

Revista Brasileira de Cartografia (2016), N° 68/5: 1005-1018
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

VÍNCULO ENTRE SENSORES NUMA EMBARCAÇÃO HIDROGRÁFICA

Local Ties Among Sensors in a Hydrographic Ship

**Nassau de Nogueira Nardez¹, Cláudia Pereira Krueger¹,
Adriano Vieira de Souza² & Quintino Dalmolin¹**

¹Universidade Federal do Paraná - UFPR
Setor de Ciências da Terra / Departamento de Geomática
Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Caixa Postal 19001, Centro Politécnico, Jardim das Américas, CEP: 81.531-990, Curitiba/PR, Brasil
nardeznessau@gmail.com; {dalmolin, ckrueger}@ufpr.br

²Centro de Hidrografia da Marinha - CHM
Divisão de Levantamentos
Rua Barão de Jaceguai, s/n, Ponta da Armação, Niterói/RJ, Brasil
adriano@chm.mar.mil.br

Recebido em 11 de Março, 2015/ Aceito em 14 de Fevereiro, 2016
Received on March 11, 2015/ Accepted on February 14, 2016

RESUMO

O conhecimento das posições relativas (vínculo) entre os sensores instalados em um navio hidrográfico é de extrema importância quando se almeja a determinação da profundidade e da posição horizontal (latitude e longitude) em levantamentos hidrográficos e batimétricos. Para obter essas posições foi definido e materializado um sistema de referência cartesiano local, tendo como referência o dique seco. Por meio de técnicas topográficas é possível transferir as coordenadas do referencial local para o da embarcação. Esta pesquisa contribui para o estabelecimento de uma metodologia visando à determinação dos vínculos entre os sensores do navio, tais como sensor GPS/DGPS, sensor inercial, sensor de giro entre outros, em relação ao sistema de coordenadas local e melhorar as suas qualidades por meio de testes estatísticos e do ajustamento de observações por mínimos quadrados. No final, as coordenadas finais foram transformadas para o sistema cartesiano de referência da embarcação. As observações e medições foram realizadas no Navio Hidrográfico Brasileiro Sirius, que estava atracado no dique Almirante Brasil do Complexo Naval da Ilha do Mocanguê, Niterói, RJ. As coordenadas finais dos sensores apresentaram desvios-padrão compatíveis com o esperado, tanto para o sensor Inercial como para o sensor GPS. A metodologia mostra-se adequada para determinar as posições relativas dos sensores auxiliares em relação ao sistema de referência da embarcação. Indica-se que estas possam ser aplicadas para melhorar a qualidade dos levantamentos hidrográficos.

Palavras chaves: Vínculo Local de Sensores, Levantamentos Hidrográficos, Transformações de Sistemas de Referência.

ABSTRACT

The knowledge of the relative positions among the hydrographic ship's sensors allows the correctly determination of the depth and its horizontal position (latitude and longitude) in hydrographic and bathymetric surveys. In order to obtain those values is necessary the establishment of the local cartesian reference system, materialized at the dry dock. It is possible to transfer the coordinates from the local system at the dry dock to the ship's Cartesian reference system

through topographic techniques. The purpose of this research is to establish a methodology to determine the offsets in position of the ship's sensor, such as GPS/DGPS, inertial sensor, gyro sensor and etc, in relation to local reference system, and improving their qualities by using statistical tests and least square adjustment of observations. At the end, the final coordinates were transformed to the ship's Cartesian reference system. The measurements were performed at the Brazilian Hydrographic Ship Sirius, which was docked at the Base Naval of Rio de Janeiro, located at Ilha do Mocanguê, Niterói, RJ. The final coordinates of the sensors showed standard deviations compatible with that expected for both the Inertial sensor as to the GPS sensor. The methodology is suitable for determining the local ties among the auxiliary sensors, in relation to the ship's reference point, and can be applied in order to improve the quality of the hydrographic surveys.

Keywords: Position Offsets, Local Ties, Hydrographic Surveys, Transformations of References Systems.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países membros da Organização Hidrográfica Internacional (OHI) (*International Hydrographic Organization - IHO*), a qual foi fundada em 1921. Trata-se de uma organização intergovernamental consultiva e técnica que visa apoiar a segurança à navegação e a proteção do ambiente marinho.

As resoluções elaboradas pela OHI têm caráter de recomendações gerais para os países membros, hoje cerca de 80 países, e a partir destas recomendações são estabelecidas especificações técnicas.

A Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) é o órgão da Marinha do Brasil que tem como missão:

- apoiar a aplicação do Poder Naval, por meio de atividades relacionadas com a hidrografia, oceanografia, cartografia, meteorologia, navegação e sinalização náutica, garantir a qualidade das atividades de segurança da navegação que lhe couberem na área marítima de interesse do Brasil e nas vias navegáveis interiores e;
- contribuir para projetos nacionais de pesquisa em águas jurisdicionais brasileiras e dos resultantes de compromissos internacionais.

Esta diretoria, assessorada pelo seu conselho técnico, publica as Instruções Técnicas (IT) que normatizam os Levantamentos Hidrográficos (LH) realizados pela própria instituição.

Segundo a Publicação Especial S-44 da Organização Hidrográfica Internacional (IHO, 2008), juntamente com as Especificações para Levantamentos Hidrográficos, sua equivalente no Brasil, publicada pela DHN, estes levantamentos passaram a respeitar normas e padrões de controle de qualidade. Com isso, qualquer

medição realizada, seja no continente ou sobre a superfície do mar, deve se enquadrar a estas.

Nos levantamentos hidrográficos têm-se sistemas de sondagens compostos por diversos sensores, como por exemplo: sensores de posicionamento da embarcação, sensores inerciais, sensores de proa (giroscópicos) e ecobatímetros. Para que as informações coletadas pelos diferentes sensores estejam no sistema de referência da embarcação, estes devem possuir suas posições conhecidas em relação à origem do sistema de coordenadas da embarcação.

A incerteza no posicionamento destes sensores em relação ao sistema da embarcação influencia diretamente nas medidas horizontais (na posição horizontal da embarcação) e vertical (profundidade reduzida). As diferenças de posição entre os sensores instalados na embarcação, relativos ao sistema de referência da embarcação, podem ser determinadas por meio de medidas realizadas externamente à mesma. É de extrema importância o conhecimento dos ângulos de rotação da embarcação (*roll, pitch e yaw*) em relação ao seu sistema de referência no instante da realização das medições, quando esta se encontra devidamente posicionada em um dique seco.

No Brasil, verifica-se a existência de levantamentos hidrográficos realizados pela DHN e por instituições não ligadas à marinha, os quais são regulamentados pelas Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos (NORMAN-25/DHN, 2014). Trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos no que diz respeito às metodologias de determinação dos vínculos entre sensores (SOUZA & PEÇANHA, 2010; NARDEZ, 2010). Ao leitor que tiver maior interesse no assunto sugerem-se as seguintes obras: Seeber e Apel (1984), Sünkel e Baker (1989), Vignudelli *et al.* (2011) e Krueger e Souza (2014).

O Brasil possui uma das maiores áreas costeiras do planeta, com uma linha de costa de aproximadamente 8.500 km de extensão. Os portos brasileiros são fundamentais à economia do país, uma vez que por eles transitam 90% do comércio exterior brasileiro, chegando a 95% em 2012 (MDIC, 2015). Por meio deles, são escoadas matérias primas: minério de ferro, madeira, algodão. Produtos industrializados como: automóveis, derivados de petróleo, etanol e produtos alimentícios, entre outros. Portanto, verifica-se que a navegação sustenta um dos principais pilares da economia brasileira.

Analisando este panorama, observa-se a importância e a necessidade de produtos cartográficos (e.g. cartas náuticas, que indicam a profundidade mínima que o navegante poderá encontrar) que permitam a realização de uma navegação segura nas aproximações de portos, canais estreitos, baixios, recifes, bancos de areia e baías (CARTAS NÁUTICAS, DHN, 2011).

A Marinha do Brasil realiza levantamentos hidrográficos periodicamente, com o propósito de manter as bases cartográficas atualizadas.

Os levantamentos hidrográficos são caracterizados pelas observações de profundidade, por meio de ecobatímetros (monofeixe ou multifeixe). Estes devem ser associados às informações de posição horizontal da embarcação, utilizando, por exemplo, receptores que captam sinais advindos de satélites que compõem o sistema de posicionamento global (GNSS), e da detecção e conexão dos seus movimentos, por meio de sensores que medem os ângulos de rotação da embarcação em torno de três eixos.

Souza (2011) cita que as incertezas das medidas dos vínculos e do desalinhamento entre os sensores auxiliares fazem parte das principais fontes de erros atuantes nas campanhas hidrográficas.

Em face do exposto, esse trabalho tem como principal finalidade estabelecer um experimento dando indicativos para uma metodologia que pode ser aplicada na determinação das posições relativas (vínculo) entre os sensores instalados em uma embarcação hidrográfica em relação ao sistema de referência da embarcação.

A metodologia para determinação do vínculo entre os sensores foi desenvolvida tendo o Navio Hidrográfico SIRIUS como estudo de caso.

2. ASPÉCTOS TEÓRICOS

Segundo a NORMAN-25/DHN:

“Levantamento Hidrográfico (LH) é toda a pesquisa em áreas marítimas, fluviais, lacustres e em canais naturais ou artificiais navegáveis, que tenha como propósito a obtenção de dados de interesse à navegação aquaviária. Esses dados podem ser constituídos por informações de batimetria, da natureza e configuração do fundo marinho, de direção e força das correntes, da altura e frequência da maré ou do nível das águas, e da localização de feições topográficas e objetos fixos que sirvam em auxílio à navegação.” (NORMAN-25/DHN, 2014)

Todos os LH, realizados em território nacional ou em Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB) e executados por entidades extra Marinha, sejam elas órgãos públicos ou privados, obedecerão ao que dispõe a NORMAN-25/DHN (2014). A DHN, por intermédio do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), é o órgão da Marinha do Brasil incumbido de exercer o controle sobre todo e qualquer levantamento hidrográfico realizado em AJB, aqui entendidas como as águas interiores, o Mar Territorial e a Zona Econômica Exclusiva (ZEE).

Para a realização dos levantamentos hidrográficos algumas especificações técnicas devem ser seguidas. No Brasil, a DHN se utiliza de “Instruções Técnicas” para doutrinar os Levantamentos Hidrográficos. Em 1989 foi editada a 1ª. Especificação para Levantamentos Hidrográficos, a qual era uma tradução da SP-44 – 3ª. Edição da OHI publicada em 1987. Em 1998 a DHN publicou a sua 2ª. Edição desta especificação, sendo esta uma tradução da SP-44, 4ª. Edição da OHI publicada em 1998. Cabe ressaltar que após a 4ª edição da SP-44, esta passou a ser denominada de S-44 (MONAHAN & WELLS, 2000).

Os LH são classificados em quatro ordens em função da área a sondar e do tipo de navegação esperada. Para cada uma destas ordens estão estabelecidos requisitos mínimos que foram internacionalmente definidos e considerados aceitáveis, com a finalidade de permitir aos Serviços Hidrográficos a produção de produtos navegacionais que propiciem condições para que as embarcações esperadas

para o tráfego possam navegar de maneira segura pelas áreas levantadas (IHO, 2008). A classificação dada é a seguinte: Ordem Especial, Ordem 1a, Ordem 1b e Ordem 2 (*International Hydrographic Organization*, 2008, cap.6. p.15).

A fim de mapear a área marítima levantada tendo em vista o preparo de cartas e documentos náuticos que irão permitir uma navegação segura, deve-se ter conhecimento do Sistema de Referência da embarcação que realizará as medições.

Devido aos movimentos sofridos pela embarcação em função do efeito do mar, torna-se necessário o estabelecimento de um sistema de referência nivelado, fixo à embarcação, cujo ponto de origem está localizado em um ponto arbitrário (normalmente no centro de massa) da embarcação, conforme ilustra a Figura 1.

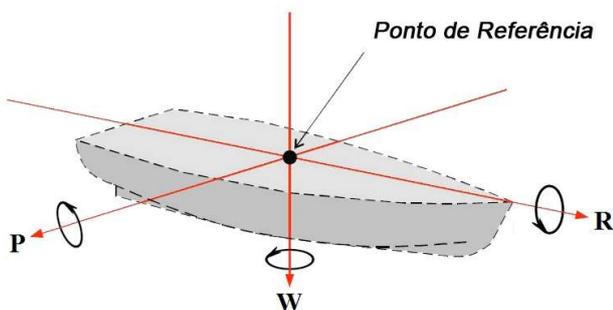


Fig. 1 – Sistema de eixos triortogonais.

Este sistema possui três eixos ortogonais, cuja origem pode ou não coincidir com o centro de massa da embarcação. Esta origem é conhecida como ponto de referência.

Neste sistema estão montados todos os sensores que se encontram a bordo da embarcação, incluindo os que visam à determinação da sua atitude e do afundamento (*heave*).

A definição dos eixos se dará da seguinte forma (Figura 1):

- Eixo *R*: é longitudinal à embarcação e paralelo à linha d'água. Positivo no sentido popa-proa e representa o eixo do balanço (*roll*);
- Eixo *P*: é transversal à embarcação e também paralelo à linha d'água. Positivo para boreste e representa o eixo de caturro (*pitch*) e
- Eixo *W*: é perpendicular ao plano formado pelos eixos *R* e *P* da embarcação. Positivo no sentido do Nadir da embarcação, formando um sistema dextrógiro, representa o eixo da

guinada (*yaw*).

Para a materialização de um sistema de eixos na embarcação, bem como a determinação da posição de sensores neste sistema, é fundamental a superabundância de medidas e consequentemente a aplicação do ajustamento de observações para estimativa e controle das incertezas inerentes às medições realizadas no processo.

O ajustamento de observações objetiva a solução única para problemas onde o número de observações é superabundante e o sistema de equações lineares é inconsistente. Desta forma, se extrai um resultado que seja único e que represente a grandeza medida com a maior confiança, e ainda, fornece a estimativa da precisão da solução adotada (DALMOLIN, 2002; GEMAEL, 1994).

A partir de um conjunto de grandezas observadas, tais como, ângulos e distâncias, estas podem ser vinculadas às incógnitas, por exemplo, as coordenadas dos pontos, por equações de condição, outras vezes, por meio de relações funcionais conhecidas, como as equações de observação. De qualquer forma, busca-se depurar as observações das inconsistências que lhe são inerentes.

3. MATERIAS E MÉTODOS

Os materiais utilizados para o levantamento de campo foram: uma estação total Leica TCR 407 (Precisão angular de 7" e precisão linear de 2 mm + 2 ppm); prismas GPR 111 e prismas auto-adesivos 60 x 60 mm. Também se empregou acessórios como tripés; bipés e bases nivelantes.

3.1 Identificação dos sensores na embarcação

O objeto de estudo foi o Navio Hidrográfico SIRIUS que tem como missão coletar e processar dados hidrográficos, oceanográficos e geodésicos.

Inicialmente foram identificados os sensores instalados ou a serem instalados na embarcação a qual se encontrava devidamente docada. Na Tabela 1 indicam-se estes sensores, a sua função e a situação no momento dos levantamentos realizados.

A localização de alguns destes sensores é mostrada na Figura 2.

Tabela 1: Sensores na embarcação Sirius

SENSORES	FUNÇÃO	SITUAÇÃO
Antena GPS	Posicionamento	Instalada
Antena RTG	Posicionamento	Instalada
Antena SeaPath	Rumo	A instalar
Sensor Inercial	Atitude	A instalar
Transdutor do Ecobatímetro EM302	Profundidade	A instalar



Fig. 2 – Localização de Alguns Sensores no Navio SIRIUS. Fonte: Nardez (2010).

3.2 Definição e materialização dos pontos que realizam o sistema de referência cartesiano local

Quatro pontos foram materializados ao redor do dique Almirante Brasil a fim de estabelecer um sistema de referência local em dique seco (Figura 3).

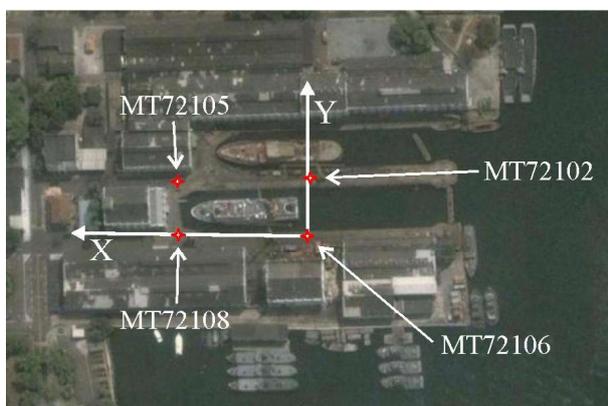


Fig. 3 – Pontos ao redor do dique. Fonte: Nardez (2010).

O ponto MT72106 foi usado para fixar a origem do sistema de referência local com coordenadas (100,000 m; 100,000 m; 100,000 m), buscando tornar positivas as coordenadas dos pontos na embarcação.

O eixo X do sistema foi orientado passando pelo marco testemunho MT72108. O eixo Z coincide com a vertical do lugar. O eixo Y foi obtido por uma rotação horária de 90° do eixo X o que completa um sistema de coordenadas levógiro, como indica a Figura 4.

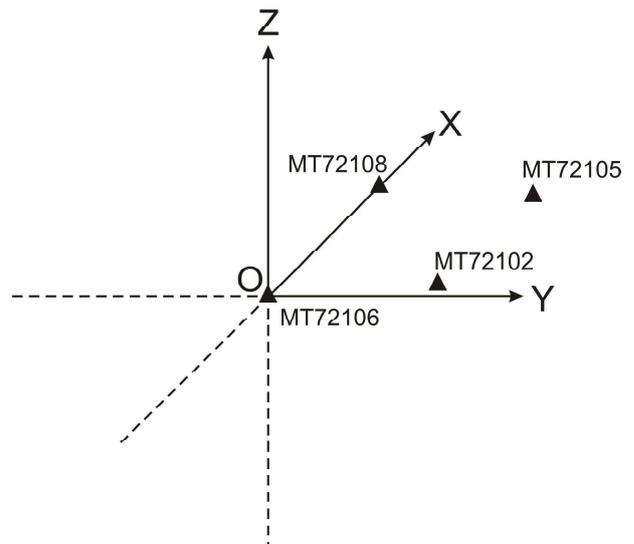


Fig. 4 – Sistema de coordenadas local. Fonte: Nardez (2010).

3.3 Determinação das coordenadas planimétricas ajustadas dos pontos materializados no dique

Para levantar os dados usou-se o método da poligonação, pelo fato do navio ter sido docado antes do início dos levantamentos o que impossibilitou realizar visadas entre os pontos MT72106 e MT72105.

Por meio de uma poligonal fechada realizou-se a técnica do caminhamento a qual consiste em percorrer o contorno da poligonal, medindo-se todos os ângulos (internos ou externos), os lados e uma orientação inicial (COMASTRI & GRIPP JUNIOR, 2004).

Os ângulos horizontais medidos na poligonal formada pelos pontos implantados no dique são internos e contados a partir do eixo X em sentido horário. Na Tabela 2 indica-se uma convenção adotada para os pontos localizados no entorno do dique.

Tabela 2: Convenção dos pontos

Ponto	Definição	Convenção
MT72106	Origem do sistema de coordenadas local	M01
MT72102		M02
MT72105		M03
MT72108	Define o eixo X	M04

Sendo o caminhamento (Figura 5) iniciado no Ponto M01, seguindo para o M02, M03 e M04. Em cada ponto foi instalada a estação total medindo-se o ângulo horizontal, a distância inclinada, o ângulo zenital, a altura do instrumento e a altura do prisma refletor.

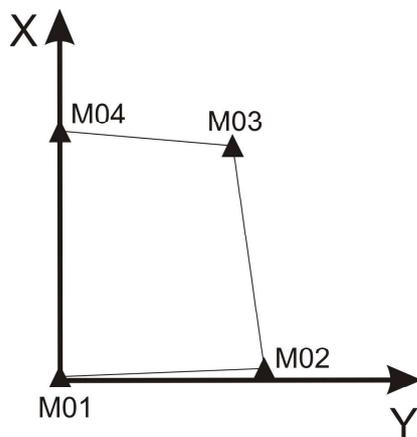


Fig. 5 – Poligonal dos pontos implantados no dique. Fonte: Nardez (2010).

Em cada ponto, na medição dos ângulos horizontais, foi realizada uma série de seis leituras, em posição direta (PD) e posição invertida (PI) da luneta. As alturas do instrumento foram determinadas com uma trena própria da estação total, e a altura do prisma por meio da haste graduada.

Depois de realizadas as observações na poligonal, os dados foram submetidos a uma depuração de erros grosseiros e um controle de qualidade das mesmas. Os valores dos ângulos horizontais (internos) e zenitais obtidos por meio do levantamento da poligonal foram inseridos em uma planilha, a qual indica a observação em que o resíduo ultrapassa a tolerância, com base no critério de Chauvenet (OLIVEIRA, 2008) para observações diretas. Desta forma, para cada série de seis observações realizadas foram eliminadas no máximo duas destas observações.

As distâncias não foram submetidas a este procedimento, por se tratarem de observações indiretas. Sendo assim, seus valores mais

prováveis e seus desvios foram determinados por meio do cálculo das médias das medidas. Posteriormente, de posse dos valores mais prováveis, foram calculados os resíduos (v) e as variâncias (σ^2) das observações. E por fim calcularam-se os desvios-padrão das observações de distâncias inclinadas. Os detalhes dos cálculos podem ser vistos em Nardez (2010).

Após terem sido realizados os procedimentos acima, pôde-se então aplicar o ajustamento de observações a fim de se obter as coordenadas planimétricas ajustadas dos pontos materializados no dique bem como suas incertezas (Tabela 4).

As coordenadas planimétricas ajustadas dos pontos no dique foram obtidas por meio do método combinado de ajustamento. As coordenadas aproximadas foram calculadas a partir das observações coletadas por meio da técnica de caminhamento topográfico pelas equações (1) e (2):

$$x_n = x_{n-1} + d \cdot \cos(\alpha) \quad (1)$$

$$y_n = y_{n-1} + d \cdot \sin(\alpha) \quad (2)$$

sendo:

d a distância reduzida ao plano;

α o ângulo horizontal.

O Modelo matemático funcional de ajustamento não linear é dado pelas equações (3) para as distâncias e (4) para os ângulos horizontais:

$$d_i = \sqrt{(x_{vante} - x_{ocupado})^2 + (y_{vante} - y_{ocupado})^2} \quad (3)$$

$$a_i = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{y_{vante} - y_{ocupado}}{x_{vante} - x_{ocupado}} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{y_{ocupado} - y_{rê}}{x_{ocupado} - x_{rê}} \right) \quad (4)$$

As equações de condição para o método combinado de ajustamento são apresentadas pelas equações (5) e (6):

$$\sqrt{(x_{vante} - x_{ocupado})^2 + (y_{vante} - y_{ocupado})^2} - d_{medida} = 0 \quad (5)$$

$$\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{y_{vante} - y_{ocupado}}{x_{vante} - x_{ocupado}} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{y_{ocupado} - y_{rê}}{x_{ocupado} - x_{rê}} \right) - \alpha_{medido} = 0 \quad (6)$$

Cujo modelo de ajustamento é dado por (7):

$$F(X_a, L_a) = 0 \quad (7)$$

e em sua forma linearizada através da expansão de Taylor (GEMAEL, 1994) se apresenta:

$$AX + BV + W = 0 \quad (8)$$

A solução da equação (8) é obtida através de:

$$X_i = -[A_i' M_i^{-1} A_i']^{-1} A_i' M_i^{-1} W_i \quad (9)$$

sendo,

$$M = BP^{-1}B' \quad (10)$$

Para o ajustamento, adotou-se como critério de convergência o valor de 0,001 m.

O leitor poderá encontrar o desenvolvimento matemático da solução da equação (8) em Dalmolin (2002) e Wolf e Ghilani (1997).

3.4 Determinação das coordenadas altimétricas ajustadas dos pontos materializados no dique

Para cada ponto, foi realizada uma série de seis leituras do ângulo zenital, em posição direta (PD) e posição invertida (PI) da luneta para anular as medidas do erro de verticalidade do instrumento de medição.

As coordenadas altimétricas ajustadas dos marcos testemunhos (M01 a M04, Figura 5) foram obtidas utilizando o método paramétrico de ajustamento com a técnica dos mínimos quadrados, a partir das observações obtidas pelo método de nivelamento trigonométrico:

$$\Delta h_{AB} = h_i - h_s + Dh \cdot \cot(Z) \quad (11)$$

sendo:

Δh_{AB} o desnível entre os pontos A e B sobre o terreno. Tratada como observação no método paramétrico;

h_i a altura do instrumento de medição;

h_s a altura do alvo mirado;

Z o ângulo zenital observado; e

Dh a distância ao plano.

O modelo matemático funcional do método paramétrico de ajustamento para os desníveis é:

$$\text{desnível}_i = z_{vante} - z_{ocupado} \quad (12)$$

cujo modelo de ajustamento é dado pela equação (13):

$$F(X_a) = L_a \quad (13)$$

e em sua forma linearizada é dado pela equação (14):

$$AX + L = V \quad (14)$$

Os valores ajustados são obtidos a partir da equação (15):

$$X = -N^{-1}U \quad (15)$$

sendo:

$$N = A^T P A \quad (16)$$

$$U = A^T P L \quad (17)$$

$$P = \sigma_0^2 \Sigma_{Lb}^{-1} \quad (18)$$

sendo:

A a matriz das derivadas parciais;

P a matriz dos pesos;

σ_0^2 a variância da unidade de peso *a priori*; e

Σ_{Lb}^{-1} a matriz variância-covariância dos valores observados.

A fim de avaliar a qualidade do ajustamento realizado, aplicou-se o teste de Chi-Quadrado. Este teste compara as relações entre a variância da população e a variância da amostra com base no número de redundância da amostra (graus de liberdade), a um determinado nível de significância. Mais informações podem ser encontradas em Dalmolin (2002).

3.5 Depurações de erros grosseiros e controle da qualidade das observações dos sensores e pontos auxiliares

Conforme exposto na seção 3.1 na embarcação em estudo, foram identificados cinco sensores listados na Tabela 1. Destes almejou-se determinar as coordenadas de quatro

deles no sistema de referência cartesiano local e posteriormente no sistema de referência da embarcação.

Visando a determinação das coordenadas destes sensores, fez-se necessário a utilização de 13 pontos marcados e materializados ao longo do navio, onde algumas destas marcações coincidem com a posição de futuros sensores. Também foram utilizados mais outros 12 pontos auxiliares. Alguns destes pontos foram materializados com chapas de aço inoxidável e outros com adesivos reflexivos. Os pontos auxiliares foram estabelecidos para que se pudesse realizar observações aos alvos quando não houvesse condições diretas de visada.

Nesta fase do levantamento também foram realizadas 6 séries de observações para cada um dos pontos auxiliares, onde foram lidos os ângulos horizontais, ângulos zenitais, distâncias inclinadas, bem como, a altura do instrumento e altura do prisma.

O controle de qualidade das observações dos pontos auxiliares empregados nesta fase do levantamento foi idêntico ao realizado para os pontos implantados no dique (sessão 3.3).

As seções 3.6, 3.7 e 3.8 apresentadas na sequência, esclarecem os passos para o cálculo das coordenadas dos sensores auxiliares, bem como as estimativas de suas precisões. Lembrando que alguns destes pontos coincidem com a posição de alguns sensores.

3.6 Determinação das coordenadas planimétricas ajustadas dos sensores e pontos auxiliares no sistema de referência local

Para o ajustamento das coordenadas planimétricas dos 4 sensores e dos 21 pontos utilizados nas medições, aplicou-se o método paramétrico de ajustamento. Como o modelo funcional é não linear, houve a necessidade do cálculo das coordenadas aproximadas dos pontos as quais foram obtidas pelas equações (01) e (02).

O modelo matemático funcional de ajustamento adotado para as distâncias foi:

$$d_i = \sqrt{(x_{vante} - x_{ocupado})^2 + (y_{vante} - y_{ocupado})^2} \quad (19)$$

e para os ângulos, onde se impôs algumas condições como segue:

Para ângulos menores que 90°:

$$a_i = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{x_{ré} - x_{ocupado}}{y_{ré} - y_{ocupado}} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{x_{vante} - x_{ocupado}}{y_{vante} - y_{ocupado}} \right) \quad (20)$$

Para ângulos entre 90° e 180°:

$$a_i = 180^\circ - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{y_{ré} - y_{ocupado}}{x_{ré} - x_{ocupado}} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{y_{vante} - y_{ocupado}}{x_{vante} - x_{ocupado}} \right) \quad (21)$$

Para ângulos entre 180° e 270°:

$$a_i = 180^\circ + \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{y_{vante} - y_{ocupado}}{x_{vante} - x_{ocupado}} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{y_{ré} - y_{ocupado}}{x_{ré} - x_{ocupado}} \right) \quad (22)$$

Para ângulos acima de 270°:

$$a_i = 360^\circ + \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{y_{ré} - y_{ocupado}}{x_{ré} - x_{ocupado}} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{y_{vante} - y_{ocupado}}{x_{vante} - x_{ocupado}} \right) \quad (23)$$

3.7 Determinação das coordenadas altimétricas ajustadas dos sensores e pontos auxiliares no sistema de referência local

Para determinar as coordenadas dos sensores, e de acordo com o realizado no levantamento dos pontos auxiliares, fez-se necessário dividir o cálculo das coordenadas altimétricas locais em três etapas distintas.

Na primeira etapa, calcularam-se as coordenadas dos pontos de uma poligonal aberta;

Na segunda etapa, calcularam-se as coordenadas dos pontos que foram visados de apenas um ponto ocupado por meio de irradiação topográfica;

Na terceira etapa, calcularam-se as coordenadas dos pontos que foram visados a partir de vários pontos ocupados.

3.8 Coordenadas altimétricas de pontos auxiliares por meio de uma poligonal aberta

A poligonal aberta composta de 15 pontos possibilitou mediante um caminhamento a determinação das coordenadas altimétricas destes pontos.

As coordenadas altimétricas ajustadas destes pontos foram obtidas empregando-se o método paramétrico de ajustamento (seção 3.4).

Cabe aqui ressaltar que para a poligonal aberta foram realizadas 10 séries de observações.

3.9 Coordenadas altimétricas de pontos auxiliares e de sensores por meio de irradiação

A partir de três pontos fixos no dique (M04, 11 e 05) e outros da poligonal aberta, nove pontos localizados na embarcação (29, 31, 18, 20, 19, 23, 06, 22, 01) tiveram as suas observações realizadas pela técnica da irradiação. Foi possível realizar apenas uma visada e também não foi possível ocupar, diretamente, os pontos devido à sua localização na embarcação.

Dentre estes pontos está a origem do sistema de coordenadas da embarcação, ponto 19 (Figura 6).

As coordenadas altimétricas destes nove pontos foram calculadas pela equação (24) e suas incertezas estimadas por meio da propagação das variâncias, fixando-se o ponto ocupado.

O modelo utilizado para a propagação das variâncias é o apresentado na equação (24):

$$z_i = z_{i-1} + (di \cdot \cos(dz)) + hi - hp \quad (24)$$

sendo:

z_i a coordenada Z do ponto no sistema cartesiano local;

z_{i-1} a coordenada Z do ponto anterior no sistema cartesiano local;

di a distância inclinada entre os pontos visados;

dz a distância zenital;

hi a altura do instrumento instalado no ponto; e

hp a altura do prisma instalado no ponto.

Cuja expressão da propagação (DALMOLIN, 2002) é:

$$\Sigma_X = D \Sigma_{Lb} D^T \quad (25)$$

sendo:

$$D = \frac{\partial F}{\partial X} \Big|_{X=Lb} \quad (26)$$

e

$$\Sigma_{Lb} = \begin{bmatrix} \sigma_{z_{i-1}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{di}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{dz}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{hi}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{hp}^2 \end{bmatrix} \quad (27)$$

3.10 Coordenadas altimétricas de pontos auxiliares e de sensores por meio de irradiação com visadas de mais de uma estação

Um conjunto de seis pontos (17, 21, 24, 25, 26 e 30), que compõem o levantamento, tiveram observações realizadas a partir de pelo menos duas outras estações.

Cada segmento que chega a estes pontos gera um valor de cota, e, por este motivo, seu valor final foi adotado a média aritmética das medidas.

Dentre estes pontos encontram-se os seguintes sensores: antena GPS (ponto 21), antena RTG (ponto 30), *SeaPath* (ponto 25).

As coordenadas Z no sistema de referência cartesiano local destes seis pontos tiveram suas incertezas estimadas pela propagação das variâncias. Para maiores detalhes verificar Nardez (2010).

3.11 Determinação das coordenadas plani-altimétricas dos sensores no sistema de referência da embarcação

Após as coordenadas dos sensores terem sido obtidas no referencial local, tornou-se possível a transformação das mesmas para o referencial da embarcação conforme segue abaixo.

3.11.1 Materialização do sistema de referência do SIRIUS

As embarcações contêm marcas em seu interior que indicam os eixos R e P materializadas no processo de construção do navio.

O navio SIRIUS (seção 3.1) foi lançado ao mar 1957. Ele já passou por diversas manutenções e reformas, o que acarretou na perda destas marcas em face de que não houve o cuidado necessário para preservá-las. Logo estas marcas tiveram que ser restabelecidas.

Para isso, após a embarcação ter sido estabilizada foi efetuada a marcação da linha d'água estática em torno do costado determinando assim o plano RP. Tendo este plano como referência fixaram-se chapas na parte externa e interna do navio, materializando estes eixos.

Na construção de uma embarcação hidrográfica o seu centro de massa e a origem do sistema de referência são materializados. No SIRIUS, o centro de massa da embarcação situa-se na praça de máquinas.

O restabelecimento da origem do sistema de referência da embarcação visou à instalação de um sensor inercial, localizado sobre a mesma.

Como o centro de massa da embarcação está situado na praça de máquinas, esta origem (Figura 6) não foi coincidente com o mesmo, mas próxima, visando assim, minimizar as vibrações e perturbações advindas da praça de máquinas sobre o sensor inercial.



Fig. 6 – Origem do sistema de coordenadas da embarcação. Fonte: Nardez (2010).

3.11.2 Transformação entre os sistemas de referência

As coordenadas ajustadas obtidas estão referenciadas ao sistema de referência local (Figura 04). Para que estas sejam transformadas para o sistema de referência da embarcação faz-se necessário aplicar uma transformação de referencial como segue.

3.11.3 Rotação em torno do eixo Z

Buscando deixar paralelos os eixos X e Y (sistema de referência local, seção 3.2, Figura 4) com os eixos R e P (sistema de referência da embarcação, seção 2, Figura 1), uma rotação foi feita em torno do eixo Z do sistema de referência local do valor equivalente à guinada sofrida pela embarcação após ela ter sido docada.

Os pontos 06 e 22 são materializados por chapas metálicas implantadas na embarcação paralelamente ao eixo R . Elas foram fixadas pelo Centro de Armas da Marinha (CAM) em setembro de 2009 visando o restabelecimento das marcas que indicam os eixos R e P da embarcação (seção 2). Já em terra, os marcos M01 e M04 materializam o eixo X . Logo, foi

possível encontrar os ângulos entre estes dois eixos, e realizar a rotação em Z , com a seguinte equação:

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{y_{06} - y_{22}}{x_{06} - x_{22}} \right) \quad (28)$$

O valor encontrado para o ângulo de rotação (guinada) em Z foi de $-2,77$ graus, conforme ilustrado na Figura 7:

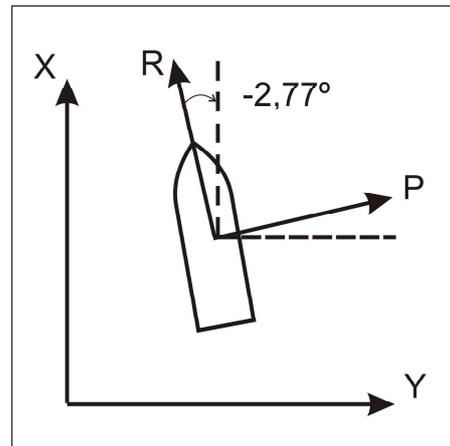


Fig. 7 – Guinada. Fonte: Nardez (2010).

3.11.4 Transformação de corpo rígido

Para transformar as coordenadas obtidas do sistema local para o sistema da embarcação aplicou-se uma transformação de Corpo Rígido, transformação passiva, empregando-se cinco pontos (06, 18, 20, 22, 26) cujas coordenadas são conhecidas no sistema da embarcação e no sistema local, como mostra a Tabela 3:

Tabela 3: Coordenadas dos cinco pontos em ambos os sistemas

Ponto	Coordenadas dos Pontos no Sistema da embarcação (m)			Coordenadas dos Pontos no Sistema local (m)		
	R	P	W	X	Y	Z
06	-35,560	-1,967	-9,350	127,941	106,951	98,325
18	0,816	-2,051	1,664	164,280	108,627	95,726
20	-0,183	-1,949	0,848	163,276	108,681	96,541
22	-41,318	-1,407	-0,952	122,163	107,231	98,341
26	9,860	-1,941	-4,035	173,308	109,174	101,424

As coordenadas no sistema da embarcação foram calculadas por meio de uma poligonal no interior do navio, utilizando a origem como ponto de orientação e atribuindo-se coordenada zero para este ponto o que permitiu calcular as coordenadas dos pontos de interesse citados na Tabela 3.

Para realizar a transformação de corpo rígido, foram calculados os elementos da matriz de rotação e o vetor de translação. Por meio da equação (29), obtêm-se as coordenadas R , P e W no sistema da embarcação a partir das respectivas coordenadas conhecidas no sistema local.

$$\begin{bmatrix} R \\ P \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} TX \\ TY \\ TZ \end{bmatrix} \quad (29)$$

Por convenção, os elementos m_{ij} formam a matriz de rotação; TX = Translação do eixo X ; TY = Translação do eixo Y ; TZ = Translação do eixo Z .

Os coeficientes de transformação foram calculados, e posteriormente aplicados para todos os pontos auxiliares e os pontos que definem os sensores instalados na embarcação obtendo-se as coordenadas deles no sistema da embarcação, sem ainda serem inseridas as correções referentes aos movimentos de rolamento (R) e arfagem (P) nos ângulos, como se explica na sequência.

3.12 Determinação dos vínculos entre os sensores

É necessário realizar as devidas correções nas coordenadas obtidas no sistema de referência da embarcação quanto aos movimentos de rolamento (R) e arfagem (P) a que a embarcação sofreu após a sua docagem. Essa correção é obtida por meio da equação (30), onde a matriz das rotações R_{TB} respeita a convenção de *Tate-Bryant*.

$$\begin{bmatrix} R \\ P \\ W \end{bmatrix}_{\substack{\text{Embarcação} \\ \text{Corrigido}}} = R_{TB} \times \begin{bmatrix} R' \\ P' \\ W' \end{bmatrix}_{\text{Embarcação}} \quad (30)$$

Os valores dos ângulos a serem corrigidos foram cedidos pelo Centro de Armas da Marinha (CAM), sendo: a) Rolamento: +55°; b) Arfagem: -9°; e c) Guinada: -2,77°. O ângulo de guinada foi calculado e corrigido antes da transformação entre os sistemas (seção 3.11.3).

4. RESULTADOS E ANÁLISES

A seguir apresentam-se os resultados e análises da obtenção das coordenadas dos marcos que materializam o sistema de referência

local e dos vínculos dos sensores no sistema de referência da embarcação.

4.1 Coordenadas dos marcos testemunhos no sistema de referência local

Os valores obtidos com a aplicação do exposto nas seções 3.2, 3.3 e 3.4 para as coordenadas ajustadas dos marcos testemunhos no sistema de referência local, bem como, os seus desvios-padrão encontram-se indicados na Tabela 4. Segundo exposto na seção 3.2 o M01 (MT72106) foi definido como a origem do sistema de referência local e as suas coordenadas locais adotadas foram iguais a 100,000 m; 100,000 m; 100,000 m, para X , Y e Z , respectivamente.

Tabela 4: Coordenadas ajustadas dos marcos testemunhos

Coordenadas e desvios	Marco Testemunho			
	M01	M02	M03	M04
X (m)	100,000	100,382	186,661	185,457
Desvio em X	± 0,000	± 0,008	± 0,005	± 0,000
Y (m)	100,000	126,504	119,739	100,000
Desvio em Y	± 0,000	± 0,010	± 0,010	± 0,000
Z (m)	100,000	100,108	100,098	100,089
Desvio em Z	± 0,000	± 0,0002	± 0,0002	± 0,0002

Os resultados encontrados apresentam precisão compatível com o esperado, obteve-se um desvio padrão máximo de 10 mm em Y nos pontos M02 e M03.

Um teste de aderência para confrontar a variância a priori com a variância a posteriori foi aplicado a um nível de significância de 5%. A hipótese nula não foi rejeitada tanto para a planimetria como para a altimetria sugerindo assim a confiança nos resultados obtidos.

4.2 Vínculos (posições relativas) dos sensores no sistema de referência da embarcação

Na Tabela 5 apresentam-se as coordenadas obtidas para os sensores da embarcação, o respectivo número do ponto os quais foram representados nos levantamentos de campo, bem como, seus desvios-padrão.

Para as coordenadas planimétricas, verifica-se que os desvios-padrão para os valores da coordenada R foram inferiores a 0,034 m, para os valores da coordenada P foram inferiores a 0,121 m e para a coordenada W foram inferiores a 0,014 m. O maior desvio-padrão para o sensor inercial foi para a coordenada P no valor de 0,051 m; para o sensor GPS foi para a coordenada P no valor de 0,121 m; para o sensor *SeatPath* foi

para a coordenada P no valor de 0,018 m e para o sensor RTG foi para a coordenada P no valor de 0,054 m.

Comparando os desvios-padrão encontrados para os sensores com os valores preconizados e tabelados de acordo com o manual do fabricante do ecobatímetro (Tabela 6).

Observa-se que os resultados se enquadram

dentro dos valores horizontais esperados. Porém a coordenada P do sensor de posicionamento GPS, não alcançou os padrões sugeridos, ultrapassando em 0,021 m do valor esperado. Isso se deve possivelmente pelo fato da antena GPS estar instalada no mastro principal da embarcação, sujeita a instabilidade durante a realização das observações.

Tabela 5: Vínculos (coordenadas) dos sensores em relação à origem do sistema de coordenadas da embarcação e seus desvios-padrão

Ponto	Sensores	R (m)	Desvio (m)	P (m)	Desvio (m)	W (m)	Desvio (m)
19	Inercial	0,000	± 0,033	0,000	± 0,051	0,000	± 0,001
21	GPS	-20,355	± 0,033	0,864	± 0,121	-18,546	± 0,014
25	SeaPath	-1,846	± 0,009	-0,686	± 0,018	-8,558	± 0,005
30	RTG	-2,510	± 0,034	2,856	± 0,054	-10,686	± 0,002

Outra possível causa, é a de que, como foi necessário estabelecer um sistema de referência local, pois as coordenadas obtidas por rastreamento GPS dos marcos testemunhos apresentaram valores elevados de multicaminho em função de algumas obstruções locais, a referência de azimute foi estabelecida entre os marcos testemunhos M01 e M04, a fim de orientar a poligonal. Para a verificação da qualidade dos resultados, recorreu-se ao teste de Chi-quadrado, onde a hipótese nula foi testada ao nível de significância de 5%, e não foi rejeitada pelo teste, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos para os vínculos planimétricos.

4.3 Análise dos resultados altimétricos

Para a verificação da qualidade dos resultados foi aplicado procedimentos idênticos aos anteriores, comparando-se os resultados obtidos com os valores esperados, verificou-se que os resultados estão de acordo com as exigências do fabricante do ecobatímetro (EM1002, 2003). Porém quando se aplicou um teste de aderência para a verificação da qualidade dos resultados, o mesmo foi rejeitado quando a hipótese nula foi testada a um nível de significância de 5%. Apesar disto os desvios apresentados na altimetria não comprometem os resultados em termos das exigências do manual do ecobatímetro (Tabela 6). Sugere-se que novos testes sejam realizados a fim de constatar as causas que levaram à rejeição do teste global.

Tabela 6: Precisoões esperadas nas medições dos vínculos

Sensor	Valor Esperado	
Sensor de movimento	Horizontal	± 0,1 m
	Vertical	± 0,02 m
Posicionador	Horizontal	± 0,1 m
	Vertical	± 0,02 m

Fonte: EM1200 Multibeam Echo Sounder, Installation Manual (2003).

5. CONCLUSÕES

A metodologia empregada utilizou técnicas topográficas, testes estatísticos e o ajustamento de observações, e apresenta-se viável para a determinação dos vínculos entre os sensores auxiliares em relação ao ponto de referência da embarcação, uma vez que todos os desvios-padrão das coordenadas dos sensores no sistema de referência da embarcação não ultrapassaram 0,054 m, a menos da coordenada P do GPS que apresentou um desvio de 0,121 m.

O referencial cartesiano local foi satisfatoriamente definido e materializado apresentando desvios-padrão de no máximo 0,010 m. Para este referencial recomenda-se que em trabalhos futuros sejam implantados um número maior de marcos testemunhos, e que seja realizado um nivelamento geométrico entre eles a fim de se obter uma maior precisão na obtenção dos desníveis, e ainda que sejam efetuadas visadas cruzadas entre os marcos a fim de formar triângulos para uma maior rigidez na geometria do polígono formado entre os marcos, gerando

assim, um maior número de graus de liberdade para o ajustamento das observações.

Recomenda-se que um cuidadoso planejamento seja realizado para este tipo de determinação de vínculos entre os sensores. Neste caso, pelas particularidades da embarcação, recomenda-se a repetição do levantamento altimétrico com superabundância de observações por meio do nivelamento trigonométrico para melhorar a qualidade dos resultados, haja vista a impossibilidade de se realizar um nivelamento geométrico no interior da embarcação, pois não foi possível utilizar as miras estadimétricas dentro da embarcação. Entretanto, quando houver a possibilidade, recomenda-se aplicar o nivelamento e contranivelamento geométrico.

A obtenção das coordenadas dos sensores no sistema de referência da embarcação mostrou-se eficaz, apesar das aproximações realizadas, as transformações apresentaram-se confiáveis. Recomenda-se aplicar uma transformação que leve em conta o fator de escala entre os sistemas.

A metodologia aplicada por meio de técnicas topográficas mostrou-se viável, e com os devidos cuidados nos procedimentos e levantamentos de campo, uma melhora considerável na qualidade dos vínculos pode ser alcançada.

Posteriormente esta metodologia poderá ser aplicada aos outros navios hidrográficos da Marinha, padronizando a obtenção dos vínculos entre os sensores, podendo ainda, evitar uma eventual necessidade de terceirizar este tipo de trabalho quando há necessidade de instalar novos equipamentos, como, por exemplo, os sistemas multifeixe.

AGRADECIMENTOS

A Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil por possibilitar a realização deste trabalho no Navio Hidrográfico SIRIUS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARTAS NÁUTICAS, DHN, 2011. disponível em: <<https://www.mar.mil.br/dhn/chm/cartas/cartas.html>>, Acesso em: 6 de outubro de 2011.

COMASTRI, J. A.; GRIPP JUNIOR, J. **Topografia aplicada, Medição, Divisão e Demarcação**. Viçosa, Editora UFV, 2004. 203p.

DALMOLIN, Q. **Ajustamento por mínimos**

quadrados. Universidade Federal do Paraná. Curso de pós-graduação em Ciências Geodésicas. Curitiba, Editora UFPR, 2002. 175p.

EM1002 Multibeam Echo Sounder, **Instalation Manual**: 851-160978: rev. Norway: E. Kongsberg Maritime AS, 2003. 119p.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba, Editora UFPR, 1994. 319p.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). **IHO Standards for Hydrographic Surveys**. Special Publication n. 44. 5.ed. Principado de Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008. 32p.

KRUEGER, C. P.; SOUZA, A. V. The Geodesy in the Hydrography. **Revista Brasileira de Cartografia**, International Issue, n.66/7, 2014. p. 1485-1493.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR (MDIC). **Sistema de Análise das Informações do Comércio Exterior via Internet (ALICEWEB)**. Disponível em <http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br/default.asp>. Acesso em 25 de Junho de 2015.

MONAHAN, D. WELLS, D. E. IHO SP 44 Standards for Hydrographic Surveys and demands of the new century. **Proceedings Canadian Hydrographic Conference**, Montreal, 2000. 10p. Disponível em: www.omg.unb.ca/omg/papers/MONAGHAN.PDF. Acesso em 27 de Março de 2009.

NARDEZ, N. N. **Metodologia para determinação dos afastamentos (offsets) entre sensores numa embarcação hidrográfica**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, 2010. 109p.

NORMAM-25/DHN de 2014 - **Normas da autoridade marítima para levantamentos hidrográficos** - Marinha do Brasil - Diretoria de Hidrografia e Navegação. 2014. 52p.

OLIVEIRA, E. C. Comparação das diferentes técnicas para a exclusão de "Outliers". In: **Congresso da Qualidade em Metrologia - ENQUALAB**, São Paulo, p. 1-5, 2008.

- SEEBER, G.; APEL, J. R. Geodetic Features of Ocean Surface and their Implication. **Marine Geophysical Researches**, v.7, n.1/2, Dordrecht, Holland, Springer-Science+Business Media, 1984. 332p.
- SOUZA, A. V. **Análise dos parâmetros que compõem a equação da incerteza vertical propagada da profundidade reduzida.** Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, 2011. 167p.
- SOUZA, A. V.; PEÇANHA, A. B. da C. Medição do afastamento entre sensores de um navio hidroceanográfico. **Anais Hidrográficos**. Tomo LXVII, Niterói, RJ, p. 77-87, 2010.
- SÜNKEL, H.; BAKER, T. **Sea Surface Topography and the Geoid.** Symposium n. 104, August 10-11, Scotland, Springer-Verlag, 1989. 187p.
- VIGNUDELLI, S.; KOSTIANOY, A. G.; CIPOLLINI, P.; BENVENISTE, J. (Eds) **Coastal Altimetry.** New York, Springer, 2011. 565p.
- WOLF, P. R.; GHILANI, C. D. **Adjustment Computations: statistics and least squares in surveying an GIS.** New York, John Wiley & Sons, 1997. 584p.