

ALEXANDRE BORGES BRIONES

ANÁLISE DO POSICIONAMENTO DGPS BASEADO NAS ERDGPS IMPLANTADAS NO LITORAL BRASILEIRO

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

Orientadora: Prof.^ª Dr.^ª Cláudia Pereira Krueger

CURITIBA

1999

ALEXANDRE BORGES BRIONES

**ANÁLISE DO POSICIONAMENTO DGPS BASEADO NAS ERDGPS
IMPLANTADAS NO LITORAL BRASILEIRO**

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

Orientadora : Prof^a. Dr^a. Cláudia Pereira Krueger.

CURITIBA

1999

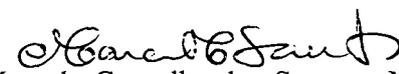
**“ANÁLISE DO POSICIONAMENTO DGPS BASEADO NAS ERDGPS
IMPLANTADAS NO LITORAL BRASILEIRO”**

POR

ALEXANDRE BORGES BRIONES

Dissertação n° 146 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:


Prof. Dr.^a Cláudia Pereira Krueger (UFPR)
Orientadora


Prof. Dr. Marcelo Carvalho dos Santos - Membro (UFPR)


CMG (RRM) Roberto Andrade Fernandes, MSc - Membro (DHN -RJ.)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de dissertação à minha esposa Leila e meus filhos Thiago e Leonardo, como uma satisfação pela escassez de tempo disponível para nosso convívio no decorrer destes 3 anos.

...Deus , que é fiel e justo,...
(1 Jo 1,9)

AGRADECIMENTOS

A elaboração de uma dissertação de mestrado, via de regra, é fruto de um extenso trabalho de cooperação, envolvendo não só o mestrando e seu orientador, como também diversas outras pessoas e/ou instituições que, direta ou indiretamente, contribuem para seu desenrolar. Conseqüentemente, por questão de justiça, é mandatório, ao menos a menção, a giza de agradecimento, de todos que me auxiliaram nesta difícil empreitada.

Inicialmente agradeço às duas instituições que me possibilitaram a realização do curso de mestrado: a Diretoria de Hidrografia e Navegação - DHN – pela confiança em mim depositada através de minha indicação para o curso e a Universidade Federal do Paraná – UFPR – por aceitar-me para o curso e disponibilizar o apoio intelectual e técnico necessário ao desenvolvimento do trabalho

Passando ao plano pessoal, transcorro sobre aqueles a quem devo profundos agradecimentos. . Em âmbito geral, agradeço a todos os professores que colaboraram com minha formação ao longo do mestrado. Em particular, agradeço ao professor Silvio Rogério Correia de Freitas, coordenador do curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, pela cordialidade e atenção que sempre me foram dispensadas. Ao professor Camil Gemael, fundador do curso e referência viva da geodésia brasileira, por seus ensinamentos e por seu exemplo de dedicação à vida acadêmica. A todos os companheiros de curso, em especial aos meus amigos Moisés Ferreira Costa e Elaine Nunes Jordan, por todos os momentos compartilhados e pela solidariedade que sempre nos permitiu contornar as dificuldades encontradas.

Ao Capitão-de-Fragata (RRm) Francisco Antonio Cardoso Garcia, então Encarregado do Serviço de Sinalização Náutica do Sul – SSN5 – pela deferência de apoiar-me através do

Navio-Balizador Amorim do Valle, para a coleta de dados no mar, sem os quais este trabalho não teria sido viável.

À professora Cláudia Pereira Krueger, prezada amiga e orientadora, por toda sua dedicação, paciência e apoio em todos os momentos em que necessitei, demonstrando grande aptidão à função de orientação, a qual lhe é atribuída por força de sua atividade acadêmica.

Aos meus pais, pelo amor com que me criaram e pelo esforço na busca da melhor formação intelectual que pudessem me oferecer.

À minha amada esposa Leila e meus amados filhos Thiago e Leonardo, pelo sentido que dão à minha trajetória pessoal e pela capacidade de, consciente ou inconscientemente, suportarem as privações decorrentes de minha dedicação às tarefas que abraço.

E por fim, agradeço a Deus, por tudo de bom que tem permeado minha vida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SIGLAS	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS	4
2.1 O NAVSTAR GPS.....	4
2.1.1 Apresentação.....	4
2.1.2 Estrutura dos sinais dos satélites GPS.....	5
2.1.3 Tipos de observação GPS.....	7
2.1.4 Erros que afetam o posicionamento GPS.....	10
2.1.4.1 Erros relacionados com os satélites.....	11
2.1.4.2 Erros relacionados com o meio de propagação.....	11
2.1.4.3 Erros relacionados com os receptores.....	12
2.1.4.4 Erros relacionados com a distribuição dos satélites.....	13
2.1.5 Métodos de posicionamento.....	13
2.1.5.1 Posicionamento absoluto.....	13
2.1.5.2 Posicionamento relativo.....	14

2.1.5.3	Posicionamento GPS diferencial (DGPS).....	15
2.1.5.3.1	Correções diferenciais.....	17
2.1.5.3.2	Tipos de Observação DGPS.....	18
2.1.5.3.3	Transmissão das correções diferenciais.....	20
2.1.5.3.4	Modelos matemáticos.....	24
2.1.5.3.5	Erros e acurácias do posicionamento GPS.....	26
2.1.5.3.6	Aplicações.....	29
2.2	MENSAGENS RTCM.....	29
2.2.1	Formato das Mensagens	31
2.2.2	Tipos de Mensagem.....	32
2.3	RADIOFARÓIS.....	36
2.3.1	Estações de Referência DGPS (ERDGPS).....	38
2.4	REQUISITOS DE ACURÁCIA.....	41
2.4.1	Navegação marítima.....	41
2.4.2	Levantamentos hidrográficos.....	43
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	45
3.1	METODOLOGIA.....	45
3.2	FASE I - RASTREIO DA ERDGPS MOELA.....	46
3.2.1	Processamento dos dados.....	48
3.2.2	Redução das excentricidades.....	49
3.2.3	Precisão das coordenadas finais.....	51
3.3	FASE II – COLETA DOS DADOS AO LONGO DAS ROTAS MARÍTIMAS.....	54
3.3.1	Arranjo das antenas a bordo.....	55
3.3.2	Dados das Trajetórias “teste”.....	57
3.3.3	Dados das Trajetórias “padrão”.....	58

3.4 FASE III – PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	59
3.4.1 Geração das trajetórias “padrão” e “teste”.....	61
3.4.1.1 Dados brutos GPS.....	61
3.4.1.2 Dados brutos DGPS.....	62
3.4.2 Comparação das trajetórias “padrão” e “teste”.....	63
3.4.2.1 Comparação das Trajetórias <i>trimble</i> (ida) com a Trajetória DGPS (ida).....	72
3.4.2.2 Comparação das Trajetórias <i>ashtech</i> (ida) com a Trajetória DGPS (ida).....	75
3.4.2.3 Comparação das Trajetórias <i>ashtech</i> (volta) com a Trajetória DGPS (volta).....	78
3.4.3 Latências das correções diferenciais.....	81
3.4.4 Variação do posicionamento altimétrico DGPS.....	85
3.5 FASE V – ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	87
3.5.1 Correlação espacial e qualidade do posicionamento planimétrico DGPS.....	89
3.5.2 Latência das correções diferenciais.....	91
3.5.3 Qualidade do posicionamento altimétrico DGPS.....	92
4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES.....	93
ANEXO 1 - LISTAGENS DO PROCESSAMENTO DAS COORDENADAS DA ERDGPS MOELA.....	96
ANEXO 2 – PARECER TÉCNICO.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

LISTA DE FIGURAS

1	PRINCÍPIO BÁSICO DO POSICIONAMENTO COM GPS.....	5
2	MÉTODO DE POSICIONAMENTO DGPS.....	16
3	ERRO DGPS EM FUNÇÃO DA LATÊNCIA DAS CORREÇÕES DIFERENCIAIS.....	27
4	CABEÇALHO DAS MENSAGENS RTCM.....	32
5	COBERTURA MARÍTIMA DA REDE ERDGPS BRASILEIRA.....	40
6	ESQUEMA DO RASTREIO DA ERDGPS MOELA.....	47
7	ROTAS PERCORRIDAS PELO NAVIO.....	55
8	ARRANJO DAS ANTENAS GPS INSTALADAS A BORDO.....	56
9	TRECHO DA PLANILHA COM DADOS DA TRAJETÓRIA “TRIMBLE ABSOLUTA (IDA)”.....	62
10	TRECHO DA PLANILHA COM DADOS DA TRAJETÓRIA “DGPS (IDA)”.....	63
11	TRECHO DA PLANILHA DE COMPARAÇÃO ENTRE AS TRAJETÓRIAS “TRIMBLE ABSOLUTA (IDA)” E “DGPS (IDA)”.....	64
12	TRECHO DA PLANILHA DE CÁLCULO DAS “DISTÂNCIAS ORTODRÔMICAS”.....	66
13	VELOCIDADES MÉDIAS DO NAVIO AO LONGO DA ROTA DE IDA.....	68
14	VELOCIDADES MÉDIAS DO NAVIO AO LONGO DA ROTA DE VOLTA.....	68
15	EXEMPLO DE TABELA DE ERROS/DISTÂNCIAS RESULTANTES DA COMPARAÇÃO ENTRE TRAJETÓRIAS.....	71
16	ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “TRIMBLE ABSOLUTA (IDA) DA ESTAÇÃO PARA”.....	73
17	ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “TRIMBLE FLUTUANTE (IDA) DA ESTAÇÃO PARA”.....	73
18	ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “TRIMBLE ABSOLUTA (IDA) DA ESTAÇÃO UEPP”.....	74
19	ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “TRIMBLE FLUTUANTE (IDA) DA ESTAÇÃO UEPP”.....	74
20	ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “ASHTECH ABSOLUTA (IDA) DA ESTAÇÃO PARA”.....	76
21	ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “ASHTECH FLUTUANTE (IDA) DA ESTAÇÃO PARA”.....	76

22	ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “ <i>ASHTECH</i> ABSOLUTA (IDA) DA ESTAÇÃO UEPP”.....	77
23	ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “ <i>ASHTECH</i> FLUTUANTE (IDA) DA ESTAÇÃO UEPP”.....	77
24	ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “ <i>ASHTECH</i> ABSOLUTA (VOLTA) DA ESTAÇÃO PARA”.....	79
25	ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “ <i>ASHTECH</i> FLUTUANTE (VOLTA) DA ESTAÇÃO PARA”.....	79
26	ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “ <i>ASHTECH</i> ABSOLUTA (VOLTA) DA ESTAÇÃO UEPP”.....	80
27	ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “ <i>ASHTECH</i> FLUTUANTE (VOLTA) DA ESTAÇÃO UEPP”.....	80
28(a)	LATÊNCIAS DAS CORREÇÕES DGPS (TRAJETÓRIA DE IDA).....	83
28(b)	LATÊNCIAS DAS CORREÇÕES DGPS (TRAJETÓRIA DE IDA).....	83
29	LATÊNCIAS DAS CORREÇÕES DGPS (TRAJETÓRIA DE VOLTA).....	84
30	VARIAÇÃO DO POSICIONAMENTO ALTIMÉTRICO DGPS.....	86
31	VARIAÇÃO DE PARÂMETROS (LATÊNCIA, HDOP, N. DE SATÉLITES).....	86

LISTA DE TABELAS

1	CARACTERÍSTICAS DOS SINAIS GPS.....	7
2	FAIXAS DE FREQUÊNCIAS RÁDIO.....	21
3	ACURÁCIAS HORIZONTAIS TÍPICAS DO POSICIONAMENTO DGPS.....	28
4	TIPOS DE MENSAGEM RTCM.....	33
5	ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA DGPS (ERDGPS) BRASILEIRAS.....	39
6	REQUISITOS DE ACURÁCIA DE POSICIONAMENTO PARA NAVEGAÇÃO MARÍTIMA.....	42
7	REQUISITOS DE ACURÁCIA DE POSICIONAMENTO PARA LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS.....	44
8	ERRO DO POSICIONAMENTO PLANIMÉTRICO DGPS BASEADO NAS ERDGPS.....	90
9	LATÊNCIA DAS CORREÇÕES DIFERENCIAIS DAS ERDGPS	91
10	ERRO DO POSICIONAMENTO ALTIMÉTRICO DGPS BASEADO NAS ERDGPS.....	92

LISTA DE SIGLAS

AS:	Anti-Spoofing.
CAMR:	Centro de Sinalização Náutica e Reparos Alte. Moraes Rêgo.
DGPS:	Differential GPS.
DHN:	Diretoria de Hidrografia e Navegação.
DOD:	Department Of Defense.
EMQ:	Erro Médio Quadrático.
ERDGPS:	Estação de Referência DGPS.
GRS 80:	Geodetic Reference System 1980.
IALA:	International Association of Lighthouse Authorities.
IGS:	International GPS Geodynamics Service.
IHO:	International Hydrographic Organization.
IMO:	International Maritime Organization.
IOD:	Issue of Data.
ION:	U.S. Institute of Navigation.
LAGE:	Laboratório de Geodésia Espacial (UFPR).
MSK:	Minimum Shift Keying.
NAVSTAR GPS:	NAVigation System with Time and Ranging Global Positioning System.
NMEA:	National Marine Eletronics Association.
NDB:	Non-Direction Beacom.
PPS:	Precise Positioning Service.
PRN:	Pseudorandom Noise.
RBMC:	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo.
RTCM:	Radio Technical Commission For Maritime Services.
RTDGPS:	Real-Time DGPS.
RTK:	Real-Time Kinematic.
RTPDGPS:	Real-Time Precise DGPS.
SA:	Selective Availability.
SIMEPAR:	Serviço Meteorológico do Paraná.

SIRGAS:	Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul.
SPS:	Standard Positioning Service.
SSN:	Serviço de Sinalização Náutica.
UDRE:	User Differential Range Error.
WGS 84:	World Geodetic System 1984.

RESUMO

O método DGPS é um dos mais eficazes para apoiar atividades nas quais se requer um posicionamento contínuo, em tempo real e com níveis de acurácia e precisão adequados aos fins a que se destina. Tendo em vista que grande parte das atividades que se desenvolvem no âmbito marítimo enquadram-se nesta situação, a Marinha do Brasil, seguindo uma tendência mundial, implantou ao longo de nosso litoral, nas proximidades de alguns radiofaróis, diversas Estações de Referência DGPS (ERDGPS). Conforme atestado pela Diretoria de Hidrografia e Navegação, o posicionamento DGPS feito com base nestas estações tem acurácia melhor que 3 m (1σ), acrescida de um erro igual a 2 ppm da distância de separação entre elas e a estação móvel. Entretanto, este fator de degradação, designado por “correlação espacial”, necessita de uma melhor investigação. Para investigar esta e outras questões relacionados com o posicionamento baseado nas ERDGPS, executou-se, ao longo de 2 rotas marítimas dispostas radialmente em relação à ERDGPS Moela, uma coleta de dados de posição GPS com 3 receptores. Dois deles coletaram dados brutos e um coletou dados de posição DGPS, baseados em correções recebidas da mencionada estação de referência. Os dados brutos, após processados, permitiram gerar trajetórias “padrões” que serviram para avaliar a qualidade de uma trajetória “teste”, decorrente do posicionamento DGPS. Pela comparação destas trajetórias, pôde-se determinar a degradação da qualidade do posicionamento em função da distância entre as estações, chegando-se a um valor médio de 11,5 ppm.

ABSTRACT

The DGPS Method is one of the most efficacious methods in helping activities which require a continuous real-time positioning system with satisfactory accuracy and precision levels. Since most maritime activities can be understood this way, Brazilian Navy, following a world trend, put along our coast some DGPS Reference Stations (assigned by ERDGPS). These stations provide DGPS positioning with accuracy better than 3m (1σ), plus a error equal to 2 ppm of the distance between them and the mobile station, as stated by Diretoria de Hidrografia e Navegação. However, this factor of degradation, called “spatial decorrelation”, needs to be better investigated. To investigate this and other questions related to DGPS methods, data were collected along two radial maritime routes in relation to Moela ERDGPS. It was used 3 receivers, two of them storing raw GPS data and one providing DGPS positions, based on differential corrections received from the cited station. After raw data were processed, it was possible generate “standard” tracks that were used to evaluate the quality of a “test” track based on DGPS positions. By comparing the tracks, it was possible to define the medium quality positioning degradation in function of the distance between stations, that was shown be 11,5 ppm.

1 INTRODUÇÃO

Como decorrência direta das características do ambiente marinho, os levantamentos e demais atividades efetuadas no mar implicam um razoável esforço logístico para sua realização. Lançar-se ao mar, com segurança e profissionalismo, tem como pré-requisito básico uma adequada previsão e provisão de recursos de pessoal e material, de forma que, os custos envolvidos são, via de regra, de considerável monta. Com isso, a eficácia dos métodos empregados para a coleta dos diversos dados de interesse tem importância capital na análise da relação custo/benefício. Um aspecto comum a qualquer atividade executada no mar é a imprescindibilidade de um método de posicionamento eficaz. Nesse caso, a eficácia estaria associada principalmente à capacidade do método empregado fornecer dados de posição em tempo real e com níveis de acurácia e precisão adequados ao fim a que se destinam. O posicionamento em tempo real é desejável e, em algumas aplicações, até mesmo imperativo, como decorrência tanto do conceito de segurança da navegação, quanto do aspecto dos custos anteriormente abordado, visto que a falta do controle em tempo real das posições dos dados coletados, poderia implicar em riscos de acidentes ou na necessidade de retorno ao mar para novas coletas. A adequação a níveis de acurácia e precisão advém da existência de requisitos mínimos estabelecidos, quer pelos próprios usuários, quer por organismos internacionais, como a IMO (*International Maritime Organization*), IALA (*International Association of Lighthouse Authorities*) e IHO (*International Hydrographic Organization*), dos quais o Brasil é um dos países-membro.

O método de posicionamento DGPS, desenvolvido no início dos anos 80 pela Guarda Costeira norte-americana (*U.S. Cost Guard*), tem-se apresentado como um dos métodos mais

eficazes para apoiar uma série de atividades marítimas, tais como navegação em águas restritas, dragagem de canais, levantamentos hidrográficos e sinalização náutica. Em face disto e a exemplo do que vem sendo feito em vários países, foram implantadas, ao longo de nosso litoral, várias Estações de Referência DGPS (ERDGPS) nas proximidades de alguns radiofaróis marítimos. Com isto, qualquer usuário, navegando em águas marítimas brasileiras, equipado com um receptor adequado, pode posicionar-se gratuitamente com base nas correções diferenciais transmitidas por essas estações.

Em linhas gerais, a execução do posicionamento DGPS baseia-se em uma “estação de referência”, cujas coordenadas têm que ser conhecidas de forma bastante acurada, que calcula correções diferenciais e as transmite via algum enlace, p. ex. rádio-transmissor, para uma “estação móvel”, geralmente uma embarcação. Usando as correções recebidas da estação de referência e os sinais dos satélites GPS, a estação móvel calcula sua posição, a qual é potencialmente isenta dos erros associados aos satélites e à atmosfera, partindo-se do princípio que estes erros afetam igualmente ambas as estações. A “eliminação” destes erros, contudo, vai tornando-se menos efetiva a medida que aumenta a separação entre as estações. Isto se dá, principalmente, com relação aos erros atmosféricos, visto que, para grandes distâncias, as condições atmosféricas reinantes em cada uma delas podem ser muito distintas entre si, acarretando o surgimento de erros, que degradam a qualidade do posicionamento DGPS. Esta relação entre a qualidade do posicionamento e a distância entre as estações é denominada “correlação espacial” (RTCM v2.1, 1994 p.1-9). Ela ainda não foi adequadamente determinada, havendo, contudo, referência a alguns valores, como por exemplo 2 ppm, conforme atestado por DHN (1992 p.9-24), e de 1 a 10 ppm, segundo WÜBENA e BAGE, conforme citado por KRUEGER (1996, P. 53).

Outro importante aspecto que incide sobre a qualidade do posicionamento DGPS é a “latência” (atraso) das correções diferenciais, expressa pelo tempo despendido desde a geração das correções até seu efetivo emprego pela estação móvel.

Objetivando a análise da qualidade do posicionamento DGPS baseado em nossas ERDGPS, especificamente quanto à caracterização da correlação espacial e da latência das correções, foram realizadas 2 rotas marítimas com apoio de um navio da Marinha do Brasil. Ao longo destas rotas foram coletados dados brutos de posição GPS, bem como dados de posição DGPS, sendo estes baseados nas correções transmitidas pela ERDGPS Moela. A partir dos processamentos e análises decorrentes, foi possível quantificar valores para a “correlação espacial” e “latência”. Considerando-se que todas as ERDGPS existentes possuem características operacionais semelhantes, pode-se esperar que os resultados alcançados sejam representativos do posicionamento DGPS baseado em quaisquer uma delas.

O presente trabalho tem como justificativa, contribuir para um melhor conhecimento da qualidade do posicionamento DGPS oferecido pelas Estações de Referência DGPS (ERDGPS), posto que isto se apresenta como questão crucial para o usuário que necessita ou busca atingir determinados níveis de qualidade para o seu posicionamento.

Na seção 2 (Conceitos Básicos) estão apresentados os conceitos necessários ao desenvolvimento do trabalho, relacionados com o assunto principal, qual seja, o método DGPS. Na seção 3 (Desenvolvimento do Trabalho) são descritas a metodologia empregada e as fases de coleta e processamento dos dados, bem como a análise dos resultados. Por fim, na seção 4 (Conclusões e Recomendações) tem-se as conclusões decorrentes e as recomendações julgadas pertinentes, envolvendo propostas para futuros trabalhos.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

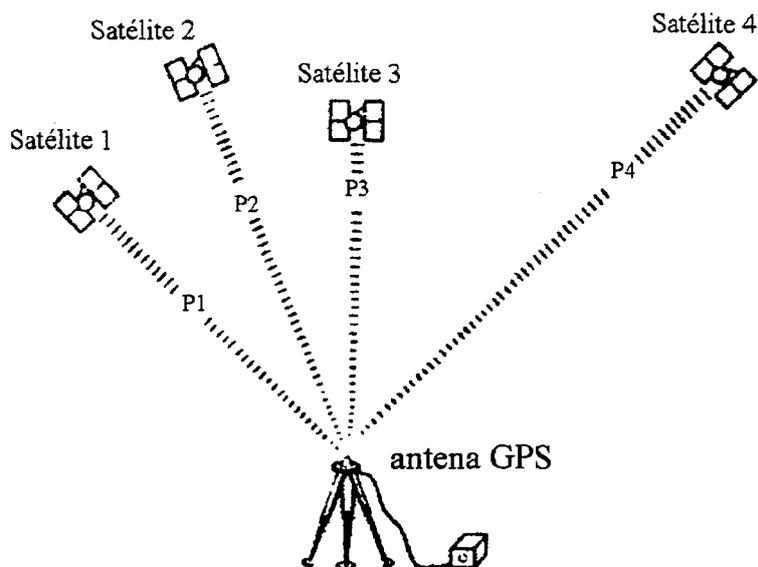
2.1 O NAVSTAR GPS

2.1.1 Apresentação

O NAVSTAR GPS, sigla advinda de *Navigation System with Time and Ranging Global Positioning System*, é um sistema de posicionamento desenvolvido e implementado pelo Departamento de Defesa dos EUA (DOD). De acordo com a concepção original do projeto, ele é primordialmente um sistema militar de navegação que provê em tempo real posicionamento e velocidade para vetores de armas tais como navios, aeronaves, veículos terrestres etc. Uma definição dada por WOODEN (1984), citado por HOFMANN (1994, p.13), atesta : “O NAVSTAR GPS é um sistema de navegação que opera em quaisquer condições climáticas, baseado em técnicas espaciais e desenvolvido pelo DOD para atender a requisitos das forças armadas relativos à determinação acurada de posição, velocidade e tempo, dentro de um mesmo sistema de referência, de forma contínua em qualquer parte sobre a Terra ou em suas proximidades”.

O princípio fundamental do sistema é a determinação da posição e velocidade de uma estação, com base em medições simultâneas de pseudodistâncias (*pseudoranges*) entre esta e pelo menos 4 satélites com coordenadas conhecidas e referidas a um adequado arcabouço (*frame*) de referência (fig.1).

FIGURA.1 - PRINCÍPIO BÁSICO DO POSICIONAMENTO COM GPS.



Fonte: SEEBER, 1993

2.1.2 Estrutura dos sinais dos satélites GPS

Os sinais transmitidos pelos satélites GPS são resultantes da composição de três tipos de sinais :

- portadoras (L_1 ou L_2);
- códigos (C/A e/ou P); e
- mensagem de dados.

O código e a mensagem de dados são sobrepostos à portadora, a qual tem como função primordial executar o transporte destes desde o satélite até o receptor.

O sistema opera com dois tipos de portadoras (L_1 e L_2) da banda L, geradas a partir de uma frequência fundamental (f_0) de 10,23 MHz. Esta frequência é produzida pelos relógios atômicos existentes nos satélites. Os satélites dos blocos II e IIA possuem dois relógios de Rubídio e dois de Césio, ao passo que os do bloco IIR, relógios de maser de Hidrogênio

(HOFMANN, 1994, p.18). Pela multiplicação eletrônica de f_0 por 154 e 120, são geradas, respectivamente, as frequências das portadoras L_1 (1.575,42 MHz) e L_2 (1.227,60 Mhz). A principal razão para a implementação de duas portadoras no GPS é a utilização delas na eliminação do efeito da refração ionosférica, que é a maior fonte de erro do sistema (HOFMANN, 1994, p.18 e 106).

São gerados dois códigos diferentes, C/A e P.¹ O código C/A (*Clear* ou *Coarse /Aquisicion*) tem seus *bits* ou *chips* gerados a uma frequência de 1,023 Mhz o que corresponde a $1\mu\text{s}$ (~300 m) por *bit*, sendo o seu ciclo de repetição de 1 ms (~300 km). O código P (*Precise* ou *Protected*) tem seus *bits* gerados a uma frequência de 10,23 MHz, correspondendo a $0,1\mu\text{s}$ (~ 30 m) por *bit*, e um ciclo de aproximadamente 266,4 dias, o qual é repartido em vários trechos de 7 dias (subciclos) sendo estes distribuídos entre os vários satélites. Os códigos (*pseudorandom noise code* ou simplesmente *code*) constituem-se numa seqüência de *bits* (valores de 0 e 1, ou -1 e +1), também designados *chips*, que aparentam ter uma lei de geração aleatória (randômica), mas que decorrem de um processo controlado baseado no uso de um mecanismo denominado de *tapped feedback shift registers* (HOFMANN, 1994, p.78).

O terceiro tipo de sinal, componente do sinal do satélite, é a mensagem de dados (ou mensagem de navegação ou mensagem GPS). Ela é gerada por uma frequência de 50 Hz (50 bps) com um ciclo de 30 segundos, sendo composta por 1500 *bits*. Este conjunto de *bits*, geralmente designado de “Quadro”, é subdividido em cinco subquadros de 300 *bits* os quais

¹ A partir de 31 / 01/ 1994, a política do AS (*Anti-Spoofing*) foi implementada permanentemente. Assim, o código P passou a ser criptografado por um outro código (W), resultando num código designado por Y (HOFMANN, 1994 p.21).

contêm dez palavras de 30 *bits*. As mensagens GPS contêm informações sobre o relógio do satélite, órbitas dos satélites, saúde dos satélites e outros dados de correção.

A portadora L_1 é modulada pelos códigos C/A, P (defasados entre si de 90°) e pela mensagem GPS, ao passo que a L_2 é modulada pelo código P e pela mensagem GPS.

Os sinais componentes dos sinais dos satélites GPS e suas características básicas são apresentadas na tabela 1.

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DOS SINAIS GPS

Portadora L_1	
Frequência ($150 \times f_0$)	1.575,42 MHz
Comprimento de onda	19,05 cm
Portadora L_2	
Frequência ($120 \times f_0$)	1.227, 60 MHz
Comprimento de onda	24,45 cm
Código C/A	
Frequência dos <i>bits</i> ($f_0 / 10$)	1,023 MHz
Comprimento de cada <i>bit</i>	293,1 m
Período do código	1 ms
Comprimento do código	299,79 km
Código P	
Frequência dos <i>bits</i> (f_0)	10,23 MHz
Comprimento de cada <i>bit</i>	29,31 m
Período do código	266 dias
Comprimento do código	$6,9 \times 10^{15}$ km (7 dias)
Mensagem de dados	
Frequência dos <i>bits</i>	50 Hz (bps)
Período da mensagem	30 s

2.1.3 Tipos de observação GPS

Em termos práticos, pode-se considerar dois tipos de observação para determinação das pseudodistâncias (SEEBER, 1993 p.250):

- Fase dos códigos (C/A e P);
- Fase das portadoras (L_1 e L_2) ou diferença de fase das portadoras;

Na prática é comum empregar-se a terminologia “medidas ou observações de código” para designar-se as observações de fase dos códigos e “medidas ou observações de fase” para designar-se as observações de fase das portadoras.

O termo pseudodistância advém do fato de os elementos básicos de medida usados pelo GPS para a determinação da distância receptor-satélite estarem afetados por uma série de erros, tais como erros dos relógios dos satélites e receptores, refração atmosférica, multicaminho, etc. No caso das medidas da fase do código, o elemento básico de medida é o intervalo de tempo despendido pelo sinal do código no seu trajeto desde o satélite até o receptor. No caso das medidas da fase da portadora, o elemento básico é a diferença de fase entre o sinal transmitido e o recebido.

Dentro da concepção inicial do GPS, as observações de fase de código constituem o tipo básico de observação para o cômputo das pseudodistâncias. O posicionamento obtido exclusivamente a partir de observações do código C/A é designado por SPS (*Standard Positioning Service*), sendo disponibilizado aos usuários civis de um modo geral. O posicionamento obtido por observações do código P é designado por PPS (*Precise Positioning Service*) e destina-se exclusivamente aos usuários militares americanos e outros usuários autorizados. O princípio básico do cálculo de pseudodistâncias, com base em medidas de código, consiste na determinação do tempo (Δt) despendido pelo sinal de código no trajeto satélite-receptor, o qual, ao ser multiplicado pelo valor da velocidade da luz no vácuo (c), fornece a distância satélite-receptor.

Matematicamente esta medição é dada pela equação (2.1), na qual estão considerados também os diversos erros envolvidos.

$$P_i^j = c \cdot \Delta t = \rho_i^j + c \cdot dT_i + c \cdot dT^j + d_{ion} + d_{trop} + \varepsilon_i^j, \quad (2.1)$$

onde:

$$\rho_i^j = |\underline{r}^j - \underline{r}_i| = [(X^j - X_i)^2 + (Y^j - Y_i)^2 + (Z^j - Z_i)^2]^{1/2};$$

$|\underline{r}^j - \underline{r}_i|$: módulo da diferença entre os vetores de posição do satélite (\underline{r}^j) e do receptor (\underline{r}_i);

P_i^j : pseudodistância (medida) entre as antenas do receptor i e do satélite j;

ρ_i^j : distância geométrica (real) entre as antenas do receptor i e do satélite j;

X^j, Y^j, Z^j : coordenadas da posição do satélite (conhecidas);

X_i, Y_i, Z_i : coordenadas da posição da antena do receptor i;

dT_i : erro de sincronismo do relógio do receptor i em relação ao tempo GPS ($dT_i = T_{GPS} - t_i$);

dT^j : erro de sincronismo do relógio do satélite j em relação ao tempo GPS ($dT^j = T_{GPS} - T^j$);

d_{ion} : erro em distância devido à refração ionosférica;

d_{trop} : erro em distância devido à refração troposférica;

ε_i^j : outros erros em distância (ruído de recepção, multicaminho, variação do centro de fase da antena receptora);

c : velocidade de propagação da luz no vácuo.

O princípio das observações de fase das portadoras consiste no cálculo da diferença entre a fase do sinal da onda portadora recebida (φ^S) e a fase do sinal da portadora (réplica) gerada pelo receptor (φ_R). Esta diferença, também chamada de “fase de batimento”, é o elemento básico de medida deste tipo de observação. A principal dificuldade da observação da fase da portadora é a determinação do “número inteiro inicial de ciclos” (N) (também designado por “ambigüidade inteira” ou simplesmente “ambigüidade”) existente entre o satélite e a antena do receptor, porque a “fase de batimento” representa somente a diferença de fase dentro de um comprimento de onda. Logo, N constitui-se em uma incógnita que tem que ser determinada por métodos especiais ou pelo conhecimento a priori, com uma acurácia de $1/2 \lambda$ da distância satélite-receptor (SEEBER, 1993 p. 249). Outra dificuldade são as

eventuais perdas da contagem dos ciclos inteiros (*cycle slips*) decorrentes da interrupção da recepção do sinal do satélite por obstrução física ou por excesso de ruído.

A representação matemática das pseudodistâncias calculadas por observações de fase das portadoras é dada pela equação (2.2):

$$\Phi_i^j \cdot \lambda = \rho_i^j + c \cdot dT^j + c \cdot dT_i - d_{ion} + d_{trop} + \epsilon_i^j - N_i^j \cdot \lambda \quad (2.2)$$

onde:

Φ_i^j : número de ciclos inteiros acrescido de uma parte fracionária de ciclos, computados desde um instante inicial T_0 até um instante t , entre o receptor i e o satélite j ;

N_i^j : número inteiro de ciclos no instante inicial T_0 , entre o receptor i e o satélite j ;

λ : comprimento de onda da portadora observada; e

$\rho_i^j, c, dT^j, dT_i, d_{ion}, d_{trop}, \epsilon_i^j$: como na equação (2.1)

2.1.4. Erros que afetam o posicionamento GPS

O posicionamento GPS sofre a influência de diversos erros, os quais podem ser grupados da seguinte maneira (HOFMANN, 1994 p.93) :

- a) erros relacionados com os satélites;
- b) erros relacionados com o meio de propagação;
- c) erros relacionados com o receptor.

Além desses pode-se também considerar (WELLS et al., 1986) :

- d) erro relacionados com a distribuição espacial dos satélites observados.

2.1.4.1 Erros relacionados com os satélites

Erros das efemérides - são as discrepâncias entre as efemérides disponíveis, sejam elas as transmitidas em tempo real pelas mensagens de dados dos satélites ou as precisas, obtidas a posteriori, e a posição verdadeira dos satélites.

Erros dos relógios dos satélites - são erros da ordem de 1ms decorrentes das derivas dos relógios dos satélites.

Erros devidos à Disponibilidade Seletiva (SA) - a SA (*Selective Availability*) consiste na degradação intencional, operada pelo Departamento de Defesa americano (DOD), dos dados relativos às efemérides transmitidas ou da frequência fundamental dos relógios dos satélites.

2.1.4.2 Erros relacionados com o meio de propagação

Erro devido à refração ionosférica - é o erro decorrente de um fenômeno de caráter sistemático que causa alteração da velocidade de propagação dos sinais GPS ao atravessarem a ionosfera. Essa alteração ocorre no sentido de que as medidas de código são retardadas, acarretando pseudodistâncias maiores que as distâncias geométricas receptor-satélite, e as medidas de fase da portadora são adiantadas, da mesma quantidade (HOFMANN, 1994 p.101), acarretando pseudodistâncias menores que as geométricas.

Erro devido à refração troposférica (ou atraso troposférico) - é um erro decorrente de um fenômeno de caráter sistemático que causa diminuição da velocidade de propagação dos sinais GPS ao atravessarem a troposfera. Com isso as pseudodistâncias obtidas, sejam por

medida de código ou de fase, sofrem sempre um acréscimo em relação à distância geométrica satélite-receptor.

2.1.4.3 Erros relacionados com os receptores

Erro do relógio dos receptores - é o erro decorrente da deriva (marcha) dos relógios dos receptores.

Erro devido ao Multicaminho - é o erro decorrente do fato de o sinal GPS chegar à antena receptora por mais de um caminho, em consequência de reflexões provocadas por estruturas existentes nas proximidades desta (principal) ou ocorridas no próprio satélite quando da emissão do sinal.

Erros de excentricidade e variação do centro de fase da antena - o erro de excentricidade é o erro decorrente do fato de o centro (eletrônico) de fase da antena não coincidir fisicamente com o centro geométrica da mesma. Tal defasagem surge quando da construção da antena e, para a maioria dos tipos de antena, seu valor é fornecido pelo fabricante com precisões na ordem do milímetro. Contudo, a excentricidade do centro de fase não é um valor fixo, apresentando uma variação sistemática de 1 a 2 cm em função da direção e intensidade do sinal recebido (SEEBER, 1993 p.310; HOFMANN, 1994 p.123).

Erros de observação (ou de recepção ou de ruídos do receptor) - são erros de caráter acidental que surgem como consequência das limitações eletrônicas dos receptores em realizar as medidas de pseudodistâncias (código ou fase), dependendo assim da razão entre o sinal GPS recebido e os ruídos existentes.

2.1.4.4 Erros relacionados com a distribuição geométrica dos satélites

A distribuição dos satélites observados tem efeito direto sobre a acurácia 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 geometricamente como sendo o inverso do volume de um tetraedro formado pelos vetores direcionados do receptor para cada um dos 4 satélites observados. Assim, tem-se que quanto maior o espalhamento dos satélites maior será o volume do tetraedro e menor o valor do PDOP, acarretando numa melhor acurácia do posicionamento.

2.1.5 Métodos de Posicionamento

O posicionamento GPS pode ser categorizado em três métodos ou modos de posicionamento, a saber: absoluto, relativo e GPS diferencial (DGPS) (HOFMANN, 1994 p. 131-136). A seguir dá-se a descrição dos três, com ênfase no método DGPS, por ser de maior interesse ao presente trabalho.

2.1.5.1 Posicionamento absoluto

Em inglês designado por *point positioning*, ou *absolute point positioning*, ou *single point positioning* (HOFMANN, 1994 p. 130), consiste, em linhas gerais, na determinação isolada da posição de um ponto com base em pseudodistâncias, baseadas em observações de

fase de código (equação 2.1) em relação a no mínimo (normalmente) quatro satélites. Este método é disponibilizado em dois tipos de serviços, consoante com o nível de precisão oferecido: SPS (*Standard Positioning Service*) e PPS (*Precise Positioning Service*). No SPS utiliza-se apenas o código C/A e as acurácias alcançadas são de 100 m e 156 m para o posicionamento horizontal e vertical, respectivamente, com nível de probabilidade de 95%, considerando-se presentes as degradações decorrentes da SA. No caso do PPS, utiliza-se ambos os códigos e os valores caem respectivamente para 16 m e 23 m. Pode-se dizer que o emprego do GPS com vistas ao posicionamento absoluto para apoio à navegação (posição e velocidade), principalmente dos usuários militares, constituiu-se na razão primordial para a criação do sistema.

2.1.5.2 Posicionamento relativo

É realizado através de observações concomitantes a um dado grupo de satélites, a partir de duas estações distintas equipadas com receptores GPS. Em uma das estações (estação de referência), a qual, via de regra, tem coordenadas conhecidas, é instalado um receptor que permanece fixo (estacionário) durante todo o período de observações. Um outro receptor é instalado sobre uma outra estação ou, sucessivamente, sobre várias outras, das quais deseja determinar-se as coordenadas. Este receptor também pode operar durante os deslocamentos entre as sucessivas estações ou ao longo de rotas que queira registrar-se com uma dada taxa de amostragem.

Como consequência deste posicionamento, determina-se o(s) vetor(es) de posição entre a estação de referência e as demais estações, os quais representam a posição relativa

entre elas, advindo disto a denominação de posicionamento relativo . A estes vetores dá-se a denominação de “linhas de base” ou, simplesmente, “bases”. Em geral este método emprega observações de fase das portadoras, tendo em vista que tal associação permite alcançar os níveis de acurácia exigidos para levantamentos geodésicos e geodinâmicos. Originalmente, realizava-se o posicionamento relativo por pós-processamento dos dados, porém, atualmente, já é possível realizar-se esta tarefa em “tempo real”, para linhas de bases curtas, pela transmissão dos dados de rastreo da estação de referência para a estação itinerante, através de algum enlace (*link*) de rádio (HOFMANN, 1994 p.134).

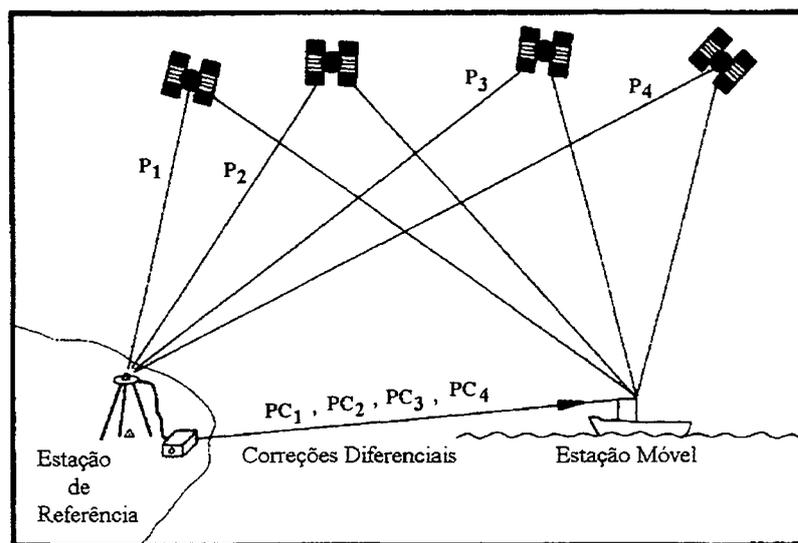
A qualidade do posicionamento relativo é tipicamente muito superior à do posicionamento absoluto. Ela depende no entanto de diversos fatores, tais como, o comprimento das linhas de base, o tempo de observação das seções, o número de satélites observados e as portadoras empregadas. Outro fator importante é se a antena da estação itinerante permaneceu estacionária (levantamento estático) ou em movimento durante o rastreo (levantamento cinemático).

2.1.5.3 Posicionamento GPS diferencial (DGPS)

O método absoluto possibilita um posicionamento em tempo real e pouco vulnerável a descontinuidades, porém com níveis de acurácia e precisão que nem sempre atendem às necessidades dos usuários. O método relativo, embora possibilite alcançar os maiores níveis de precisão dentro do posicionamento GPS, tem contudo dois inconvenientes. Primeiro, como emprega-se normalmente observações de fase das portadoras, é vulnerável às perdas de sinal, que por vezes prejudicam a qualidade do posicionamento em função das dificuldades

envolvidas na resolução das ambigüidades. Segundo, requer, via de regra, pós-processamento dos dados, o que significa não possibilitar um posicionamento em tempo real. O método DGPS, tem como grande vantagem encontrar-se num patamar intermediário, permitindo um posicionamento, em tempo real, menos afetado pelas discontinuidades que o relativo e com qualidade bem superior à do absoluto. O princípio básico deste método consiste em utilizar-se, assim como no método relativo, simultaneamente dois receptores, um instalado em uma estação fixa de coordenadas conhecidas, via de regra designada por “estação de referência”, e um outro em uma estação itinerante, normalmente em permanente movimento, designada por “estação móvel”. A partir da estação de referência são calculadas correções, denominadas “correções diferenciais”, as quais são utilizadas pela estação móvel no processo de cálculo de sua posição (fig. 2).

FIGURA 2 - MÉTODO DE POSICIONAMENTO DGPS



Fonte : SEEBER, 1993

O posicionamento diferencial pode ser realizado por pós-processamento ou em tempo real, como ocorre na maioria das aplicações no âmbito marítimo (p. ex., levantamentos

hidrográficos e navegação), sendo neste caso chamado de RTDGPS (*Real-Time DGPS*) (KRUEGER, 1996 p.54). Neste caso as correções têm que ser transmitidas através de algum enlace (*link*) de dados, com uma formatação adequada. É no apoio ao posicionamento em tempo real que o DGPS encontra suas maiores potencialidades, aliando economia de tempo a uma qualidade posicional relativamente alta em comparação à do posicionamento absoluto.

2.1.5.3.1 Correções diferenciais

Nas aplicações em tempo real, podem ser empregadas correções diferenciais de dois tipos: correções de posição e correções de pseudodistância (HOFMANN, 1994 p.132).

O uso de correções de posição é o meio mais simples de usar o método DGPS, porém o menos flexível, pois é necessário que o conjunto de satélites empregado pela estação de referência na geração das correções seja o mesmo empregado pela estação móvel. Caso contrário podem ser introduzidos erros sistemáticos que, quando sob presença da SA, podem ultrapassar 10 m (SEEBER, 1993 p.342).

Por seu turno, as correções de pseudodistância estão associadas individualmente a cada uma das pseudodistâncias obtidas pela estação de referência em relação aos satélites por ela rastreados. Desta forma, essas correções não têm um compromisso direto com a constelação observada como um todo, mas sim com cada satélite isoladamente. Ao receber estas correções, a estação móvel seleciona, para o cômputo de sua posição, apenas aquelas relativas aos satélites por ela rastreados. Sendo assim, não há necessidade de as constelações serem idênticas em ambas as estações, bastando tão somente que haja um mínimo de 4 satélites comuns às duas. Apesar de o esforço computacional ser maior, o uso destas correções

é compensado por uma maior flexibilidade e acurácia, se comparadas às das correções de posição (HOFMANN, 1994 p.132). Atualmente, na maioria dos casos são empregadas as correções de pseudodistância (fig. 2) (SEEBER, 1993 p.464).

2.1.5.3.2 Tipos de observação DGPS

Os tipos de observações, inicialmente utilizadas no posicionamento DGPS, eram a fase do código e a fase do código suavizado pela portadora.

As pseudodistâncias baseadas em fase do código são representadas pela equação (2.1) e as baseadas no código suavizado pela portadora são dadas pelo algoritmo, LACHAPELE et al.(1986), citado por HOFMANN (1994 p. 97) :

$$P_{SM}(t) = W(t) \cdot P(t) + (1 - W(t)) \cdot [P_{SM}(t-1) + (\Phi(t) - \Phi(t-1))], \quad (2.3)$$

onde:

$P_{SM}(t)$: pseudodistância baseada em medidas de fase do código suavizado pela portadora;

$P(t)$: pseudodistância baseada em medidas de fase do código (2.1);

$\Phi(t)$: pseudodistância baseada em medidas de fase da portadora (2.2);

$W(t)$: fator peso, sendo adotado o valor inicial $W(t_0) = 1$, o qual é continuamente reduzido com o tempo.

Este algoritmo funciona como um filtro que progressivamente aumenta a influência das medidas de fase da portadora (Φ) e diminui a influência das medidas de código (P), podendo ser aplicado mesmo no caso de se dispor de apenas uma das portadoras (HOFMANN,1994 p.98). As ambigüidades são resolvidas após algum tempo de observação e caso ocorra alguma perda de ciclo o algoritmo deve ser reinicializado (SEEBER, 1993 p.289).

Pesquisas feitas no início dos anos 90 mostraram ser possível aumentar o nível da acurácia oferecido pelo DGPS, empregando-se observações de fase das portadoras, permitindo atingir-se acurácias da ordem do decímetro, em tempo real e com a estação itinerante em movimento. Esta técnica tem sido designada por “RTK GPS” (*Real-Time Kinematic GPS*) (LANGLEY, 1998 p.70) ou “RTPDGPS” (*Real-Time Precise DGPS*) (KRUEGER, 1996 p.55). Ela vem sendo empregada em aplicações que requeiram elevada acurácia em tempo real, sendo porém seu uso limitado a bases curtas, pois apenas os enlaces rádio das faixas VHF/UHF são capazes de transmitir as informações RTK (2.1.5.3.3). Além disto, é indispensável o uso de técnicas OTF para a rápida resolução das ambigüidades durante o deslocamento da estação móvel. O posicionamento RTK GPS é feito com informações diferenciais de medidas brutas de fase da portadora ou de correções de fase da portadora, podendo-se, como observável secundária, usar o código suavizado pela portadora. Quando usando medidas brutas de fase, a estação móvel efetua duplas-diferenças entre as medidas brutas por ela determinadas e as recebidas da estação de referência (LANGLEY, 1998 p.74) . Neste caso, o RTK GPS é, em princípio, idêntico ao posicionamento relativo “cinemático puro”, pois as duplas diferenças geram efetivamente vetores de posição entre as duas estações. No caso do uso de correções de fase, adota-se uma abordagem similar à do método DGPS, ou seja, a estação móvel utiliza as correções recebidas para corrigir suas próprias medidas de fase (LANGLEY, 1998 p.76 e RTCM V2.1, 1994 p.IV-4).

Na prática, em geral, tem-se empregado o termo “DGPS” para designar o posicionamento diferencial GPS em tempo real com observações de fase dos códigos ou códigos suavizados pelas portadoras, e o termo “RTK” para designar o posicionamento diferencial GPS em tempo real com observações de fase das portadoras. No corpo do presente trabalho esta será a nomenclatura utilizada.

2.1.5.3.3 Transmissão das correções diferenciais

As correções diferenciais têm que ser transmitidas, desde a estação de referência até a móvel, através de algum enlace (*link*) que seja capaz de transmitir dados de forma confiável e contínua a uma taxa de pelo menos 50 bps, conforme preconizado pela RTCM SC-104. Os enlaces podem ser feito por rádios transmissores, linhas telefônicas e satélites de comunicação, utilizando diferentes partes de espectro eletromagnético. Alguns aspectos devem ser considerados na escolha do tipo de enlace. Altas frequências proveêm melhor solução, e conseqüentemente maior precisão, possibilitam o uso de maiores taxas de transmissão de dados e apresentam menores custos, porém têm alcances limitados em relação às frequências baixas (KRUEGER, 1994 p.74).

Faixas de frequência

O espectro eletromagnético estende-se desde abaixo das frequências rádio ELF ($<3 \times 10^3$ Hz) até as frequências características dos raios gama (3×10^{19} Hz). As chamadas “frequências rádio” representam a porção deste espectro compreendida aproximadamente entre 30 Hz e 300 GHz (LANGLEY, 1993), sendo subdivididas em faixas, como representado pela tabela 2.

Em princípio pode-se usar enlaces diferenciais que operem em qualquer uma das faixas citadas. Contudo, na prática, as faixas são escolhidas em função da capacidade de taxa de transmissão, do alcance eficaz, da técnica de modulação utilizada e de considerações sobre infra-estrutura (LANGLEY, 1993). Assim, atualmente, os principais enlaces de dados diferenciais operam nas faixas LF/MF e VHF/UHF.

TABELA 2 - FAIXAS DE FREQUÊNCIAS RÁDIO

FAIXAS	FREQUÊNCIAS	COMPRIMENTOS DE ONDA
ELF (<i>Extremely Low Frequency</i>)	< 3 kHz	> 100.000 m
VLF (<i>Very Low Frequency</i>)	3 - 30 kHz	100.000 - 10.000 m
LF (<i>Low Frequency</i>)	30 - 300 kHz	10.000 - 1.000 m
MF (<i>Medium Frequency</i>)	300 - 3.000 kHz	1.000 - 100 m
HF (<i>High Frequency</i>)	3 - 30 MHz	100 - 10 m
VHF (<i>Very High Frequency</i>)	30 - 300 MHz	10 - 1 m
UHF (<i>Ultra High Frequency</i>)	300 - 3.000 MHz	1 - 0,1 m
SHF (<i>Super High Frequency</i>)	3 - 30 GHz	0,1 - 0,01 m
EHF (<i>Extremely High Frequency</i>)	> 30 GHz	0,01 - 0,001m

Fonte : KRUEGER, 1996

A seguir apresenta-se algumas características destas faixas.

- Faixas LF/MF

Dentro destas faixas são encontradas principalmente transmissões de rádios AM, radiofaróis aeronáuticos (190 - 415 e 510 - 535kHz) e radiofaróis marítimos (285,5 - 325kHz) (RTCM v2.1,1994p.1-4). Os sinais de LF propagam-se basicamente por meio de ondas terrestres, as quais acompanham a curvatura da Terra, alcançando distâncias superiores a 150 km sobre superfícies líquidas e de até 100 km sobre terra, onde são bastantes atenuadas pelo solo. Os sinais MF propagam-se por meio de ondas terrestres e ondas celestes, aquelas com alcances em torno de 400 km sobre superfícies líquidas e 50 km sobre terra e estas com alcances de até 2.000 km conforme o grau de ionização da atmosfera (LANGLEY, 1993). Como a onda celeste é muito sujeita a desvanecimentos, o alcance eficaz da faixa MF é dado por suas ondas terrestres.

Os enlaces diferenciais usados nestas faixas constam principalmente dos radiofaróis marítimos, operando com uma taxa de transmissão de dados de 100 à 200 bps . Além deste, alguns outros têm sido usados na parte superior do MF (~2 Mhz) (LANGLEY, 1993).

- Faixas VHF/UHF

Dentro destas faixas encontram-se transmissões de rádios FM, emissoras de TV, satélites GPS e GLONASS e de diversos satélites de comunicação (p. ex., INMARSAT). Os sinais propagam-se ao longo da linha de visada entre as antenas transmissora e receptora. A distância do “horizonte rádio” desta faixa é dado por (LANGLEY, 1993):

$$D = 4,1 \cdot (Ht + Hr)^{1/2}, \quad (2.4)$$

onde:

D : alcance do sinal em quilômetros;

Ht : altura da antena transmissora em metros;

Hr : altura da antena receptora em metros.

As distâncias dadas pela equação (2.4) podem ser menores que as efetivamente obtidas em operações sobre superfícies líquidas e maiores que as obtidas sobre superfícies terrestres. Os enlaces que empregam estas faixas, se comparados aos das faixas LF/MF, são mais simples e baratos, requerem menores potências e possibilitam o uso de taxas de transferência mais elevadas (até 9.600 bps). Por outro lado têm alcances mais limitados (<50 km) e são mais afetados pelo efeito do multicaminho (KRUEGER, 1996 p.78). Estas faixas são usadas para enlaces de dados diferenciais DGPS como também de dados RTK, posto que estes últimos requerem elevadas taxas de transmissão.

Enlace de dados diferenciais

Dentro das faixas LF/MF, conforme aprovado pela IALA (*International Association of Lighthouse Authorities*) e pela IMO (*International Maritime Organization*), instituições das

quais o Brasil é país-membro, tem-se empregado amplamente os sinais transmitidos pelos radiofaróis (principalmente os marítimos) como enlace para transmissão das correções diferenciais, havendo numerosas vantagens, dentre estas (MIGUENS, 1995 p.97):

- O alcance dos radiofaróis (350 - 550 km) é compatível com as distâncias dentro das quais as correções diferenciais são válidas;
- as faixas de operação dos radiofaróis são protegidas em todo o mundo por regulamentos internacionais;
- os equipamentos de transmissão dos sinais dos radiofaróis NDB (*Non Directional Beacon*) são confiáveis e relativamente baratos ;
- a configuração necessária à recepção das correções diferenciais pode ser usada em todo o mundo, pois todos os radiofaróis operam na mesma faixa de frequência ;
- atende à recomendação da IALA que dispõe que as transmissões não devem ser codificadas, de modo que qualquer usuário possa ter acesso ao sistema gratuitamente;
- a estação de referência DGPS utiliza toda a infra-estrutura já existente para a operação e manutenção do radiofarol.

A técnica empregada para modulação das correções diferenciais na portadora do radiofarol é denominada MSK (*Minimum Shift Keying*). Essa técnica requer pouca largura de banda de frequência, provê uma cobertura confiável na presença de ruídos atmosféricos e não interfere nas atividades de radiogoniometria (determinação de direções a partir de ondas de rádio) (LANGLEY, 1993 p.48).

Dentro das faixas VHF/UHF existem inúmeros enlaces possíveis de serem utilizados, contudo tais enlaces, diferentemente dos radiofaróis, são basicamente de caráter comercial ou privado. Várias regiões destas faixas foram alocadas para comunicação móvel, porém,

algumas porções do UHF (902 - 928 MHz) e outras maiores foram reservadas para enlaces que usem transmissões de espectro largo com baixa potência, sem necessidade de licença prévia. Com potência limitada a 1 W, esses enlaces podem cobrir distâncias da ordem de 5 km. Ao invés de implantar um enlace diferencial próprio, é possível valer-se de redes de comunicações existentes, como por exemplo a rede de estações rádio FM públicas ou comerciais. Essas redes, a exemplo do que é feito nos radiofaróis, transmitiriam as correções diferenciais, em uma subportadora, sem prejuízo de seus sinais normais (LANGLEY, 1993 p.50). Por outro lado, na América do Norte e em outras jurisdições, as frequências VHF de 150 - 174 MHz e UHF de 450 - 470 MHz devem ser licenciadas futuramente para enlaces de dados RTK/DGPS (LANGLEY, 1998 p.72).

No Brasil, os enlaces empregados para operações DGPS têm sido os radiofaróis marítimos, cujo controle fica a encargo da Marinha do Brasil, e enlaces rádio de alcance local, nas faixas VHF/UHF com potência limitada, dedicados exclusivamente ao posicionamento DGPS/RTK, operados por diversas instituições.

2.1.5.3.4 Modelos matemáticos

No posicionamento DGPS

A estação móvel calcula pseudodistâncias para cada satélite por ela rastreado (P_M), adicionando a elas as respectivas correções diferenciais (PC) recebidas da estação de referência, de forma a corrigi-las. Assim, uma pseudodistância medida na estação móvel num instante t ($P_M(t)$) é corrigida como a seguir (adaptado de RTCM V2.1; 1994 p.4 - 7):

$$P(t) = P_M(t) + PC(t) \quad (2.5)$$

A correção diferencial (PC (t)), é resultante da conjugação de uma correção de pseudodistância relativa ao instante t_0 (PC (t_0)), calculada na estação de referência, com uma correção correspondente à sua taxa de variação (RRC). Esta taxa de variação tem por finalidade corrigir a defasagem de tempo existente entre os instantes t e t_0 , para os quais foram calculadas as pseudodistâncias, na estação móvel e de referência, respectivamente. Tem-se então que a correção diferencial em um instante t é dada por (adaptado de RTCM V 2.1, 1994 p. 3 - 10):

$$PC(t) = PC(t_0) + RRC \cdot (t - t_0), \quad (2.6)$$

onde:

PC (t) : correção diferencial para o tempo t;

PC (t_0) = $\rho(t_0) - P(t_0)$: correção de pseudodistância para o tempo t_0 ; e

RRC : taxa de variação da correção de pseudodistância PC (t_0).

As pseudodistâncias mencionadas seguem a formulação dada pela equações (2.1) ou (2.3), conforme os receptores empregados estejam habilitados a trabalhar.

No posicionamento RTK

Como já citado anteriormente (2.1.5.3.2), o principal tipo de observação RTK é a fase da portadora, por permitir atingir um maior nível de acurácia. No caso do uso de medidas brutas de fase da portadora, a estação móvel calcula, para cada época de observação, duplas-diferenças entre as medidas de fase por ela determinada e as recebidas da estação de referência. No caso do uso de correções de fase da portadora a formulação é semelhante à do DGPS. A estação móvel calcula medidas de fase (Φ_M) para cada satélite por ela rastreado, adicionando a estas as respectivas correções de fase (Φ_C) recebidas da estação de referência.

Assim, uma medida de fase feita num instante t ($\Phi_M(t)$) é corrigida como a seguir (RTCM v2.1,1994 p. 4-31):

$$\Phi(t) = \Phi_M(t) + \Phi_C(t), \quad (2.7)$$

onde:

$\Phi_C(t) = \rho(t) - (\Phi(t) + N)$: correção de fase da portadora;

$\rho(t)$: distância geométrica (satélite-estação de referência), em ciclos;

$(\Phi(t) + N)$: distância medida (satélite-estação de referência), em ciclos.

2.1.5.3.5 Erros e acurácias do posicionamento DGPS

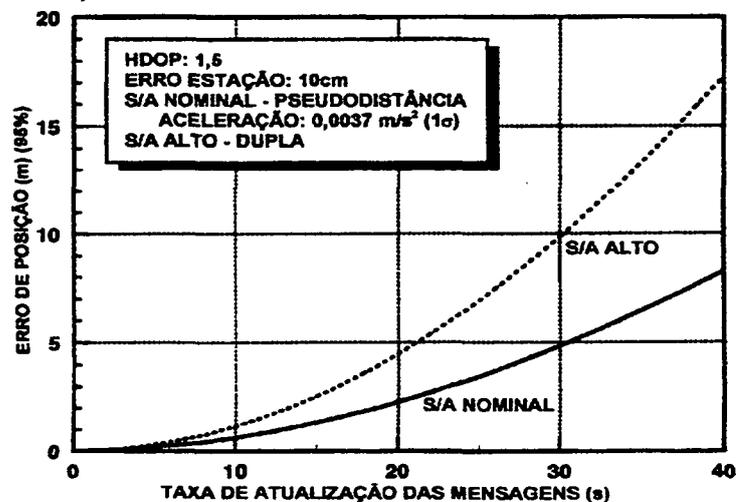
A técnica diferencial funciona se os erros preponderantes das medições realizadas forem sistemáticos e originários de fatores externos aos receptores, como é o caso do GPS (RTCM v2.1,1994 p.1-8, 1-9, 4-1). Os principais erros desse tipo são:

1. Erros artificiais devidos à Disponibilidade Seletiva (SA);
2. Refração ionosférica;
3. Refração troposférica;
4. Erros dos modelos de predição das efemérides; e
5. Erros dos modelos de predição dos relógios dos satélites.

A técnica diferencial elimina completamente o erro 5, pois este é igual nas estações móvel e de referência. Os erros 1, 2, 3 e 4 serão potencialmente eliminados desde que a distância entre as estações permita considerá-los também como afetando igualmente ambas as estações. Segundo HOFMANN (1994, p.133) esta consideração pode ser feita até distâncias em torno de 500 km. Contudo, com o distanciamento entre as estações, tal consideração vai

perdendo consistência, dando lugar a erros nas medições diferenciais da ordem de 1 à 10 ppm, segundo WÜBBENA e BAGGE (1995), conforme citado por KRUEGER (1996, p.53) ou de 2 ppm (DHN,1992 p.9-24). Esta relação é denominada “correlação espacial” (RTCM v2.1, 1994 P1-9). Quanto aos erros do tipo 1, tem-se que no caso do “processo δ ” (deterioração das frequências dos relógios dos satélites), sua eliminação dependerá não só da distância entre as estações, como também do atraso na recepção das correções diferenciais. Na prática sempre se verifica algum atraso, como fruto do tempo despendido para cálculo, transmissão e processamento das correções diferenciais. Este atraso, denominado “latência”, pode chegar até 2 segundos conforme a taxa de transmissão de dados usada (LANGLEY, 1994 p.74). Na ausência da SA, empregando-se o fator RRC (taxa de variação da pseudodistância) (equação 2.6), o erro devido a uma latência de 10 s seria negligenciável, e o devido a uma latência de 30 s seria 1,5 m (HOFMANN, 1994 p.138). Esta relação é denominada “correlação temporal” (JIN et al., 198-?). Na presença da SA esses valores sofreriam um aumento conforme apresentado pela fig. 3.

FIGURA. 3 - ERRO DGPS EM FUNÇÃO DA LATÊNCIA DAS CORREÇÕES DIFERENCIAIS



Fonte : RTCM, 1994

Tem-se com isso que, na presença da SA, a latência das correções diferenciais é um dos principais fatores de degradação da acurácia do posicionamento DGPS. Além disto a acurácia DGPS é afetada por erros intrínsecos aos receptores (multicaminho, ruídos de recepção e erro do relógio da estação de referência) e pela distribuição geométrica dos satélites.

Muito embora não haja, aparentemente, um consenso quanto à acurácia do posicionamento DGPS, os valores citados por diversas fontes não são muito discrepantes entre si, situando-se em valores inferiores a 10 metros. Segundo HOFMANN (1994 p.289), as acurácias tipicamente alcançadas atualmente pelo método DGPS no posicionamento horizontal, na presença da SA, são as apresentadas na tabela 3. As altitudes correspondentes teriam acurácias degradadas por um fator de 1,5 a 2. Vale ressaltar que o autor não menciona o nível de confiabilidade dos valores citados. De acordo com RTCM (1994 p. i), a expectativa inicial seria de uma acurácia de 8-10 m (95%), sendo que na prática tem-se verificado valores melhores que 5 m, freqüentemente alcançando-se 1-3m. Por seu turno, a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN, 1992 p. 2-24), propõe uma acurácia melhor que 3 m (68%) ou que 9 m (98%) para o posicionamento DGPS baseado nas ERDGPS (ver 2.3.1).

TABELA 3 - ACURÁCIAS HORIZONTAIS TÍPICAS DO POSICIONAMENTO DGPS.

Tipos de observação	Distância entre as estações (km)	Acurácias (m)
Código	10	4 – 8
	500	5 – 10
Código suavizado	10	0,3 – 3
	500	4 – 7
Fase da portadora	10	0,03 - 0,2

Fonte : HOFMANN, 1994

2.1.5.3.6 Aplicações

O método de posicionamento diferencial em tempo real (DGPS e RTK), por aliar economia de tempo, pois não requer pós-processamento dos dados, a um nível de acurácia relativamente alto, tem encontrado aplicações em diversas áreas. Como exemplo de algumas aplicações típicas pode citar-se (MIGUENS, 1995 p.105 e HOFMANN,1994 p.289):

- navegação de aproximação de portos e em águas restritas;
- atividades de sinalização náutica;
- operações de dragagem;
- levantamentos topográficos, hidrográficos, oceanográficos e geofísicos;
- navegação aérea (exceto fases de aproximação e pouso);
- apoio a atividades de sistemas de informação geográficas (SIG);
- levantamentos topográficos;
- apoio a atividades de aerofotogrametria; e
- gerenciamento de frotas de veículos terrestres.

2.2 Mensagens RTCM

Um importante aspecto no estabelecimento do enlace de dados DGPS é o formato no qual eles são transmitidos. Em novembro de 1983, em função da solicitação do ION (*U.S. Institute of Navigation*), a RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) estabeleceu o Comitê Especial 104, designado RTCM SC-104, com o propósito de desenvolver recomendações sobre os padrões de transmissão de correções diferenciais para os usuários do GPS e definir os enlaces diferenciais (KALAFUS, DIERENDONCK, PEALER, 1986 p.26) (KRUEGER, 1996 p. 64). Em 1985 a comissão publicou a 1ª versão de suas

recomendações (RTCM v. 1.0). Posteriormente, em janeiro de 1990, em função de testes e experiências operacionais, publicou a 2ª versão (RTCM v. 2.0) (Langley, 1993 p.47) a qual por sua vez foi substituída em janeiro de 1994 pela versão RTCM v. 2.1 (RTCM v.2.1, 1994 p.i).

As mensagens RTCM fornecem diversos dados, sendo os mais importantes os relativos a correções e/ou medidas brutas de pseudodistâncias (de código e/ou fase), almanaque e saúde dos satélites. Cada tipo de mensagem tem uma identificação única de 1 à 64 e é enquadrada dentro de 3 condições : fixa, tentativa e reservada. As mensagens “fixas” não estão sujeitas a mudanças. Se por alguma razão futura, elas se mostrarem inadequadas, novas mensagens serão definidas para acomodar as novas situações. As mensagens “tentativas” são aquelas que em função das experiências de campo, poderão vir a tornarem-se “fixas” no futuro. As mensagens “reservadas” destinam-se a um uso específico, porém o conteúdo delas ainda não foi definido ou proposto. (RTCM v.2.1, 1994 p.1-1, 4-1). Além disso, caso uma mensagem seja cancelada ela é rotulada como “retirada”.

O formato das mensagens RTCM foi estabelecido após a padronização das mensagens de dados dos satélites GPS, de modo que houvesse compatibilidade dos programas em uso, forte capacidade de detecção de erros e apoio ao uso de “pseudolites”² para a transmissão de dados. O tamanho e formato das palavras, o algoritmo de paridade e outras características são semelhantes, sendo a maior diferença entre as mensagens GPS e RTCM, o fato de as primeiras possuírem comprimento fixo de 300 bits (2.1.2) e as últimas, comprimento variável.

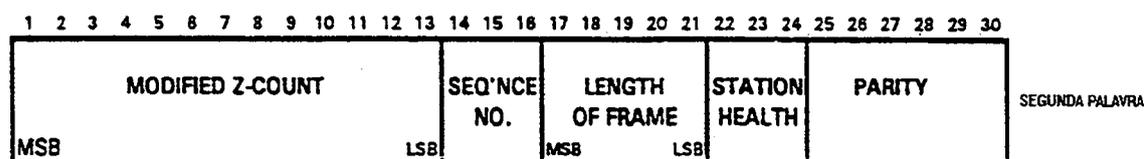
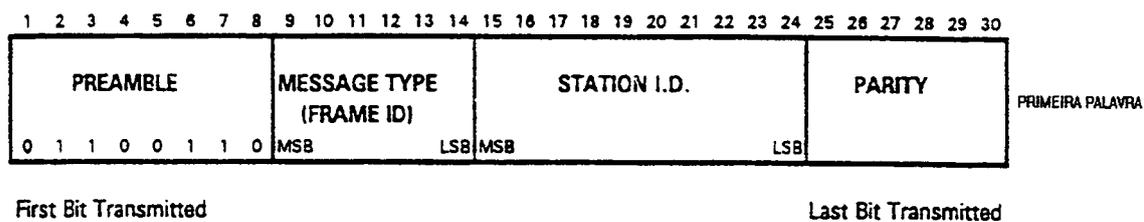
² Contração de *pseudo-satellite*. Consiste de uma implementação específica do posicionamento diferencial, na qual os enlaces de dados diferenciais usam a mesma modulação, codificação e frequência das mensagens GPS transmitidas pelos satélites (RTCM v. 2.1, 1994 p.3-12).

Uma taxa mínima de 50 bps é sugerida para a transmissão dos dados, sendo a principal razão disto a existência dos erros decorrentes da SA. Assim, caso a SA venha a ser desabilitada ou reduzida no futuro, a taxa de 50 bps também poderá ser reduzida. Por outro lado, as taxas de transferência dos dados ou de repetição de cada tipo de mensagem a serem adotadas podem ser tão elevadas quanto se desejar, sujeitas apenas às limitações impostas pelo enlace empregado (2.1.5.3.3). Não há nenhuma determinação para que as transmissões sejam contínuas, de forma que pode adotar-se transmissões intermitentes com taxas elevadas.

2.2.1 Formato das mensagens

Cada um dos tipos de mensagem (ou quadros ou *frame*) RTCM é formado por $(N+2)$ palavra de 30 bits cada, sendo N o número de palavras que contêm dados na mensagem, variando em função do tipo de mensagem e, conforme o caso, dentro do mesmo tipo. O tamanho de cada palavra (30 bits) e o algoritmo de paridade são idênticos aos das mensagens de navegação GPS. As duas primeiras palavras de cada mensagem constituem o seu cabeçalho (fig. 4), e contêm dados de mesma natureza para todos os tipos de mensagem: informação sobre a estação de referência, tempo de referência e informações necessárias à sincronização da mensagem pelo usuário.

FIGURA 4 - CABEÇALHO DAS MENSAGENS RTCM



Fonte : RTCM v 2.1, 1994

2.2.2 Tipos de mensagem

Dentre os 64 tipos possíveis de mensagens, 26 foram definidas pela RTCM SC - 104, através do documento “*RTCM Recommended Standard for Differential NAVSTAR GPS Service Verson 2.1*”, conforme apresentado na tabela 4.

TABELA 4 - TIPOS DE MENSAGEM RTCM

Tipo de mensagem	Condição atual	Título
1	Fixa	Correções diferenciais GPS
2	Fixa	Correções delta diferenciais GPS
3	Fixa	Parâmetros da estação de referência
4	Retirada	Levantamento
5	Tentativa	Saúde da constelação
6	Fixa	Mensagem nula
7	Fixa	Almanaque dos radiofaróis
8	Tentativa	Almanaque das estações pseudolite
9	Fixa	Correções diferenciais de um conjunto parcial de satélites
10	Reservada	Correções diferenciais para o código P
11	Reservada	Correções diferenciais (código C/A, L ₂)
12	Reservada	Parâmetros das estações pseudolite
13	Tentativa	Parâmetros estação de transmissora
14	Reservada	Mensagens auxiliares de levantamento
15	Reservada	Ionosfera e troposfera
16	Fixa	Mensagem especial
17	Tentativa	Almanaque das efemérides dos satélites
18	Tentativa	Medidas brutas de fase da portadora
19	Tentativa	Medidas brutas de pseudodistância
20	Tentativa	Correções RTK de fase da portadora
21	Tentativa	Correções RTK de pseudodistância
22 - 58	-	Indefinida
59	Tentativa	Mensagem do operador da estação
60 - 63	Reservada	Uso geral

Fonte : RTCM v. 2.1, 1994

A seguir estão descritos os principais tipos de mensagem :

Mensagem 1 : Correções Diferenciais GPS

É a principal mensagem do formato RTCM. Provê as correções de pseudodistância (PC) e as respectivas taxas de variações (RRC), relativas a um tempo t_0 de referência. De posse destas, qualquer usuário pode determinar as correções de pseudodistância relativas a um tempo t , para o qual ele efetuou suas medidas, conforme as equações (2.5) e (2.6). Para cada satélite observado são informados :

- UDRE - estimativa (1σ) da incerteza na correção de pseudodistância fornecida (PC);
- Número de identificação do satélite (PRN);
- PC - correção da pseudodistância;
- RRC - taxa de variação da correção da pseudodistância;
- IOD - indicador da época dos dados de navegação GPS.

O uso da RRC visa “estender a validade” da PC a qual vai perdendo sua consistência a medida que “envelhece”. Em função disto, esta mensagem deve ser transmitida e atualizada com a maior frequência possível.

A estação de referência não considera os efeitos da refração atmosférica para a geração das correções diferenciais, porém corrige os efeitos dos erros dos relógios dos satélites e relativísticos. Quanto ao erro do relógio da estação de referência, não se verificam erros de sincronismo com o tempo GPS maiores que 100 nanosegundo, mesmo quando se emprega relógios com osciladores de quartzo (mais simples e barato). Assim, se todas as correções diferenciais de uma mensagem fornecida por uma estação de referência possuírem uma mesma defasagem (da ordem de 100 ns) e desde que todas elas refiram-se a um mesmo instante, o erro posicional resultante é zero (RTCM v2.1, 1994 p. 3-7).

Mensagem 2 : Correções Delta Diferenciais GPS

É fornecida visando as situações em que a estação móvel ainda não conseguiu receber dados novos de navegação dos satélites GPS, porém a estação de referência já os está empregando nos seus cálculos diferenciais. Este fato pode resultar em erros de posição, de modo que sempre que tal situação ocorrer a mensagem 2 deve começar a ser transmitida juntamente com a mensagem 1. A estação móvel consegue detectar esta situação pela comparação do parâmetro IOD contido na mensagem 1 com o IOD contido na mensagem GPS.

Nestes casos, a PC sofre uma correção dada pela equação (2.8) (RTCM v.2.1, 1994 p. 4 - 12) :

$$PC(t) = [PC(\text{ novo IOD}) + \delta PC(\text{ velho IOD})] + [RRC(\text{ novo IOD}) \cdot (t - t_1)] + [\delta RRC(\text{ velho IOD}) \cdot (t - t_2)] \quad (2.8);$$

onde :

t : tempo da aplicação da correção PC;

t₁ : tempo fornecido pela mensagem 1;

t₂ : tempo fornecido pela mensagem 2.

Mensagem 3 : Parâmetros da estação de referência

Fornece as coordenadas cartesianas da antena da estação de referência, ao nível do centímetro, referidas ao *Datum* WGS 84. Caso seja empregado outro *datum*, é de responsabilidade da instituição provedora do serviço DGPS informá-lo ao usuário.

Mensagem 7 : Almanaque dos radiofaróis

Provê informações de coordenadas, frequência, alcance eficaz, saúde e número de identificação dos radiofaróis equipados para transmitir dados GPS diferenciais. Essas

informações permitem ao receptor da estação móvel selecionar automaticamente a melhor estação de referência a ser usada dentro de uma rede DGPS.

Mensagem 16: Mensagem Especial

É uma mensagem no formato ASCII de 8 *bits*, usada para transmitir informações de até 90 caracteres, a serem mostradas num monitor de um receptor ou computador ou numa impressora. No caso das ERDGPS brasileiras (6.1.3.1), esta mensagem tem sido empregada para transmitir o nome do radiofarol cujo sinal serve de portadora às correções diferenciais (p. ex: “RF SANTA MARTA”).

Mensagens 18 à 21: Mensagens RTK

Estas 4 mensagens provêem informações necessárias às aplicações do posicionamento cinemático em tempo real (RTK), usado no apoio à levantamentos e navegação, principalmente no âmbito marítimo, onde se requeira acurácias da ordem do decímetro. Seu uso, contudo, impõe a utilização de enlaces que operem nas faixas de frequência VHF/UHF.

2.3 Radiofaróis

Os radiofaróis compreendem o mais antigo sistema de radionavegação disponível no mundo. Constituem-se basicamente de estações transmissoras de sinais rádio especiais, em código Morse (CW), na faixa de 283,5 à 325 KHz, que permitem a determinação de sua direção a partir de uma estação móvel (navio ou aeronave). Eles são divididos em três tipos (DHN, 1992 p. 2-8):

- radiofaróis direcionais : transmitem sinais rádio dentro de um setor específico, destinando-se a fornecer um rumo de governo definido. São usados principalmente na navegação aérea.
- radiofaróis rotativos : transmitem um feixe direcional com movimento rotativo uniforme.
- radiofaróis circulares : também designados por “onidirecionais” ou “NDB” (*non-direction beacons*), transmitem sinais rádio com a mesma intensidade em todas as direções, permitindo a determinação de sua direção a partir de uma estação móvel pelo uso de um receptor especial denominado radiogoniômetro. Este é o tipo mais comum de radiofarol existente no mundo e a ele pertencem todos os radiofaróis marítimos existentes no Brasil.

A finalidade precípua dos radiofaróis é apoiar o posicionamento radiogoniométrico. Porém, hoje em dia, este é o menos preciso e utilizado dentre todos os sistemas de radionavegação disponíveis, de forma que havia uma tendência mundial para a desativação progressiva dos mesmos. Contudo, o advento do posicionamento DGPS reverteu este quadro, posto que os radiofaróis passaram a figurar como um dos mais atraentes enlaces de dados diferenciais por apresentarem diversas vantagens (2.1.5.3.3).

Atualmente existem em operação ao longo do litoral brasileiro 15 radiofaróis marítimos, os quais são administrados pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) por intermédio do Centro de Sinalização Náutica e Reparos Alte. Moraes Rego (CAMR) e dos diversos Serviços de Sinalização Náutica (SSN) existentes. A DHN apresenta em sua publicação “Lista de Auxílios-Rádio” (DHN, 1992) uma listagem completa de todos os radiofaróis marítimos e dos radiofaróis aeronáuticos localizados próximo à costa. Para cada

um deles são apresentados dados característicos, tais como alcance, frequência, código, coordenadas.

2.3.1 Estações de Referência DGPS (ERDGPS)

A exemplo do que está sendo ou já foi feito por diversos países como EUA, Canadá, Alemanha, Noruega, Suécia, Finlândia, Dinamarca, Austrália e Reino Unido, a Marinha do Brasil, através da DHN, vem implantando ao longo do litoral brasileiro várias estações de referência DGPS designadas genericamente pela sigla ERDGPS. Quando completa, a rede formada pelas ERDGPS irá propiciar uma cobertura quase contínua de nossas águas jurisdicionais até distâncias superiores a 200 milhas náuticas (\cong 370 km) da costa (MIGUENS, 1995 p.101), tendo por objetivo principal o apoio à navegação marítima. Outras atividades porém, tais como levantamentos hidroceonográficos e serviços de sinalização náutica, também têm tirado proveito destas estações para fins de posicionamento. Elas estão instaladas nas proximidades de alguns radiofaróis de forma a servirem-se dos sinais destes como enlaces dos dados diferenciais, bem como de toda a infra-estrutura existente. Até o momento já foram instaladas 10 ERDGPS cujos nomes de identificação são os mesmos atribuídos aos radiofaróis que lhes servem de apoio. Na tabela 5 são apresentadas as principais características de cada uma delas, com base em dados apresentados por MIGUENS (1995) e DHN (DH8, 1992) e a figura 5 apresenta graficamente a cobertura da área marítima resultante.

TABELA 5 - ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA DGPS (ERDGPS) BRASILEIRAS.

Nome	Código	Coordenadas da antena DGPS	Transmissor (tipo/potência/fab.)	Frequência (khz)	Alcance (milhas)	Mensagens RTCM	Transmissão (bps)
Canivete	0463	00° 30' 31,606" S 050° 24' 50,127" W	NDB-1000B/1Kw/ Tecnasa	310	200	1,2,3,6 e 16	100
São Marcos	0460	02° 29,337' S 044° 18,086' W	NDB-1000A/1Kw/ Tecnasa	300	200	1,2,3,6 e 16	100
Calcanhar	0467	05° 09' 36,813" S 035° 29' 15,171" W	NDB-200B/200W Tecnasa	305	300	1,2,3,5,6, 15 e 16	100
Sergipe	0468	10° 38' 10,669" S 037° 02' 11,101" W	NDB-200B/200W Tecnasa	320	300	*	100
Abrolhos	0461	17° 57' 53,034" S 038° 41' 38,201" W	NDB-200A/200W Tecnasa	290	300	1,2,3,6 e 16	100
São Tomé	0465	22° 02' 30,894" S 041° 03' 09,453" W	NDB-200B/200W Tecnasa	300	300	1,2,3,5,6, 15 e 16	100
Rasa	0469	23° 03' 48,384" S 043° 08' 45,050" W	NDB-200B/200W Tecnasa	315	300	*	100
Moela	0462	24° 02' 51,587" S 046° 15' 48,208" W	NDB-200B/200W Tecnasa	305	300	1,2,3,5,6, 15 e 16	100
Santa Marta	0466	28° 36' 16,154" S 048° 48' 50,071" W	NDB-200A/200W Tecnasa	310	300	1,2,3,5,6, 15 e 16	100
Rio Grande	0464	32° 08' 55,257" S 052° 06' 11,848" W	NDB-200A/200W Tecnasa	290	300	1,2,3,5,6, 15 e 16	100

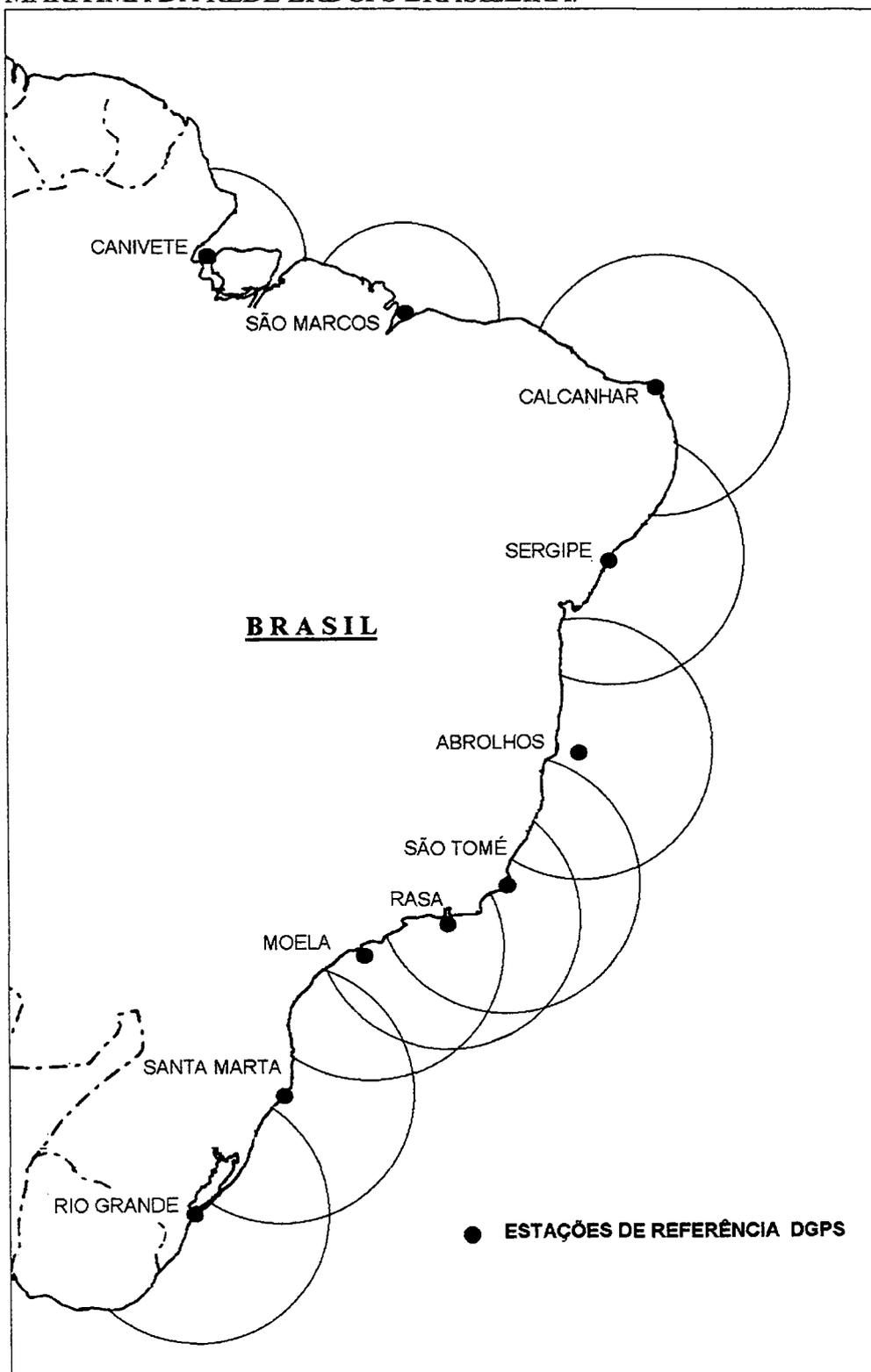
Notas: a) As coordenadas apresentadas estão sujeitas a modificações, pois o CAMR está realizando novos rastreios das ERDGPS, de modo a garantir uma maior acurácia de posicionamento;

b) Todas as coordenadas estão referidas ao Datum WGS – 84, exceto as da estação São Marcos que referem-se ao Datum Córrego Alegre;

c) * Dados ainda não disponíveis; e

d) Todas as estações estão equipadas com receptores Trimble 4000 MSK, os quais operam apenas com a portadora L₁.

FIGURA 5 - APRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA COBERTURA MARÍTIMA DA REDE ERDGPS BRASILEIRA.



2.4 Requisitos de acurácia

2.4.1 Navegação marítima

Tradicionalmente, a navegação marítima é dividida em 3 tipos ou categorias primárias, conforme a distância a que se navega da costa ou perigo mais próximo (MIGUENS, 1996 p.3):

Navegação oceânica : é a navegação praticada em alto-mar, normalmente a mais de 50 milhas da costa ou perigo mais próximo;

Navegação costeira : é a navegação praticada nas regiões situadas entre 3 e 50 milhas da costa ou perigo mais próximo; e

Navegação em águas restritas : é a navegação praticada a menos de 3 milhas da costa ou perigo mais próximo, bem como em portos e seus canais de acesso e em águas interiores (rios, lagoas, baías, etc) ou em quaisquer outras situações em que haja limitações para a manobra do navio.

Em função do tipo de navegação praticada impõe-se diferentes requisitos de acurácia e de frequência do posicionamento dos navios, conforme sumarizado na tabela 6. Os valores apresentados poderão variar de acordo com cada situação.

TABELA 6 - REQUISITOS DE ACURÁCIA DE POSICIONAMENTO PARA NAVEGAÇÃO MARÍTIMA.

Requisito	Tipos de navegação		
	Águas restritas	Costeira	Oceânica
Acurácia	< 0,05 milhas (90 m)	0,1 milhas (185 m)	1 -2 milhas (1,8 - 3,7 Km)
Frequência	cada 3 minutos	10 à 30 minutos	3 vezes por dia (mínimo)

Fonte: Miguens, 1995.

As organizações internacionais que tratam da segurança da navegação marítima, IMO (*International Maritime Organization*) e IALA (*International Association of Lighthouse Authorities*), recomendam que os sistemas eletrônico de posicionamento (p. ex: GPS, Radar, Omega, etc) para navegação em portos e de aproximação dos mesmos, tenham uma precisão da ordem de 8 à 20 m (95% de probabilidade) (MIGUENS,1996 p.3).

Vê-se então que o uso do GPS no método de posicionamento absoluto com código C/A (SPS) (2.1.5.1) atende totalmente os requisitos para as navegações oceânica e costeira, porém não atende às recomendações da IALA e da IMO, necessitando neste caso do emprego do método DGPS, cujas acurácias típicas (tabela 3, p. 28) satisfazem plenamente às referidas recomendações.

2.4.2 Levantamentos hidrográficos

A IHO (*International Hydrographic Organization*), através de sua Publicação Especial Nº 44, 4ª edição (IHO S44, 1997), estabelece diversas normas e requisitos técnicos a serem observados para a realização de levantamentos hidrográficos, envolvendo a classificação dos levantamentos, o posicionamento, as medições de diversas grandezas (maré, profundidade, etc) e os respectivos controles de qualidade.

Dentro do escopo deste trabalho, é interessante apresentar de modo breve a classificação e os requisitos de acurácia de posicionamento relativos aos levantamentos hidrográficos.

Os Levantamentos Hidrográficos foram classificados em quatro “ordens”, de modo a acomodar, de maneira sistemática, diversos requisitos de acurácia das medições realizadas nas áreas a serem levantadas. Resumidamente, tem-se:

Ordem Especial : destina-se a levantamentos efetuados em áreas críticas específicas, nas quais a profundidade abaixo da quilha do navio seja mínima e as características geomorfológicas do fundo sejam potencialmente perigosas aos navios. Como exemplos destas áreas tem-se os portos, ancoradouros e canais de difícil navegação.

Ordem 1 : levantamentos efetuados ao longo de rotas recomendadas, canais de navegação em águas interiores, áreas costeiras com alta densidade de tráfego marítimo e em portos e seus canais de acesso onde a profundidade abaixo da quilha e as características geomorfológicas do fundo sejam menos críticas que as da Ordem Especial. Os levantamentos da Ordem 1 devem ser limitados às áreas com profundidades inferiores a 100 m.

Ordem 2 : levantamentos efetuados em áreas com profundidades inferiores a 200 m, não enquadradas nas ordens anteriores e onde as características batimétricas gerais assegurem

não haver obstruções submarinas que venham a representar perigo às embarcações que tipicamente transitam ou operam na área.

Ordem 3 : levantamentos efetuados em áreas não enquadradas nas ordens anteriores.

Coerentemente com a ordem do levantamento e com o tipo de entidade a ser levantada, a IHO estabeleceu os requisitos de acurácia, para um nível de 95% de probabilidade, apresentados na tabela 7.

TABELA 7 - REQUISITOS DE ACURÁCIA DE POSICIONAMENTO PARA LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS

ENTIDADES	ORDEM DO LEVANTAMENTO			
	ESPECIAL	1	2	3
a) Sondagens, perigos à navegação e quaisquer obstruções submarinas	2 m	5 m + 5% da profundidade	20 m + 5% da profundidade	150 m + 5% da profundidade
b) Auxílios à navegação fixos e pontos notáveis à navegação	2 m	2 m	5 m	5 m
c) Posição média de auxílios à navegação flutuantes	10 m	10 m	20 m	20 m
d) Linha de costa natural e feições topográficas	10 m	20 m	20 m	20 m

(Fonte : IHO, 1997)

Com base na tabela 7, o posicionamento DGPS atende satisfatoriamente aos requisitos de acurácia estabelecidos para o posicionamento em Levantamentos Hidrográficos, exceto quanto ao posicionamento das entidades b), nos levantamentos de Ordem Especial e Ordem 1, e das entidades a), nos levantamentos de Ordem Especial. Nestes casos, as acurácias requeridas geralmente serão atendidas pelo posicionamento RTK.

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

3.1 METODOLOGIA

Para viabilizar o cumprimento do objetivo geral do trabalho, qual seja, a análise da qualidade do posicionamento DGPS baseado nas ERDGPS, optou-se pela realização de uma coleta simultânea de dados a partir de receptores instalados a bordo de um navio. Foram instalados 2 receptores GPS geodésicos, que armazenaram dados brutos, e um receptor GPS de navegação, ajustado para fornecer dados DGPS em tempo real. Os dados foram coletados ao longo de 2 rotas marítimas percorridas pelo navio. Os dados brutos, após serem processados adequadamente empregado-se 2 estações da RBMC (PARA e UEPP) como estações-base, foram tomados como dados de referência, tendo sido utilizados para a geração de trajetórias “padrão”. Por seu turno, os dados DGPS, que tiveram a ERDGPS Moela como estação de referência, foram utilizados na geração de trajetórias “teste”. As trajetórias “padrão” puderam ser tomadas como referência, em face de as técnicas de processamento empregadas lhes conferirem maior qualidade posicional, comparativamente à das trajetórias “teste”. Comparando-se as trajetórias “teste” com as “padrão”, foi possível determinar o erro do posicionamento DGPS e seu comportamento em função da distância à ERDGPS (correlação espacial). Para que tal comparação tivesse consistência, as trajetórias tinham que estar referidas a um mesmo sistema geodésico de referência, ou a sistemas cujas diferenças fossem negligenciáveis dentro dos níveis de acurácia envolvidos no estudo em questão. Por terem sido processadas a partir de estações RBMC, as trajetórias “padrão” estão referidas ao SIRGAS. Por outro lado, estando a ERDGPS Moela referida ao Sistema WGS-84, a ele

estão referidas as trajetórias “teste”. Em termos práticos, tais sistemas podem ser considerados como coincidentes. Contudo, para certificar-se que suas coordenadas não continham erros grosseiros que pudessem vir a afetar os resultados do trabalho, realizou-se um rastreo estático na ERDGPS Moela.

Aproveitando-se também a grande massa de dados DGPS coletados, fez-se também a análise do comportamento da “latência” das correções DGPS e da variação do posicionamento altimétrico DGPS.

O desenvolvimento do trabalho foi subdividido em 4 Fases, a saber:

Fase I - Rastreo na ERDGPS Moela

Fase II - Coleta dos dados ao longo das trajetórias marítimas

Fase III - Processamento dos dados

Fase IV – Análise dos resultados

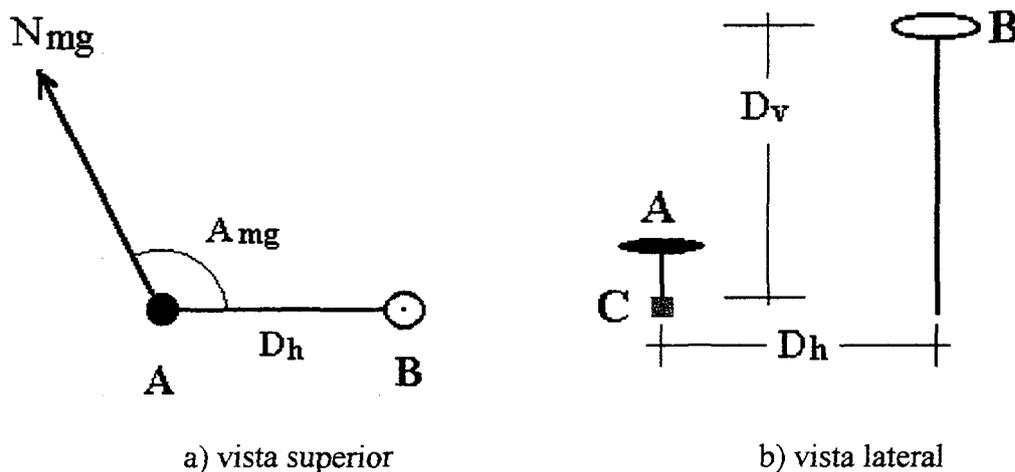
3.2 FASE I - RASTREIO NA ERDGPS MOELA

A ERDGPS Moela foi escolhida como estação de referência para a realização da trajetória “teste”, a qual foi comparada com a trajetória “padrão”. Para que esta comparação tivesse consistência, ambas as trajetórias tinham que estar referidas a um mesmo sistema de referência, pois, caso contrário, poderia haver a presença de erro sistemático que interferiria na acurácia dos valores obtidos. Decidiu-se, então, pela realização de um rastreo GPS (Estático Clássico) de forma a determinar-se as coordenadas da ERDGPS Moela, tendo por estações-base 2 estações da RBMC, as quais pertencem ao arcabouço SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul).

O rastreo deu-se no dia 26/maio/1998 (dia 146 do ano) no período das 10:20 h às 16:25 h (fuso P), num total de 365 minutos, com um intervalo de gravação de 15 s, empregando-se um receptor GPS geodésico marca Ashtech Z-XII.

A ERDGPS Moela é materializada por um marco-testemunho padrão da DHN com número de inscrição 81069. Infelizmente, dada a impossibilidade de instalar-se a antena de rastreo sobre o marco-testemunho, fez-se necessária a realização do rastreo de um ponto excêntrico, situado a uma distância horizontal $D_h=95$ cm, com azimute magnético $A_{mg}=110^\circ$ e a uma distância vertical $D_v=115$ cm acima deste (fig 6). Tal impossibilidade decorreu do fato de que a instalação da antena de rastreo sobre o marco necessitaria de autorização prévia da DHN, pois implicaria a obstrução temporária da antena diferencial da estação e, conseqüentemente, prejuízo do serviço de posicionamento DGPS provido pela mesma.

FIGURA 6 - ESQUEMA DO RASTREIO DA ERDGPS MOELA



Nota : D_v : excentricidade vertical (115 cm) ;
 A_{mg} : azimute magnético (110°);
 B : antena de rastreo do receptor Ashtech Z-XII;
 N_{mg} : norte magnético.

D_h : excentricidade horizontal (95 cm);
 A : antena diferencial da ERDGPS Moela;
 C : marco-testemunho 81069;

As excentricidades foram medidas empregando-se uma régua milimetrada de precisão, um nível de bolha e uma bússola. De acordo com DHN (1990), a declinação magnética na região em questão é de 19° W para o ano de 1990 e a variação anual é de $7'$ W, o que propagado para 1998, leva a uma declinação de $19^{\circ} 56'$ W ou, aproximadamente, 20° W. Assim, tem-se que o azimute verdadeiro (A_v) do ponto excêntrico é 90° .

Com vistas à análise da precisão das coordenadas e em função das resoluções dos instrumentos empregados, foram adotados os seguintes valores para estimativa das incertezas das grandezas medidas:

$$A_v = 90^{\circ} \quad \Rightarrow \quad \sigma_{A_v} = 5^{\circ};$$

$$D_h = 95 \text{ cm} \quad \Rightarrow \quad \sigma_{D_h} = 1 \text{ cm};$$

$$D_v = 115 \text{ cm} \quad \Rightarrow \quad \sigma_{D_v} = 1,5 \text{ cm}.$$

3.2.1 Processamento dos dados de rastreamento

Os dados de rastreamento foram pós-processados no LAGE (Laboratório de Geodésia Espacial) da Universidade Federal do Paraná, utilizando-se o programa científico *BERNESE Version 4.0*. Para o processamento foram empregadas as órbitas precisas dos satélites GPS, obtidas via Internet junto ao IGS (*International GPS Geodynamics Service*) e como estações-base as Estações PARA e VICO da RBMC, cujas coordenadas (SIRGAS) são:

$$\begin{aligned} \text{PARA :} \quad \varphi &= 25^{\circ} 26' 54'',129127 \text{ S}; \\ \lambda &= 049^{\circ} 13' 51'',436838 \text{ W}; \\ h \text{ (elipsoidal)} &= 925,7591 \text{ m}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{VICO : } \quad \varphi &= 20^{\circ} 45' 41'',404258 \text{ S ;} \\ \lambda &= 042^{\circ} 52' 11'',960856 \text{ W ;} \\ h \text{ (elipsoidal)} &= 665,9619 \text{ m.} \end{aligned}$$

Conforme listagens do programa (ver Anexo 1) as coordenadas do ponto rastreado (excêntrico) e os respectivos erros médios quadráticos são:

$$\begin{aligned} \varphi &= 24^{\circ} 02' 51'',571959 \text{ S (+/- 0,5 mm) ;} \\ \lambda &= 046^{\circ} 15' 48'',178542 \text{ W (+/- 1,2 mm);} \\ h \text{ (elipsoidal)} &= 38,8917 \text{ m (+/- 1,3 mm).} \\ X &= 4.029.039,7097 \text{ m (+/- 1,4 mm);} \\ Y &= -4.210.758,2882 \text{ m (+/- 1,1 mm);} \\ Z &= -2.583.120,6442 \text{ m (+/- 0,5 mm)} \end{aligned}$$

3.2.2 Redução das excentricidades

Para a determinação das coordenadas da ERDGPS Moela, ou seja, do marco-testemunho 81069, fez-se necessária a redução das excentricidades do ponto de rastreo.

Com base nos parâmetros indicados anteriormente (ver 3.2), tem-se que a redução das excentricidades consiste na correção de um arco de longitude equivalente a 95 cm, ao longo do azimute verdadeiro 270° (contado do norte) e de -115 cm na altitude .

A equação para o cálculo do comprimento de um arco infinitesimal (ds) sobre o elipsóide é dado por (RICHARDUS, 1972 p.41):

$$ds^2 = M^2 \cdot d\varphi^2 + N^2 \cdot \cos^2 \varphi \cdot d\lambda^2 , \quad (3.1)$$

onde :

ds - arco de deslocamento infinitesimal;

M - raio de curvatura meridiana (pequena normal);

N - raio de curvatura do 1º vertical (grande normal);

φ - latitude local;

$d\varphi$ - arco de deslocamento infinitesimal em latitude (radianos);

$d\lambda$ - arco de deslocamento infinitesimal em longitude (radianos);

Adotando-se $\varphi = 24^{\circ} 02' 52''$ e como superfície de referência o Elipsóide GRS80 ($a = 6.378.137$ m, $f^{-1} = 298,257222101$) (MORITZ, 1980), vem:

$$M = 6.346.018,0629 \text{ m; e}$$

$$N = 6.381.685,0363 \text{ m.}$$

Assim, inserindo-se os valores de M , N , $d\varphi = 0$ e $d\lambda = 1''$ ($4,8414 \cdot 10^{-6}$ rad) na equação (3.1), chega-se ao comprimento (ds) de um arco de $1''$ de longitude igual a 28,254 m.

Logo, um arco de 95 cm de longitude equivale, em segundos, a:

$$\begin{array}{l} 28,254 \text{ m} \text{ ----- } 1'' \\ 0,95 \text{ m} \text{ ----- } x \end{array} \quad \therefore \quad x = 0'',0336.$$

Com isto, reduzindo-se a excentricidade horizontal, através de uma correção de $0'',0336$ para oeste, e a vertical, por uma correção de $-1,15$ m, chega-se às coordenadas finais (SIRGAS) da ERDGPS Moela:

$$\varphi = 24^{\circ} 02' 51'',571959 \text{ S ;}$$

$$\lambda = 046^{\circ} 15' 48'',212166 \text{ W ;}$$

$$h \text{ (elipsoidal)} = 37,7417 \text{ m.}$$

As coordenadas inseridas, à época do rastreamento, no receptor da ERDGPS Moela, referidas ao WGS-84, eram:

$$\varphi = 24^{\circ} 02' 51'',57246 \text{ S ;}$$

$$\lambda = 046^{\circ} 15' 48'',19403 \text{ W ;}$$

$$h \text{ (elipsoidal)} = 25,163 \text{ m.}$$

Comparando-se as coordenadas obtidas no rastreamento com as efetivamente utilizadas, constata-se discrepâncias de $0'',0005$ (1,5 cm) em latitude, $0'',018136$ (51,2 cm) em longitude

e 12,578 m em altitude. Tais discrepâncias não poderiam ser atribuídas ao fato de as coordenadas estarem referidas a diferentes sistemas de referência (WGS-84 e SIRGAS), posto que, em termos práticos, estes podem ser considerados como coincidentes. Após verificação junto à DHN, constatou-se que a discrepância em altitude devia-se a erro grosseiro ocorrido no processamento realizado pela Marinha, o qual está para ser retificado³. Entretanto, as discrepâncias planimétricas verificadas podem ser consideradas desprezíveis dentro do escopo deste trabalho, posto que o posicionamento DGPS na melhor das hipóteses oferece precisão pior que o metro. Quanto à discrepância em altitude, não obstante ser significativa, pode da mesma forma ser desconsiderada, tendo em vista o fato de a análise do posicionamento DGPS altimétrico a ser realizada poder prescindir por erros de caráter sistemáticos.

3.2.3 Precisão das coordenadas finais

As incertezas dos valores das coordenadas finais da ERDGPS Moela são uma conjugação das incertezas decorrentes do processamento do rastreamento, fornecidas pelo programa empregado (ver Anexo 1), com as incertezas decorrentes do processo de redução das excentricidades.

Baseando-se na figura 6 pode-se escrever as seguintes equações:

$$f_1 : \Delta\varphi = Dh \cdot \cos Av ; \quad (3.2)$$

$$f_2 : \Delta\lambda = Dh \cdot \sin Av . \quad (3.3)$$

³ Posteriormente a Marinha efetuou rastreamento da ERDGPS Moela obtendo novas coordenadas: altitude elipsoidal de 37,814m e coordenadas planas conforme apresentado na tabela 5 (p. 39).

Partindo-se da equação da “lei de propagação das covariâncias” para um modelo não linear (GEMAEL, 1994 p.44 - 45):

$$\sum Y = D \cdot \sum X \cdot D^T, \quad (3.4)$$

onde:

$$a) D = \frac{\partial F}{\partial Dh \partial Av} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial Dh} & \frac{\partial f_1}{\partial Av} \\ \frac{\partial f_2}{\partial Dh} & \frac{\partial f_2}{\partial Av} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos Av & -Dh \cdot \text{sen Av} \\ \text{sen Av} & Dh \cdot \cos Av \end{bmatrix}$$

com $Av = 90^0$ e $Dh = 95 \text{ cm}$:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & -95 \text{ cm} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$b) \sum X = \begin{bmatrix} \sigma_{Dh}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{Av}^2 \end{bmatrix};$$

Adotando-se as estimativas de variâncias $\sigma_{Dh} = 1 \text{ cm}$ e $\sigma_{Av} = 5^0$, citadas em 3.2, vem:

$$\sigma_{Dh}^2 = 1 \text{ cm}^2;$$

$$\sigma_{Av}^2 = (5^0)^2 = 0,007615435 \text{ rad}^2, \text{ daí:}$$

$$\sum X = \begin{bmatrix} 1 \text{ cm}^2 & 0 \\ 0 & 0,007615435 \text{ rad}^2 \end{bmatrix};$$

Logo:

$$\sum Y = \begin{bmatrix} 68,7293 \text{ cm}^2 & 0 \\ 0 & 1 \text{ cm}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta\varphi}^2 & \sigma_{\Delta\varphi \Delta\lambda} \\ \sigma_{\Delta\lambda \Delta\varphi} & \sigma_{\Delta\lambda}^2 \end{bmatrix}$$

Então:

$$\sigma_{\Delta\varphi} = 8,29 \text{ cm} \text{ e } \sigma_{\Delta\lambda} = 1 \text{ cm}.$$

A incerteza decorrente da redução da excentricidade vertical (Dv) vem diretamente da variância estimada para a medição feita (ver 3.2), ou seja, $\sigma_{Dv} = 1,5$ cm.

Compondo-se estes valores com os resultantes do processamento do rastreo (ver 3.2.1), chega-se aos seguintes valores estimativos da precisão das coordenadas finais da ERDGPS Moela:

$$\sigma_{\varphi} = 8,29 \text{ cm} + 0,05 \text{ cm} = 8,34 \text{ cm};$$

$$\sigma_{\lambda} = 1 \text{ cm} + 0,12 \text{ cm} = 1,12 \text{ cm}; \text{ e}$$

$$\sigma_h = 1,5 \text{ cm} + 0,13 \text{ cm} = 1,63 \text{ cm}.$$

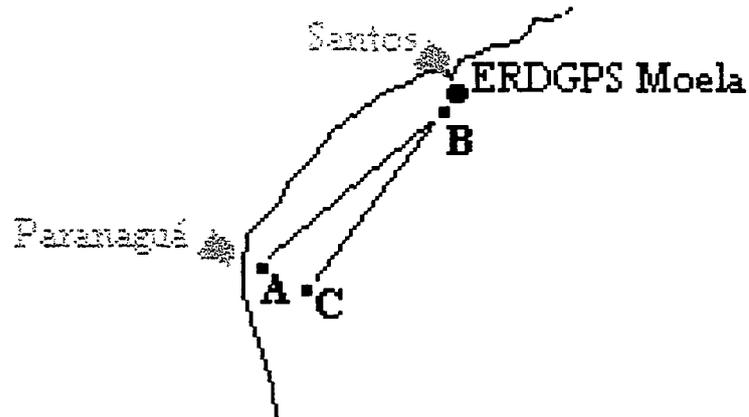
3.3 Fase II – COLETA DOS DADOS AO LONGO DAS ROTAS MARÍTIMAS

Durante os dias 12 e 13/nov/98, com o apoio do Navio Balizador Amorim do Valle, da Marinha do Brasil, foi realizada a coleta de dados de posição para a geração das trajetórias “padrão” e “teste”. O propósito da determinação destas trajetórias foi possibilitar a análise da qualidade do posicionamento DGPS, com vista principalmente à determinação de sua correlação espacial.

Os dados foram coletados continuamente ao longo de duas rotas percorridas pelo navio, com extensão aproximada de 150 milhas náuticas (\cong 280 km). A rota 1 (ida) teve início às 00:45 h do dia 12/nov em frente ao Porto de Paranaguá, com o navio demandando o Canal da Galheta. A partir das 03:30 h (ponto A, fig. 7), já em mar aberto, navegou-se no rumo base 049° (azimute verdadeiro), demandando a ERDGPS Moela, situada na Ilha de mesmo nome em frente à Cidade de Santos (SP). Por volta das 21:15 h do mesmo dia, estando o navio nas proximidades de Moela (\pm 3 km) (ponto B, fig. 7), encerrou-se a rota de ida, iniciando-se na seqüência a rota 2 (volta). Esta constou basicamente do percurso inverso, retornando o navio em direção à Paranaguá com o rumo base 227° , chegando às proximidades do Canal da Galheta em torno das 11:40 h do dia 13/nov (ponto C, fig. 7), navegando em seguida em direção ao Porto de Paranaguá. Às 16:40 h deste mesmo dia, com o navio fundeado em frente ao Porto de Paranaguá, encerrou-se a rota 2 (volta).

A representação esquemática das rotas, feita na fig.7, ateuve-se apenas à parte percorrida pelo navio em mar aberto, não entrando no detalhamento dos trechos referentes às entradas e saídas pela Baía de Paranaguá.

FIGURA 7 - ROTAS PERCORRIDAS PELO NAVIO

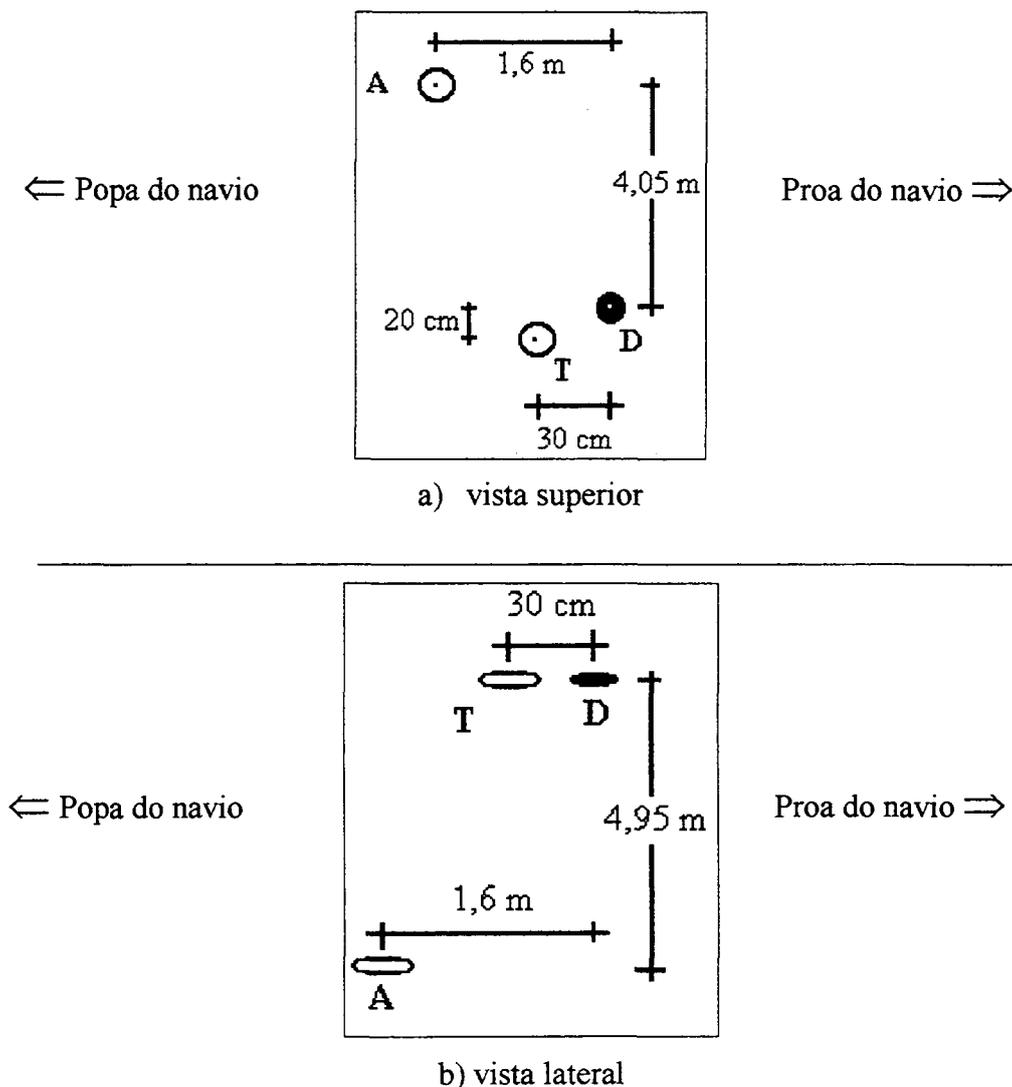


AB : rota 1 (rumo base 049°)
BC : rota 2 (rumo base 227°)

3.3.1 Arranjo das antenas a bordo

Visando minimizar a presença de erros sistemáticos decorrentes de excentricidade das antenas geradoras das trajetórias “padrão” (antenas dos receptores GPS geodésicos *Trimble 4000SSE* e *Ashtech Z-XII*) em relação à antena geradora da trajetória “teste” (antena do receptor GPS de navegação *Trimble NT200D*), procurou-se instalá-las o mais próximo possível entre si e medir-se acuradamente os valores das excentricidades. Contudo, devido a falta de cabeção com comprimento suficiente, a antena do receptor *Ashtech* teve que ser instalada relativamente afastada das demais, conforme apresentado esquematicamente na figura 8.

FIGURA 8 - ARRANJO DAS ANTENAS GPS INSTALADAS A BORDO



- Notas :
- a) A : antena do receptor geodésico, Ashtech Z-XII (trajetórias “padrão”);
 - b) T : antena do receptor geodésico, Trimble 4000SSE (trajetórias “padrão”);
 - c) D : antena do receptor DGPS de navegação, Trimble NT200D (trajetórias “teste”).

Tendo em vista que a resolução do receptor NT200D é de 0',0001 (aproximadamente 17 cm) e que a acurácia posicional DGPS é pior que 1 metro, a antena geodésica T (*Trimble*) pôde ser considerada, sem grandes problemas, como “coincidente” com a antena de navegação D. O mesmo não ocorre, contudo, com a antena geodésica A (*Ashtech*), cujas posições tiveram que sofrer correções para a redução das excentricidades.

3.3.2 Dados das trajetórias “teste”

O receptor GPS de navegação (Trimble NT200D), que tem capacidade de realizar posicionamento DGPS em tempo real a partir de correções diferenciais transmitidas pelos radiofaróis, foi empregado na coleta dos dados DGPS a serem usados para a definição das trajetórias “teste”. Ele foi ajustado para fornecer posições a cada segundo com base nas correções diferenciais da ERDGPS Moela, transmitidas na frequência de 315 kHz, e para que, em caso de perda das mesmas, nenhum dado de posição fosse fornecido. Esta estação de referência é equipada com um receptor Trimble 4000MSK, que faz medidas do código C/A e portadora L1 e transmite mensagens RTCM (v. 2.0) do tipo 1,2,3,5,6,15 e 16.

Os dados DGPS foram descarregados, em tempo real, em um computador *notebook*, constando de arquivos “texto” contendo as sentenças GGA e VTG estabelecidas pelo padrão NMEA 0183 (v.2.0). Este é um padrão de interface estabelecido pela *National Marine Electronics Association* (NMEA) destinado a viabilizar a comunicação de dados entre equipamentos eletrônicos marítimos de marcas diferentes. O NMEA 0183 é um padrão bastante abrangente que define tanto a interface de comunicação quanto o formato dos dados transmitidos (TRIMBLE, 1994 p.B-1)⁴.

A mensagem GGA traz as seguintes informações relativas ao posicionamento GPS:

- a) tempo de referência (UTC) da posição;
- b) latitude e longitude (graus, minutos e décimos ou milésimos de minuto);
- c) tipo de posição (0 = sem posição; 1 = absoluta ; 2 = DGPS);
- d) número de satélites utilizados;

⁴ Para maiores informações o leitor pode consultar TRIMBLE (1994).

- e) HDOP;
- f) altitude elipsoidal;
- g) ondulação geoidal;
- h) idade das correções diferenciais; e
- i) identificação da estação de referência DGPS em uso.

A mensagem VTG contém as seguintes informações de rumo e velocidade:

- a) rumo verdadeiro;
- b) rumo magnético;
- c) velocidade no fundo (nós); e
- d) velocidade no fundo (km/h).

3.3.3 Dados das trajetórias “padrão”

Visando a determinação das trajetórias a serem tomadas como “padrão”, foram instalados a bordo do navio 2 receptores GPS geodésicos (1 Trimble 4000SSE e 1 Ashtech Z-XII) com capacidade de efetuar medidas de fase dos códigos C/A e P e das portadoras L1 e L2. Estes receptores coletaram dados "brutos"GPS a uma taxa de 15 s, posto que esta é a taxa de gravação adotada pelas estações PARA e UEPP da RBMC, com base nas quais o pós-processamento destes dados foi realizado. Devido a indisponibilidade de mais computadores que pudessem ser dedicados exclusivamente ao armazenamento de dados, estes não puderam ser descarregados em tempo real. Optou-se então por deixar os receptores armazenando-os internamente, até que se esgotasse a capacidade de suas memórias, quando então eram desligados e levados para descarga manual em um computador. Após isto, eram reinstalados para realizar nova coleta de dados.

3.4 FASE III – PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados brutos GPS coletados foram classificados em *trimble* (os coletados pelo receptor *Trimble 4000SSE*) e *ashtech* (os coletados pelo receptor *Ashtech Z-XII*). Analogamente, as respectivas trajetórias decorrentes foram denominados de trajetórias *trimble* e *ashtech*. Por sua vez, os dados de posição *DGPS* (coletados pelo receptor *Trimble NT200D*) deram origem às trajetórias *DGPS*.

O processamento dos dados brutos foi realizado no Laboratório de Geodésia Espacial (UFPR) com o programa de processamento GPS GEONAP-K (científico), usando-se efemérides IGS (precisas) e tendo como estações-base as estações PARA (Curitiba) e UEPP (Presidente Prudente) pertencentes à RBMC. Foram utilizados dois tipos de soluções fornecidas pelo programa -“absoluta” e “flutuante”. A solução designada por “absoluta” equivale a um posicionamento DGPS pós-processado, no qual as posições brutas são corrigidas por correções geradas pela estação-base. A solução “flutuante” consiste em um posicionamento relativo baseado em observações de fase das portadoras, sem fixação das ambigüidades. O motivo de não se ter optado por soluções com fixação de ambigüidades, foi que, os parâmetros de qualidade, fornecidos pelo próprio programa, indicaram que tais soluções não apresentavam boa qualidade. Isto talvez seja decorrente do grande afastamento em relação às estações-base, associado ao grande número de perdas de sinal (*cycle slips*) ocorridas durante o levantamento.

Devido a problemas ocorridos durante a descarga dos dados, houve perda de quase todos os dados *trimble* relativos à rota 2 (volta), de modo que estes dados, assim como a decorrente trajetória *trimble*, referem-se apenas à rota 1 (ida). Os processamentos foram feitos de forma independente para cada uma das estações-base, tendo-se então gerado ao todo 12

tipos de trajetórias, 6 a partir da estação PARA e 6 a partir da estação UEPP. Elas foram classificadas em função das estações-base (PARA ou UEPP), dos dados de origem (*trimble* ou *ashtech*), tipo de solução (absoluta ou flutuante) e do sentido da trajetória (ida ou volta), resultando nas seguintes trajetórias:

a) Em relação à Estação PARA:

- a.1) Dados *trimble* : Trajetória *trimble* absoluta (ida);
Trajetória *trimble* flutuante (ida);
- a.2) Dados *ashtech* : Trajetória *ashtech* absoluta (ida);
Trajetória *ashtech* flutuante (ida);
Trajetória *ashtech* absoluta (volta);
Trajetória *ashtech* flutuante (volta).

b) Em relação à Estação UEPP:

- b.1) Dados *trimble* : Trajetória *trimble* absoluta (ida);
Trajetória *trimble* flutuante (ida);
- b.2) Dados *ashtech* : Trajetória *ashtech* absoluta (ida);
Trajetória *ashtech* flutuante (ida);
Trajetória *ashtech* absoluta (volta);
Trajetória *ashtech* flutuante (volta).

Como cada uma destas 12 trajetórias foi usada como um padrão de referência na avaliação da qualidade das posições DGPS, elas representam as trajetórias “padrão” e, conseqüentemente, as trajetórias DGPS representam as trajetórias “teste”. Quanto a estas, foram geradas 2 trajetórias, uma para os dados coletados ao longo da rota 1 - Trajetória DGPS (ida) - e outra para os coletados ao longo da rota 2 - Trajetória DGPS (volta).

Para a organização dos dados das trajetórias obtidas, realização das comparações pertinentes entre elas, elaboração de cálculos, geração de gráficos e determinação de equações matemáticas afins, empregou-se o aplicativo *Microsoft Excel 97*.

3.4.1 Organização das trajetórias “padrão” e “teste”

3.4.1.1 Dados brutos GPS

Com o processamento dos dados brutos GPS, foram obtidos os dados de posição que caracterizaram as diversas trajetórias “padrão”. O programa forneceu, como produtos finais, arquivos (ASCII) contendo informações de tempo das posições (em segundo GPS), coordenadas (X,Y,Z e ϕ,λ,h) e as estimativas de seus desvios padrão (em X,Y,Z ou ϕ,λ,h).

Optou-se por trabalhar com as coordenadas geodésicas, as quais foram dadas pelo programa em “graus , minutos, segundos e milésimos de segundo”. Essas coordenadas, contudo, tiveram que ser transformadas para “graus, minutos e milésimo de minutos”, tendo em vista que as posições DGPS a serem comparadas seguiam tal padrão. Os tempo de referência das posições, por motivo semelhante, também foram transformados de segundos GPS para “horas, minutos e segundos”. Como foram processados a partir das estações PARA e UEPP da RBMC, as posições calculadas estão referenciadas aos instantes terminados nos segundos 00, 15, 30 e 45, que são os instantes adotados pelas estações RBMC no armazenamento de posições.

Posteriormente, as informações atinentes a cada uma das 12 trajetórias “padrão” foram transferidas para planilhas de trabalho do aplicativo *Microsoft Excel 97*. Como exemplo, apresenta-se na fig. 9 um pedaço da planilha representativa da trajetória trimble absoluta (ida) (padrão) gerada a partir da estação de referência PARA.

FIGURA 9 – TRECHO DA PLANILHA COM DADOS DA TRAJETÓRIA “TRIMBLE ABSOLUTA (IDA)”

Posições da Trajetória <i>trimble absoluta</i> (Ida) Estação Referência : PARA														
1														
2	TEMPO	LATITUDE				LONGITUDE				ALT	Dx	Dy	Dz	D. Total
3	(hms)	graus	min	seg	min...	graus	min	seg	min...	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
488	2:46:15	25	35	42,4747	35,7079	48	18	9,8147	18,1636	13,193	0,7	0,3	0,8	1,1
489	2:46:30	25	35	43,9754	35,7329	48	18	8,2507	18,1375	12,905	0,7	0,3	0,7	1,0
490	2:46:45	25	35	45,4813	35,7580	48	18	6,6802	18,1113	12,839	0,6	0,3	0,7	1,0
491	2:47:00	25	35	47,0006	35,7833	48	18	5,1228	18,0854	12,828	0,6	0,3	0,7	0,9
492	2:47:15	25	35	48,5001	35,8083	48	18	3,5344	18,0589	12,428	0,5	0,3	0,7	0,9
493	2:47:30	25	35	49,9757	35,8329	48	18	1,9479	18,0325	12,285	0,5	0,3	0,7	0,9
494	2:47:45	25	35	51,4717	35,8579	48	18	0,3717	18,0062	13,331	0,7	0,3	0,8	1,1
495	2:48:00	25	35	52,9146	35,8819	48	17	58,8265	17,9804	13,146	0,7	0,3	0,8	1,1
496	2:48:15	25	35	54,3559	35,9059	48	17	57,2311	17,9539	12,714	0,6	0,3	0,7	1,0
497	2:48:30	25	35	55,8067	35,9301	48	17	55,6555	17,9276	12,526	0,6	0,3	0,7	1,0
498	2:48:45	25	35	57,2532	35,9542	48	17	54,1103	17,9018	12,742	0,5	0,3	0,7	0,9
499	2:49:00	25	35	58,7188	35,9786	48	17	52,5585	17,8760	12,499	0,5	0,3	0,7	0,9

Nota: ALT – altitudes elipsoidais.

Dx, Dy, Dz – desvios padrão ao longo dos eixos X, Y e Z, respectivamente.

D. Total – desvios padrão totais = $(Dx^2 + Dy^2 + Dz^2)^{1/2}$.

3.4.1.2 Dados DGPS

Os dados DGPS foram coletados em tempo real, sob a forma de mensagens NMEA contendo diversas informações (ver 3.3.2), com destaque para tempo, posição, HDOP e velocidade. As posições foram geradas a cada segundo com base nas correções diferenciais transmitidas pela ERDGPS Moela. O conjunto das posições DGPS, armazenadas ao longo das rotas de ida e de volta, constituíram as 2 trajetórias “teste”. Devido ao fato de as posições das trajetórias “padrão” (processamento dos dados brutos GPS) estarem referidas apenas aos segundos 00, 15, 30 e 45, foram considerados também, para efeito das comparações destas trajetórias com as trajetórias “teste”, tão somente as posição DGPS referenciadas a tais instantes.

Da mesma forma, as informações atinentes às 2 trajetórias “teste” foram transferidas para planilhas de trabalho do aplicativo *Microsoft Excel 97*, conforme exemplificado pela fig. 10, onde está apresentado um pedaço da planilha representativa da trajetória DGPS (ida) (teste).

FIGURA 10 – TRECHO DA PLANILHA COM DADOS DA TRAJETÓRIA “DGPS (IDA)”

	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1	Dados DGPS - Trajetória DGPS (ida) Estação de Referência : ERDGPS Moela												
2	MSG	TEMPO (hms)	LAT	LON	DGPS	N, SAT	HDOP	h (Elip.)	AGE	ERDGPS			
888	\$GPGGA	024815	25	35,7301	48	18,1433	2	6	2	8	23	462	
889	\$GPVTG	135	T										
890	\$GPGGA	024829	25	35,7542	48	18,1190	2	5	2	9	8	462	
891	\$GPVTG	137	T										
892	\$GPGGA	024831	25	35,7575	48	18,1155	2	5	2	9	9	462	
893	\$GPVTG	137	T										
894	\$GPGGA	024845	25	35,7814	48	18,0913	2	6	2	8	8	462	
895	\$GPVTG	137	T										
896	\$GPGGA	024700	25	35,8060	48	18,0648	2	5	2	9	13	462	
897	\$GPVTG	136	T										
898	\$GPGGA	024714	25	35,8290	48	18,0397	2	5	2	8	12	462	
899	\$GPVTG	135	T										
900	\$GPGGA	024716	25	35,8321	48	18,0365	2	6	2	8	13	462	

Nota: DGPS - o código 2 indica que se está operando com posicionamento DGPS
 N. SAT - número de satélites.
 HDOP - valores dos HDOP.
 h - altitudes elipsoidais.
 AGE - valores dos atrasos (latências), em segundos, das correções diferenciais.
 ERDGPS - código identificador da estação de referência transmissora das correções (462 - Moela)

3.4.2 Comparação das trajetórias “padrão” e “teste”

De posse das trajetórias geradas, foram organizadas novas planilhas através das quais efetivou-se a comparação entre elas. Da rota 1 (ida) resultaram as comparações das 8 trajetórias “padrão” (4 *trimble* e 4 *ashtech*) com a trajetória “teste” DGPS. Da rota 2 (volta) resultaram as comparações das 4 trajetórias “padrão” (4 *ashtech*) com a trajetória “teste” DGPS. Estas comparações consistiram no cálculo da distância linear (planimétrica) entre

pontos de cada trajetória referidos a um mesmo instante. Esta distância foi considerada como representativa do “erro do posicionamento DGPS”, sendo dada por:

$$E = [(\Delta\phi)^2 + (\Delta\lambda)^2]^{1/2}; \quad (3.5)$$

onde:

E : erro do posicionamento DGPS;

$\Delta\phi = d\phi$ (“) . ϕ (1”) : diferença de latitude entre os pontos (em metros);

$\Delta\lambda = d\lambda$ (“) . λ (1”) : diferença de longitude entre os pontos (em metros).

As diferenças de latitude e longitude em metros, foram obtidas pela multiplicação das diferenças calculadas em segundos de arco, pelos valores dos respectivos arcos de 1”, ϕ (1”) = 30,8 m e λ (1”) = 28,0 m, obtidos pelo emprego da equação (3.1) para uma latitude média de 25° para a área de levantamento.

Como exemplo, apresenta-se na fig. 11 um trecho da planilha na qual foi realizada a comparação da trajetória *trimble absoluta (ida)* (padrão) com a trajetória *DGPS (ida)* (teste).

FIGURA 11 – TRECHO DA PLANILHA DE COMPARAÇÃO ENTRE AS TRAJETÓRIAS “TRIMBLE ABSOLUTA (IDA)” E “DGPS (IDA)”

	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1	Posicionamento - Trajetória "trimble absoluta (ida)" Est. Ref. : PARA				Posicionamento - Trajetória "DGPS (ida)" Est Ref : Moela			Diferenças entre as trajetórias (trimble - DGPS)			
2	LAT	LON	ALT	TEMPO	LAT	LON	ERDGP	Dif LAT	Dif LON	Dist Linear	
3	min...	min...	(m)	(hms)	min...	min...		(m)	(m)	(m)	
488	35,7079	18,1636	13,193	2:46:15	35,7301	18,1433	462	-41,0	33,7	53,1	
489	35,7329	18,1375	12,905	2:46:30	35,7558	18,1172	462	-42,3	33,7	54,1	
490	35,7580	18,1113	12,839	2:46:45	35,7814	18,0913	462	-43,2	33,2	54,5	
491	35,7833	18,0854	12,828	2:47:00	35,8060	18,0648	462	-41,9	34,2	54,1	
492	35,8083	18,0589	12,426	2:47:15	35,8306	18,0381	462	-41,2	34,6	53,8	
493	35,8329	18,0325	12,285	2:47:30	35,8550	18,0121	462	-40,8	33,9	53,1	
494	35,8579	18,0062	13,331	2:47:45	35,8795	17,9855	462	-39,9	34,4	52,7	
495	35,8819	17,9804	13,146	2:48:00	35,9020	17,9590	462	-37,1	35,6	51,4	
496	35,9059	17,9539	12,714	2:48:15	35,9258	17,9349	462	-36,8	31,6	48,5	
497	35,9301	17,9276	12,526	2:48:30	35,9513	17,9076	462	-39,2	33,2	51,4	
498	35,9542	17,9018	12,742	2:48:45	35,9740	17,8835	462	-36,6	30,4	47,6	
499	35,9786	17,8760	12,499	2:49:00	35,9975	17,8572	462	-34,9	31,2	46,9	
500	36,0021	17,8493	12,235	2:49:15	36,0204	17,8298	462	-33,8	32,4	46,8	
501	36,0244	17,8216	12,200	2:49:30	36,0428	17,8023	462	-34,0	32,1	46,7	
502	36,0465	17,7935	12,143	2:49:45	36,0669	17,7730	462	-37,7	34,1	50,8	

Nota: Dif Lat e Dif Lon – diferenças em latitude e longitude, respectivamente, já convertidas em metros.
Dist Linear – diferenças totais em metros, a serem tomadas como “erros das posições DGPS”.
As colunas LAT e LON apresentam apenas a parte de minutos e décimos de minuto das posições.

Procurando aumentar ainda mais o nível de confiança das trajetórias “padrões”, efetuou-se uma filtragem, de forma que fossem aceitas apenas as posições com desvio padrão total (resultante dos desvios padrão ao longo dos 3 eixos coordenados X, Y e Z) ≤ 1 m, altitude compreendida entre 10 e 19 m, para as posições *trimble*, e entre 5 e 14 m, para as posições *ashtech*. Estes limites às altitudes foram estipulados por adotar-se uma altura média das antenas de 14,5 m (antena *trimble*) e de 9,5 m (antena *ashtech*), em relação ao nível do mar, e considerar-se variações da ordem de 4,5 m (para mais e para menos) como decorrência do efeito conjunto das ondas do mar, das ondas de maré e do “jogo” do navio (arfagem e balanço).

Além dos “erros DGPS” , foram também calculadas, a partir das posições das trajetórias “padrões”, as “distâncias ortodrômicas” em relação à ERDGPS Moela. As distâncias variaram de 3 Km, para os pontos próximos à Moela, até em torno de 280 Km, para aqueles próximos à Paranaguá. Estas distâncias foram calculadas pela seguinte formulação (RICHARDUS, 1972 p. 20):

$$D_{P_1 P_2} = R \cdot \beta / 57^{\circ},29578 ; \quad (3.6)$$

$$\text{Cos } \beta = \text{Sen } \varphi_1 \cdot \text{Sen } \varphi_2 + \text{Cos } \varphi_1 \cdot \text{Cos } \varphi_2 \cdot \text{Cos } (\lambda_2 - \lambda_1) ; \quad (3.7)$$

onde:

$D_{P_1 P_2}$: distância ortodrômica entre os pontos P_1 e P_2

R: raio da esfera;

β : ângulo central subentendido pelo arco de ortodrômica P_1P_2 em graus;

φ_1 e λ_1 : coordenadas do ponto 1 (ERDGPS Moela);

φ_2 e λ_2 : coordenadas do ponto 2 (pontos da trajetória padrão).

Para efeito dos cálculos, adotou-se a hipótese simplificadora da “Terra esférica” com raio dado por:

$$R = (Mm \cdot Nm)^{1/2} \quad (3.8)$$

Considerando-se uma latitude média de 25°, chega-se a:

Mm = 6.347 km (pequena normal);

Nm = 6.382 km (grande normal);

R = 6.364 km.

As “distâncias” foram calculadas numa outra planilha, para onde foram também transferidos os valores dos “erros”, conforme exemplificado na figura 12.

FIGURA 12 – TRECHO DA PLANILHA DE CÁLCULO DAS “DISTÂNCIAS ORTODRÔMICAS”

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Comparação entre posições "DGPS (ida)" e "Trimble absoluta (ida)" (Est. Ref. PARA)							Ângulo central	Dist. Ortodrômica
2	Tempo (hms)	Lat (graus)	Lon (graus)	D. Total (m)	Alt (m)	ERDGPS	Erro DGPS (m)	(rad)	(Km)
122	2:48:15	25,5984322	48,2992309	1,0	12,7	462	48,5	0,0421153	268
123	2:48:30	25,5988352	48,2987932	1,0	12,5	462	51,4	0,0421145	268
124	2:48:45	25,5992370	48,2983640	0,9	12,7	462	47,6	0,0421137	268
125	2:49:00	25,5996441	48,2979329	0,9	12,5	462	46,9	0,0421130	268
126	2:49:15	25,6000353	48,2974883	0,9	12,2	462	46,8	0,0421120	268
127	2:49:30	25,6004065	48,2970272	0,8	12,2	462	46,7	0,0421105	268
128	2:49:45	25,6007746	48,2965591	0,8	12,1	462	50,8	0,0421089	268
129	2:50:00	25,6011500	48,2960992	0,8	11,8	462	49,0	0,0421075	268
130	2:50:15	25,6015226	48,2956440	0,8	11,6	462	48,9	0,0421061	268
131	2:50:30	25,6018883	48,2951903	0,8	12,0	462	52,7	0,0421047	268
132	2:50:45	25,6022519	48,2947332	0,8	11,9	462	55,3	0,0421032	268
133	2:51:00	25,6026185	48,2942783	0,8	12,0	462	56,1	0,0421018	268
134	2:51:15	25,6029834	48,2938156	0,8	12,1	462	55,8	0,0421002	268
135	2:51:30	25,6033508	48,2933533	0,7	11,8	462	53,2	0,0420987	268
136	2:51:45	25,6037227	48,2928968	0,7	11,9	462	53,3	0,0420973	268
137	2:52:00	25,6040859	48,2924336	0,7	11,9	462	54,9	0,0420958	268
138	2:52:15	25,6055448	48,2905772	1,0	13,1	462	46,7	0,0420896	268

Nota: D. Total – desvios padrão totais das posições da trajetória “padrão”.

Erro – erros do posicionamento DGPS.

Ângulo central – ângulo em radianos usado no cálculo da distância ortodrômica entre as estações referência e móvel.

Após se ter obtido os valores de “erro DGPS”, dois fatos importantes foram constatados. Primeiro, o valor médio dos erros, que ao longo da rota de ida foi da ordem de 46 m, deu um salto para 63 m ao longo da rota de volta. Segundo, durante o período em que o navio encontrava-se fundeado (final da rota de volta) os erros foram drasticamente reduzidos, sendo inferiores a 10 m. Como explicação para tais fatos, veiculou-se a hipótese de haver uma defasagem “dT” entre os padrões de tempo adotados para a referenciação das posições “teste” (DGPS) e “padrão”(pós-processadas). Tal defasagem, associada com o deslocamento do navio, estaria “contaminando” os resultados obtidos para os “erros DGPS”. Assim, estes erros conteriam uma parcela decorrente da degradação do posicionamento DGPS propriamente dita (de interesse para o trabalho em questão) e outra, espúria, decorrente do deslocamento do navio em presença da defasagem “dT”. Matematicamente, isso pode ser expresso por:

$$E_T = E_{DGPS} + (V_n \cdot dT); \quad (3.9)$$

onde:

E_T : erro DGPS total, obtido pelas comparações realizadas;

E_{DGPS} : erro DGPS;

V_n : velocidade de deslocamento do navio;

dT : defasagem de tempo entre os padrões de tempo usados para referenciação das posições “teste” (DGPS) e “padrão” (pós-processadas).

Isto implicaria o fato de os erros constatados ao longo das rotas (navio em movimento) serem muito superiores aos apresentados pela literatura (<10m) e os constatados durante o fundeio (navio praticamente parado) serem compatíveis com esta. Além disto, o aumento do erro ao longo da rota de ida relativamente à de volta, poderia ser justificado pela ocorrência de um aumento no valor médio da velocidade do navio. Para confirmar tal hipótese, a partir das mensagens NMEA geradas pelo receptor DGPS (ver 3.3.2), fez-se um estudo da velocidade do navio ao longo das rotas, cujos valores resultantes podem ser observados nas figuras 13 e

14. Este estudo mostrou que a velocidade média do navio elevou-se de 7,9 nós, ao longo da rota de ida, para 10 nós, ao longo da rota de volta, justificando então as variações observadas.

FIGURA 13 – VELOCIDADES MÉDIAS DO NAVIO AO LONGO DA ROTA DE IDA

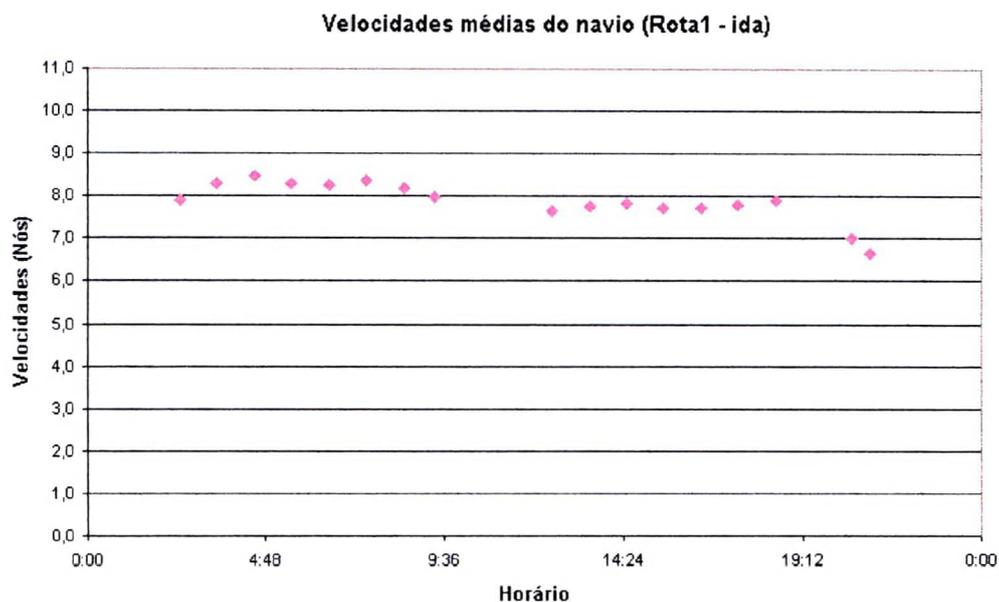
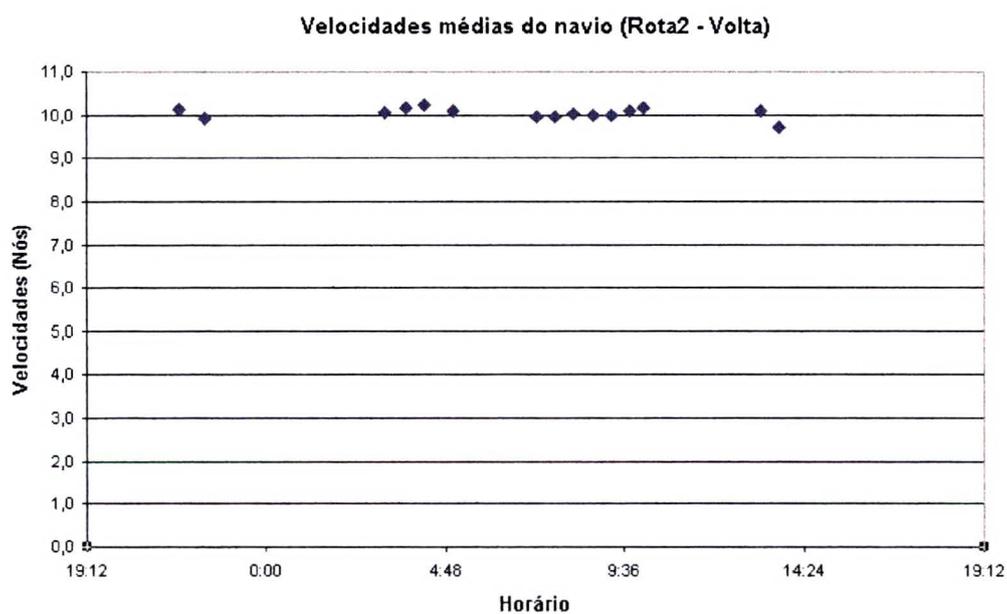


FIGURA 14 – VELOCIDADES MÉDIAS DO NAVIO AO LONGO DA ROTA DE VOLTA



Na verdade, o efeito conjunto da defasagem de tempo e do deslocamento do navio, expresso pelo produto “ $V_n \cdot dT$ ” (equação 3.9), não se constituiria em nenhum empecilho, desde que apresentasse um valor constante (V_n e $dT = \text{cte}$) ao longo de toda a rota. Neste caso, apenas acarretaria um efeito que influenciaria de modo sistemático e constante os valores dos “erros DGPS” obtidos, não afetando a análise da correlação espacial a ser feita, para qual interessa apenas a variação (relativa) do erro DGPS em função da distância entre as estações. Contudo, verificou-se que, não só entre as rotas, mas no decorrer destas (principalmente na rota de ida), ocorreu significativa variação da velocidade do navio. Isto provavelmente teria afetado os “erros DGPS” de maneira, ainda que sistemática, porém variável, o que viria a adulterar as análises a serem feitas. Para eliminar este caráter variável, aplicou-se uma correção com objetivo de efetuar uma “homogeneização” das velocidades e, por conseguinte, da influência destas sobre os erros obtidos. Deste modo, os erros associados a posições cujas velocidades fossem inferiores à velocidade média da rota sofreriam um acréscimo, ao passo que os associados a posições cujas velocidades fossem superiores a da média, sofreriam uma redução. A expressão desta correção é dada por:

$$C = (V_n - v) \cdot f \cdot dT; \quad (3.10)$$

onde:

C : correção em metros a ser aplicada sobre o valor do “erro DGPS”.

V_n : velocidade média do navio, em nós, ao longo da rota. $V_n = 7,9$ nós (rota 1 - ida) e 10 nós (rota 2 - volta);

v : velocidade do navio, em nós, em um dado instante;

$f = 0,51$ (fator de conversão da velocidade de “nós” para “m/s”);

dT : defasagem de tempo entre o padrão adotado para referenciação das posições “teste” (DGPS) e o adotado para as posições “padrão” (pós-processado).

Restava ainda, contudo, definir qual era o valor da defasagem “ dT ” entre as posições “teste” e as “padrão”. Após várias análises constatou-se que o problema residia na referência

de tempo das posições “teste”. Estas posições estavam referenciadas pelas informações de “tempo” constantes das mensagens NMEA geradas pelo receptor DGPS. Ao que parece, estes “tempos” referem-se ao instante em que as correções diferenciais foram geradas pela estação de referência e não ao instante ao qual a posição DGPS está associada. Assim, a defasagem “dT” seria dada pela “idade” (*age*) das correções, que é intervalo de tempo decorrido desde a geração das correções diferenciais, pela estação de referência, até seu efetivo emprego, pela estação móvel. Igualmente como foi feito para o estudo das velocidades do navio, fez-se um estudo do comportamento das “idades” das correções diferenciais (ver 3.4.3), segundo o qual as correções apresentaram um atraso médio de 9,5 s, valor este adotado como representativo da defasagem “dT”.

Desta feita, uma vez que se dispunha dos “erros DGPS”, agora já adequadamente tratados, e das “distâncias” à estação de referência (ERDGPS Moela) a eles associadas, foi possível organizar estas informações em novas planilhas de modo a tentar caracterizar a relação existente entre elas. Segregando-se os dados, em função das distâncias, em trechos de aproximadamente 10 Km (0-10 Km, 10-20 Km,..., 270-280 Km), calculou-se, para cada trecho, o valor médio e o desvio padrão dos “erros DGPS”. Em seguida estes valores foram associados por meio de tabelas (fig. 15), a partir das quais foram gerados os gráficos finais representativos da relação Erro/Distância.

Em função dos critérios de filtragem adotados e das perdas de sinais ocorridas durante a coleta dos dados, existem algumas descontinuidades na seqüência dos dados, que no entanto não chegaram a comprometer a metodologia empregada.

FIGURA 15 –EXEMPLO DE TABELA DE ERROS/DISTÂNCIAS RESULTANTES DA COMPARAÇÃO ENTRE TRAJETÓRIAS

	N	O	P	Q	R	S	T
1	Trecho	Erro Linear (média)	Erro Linear (desvio padrão)				
2	(Km)	(m)	(m)				
3	20	48,4	2,6				
4	75	44,6	2,5				
5	85	45,2	1,9				
6	95	45,8	1,7				
7	105	47,7	2,4				
8	115	48,7	1,8				
9	125	48,6	1,7				
10	165	48,9	1,7				
11	175	49,6	2,2				
12	185	49,2	1,9				
13	195	52,7	1,8				
14	205	51,1	2,6				
15	225	48,9	2,5				
16	255	52,0	2,3				
17	270	48,1	3,5				
18							

Plan1 Gráfico (<1, 1m)

Nota: Trecho – distâncias ortodrômicas médias dos trechos considerados à ERDGPS Moela.
 Erro Linear (média) – médias dos erros do posicionamento DGPS em cada trecho.
 Erro Linear (desvio padrão) – desvios padrão das médias.

Os gráficos construídos têm o eixo das abscissas graduado em quilômetros, para a representação das “distâncias ortodrômicas”, e o das ordenadas em metros, para a representação dos valores médios e desvios padrões do “erro DGPS”. A caracterização da relação do “erro DGPS” com a “distância entre as estações” traduz o conceito da correlação espacial, segundo o qual existe um compromisso entre a qualidade da posição DGPS e a distância de separação entre as estações móvel e de referência.

Cada um dos gráficos resultantes apresenta 2 seqüências de dados, sendo uma representativa da relação “erro médio/distância” e outra da relação “desvio padrão do erro médio/distância”. Para cada uma destas seqüências, de caráter discreto, fez-se, com auxílio do *Microsoft Excel 97*, a escolha de uma função linear que a melhor modelasse de forma contínua. Nos itens 3.4.2.1 a 3.4.2.3 são apresentados os resultados alcançados pelas 12 comparações realizadas.

3.4.2.1 Comparação das Trajetórias *trimble* (ida) com a Trajetória DGPS (ida)

Da comparação da trajetória DGPS (ida) (“teste”) com as 4 trajetórias *trimble* (ida) (“padrão”), decorrentes das soluções “absoluta” e “flutuante” das Estações PARA e UEPP, resultaram os gráficos abaixo (fig. 16 a 19). Neles estão simbolizados por pontos azuis os valores médios do “erro DGPS” de cada um dos trechos considerados, os quais continham, conforme o caso, de 50 a 100 valores de erro. A função Y1 é a função linear que modela de forma contínua a distribuição discreta dos pontos, representando o comportamento do “erro DGPS” em função da distância entre as estações de referência e móvel. Os desvios padrões do “erro DGPS” estão simbolizados por pontos rosas, tendo da mesma forma sua distribuição modelada por uma função linear (Y2).

Fazendo-se uma média aritmética dos dois grupos de funções (Y1 e Y2), obteve-se as seguintes funções:

$$Y1' = 0,012X + 46,6 \quad (3.11)$$

$$Y2' = 0,002X + 1,8 \quad (3.12)$$

onde:

Y1' : valor médio do “erro DGPS”, em metros;

Y2' : desvio padrão do “erro DGPS”, em metros;

X : distância entre as estações móvel e de referência, em quilômetros.

FIGURA 16 – ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “TRIMBLE ABSOLUTA (IDA) DA ESTAÇÃO PARA”

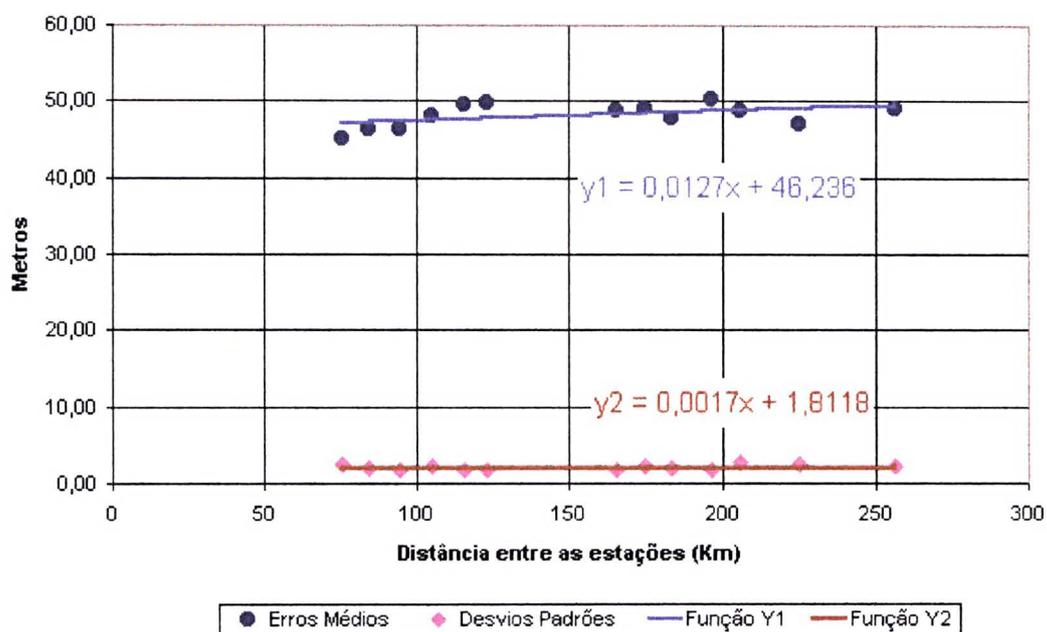


FIGURA 17 - ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “TRIMBLE FLUTUANTE (IDA) DA ESTAÇÃO PARA”

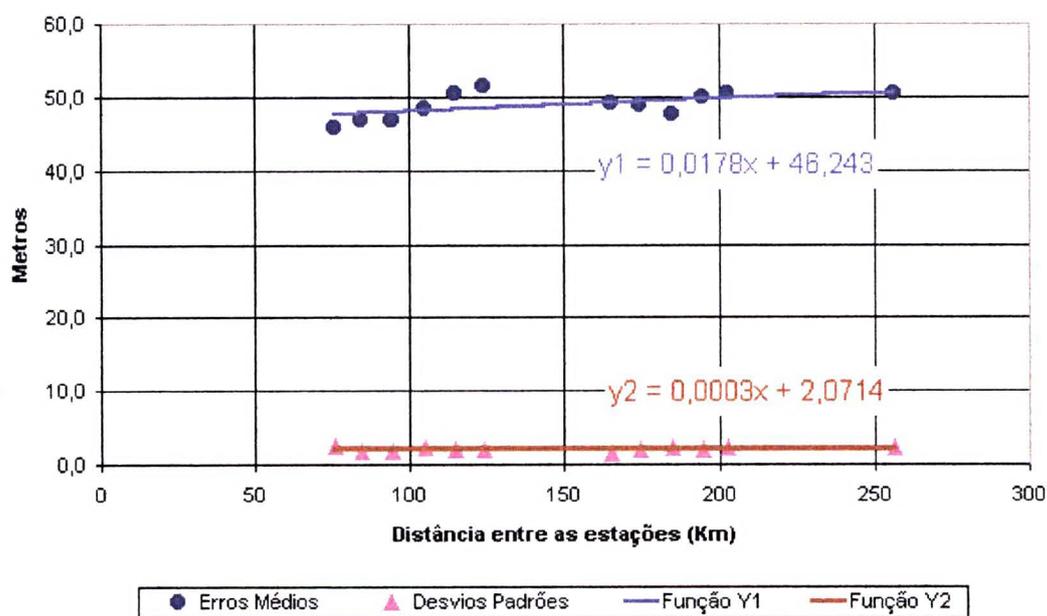


FIGURA 18 - ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “TRIMBLE ABSOLUTA (IDA) DA ESTAÇÃO UEPP”

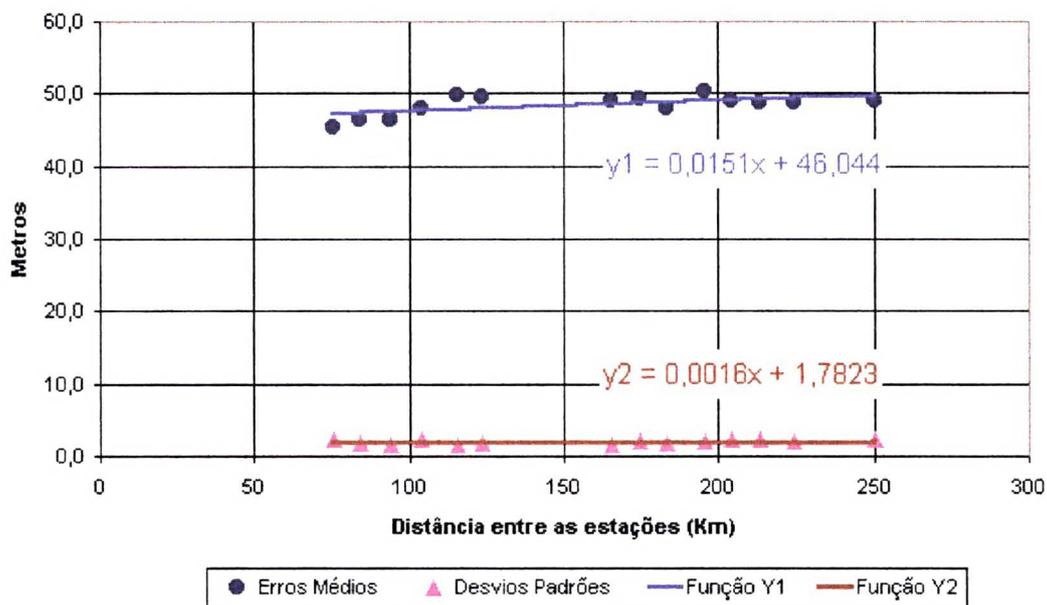
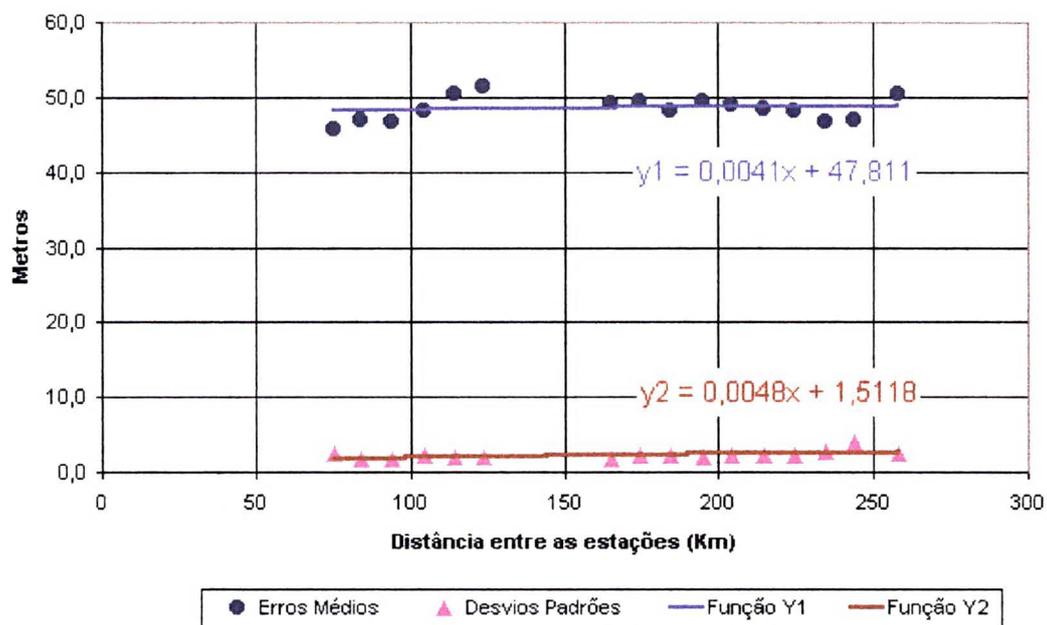


FIGURA 19 - ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “TRIMBLE FLUTUANTE (IDA) DA ESTAÇÃO UEPP”



3.4.2.2 Comparação das Trajetórias *ashtech* (ida) com a Trajetória DGPS (ida)

Analogamente, da comparação das posições da trajetória DGPS (ida) (“teste”), com as 4 trajetórias *ashtech* (ida) (“padrão”), resultaram os gráficos abaixo (fig. 20 a 23), nos quais foi usada a mesma simbologia para representar os pontos e as funções geradas. Da mesma forma, fazendo-se uma média aritmética dos dois grupos de funções (Y1 e Y2), obteve-se as seguintes funções:

$$Y1' = 0,011X + 47,2 \quad (3.13)$$

$$Y2' = 0,003X + 2,0 \quad (3.14)$$

onde:

Y1' : valor médio do “erro DGPS”, em metros;

Y2' : desvio padrão do “erro DGPS”, em metros;

X : distância entre as estações móvel e de referência, em quilômetros.

FIGURA 20 - ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “ASHTECH ABSOLUTA (IDA) DA ESTAÇÃO PARA”

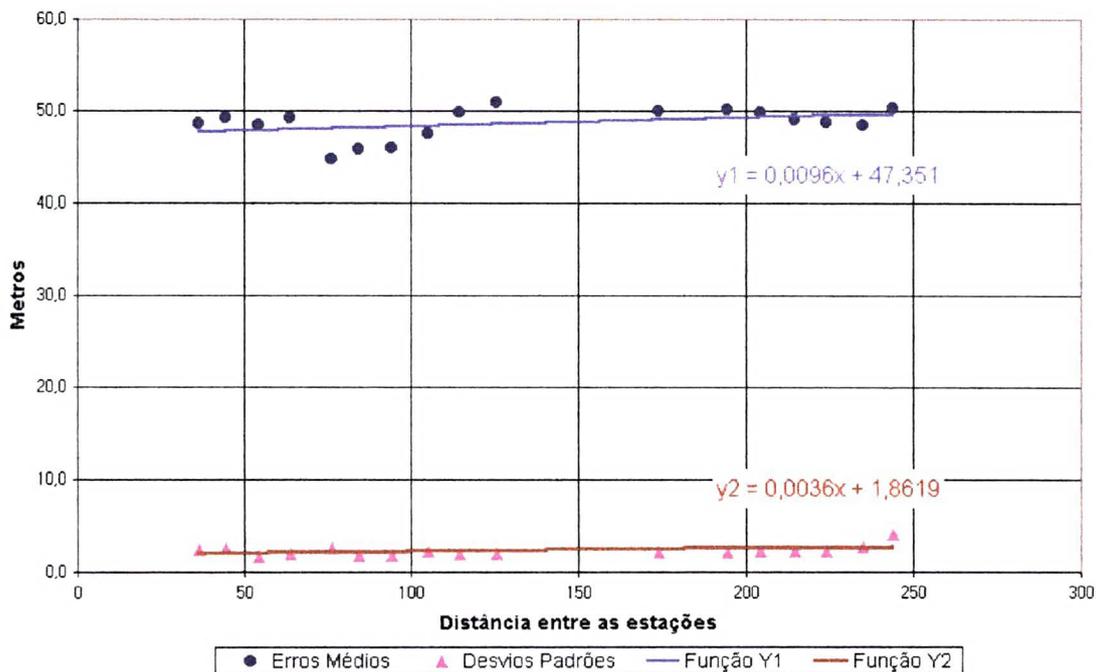


FIGURA 21 - ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “ASHTECH FLUTUANTE (IDA) DA ESTAÇÃO PARA”

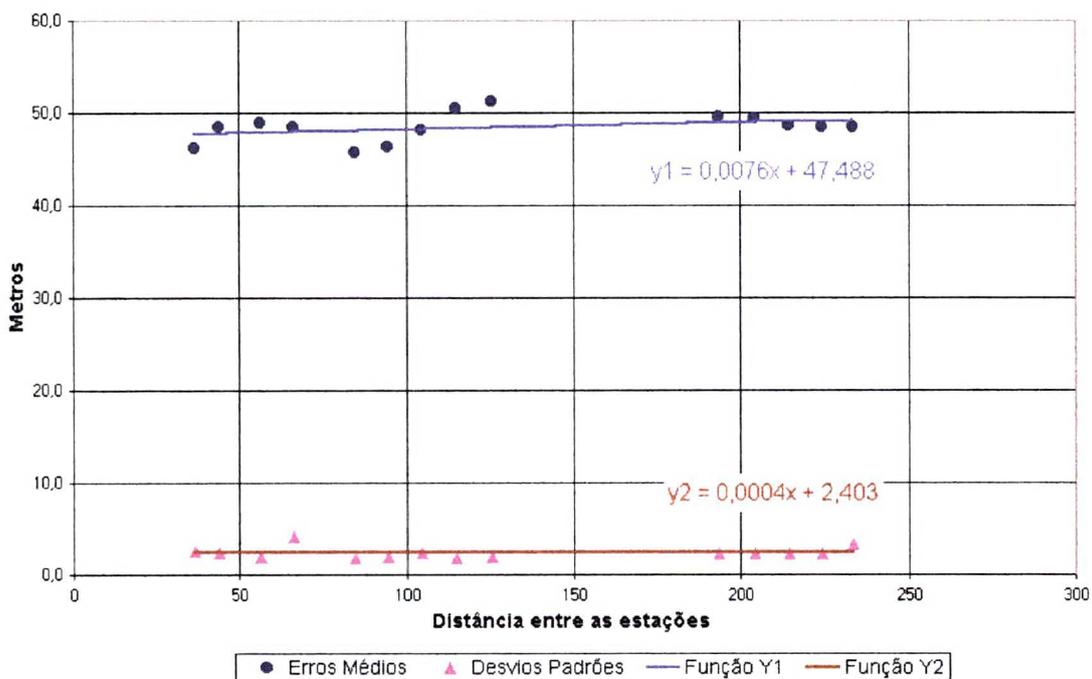


FIGURA 22 - ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “ASHTECH ABSOLUTA (IDA) DA ESTAÇÃO UEPP”

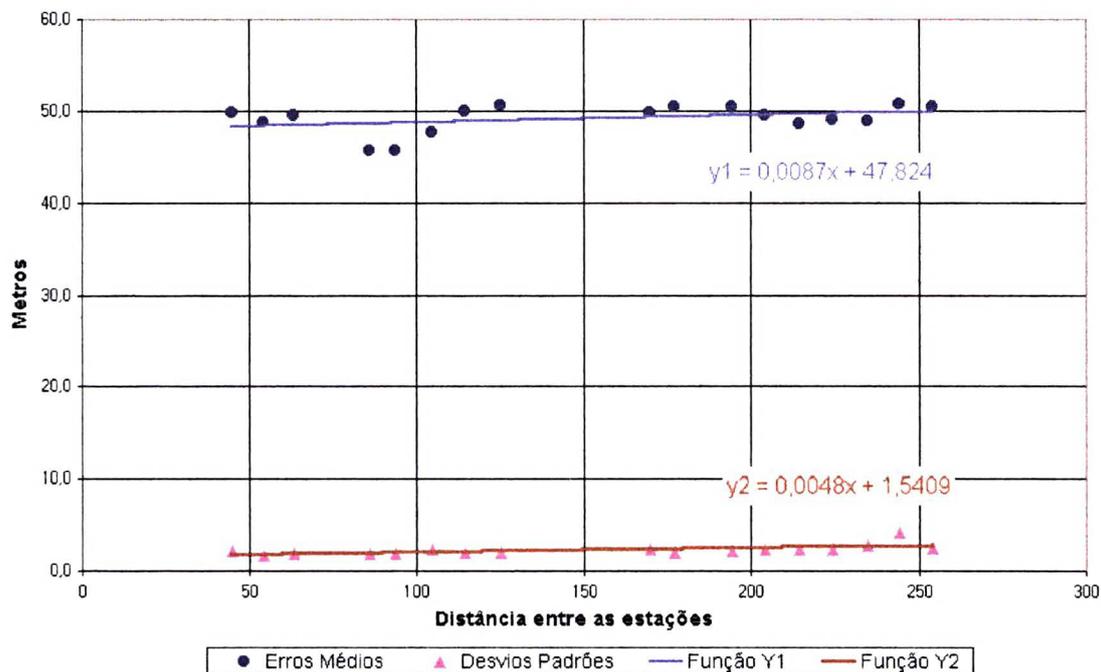
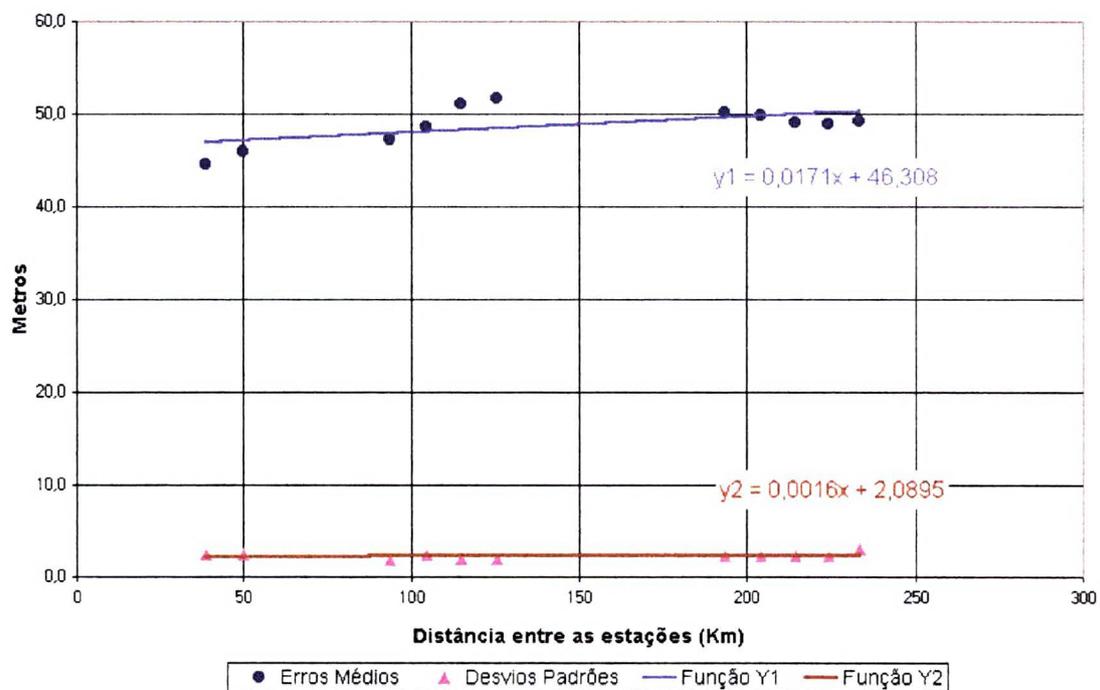


FIGURA 23 - ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “ASHTECH FLUTUANTE (IDA) DA ESTAÇÃO UEPP”



3.4.2.3 Comparação das Trajetórias *ashtech* (volta) com a Trajetória DGPS (volta)

Como já mencionado anteriormente (ver 3.4), os dados *trimble* relativos a rota 2 (volta) foram perdidos, fazendo com que os resultados obtidos ao longo desta digam respeito apenas aos dados *ashtech* coletados.

Comparando-se as posições da trajetória DGPS (volta) (“teste”), com as 4 trajetórias *ashtech* (volta) (“padrão”), resultaram os gráficos a seguir (fig. 24 a 27), nos quais foi usada a mesma simbologia dos gráficos anteriores para representar os pontos e as funções geradas.

Fazendo-se uma média aritmética dos dois grupos de funções (Y1 e Y2), obteve-se as seguintes funções:

$$Y1' = - 0,002 X + 63,2 \quad (3.15)$$

$$Y2' = - 0,001 X + 2,6 \quad (3.16)$$

onde:

Y1' : valor médio do “erro DGPS”, em metros;

Y2' : desvio padrão do “erro DGPS”, em metros;

X : distância entre as estações móvel e de referência, em quilômetros.

FIGURA 24 - ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “ASHTECH ABSOLUTA (VOLTA) DA ESTAÇÃO PARA”

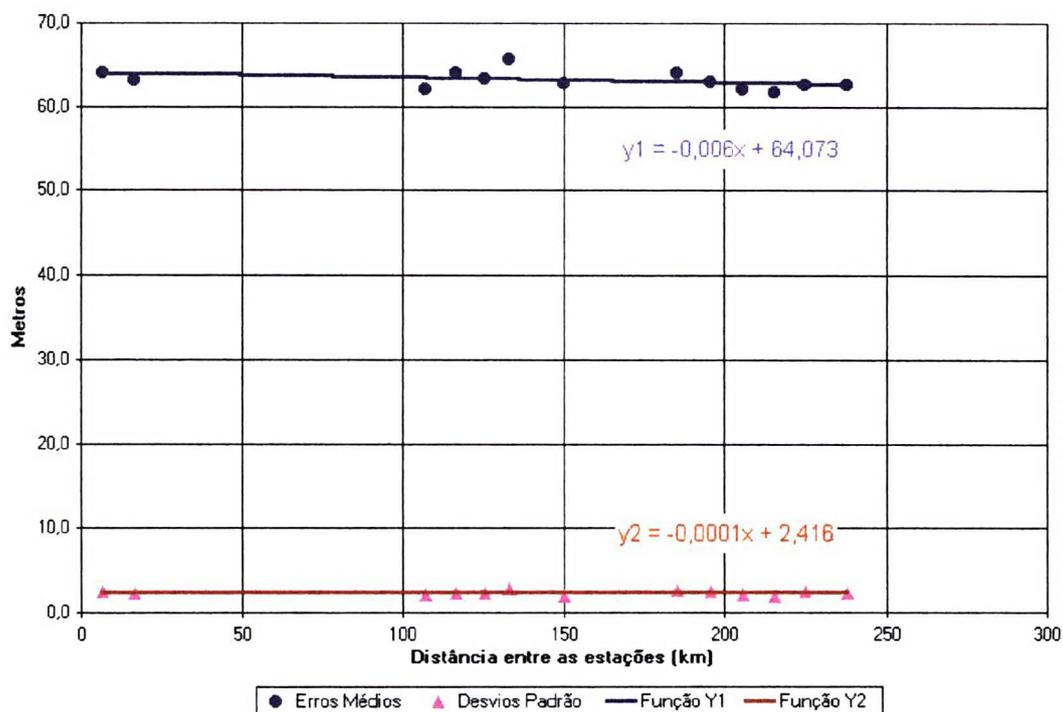


FIGURA 25 - ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “ASHTECH FLUTUANTE (VOLTA) DA ESTAÇÃO PARA”

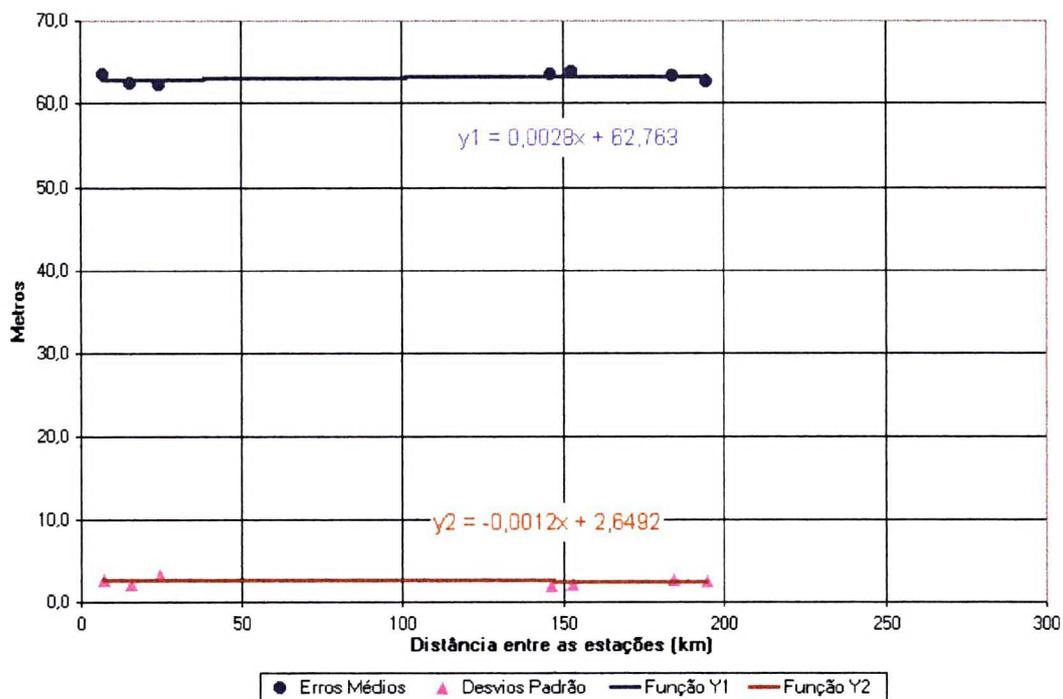


FIGURA 26 - ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “ASHTECH ABSOLUTA (VOLTA) DA ESTAÇÃO UEPP”

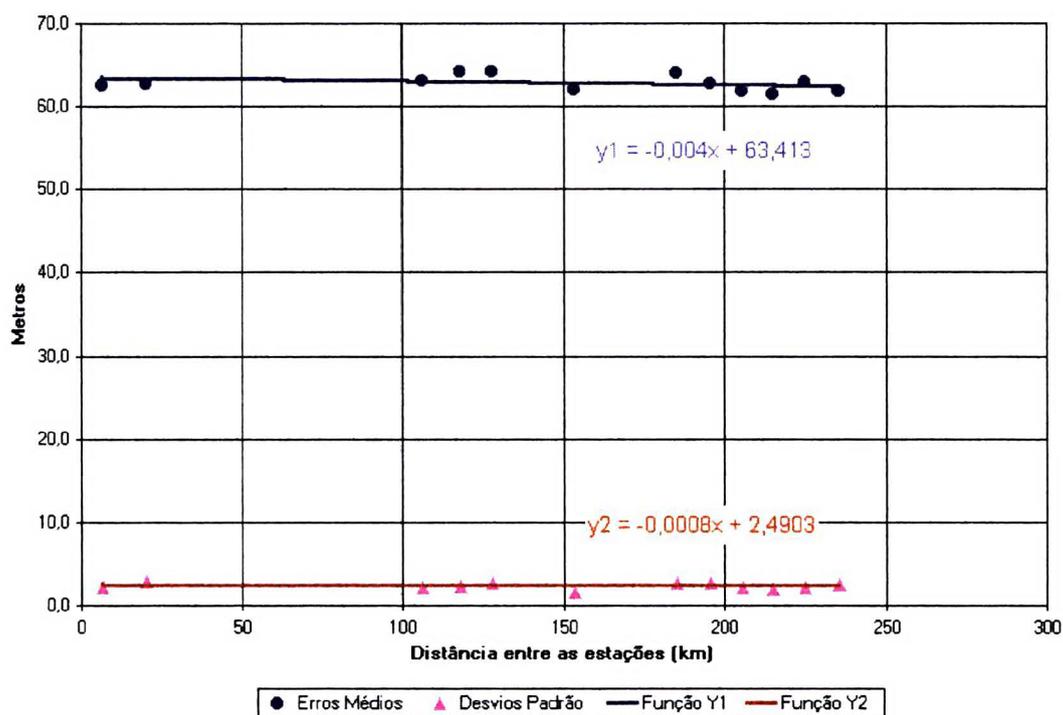
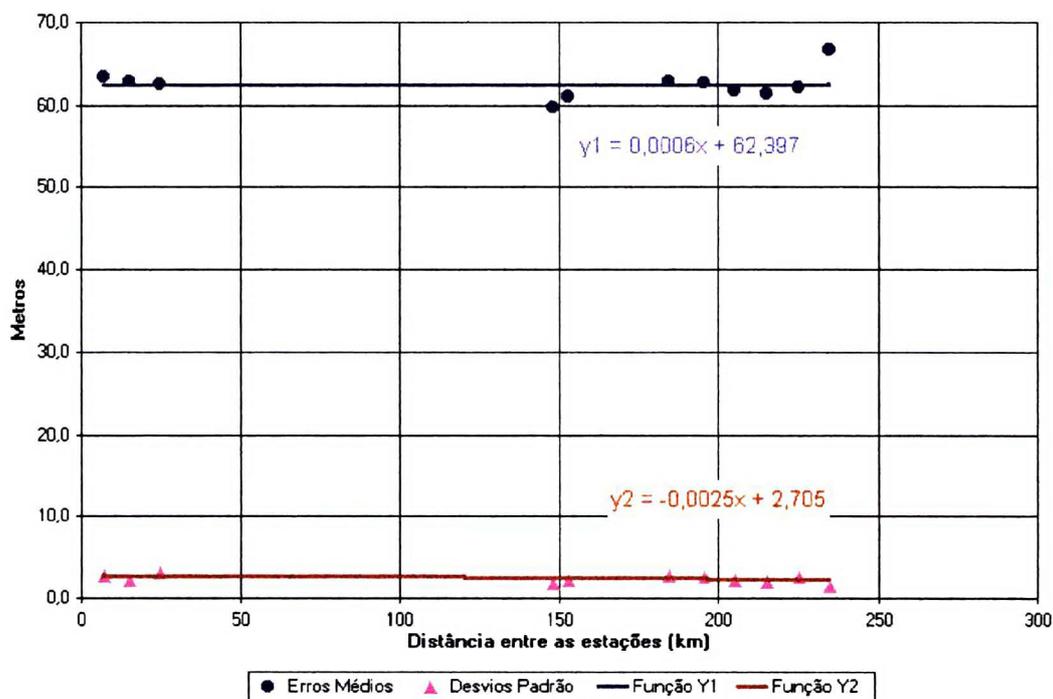


FIGURA 27 - ERRO DO POSICIONAMENTO DGPS EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO “ASHTECH FLUTUANTE (VOLTA) DA ESTAÇÃO UEPP”



3.4.3 Latência das Correções Diferenciais

Um outro aspecto importante a ser abordado, dentro da análise da qualidade do posicionamento DGPS, é a latência (atraso) das correções diferenciais. Ela consiste no intervalo de tempo decorrido desde o instante à que se referem as correções (instante em que foram geradas pela estação de referência) até o instante em que são efetivamente utilizadas pela estação móvel, no cômputo de sua posição. Ela é fruto do tempo despendido para o cálculo, transmissão, recepção e processamento das correções diferenciais, o qual, tem compromisso direto com a taxa de transmissão de dados adotada e com número e tamanho das mensagens a serem transmitidas, que por sua vez dependem de fatores como o número de satélites rastreados e os tipos de mensagens que se queira transmitir. Obviamente, assim como o fator distância degrada a qualidade da posição DGPS, o fator latência, também o faz. Analogamente à correlação espacial, este compromisso entre qualidade da posição e atraso das correções, é designado por “correlação temporal” (JIN, et al., 198-?). Na fig. 3 (p. 27), adaptada de RTCM (1994, p.4-49) (ver 2.1.5.3.5), são apresentados os valores dos erros de posição decorrentes do atraso das correções.

A partir das mensagens diferenciais recebidas ao longo das duas rotas percorridas, foram selecionados trechos de 5 minutos de duração, intervalados de 60 a 90 minutos. Dentro de cada um desses trechos, com base nas informações de idade (*age*) das correções (ver fig. 10), que é uma das informações disponibilizadas nas mensagens GGA (NMEA) (ver 3.3.2), foram calculados a média e o desvio padrão dos atrasos. Calculou-se também as distâncias ortodrômicas médias de cada um dos trechos à ERDGPS Moela, seguindo a mesma metodologia apresentada em 3.4.2. Associando-se os valores dos atrasos (média e desvio padrão) com as respectivas distâncias ortodrômicas, foram gerados os gráficos apresentados a

seguir (fig. 28(a) e 28(b)). Nas fig. 28(a) e (b) são apresentados os resultados dos atrasos verificados no decorrer da trajetória de ida (Paranaguá - Moela) e na fig. 29 os verificados na trajetória de volta (Moela - Paranaguá). O repentino crescimento dos atrasos nos trechos afastados além de 245 km pode ser atribuído, em princípio, a desvanecimentos do sinal da estação de referência. Neste caso, o receptor da estação móvel viu-se na contingência de ter que propagar, por maiores períodos de tempo, as correções diferenciais recebidas. Nos casos mais críticos verificou-se atrasos da ordem de 80 s. Os desvanecimentos podem ter decorrido do fato conjunto de o navio encontrar-se razoavelmente afastado da estação de referência e durante o período noturno (00:45 h as 05:00 h), sendo a maior parte do tempo no interior da Baía de Paranaguá, cujo relevo circundante contribui para dificultar a recepção dos sinais. A recepção noturna é bastante problemática para as transmissões da faixa de operação dos radiofaróis (MF), sendo talvez o fator principal nos desvanecimentos ocorridos. A influência do período noturno é reforçada pelo fato de não se ter verificado a ocorrência de fenômeno idêntico na trajetória de volta (fig. 29), quando o navio se encontrava nesta mesma região, porém no período diurno (09:30 h as 14:00 h). Assim, para efeito da presente análise, optou-se por considerar a trajetória de ida somente até a distância de 230 km (fig. 28 (b)).

Nas figuras, estão representados por pontos azuis os valores médios da latência das correções de cada trecho, sendo os mesmos modelados de forma contínua pela função T1. Os desvios padrão da latência das correções estão simbolizados por pontos rosa e modelados pela função T2.

A exemplo do que foi feito na análise do erro DGPS, fazendo-se uma média dos dois grupos de funções (T1 e T2), pode-se considerar as seguintes equações para a análise da latência das correções diferenciais das ERDGPS:

$$T1' = 0,003X + 9,2 \quad (3.17)$$

$$T2' = 0,004X + 2,4 \quad (3.18)$$

onde:

T1' : valor médio da “latência” das correções, em segundos;

T2' : desvio padrão da “latência” das correções, em segundos;

X : distância entre as estações móvel e de referência, em quilômetros.

FIGURA 28 (a) – LATÊNCIAS DAS CORREÇÕES DGPS (TRAJETÓRIA DE IDA)
(DE 0 A 270 KM)

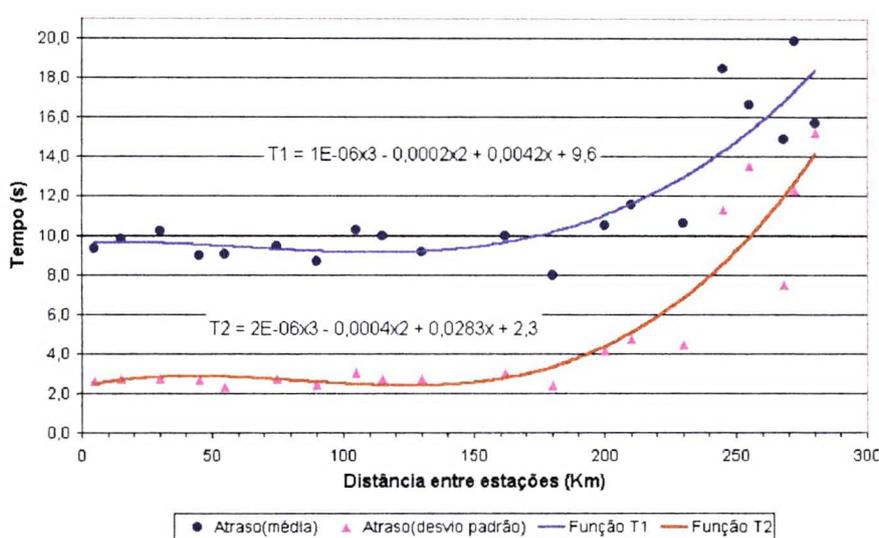


FIGURA 28 (b) – LATÊNCIAS DAS CORREÇÕES DGPS (TRAJETÓRIA DE IDA)
(DE 0 A 235 KM)

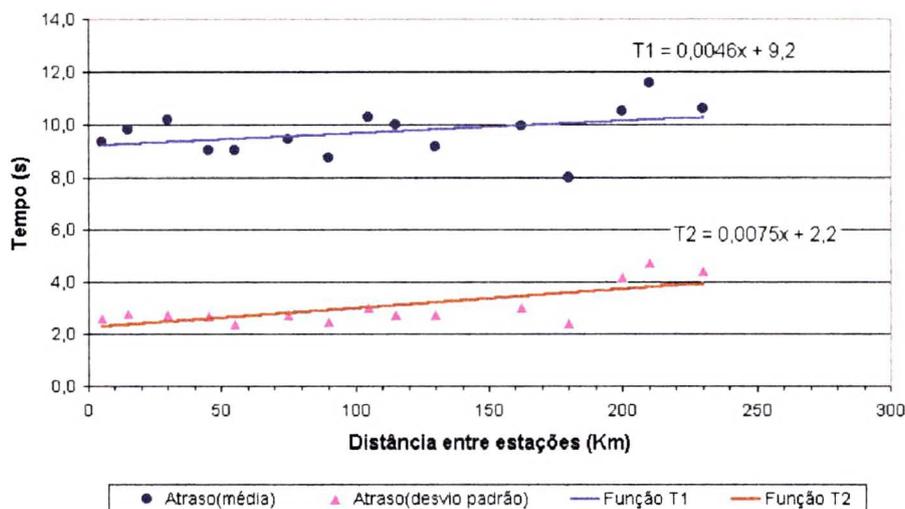
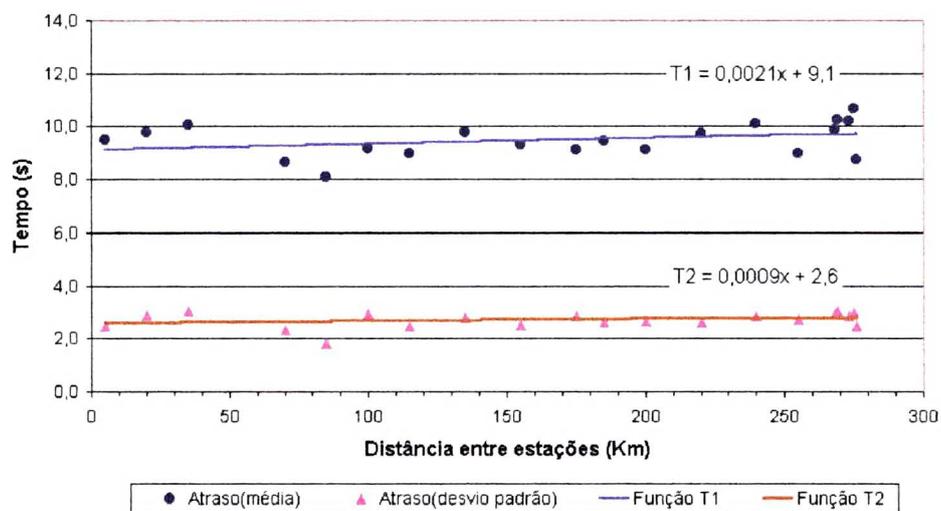


FIGURA 29 – LATÊNCIAS DAS CORREÇÕES DGPS (TRAJETÓRIA DE VOLTA)



3.4.4 Variação do posicionamento altimétrico DGPS

Por ocasião do término da rota de volta, em torno das 14:00 h do dia 13/nov/98, o NB Amorim do Valle fundeou em frente ao Porto de Paranaguá (± 270 km da ERDGPS Moela). Durante o período de fundeio, o receptor DGPS permaneceu coletando dados diferenciais, sendo possível registrar a variação dos valores de altitude fornecidos (fig. 30), bem como dos parâmetros: HDOP, número de satélites e latência das correções (fig. 31). Os dados que deram origem aos gráficos apresentados advêm de amostras de 20 s de duração, intervaladas de 2 minutos, extraídas das mensagens NMEA geradas no período das 14:30 h às 16:00 h.

Pela fig. 31, observa-se que até às 15:14 h, os parâmetros HDOP e n° de satélites mantiveram-se com um determinado padrão, sofrendo, a partir daí, uma pequena degeneração, ou seja, aumentando o HDOP e diminuindo o n° de satélites. Quanto à latência das correções, embora de modo menos característico a partir das 15:14 h, ela também apresenta uma tendência de aumento, bem como uma maior variabilidade. Analisando agora os dados de altitude, vê-se que ocorre uma variação de seu comportamento a partir das 15:14 h. Antes deste ponto, a altitude apresentava uma média de 3,3 m com um desvio padrão de 3,7 m, passando a -1,4 m com desvio de 4,6 m. Como o navio estava fundeado em local abrigado e próximo ao instante de ocorrência do estofa de preamar, que ocorreu às 15:00 h, este comportamento não pode ser atribuído às variações da maré, cuja amplitude teórica máxima, durante o período de fundeio, foi de 0,2 m (DHN, 1997). Deste modo, supõe-se que as variações altimétricas decorreram das variações dos parâmetros latência, HDOP e n° de satélites, com os quais guardam uma certa correlação. Com relação à precisão das altitudes, pode-se afirmar, com base nos valores dos desvios padrão citados, que houve uma leve piora a partir das 15:14 h. Contudo, com relação à acurácia das mesmas, nada se pode garantir, já que

não se dispunha de um valor que pudesse ser tomado como referência. Entretanto, a avaliação da variação das altitudes está relacionada mais intimamente com a precisão dos valores do que com a acurácia dos mesmos. Assim, considerando-se todo o período de coleta (14:15 h às 16:00 h), as altitudes DGPS apresentaram uma média de 0,9 m e um desvio padrão de 4,8 m.

FIGURA 30 – VARIAÇÃO DO POSICIONAMENTO ALTIMÉTRICO DGPS

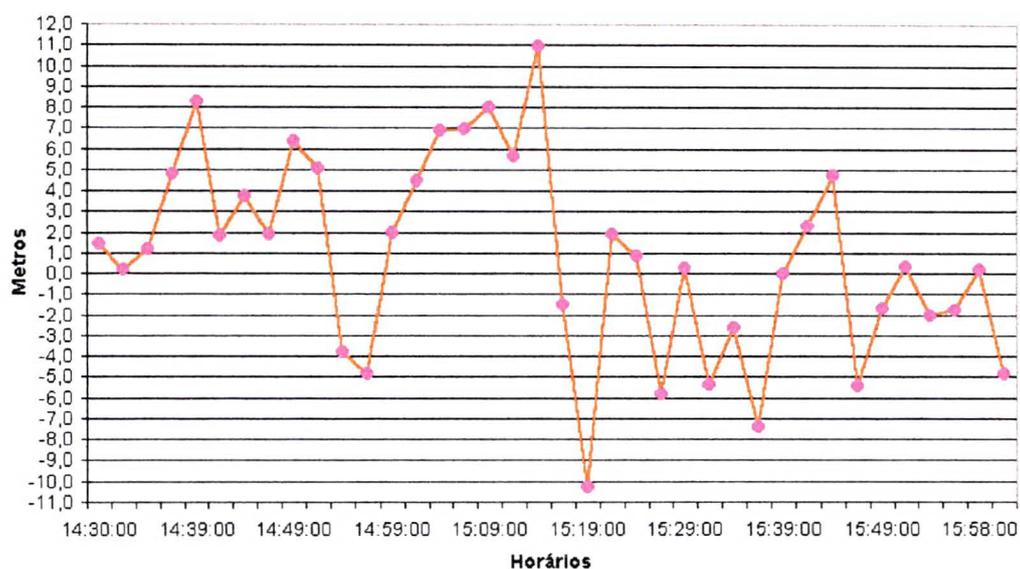
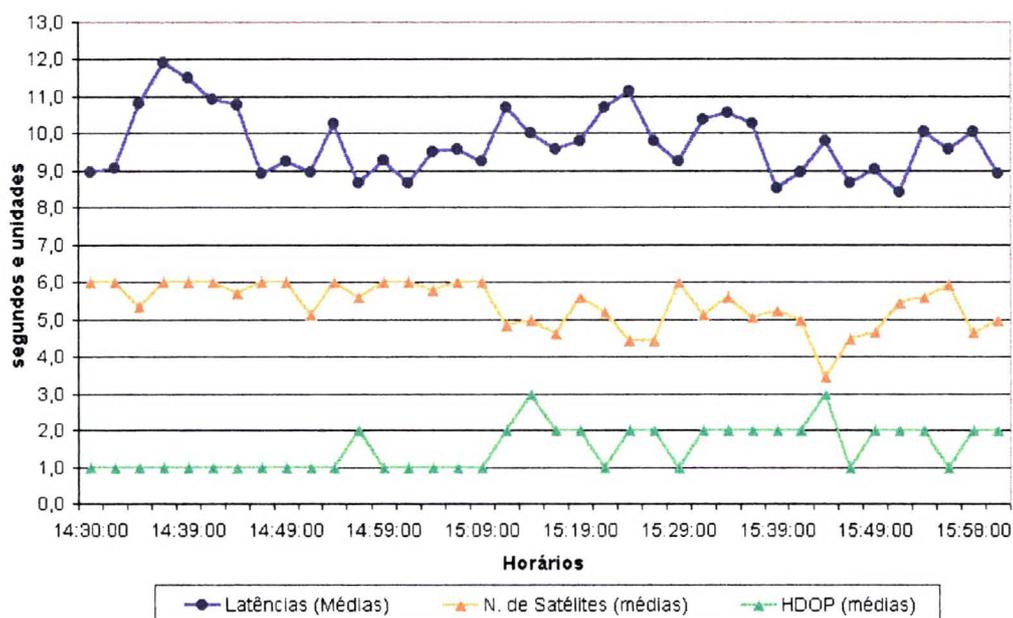


FIGURA 31 – VARIAÇÃO DE PARÂMETROS (LATÊNCIAS, HDOP, N.SATÉLITES)



3.5 FASE IV - ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.5.1 Correlação espacial e qualidade do posicionamento planimétrico DGPS

As comparações realizadas permitem a elaboração de uma proposta para expressar a qualidade posicional do método DGPS feito com base nas ERDGPS. Esta qualidade é aqui entendida como a caracterização da acurácia e da precisão das posições DGPS. A acurácia expressa o grau de conformidade de um resultado (ex: o valor médio de uma série de medições) com relação a um padrão tomado por referência. Está relacionada com a qualidade do resultado, vinculando-se a efeitos tanto de caráter aleatório quanto de caráter sistemático. A precisão expressa o grau de refinamento na realização de uma operação. Está relacionada com a qualidade da execução do processo de medição, vinculando-se a efeitos de caráter aleatório. Ela reflete a dispersão (variação) das medidas efetuadas em relação ao seu valor médio, sendo em geral quantificada pelo desvio padrão ou pelo erro médio quadrático das medições. Assim, pode-se entender que as equações 3.11, 3.13 e 3.15 representem a acurácia do posicionamento DGPS, dentro dos respectivos grupos de comparação, pois quantificam, através do valor médio do erro, o quanto o posicionamento DGPS está afastado do posicionamento tomado como verdadeiro. Neste caso, o padrão utilizado foram as posições advindas do pós-processamento dos dados GPS brutos. Por seu turno, as equações 3.12, 3.14 e 3.16 expressam a precisão do posicionamento DGPS, pois representam, através do desvio padrão do erro, a dispersão do erro posicional em relação ao seu valor médio.

Os resultados das comparações realizadas, a partir dos dados coletados ao longo da rota 1 (ida), são expressos pelas equações 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14 e os resultados decorrentes

da rota 2 (volta) são expressos pelas equações 3.15 e 3.16. Um breve exame das equações anteriormente mencionadas, revela que as 4 primeiras são coerentes entre si e se coadunam, qualitativamente, com conceito de que, o aumento da distância entre as estações implica o aumento do erro posicional. Porém, o mesmo não acontece com as duas últimas, as quais revelam uma relação em sentido inverso ao esperado (ver fig. 24 e 26), sugerindo haver uma melhora da qualidade posicional com o aumento da distância. Tal fato poderia ser decorrente de algum efeito, que teria interferido de maneira sistemática nos valores obtidos ao longo da rota de volta, o que vale dizer, ao longo do dia 13/nov, afetando as posições DGPS ou as pós-processadas, ou ambas. Após várias especulações, concluiu-se pela possibilidade deste fato estar relacionado com variações nas condições, que teriam ocasionado variações nos valores de refração troposférica. Assim, levantou-se a hipótese de que, durante a rota 1 (dia 12/nov), as condições atmosféricas sobre as estações de referência (PARA, UEPP e MOELA) e móvel (navio) fossem mais ou menos homogêneas, fazendo com que o efeito da refração troposférica tivesse um impacto menor sobre a acurácia das posições finais, pois seria em grande parte atenuado pela própria metodologia empregada nos posicionamentos. Por outro lado, durante a rota 2, que transcorreu em sua maior parte no dia 13/nov, teria havido mudança das condições atmosféricas, fazendo com que os efeitos troposféricos sobre as estações não fossem tão homogêneos quanto no dia 12, afetando a acurácia posicional de forma mais acentuada. Para testar essa hipótese, fez-se uma consulta ao SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná), recebendo-se em resposta, os pareceres técnicos emitidos pelo meteorologista Vilson Souza Ferreira (ver Anexo 2). Neles, fica atestado que, embora os dados de superfície não indicassem variação de parâmetros meteorológicos nos dias 12 e 13/nov, as imagens de satélite caracterizavam que em altitude, no decorrer do dia 13, as condições atmosféricas nos estados de São Paulo e Paraná eram distintas. Sendo assim, é

possível que os resultados da rota 2 (volta) tenham sofrido influências das variações ocorridas e, por conseguinte, não reflitam adequadamente o comportamento do erro do posicionamento DGPS. Decidiu-se então descartar tais resultados e trabalhar apenas com os resultantes da rota 1 (ida), o que vale dizer, com as equações 3.11 a 3.14.

Fazendo-se uma média entre os coeficientes angulares das equações 3.11 e 3.13, os quais caracterizam a taxa de variação do erro médio DGPS (m) em função da distância (km) à estação de referência, obtém-se o valor de 0,0115 (11,5 ppm). Este valor representa, quantitativamente, a correlação espacial do posicionamento. Fazendo-se o mesmo com os coeficientes lineares, que caracterizam o erro posicional DGPS na situação hipotética de as estações móvel e de referência serem coincidentes ($x = 0$), chega-se ao valor de 46,9 m. Este valor, que é muito superior ao esperado, deve-se a efeitos que afetaram de maneira sistemática os valores de erro calculados (ver 3.4.2). De acordo com o exposto em 2.1.5.3.5, seria razoável adotar-se, com uma confiabilidade de 95%, o valor de 5 m para tal coeficiente. Com isto, chega-se a seguinte equação:

$$E_{DGPS} = 5 + 0,0115 X \quad (3.19)$$

onde:

E_{DGPS} : erro médio do posicionamento DGPS, em metros;

X : distância entre as estações , em km.

Esta equação pode ser entendida como representativa da acurácia do posicionamento DGPS, pois traduz o afastamento (erro) deste em relação a um padrão adotado como verdadeiro.

Analogamente, fazendo-se uma média entre as equações 3.12 e 3.14, chega-se a seguinte equação:

$$\sigma_{DGPS} = 1,9 + 0,0025 X \quad (3.20)$$

onde:

σ_{DGPS} : desvio padrão do posicionamento DGPS, em metros;

X : distância entre as estações , em km.

A equação (3.20) pode ser entendida como representativa da precisão do posicionamento DGPS, pois indica a variação deste em relação ao seu valor médio.

Associando-se ambas equações (3.19 e 3.20), criou-se a tabela abaixo, na qual se tenta definir, de maneira discriminada, a qualidade do posicionamento DGPS. Vale ressaltar que, os intervalos de confiança propostos estão influenciados pela adoção do valor de 5 m como valor médio inicial do erro DGPS, cuja determinação fugiu da possibilidade do presente trabalho. Outro aspecto que merece destaque é que, sendo o alcance nominal dos sinais dos radiofaróis de 300 km, o posicionamento realizado com base nas ERDGPS, pode, a partir desta distância, apresentar degradação superior à proposta pelas equações mencionadas, tendo em vista que os desvanecimentos de sinais implicarão a utilização de correções com elevada latência. Tal aspecto torna-se ainda mais relevante durante o período noturno, que afeta o comportamento das transmissões eletromagnéticas da faixa de MF (ver 2.1.5.3.3).

TABELA 8 – ERRO DO POSICIONAMENTO PLANIMÉTRICO DGPS BASEADO NAS ERDGPS

Distância entre as estações (km)	Erro DGPS (m)		
	Média (E_{DGPS})	E.M.Q. ($\pm\sigma_E$)	Intervalo de confiança (95%) (média $\pm 2\sigma_E$)
0	5,0	1,9	1,2 – 8,8
50	5,6	2,0	1,6 – 9,6
100	6,2	2,1	2,0 – 10,4
150	6,7	2,3	2,1 – 11,3
200	7,3	2,4	2,5 – 12,1
250	7,9	2,5	2,9 – 12,9
300	8,5	2,6	3,3– 13,7

3.5.2 Latência das correções diferenciais

Partindo-se das equações 3.17 e 3.18 e seguindo raciocínio semelhante ao adotado no item anterior, foi possível construir-se a tabela abaixo, pela qual estipula-se o comportamento da latência das correções diferenciais.

TABELA 9 – LATÊNCIA DAS CORREÇÕES DIFERENCIAIS DAS ERDGPS

Distância entre as estações (km)	Latências (segundos)		
	Média	E.M.Q. ($\pm \sigma_E$)	Intervalo de confiança (95%) (média $\pm 2 \sigma_E$)
0	9,2	2,4	4,4 – 14,0
100	9,5	2,8	3,9 – 15,1
200	9,8	3,2	3,4 – 13,4
300	10,1	3,6	2,9 – 17,3

Conquanto, apareçam no intervalo de confiança, por força do conceito estatístico, valores menores que 4 s, em nenhum momento a latência das correções foi inferior a tal valor. Talvez, esta incongruência deva-se ao fato de os valores das latências não se apresentarem totalmente como uma distribuição de probabilidade Normal (Gaussiana).

Pode-se então esperar que, dentro das distâncias em questão (até $\cong 300$ km), as correções transmitidas pelas ERDGPS apresentem atrasos de 4 s a 17 s, com um valor médio de 9,5 s. Baseando-se no gráfico da fig. 3 (ver 2.1.5.3.5), isto implicaria um erro posicional médio de 1 m, podendo chegar até 3 m, em condições de SA elevada. Contudo, este erro já estaria em boa parte embutido nos intervalos de confiança apresentados na tabela 8.

3.5.3 Qualidade do posicionamento altimétrico DGPS

De acordo com o apresentado em 3.4.4, o posicionamento altimétrico DGPS apresentou um desvio padrão de 4,8 m, a uma distância de aproximadamente 270 km da estação de referência. Segundo HOFMANN (1994 p. 289), a acurácia para a altimetria DGPS é suposta como igual a do posicionamento planimétrico degradada por um fator de 1,5 a 2. Adotando-se um valor intermediário de 1,8 e multiplicando-o por 2,54 m, que é o desvio padrão planimétrico para a distância de 270 km (ver tabela 8), chega-se a 4,6 m, que é bastante coerente com o desvio verificado de 4,8 m (ver 3.4.4). Com isto é possível, generalizando este raciocínio, elaborar também uma tabela representativa da qualidade do posicionamento altimétrico DGPS. Partindo-se da tabela 8 e aplicando sobre seus valores um fator de 1,8, chega-se a tabela abaixo.

TABELA 10 – ERRO DO POSICIONAMENTO ALTIMÉTRICO DGPS BASEADO NAS ERDGPS

Distância entre as estações (km)	Erro DGPS (m)		
	Média (E_{DGPS})	E.M.Q. ($\pm \sigma_E$)	Intervalo de confiança (95%) (média $\pm 2 \sigma_E$)
0	9,0	3,4	2,2 - 15,8
50	10,1	3,6	2,9 - 17,3
100	11,2	3,8	3,6 - 18,8
150	12,1	4,1	3,9 - 20,3
200	13,1	4,3	4,5 - 21,7
250	14,2	4,5	5,2 - 23,2
300	15,3	4,7	5,9 - 24,7

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A implementação das Estações de Referência DGPS ao longo do litoral brasileiro, aproveitando como portadora os sinais dos radiofaróis marítimos, é mais um passo dado pelo Brasil para o aprimoramento de condições necessárias à manutenção da segurança à navegação na área marítima de sua responsabilidade. Estas estações oferecem aos usuários, devidamente equipados, que navegam em nossas águas jurisdicionais, a possibilidade de usufruírem gratuitamente do posicionamento DGPS, o qual propicia elevada acurácia em termos de posicionamento marítimo. Além da navegação regular, muitas outras atividades marítimas que também requeiram posicionamento contínuo, acurado e em tempo real têm-se beneficiado destas estações, destacando-se os levantamentos hidroceanográficos e os serviços de sinalização náutica. Tal fato tem acarretado o aumento do número de usuários destas estações, o que aliado ao aumento dos requisitos de acurácia para o posicionamento marítimo, especificados por diversos organismos internacionais (IMO, IALA, IHO), torna lícitos os estudos feitos com vistas a um melhor conhecimento da qualidade do posicionamento DGPS.

O objetivo deste trabalho foi a análise do posicionamento DGPS, dando ênfase à determinação da correlação espacial. Porém, dada a disponibilidade de dados, fez-se também a análise das latências das correções diferenciais e da variação do posicionamento altimétrico DGPS.

Os resultados alcançados indicam que o posicionamento planimétrico DGPS baseado na ERDGPS Moela apresentou uma degradação, em metros, na razão de 11,5 ppm da distância, em quilômetros, entre as estações de referência e móvel e desvio padrão de 1,9 m. Para o posicionamento altimétrico estes valores seriam majorados por um fator de 1,8. As correções diferenciais apresentaram valores de 4 a 17 s, com uma média de 9,5s. Contudo,

durante o período noturno, para distâncias entre 235 e 270 Km da estação de referência, foram constatados atrasos de até 80 s.

A ERDGPS Moela transmite correções de pseudodistância, obtidas por observações do código C/A, a uma taxa de 100 bps. Como todas as ERDGPS têm características operacionais muito semelhantes, é de se supor que estes resultados sejam válidos para o posicionamento feito com base em quaisquer uma delas. Em contrapartida, para estações de referência com características distintas das citadas, os resultados podem variar. Contudo, dentro de uma visão científica, vale destacar que, torna-se imperioso a realização de novos experimentos com vista a retificação ou ratificação dos resultados apresentados.

Como recomendações para futuros trabalhos, sugere-se:

- a) realizar estudo semelhante usando uma ERDGPS localizada em região cujas condições climáticas reinantes sejam distintas da ERDGPS Moela;
- b) realizar estudo que tente relacionar a variação do erro DGPS com as condições atmosféricas reinantes;
- c) rastrear todas as ERDGPS usando-se estações da RBMC como estações-base, de modo a obter-se coordenadas das ERDGPS com alto padrão de qualidade e quantificando-se a incerteza das coordenadas obtidas.
- d) estudo mais específico do valor do erro posicional DGPS nas imediações das ERDGPS, posto que este valor irá representar a acurácia inicial, a partir da qual se dá a degradação imposta pela correlação espacial. No presente trabalho adotou-se o valor de 5 m.
- e) estudo semelhante ao realizado neste trabalho, visando a análise da qualidade posicional RTK, posto que este método tem sido amplamente empregado no posicionamento marítimo de alta acurácia.
- f) estudo para analisar a influência dos erros (ou incertezas) que eventualmente existam nas coordenadas da estação de referência, sobre a posição DGPS final,

verificando se, de acordo com o tipo de correção diferencial usada (posição ou pseudodistância), existe uma maior ou menor propagação deste erro. Esta análise é importante pois, todo levantamento baseado no posicionamento DGPS está vulnerável a erros que por ventura afetem as coordenadas da estação de referência.

- g) estudo do efeito do período noturno sobre os sinais diferenciais das ERDGPS, tendo em vista que, neste período, aparentemente, as áreas afastadas além de 250 km da estação de referência estariam mais sujeitas a desvanecimentos.
- h) delimitação do alcance dos sinais das ERDGPS na área terrestre, pois até o momento só existe previsão para o alcance na área marítima (ver fig. 5).

ANEXO 1

Listagens do processamento das coordenadas da ERDGPS Moela

CAMPANHA MOELA
14:14

29-SEP-98

PARAMETERS:

STATION COORDINATES : 9
TOTAL # OF PARAMETERS : 9

PARAMETER CHARACTERIZATION LIST:

PARAM	TYPE	STATION NAME	COORDINATE
1	1	PARA	X
2	1	PARA	Y
3	1	PARA	Z
4	1	MOEL	X
5	1	MOEL	Y
6	1	MOEL	Z
7	1	VICO	X
8	1	VICO	Y
9	1	VICO	Z

UPPER TRIANGULAR PART OF VARIANCE-COVARIANCE MATRIX:

RMS OF UNIT WEIGHT: 0.0037 # OBS: 11618 # UNKNOWNNS: 48

ROW	COL	MATRIX ELEMENT
1	1	0.2499883906D-04
2	1	-0.1390446895D-09
2	2	0.2499804521D-04
3	1	-0.5363006653D-09
3	2	0.1776545607D-08
3	3	0.2498894941D-04
4	1	0.1055845240D-04
4	2	0.7347270828D-07
4	3	0.2977441060D-05
4	4	0.1354555837D+00
5	1	0.3321404082D-06
5	2	0.1357669501D-04
5	3	-0.4550997988D-05
5	4	-0.1668645213D-01
5	5	0.9446646779D-01
6	1	0.4006384466D-06
6	2	-0.8513076836D-06
6	3	0.1407526265D-04
6	4	-0.9669578343D-02
6	5	0.1713241563D-01
6	6	0.1677474540D-01
7	1	0.1174840434D-08
7	2	0.1322246965D-09
7	3	0.7000162946D-09
7	4	0.1439565798D-04
7	5	-0.2745127233D-06
7	6	-0.1868014063D-06
7	7	0.2499880715D-04
8	1	0.1149799417D-09
8	2	0.1950253090D-08
8	3	-0.1824322741D-08
8	4	-0.1129643355D-06
8	5	0.1139391103D-04
8	6	0.8114679196D-06
8	7	-0.1127917146D-09
8	8	0.2499808123D-04
9	1	0.4774900104D-09
9	2	-0.1771223619D-08
9	3	0.1120119477D-07
9	4	-0.3252116819D-05
9	5	0.4664723582D-05
9	6	0.1098578924D-04
9	7	-0.6411364259D-09
9	8	0.1917603366D-06
9	9	0.2498902196D-04

COMBINATION OF NORMAL EQUATIONS OF DIFFERENT SOLUTIONS
 CAMPANHA MOELA

PROGRAM ADDNEQ 29-SEP-96 14:14
 BERNESE GPS SOFTWARE VERSION 4.0

LIST OF INPUT AND OUTPUT FILENAMES

```

GENERAL CONSTANTS      : X:\GEN\CONST.
STATION CRUX FILE      : X:\GEN\STACRUX.
SATELLITE PROBLEMS    : X:\GEN\SAT_1998.CRX
SATELLITE INFORMATION : X:\GEN\SATELLIT.TTT
SINEX GENERAL INPUT FILE : X:\GEN\SINEX.
POLE INFORMATION (SCRATCH) : U:\WORK\AGE0E1.SCR
LOCAL GEODETIC DATUM  : X:\GEN\DATUM.
A PRIORI COORDINATES  : ---
SPECIAL FIXING VELOCITIES : ---
A PRIORI VELOCITY FIELD : ---
SPECIAL FIXING COORDINATES : X:\MOELA\STA\RINEX.CRD
BASELINE DEFINITION FILE : ---
SITES FOR REPEATABILITY : ---
COORDINATE RESULTS    : X:\MOELA\STA\AJUSCIR2.CRD
VAR/COVAR MATRIX COORD. : ---
VAR/COVAR MATRIX TOTAL : X:\MOELA\OUT\COV146.COV
IONOSPHERE RESULTS    : ---
NORMAL EQUATIONS OUTPUT : ---
PLOT RESULTS          : ---
VELOCITY RESULTS      : ---
TROPOSPHERE CORRECTIONS : ---
EARTH ROTATION PARAMETERS : ---
IERS FORMAT ERP OUTPUT : ---
TRANSLATION TABLE (NUVELL) : ---
HELMERT TRANSFORMATION PARAM: ---
SINEX FORMAT (CRD,VEL,ERPS) : ---
INTERNAL ALX FILE     : U:\WORK\ADDNEQ.SCR
COVARIANCE COMPONENTS INPUT : ---
COVARIANCE COMPONENTS ESTIM. : ---
ALX FILES FOR COV-COMP-EST. : U:\WORK\ADD
REF. STAT. FOR COV-COMP-EST. : ---
    
```

LIST OF NORMAL EQUATION FILES

NUMBER OF NORMAL EQUATION FILES: 2

FILE	FILE NAME	#PAR/COV-FAC.	TITLE
1	X:\MOELA\OUT\NEQP146.NEQ	6	1MOELA
2	X:\MOELA\OUT\NEQV146.NEQ	6	1MOELA

1

LIST OF STATIONS

TOTAL NUMBER OF STATIONS: 3

NUM	STATION	VELO	R	#FIL	L2
2	PARA	1	F		
1	MOEL	2	XX		
3	VICO	1	F		

FLAGS: W: WEIGHTS, F: FIXED, N: FREE NETWORK RESTRICTIONS, X: FREE ESTIM.
 R: REFERENCE FOR COVARIANCE COMPONENT ESTIMATION

RESTRICTIONS FOR STATION COORDINATES / VELOCITIES :

	COORDINATES						VELOCITIES							
	X	Y	Z	W1	W2	W3	M	X	Y	Z	W1	W2	W3	M
HELMERT RESTRICTIONS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

RESTRICTIONS/FIXING CONCERNING SPECIAL COORDINATES/VELOCITIES :

COORDINATES	VELOCITIES
X:\MOELA\STA\RINEX.CRD	

A PRIORI SIGMAS FOR STATION COORDINATES / VELOCITIES :

NUM	STATION NAME	SIGMAS IN LOCAL GEODETIC DATUM			VELOCITIES (MM/YEAR)			UP	RELATIVE
		NORTH	EAST	UP	NORTH	EAST	UP		
2	PARA	0.00001	0.00001	0.00001					
3	VICO	0.00001	0.00001	0.00001					

EPOCH: 1958-11-17 0:00:00
 VELOCITY MODEL INTRODUCED TO INDIVIDUAL SOLUTIONS: ZERO VELOCITY FIELD

NUM	STATION	#FIL	FLG	X (M)	RMS1	RMS2	Y (M)	RMS1	RMS2	Z (M)	RMS1	RMS2	RMS1-RMS2
0	PARA	1	F	3763751.6390	0.0000	0.0000	-4365113.7680	0.0000	0.0000	-1724404.7550	0.0000	0.0000	0.0000
1	MOEL	2	M	4029039.7097	0.0014	0.0298	-4210758.2862	0.0011	0.0099	-1550120.6442	0.0005	0.0042	0.0017
3	VICO	1	F	4373283.3250	0.0000	0.0000	-4059639.0080	0.0000	0.0000	-2046259.7960	0.0000	0.0000	0.0000

COMPARISON OF COMBINED SOLUTION WITH INDIVIDUAL SOLUTIONS

LIST OF RMS VALUES

FILE	FILE NAME	RMS (SINGLE DIFFERENCE)	#OBS	#PAR (ORIG.)	#PAR (SOLVED)	MUT
1	X:\MOELA\OUT\NEQP146.NEQ	0.0047	5613	24	6	50959.68273
2	X:\MOELA\OUT\NEQV146.NEQ	0.0042	6005	27	6	50959.63273
		0.0052	11618	48	9	0.00000

FINAL LIST OF COVFACTOR VALUES:
 ITERATION NECESSARY : NO

FILE	FILE NAME	VALUE	RMS	GRP
1	X:\MOELA\OUT\NEQP146.NEQ	1.0000	0.000000	
2	X:\MOELA\OUT\NEQV146.NEQ	1.0000	0.000000	

COMPARISON OF STATION COORDINATES WITH RESPECT TO THE COMBINED SOLUTION IN MM
 - UNWEIGHTED RMS OF INDIVIDUAL COORDINATE RESIDUALS

TOTAL NUMBER OF STATIONS: 3

NUM	STATION	#FIL	C	RMS	1	2
2	PARA	1	N	0.0	0.0	
			E	0.0	0.0	
			U	0.0	0.0	
1	MOEL	2	N	22.4	6.6	-21.4
			E	29.7	-21.3	20.6
			U	44.2	-40.8	16.8
3	VICO	1	N	0.0	0.0	
			E	0.0	0.0	
			U	0.0	0.0	

UNWEIGHTED RMS VALUES WITH RESPECT TO THE COMBINED SOLUTION IN MM

TOTAL NUMBER OF STATIONS: 3

	#FIL	C	RMS	1	2
COMBINATION	2	N	12.9	6.6	21.4
		E	17.1	21.3	20.6
		U	25.5	40.8	16.8
	#STA		3	2	2
	FAC			26.83	32.56

OUTLIER DETECTION USING THE MEAN REPEATABILITY RMS OF EACH COMPONENT
 DETECTION LEVEL (RESIDUUM/RMS): 3.00
 NORTH: 0.039, EAST: 0.011, UP: 0.076 (M)

FILE	STATION	COMPONENT	RESIDUUM(M)	RMS(M)	RMS*FAC(M)	GRP
------	---------	-----------	-------------	--------	------------	-----

UNWEIGHTED RMS VALUES OF THE COMPARISON BETWEEN THE SOLUTIONS IN MM

TOTAL NUMBER OF STATIONS: 3

	FIL	C	1
2	N		0.0
	E		0.0
	U		0.0
	#STA		1

ANEXO 2

PARECER TÉCNICO

Seguem as cópias das mensagens tramitadas, atinentes à consulta sobre as condições meteorológicas reinantes nas regiões de coleta de dados e das estações de referência, no decorrer dos dias 12 e 13/nov/98. A consulta foi encaminhada ao Sr. Vilson Souza Ferreira, meteorologista do SIMEPAR, o qual deu seu parecer técnico sobre a questão.

-----Mensagem original-----

De: Vilson Souza Ferreira <ferreira@simepar.br>
Para: briones@brhs.com.br <briones@brhs.com.br>
Data: Quarta-feira, 20 de Outubro de 1999 10:17
Assunto: situação atmosférica

Caro Alexandre,

Através da análise dos dados meteorológicos e imagens de satélite nota-se que nos dias 12 e 13 de novembro de 1998, uma frente fria permaneceu atuando na região Sudeste do País. Este sistema, cuja banda principal de nuvens se localizava sobre o RJ, ES e MG, instabilizava as regiões Leste de SP e a umidade associada a passagem deste sistema, também mantinha muita umidade e nuvens baixas no Leste Paranaense. O cavado do sistema frontal oscilava ate a altura de SP, o que gerou a formação, no dia 12, de um CCM (complexo Convectivo de Meso-Escala) no MS que se deslocou durante o dia provocando instabilidades em todo o Estado de SP e Norte e Nordeste do PR. No dia 13 de novembro de 1998, o cavado da frente fria, associado ao deslocamento de umidade desde o MS e do Paraguai, provocou a formação de áreas de instabilidade que provocaram chuvas fracas e isoladas no Leste do Paraná e possivelmente de SP (não tenho dados deste estado) e o tempo permaneceu a maior parte do período nublado.

Salienta-se contudo, que não foram observados durante este período, variações significativas nas variáveis temperatura e umidade relativa em superfície mas, nota-se nos níveis de 850 e 700 hPa (milibares) um aumento de umidade e o conseqüente aumento de nuvens, o que demonstra que houve um aumento na liberação de calor latente e conseqüentemente aumento de calor sensível, o que sempre provoca um aumento de temperatura dentro da camada considerada. Resumindo, as variações mais significativas nos campos meteorológicos devem ter ocorrido nos níveis superiores, pois na superfície não tivemos grandes variações de umidade e temperatura.

.....
Um abraço

Vilson Souza Ferreira
Meteorologista
Sistema Meteorologico do Parana
SIMEPAR - Fone/Fax - 041 3663003Curitiba – PR
CxP – 19100
CEP - 81531-990 Centro Politecnico
Curitiba - PR

-----Mensagem original-----

De: ALEXANDRE BRIONES <briones@brhs.com.br>
 Para: Vilson Souza Ferreira <ferreira@simepar.br>
 Data: Quinta-feira, 21 de Outubro de 1999 20:17
 Assunto: Re: situação atmosférica

Prezado Vilson,

Antes de mais nada agradeço-lhe a gentileza do envio de seu parecer. Contudo há um aspecto que se pudesse ser caracterizado poderia auxiliar ainda mais algumas conclusões. A questão é a seguinte:

Eu trabalhei com 3 estações de posicionamento. Uma localizada próximo a Santos (leste de SP), outra em Presidente Prudente (Oeste de SP, Norte de PR) e outra aqui em Curitiba. Caso todas elas estivessem sob condições atmosféricas mais ou menos homogêneas o posicionamento não seria muito afetado. Porém se as condições fossem desiguais poderia haver problemas. No processamento realizado, as posições obtidas no decorrer do dia 12 se comportaram como esperado, porém as do dia 13, não. Dentro dos dados que você dispõe, é possível caracterizar que no dia 12 essas 3 regiões estivessem sob condições semelhantes, e que no decorrer do dia 13 tenha havido alguma mudança que levasse a condições diferentes entre uma ou duas delas?

Se não me engano, quando estive com você aí no SIMEPAR, as imagens satélites sugeriam que no dia 13 a área de instabilidade que já se encontrava próximo ao RJ, regride para o sul, atingindo inicialmente o leste de SP e em seguida o PR. Caso seja possível caracterizar isto, terei alguma explicação para justificar os resultados do dia 13. Desde já agradeço.

Cordialmente,
 Alexandre Borges Briones

-----Mensagem original-----

De: Vilson Souza Ferreira <ferreira@simepar.br>
 Para: ALEXANDRE BRIONES <briones@brhs.com.br>
 Data: Sexta-feira, 22 de Outubro de 1999 10:52
 Assunto: Re: situação atmosférica

Alexandre,

O amigo tem razão. Eu esqueci de citar este detalhe, importante diga-se de passagem. Realmente no dia 12 as condições atmosféricas não sofreram grandes modificações, se mantendo estáveis (tempo instável sem modificações durante o dia) tanto em Curitiba quanto no Oeste e no Leste de SP. No dia 13 o cavado da frente fria oscilou, tendo um pequeno recuo, em relação a posição em que se encontrava no dia 12. Isto provocou uma maior instabilidade e favoreceu inclusive a formação da área de instabilidade no Mato Grosso do Sul que atingiu SP pelo Oeste e no decorrer do dia também o Leste de SP e do PR. Não possuo dados de SP para comparar com Curitiba, mas pelas imagens de satélite a posição do cavado da frente fria, estava mais próximo de SP e a nebulosidade associada a área de instabilidade, atingiu uma área maior e por mais tempo, também em SP, o que é uma indicação de maior instabilidade nas regiões localizadas no Estado Paulista.

Abraços

.....
 Vilson Souza Ferreira

Meteorologista

Sistema Meteorológico do Paraná

SIMEPAR - Fone/Fax - 041 3663003

Curitiba - PR

CxP - 19100

CEP - 81531-990 Centro Politecnico

Curitiba - PR

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. **Cárta náutica nº 1701**. 6. ed. Rio de Janeiro, 1990. 663,6 x 963,1 mm. Escala 1:23.000.
- 2 _____. **Lista de auxílios-rádio**. 11. ed. Rio de Janeiro, 1992.
- 3 _____. **Tábuas das Marés para 1998**. 35. ed. Rio de Janeiro, 1997.
- 4 GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações : aplicações geodésicas**. Curitiba : UFPR, 1994.
- 5 HOFMANN-WELLNHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS : theory and practice**. 3. ed.(revised). New York : Springer-Verlag Wien, 1994.
- 6 INTERNATIONAL HYDROGRAFIC ORGANIZATION. **Special publication nº 44**. 4. ed. Monaco, 1997.
- 7 JIN, X.; MAREL, H.V.; JONG, C.D. **Computation and quality control of differential GPS corrections (198-?)**.
- 8 KALAFUS, R.M.; DIERENDONCK, A.J.V.; PEALER, N.A. Special committee 104 : recomendations for differential GPS service. **Journal of The Institute of Navigation**, v. 33, n. 1, p. 26-41, Spring 1986.
- 9 KRUEGER, C.P. **Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito marinho**. Curitiba, 1996. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.
- 10 LANGLEY, R. Communications links for DGPS. **GPS World**, p. 47-51, May 1993.
- 11 _____. RTK GPS. **GPS World**, p. 70-72 e 74-76, September 1998.
- 12 MIGUENS, A.P. O emprego de GPS Diferencial utilizando a transmissão dos radiofaróis. **Revista Marítima Brasileira**, Rio de Janeiro, p.85-107, 3. trim. 1995.

- 13 _____. **Navegação** : a ciência e a arte. Rio de Janeiro : DHN, v. 1, 1996.
- 14 RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR MARITIME SERVICES. **RTCM recommended standards for Differential NAVSTAR GPS service**, v. 2.1. Washington, D.C., 1994.
- 15 RICHARDUS, P.; ADLER. R.K. **Map projections** : for geodesists, cartographers and geographers. Amsterdam : North-Holland Publishing Company, 1972.
- 16 SEEBER, G. **Satellite geodesy** : foundations, methods, and applications. Berlin; New York : Walter de Gruyter, 1993.
- 17 WELLS, D.E. et al. (1986). **Guide to GPS positioning**. Canadian GPS associates, Fredericton, N.B., Canada. cap. 9.