
ANÁLISE DA ACURÁCIA HORIZONTAL DO POSICIONAMENTO GPS DIFERENCIAL EMPREGADO EM LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS A PARTIR DE SISTEMAS DGPS, RTK E RTG

ALEXANDRE MOREIRA RAMOS^{1,2}
DIULIANA LEANDRO¹
SUELEN CRISTINA MOVIO HUINCA¹
CLÁUDIA PEREIRA KRUEGER¹

¹Universidade Federal do Paraná - UFPR
Setor de Ciências da Terra
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - CPGCG, Curitiba - Pr
{diuliana, suelenhuinca, moreira.ramos, ckrueger}@ufpr.br

²Centro de Hidrografia da Marinha - CHM
Rua Barão de Jaceguai s/n, Ponta da Armação
CEP 24048-900, Niterói, Rio de Janeiro

RESUMO - A análise da acurácia de uma plataforma móvel no mar não é uma tarefa simples, uma vez que exige a obtenção de pontos de controle acurados, tomados como verdadeiros para comparação com as posições observadas. Nesse trabalho foi avaliada a acurácia horizontal do posicionamento GPS em tempo real de uma embarcação durante operações no mar, empregando o método diferencial a partir de observações da fase do código (sistemas DGPS), e da fase da onda portadora (sistemas RTK). É apresentada também uma análise do sistema RTG (*Real Time GIPSY*), baseado em correções para as órbitas e relógios dos satélites, a partir de uma rede global de estações de referência, possibilitando precisões horizontais decimétricas. As coordenadas padrão foram obtidas através do método relativo cinemático (pós-processado). Os resultados indicam a adequabilidade dos sistemas RTK e RTG às especificações para o posicionamento horizontal recomendadas pela IHO (*International Hydrographic Organization*) para Levantamentos Hidrográficos de Ordem Especial. Contudo, os sistemas DGPS dependem do estudo dos erros correlacionados com a distância, sendo recomendados para levantamentos de Primeira Ordem. As acurácias 2dRMS dos sistemas RTK e RTG foram, respectivamente, de 24 cm e 64 cm, enquanto os sistemas DGPS variaram entre 1 e 3 metros.

1 INTRODUÇÃO

Os Levantamentos Hidrográficos são abordados neste trabalho sob o enfoque da Cartografia Náutica, compreendendo um conjunto de atividades executadas na obtenção de dados batimétricos, geológicos, maregráficos, fluviométricos, topo-geodésicos, oceanográficos e geofísicos, em áreas marítimas, fluviais, lacustres e em canais artificiais, navegáveis ou não, cujo propósito principal é a segurança da navegação. Todas estas operações são realizadas de forma sistemática, permitindo o georreferenciamento dos dados coletados.

A Marinha do Brasil é responsável pela elaboração e execução do Plano Cartográfico Náutico Nacional, além do estabelecimento de Normas Técnicas concernentes às Cartas Náuticas de qualquer escala (BRASIL, 1967). Tais Normas são elaboradas segundo padrões internacionais de qualidade recomendados pela IHO (*International*

Hydrographic Organization), que classifica os Levantamentos Hidrográficos em quatro tipos principais, de acordo com a acurácia requerida pela navegação em função das características de cada área, visando garantir a segurança do navegante. A Tabela 1 apresenta os requisitos de acurácia horizontal (nível de confiança de 95%) em cada área típica, de acordo com a classificação dos levantamentos.

Os métodos empregados para o posicionamento dinâmico no mar é um dos fatores determinantes da qualidade da coleta sistemática dos dados georreferenciados. Classicamente, a embarcação de sondagem era posicionada através de medidas tomadas a partir de um ponto de apoio em terra, utilizando relações geométricas simples. No entanto, tanto a precisão fornecida por esses métodos, como a sua onerosidade tornou-os inviáveis, do ponto de vista prático. A incorporação de novas tecnologias, sobretudo com o advento das técnicas espaciais, permitiu um ganho

significativo de qualidade do posicionamento horizontal, além de possibilitar uma independência dos pontos de apoio em terra.

Tabela 1 - Requisitos de acurácia horizontal

Ordem	Exemplos de Áreas Típicas	Acurácia Horizontal (Nível de Confiança de 95%)
Especial	Portos, atracadouros e canais críticos associados com folgas mínimas sob a quilha.	2 m
1	Portos, canais de aproximação de portos, rotas recomendadas e áreas costeiras com profundidades menores que 100 m.	5 m + 5% da profundidade
2	Áreas não abrangidas pela Ordem Especial e 1, ou com profundidades menores que 200 m.	20 m + 5% da profundidade
3	Áreas oceânicas não abrangidas pelas Ordens anteriores.	150 m + 5% da profundidade

Fonte: Adaptado de IHO (1998).

A DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação) passou a utilizar o posicionamento GPS diferencial, baseado em observações da fase do código (sistemas DGPS), a partir de 1993 (MIGUENS,1996,p.1388), disponibilizado através de implantação de uma rede de estações de referência próximas aos radiofaróis. Em 1999, a técnica RTK foi empregada pela primeira vez em levantamentos hidrográficos na Marinha (DHN,2003,p.24). Mais tarde foram adquiridas assinaturas do serviço WADGPS OmniSTAR, que em função do alto custo, ficou restrito a apenas alguns levantamentos em áreas onde não fosse possível utilizar as correções diferenciais baseadas em Radiofarol.

O objetivo deste trabalho é avaliar a acurácia obtida pelos principais sistemas atualmente empregados para o posicionamento horizontal de uma embarcação de sondagem. Para isto foram instalados dois sistemas RTK (Trimble 7400 e FlexPak), um sistema RTG C-Nav e dois sistemas DGPS (Trimble NT200D e Ashtech Z-XII) a bordo da lancha balizadora “SO OLIVEIRA”, e analisados seus respectivos desempenhos durante um levantamento batimétrico realizado na Baía de Guanabara (RJ), em uma área representada na Figura 1. Os sistemas RTK e RTG foram associados ao sensor inercial TSS335B, para correção dos efeitos decorrentes da variação de atitude da embarcação, de modo pós-processado através do programa de aquisição automática HYPACK.

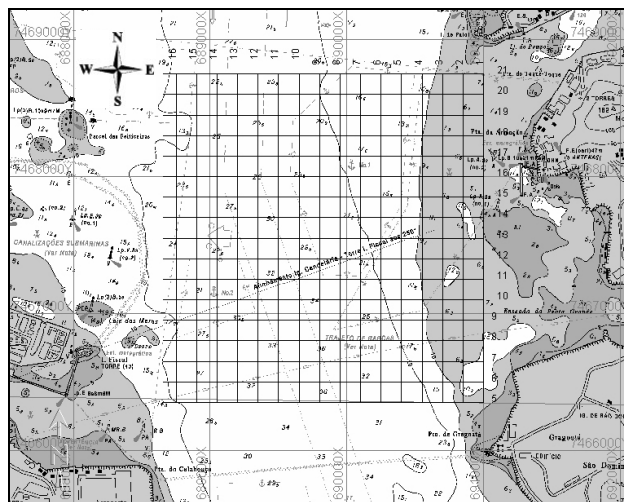


Figura 1 – Área de Estudo – Baía de Guanabara.

Foram planejados perfis ortogonais nos sentidos Norte-Sul e Leste-Oeste (Figura 1), com um espaçamento de 150 metros, totalizando 44,8 milhas náuticas (aproximadamente 82,9 km) percorridas a uma velocidade média de 6 nós. A área situa-se entre a Ponta da Armação – Niterói e a Ilha Fiscal - Rio de Janeiro. As estações de referência dos sistemas RTK e do DGPS Ashtech Z-XII foram instaladas na Ponta da Armação, de modo que a distância máxima aos receptores móveis fosse de aproximadamente 4 km. O DGPS Trimble NT200D utiliza a estação de referência do radiofarol da Ilha Rasa, distante 34 km da área de trabalho. O sistema RTG dispensa a instalação de estações de referências próximas, conforme será abordado na seção 3.

2 MÉTODOS DIFERENCIAIS DE POSICIONAMENTO GPS

O princípio básico do método diferencial consiste no posicionamento em tempo real de uma estação móvel através das correções diferenciais geradas na estação de referência (KRUEGER, 1996). As correções diferenciais podem ser geradas a partir de observação da fase do código, da portadora, ou código suavizado pela portadora. Na prática tem-se empregado o termo DGPS para o posicionamento diferencial em tempo real empregando-se correções de posição ou pseudodistância a partir de observações do código e código suavizado pela onda portadora, e o termo RTK, quando o posicionamento diferencial é obtido a partir de medidas brutas de fase da onda portadora ou correções diferenciais de fase da portadora. As técnicas diferenciais baseadas na observação da fase da portadora são capazes de alcançar elevada acurácia de posicionamento em função da maior precisão obtida através das observáveis de fase da portadora. A validação destas correções diferenciais torna-se menos efetiva a medida que aumenta a distância entre as estações móvel e de referência, degradando progressivamente a qualidade do posicionamento (BRIONES, 1999).

Para minimizar as perdas de qualidade do posicionamento diferencial em função da distância,

desenvolveu-se o conceito das redes de estações de referência, sob duas abordagens distintas: no domínio das medidas e a representação espaço de estado (HOFMANN-WELLENHOF, 2003, p.201). A primeira abordagem baseia-se na transmissão e aplicação de correções diferenciais escalares (PRCs e RRCs) na estação móvel, a partir de uma estação referência mais próxima, ou de uma média das correções de um conjunto de estações, empregando o conceito de estação de referência virtual (VRS - *Virtual Reference Station*) e correções FKP, ou o conceito *Master-Auxiliary* (MAC - *Master Auxiliary Concept*), que constitui a base das mensagens dos padrões RTCM 3.0 (2004) e 3.1 (2006), que serão abordadas na seção 2.4.1.2. Este tipo de abordagem exige uma alta densidade de estações de referência, e é adotada nos serviços PDGPS (*precise DGPS*).

A abordagem espaço de estado compreende uma rede global de estações de referência, empregando receptores de dupla frequência utilizados para gerar soluções livres dos efeitos ionosféricos para cálculo de correções das órbitas dos satélites e erros dos relógios. As correções orbitais são transmitidas como vetores tridimensionais que correlacionam a posição verdadeira do satélite aos parâmetros orbitais presentes nas efemérides transmitidas. As correções ionosféricas são modeladas, normalmente, a partir das mensagens TEC (*total electron content*), em função da hora local, latitude, ciclo de atividades solar e outros fatores (HOFMANN-WELLENHOF, 2003, p.201). São empregados ainda modelos troposféricos. Todas as informações de correções são interpoladas para a posição do usuário e transmitidas através de satélites geoestacionários. Esta abordagem requer uma densidade menor de estações de referência e possibilita alcances muito maiores, sendo denominadas WADGPS (*Wide Area DGPS*).

O WADGPS pode ser implementado através de sistemas regionais ampliados, denominados SBAS (*Satellite Based Augmentation System*), onde além das correções diferenciais, sinais para aumento da confiabilidade e integridade da rede são transmitidos via satélite para as estações móveis (LEICK, 2004). Há ainda outros sistemas WADGPS, disponibilizados por provedores comerciais, entre eles pode-se citar: OmniSTAR, StarFix-Plus e StarFix-HP (Fugro Chance, Inc.), SkyFix XP (Thales Geosolutions Group Ltd.) e C-Nav/StarFire (C&C Technologies, Inc.). Este último emprega a técnica RTG (*Real Time GIPSY*).

3 TÉCNICA REAL TIME GIPSY (RTG)

Esta técnica é incorporada por alguns serviços comerciais WADGPS, que provêm correção diferencial global GPS (GDGPS - *Global Differential GPS*). A tecnologia GDGPS foi financiada pelo *NASA's Earth Science Technology Office* e desenvolvida pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) em apoio a missões científicas, em qualquer parte do planeta, que necessitavam de posicionamento em tempo real com acurácias compatíveis com as obtidas em métodos pós-processados (ARROYO-

SUAREZ et al., 2005). Baseados em melhorias e refinamentos do algoritmo GIPSY-OASIS II (*GPS Inferred Positioning SYstem and Orbit Analysis Simulation Software*), foi desenvolvido o *Real Time GIPSY* (RTG), que estima e modela com precisão vários parâmetros e fontes de erros dos satélites GPS, através de dados recebidos em tempo real, via Internet, de uma rede global de estações de referência, gerando correções para as órbitas e relógios de cada satélite GPS ativo, que são retransmitidas para os usuários através da Banda-L dos satélites de comunicação INMARSAT (1525-1565 MHz).

A rede C-Nav GcGPS é formada por 53 estações de referências, operadas pela NavCom e JPL, sendo quatro estações principais (*Master*) e três NPH (*Network Processing Hubs*). São empregados ainda três satélites geo-estacionários de comunicações.

Os NPH processam as observações GPS brutas de dupla frequência oriundas das estações de referência da rede, e geram um conjunto de correções RTG, baseadas em combinações lineares livres dos efeitos ionosféricos. Estas correções são transmitidas, via *link* de comunicações terrestres, aos centros de controle dos satélites geo-estacionários para retransmissão aos usuários do sistema (HUDSON e SHARP, 2001). Observações GPS de dupla frequência e o emprego de modelos troposféricos, pelos receptores dos usuários, possibilitam precisões horizontais subdecimétricas, segundo os fabricantes.

O C-Nav (*C&C Technologies, Inc.*) é uma versão do sistema StarFire (*Navcom e Ag Management Systems - AMS*) para aplicações em ambiente marinho, baseado em uma arquitetura de dupla frequência, com correções das órbitas e dos relógios dos satélites geradas a partir de uma rede global de estações de referência operada pela NavCom e JPL. Os efeitos troposféricos são modelados pelo modelo UNB3¹, enquanto o multicaminho é minimizado através da aplicação de avançadas técnicas de suavização da portadora (CLARKE et al., 2005). Depende da aplicação de correções das marés terrestres, não necessárias nos sistemas RTK em função das linhas de bases curtas sofrerem as mesmas influências (ARROYO-SUAREZ et al., 2005).

Neste trabalho foi utilizado o sistema C-Nav da *C&C Technologies Inc.*, empregando-se o receptor C-Nav 2050M, que consiste em uma antena de três bandas (L1, L2 e L-INMARSAT) que integra também um demodulador para o sinal de correções INMARSAT, além da unidade receptora.

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais e Métodos

A análise da acurácia de uma plataforma móvel no mar não é uma tarefa simples, uma vez que exige a obtenção de pontos de controle mais acurados, tomados

¹ Modelo para cálculo das variações regionais e sazonais do atraso troposférico, baseado nos algoritmos de atraso zenital de Saastamoinen, funções de mapeamento de Niell e uma tabela de parâmetros atmosféricos (COLLINS e LANGLEY, 1999).

como “verdadeiros” para comparação com as posições observadas. Foi empregada a metodologia apresentada por BRIONES (1999) e BISNATH et al (2003), onde as posições observadas são comparadas a trajetórias padrão, compostas por pontos determinados a partir do processamento relativo cinemático das observações brutas GPS.

A disposição das antenas GPS a bordo da lancha “SO OLIVEIRA” é apresentada na Figura 2.

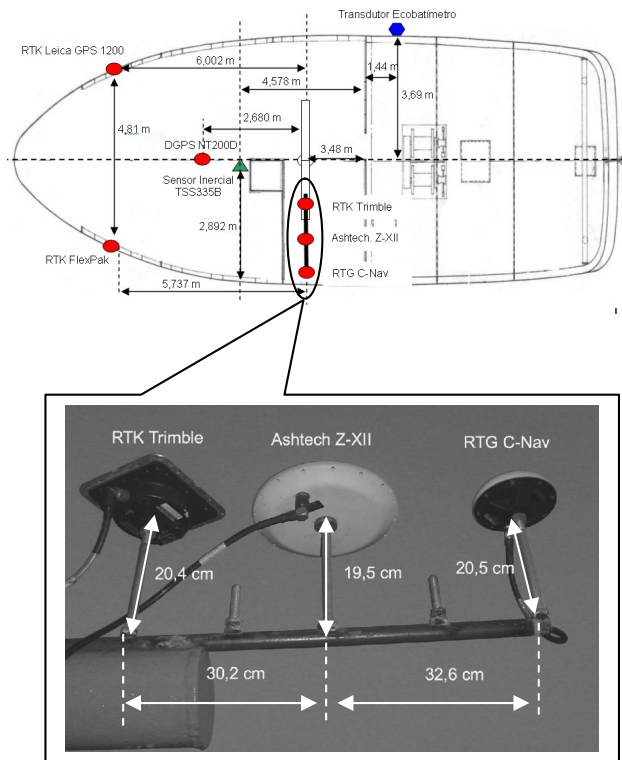


Figura 2 - Disposição dos sensores a bordo da embarcação de sondagem

Para a determinação das trajetórias padrão foram empregados os receptores Ashtech Z-XII e Leica GX1230, que serviram de referência para análise da acurácia dos sistemas RTK (Trimble e FlexPak), RTG C-Nav e DGPS (Ashtech Z-XII e Trimble NT200D). As taxas de gravação e o subsequente número de amostras utilizadas em cada análise são sumarizadas na Tabela 2. Os índices estatísticos que sumarizam as análises foram o erro máximo (maior desvio encontrado em relação a coordenada padrão), erro médio (média das diferenças em relação às coordenadas padrão), desvios padrão dos erros obtidos e erro médio quadrático (R.M.S.), ao nível de significância de 95%, para as componentes em latitude e longitude.

As posições observadas foram obtidas a partir das mensagens NMEA \$GPGGA de cada equipamento gravadas nos arquivos brutos gerados pelo programa de aquisição automática HYPACK (Trimble, FlexPak e C-Nav), ou através do programa de comunicação HyperTerminal (Sistemas DGPS), durante a sondagem.

Tabela 2 - Referências para análise de acurácia

Coordenadas Padrão	Taxa de gravação (s)	Coordenadas Observadas	Amostras	Dia
Ashtech Z-XII	1	RTK Trimble	18086	28
Ashtech Z-XII	1	RTG C-Nav	18083	28
Ashtech Z-XII	3	DGPS Trimble NT200D	2604	26
Ashtech Z-XII	3	DGPS Ashtech Z-XII	1487	26
Leica GX1230	3	RTK FlexPak	7677	28

NOTA: Dados coletados durante os levantamentos hidrográficos realizados no mês de Julho/2006.

4.2 Redução das Excentricidades

A análise de acurácia em uma plataforma móvel exige que tanto as posições observadas, quanto as trajetórias padrão, estejam referidas ao mesmo ponto. Para isto, seria necessário que os receptores utilizassem, de forma comum, a mesma antena, através de um dispositivo divisor de sinal (*splitter*). Como não foi possível a aplicação deste procedimento, foi necessário efetuar a redução de excentricidade entre as antenas dos receptores analisados e àqueles tomados como referência para geração das trajetórias padrão (Ashtech Z-XII ou Leica GX1230), a fim de se minimizar erros sistemáticos.

O programa de aquisição automática HYPACK permite executar uma correção de *offsets* para alinhamento absoluto e relativo entre os sensores, entretanto este procedimento introduz nas coordenadas corrigidas uma defasagem de tempo na ordem do décimo de segundo, que quando associada à velocidade média da embarcação de sondagem (aproximadamente 3 m/s), produz erros de até dois metros em relação aos pontos da trajetória padrão, referidas a um valor inteiro de segundos.

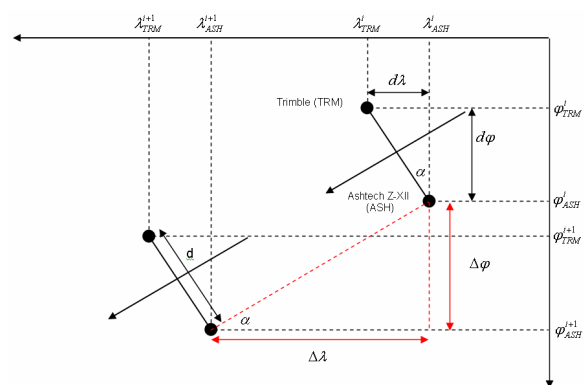


Figura 3 - Redução de Excentricidades entre as antenas RTK Trimble e Ashtech Z-XII

A redução das excentricidades de cada receptor analisado foi calculada, conforme a Figura 3, a partir do ângulo (α) definido pela direção percorrida entre duas coordenadas sucessivas nos instantes t_i e t_{i+1} , com base nos comprimentos dos vetores transversais d (Figura 2) entre as antenas dos receptores observados e padrão.

Como o intervalo entre os instantes é de 1 segundo, podem-se considerar desprezíveis os efeitos dos ventos e correntes de marés, sendo o sentido do

deslocamento da embarcação de sondagem normal ao alinhamento entre as antenas consideradas na análise.

Para o exemplo da Figura 3, para um instante t_{i+1} , as coordenadas geodésicas Trimble (TRM) corrigidas $(\varphi_c^{i+1}, \lambda_c^{i+1})$ para a posição da antena de referência Ashtech (ASH) são obtidas a partir das coordenadas geodésicas da antena Trimble no mesmo instante $(\varphi_0^{i+1}, \lambda_0^{i+1})$, associadas às correções em longitude e latitude $(d\lambda, d\varphi)$, de acordo com as expressões:

$$\begin{aligned} \lambda_c^{i+1} &= \lambda_0^{i+1} - d\lambda \\ \varphi_c^{i+1} &= \varphi_0^{i+1} + d\varphi \end{aligned} \quad (1)$$

As correções $(d\lambda, d\varphi)$ são calculadas a partir da distância d entre as antenas, e do ângulo α , definido pelo deslocamento da embarcação de sondagem entre dois instantes consecutivos.

$$\begin{aligned} d\varphi &= d \cdot \cos \alpha \\ d\lambda &= d \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

sendo:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}\right) \quad (3)$$

Onde $\Delta\varphi$ e $\Delta\lambda$ são arcos de latitude e longitude, em metros, referentes ao deslocamento da embarcação entre os instantes t_i e t_{i+1} .

Os gráficos da Figura 4 apresentam os efeitos sistemáticos nas diferenças em latitude entre os valores padrão (Leica GX1230) e observados (RTK FlexPak), assim como o resultado da aplicação das correções de excentricidade.

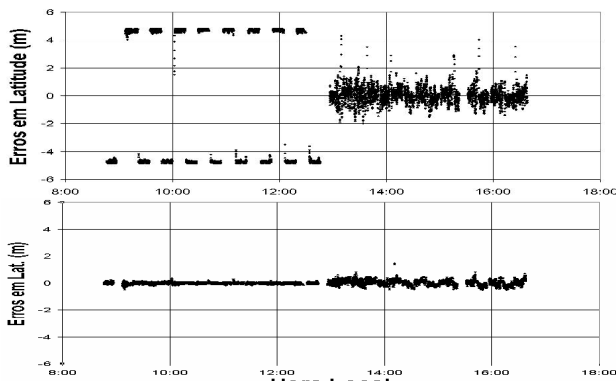


Figura 4 - Correção dos efeitos sistemáticos nas diferenças em latitude para o sistema RTK FlexPak, decorrente do afastamento de 4,76 entre as antenas

No gráfico superior da Figura 4, os erros em latitude apresentam uma diferença sistemática equivalente ao afastamento entre as antenas (observada e padrão), cujo comportamento varia de acordo com o sentido das linhas de sondagem percorridas pela embarcação. No período da manhã, as linhas têm o sentido Leste-Oeste, e à tarde, Norte-Sul, conforme a Figura 1. Com a aplicação das correções de excentricidade, a posição da antena

observada é transladada para o local de instalação da antena utilizada na geração da trajetória padrão. Isto permite minimizar os erros sistemáticos, possibilitando uma melhor análise da acurácia.

5 ANÁLISES E RESULTADOS

São analisados alguns parâmetros indicadores de qualidade posicional das observações de cada sistema, tais como HDOP, número de satélites e idade das correções aplicadas no receptor móvel. As soluções de posição são caracterizadas por índices que representam sua qualidade, desde soluções baseadas no posicionamento absoluto, àquelas de maior qualidade, obtidas a partir da determinação das ambigüidades inteiras (fixas).

Os comportamentos dos erros em latitude e longitude também são apresentados, redundando na acurácia 2dRMS de cada sistema.

Todas as análises são oriundas de dados coletados por uma embarcação de sondagem, em operações no mar, durante a execução de um levantamento hidrográfico.

5.1 Sistema RTK FlexPak

A análise conjunta dos parâmetros observados (HDOP, índice de qualidade, número de satélites e idade das correções) indica uma boa qualidade das posições RTK FlexPak, que durante a maior parte tempo (97,24%) foram determinadas a partir de soluções fixas (índice de qualidade 4) das ambigüidades, conforme pode ser observado na Figura 5.

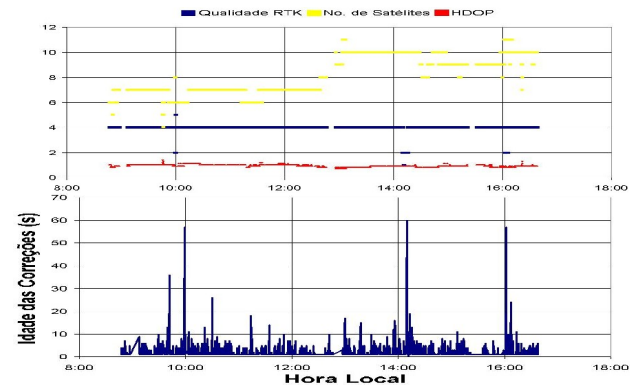


Figura 5 - Parâmetros dos sinais do sistema RTK FlexPak

A idade média das correções foi de 2 segundos, com alguns períodos de aproximadamente um minuto, como às 09h57, 14h09 e 16h01, quando ocorreram atrasos de até 60 segundos provocados por algum problema de comunicação, degradando a qualidade da solução de posição nestes instantes, durante aproximadamente 3 minutos. A quantidade de satélites manteve-se entre 7 e 10, garantindo baixos valores para o fator HDOP, em média igual a 0,92.

A análise da performance do sistema RTK FlexPak, resumida na Tabela 3, considerou apenas as soluções de posição do período da manhã, para os erros em latitude, e no período da tarde, para análise dos erros em longitude. Em função das elevadas incertezas na

medida da linha de base entre as antenas FlexPak e Leica (trajetória padrão), não foi possível a suavização adequada dos erros sistemáticos pelo processo de redução de excentricidade nos demais períodos.

Tabela 3 - Sumário estatístico das soluções de posição RTK FlexPak

Componente	Erros em cm					
	Máx	Médio	Int. Conf. (95%)	1.s	RMS	RMS 95%
Latitude	35,17	-2,70	$\pm 0,22$	7,00	7,51	14,72
Longitude	64,73	-0,90	$\pm 0,23$	7,31	7,36	14,43
Incerteza do posicionamento 2dRMS (95%)						21,03 cm

Observa-se a partir da Figura 6, que mesmo com sua antena instalada em um local não muito apropriado, na proa da embarcação, o que aumentam as possibilidades de perdas de sinal e multicaminho, as componentes latitude e longitude tiveram comportamentos semelhantes, apresentando erros abaixo dos 10 cm. A acurácia horizontal, estimada em 21,03 cm dRMS, suplanta largamente os padrões exigidos para levantamentos de Ordem Especial (Tabela 1).

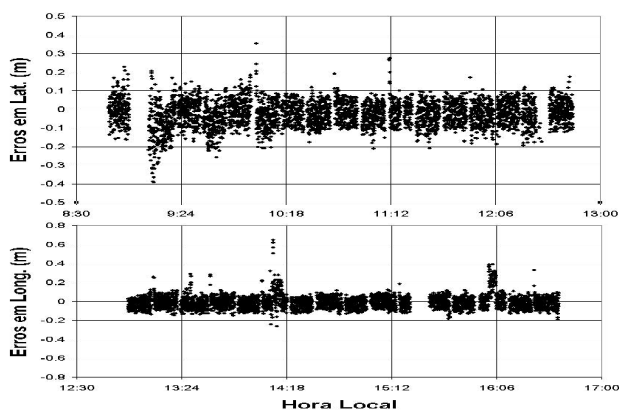


Figura 6 - Performance das soluções de posição RTK FlexPak

5.2 Análise do sistema RTK Trimble

Não foi possível a análise da idade dos dados transmitidos pela estação de referência do sistema Trimble porque as mensagens NMEA empregadas não forneciam este parâmetro. O gráfico da Figura 7 apresenta apenas os dados de HDOP, número de satélites observados e qualidade das soluções fornecidas.

O sistema RTK Trimble proporcionou uma disponibilidade de soluções fixas (índice de qualidade 3) durante 98,05% do tempo de trabalho. A quantidade de satélites observados variou entre 4 e 7, mantendo um total de 7 satélites durante 78,65% do levantamento. Este número é muito próximo do mínimo de 5 satélites recomendável para o posicionamento diferencial. Como não se pôde observar a idade das correções transmitidas, observam-se degradações de qualidade do posicionamento (índices 2 e 4). Às 8h50 houve uma certa demora, a partir do instante quando foi ligado, para o receptor adquirir o número de satélites suficientes para

obtenção de soluções fixas. Às 12h57, em função de uma diminuição do número de satélites, houve algumas soluções flutuantes. O fator HDOP manteve-se em média igual 3,1.

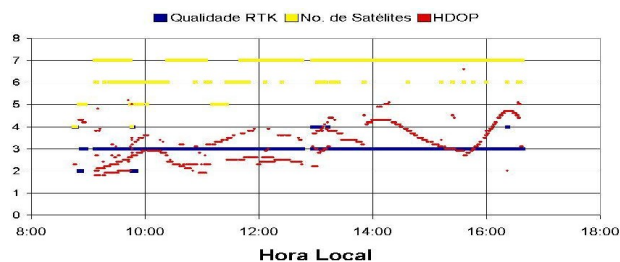


Figura 7 - Parâmetros dos sinais do sistema RTK Trimble

A distância medida entre as antenas (Trimble e Ashtech) foi ajustada, através do processo de redução de excentricidades, para 28,8 cm. Em função desta curta distância os erros aleatórios, em latitude para o período da tarde e em longitude no período da manhã, não foram muito expressivos e puderam também ser suavizados pelo processo de correção das excentricidades.

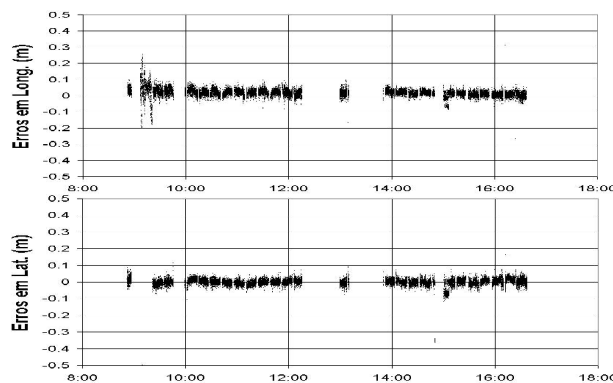


Figura 8 - Performance das soluções de posição RTK Trimble

Os gráficos da Figura 8 representam uma boa qualidade nas posições RTK Trimble, cujos erros mantiveram-se dentro de uma faixa de 10 cm, exceto pela componente de latitude que apresentou variações de aproximadamente 12 cm, no início do levantamento. O resultado da análise do sistema RTK Trimble é sumarizado pela Tabela 4, cuja acurácia 2dRMS do sistema foi de 25,68 cm, atendendo às especificações recomendadas pela IHO para levantamentos de Ordem Especial (Tabela 1).

Tabela 4 - Sumário estatístico das soluções de posição RTK Trimble

Componente	Erros em cm					
	Máx	Médio	Int. Conf. (95%)	1.s	RMS	RMS 95%
Latitude	16,36	-2,74	$\pm 0,18$	12,18	12,48	24,47
Longitude	31,30	1,74	$\pm 0,04$	2,50	3,04	5,96
Incerteza do posicionamento 2dRMS (95%)						25,68 cm

5.3 Sistema RTG C-Nav

Foram analisados os parâmetros associados à qualidade posicional em função da geometria da constelação de satélites observada (HDOP, PDOP, VDOP), número de satélites observados e idades das correções RTG de dupla frequência. O número de satélites observados manteve-se entre 5 e 10, exceto por uma perda de sinal às 9h46, quando se chegou a três satélites por apenas dois segundos. A partir das 16h21 houve um atraso excessivo (93 seg) no recebimento das correções RTG. Após dois minutos o receptor voltou a operar normalmente com uma idade média das correções de 9 seg, mantendo uma boa disponibilidade de soluções de índice 2, obtidas com o emprego das correções diferenciais RTG de dupla frequência.

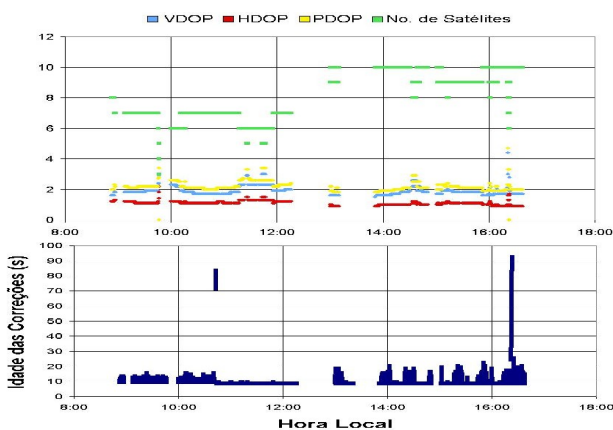


Figura 9 - Parâmetros dos sinais do sistema RTG C-Nav

O gráfico da Figura 10 apresenta o comportamento dos erros das componentes em latitude e longitude das soluções de posição RTG C-Nav.

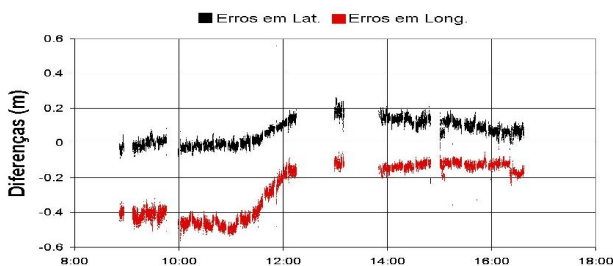


Figura 10 - Performance das soluções de posição RTG C-Nav

A descontinuidade de dados entre às 09h46 e 09h59, observada no gráfico da Figura 10 ocorre devido à ausência de coordenadas padrão neste período. Entretanto, conforme observado no gráfico superior da Figura 9, houve uma perda de sinal exatamente às 09h46, provocando uma nova inicialização do sistema, o que gerou um degrau entre as soluções fornecidas antes e depois da perda de sinal. Além disso, pode ser observada uma tendência na variação dos erros. Segundo BISNATH et. al. (2003), o sistema RTG necessita de 30 minutos a duas horas para que haja convergência nas suas soluções de posição, a partir de sua inicialização. Os resultados da

análise de acurácia do sistema RTG C-Nav são sumarizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Sumário estatístico das soluções de posição RTG C-Nav

Componente	Erros em cm					
	Máx	Médio	Int. Conf. (95%)	1.s	RMS	RMS 95%
Latitude	26,04	5,85	$\pm 0,09$	6,66	8,86	17,37
Longitude	8,03	-26,00	$\pm 0,22$	15,01	30,89	60,55
Incerteza do posicionamento 2dRMS (95%)						64,27 cm

5.4 Sistema DGPS Trimble NT200D

O receptor NT200D apresentou uma disponibilidade de 99,17% de posições do tipo 2, ou seja, aquelas obtidas a partir das correções diferenciais transmitidas pela estação de referência (radiofarol da Ilha Rasa), que se encontrava a uma distância média de 34 km da área de pesquisa. A latência média das correções diferenciais foi de 9 segundos, entretanto o receptor fornecia posições de qualidade diferencial, com a observação de pelo menos quatro satélites com latências de até 33 segundos, o que pode ter comprometido a qualidade da solução de posição.

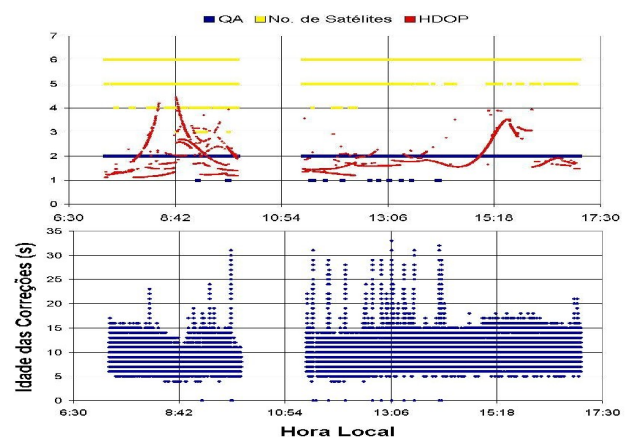


Figura 11 - Parâmetros dos sinais do sistema DGPS NT200D

Deve-se levar em consideração que os erros em latitude e longitude (Figura 12) incorporam ainda as incertezas envolvidas na medida do posicionamento relativo entre as antenas, a partir de trenas milimétricas, e do processo de correção das excentricidades. Ambas as componentes apresentaram variações dentro de uma faixa de aproximadamente 3 metros, sendo que componente de longitude mostrou-se mais sensível às mudanças de HDOP. Os resultados estão sumarizados na Tabela 6.

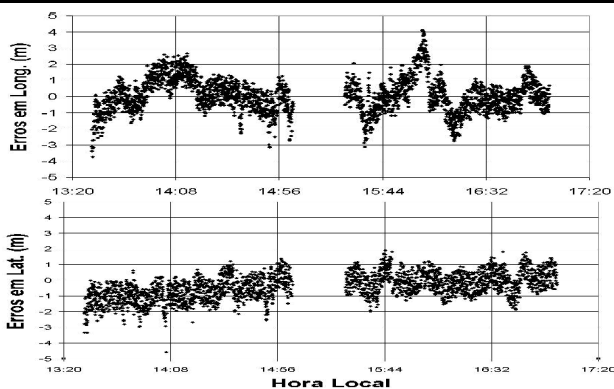


Figura 12 - Performance das soluções de posição DGPS Trimble NT200D

Tabela 6 - Sumário estatístico das soluções de posição DGPS Trimble NT200D

Componente	Erros em metros					
	Máx	Médio	Int. Conf. (95%)	1.s	RMS	RMS 95%
Latitude	1,894	-0,433	$\pm 0,038$	0,998	1,088	2,133
Longitude	4,107	0,046	$\pm 0,22$	0,040	1,055	2,068
Incerteza do posicionamento 2dRMS (95%)						3,032 m

5.5 Sistema DGPS Ashtech Z-XII

A qualidade das posições DGPS fornecidas pelo receptor Ashtech Z-XII foram analisadas de forma mais isenta, em função das coordenadas padrão terem sido obtidas da mesma antena utilizada para geração das coordenadas observadas, dispensando as correções de excentricidade.

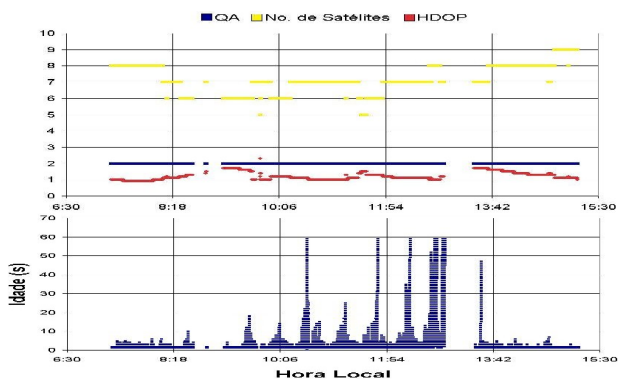


Figura 13 - Parâmetros dos sinais do sistema DGPS Ashtech Z-XII

O número de satélites rastreados ficou, na maior parte do período do levantamento observado, entre 6 e 8, com valores de HDOP variando em torno 1,2 e uma idade média das correções diferenciais de 2,7 segundos. Esses dados são indicadores de uma ótima qualidade das soluções de posições fornecidas pelo sistema. Comparando os gráficos das Figuras 11 e 13, o sistema DGPS Ashtech apresentou um melhor desempenho, entretanto deve-se considerar que sua estação de referência encontrava-se a apenas 3,5 km aproximadamente. Além disso, a antena Ashtech estava

mais bem posicionada, proporcionando uma visada mais clara para os satélites.

Os erros em latitude e longitude obtidos durante o período de análise são apresentados na Figura 14.

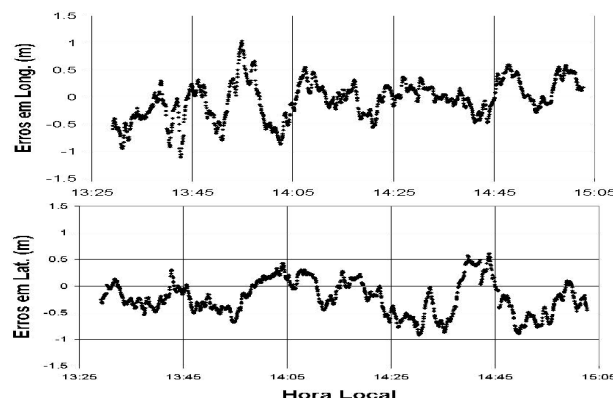


Figura 14 - Performance das soluções de posição DGPS Ashtech Z-XII

O período da análise foi de aproximadamente 1h40 em função da limitação de memória do receptor Ashtech, que gravou as observações brutas GPS para o pós-processamento. Mesmo assim, dentro deste período, a componente em longitude apresentou erros que oscilaram dentro de uma faixa de 1 metro, e já a componente em latitude redundou em uma variação menor, dentro de aproximadamente 50 cm. O sumário estatístico desta análise encontra-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Sumário estatístico das soluções de posição DGPS Ashtech Z-XII

Componente	Erros em metros					
	Máx	Médio	Int. Conf. (95%)	1.s	RMS	RMS 95%
Latitude	0,608	-0,220	$\pm 0,017$	0,330	0,397	0,777
Longitude	1,033	-0,050	$\pm 0,018$	0,355	0,358	0,703
Incerteza do posicionamento 2dRMS (95%)						1,069 metros

6 CONCLUSÕES

À luz das especificações recomendadas pela IHO, apenas os sistemas RTK e RTG apresentaram-se como solução de posicionamento para emprego em levantamentos de Ordem Especial. A técnica RTG, por dispensar a necessidade de estações de referências próximas, representa uma solução para áreas oceânicas, ou regiões inóspitas onde sejam requeridas elevadas acurácias, tais como as Barras Norte e Sul do rio Amazonas.

É necessária certa cautela no emprego de sistemas DGPS, sendo apenas remendados para levantamentos de Primeira Ordem, apesar do receptor Ashtech Z-XII ter atendido ao requisito de acurácia horizontal recomendado para levantamentos de Ordem Especial.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), Centro de Sinalização Náutica e Reparos Almirante Moraes Rego (CAMR), Base de Hidrografia da Marinha em Niterói (BHMN), Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) e a Tripulação da Lancha “SO Oliveira”, pelo uso de suas instalações e por todo o apoio técnico. Ao Laboratório de Geodésia Espacial da Universidade Federal do Paraná – LAGE, ao Laboratório de Levantamentos, Aferição e Instrumentação Geodésica – LAIG. Às empresas C&C Technologies do Brasil e SightGPS pelo empréstimo dos equipamentos RTG C-Nav2050M e RTK FlexPak, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- ARROYO-SUAREZ,E.N.;RILEY,J.L.;MABEY,D.L. Evaluating a Global Differential GPS System for Hydrographic Surveying. In: Institute of Navigation GNSS 2005, Long Beach, 2005. **Proceedings...**
- BISNATH,S.; WELLS,D.; DODD,D. Evaluation of commercial carrier phased-based WADGPS services for marine applications. In: Institute of Navigation GPS/GNSS 2003, Portland, 2003. **Proceedings...**
- BRASIL, Decreto-Lei n. 243, de 28 de fevereiro de 1967. Fixa as Diretrizes e Bases da Cartografia Brasileira e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, DF, p. 2438, 28 fev. 1967. Seção 1, col. 2.
- BRIONES, A.B., **Análise do posicionamento DGPS baseado nas ERDGPS implantadas no litoral brasileiro**, 104f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.
- CLARKE, J.E.H., DARE, P., BEAUDOIN, J., BARTLETT, J. A stable vertical reference for bathymetric surveying and tidal analysis in the high Arctic. U.S. Hydrographic Conference, US HYDRO 2005, 2005, San Diego. **Proceedings...**
- COLLINS, J.P.; LANGLEY, R.B. Nominal and Extreme Error Performance of the UNB3 Tropospheric Delay Model. **Final contract report for Nav Canada Satellite Navigation Program Office**. Geodetic Research Laboratory, Departments of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report n. 34, University of New Brunswick, Fredericton, 1999, 173 p.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN), **Histórico, Atividades e Perspectivas**. Rio de Janeiro: Base de Hidrografia da Marinha em Niterói, 2003, 59p.
- HOFMANN-WELLENHOF,B;LEGAT, K.;WIESER, M. **Navigation principles of positioning and guidance**. Wien: Springer-Verlag, 2003, 427 p.
- HUDSON,J.R.;SHARP,T. **Globally Corrected GPS (GcGPS): C-Nav GPS System**. Dynamic Positioning Conference, Marine Technology Society, Houston, 2001.
- MIGUENS,A.P. **Navegação: A CIÊNCIA E A ARTE - VOLUME III - NAVEGAÇÃO ELETRÔNICA E EM CONDIÇÕES ESPECIAIS**. Rio de Janeiro: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1996, 1822p.
- KRUEGER,C.P., **Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito marinho**, 267f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.
- LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 435 p.
- RAMOS, A. M., **Aplicação, investigação e análise da metodologia de reduções batimétricas através do método GPS diferencial preciso**, 221f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.