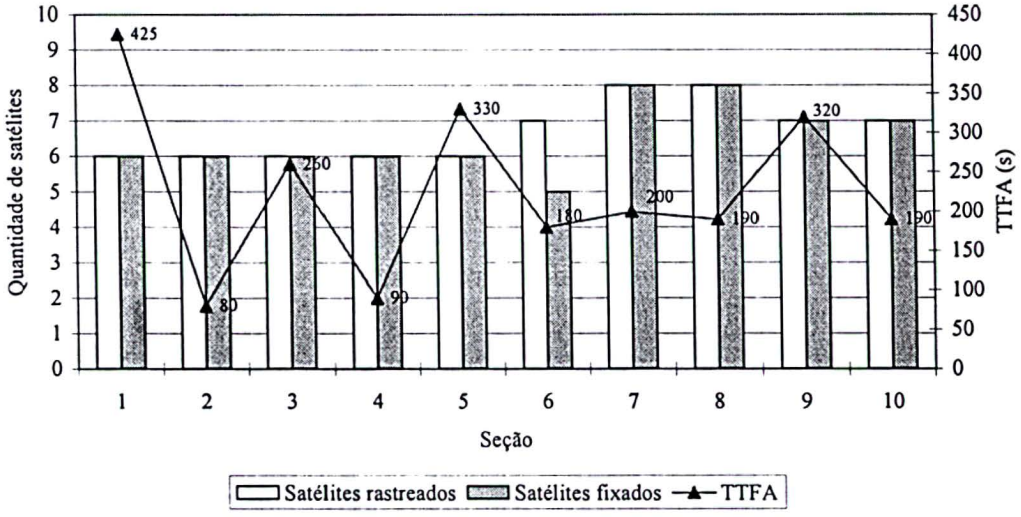
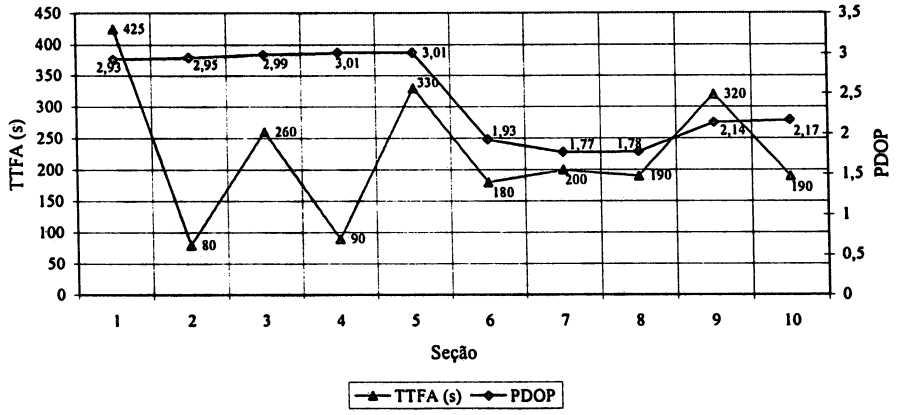


FIGURA 4.59 – TTFA E PDOP
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO PIL – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



Seguindo o mesmo raciocínio, a primeira, a oitava e a décima seções de observação da primeira ocupação no marco PIL com emprego da estação de referência ADMN resultaram em erros planimétricos não toleráveis (figura 4.60) com sete, seis e quatro satélites com as suas ambigüidades fixadas, respectivamente (figura 4.61). No primeiro caso pode-se supor que houve uma falsa fixação de ambigüidades; contudo, na décima seção conta-se com a fixação de ambigüidades de apenas quatro satélites que podem ter influenciado na definição do espaço de busca das ambigüidades, conduzindo a um mal condicionamento do sistema de equações normais (GARNÉS, 2001, p. 66-71).

FIGURA 4.60 – ERROS PLANIMÉTRICOS E ALTIMÉTRICOS
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO PIL – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)

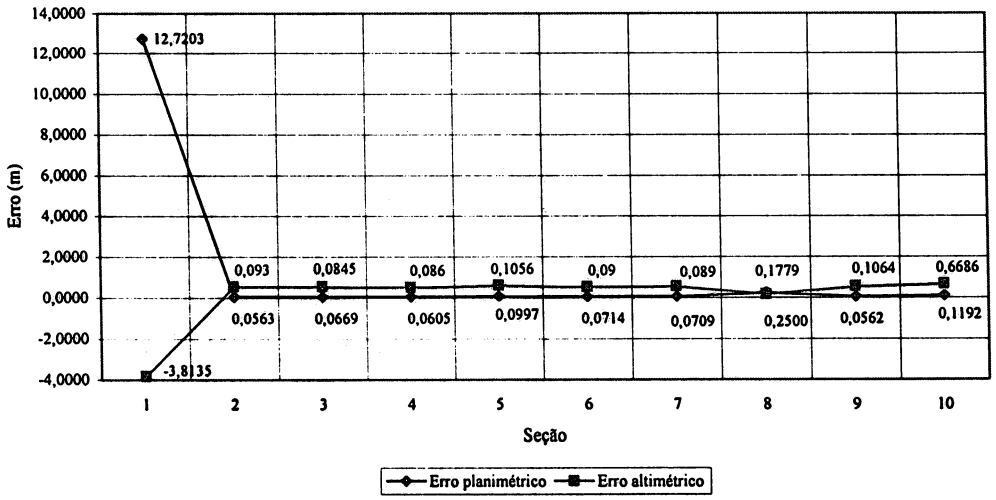
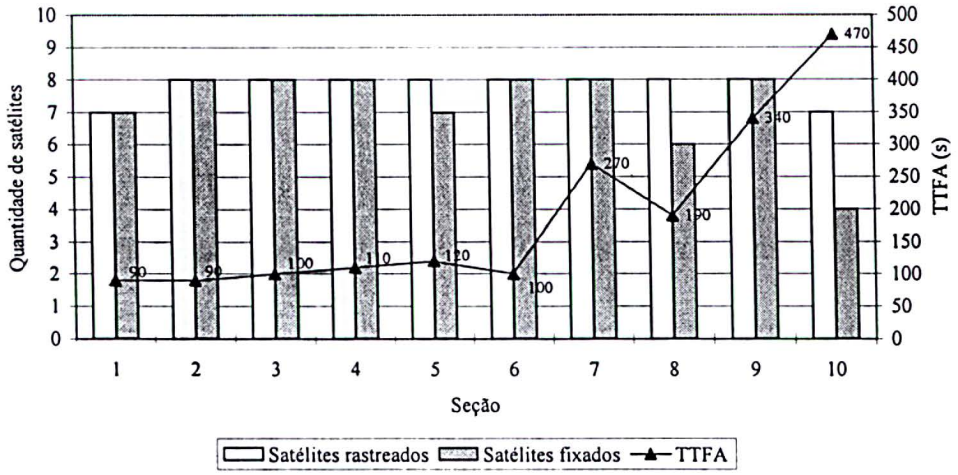
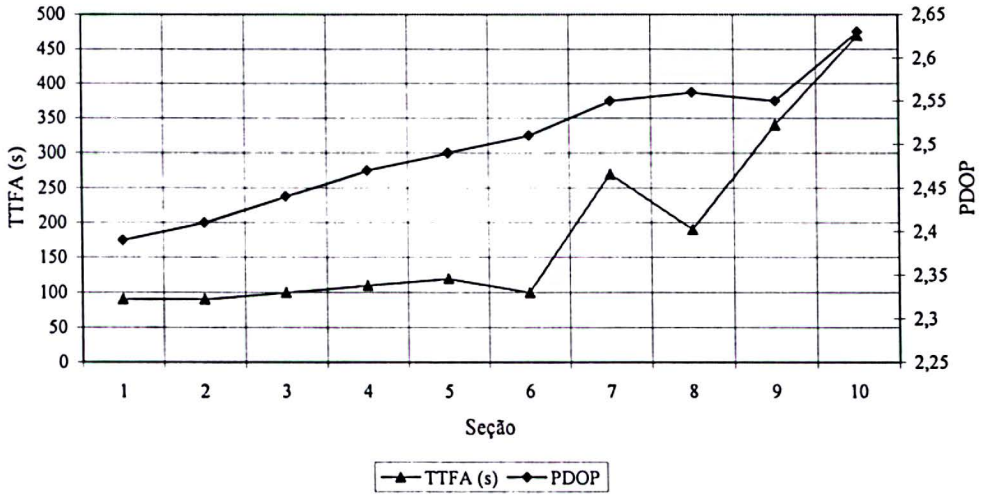


FIGURA 4.61 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO PIL – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



Na figura 4.62 constata-se que há uma elevação do PDOP durante esta primeira ocupação, evidenciando que com a modificação da constelação rastreada houve elevação do PDOP e uma maior dificuldade na fixação das ambigüidades.

FIGURA 4.62 – TTFA E PDOP
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO PIL – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



Durante a segunda ocupação no mesmo marco, apenas as seções 3 e 5 foram válidas (figura 4.63), ambas com sete ou oito satélites fixados (figura 4.64) e PDOP inferior a 2,3 (figura 4.65). Estas seções apresentaram um TTFA igual a 270 e 300 segundos, respectivamente.

FIGURA 4.63 – ERROS PLANIMÉTRICOS E ALTIMÉTRICOS
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO PIL – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)

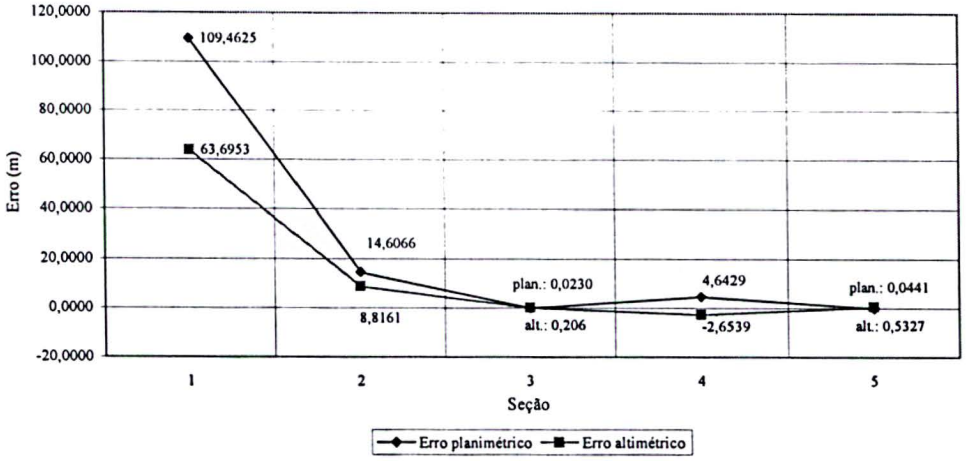


FIGURA 4.64 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO PIL – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)

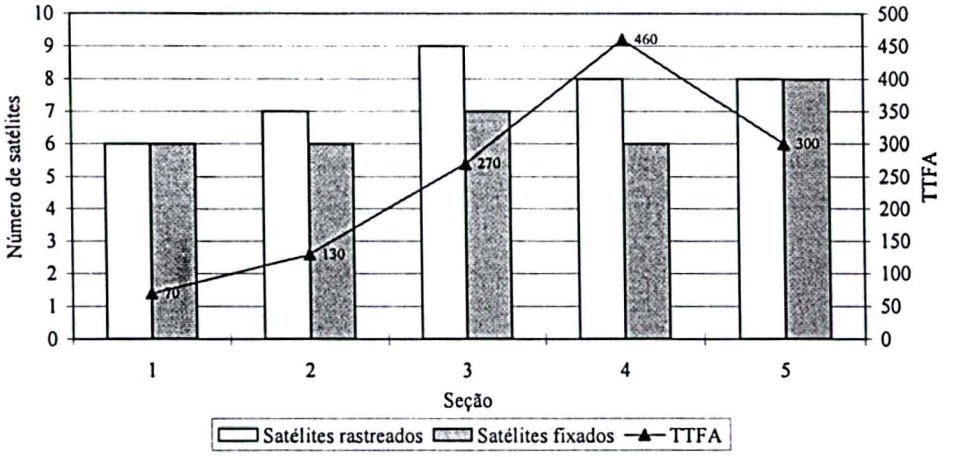
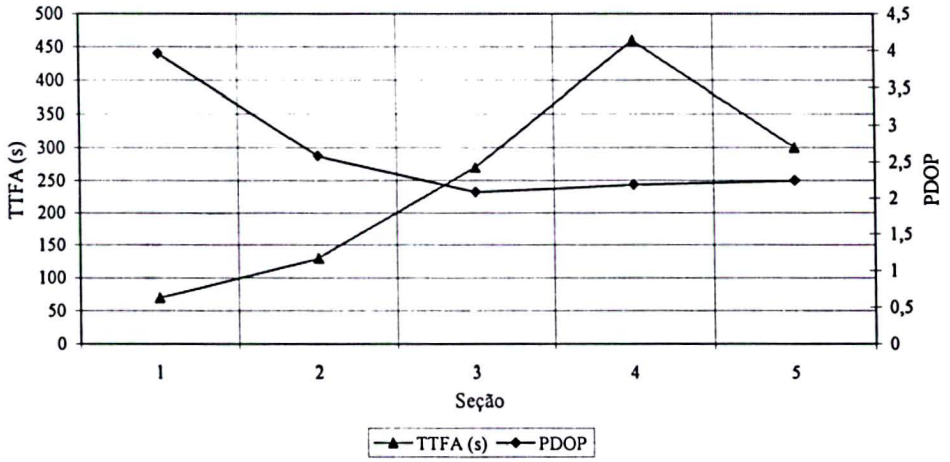


FIGURA 4.65 – TTFA E PDOP
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO PIL – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)

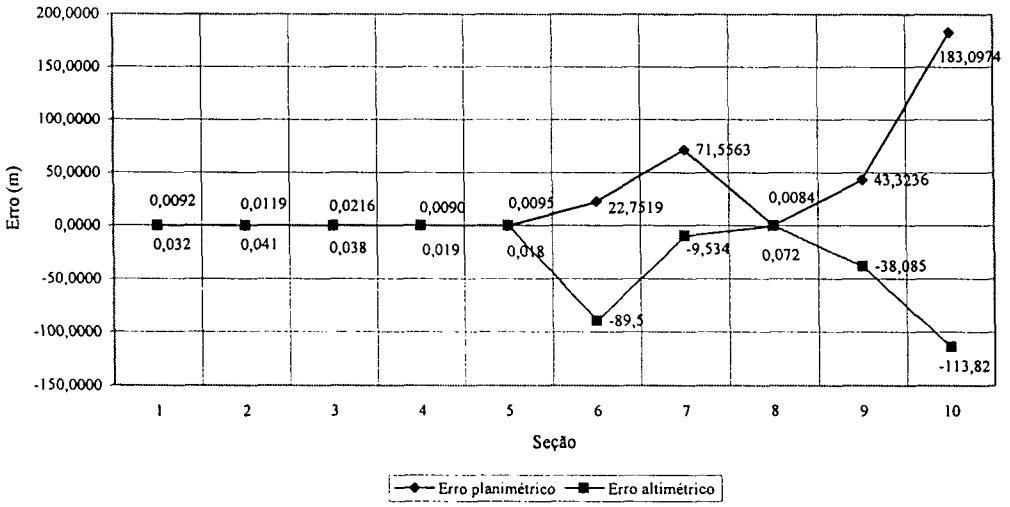


4.2.5.6 Marco relativo PIL2

O marco relativo PIL2, que dista aproximadamente 0,9 km (quadro 3.4) das estações de referência ocupadas, apresentou erros planimétricos da ordem de 1,2 cm, contudo a porcentagem de soluções com erros iguais ou inferiores a 1cm+10ppm com a estação de referência RM03 foi de apenas 40%, e com a estação ADMN obteve-se 100% (figuras 4.8 e 4.9). Este fato desperta o interesse para uma análise conjunta de alguns dos parâmetros que influenciam o posicionamento RTK.

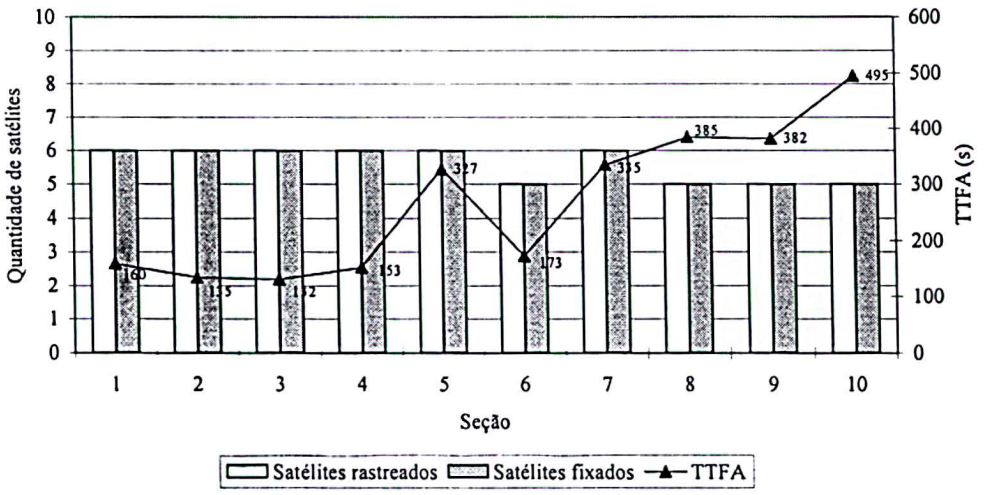
Na figura 4.66 observa-se a variação dos erros planimétricos e altimétricos resultantes em cada determinação de coordenadas nas dez seções realizadas. Cinco seções apresentaram um erro planimétrico abaixo do decímetro ao passo que nas demais seções os erros se mostraram acima da precisão esperada (1,9 cm), indicando que nestas seções alguns parâmetros podem ter influenciado na solução, e.g., uma falsa fixação das ambigüidades.

FIGURA 4.66 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO PIL2 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



NOTA: valor superior: erro planimétrico;valor inferior: erro altimétrico.

FIGURA 4.67 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO PIL2 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)

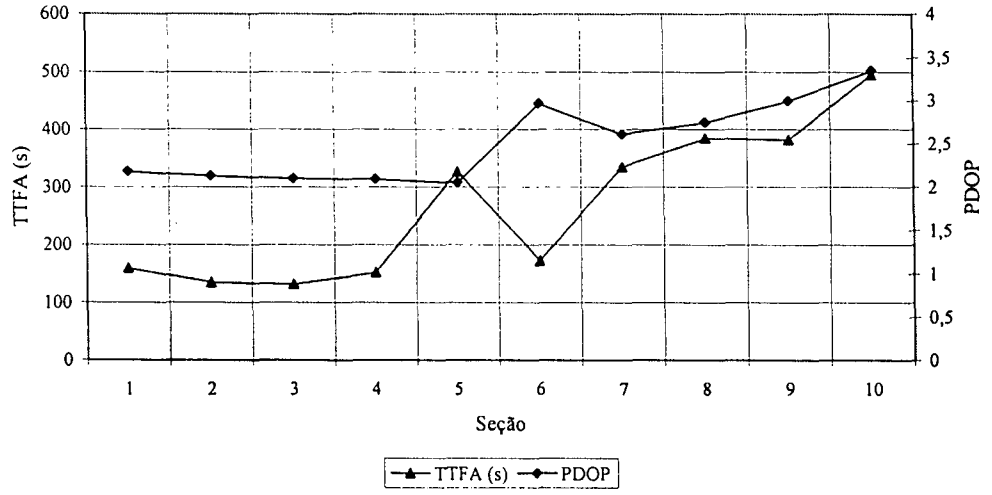


Na figura 4.67, percebe-se na sexta seção que houve uma alteração na quantidade de satélites, podendo ter ocorrido a perda do sinal de um satélite ou a substituição do satélite que foi tomado como satélite de referência para formar as equações de dupla diferença (equação 2.7). GARNÉS (2001, p. 126) afirma que, em determinadas formações seqüenciais para a formação das equações de dupla diferença, a perda do sinal do satélite de referência causa uma alteração de todas estas equações; contudo, se não for o sinal do satélite de referência a ser perdido, nada deveria acontecer a não ser uma provável diminuição da precisão como conseqüência de um provável aumento no DOP.

Nota-se que no período em que ocorreu a variação de seis para cinco satélites (da quinta para a sexta seção e da sexta para a sétima seção) os erros se apresentaram acima da precisão convencionada. De forma geral, as diferenças ocorridas nestas seções resultaram acima do metro, indicando que provavelmente houve problemas no cálculo dos inteiros das ambigüidades. A alteração da quantidade de satélites envolvidos no processamento pode ter contribuído para a introdução de erros no processamento das coordenadas, de forma que se obteve soluções não compatíveis com a precisão requerida.

Constata-se na figura 4.68 que houve elevação crescente do PDOP a partir da quinta seção, sendo mais significativa quando passou da quinta para a sexta seção.

FIGURA 4.68 – TTFA E PDOP
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO PIL2 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



4.2.5.7 Marco relativo KM03

Este marco relativo dista aproximadamente 11,0 km das estações de referência (quadro 3.4).

Analisando-se as figuras 4.19 e 4.20 constatou-se que quando se deu a modificação da estação de referência houve uma perda de confiabilidade (a porcentagem de soluções com erros planimétricos iguais ou inferiores a 1cm+10ppm passou de 55% para 10%); contudo, houve um pequeno ganho em precisão (o erro planimétrico passou de 8,0 cm para 7,0 cm).

Na figura 4.69 apresentam-se os erros planimétricos e altimétricos obtidos na primeira ocupação no marco relativo KM03 com o emprego da estação de referência ADMN. Verifica-se que a única solução satisfatória foi a obtida na primeira seção (erro igual ou inferior a 12 cm). Percebe-se que esta seção demandou o maior tempo para fixar as ambigüidades dos satélites, tendo-se um TTFA igual a 720 segundos (figura 4.70) com sete satélites rastreados e fixados. Constata-se na figura 4.71 que o valor do PDOP nesta seção foi inferior a 2,5 e que nas demais seções há uma redução deste valor chegando a valores na ordem de 1,85.

FIGURA 4.69 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO KM03 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)

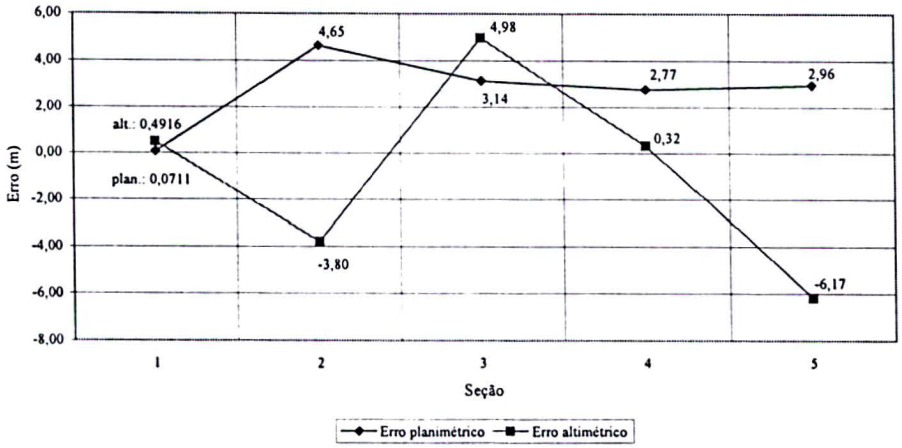


FIGURA 4.70 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO KM03 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)

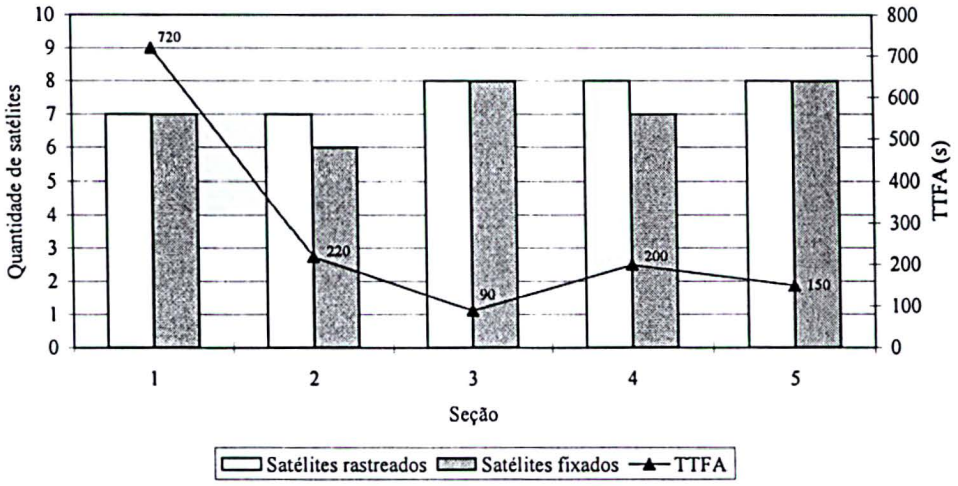
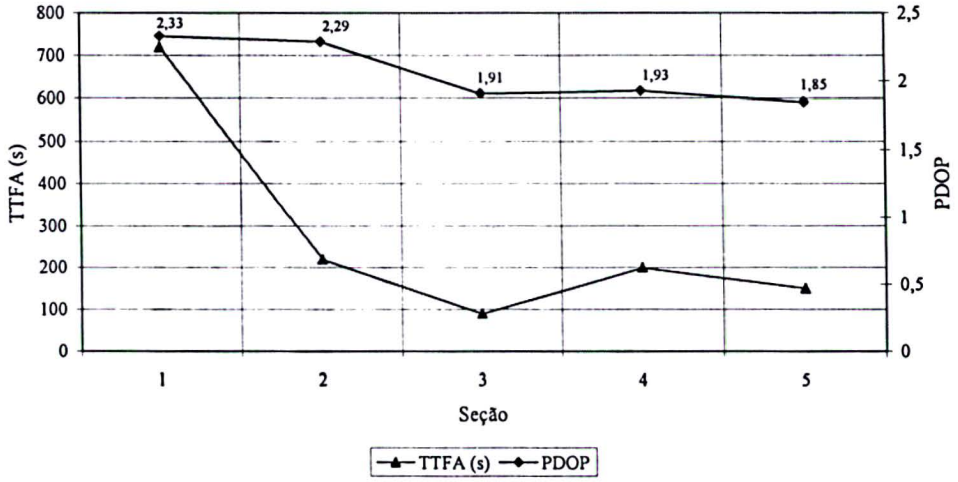


FIGURA 4.71 – TTFA E PDOP
(PRIMEIRA OCUPAÇÃO – MARCO KM03 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



Analisando-se os resultados obtidos na segunda ocupação no marco relativo KM03 com emprego da estação de referência RM03 constatou-se que 63% das seções realizadas apresentaram erros planimétricos iguais ou inferiores a 1cm+10ppm (figura 4.72). Constata-se que nestas seções houve uma constelação de oito a nove satélites rastreados, com o TTFA entre 110 e 400 segundos (figura 4.73).

FIGURA 4.72 – ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO KM03 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)

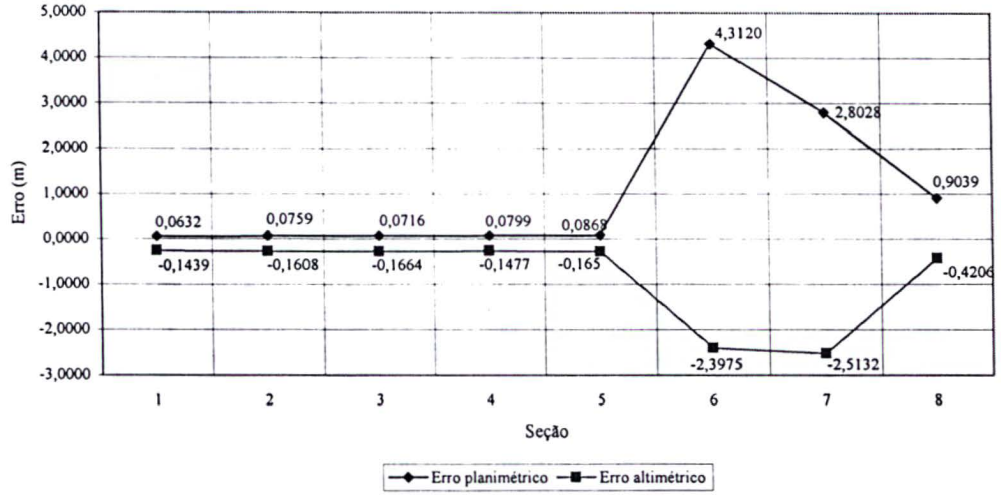


FIGURA 4.73 – QUANTIDADE DE SATÉLITES E TTFA
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO KM03 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)

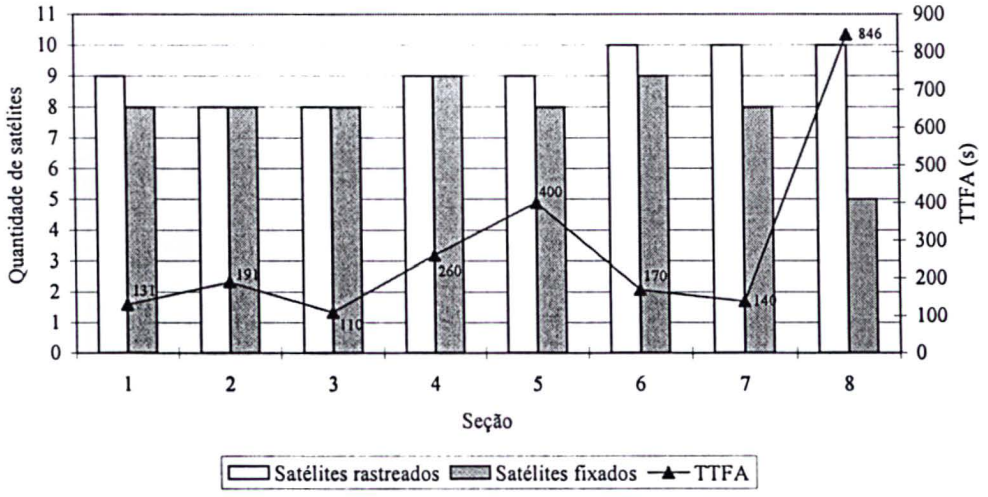
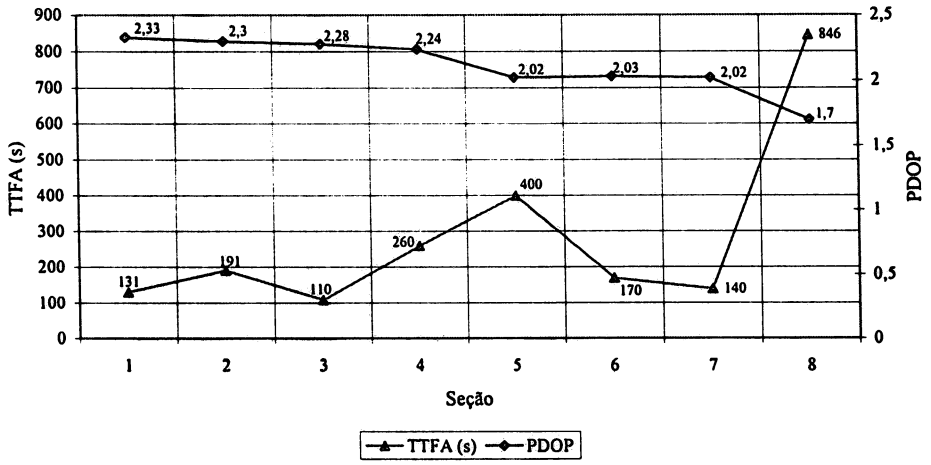


FIGURA 4.74 – TTFA E PDOP
(SEGUNDA OCUPAÇÃO – MARCO KM03 – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



4.2.6 Análise Radial de Alguns Marcos Relativos

Mediante as análises realizadas até o presente momento (seções 4.2.1 a 4.2.5) constata-se que há marcos relativos com praticamente o mesmo comprimento de linha de base porém com comportamentos distintos. Tentando-se investigar um pouco mais os resultados alcançados com estes levantamentos RTK, busca-se realizar nesta seção uma análise radial de alguns marcos relativos.

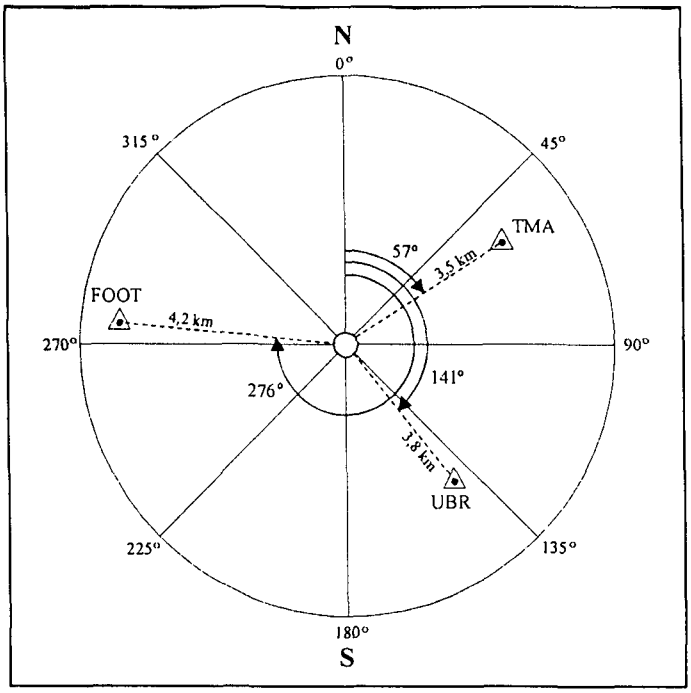
4.2.6.1 Marcos relativos com comprimento de linha de base entre 3,5 e 4 km

Dentre os marcos relativos ocupados verifica-se que apenas três deles encontram-se situados dentro desta faixa. São eles: o TMA (CLB igual a 3,5 km), UBR (CLB igual a 3,8 km) e o FOOT (CLB igual a 4,2 km), conforme observa-se no quadro 3.4.

A figura 4.75 ilustra a distribuição deste marcos relativos, os quais foram representados em função das suas coordenadas polares (azimute e comprimento das linhas de base) com relação ao marco RM03 situado no Centro Politécnico. Cabe salientar que os valores dos azimutes apresentados são aproximados. Percebe-se que o azimute do marco TMA é $\approx 57^{\circ}$, do marco UBR é $\approx 141^{\circ}$ e do marco FOOT é $\approx 276^{\circ}$.

Encontram-se indicados no quadro 4.2 as porcentagens de soluções com erros iguais ou inferiores a 1cm+10ppm (confiabilidade) e os erros planimétricos resultantes (em metros) nestes marcos relativos com o emprego das estações de referência RM03 e ADMN. Constata-se que os marcos relativos TMA (azimute $\approx 57^{\circ}$) e UBR (azimute $\approx 141^{\circ}$) não apresentaram qualquer alteração em confiabilidade ou precisão quando se deu a modificação das estações de referência. Por sua vez, o marco FOOT (azimute $\approx 276^{\circ}$) apresentou ganho em confiabilidade e precisão.

FIGURA 4.75 – PLANO RADIAL DOS MARCOS RELATIVOS TMA, UBR E FOOT



QUADRO 4.2 – MARCOS RELATIVOS TMA, UBR E FOOT

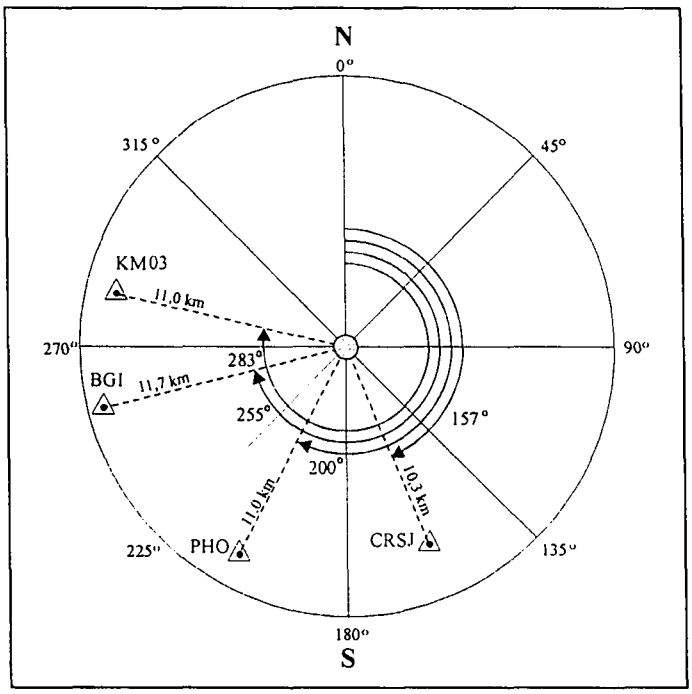
Marco	RM03		ADMN	
	Soluções (%)	Erro planimétrico (m)	Soluções (%)	Erro planimétrico (m)
TMA	100	0,018	100	0,018
UBR	100	0,015	100	0,015
FOOT	29	0,050	97	0,030

4.2.6.2 Marcos relativos com comprimento de linha de base entre 10 e 12 km

De acordo com o quadro 3.4 (seção 3.1.4) constata-se que quatro marcos relativos encontram-se dentro deste intervalo de comprimento de linhas de base, sendo: CRSJ (CLB igual a 10,3 km), KM03 (CLB igual a 11,0 km), PHO (CLB igual a 11,0 km) e BGI (CLB igual a 11,7 km).

Na figura 4.76 observa-se a representação destes marcos relativos em função das suas coordenadas polares (azimute e comprimento da linha de base) com relação ao marco RM03 situado no Centro Politécnico, local em que se localizam as estações de referência empregadas nestes levantamentos RTK (seção 3.1.1).

FIGURA 4.76 – PLANO RADIAL DOS MARCOS RELATIVOS CRSJ, KM03, PHO E BGI



No quadro 4.3 apresentam-se os valores obtidos das porcentagens de soluções com erros iguais ou inferiores a 1cm+10ppm (confiabilidade) e o erro planimétrico, em metros, destes marcos relativos com o emprego das estações de referência RM03 e ADMN. Verifica-se que quando se deu a modificação da estação de referência do marco RM03 para o ADMN apenas o marco relativo CRSJ (azimute ≈ 157°) apresentou um ganho em confiabilidade e em precisão. Já os marcos relativos KM03

(azimute ≈ 283°) e BGI (azimute ≈ 255°) apresentaram melhora em precisão mas perderam em confiabilidade. O marco PHO (azimute ≈ 200°) apresentou piora em relação a estes dois parâmetros (confiabilidade e precisão).

QUADRO 4.3 – MARCOS RELATIVOS CRSJ, KM03, PHO E BGI

Marco	RM03		ADMN	
	Soluções (%)	Erro planimétrico (m)	Soluções (%)	Erro planimétrico (m)
CRSJ	50	0,07	85	0,03
KM03	55	0,07	10	0,07
PHO	30	0,05	0	1,87
BGI	93	0,07	80	0,03

4.2.6.3 Marcos relativos com comprimento de linha de base entre 13 e 14,5 km

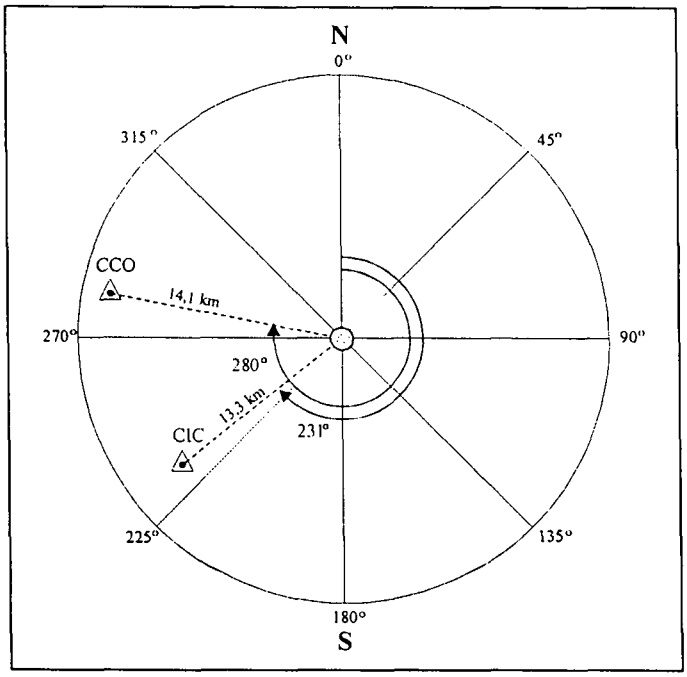
Neste intervalo de comprimento de linha de base existem apenas dois marcos relativos (quadro 3.4, seção 3.1.4), sendo: CIC e CCO.

A representação destes marcos em função das suas coordenadas polares (azimute e comprimento de linha de base) com relação ao marco RM03 situado no Centro Politécnico, local em que se localizaram as estações de referência empregadas nestes levantamentos RTK (seção 3.1.1), encontram-se na figura 4.77. Verifica-se que o marco relativo CIC dista 13,3 km com um azimute ≈ 231° e o marco relativo CCO dista 14,1 km com um azimute ≈ 280°.

Os valores das porcentagens de soluções com erros iguais ou inferiores a 1cm+10ppm e o erro planimétrico (em metros) obtidos nestes marcos relativos com o emprego das estações de referência RM03 e ADMN encontram-se indicados no quadro 4.4.

Analisando-se os valores indicados no quadro 4.4 verifica-se que quando se deu a mudança da estação de referência (RM03 para ADMN) o marco CIC (azimute ≈ 231°) apresentou ganho em confiabilidade visto que a estação móvel não recebeu os sinais de rádio quando do emprego da estação de referência RM03. O marco relativo CCO (azimute de 280°), por sua vez, não apresentou qualquer ganho por conta da mudança da estação de referência.

FIGURA 4.77 – PLANO RADIAL DOS MARCOS RELATIVOS CIC E CCO



QUADRO 4.4 – MARCOS RELATIVOS CIC E CCO

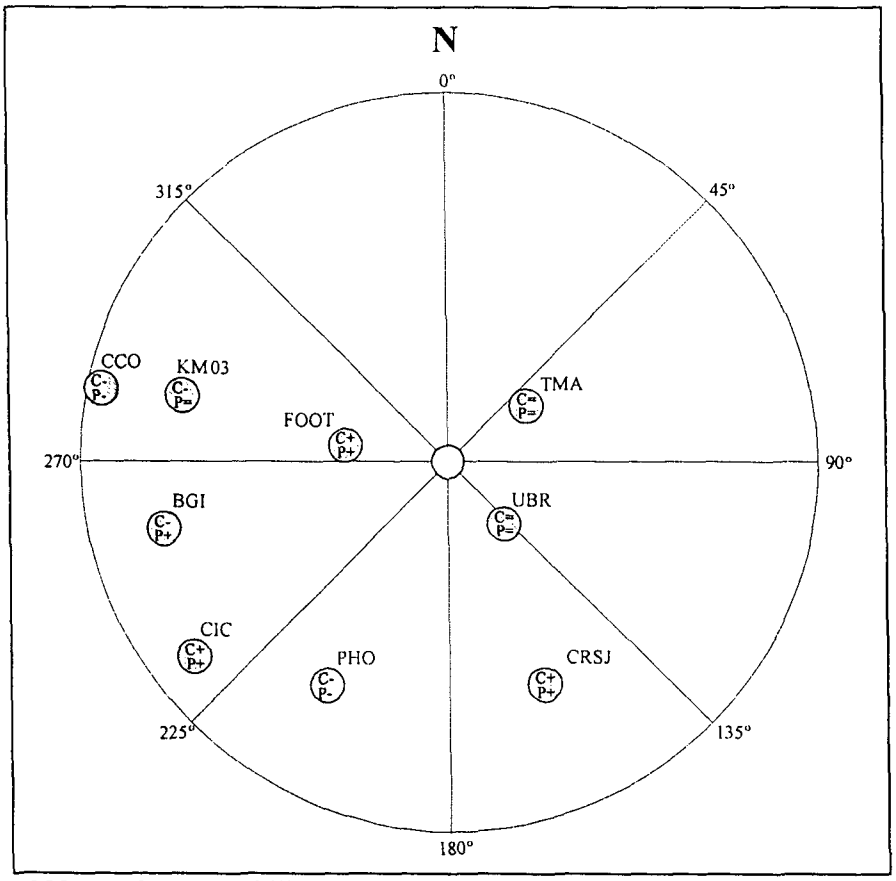
Marco	RM03		ADMN	
	Soluções (%)	Erro planimétrico (m)	Soluções (%)	Erro planimétrico (m)
CIC	–	–	20	0,06
CCO	45	0,05	14	0,15

4.2.6.4 Análise conjunta destes marcos relativos

Na figura 4.78 apresenta-se o esquema de todos os marcos relativos analisados anteriormente (seções 4.2.6.1 a 4.2.6.3) e que estão compreendidos no intervalo de comprimento de linha de base entre 3,5 e 14,5 km com relação ao marco RM03.

Verifica-se que os marcos relativos que mais apresentaram perdas em confiabilidade e em precisão localizam-se entre os azimutes 270° e 315°, com exceção do marco FOOT (CLB de 4,2 km). Compreendido entre os azimutes 180° e 225° encontra-se o marco relativo PHO, o qual também apresentou perdas quanto a estes parâmetros (confiabilidade e precisão).

FIGURA 4.78 – PLANO RADIAL DOS MARCOS RELATIVOS



NOTA: C – confiabilidade; P – precisão; os sinais positivo (+), negativo (-) e igualdade (=) indicam se houve melhora (+), piora (-) ou se não houve alteração nos resultados (=).

Os marcos relativos situados entre os azimutes 270° e 315° podem estar situados em uma área ou região de sombra, ou seja, entre as estações de referência e estes marcos devem haver obstáculos ou região de ruído.

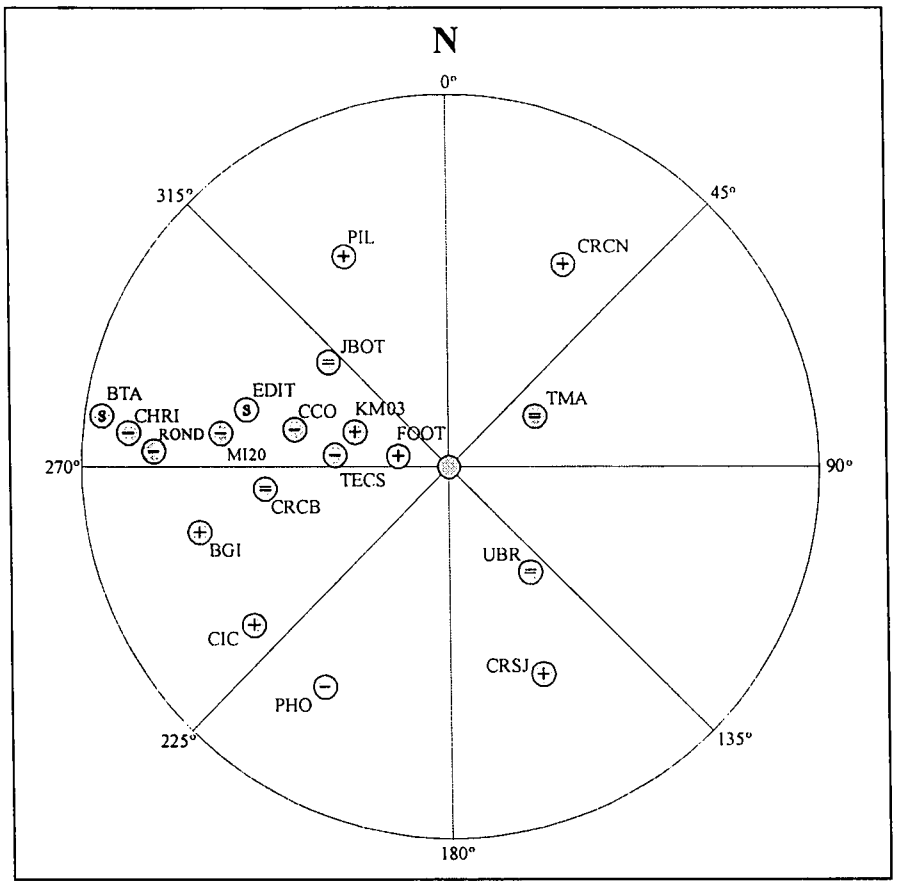
A análise da figura 3.4 revela que, entre estas estações, encontra-se toda a área central da cidade de Curitiba, onde existem edifícios altos. Salienta-se que estas áreas ou regiões podem interferir na qualidade ou, até mesmo, na propagação dos sinais UHF/VHF.

O mesmo fato pode estar ocorrendo com o marco relativo PHO, contudo haveria a necessidade de se dispor de outros marcos relativos compreendidos entre os azimutes 180° e 225° para a confirmação deste fato.

Na figura 4.79 visualiza-se a localização de todos os marcos relativos ocupados nestes levantamentos RTK dentro de um círculo azimutal com centro no marco RM03.

Verifica-se que os marcos EDIT, MI20, ROND, CHRI e BTA estão dentro da faixa azimutal de 270° a 315°. Os marcos BTA e EDIT apresentaram resultado positivo quando se deu a mudança da estação de referência do marco RM03 para o ADMN, visto que passaram a receber o sinal de correção diferencial contudo não alcançaram a precisão requerida. Este fato pode reforçar a hipótese de que esta é uma região de sombra ao sinal de transmissão quando se emprega estas estações de referência.

FIGURA 4.79 – PLANO RADIAL DOS MARCOS RELATIVOS



NOTA: s – sinal de correção diferencial recebido nas ocupações a partir do emprego da estação de referência ADMN.

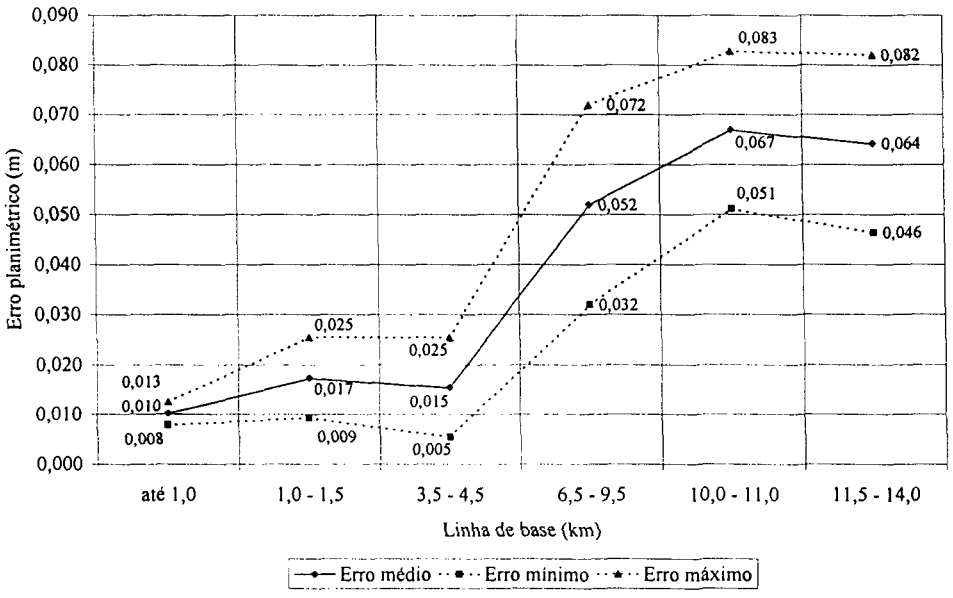
4.2.7 Análise dos Erros Médios, Máximos e Mínimos

Nesta seção tem-se por objetivo apresentar os erros planimétricos e altimétricos, médios, máximos e mínimos, ocorridos dentro da precisão fixada (1cm+10ppm) nos marcos compreendidos nas linhas de base de até 14,5 km. Estas análises são realizadas agrupando-se os marcos relativos em faixas com CLB definidos a partir da posição da estação de referência RM03. As faixas são as seguintes:

- até 1 km;
- 1 à 1,5 km;
- 3,5 à 4,5 km;
- 6,5 à 9,5 km;
- 10 à 11 km;
- 11 à 14,5 km

Apresentam-se na figura 4.80 os erros planimétricos médios, máximos e mínimos (correspondentes a 1σ), que delimitam as seis faixas de comprimento de linhas de base nas ocupações realizadas com o emprego da estação de referência RM03.

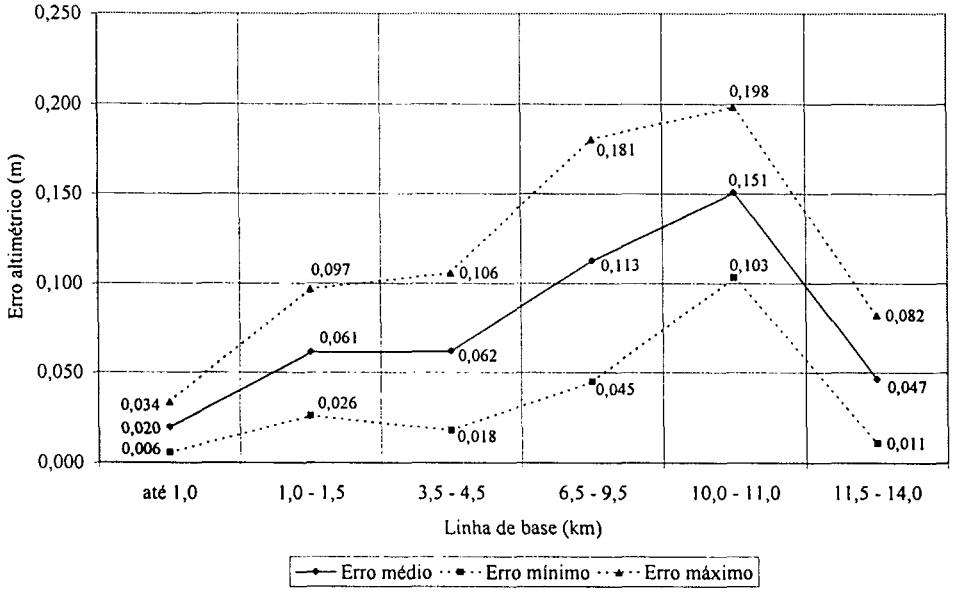
FIGURA 4.80 – ERRO PLANIMÉTRICO (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



Constata-se que o maior erro planimétrico (limite superior igual a 8,3 cm) ocorreu na quinta faixa (de 10,0 a 11,0 km) e o menor erro (limite inferior igual a 0,5 cm) ocorreu na terceira faixa (de 3,5 a 4,5 km). Percebe-se claramente a existência da correlação espacial, ou seja, à medida que aumenta o comprimento da linha de base, aumentam os erros planimétricos.

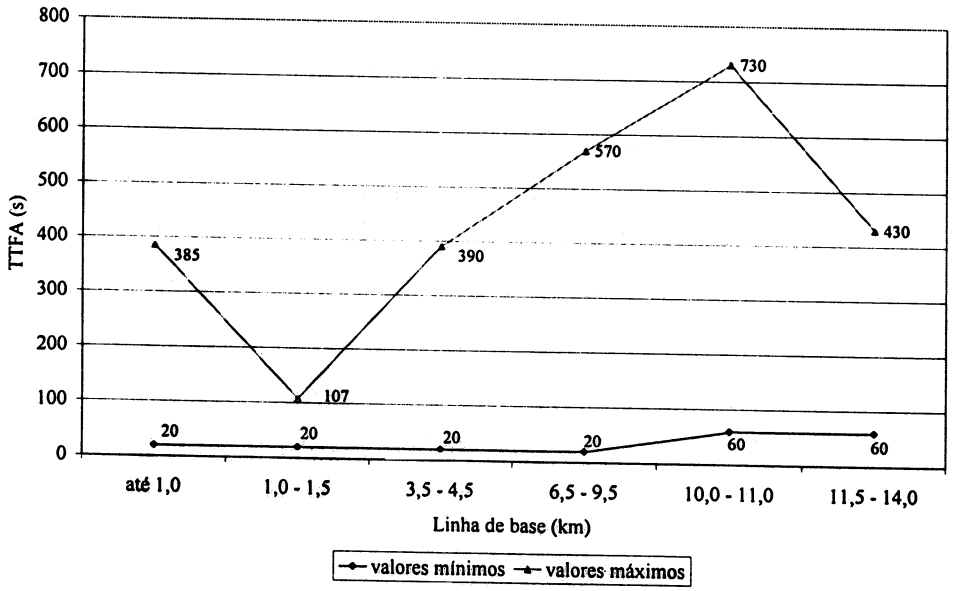
Da mesma forma representam-se os erros altimétricos médios, máximos e mínimos (correspondentes a 1σ) nas seis faixas radiais anteriormente listadas (figura 4.81). O menor erro altimétrico verificado (limite inferior igual a 0,6 cm) ocorreu nos marcos relativos de até 1,0 km e os erros altimétricos máximos foram inferiores a 20,0 cm (de 10,0 a 11,0 km). Desconsiderando a sexta faixa, percebe-se a correlação espacial existente.

FIGURA 4.81 –ERRO ALTIMÉTRICO (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



Na figura 4.82, observam-se os valores máximos e mínimos de TTFA obtidos nas seções que ficaram com erros iguais ou inferiores a 1cm+10ppm. Os menores TTFA mantiveram-se constantes (20 segundos) nas quatro primeiras faixas (até 9,5 km) elevando-se para 60 segundos nas duas últimas faixas. Os valores máximos obtidos da segunda até a quinta faixa mostram-se crescentes indicando a correlação espacial. Contudo, os valores obtidos na primeira e na quinta faixa são exceções.

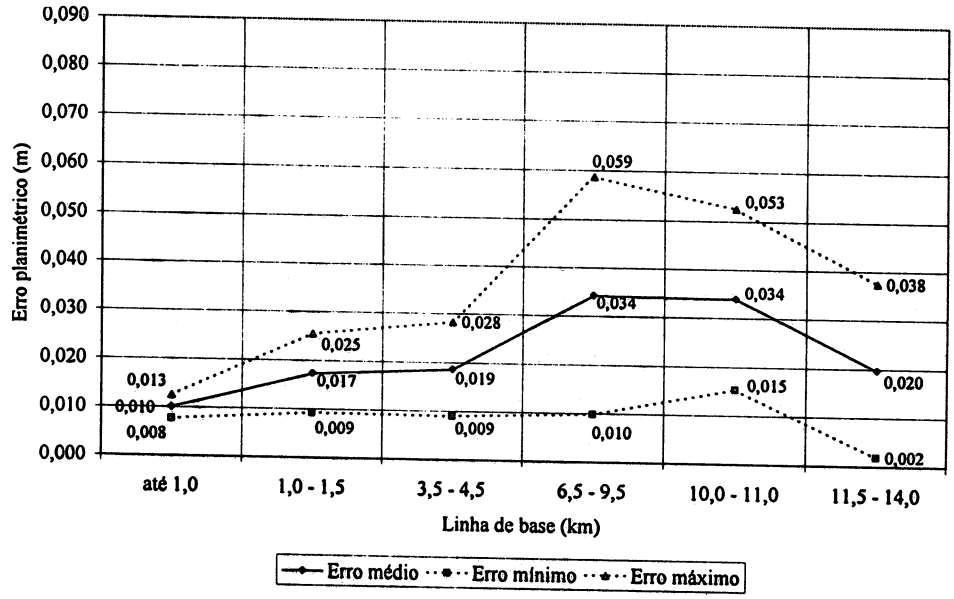
FIGURA 4.82 – TTFA (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



A figura 4.83 mostra os erros planimétricos médios, máximos e mínimos (correspondentes a 1σ) que delimitam as seis faixas de comprimento de linhas de base nas ocupações realizadas com o emprego da estação de referência ADMN.

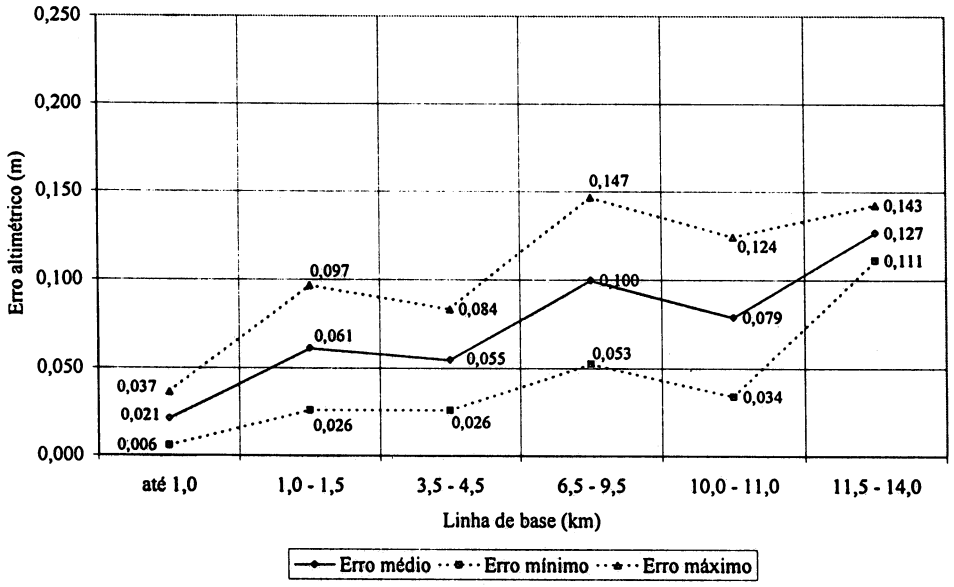
Constata-se que o maior erro planimétrico (limite superior igual a 5,9 cm) ocorreu na quarta faixa (de 6,5 a 9,5 km) e o menor erro planimétrico (limite inferior igual a 0,2 cm) ocorreu na sexta faixa (de 11,5 a 14,0 km).

FIGURA 4.83 – ERROS PLANIMÉTRICOS (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



Da mesma forma apresentam-se os erros altimétricos médios, máximos e mínimos (correspondentes a 1 σ) nas seis faixas (figura 4.84) onde se verifica que os erros altimétricos resultaram inferiores a 15,0 cm.

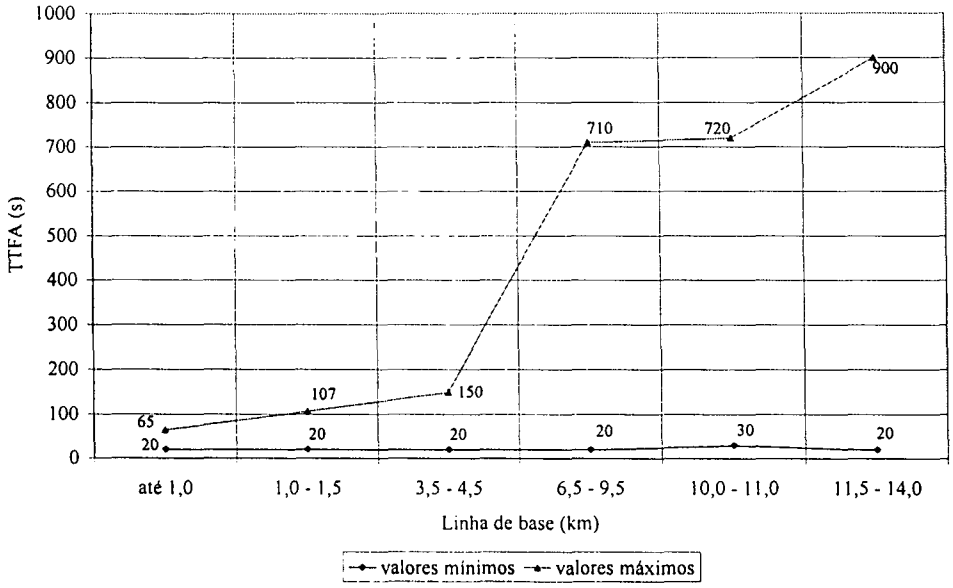
FIGURA 4.84 – ERROS ALTIMÉTRICOS (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



Na figura 4.85 observam-se os valores máximos e mínimos de TTFA obtidos nas seções que ficaram com erros iguais ou inferiores a 1cm+10ppm. Constata-se claramente a correlação espacial visto que, à medida que aumenta o comprimento da linha de base, aumentam os valores máximos de TTFA. Cabe ressaltar que, à medida que a estação móvel se distancia da estação de referência, há maior dificuldade na fixação das ambigüidades. Os valores de TTFA apresentam grandes variações e os valores mínimos mantêm-se igual a 20 segundos na maioria das faixas, atingindo 30 segundos apenas na quinta faixa (CLB entre 10 e 11 km).

Analisando-se as figuras 4.80 e 4.83, constata-se que os erros planimétricos foram inferiores a 9,0 cm. Percebe-se que com a instalação da estação de referência no marco ADMN há redução dos erros nos marcos relativos situados a partir da terceira faixa (CLB maior que 3,5 km).

FIGURA 4.85 – TTFA (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)

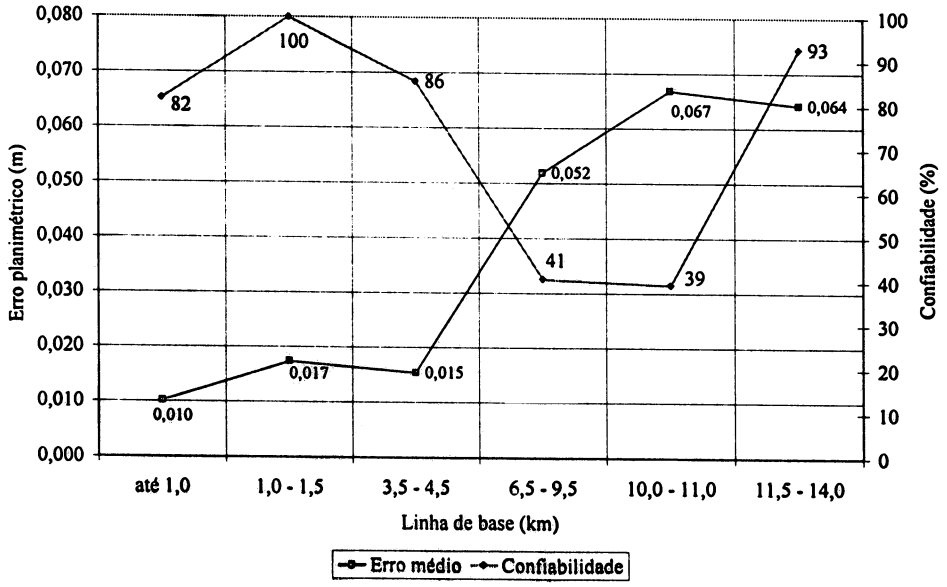


Observando-se as figuras 4.81 e 4.84 percebe-se que a mudança da estação de referência gerou redução dos erros altimétricos máximos nas cinco primeiras faixas (CLB de até 11 km). Na figura 4.84 percebe-se melhor a correlação espacial.

Em uma análise conjunta das figuras 4.82 e 4.85 constata-se que com a modificação da estação de referência há redução dos valores mínimos do TTFA nas duas últimas faixas (CLB superior a 9,5 km). Os valores máximos apresentados na figura 4.85 indicam claramente a correlação espacial. Com a estação de referência ADMN percebe-se que houve maior facilidade na fixação das ambigüidades nas linhas de base de até 4,5 km ao comparar-se com os TTFA obtidos com a estação de referência RM03 (figura 4.82).

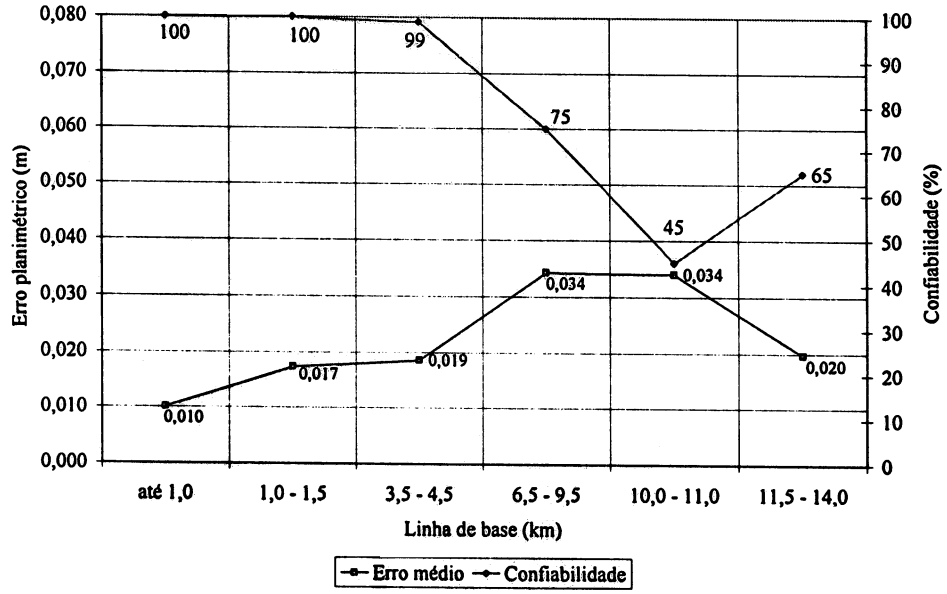
Na figura 4.86 observa-se nas seis faixas de linhas de base os valores obtidos em confiabilidade e em precisão com o emprego da estação de referência RM03. Ao se considerar as cinco primeiras faixas (CLB até 11 km) constata-se que a confiabilidade é dependente do comprimento da linha de base. Obteve-se menos seções validadas na quarta faixa (CLB entre 6,5 e 9,5 km) acompanhado de aumento dos erros planimétricos. A sexta faixa apresenta elevação em confiabilidade e sensível melhora em precisão.

FIGURA 4.86 – CONFIABILIDADE E PRECISÃO DO POSICIONAMENO RTK (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03)



Com o emprego da estação de referência ADMN obtiveram-se os valores em confiabilidade e em precisão indicados na figura 4.87. Constatam-se também redução em confiabilidade e perda em precisão à medida que aumenta o comprimento da linha de base, desconsiderando-se a sexta faixa de linha de base.

FIGURA 4.87 – CONFIABILIDADE E PRECISÃO DO POSICIONAMENO RTK (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA ADMN)



Comparando-se as figuras 4.86 e 4.87 constata-se que, com a mudança da estação de referência para o marco ADMN, houve ganho em confiabilidade nos marcos relativos com comprimento de linha de base de até 11,0 km.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÃO

O objetivo principal desta dissertação consistiu na análise da degradação do posicionamento em tempo real, no âmbito terrestre, com o emprego do programa GNRT. Este objetivo foi alcançado com a realização de um levantamento pela técnica RTK onde foram empregados 22 marcos relativos com comprimento de linha de base variando aproximadamente de 0,2 a 30 km em relação ao marco RM03, situado no *Campus* do Centro Politécnico da UFPR.

Foram empregadas duas estações de referência. Com o emprego da estação de referência RM03 constatou-se que nos marcos relativos com comprimento de linha de base de até 4,5 km os erros planimétricos máximos foram inferiores a 2,5 cm, os erros altimétricos máximos inferiores a 11,0 cm com TTFA máximo de 390 segundos. Nos marcos com comprimento de linha de base entre 6,5 e 11 km verificou-se que o erro planimétrico e altimétrico máximo foi de 8,3 cm e 19,8 cm, respectivamente, com um TTFA máximo de 730 segundos. Nos intervalos entre 11 e 14 km, ambos os erros planimétrico e altimétrico máximos foram de 8,5 cm com TTFA máximo de 430 segundos.

Com o emprego da estação de referência ADMN verificou-se um ganho em confiabilidade e em precisão na maioria dos marcos relativos com comprimento de linha de base de até 14 km. O erro planimétrico e altimétrico máximo nas linhas de base de até 4,5 km foi de 2,8 cm e 9,7, respectivamente, com TTFA máximo de 250 segundos. No intervalo entre 6,5 e 11 km, o erro planimétrico e altimétrico máximo foi inferior a 6,0 cm e 15 cm, respectivamente, com TTFA máximo de 720 segundos. No intervalo de 11,5 a 14 km, o erro planimétrico e altimétrico máximo foi de 14,3 cm e 3,8 cm, com TTFA máximo de 900 segundos. Constata-se que o emprego desta estação de referência promoveu maior facilidade na fixação das

ambigüidades nas linhas de base de até 4,5 km do que com o emprego da estação de referência RM03.

Verificou-se que a mudança da estação de referência não trouxe os efeitos esperados nos marcos relativos com comprimento de linha de base superior a 14 km. Constatou-se que, com esta estratégia, as estações EDIT e BTA passaram a receber o sinal das correções diferenciais transmitido da estação de referência ADMN, contudo se obteve pouca melhora na confiabilidade apenas no marco EDIT.

A correlação espacial ficou evidente por meio das análises realizadas neste trabalho, nas quais se percebe uma tendência de aumento dos erros planimétricos e do tempo de fixação das ambigüidades (TTFA) principalmente nos marcos com linha de base superior a 11 km.

Percebeu-se que na maioria dos casos em que ocorreu alteração na quantidade de satélites envolvidos no processamento das coordenadas (diferença entre a quantidade de satélites rastreados e a quantidade de satélites com as ambigüidades fixadas), os erros planimétricos resultantes foram superiores ao almejado (1cm+10ppm), indicando que provavelmente houve problemas no cálculo dos inteiros das ambigüidades.

As experiências comprovaram que o aumento da quantidade de satélites não contribuiu significativamente para melhorar a precisão do posicionamento RTK (conforme exposto na seção 2.2.4.3.3), embora a confiabilidade do processo de resolução das ambigüidades tenha aumentado.

Os marcos relativos com linha de base da ordem de 20 km (e.g., MI20 e CHRI) apresentaram maior dificuldade na fixação das ambigüidades. Contudo, o sistema de comunicação teve um excelente desempenho visto que se observou a recepção das correções diferenciais enviadas pela estação de referência à móvel durante quase todo o levantamento, salvo durante as ocupações nos marcos EDIT, PIL e CIC com emprego da estação de referência RM03.

Verifica-se que os marcos relativos CCO e PHO apresentaram resultados desfavoráveis quando se deu o emprego da estação de referência no marco ADMN.

Cabe ressaltar que eles encontram-se próximos a torres as quais contribuem sobremaneira para a ocorrência do efeito multicaminho (seção 3.1.2).

Constatou-se que a fixação das ambigüidades de apenas quatro satélites pode influenciar na definição do espaço de busca das ambigüidades conduzindo a um mal condicionamento do sistema de equações normais, conforme deve ter ocorrido em uma das seções de ocupações no marco PIL. Supõe-se que a perda do sinal de um satélite ou a substituição do satélite que foi tomado como satélite de referência para formar as equações de dupla diferença (seção 2.1.3) possam provocar degradação da precisão do posicionamento e elevação do tempo de fixação das ambigüidades (TTFA), conseqüências prováveis de uma elevação do PDOP.

Mediante a análise de alguns marcos relativos inseridos em um círculo azimutal com centro no marco RM03 (situado no *Campus* do Centro Politécnico da UFPR), pôde-se constatar que os marcos situados entre os azimutes 270° e 315° provavelmente encontram-se em uma área de sombra quando da ocupação com o emprego das estações de referência em questão. Verificou-se que entre as estações de referência (UFPR) e as estações relativas com comprimento de linha de base superior a 8 km existem torres e edifícios altos, os quais desfavorecem aos sistemas de comunicação que empregam a faixa de freqüência VHF/UHF (seção 3.1). Talvez o mesmo ocorra para o marco PHO, que se localiza entre os azimutes 180° e 225°.

Verifica-se que a realização de apenas uma seção com a técnica RTK não garante a confiabilidade do posicionamento em vista da possibilidade de ocorrer uma falsa fixação de ambigüidades, resultando em coordenadas fora da precisão almejada para levantamentos cadastrais (1cm+10ppm).

5.2 RECOMENDAÇÕES

Como recomendações para trabalhos futuros, sugerem-se:

a) realizar outros levantamentos com esta técnica empregando outros marcos relativos;

b) realizar um mapeamento das áreas de "sombra" para a estação de referência ADMN, localizada no campus do Centro Politécnico (UFPR);

c) realizar outros levantamentos com o RTK em outros marcos situados nos azimutes entre os azimutes de 180° a 225° visando verificar se esta é uma faixa com áreas de sombras para o emprego das estações de referência ocupadas no Centro Politécnico;

d) reocupar os marcos relativos que se encontram nos azimutes entre 270° e 315° com o emprego de uma estação de referência instalada em um outro edifício de Curitiba;

e) estudar a implantação de estações repetidoras para as áreas de "sombra", possivelmente detectadas neste estudo;

f) analisar a degradação deste posicionamento, nestes marcos, com outros sistemas de comunicação;

g) realizar um mapeamento temático na região compreendida entre os azimutes de 180° a 225° visando cadastrar as antenas, torres e outras fontes de emissão de sinais de comunicação bem como também as obstruções físicas presentes.

REFERÊNCIAS

ABOUSALEM, M.; HAN, S.; QIN, X.; MARTIN, W.; LEMOINE, R. (2001). Ashtech Instant-RTK: a revolutionary solution for surveying professionals. In: SYMPOSIUM ON MOBILE MAPPING TECHNOLOGY, 3., 2001, Cairo-Egypt. **Presented paper**. P. 1-13. Disponível em: <http://www.ashtech.com/Media/PDF/AshtechInstant-RTK.pdf> Acesso em 17/10/2001.

ALSALMAN, A. S. A. (2001). Effects of electric power lines on the accuracy of GPS positioning. **Survey Review**, Bristol, v. 36, n. 279, p. 54-61, jan. 2001.

ANDRADE, J. B. (1988). **NAVSTAR-GPS**. Curitiba, 1988. 63 f. Trabalho acadêmico. Setor de Tecnologia, Departamento de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.

ANDRADE, J. B. (2001). A função ambigüidade. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 7, p. 15-20.

ASHTECH (1995). **PRISM software suite:** software user's guide. USA.

BAUER, M. (1997). **Vermessung und Ortung mit Satelliten:** NAVSTAR-GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme. 4. Aufl. Heidelberg: Wichmann.

CAMARGO, P. O. (1999). **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência.** Curitiba, 1999. 191 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Paraná.

CARVALHO, L. D. (1999). **Análise das técnicas GPS atuais para os posicionamentos estáticos e cinemáticos em bases curtas**. Curitiba, 1999. 139 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Paraná.

CUNHA, M. J. P. da (1997). **Aplicação do sistema de posicionamento global no cadastramento de redes de distribuição elétrica**. Curitiba, 1997. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Paraná.

DALAZOANA, R. (2001). **Implicações na cartografia com a evolução do sistema geodésico brasileiro e futura adoção do SIRGAS.** Curitiba, 2001. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná.

DIVIS, D. A. (2000). SA: going the way of the dinosaur. **GPS World**, Oregon, jun. 2000. Vol. 11, n. 6, p. 16-19.

DRANE, C.; RIZOS, C. (1998). **Positioning systems in intelligent transportation systems**. Boston: Artech House.

EDWARDS, S. J.; CROSS, P. A.; BARNES, J. B.; BÉTAILLE, D. (1999). A Methodology for benchmarking real time kinematic GPS. **Survey Review**, Bristol, v. 35, n. 273, p. 163-174, jul. 1999.

EL-MOWAFY, A. (2000). Performance analysis of the RTK technique in an urban environment. **The Australian Surveyor**, Sydney, v. 45, n. 1, p. 47-54, jun. 2000.

FARRET, J. C. (2000). **O efeito do multicaminho estático nas medidas da fase das portadoras GPS**. Curitiba, 2000. 132 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Paraná.

GAO, Y.; LI Z.; MCLELLAN J. F. (1997). Carrier phase based regional area Differential GPS for decimeter-level positioning and navigation. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 10., 1997, Kansas City. **Presented paper**. Alexandria: Institute of Navigation, 1997, p. 1305-1313.

GARNÉS, S. J. A (2001). **Resolução das ambigüidades GPS para linhas de base curta:** análise dos algoritmos de otimização. Curitiba, 2001. 204 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná.

GEOPP (1995) Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH. **Kurzanleitung zu GNRT-K / GNRT empfängerunabhängiges Sofwaresystem zur (hoch)genauen Positionierung mit GPS ind Echtzeit.** Garbsen: Geo++.

GEOPP (2002) **GEO++ GNRT**. Disponível em: <http://www.geopp.de> Acesso em: 30 de março de 2002.

HAN, S.; RIZOS, C. (2000). An instantaneous ambiguity resolution technique for medium-range GPS kinematic positioning. **Navigation - journal of the Institute of Navigation**, Alexandria, v. 47, n. 1, p. 17-31.

HEIN, G. W. (2000). From GPS and GLONASS via EGNOS to Galileo – positioning and navigation in the third millenium. **GPS Solutions**, New York, v. 3, n. 4, p. 39-47, spring 2000.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. (1994). **GPS:** theory and practice. 3.ed. Wien: Springer.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. (2001). **GPS:** theory and practice. 3.ed. Wien: Springer.

IBGE (1997). **Sistema de Referência para a América do Sul – Relatório Final.** Grupos de trabalho I e II. Rio de Janeiro.

IBGE (1998). **Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos** (Coletânea de Normas Vigentes). Rio de Janeiro.

KRUEGER, C. P. (1996). **Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito marinho**. Curitiba, 1996. 267 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Paraná.

KRUEGER, C. P. (2001). **Relatório internacional – projeto de pesquisa para uma cooperação entre Brasil e Alemanha (relatório consolidado dos resultados).** CNPq/DLR. Curitiba, 2001, 81p.

LAGO, I. F. (2001). **Integração GPS e GLONASS aplicada aos levantamentos geodésicos**. Curitiba, 2001. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná.

LANGLEY, R. B. (1998). **RTK GPS**. Disponível em: <http://www.gpsworld.com/0199/0199innov.html>. Acesso em: 24 out. 2000.

LEICK, A. (1995). **GPS**: Satellite surveying. 2. ed. New York: J.Wiley.

LEMMON, T. R.; GERDAN, G. P. (1999). The influence of the number of satellites on the accuracy of the RTK GPS positions. **The Australian Surveyor**, Sydney, v. 44, n. 1, p. 64-70, jun. 1999.

MONICO, J. F. G. (2000). **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS**: descrição, fundamentos e aplicações. São Paulo: UNESP.

NIMA (2000). **World Geodetic System 1984**: its definition and relationships with local geodetic systems. USA, jan. 2000.

PRADO, A. (2001). **Análise da precisão e da correlação espacial nas técnicas DGPS e RTK**. Curitiba, 2001. 137 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná.

RICHARDUS, P.; ADLER, R. K. (1972) **Map projections:** for geodesists, catographers and geographers. Amsterdam: North-Holland Publishing Company.

RIZOS, C.; HAN, S. (1998). Precise kinematic applications of GPS: prospects and challenges. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 3, p. 3-33.

RTCM (1998). **RTCM recommended standards for differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) service**. Version. 2.2. Alexandria: RTCM Special Commitee n°104, jan. 1998.

SANTOS, M. C. (1995). **On real-time orbit improvement for GPS satellites.** New Brunswick, 1995. 125 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick.

SCHÖDLBAUER, A. (2000). **Geodätische Astronomie:** Grundlagen uns Konzepte. Berlin: W. de Gruyter.

SEEBER, G. (1993). **Satellite Geodesy**. Berlin: de Gruyter.

STEWART, M. (2001). **Quality control for RTK GPS surveying**. Perth, 2001. 30 f. Academic lecture (GPS/Geodesy) – Department of Spacial Sciences, Curtin University.

TALBOT, N. C. (1996). Compact data transmission standard for high-precision GPS. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 9., 1996, Kansas City. **Presented paper**. Alexandria: Institute of Navigation, 1996, p. 861-871.

TEICHERT, M. (1999). **GPS-Multistationauswertung über grosse Entfernungen mit der Echtzeitsoftware GNRT/GNNET.** Hannover, 1999. 107 f. Diplomarbeit. Institut für Erdmessung, Universität Hannover.

WALSH, D.; ASHKENAZI, V.; FFOULKES-JONES, G. (1995). Performance of OTF ambiguity resolution search algorithms for real time positioning under varying conditions. In: PROCEEDINGS OF THE NATIONAL TECHNICAL MEETING, 1995, Anaheim. **Presented paper**. Alexandria: Institute of Navigation, 1995, p. 313-321.

WANNINGER, L. (2000). **Präzises Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen**. München, 2000. 68 f. Dissertation – Deutsche Geodätische Kommission, Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

WEBSTER'S (1983). In: Webster's UNABRIDGED DICTIONARY. Nova York: Dorset ε Baber, 1983. 2nd edition, p. 478.

WILLGALIS, S.; SEEBER, G.; KRUEGER, C. P.; ROMÃO, V. M. C. (2002). A real time reference network for Recife, Brazil, enabling precise and reliable cadastral surveys. In: FIG XXII INTERNATIONAL CONGRESS, 2002, Washington, D.C. USA. **Presented paper**, p. 1-14.

WÜBBENA, G.; BAGGE, A. (1995). Präzises DGPS in Echtzeit für Vermessung und GIS-Anwendungen. **Beitrag zum**: DVW-Praxisseminar DGPS-Anwendungen, 1995, Hamburg. Garbsen: Geo++, p. 1-16.

WÜBBENA, G.; BAGGE, A.; SEEBER, G.; BÖDER, V.; HANKEMEIER, P. (1996). Reducing distance dependent errors for real-time Precise DPGS applications by establishing reference station networks. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 9., 1996, Kansas City. **Presented paper**. Alexandria: Institute of Navigation, 1996, p. 1845-1852.

DOCUMENTOS CONSULTADOS

BACKHAUSEN, D.; BÄUMKER, M.; FITZEN, H. P. (2000). Hochgenaue Überwachung von Bauwerken mit fest inslallierten Real Time GPS-Systemen. **Zeitschrift für Vermessungswesen,** Stuttgart, v. 125, n. 11, p. 369-376.

BAGGE, A.; WÜBBENA, G. DGPS Datenformate. **Beitrag zum**. Garbsen: Geo++ Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH, 1996, p. 1-12.

BRICEÑO, J. G. (2000). **Avaliação do posicionamento estático rápido para distâncias médias**. Curitiba, 2000. 65 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Paraná.

BRIONES, A. B. (1999). **Análise do posicionamento DGPS baseado nas ERDGPS implantadas no litoral brasileiro**. Curitiba, 1999. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Paraná.

FERREIRA, L. D. D.; KUGA, H. K. (1997). Avaliação dos efeitos da pressão de radiação solar para satélites GPS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 2, p. 3-11.

GEFRUD, R.; QIN, X.; MARTIN, W. (1995). Real-time GPS land surveying. In: PROCEEDINGS OF THE NATIONAL TECHNICAL MEETING, 1995, Anaheim. **Presented paper**. Alexandria: Institute of Navigation, 1995, p. 287-292.

GEMAEL, C. (1999). **Introdução à Geodésia Física**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.

GEOPP (1998). Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH (1998) **GNNET Multistationsoftware**. Programmdokumentation und Referenzhandbuch. Garbsen: Geo++.

GOGUEN, J. P. T.; ALLISON T. (1995). Precise RTK using the new RTCM-104 v. 2.1 standard. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 8., 1995, Palm Springs. **Presented paper**. Alexandria: Institute of Navigation, 1995, p. 1461-1466.

GROVES, K. M.; BASU, S.; BISHOP, G.J.; WEBER, E.J.; QUINN, J.M. (1996). Ionospheric effects on GPS navigation. In: PROCEEDINGS OF THE ANNUAL MEETING, 52., 1996, Cambridge. **Presented paper.** Alexandria: Institute of Navigation, 1996, p. 583-591.

STEWART, M. (2001). Combined analysis of real-time kinematic GPS equipment and its users for height determination. **Journal of Surveying Engineering**, Perth, v. 127, n.2, p. 31-51.

KALAFUS, R. (1996). New RTCM SC-104 standard for differential GNSS. In: PROCEEDINGS OF THE ANNUAL MEETING, 52., 1996, Cambridge. **Presented paper.** Alexandria: Institute of Navigation, 1996, p. 175-181.

LAPUCHA, D.; BARKER, R.; LIU, Z. (1995). High-rate precise real-time positioning using differential carrier phase. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 8., 1995, Palm Springs. **Presented paper**. Alexandria: Institute of Navigation, 1995, p. 144-1449.

RETSCHER, G.; MOK, E. (1999). Precise single epoch GPS positoning for deformation monitoring. **Zeitschrift für Vermessungswesen,** Stuttgart, v. 124, n. 7, p. 221-228.

SCHMIDT, H.; WITTE, B. (2000). **Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen**. 4., Neubearbeite Auflage, Stuttgart: Konrad Wittwer.

TEUNISSEN, P. J.; De JONG, P. J.; TIBERIUS, C. C. J. M. (1997). Performance of the LAMBDA method for fast GPS ambiguity resolutions. **Navigation - journal of The Institute of Navigation**, Alexandria, v. 44, n. 3, p. 373-383.

TORGE, W. (2001). **Geodesy.** 3rd ed. Berlin: W. de Gruyter.

WEISENBURGER, S.; WILSON, C. (2000). An integrated vehicle positioning system for safety applications. **Navigation: Journal of the Institute of Navigation**, Alexandria, v. 47, n°2, p. 75-81.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – ARQUIVOS EM LOTE 132
APÊNDICE 2 – PLANILHA DE CAMPO PARA LEVANTAMENTOS RTK (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA) 133
APÊNDICE 3 – PLANILHA DE CAMPO PARA LEVANTAMENTOS RTK (ESTAÇÃO MÓVEL) 134
APÊNDICE 4 – SINOPSE DA AVALIAÇÃO DOS DADOS DO LEVANTAMENTO (MARCO UBR – PRIMEIRA OCUPAÇÃO – ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA RM03) 135

APÊNDICE 1 – ARQUIVOS EM LOTE

```
REM UFPR 05.02.2002
REM GNRT Estacao de referencia
REM Secao de registro dos dados de saida (c:/diretorio,SEMANA GPS,DIA GPS)
set GN_DATA=c:\jaime,WEEK,DAY
REM Geracao de protocolo das informacoes dos modulos
start /PM gn_proto
wait 3000
REM Ambiente e chamada para compactacao de dados RINEX
REM set GN_PACK=1h m $DEST $SOURCE
REM start /PM gn_packd
wait 2000
REM O modulo do receptor Ashtech esta ativo;
REM Outras opcoes de receptores:
REM start /PM nxr5_in base -c1 -b9600
REM start /PM msi_in base -c1 -b38400
REM start /PM ash_in base -c2 -b38400 -z -a1.5 +X1,60 -S
start /PM ash_in base -c2 -b38400 -z -a1.5 +X1,60 -S
wait 2000
REM GNRT-Modulo principal
start "GNRT-Basestation" /WIN/MIN/N gnrt base 123 -Dbase -rRM03.ref -e0 -s2
-C -H
wait 2000
REM GNRT-Janela do mostrador de status dos satelites
start /PM stagra -oGNRT,base
wait 2000
REM Transmissao dos dados de correcao no formato RTCM(em RTCM++)
REM A mensagem 59 e transmitida com taxa de 1 segundo
start /PM rtcm_out 1 -b4800 -d -t59,1
REM
REM FIM
-------------------------

REM UFPR  05.02.2002
REM estacao movel
set GN_DATA=c:\jaime,WEEK,DAY
start /PM gn_proto
start /PM ash_in mobi -c1 -b38400 -z -a1.476 +X1,60 -K +b -l -L> ASH.scr
wait 2000
REM GNRT-Modulo principal
start "GNRT-Estacao movel" /PM gnrt mobi 123 +Dbase -e0 -s2 +M -C -lage.ref
>gnrt.scr
rem wait 2000
start /PM stagra -oGNRT,mobi
wait 2000
REM
REM Correcoes RTCM - (e.g. RTCM++)
start /PM rtcm_in 3 -b4800 -d> rtcm.scr
wait 2000
start /PM gnrt_k -rRTCM_IN,COM3 -mGNRT,mobi -e5 -E10 -k25 +b -d
+s>gnrtk.lst
rem wait 5000
start /PM gnmain
start /PM view_sol -oGNRT_K,mobi
start /PM nav_out  6 -d -fbom -oGNRT_K,mobi -t -n1 > 6lage.out
REM FIM
-------------------------
```

APÊNDICE 2 – PLANILHA DE CAMPO PARA LEVANTAMENTOS RTK (ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA)

LEVANTAMENTO RTK

Página _____

Data	/ / 2002	Semana GPS		Dia GPS	

Informações da estação de referência							
Marco		Receptor	ASHTECH ZXII, 996	Antena	Geodés.III	Alt.V.(CF)	
Latitude			Longitude			Alt. Elips.	

Dados climáticos		Temperatura seca	Temperatura úmida	Pressão
Início do rastreio				
Término do rastreio				

Estações móveis ocupadas (em ordem)

Ocupação	Nome	Identificação	Tipo	Local

APÊNDICE 3 – PLANILHA DE CAMPO PARA LEVANTAMENTOS RTK (ESTAÇÃO MÓVEL)

LEVANTAMENTO RTK

Página _____

Informações da estação móvel			
Marco	Identificação	Tipo	Local

Coordenadas de referência (WGS 84)		
Latitude	Longitude	Altura elipsoidal / geoidal
		/

Informações do levantamento							
Receptor	ASHTECH ZXII, 993	Antena	CIN.GEOD.	Alt.(V.CF)		Linha Base	
Dados climáticos		Temperatura seca		Temperatura úmida		Pressão	
Início do rastreio							
Término do rastreio							

Tempo GPS	TTFA	Satélites	Satélit. Fix.	Contraste	PDOP	Observações

APÊNDICE 4 – SINOPSE DA AVALIAÇÃO DOS DADOS DO LEVANTAMENTO (MARCO UBR – PRIMEIRA OCUPAÇÃO – RM03)

a) LINHAS DE DADOS DE CADA SEÇÃO EXTRAÍDAS DO ARQUIVO DE TEXTO

Tempo GPS (s)	Latitude (° ' ")	Longitude (° ' ")	Altitude (m)	dp x (m)	dp y (m)	dp h (m)
305014	-25 28 33,90404	-49 12 28,99082	911,2076	0,0036	0,0033	0,0104
305055	-25 28 33,90409	-49 12 28,99087	911,2161	0,0034	0,0031	0,0098
305099	-25 28 33,90411	-49 12 28,99093	911,2198	0,0032	0,0029	0,0094
305148	-25 28 33,90412	-49 12 28,9907	911,2244	0,0036	0,0033	0,0104
305201	-25 28 33,9041	-49 12 28,99074	911,2147	0,0029	0,0026	0,0084
305238	-25 28 33,90415	-49 12 28,99077	911,2177	0,0027	0,0024	0,0076
305284	-25 28 33,90422	-49 12 28,99099	911,2202	0,0037	0,0034	0,0107
305322	-25 28 33,90419	-49 12 28,99086	911,2291	0,0034	0,0031	0,0098
305360	-25 28 33,90418	-49 12 28,9908	911,2325	0,0037	0,0033	0,0105
305403	-25 28 33,9042	-49 12 28,99086	911,236	0,003	0,0027	0,0084

b) PLANILHA PARA O CÁLCULO DOS ERROS PLANIMÉTRICOS E ALTIMÉTRICOS

WGS 84	
a	6.378.137
f	0,003352811
e	0,081819191

LATITUDE LOCAL			
Sexag.			Radianos
-25	28	33	-0,44464

Coordenadas de Referência (WGS 84)									
LATITUDE				LONGITUDE				ALT. (m)	
			Rad	Sexag.			Rad		
-25	28	33,90411	-0,4446	-49	12	28,99029	-0,8588	911,28	

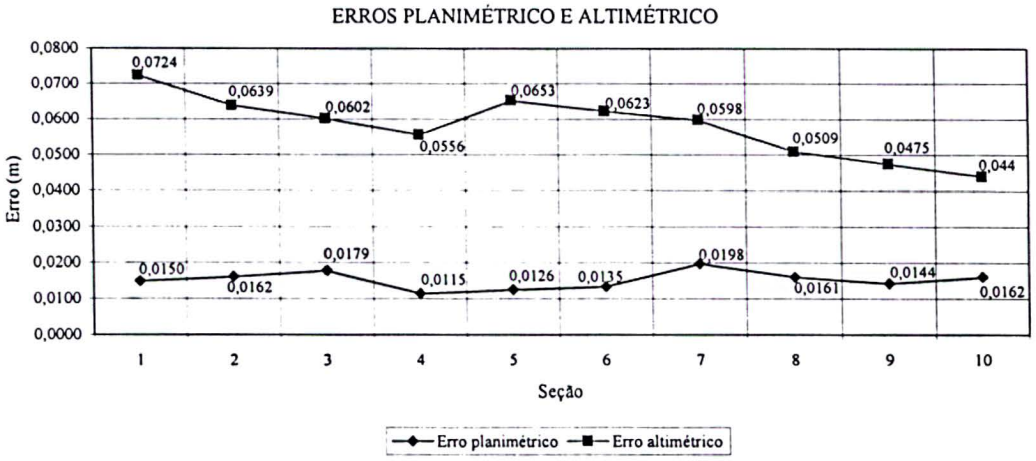
Raio de curvatura meridiana - M (m)	Raio de curvatura do 1. vertical - N (m)
6347227,6323	6382090,4664

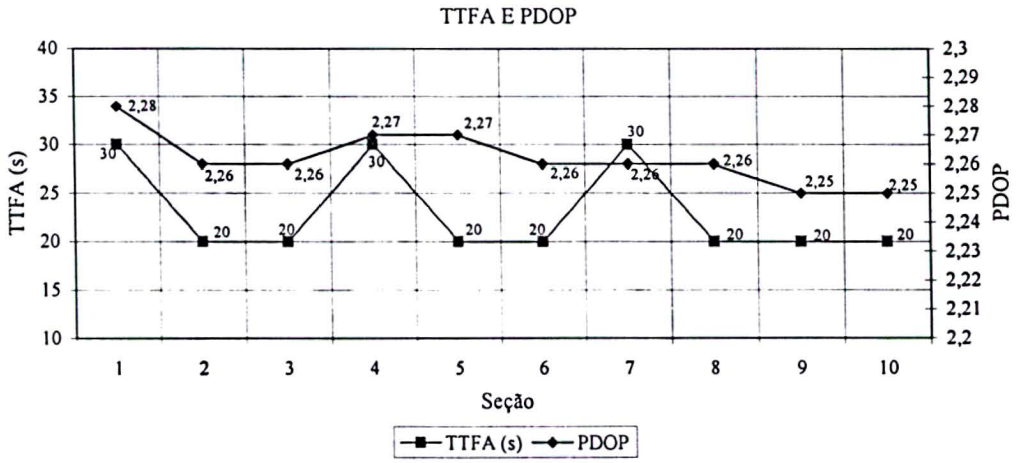
Seção	Coordenadas RTK					Arco de deslocamento infinitesimal (Rad)		desloc. LAT (m)	desloc. LONG (m)	erro planim. (m)	erro altim. (m)
	LATITUDE		LONGITUDE		ALT. (m)	LATITUDE	LONGITUDE				
	Decimal	Rad	Decimal	Rad							
1	-25,47608445556	-0,444642	-49,20805300556	-0,858843	911,208	-0,0000000003	0,0000000026	0,0022	0,0148	0,0150	0,0724
2	-25,47608446944	-0,444642	-49,20805301944	-0,858843	911,216	-0,0000000001	0,0000000028	0,0006	0,0162	0,0162	0,0639
3	-25,47608447500	-0,444642	-49,20805303611	-0,858843	911,22	0,0000000000	0,0000000031	0,0000	0,0179	0,0179	0,0602
4	-25,47608447778	-0,444642	-49,20805297222	-0,858843	911,224	0,0000000000	0,0000000020	0,0003	0,0115	0,0115	0,0556
5	-25,47608447222	-0,444642	-49,20805298333	-0,858843	911,215	0,0000000000	0,0000000022	0,0003	0,0126	0,0126	0,0653
6	-25,47608448611	-0,444642	-49,20805299167	-0,858843	911,218	0,0000000002	0,0000000023	0,0012	0,0134	0,0135	0,0623
7	-25,47608450556	-0,444642	-49,20805305278	-0,858843	911,22	0,0000000005	0,0000000034	0,0034	0,0196	0,0198	0,0598
8	-25,47608449722	-0,444642	-49,20805301667	-0,858843	911,229	0,0000000004	0,0000000028	0,0025	0,0159	0,0161	0,0509
9	-25,47608449444	-0,444642	-49,20805300000	-0,858843	911,233	0,0000000003	0,0000000025	0,0022	0,0142	0,0144	0,0475
10	-25,47608450000	-0,444642	-49,20805301667	-0,858843	911,236	0,0000000004	0,0000000028	0,0028	0,0159	0,0162	0,0440

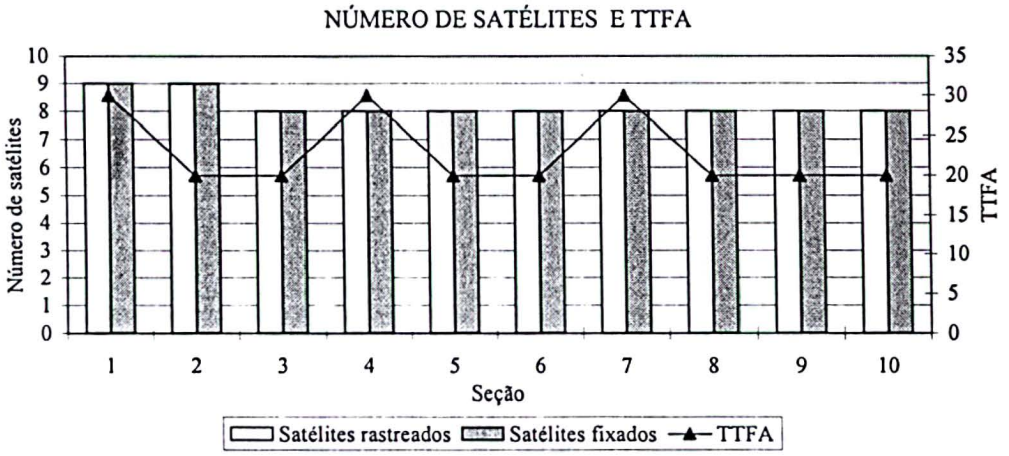
c) DADOS GERAIS DAS SEÇÕES

Seção	Latitude (decimal)	Longitude (decimal)	dp 2D (m)	dp 3D (m)	erro (m) planim.	erro (m) altim.	erro (m) latitude	erro (m) longitude	Satélites rastredos	Satélites Fixados	TTFA (s)	Contraste	PDOP
1	-25,4760845	-49,2080530	0,0048836	0,0114896	0,0150	0,0724	0,0022	0,0148	9	9	30	31,2	2,28
2	-25,4760845	-49,2080530	0,0046011	0,0108264	0,0162	0,0639	0,0006	0,0162	9	9	20	27,2	2,26
3	-25,4760845	-49,2080530	0,0043186	0,0103446	0,0179	0,0602	0,0000	0,0179	8	8	20	18,5	2,26
4	-25,4760845	-49,2080530	0,0048836	0,0114896	0,0115	0,0556	0,0003	0,0115	8	8	30	31,2	2,27
5	-25,4760845	-49,2080530	0,0038949	0,009259	0,0126	0,0653	0,0003	0,0126	8	8	20	38,9	2,27
6	-25,4760845	-49,2080530	0,0036125	0,0084149	0,0135	0,0623	0,0012	0,0134	8	8	20	41,1	2,26
7	-25,4760845	-49,2080531	0,0050249	0,0118212	0,0198	0,0598	0,0034	0,0196	8	8	30	27,7	2,26
8	-25,4760845	-49,2080530	0,0046011	0,0108264	0,0161	0,0509	0,0025	0,0159	8	8	20	30,1	2,26
9	-25,4760845	-49,2080530	0,0049578	0,0116116	0,0144	0,0475	0,0022	0,0142	8	8	20	17,7	2,25
10	-25,4760845	-49,2080530	0,0040361	0,0093193	0,0162	0,044	0,0028	0,0159	8	8	20	26,8	2,25

d) GRÁFICOS


ERROS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO
Erro (m)
0,0800
0,0700
0,0600
0,0500
0,0400
0,0300
0,0200
0,0100
0,0000
0,0724
0,0639
0,0602
0,0556
0,0653
0,0623
0,0598
0,0509
0,0475
0,044
0,0150
0,0162
0,0179
0,0115
0,0126
0,0135
0,0198
0,0161
0,0144
0,0162
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Seção
Erro planimétrico
Erro altimétrico


TTFA E PDOP
TTFA (s)
PDOP
40
35
30
25
20
15
10
2,3
2,29
2,28
2,27
2,26
2,25
2,24
2,23
2,22
2,21
2,2
2,28
2,26
2,26
2,27
2,27
2,26
2,26
2,26
2,25
2,25
30
20
20
30
20
20
30
20
20
20
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Seção
TTFA (s)
PDOP


NÚMERO DE SATÉLITES E TTFA
Número de satélites
TTFA
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
35
30
25
20
15
10
5
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Seção
Satélites rastreados
Satélites fixados
TTFA