

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NASSAU DE NOGUEIRA NARDEZ

METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DOS AFASTAMENTOS (*OFFSETS*)  
ENTRE SENSORES NUMA EMBARCAÇÃO HIDROGRÁFICA

CURITIBA

2010

NASSAU DE NOGUEIRA NARDEZ

METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DOS AFASTAMENTOS  
(*OFFSETS*) ENTRE SENSORES NUMA EMBARCAÇÃO HIDROGRÁFICA

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

Orientadores:  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Pereira Krueger  
Prof. Dr. Quintino Dalmolin

CURITIBA  
2010

N223m Nardez, Nassau de Nogueira

Metodologia para determinação dos afastamentos (offsets) entre sensores numa embarcação hidrográfica / Nassau de Nogueira Nardez. – Curitiba, 2010.

109 f.: il., tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Orientadores: Cláudia Pereira Krueger, Quintino Dalmolin.

1. Levantamentos hidrográficos. 2. Hidrografia. I. Krueger, Cláudia Pereira. II. Dalmolin, Quintino. III. Universidade Federal do Paraná. IV. Título.

CDD: 526.99

## TERMO DE APROVAÇÃO

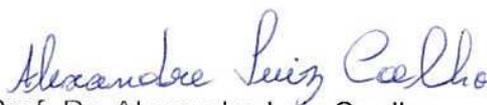
NASSAU NOGUEIRA NARDEZ

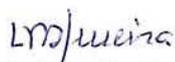
*"METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DOS AFASTAMENTOS (OFFSETS)  
ENTRE SENSORES NUMA EMBARCAÇÃO HIDROGRÁFICA "*

Dissertação nº 235 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientadora:

  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Claudia Pereira Krueger  
Departamento de Geomática, UFPR

  
Prof. Dr. Alexandre Luiz Coelho  
Diretoria de Hidrografia e Navegação, DHN

  
Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira  
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 30 de junho de 2010.

*Aos meus queridos pais, Milton e Anna do Carmo.  
Ao meu irmão Yuri.  
E ao meu querido avô Milton Nardez (in memoriam).  
Por tudo que representam em minha vida.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, bênçãos e proteção.

A professora Cláudia Pereira Krueger, pela orientação, pelos ensinamentos, incentivo e confiança em minha pessoa depositada.

Ao professor Quintino Dalmolin, pela orientação, reflexões, sugestões e pelos ensinamentos.

Ao Capitão-Tenente Adriano Vieira de Souza, pela parceria nos levantamentos de campo, pelas sugestões, idéias e cooperação.

Aos Senhores membros da banca de qualificação: Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira e Comandante Dr. José Helvécio Moraes de Rezende. Pelas observações, sugestões e críticas apresentadas visando o enriquecimento deste trabalho.

A todas as pessoas que participaram direta ou indiretamente dos levantamentos realizados em campo.

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

A empresa AVR Instrumental Topográfico, por ceder gentilmente os prismas auto-adesivos.

A todos os Professores Doutores do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG) da Universidade Federal do Paraná, pelos ensinamentos e pela maneira respeitosa que sempre me trataram.

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

A Graziela Valença de Souza, pelas reflexões, pelas críticas construtivas, colaboração e incentivo.

Aos amigos do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG) da Universidade Federal do Paraná, pelas trocas de conhecimento, pelos conselhos e pela convivência sadia ao longo dos anos.

E aos companheiros do Laboratório de Geodésia Espacial (LAGE), por todos esses anos de convívio sadio, pelas colaborações, trocas de conhecimentos, e pela amizade de todos que passaram pelo LAGE.

Posso ter defeitos, viver ansioso e ficar irritado algumas vezes, mas não esqueço de que minha vida é a maior empresa do mundo. E que posso evitar que ela vá à falência.

Ser feliz é reconhecer que vale a pena viver, apesar de todos os desafios, incompreensões e períodos de crise. Ser feliz é deixar de ser vítima dos problemas e se tornar um autor da própria história.

É atravessar desertos fora de si, mas ser capaz de encontrar um oásis no recôndito da sua alma.

É agradecer a Deus a cada manhã pelo milagre da vida.

Ser feliz é não ter medo dos próprios sentimentos.

É saber falar de si mesmo.

É ter coragem para ouvir um não. É ter segurança para receber uma crítica, mesmo que injusta.

## RESUMO

O conhecimento dos afastamentos entre os sensores de um navio hidrográfico permite a determinação correta da profundidade e da sua posição (latitude e longitude). Para obter esses valores é necessário o estabelecimento de um sistema cartesiano local, definido e materializado no dique seco. Através de técnicas topográficas é possível transferir as coordenadas do referencial local para a embarcação. O objetivo desta pesquisa é estabelecer uma metodologia para determinar os afastamentos de sensores do navio, tais como sensor GPS/ DGPS, sensor inercial, sensor de giro entre outros, em relação ao sistema de coordenadas local e depurar as suas qualidades, por meio de testes estatísticos e do ajuste de observações por mínimos quadrados. No final, a matriz de coordenadas finais é rotacionada e trazida para o ponto de referência do navio. As medições foram realizadas no Navio Hidrográfico (NH) brasileiro Sirius, que estava atracado na Base Naval do Rio de Janeiro, localizado na Ilha do Mocanguê, Niterói (RJ). A metodologia é adequada para determinar as distâncias entre os sensores auxiliares, em relação ao ponto de referência da embarcação, as quais devem ser aplicadas para melhorar a qualidade dos levantamentos hidrográficos.

Palavras-chave: Afastamentos (*offsets*). Levantamentos Hidrográficos. Transformações de Referenciais.

## ABSTRACT

The knowledge of the offsets among the hydrographic vessel's sensors allows the correct determination of the depth and its position (latitude and longitude). In order to obtain those values is necessary the establishment of the local cartesian frame, defined and materialized at the dry dock. Through topographic techniques is possible to transfer the coordinates from dry dock to vessel. The purpose of this research is to establish a methodology to determine the offsets of the ship's sensor, such as GPS/DGPS, inertial sensor, gyro sensor and etc, in relation to local coordinate system, and debugging its qualities, using statistical tests and adjustment of observations by least squares. At the end, the matrix of the final coordinates were rotated and translated to vessel reference point. The measurement was performed at the Brazilian Hydrographic Ship called Sirius, which was docked at the Base Naval of Rio de Janeiro, located at Ilha do Mocanguê, Niterói. The methodology is suitable for determining the offsets between the auxiliary sensors, in relation to the vessel's reference point, and must be applied in order to improve the quality of the hydrographic surveys.

Keywords: Offsets. Hydrographic Surveys. Transformations of references.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01 – ECOBATÍMETRO MONOFEIXE.....	31
FIGURA 02 – SISTEMA DEXTRÓGIRO.....	33
FIGURA 03 – SISTEMA LEVÓGIRO .....	34
FIGURA 04 – SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO TERRESTRE .....	35
FIGURA 05 – SISTEMA DE REFERÊNCIA INERCIAL.....	35
FIGURA 06 – SISTEMA DE EIXOS TRIORTOGONAL.....	36
FIGURA 07 – MOVIMENTO DE ROLL .....	37
FIGURA 08 – MOVIMENTO DE PITCH.....	38
FIGURA 09 – MOVIMENTO DE YAW .....	38
FIGURA 10 – MÉTODO DO CAMINHAMENTO .....	40
FIGURA 11 – INTERSEÇÃO À VANTE .....	41
FIGURA 12 – IRRADIAÇÃO .....	42
FIGURA 13 – NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO .....	43
FIGURA 14 – TRANSFORMAÇÃO DE CORPO RÍGIDO. ....	50
FIGURA 15 – COMPLEXO NAVAL MOCANGUÊ.....	54
FIGURA 16 – O NAVIO HIDROGRÁFICO SIRIUS .....	55
FIGURA 17 – POSICIONAMENTO DOS SENSORES.....	56
FIGURA 18 – MARCOS TESTEMUNHOS.....	58
FIGURA 19 – MARCOS TESTEMUNHOS.....	58
FIGURA 20 – MARCOS TESTEMUNHOS.....	59
FIGURA 21 – MARCOS TESTEMUNHOS.....	60
FIGURA 22 – SISTEMA DE COORDENADAS LOCAL DOS MARCOS TESTEMUNHOS ..	61
FIGURA 23 – POLIGONAL DOS MARCOS TESTEMUNHOS.....	62
FIGURA 24 – POSIÇÃO DOS PONTOS 21, 30, 25, 24 E 29.....	68
FIGURA 25 – POSIÇÃO DO PONTO 23 .....	69
FIGURA 26 – POSIÇÃO DOS PONTOS 05, 06 E 22.....	69
FIGURA 27 – POSIÇÃO DOS PONTOS 07 E 08 .....	70
FIGURA 28 – POSIÇÃO DOS PONTOS 08 E 09 .....	70
FIGURA 29 – POSIÇÃO DO PONTO 10 .....	71
FIGURA 30 – POSIÇÃO DO PONTO 11 .....	71
FIGURA 31 – POSIÇÃO DO PONTO 12 .....	72
FIGURA 32 – POSIÇÃO DO PONTO 13 .....	72

FIGURA 33 – POSIÇÃO DO PONTO 14 .....	73
FIGURA 34 – POSIÇÃO DOS PONTOS 15 E 16 .....	73
FIGURA 35 – POSIÇÃO DOS PONTOS 17 E 26 .....	74
FIGURA 36 – POSIÇÃO DO PONTO 19 .....	74
FIGURA 37 – POSIÇÃO DOS PONTOS 18 E 20 .....	75
FIGURA 38 – POSIÇÃO DO PONTO 27 .....	75
FIGURA 39 – POSIÇÃO DOS PONTOS 28 E 31 .....	76
FIGURA 40 – IRRADIAÇÕES COM VÁRIAS COTAS.....	82
FIGURA 41 – ORIGEM DAS COORDENADAS DA EMBARCAÇÃO .....	84
FIGURA 42 – GUINADA .....	85
FIGURA 43 – DESVIOS-PADRÃO OBTIDOS PARA AS COORDENADAS NO SISTEMA LOCAL.....	91
FIGURA 44 – DESVIOS-PADRÃO OBTIDOS PARA AS COORDENADAS EM RELAÇÃO À ORIGEM DO SISTEMA DA EMBARCAÇÃO .....	95



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AJB	– Águas Jurisdicionais Brasileiras
CAM	– Centro de Armas da Marinha
CHM	– Centro de Hidrografia da Marinha
CHS	– <i>Canadian Hydrographic Service</i>
DGPS	– <i>Differential Global Position System</i>
DHN	– Diretoria de Hidrografia e Navegação
ESA	– <i>European Space Agency</i>
EU	– <i>European Union</i>
GALILEO	– <i>European Satellite Navigation System</i>
GLONASS	– <i>Global Navigation Satellite System</i>
GNSS	– <i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	– <i>Global Position System</i>
IT	– Instrução Técnica
LH	– Levantamento Hidrográfico
MBES	– <i>Multibeam Echo-Sound</i> , Traduzido como Ecobatímetro Multifeixe
MDIC	– Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MMQ	– Método dos Mínimos Quadrados
NAVSTAR-GPS	– <i>Navigation System with Time and Ranging Global Positioning System</i>
OHI	– Organização Hidrográfica Internacional
RTCM	– <i>Radio Technical Committee for Maritime Service</i>
RTG	– <i>Real Time GIPSY</i>
RTK	– <i>Real Time Kinematic</i>
S-44	– <i>Special n°44 (Standards for Hydrographic Surveys)</i>
SFS	– Sondador de Feixe Simples
SL	– Sonar Lateral
SMF	– Sondador de Multifeixe
SP-44	– <i>Special Publication n°44 (Standards for Hydrographic Surveys)</i>
THU	– <i>Total Horizontal Uncertainty</i>

- TVU – *Total Vertical Uncertainty*
- SBES – *Singlebeam Echo-Sounder*. Traduzido como Ecobatímetro  
Monofeixe
- OWTT – *One-Way Travel Time*. Traduzido como Tempo de Viagem do  
Feixe

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	19
1.2	OBJETIVOS.....	21
1.2.1	Objetivo Geral.....	21
1.2.2	Objetivos Específicos.....	21
1.3	ESTRUTURAÇÃO .....	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>23</b>
2.1	LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS .....	23
2.2	SENSORES.....	28
2.2.1	Sensor Inercial .....	29
2.2.2	Sensor de Rumo (Bússola Giroscópica) .....	29
2.2.3	Ecobatímetro.....	30
2.2.4	Sensores de determinação de posição.....	32
2.3	REFERENCIAIS .....	32
2.3.1	Sistema de coordenadas terrestre local.....	33
2.3.2	Sistema de referência geocêntrico terrestre .....	34
2.3.3	Sistema de referência inercial geocêntrico .....	35
2.3.4	Sistema de coordenadas da embarcação.....	36
2.3.4.1	Atitude da embarcação .....	37
2.4	LEVANTAMENTO PLANIMÉTRICO.....	39
2.4.1	Caminhamento.....	39
2.4.2	Interseção à vante .....	40
2.4.3	Irradiação .....	42
2.5	LEVANTAMENTO ALTIMÉTRICO.....	42
2.5.1	Nivelamento trigonométrico .....	43
2.6	ERROS EM MEDIÇÕES.....	44
2.6.1	Fonte dos erros de observações.....	45
2.6.2	Classificação dos erros de observações.....	45
2.6.3	Critério de Chauvenet .....	46
2.7	TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS ENTRE DOIS ESPAÇOS .....	47
2.7.1	Transformação de corpo rígido .....	48

2.8	AFASTAMENTOS.....	50
2.8.1	Convenção das rotações de Tate-Bryant.....	50
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....</b>	<b>53</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO .....	53
3.2	EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS EMPREGADOS .....	54
3.3	O NAVIO HIDROGRÁFICO SIRIUS .....	55
<b>4</b>	<b>MÉTODOS.....</b>	<b>57</b>
4.1	DEPURAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS E CONTROLE DA QUALIDADE DAS OBSERVAÇÕES NOS MARCOS TESTEMUNHOS ..	62
4.2	DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS PLANIMÉTRICAS DOS MARCOS TESTEMUNHOS NO SISTEMA DE COORDENADAS LOCAL.....	64
4.3	DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS ALTIMÉTRICAS DOS MARCOS TESTEMUNHOS NO SISTEMA DE COORDENADAS LOCAL.....	66
4.4	TESTE DE QUI-QUADRADO DOS AJUSTAMENTOS REALIZADOS.....	67
4.5	DEPURAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS E CONTROLE DA QUALIDADE DAS OBSERVAÇÕES DOS SENSORES E PONTOS AUXILIARES .....	67
4.6	DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS PLANIMÉTRICAS AJUSTADAS DOS SENSORES E PONTOS AUXILIARES NO SISTEMA DE COORDENADAS LOCAL.....	77
4.7	DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS ALTIMÉTRICAS DOS SENSORES E PONTOS AUXILIARES NO SISTEMA DE COORDENADAS LOCAL.....	78
4.7.1	Coordenadas altimétricas de alguns pontos auxiliares por meio de uma poligonal.....	79
4.7.2	Coordenadas altimétricas de alguns pontos auxiliares e de alguns sensores obtidos por meio de irradiação com visadas a partir de uma estação.....	79
4.7.3	Coordenadas altimétricas de alguns pontos auxiliares e de alguns sensores obtidas por meio de irradiação com visadas de mais de uma estação.....	81

4.8	DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS PLANIALTIMÉTRICAS DOS SENSORES AUXILIARES NO SISTEMA DA EMBARCAÇÃO .....	82
4.8.1	Definição do sistema de coordenadas do SIRIUS .....	83
4.8.2	Transformação entre os sistemas de coordenadas .....	84
4.8.2.1	Rotação em torno do eixo Z.....	84
4.8.2.2	Transformação de Corpo Rígido.....	85
4.9	DETERMINAÇÃO DOS AFASTAMENTOS .....	87
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>88</b>
5.1	COORDENADAS LOCAIS DOS MARCOS TESTEMUNHOS .....	88
5.1.1	Análise dos resultados planimétricos e altimétricos.....	89
5.2	COORDENADAS DOS SENSORES E DOS PONTOS AUXILIARES NO SISTEMA LOCAL.....	89
5.2.1	Análise dos resultados planimétricos.....	91
5.2.2	Análise dos resultados altimétricos.....	92
5.3	COEFICIENTES DA TRANSFORMAÇÃO DE CORPO RÍGIDO .....	92
5.4	AFASTAMENTOS (COORDENADAS) DOS PONTOS AUXILIARES E DOS SENSORES EM RELAÇÃO À ORIGEM DO SISTEMA DA EMBACAÇÃO.....	93
5.4.1	Análise dos resultados planimétricos.....	96
5.4.2	Análise dos resultados altimétricos.....	96
<b>6</b>	<b>SÍNTESE DA METODOLOGIA .....</b>	<b>98</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>99</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>101</b>
	<b>APÊNDICE 1.....</b>	<b>105</b>
	<b>APÊNDICE 2.....</b>	<b>106</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países membros da Organização Hidrográfica Internacional (OHI), a qual foi fundada em 1921. Trata-se de uma organização intergovernamental consultiva e técnica que visa apoiar a segurança da navegação e a proteção do ambiente marinho. Dentre os objetivos que a OHI tem, cita-se: a coordenação das atividades dos institutos nacionais de hidrografia; maior uniformidade possível na elaboração de documentos e das cartas náuticas; a adoção de métodos confiáveis e eficientes de realizar e explorar os levantamentos hidrográficos; o desenvolvimento das ciências no campo da hidrografia e das técnicas empregadas na oceanografia.

As resoluções elaboradas pela OHI têm caráter de recomendações gerais para os países membros, hoje cerca de 80 países (<http://www.iho-ohi.net/english/home/about-the-iho/about-the-iho.html>), que a partir destas recomendações estabelecem as suas especificações técnicas.

A Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) é o órgão da Marinha do Brasil que tem como propósitos (<https://www.mar.mil.br/dhn/dhn/index.html>):

- 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;
- 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 realizados pela própria instituição e por outras entidades extras marinha em águas brasileiras.

Segundo a Publicação Especial S-44 da Organização Hidrográfica Internacional (*Internacional Standards for Hydrographic Surveys* – 5.<sup>a</sup> Edição, de Fevereiro de 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 e ecobatímetros. Para que as informações coletadas pelos diferentes sensores estejam referenciadas a um único ponto comum entre eles, estes devem possuir suas posições em relação ao ponto de referência, ou seja, a origem do sistema de coordenadas da embarcação.

A incerteza no posicionamento destes sensores em relação ao sistema da embarcação influencia diretamente nas medidas horizontal (na posição da embarcação) e vertical (profundidade reduzida). Os afastamentos entre os sensores instalados na embarcação (*offsets*<sup>1</sup>), no sistema de coordenadas da embarcação, podem ser determinados através de medidas realizadas externamente à embarcação. É de extrema importância o conhecimento dos ângulos de rotação da embarcação em relação ao seu sistema de coordenadas no instante da realização das medições, quando esta se encontra devidamente posicionada em um dique seco.

Na Engenharia Naval uma das grandes preocupações sempre foi a estabilidade da embarcação. Apesar de cumprir normas especiais de carga, nem sempre o navio atracado no porto está nivelado. Para isso é necessário um sistema de controle de estabilidade, que traga segurança à navegação, à tripulação, carga e navio (Muñoz e Valenzuela, 2007).

Internacionalmente verificam-se poucos estudos científicos visando a determinação dos afastamentos e dos desalinhamentos entre os sensores instalados na embarcação com análise da qualidade das observações e do ajustamento a ser efetuado. Dentre estes estudos destacam-se os realizados pelo Serviço Hidrográfico Canadense (CHS, 2003), e o desenvolvido por Clarke (2003).

O Serviço Hidrográfico canadense realizou um levantamento a partir de técnicas topográficas para posicionar o transdutor de um novo ecobatímetro Sinrad EM1002 e o sensor de movimento Applanix POS/MV320. As precisões finais dos

---

<sup>1</sup> Emprega-se *offsets* na conotação inglesa para designar os deslocamento característicos, neste caso, dos sensores em relação ao ponto de referência.

posicionamentos devem se enquadrar às preconizadas pelo manual do fabricante do ecobatímetro. Inicialmente foi materializado o eixo longitudinal (de balanço) da embarcação, positivo no sentido popa-proa, com discos de aço. Adesivos reflexivos foram colados como alvos nos pontos de interesse e nas posições dos sensores instalados. A partir de dois pontos implantados no dique foram então realizadas medidas nos alvos estabelecidos na embarcação, com o emprego de uma estação total. Resíduos angulares não foram detectados com a calibração do transdutor do ecobatímetro e a precisão angular obtida foi de  $\pm 0,1^\circ$ .

Clarke (2003) propõe uma metodologia para detecção dos alinhamentos entre sensores com a embarcação em movimento (alinhamento dinâmico). Ele emprega antenas GPS realizando um posicionamento RTK e aplicando o *Patch Test*. Contudo este procedimento não possibilita o alinhamento dos sensores em relação ao sistema de referência da embarcação.

No Brasil, verifica-se a existência de levantamentos hidrográficos realizados pela DHN e outras instituições não ligadas à Marinha do Brasil, porém, poucos trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos no que diz respeito à metodologias que poderiam ser normatizadas pelos órgãos competentes, o que seria de extrema importância.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

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 (MDIC, 2010). 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 que permitam a realização de uma navegação segura nas aproximações de portos, canais estreitos, baixios, recifes, bancos de areia e baías.

Por exemplo, uma carta náutica indica a profundidade mínima que o navegante poderá encontrar naquela região do mar ou áreas costeiras e marítimas.

A responsabilidade nacional para confecção de cartas náuticas e de outros produtos voltados à segurança da navegação está a cargo do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).

A Marinha do Brasil realiza levantamentos hidrográficos periodicamente, com o propósito de manter as bases cartográficas atualizadas e verificar novos perigos à navegação.

Os levantamentos hidrográficos são caracterizados pela coleta de dados de profundidade, por meio de ecobatímetros, associados às informações de posição da embarcação, por meio, por exemplo, de receptores que captam os sinais advindos de satélites que compõem um sistema de posicionamento global, e de seus movimentos, por meio de sensores que medem os ângulos de rotação da embarcação em torno de seus três eixos.

De acordo com Ramos (2007), é preciso desenvolver estudos para a realização de referenciais cartesianos locais em diques secos, através de métodos topográficos, a fim de permitir a materialização e o acompanhamento de possíveis alterações em um referencial fixo (linha d'água estática) aos navios e lanchas empregados em levantamentos hidrográficos. A partir deste referencial fixo, são determinados os afastamentos dos sensores, como por exemplo, antena GPS, sistema inercial e transdutores dos ecobatímetros.

Em face do exposto anteriormente verifica-se a necessidade em se desenvolver uma metodologia nacional para a determinação dos afastamentos entre os sensores instalados em uma embarcação hidrográfica.

Constata-se que se referenciais cartesianos locais em diques secos permitem a materialização e o acompanhamento de possíveis alterações fixas às embarcações (p. ex.: linha d'água estática), então os afastamentos dos sensores em relação a um ponto de referência (preferencialmente no centro de massa da embarcação), e conseqüentemente a este referencial cartesiano local devem ser determinados com precisão e confiabilidade. Assim, será garantida a confiabilidade das medições das profundidades obtidas por meio dos levantamentos batimétricos, as quais afetam diretamente as informações a serem empregadas na confecção de cartas náuticas e demais produtos gerados.

Essa dissertação poderá fornecer subsídios à Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) para a geração de uma metodologia nacional, criando uma Instrução Técnica (IT), que vise a determinação dos afastamentos entre os sensores instalados em uma embarcação em relação à origem de seu sistema de coordenadas com confiabilidade.

A metodologia para determinação dos afastamentos será desenvolvida tendo o Navio Hidrográfico SIRIUS como estudo de caso. Posteriormente ela poderá ser aplicada aos outros navios hidrográficos da Marinha, bem como, a navios de entidades não ligadas a este órgão.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Estabelecer uma metodologia para determinação dos afastamentos (*offsets*) entre os sensores instalados em uma embarcação em relação a um ponto de referência denominado origem do sistema de coordenadas da embarcação.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Identificar os sensores que já estão a bordo da embarcação e os que ainda serão instalados;
- Estabelecer e materializar através de marcos testemunhos o referencial cartesiano local;
- Estabelecer e materializar a origem do sistema de coordenadas da embarcação;

- Obter as coordenadas tridimensionais destes marcos no sistema de coordenadas local;
- Obter as coordenadas tridimensionais dos sensores auxiliares no sistema de coordenadas local e no sistema de coordenadas da embarcação;
- Verificar a qualidade das medições realizadas mediante o emprego de testes estatísticos; e
- Aplicar o ajustamento das observações através do método dos mínimos quadrados.

### 1.3 ESTRUTURAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em 7 seções. Na seção 2, é apresentada uma revisão de literatura quanto aos levantamentos hidrográficos, sensores, sistemas de referência, levantamentos planimétricos e altimétricos, erros em medições, transformação de coordenadas entre sistemas e a determinação dos afastamentos entre sensores.

No item área de estudo (seção 3) são descritos os equipamentos, programas utilizados e o objeto de estudo deste trabalho.

Os levantamentos efetuados no Navio Hidrográfico SIRIUS e nos marcos testemunhos localizados ao redor do dique, bem como, os processamentos dos dados fazem parte da seção 4.

A seção 5 refere-se aos resultados obtidos apresentando as devidas análises e as discussões pertinentes.

Uma síntese da metodologia é apresentada na seção 6, bem como, a seqüência dos procedimentos a serem realizados para a obtenção dos objetivos propostos.

As conclusões obtidas, bem como, as recomendações a serem observadas em levantamentos futuros estão na seção 7.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção serão apresentados alguns tópicos importantes para o desenvolvimento da metodologia visando a determinação dos afastamentos entre os sensores instalados em uma embarcação, com relação à origem do sistema de coordenadas de uma embarcação hidrográfica. Inicialmente são abordados os levantamentos hidrográficos com os padrões mínimos de qualidade exigidos pela DHN. Posteriormente, citam-se alguns sensores que podem ser instalados em um navio hidrográfico, considerações sobre os sistemas de referência e os ângulos de inclinação da embarcação, bem como, os levantamentos planialtimétricos que podem ser aplicados nos levantamentos terrestres e a bordo da embarcação. Ao final serão apresentados os erros que podem ocorrer nas medições e a transformação que deve ser realizada entre os sistemas.

### 2.1 LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS

Segundo o Anexo (8), da Portaria 121/MB/2003:

“Entende-se como Levantamento Hidrográfico (LH), para os fins específicos destas instruções, o 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 naturais ou artificiais, navegáveis ou não, que não tenham como finalidade a pesquisa e a investigação científica, de que trata o Decreto nº 96.000, de 2 de maio de 1988” (<https://www.mar.mil.br/dhn/dhn/index.html>).

Segundo Fernandes (1996), levantamento hidrográfico é o processo de coleta de dados, realizações de medições e observações na área costeira e oceânica, conduzido sob a ótica hidrográfica, com o propósito de mapear a área levantada. Eles visam principalmente a exploração, medida e descrição do relevo submarino, tendo em vista o preparo de cartas e documentos náuticos que irão

permitir uma navegação segura, sendo ainda de extrema importância para a ciência e para fins militares.

O processamento adequado dos dados coletados em um levantamento hidrográfico possibilita um conhecimento preciso da natureza do fundo marinho, sua relação geográfica com a costa, as características e dinâmicas oceânicas das áreas navegáveis. Estes levantamentos fornecem subsídios, através da coleta sistemática de dados, necessários ao apoio a atividades de preservação ambiental, exploração de recursos naturais, gerenciamento de zonas costeiras, segurança da navegação e o próprio exercício da soberania do país (RAMOS, 2007).

De acordo com o Anexo (8), da Portaria 121/MB/2003 “Instruções para controle dos levantamentos hidrográficos pela Marinha do Brasil”:

“Todos os Levantamentos Hidrográficos (LH), realizados em território nacional ou em Águas Jurisdicionais Brasileiras e executados por entidades extra Marinha, sejam elas órgãos públicos ou privados, obedecerão ao disposto nestas instruções. A Diretoria de Hidrografia e Navegação (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 Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB), aqui entendidas como as águas interiores, o Mar Territorial e a Zona Econômica Exclusiva (ZEE).” (<https://www.mar.mil.br/dhn/dhn/index.html>).

O termo levantamento batimétrico é encontrado correntemente na literatura, constituindo a principal tarefa de um levantamento hidrográfico. Segundo Krueger (1996), este levantamento tem por objetivo realizar as medições regulares de dados de profundidade associadas a uma posição na superfície d’água (posição da embarcação), necessárias em áreas marítimas, fluviais, lagoas e canais naturais ou artificiais, navegáveis ou não, visando à representação destas áreas em uma carta.

De acordo com Fernandes e Souza (2009), o levantamento batimétrico consiste em um levantamento sistemático e completo do fundo do mar, na área do levantamento hidrográfico, de modo a definir as posições e profundidades mínimas sobre baixios, recifes, bancos de areia e outras feições que apresentam perigo à navegação (profundidades críticas), mudanças súbitas na topografia submarina (profundidades significativas) e as profundidades regulares que representam a morfologia do fundo (profundidades representativas) – nessa ordem.

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 pela DHN 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 publica 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 pela sigla S-44 (Monahan e Wells, 2000).

Os Levantamentos Hidrográficos 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. A classificação dada é a seguinte: Ordem Especial, Ordem 1a, Ordem 1b e Ordem 2 (International Hydrographic Organization, 2008, cap.6, p.15).

Resumidamente pode-se citar que:

“Levantamentos hidrográficos de Ordem Especial são realizados em áreas críticas, com características potencialmente perigosas para a navegação e onde a navegação típica tem reduzido resguardo ao fundo (p.ex.: portos). Ele requer obrigatoriamente uma busca total do fundo e a detecção de feições submarinas de pequena dimensão. Em princípio, devem ser realizados apenas em áreas com menos de 40 m de profundidade.

Levantamentos hidrográficos de Ordem 1a são efetuados em áreas onde a profundidade é suficientemente reduzida para considerar que as feições submarinas no fundo do mar constituem uma preocupação para o tipo de navegação de superfície esperada para a área, mas onde o resguardo ao fundo não é tão crítico como nas áreas alvo de levantamentos de Ordem Especial. Devido a essa preocupação é requerida uma busca total do fundo, no entanto a dimensão das feições submarinas a detectar é maior que a definida para a Ordem Especial. O resguardo ao fundo é menos crítico à medida que a profundidade aumenta, por isso a dimensão das feições submarinas a detectar aumenta em áreas onde a profundidade é superior a 40 m. Em princípio, os LH de Ordem 1a devem ser realizados apenas em áreas com menos de 100 m de profundidade.

Levantamentos hidrográficos de Ordem 1b são efetuados em áreas onde a profundidade é inferior a 100 m e onde um conhecimento geral do fundo é considerado adequado para o tipo de navegação esperada. Nesta ordem de levantamento não é requerida a busca total do fundo, o que significa que algumas feições submarinas possam não ser detectadas, sendo o tamanho delas definido pelo espaçamento máximo entre as linhas de sondagem. Um exemplo será uma área onde as características do fundo são tais que a probabilidade de encontrar uma feição submarina no fundo do mar que represente perigo para a navegação de superfície esperada é reduzida.

Levantamentos hidrográficos de Ordem 2 são efetuados em áreas onde um conhecimento geral do fundo é considerado adequado. Neste tipo de levantamento não é requerida a busca total do fundo. Este tipo de levantamento é recomendado para áreas de profundidades superiores a 100 m. Para essas profundidades é extremamente improvável a existência de feições submarinas com dimensões suficientemente grandes com impacto na navegação de superfície (S-44, 2008)".

A TABELA 01 apresenta os requisitos mínimos para os levantamentos hidrográficos para as quatro ordens de precisão, onde estão definidos os valores máximos permitidos da incerteza horizontal (posicionamento), designada por *Total Horizontal Uncertainty* (THU), e da incerteza vertical (profundidades), designada por *Total Vertical Uncertainty* (TVU).

TABELA 01 – PADRÕES MÍNIMOS PARA LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS.

ORDEM	Exemplos de áreas típicas	Máxima THU admissível (a um nível de confiança de 95%)	Máxima TVU admissível (a um nível de confiança de 95%)	Capacidade de detecção de feições submarinas	Máximo espaçamento entre linhas de sondagem	Métodos e equipamentos recomendados
<b>ESPECIAL</b>	Áreas onde o resguardo à quilha é crítico, normalmente com profundidades inferiores a 40m.	2m	$a = 0,25m$ $b = 0,0075$	Feições submarinas cúbicas com aresta superior a 1m	Não aplicável. Requerida busca total do fundo.	Medição de profundidades ao longo de faixas com SMF ou medição de profundidades ao longo de perfis, complementadas pelos dados de um sistema de varredura, SFS com SL.
<b>1</b>	<b>a</b> Áreas com profundidades inferiores a 100 m e onde o resguardo à quilha é menos crítico, mas onde possam existir estruturas com interesse para a navegação de superfície.	$5m+0,05*d$	$a = 0,5m$ $b = 0,013$	Feições submarinas cúbicas com aresta superior a 2m em fundos até aos 40m; Em fundos superiores, aresta superior a 10% da profundidade.	Não aplicável. Requerida busca total do fundo.	Medição de profundidades ao longo de faixas com SMF ou medição de profundidades ao longo de perfis, complementadas pelos dados de um sistema de varredura, SFS com SL.
	<b>b</b> Áreas com profundidades inferiores a 100 m e onde o resguardo à quilha não é um requisito para a navegação de superfície esperada para a área.	$5m+0,05*d$	$a = 0,5m$ $b = 0,013$	Não aplicável	3 vezes a profundidade média ou 25m, conforme o maior valor.	Medição de profundidades ao longo de perfis com SFS ou com SMF sem busca total do fundo.
<b>2</b>	Áreas com profundidades superiores a 100 m, não requerendo busca total do fundo.	$20m+0,10*d$	$a = 1,0m$ $b = 0,023$	Não aplicável	4 vezes a profundidade média.	Medição de profundidades ao longo de perfis com SFS ou com SMF sem busca total do fundo.

FONTE: Adaptada de OHI (2008).

NOTA: QUILHA: PEÇA DISPOSTA EM TODO O COMPRIMENTO DO CASCO NO PLANO DIAMETRAL E NA PARTE MAIS BAIXA DO NAVIO: CONSTITUI A “ESPINHA DORSAL” DA EMBARCAÇÃO (FONSECA, 1985). SFS (SONDADOR DE FEIXE SIMPLES), SMF (SONDADOR DE MULTIFEIXE), SL (SONAR LATERAL).

O valor máximo permitido da incerteza vertical, para cada profundidade, a um nível de confiança de 95%, é calculado a partir da equação 01, juntamente com os parâmetros  $a$  e  $b$  apresentados na TABELA 01, os quais variam em função da

ordem do levantamento. A máxima THU é fixa para a Ordem Especial e dependendo da profundidade reduzida ( $d$ ) para as demais ordens. Esta equação reconhece que existem erros dependentes e independentes da profundidade.

$$TVU(95\%) = \pm\sqrt{a^2 + (b*d)^2} \quad (01)$$

onde:

$a$ : representa a parcela da incerteza que não varia com a profundidade;

$b$ : coeficiente que representa a parcela da incerteza que varia com a profundidade;

$d$ : profundidade reduzida; e

$b*d$ : representa a incerteza que varia com a profundidade.

## 2.2 SENSORES

O sensor é o dispositivo que programa a monitoração física de um fenômeno ambiental e gera relatórios de medidas. Um sensor produz uma resposta mensurável a mudanças em condições físicas, tais como temperatura, campo magnético e luz (MEGERIAN *et al.*, 2002). Segundo estes autores um sensor, tipicamente, consiste de cinco componentes: detector de hardware, memória, bateria, processador embutido e transmissor-receptor.

Diversos podem ser os sensores instalados em uma embarcação, como por exemplo, sensores de posicionamento; sensores de controle da atitude e sensores de rumo da embarcação. Tem-se que a incerteza horizontal (THU) é afetada pela incerteza na localização e alinhamento dos diferentes sensores. Também para que as profundidades sejam devidamente corrigidas dos movimentos que a embarcação sofre durante os levantamentos hidrográficos é necessário que as posições de todos os sensores instalados nesta embarcação sejam adequadamente conhecidas e referidas a um sistema de eixos tri-ortogonal com origem num ponto de referência, situado no (ou o mais próximo possível do) centro de gravidade do navio ou da embarcação.

### 2.2.1 Sensor Inercial

Os sensores inerciais ou unidades de medida inercial (IMU) são os sensores mais comumente usados em hidrografia. Eles são empregados para medir os ângulos de atitude da embarcação (*roll, pitch e heave*), ou seja, o movimento realizado por esta embarcação ao redor dos eixos que definem o sistema de coordenada da embarcação.

Um sistema de navegação inercial é constituído basicamente por acelerômetros, giroscópios e por dispositivos capazes de processar as informações deles obtidas. Os primeiros são empregados na medição de força específica e os segundos na detecção de movimentos de rotação. A navegação inercial requer uma inicialização apropriada, a qual possibilita o conhecimento contínuo da velocidade, posição e atitude, livres de qualquer interferência externa (FREITAS, 1980).

Os sensores de movimentos são considerados um requisito essencial não somente para o levantamento multifeixe como também para o feixe simples quando se utilizam sistemas de coleta de dados automáticos.

Uma explanação sobre Sistema de Navegação Inercial (*Inertial Navigation System - INS*) pode ser obtida em De Lima (2005).

### 2.2.2 Sensor de Rumo (Bússola Giroscópica)

Geralmente conhecido como agulha giroscópica, este sensor de direção por bússola de três eixos consiste de um disco montado em uma base cujos eixos podem girar livremente em uma ou mais direções mantendo sua orientação em relação a qualquer movimento de um corpo rígido.

O sensor é utilizado para informar o rumo verdadeiro da embarcação. Caso a antena de posicionamento da embarcação e o transdutor estejam localizados no mesmo eixo vertical este rumo é essencial para o sistema de levantamentos hidrográficos por varredura multifeixe, e menos significativo para sistemas de feixe único (OHI, 2010).

Atualmente os sensores de rumo estão baseados em sensores inerciais integrados às informações do GPS diferencial (DGPS), permitindo uma maior precisão.

### 2.2.3 Ecobatímetro

O princípio fundamental de um ecobatímetro consiste em um feixe de ondas sonoras ou ultra-sonoras que é transmitido verticalmente por um emissor instalado no casco do navio. Este feixe atravessa o meio líquido até o fundo do mar, lagoa ou rio, e reflete, voltando à superfície, onde é detectado por um receptor (MIGUENS, 1996).

Sendo a velocidade do som na água conhecida, o tempo decorrido desde a emissão do sinal e a recepção do eco refletido do fundo é convertido em profundidade.

A profundidade medida por um ecobatímetro monofeixe (SBES) equivale à distância vertical advinda da metade deste intervalo de tempo (tempo de viagem do feixe - One-Way Travel Time (OWTT)) decorrido multiplicado pela velocidade de propagação do som na água. No caso dos ecobatímetros multifeixe (MBES) será gerada uma distância inclinada.

Os ecobatímetros monofeixe são empregados há mais de 50 anos pelos serviços hidrográficos ao redor do mundo. Eles apresentam limitações como aquela que advém da largura da abertura do seu cone angular, o qual varia de  $10^\circ$  a  $30^\circ$  em função do modelo empregado. A profundidade é obtida pela extração do menor valor do lóbulo principal. Este equipamento não possibilita o conhecimento das feições submersas ao longo do espaçamento entre duas linhas de sondagem adjacentes. Assume-se neste caso que o fundo do mar se comporta de forma regular, o que de fato pode não ocorrer. Visando superar a deficiência advinda deste ecobatímetro é que surgem os multifeixes. Eles têm a capacidade de medição do ângulo de elevação, de emitir inúmeros feixes estreitos e possibilitar a escolha do ângulo de abertura de varredura. Desta forma, inúmeras informações sobre o fundo do mar são obtidas.

Os SBES podem ter transdutores com uma simples peça de transdutor ou com um alinhamento.

Os MBES têm alinhamentos de transdutores construídos a partir de alguns elementos, estes formam feixes de direções múltiplas e, algumas vezes, direções de feixe compensados do comportamento da plataforma.

Os transdutores são os equipamentos utilizados para a transmissão e a recepção dos pulsos acústicos. Eles operam ao convergir a energia elétrica mecânica, ou seja, os transdutores convertem os pulsos elétricos de um gerador de sinais a vibrações longitudinais que se propagam na coluna de água como uma onda de pressão. Durante a recepção, reciprocamente, as ondas são convertidas em sinais elétricos.

Na FIGURA 01 apresenta-se um ecobatímetro monofeixe composto de:

- Transmissor / Excitador;
- Receptor;
- Amplificador;
- Registrador e/ou indicador;
- Transdutor;
- Comando de transmissão.

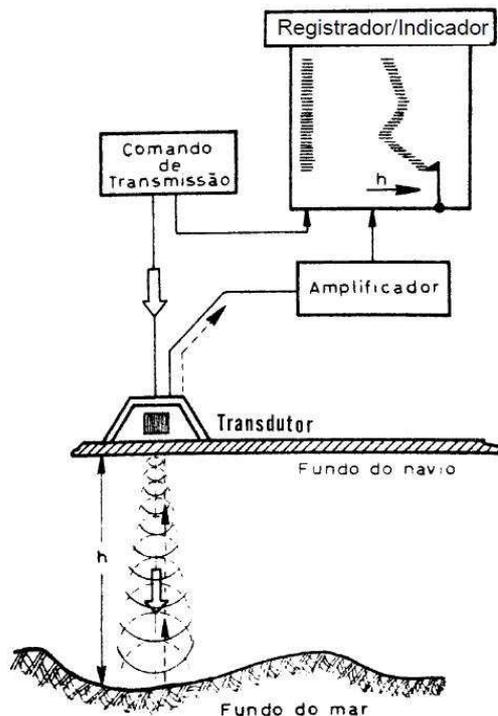


FIGURA 01 – ECOBATÍMETRO MONOFEIXE  
 FONTE: MIGUENS (1996)

#### 2.2.4 Sensores de determinação de posição

São caracterizados pelo conjunto antena/receptor utilizados para determinação da posição de um ponto na superfície da Terra. Existem diferentes sensores possíveis de serem empregados com esta finalidade, contudo, neste trabalho far-se-á restrição aos sensores de determinação de posição por rastreamento de satélites artificiais.

Atualmente dispõe-se dos Sistemas de Posicionamento por Satélites (GNSS), e dentre eles citam-se o NAVSTAR-GPS (*NAVigation System with Time And Ranging - Global Positioning System*) e o GLONASS (*GLObal NAVigation Satellite System*). Um novo sistema de posicionamento global que envolve a União Europeia (EU), a ESA (*European Space Agency*) e a indústria europeia está em implantação e denomina-se GALILEO (*European Satellite Navigation System*). Ele é um sistema controlado por autoridades civis e será compatível com o GPS e o GLONASS.

Amplamente utilizado, o sistema NAVSTAR-GPS permite em levantamentos hidrográficos a aplicação de métodos de posicionamento diferencial em tempo real, podendo-se citar: o GPS Diferencial (*Differential GPS*), o RTK (*Real Time Kinematic*) e o RTG (*Real Time GIPSY*). Segundo Krueger (1996) este método consiste no posicionamento de uma estação móvel através das correções diferenciais geradas na estação de referência. Essas correções são enviadas em tempo real por meio de um sistema de comunicação (p.ex. rádio de transmissão, linha telefônica, ou satélites de comunicação) e dentro de um formato apropriado, definido pela *Radio Technical Committee for Maritime Service (RTCM)*.

### 2.3 REFERENCIAIS

Concebidos para definir posições de objetos no espaço torna-se necessário, no entanto, a adoção de um referencial adequado. Segundo Andrade (1980) o estabelecimento de um referencial exige a sua definição, seguida da correspondente materialização. O referencial definido tem seus parâmetros estabelecidos

teoricamente. O referencial materializado é de natureza prática e sua materialização exige observações acuradas de ordem a torná-la tão próxima quanto possível do referencial definido (ANDRADE, 2003).

Este autor comenta ainda que a escolha de um referencial deve ser criteriosa, pois assim pode-se simplificar a obtenção dos dados (observações), os cálculos e a exatidão dos resultados.

### 2.3.1 Sistema de coordenadas terrestre local

Segundo Monico (2008) um sistema de coordenadas terrestres local proporciona o apoio para levantamentos tridimensionais locais que normalmente são utilizados em Topografia.

Um sistema de coordenadas local cartesiano em sua definição é constituído de três eixos mutuamente ortogonais. No entanto, as direções dos eixos nem sempre seguem a definição convencional (MONICO, 2008).

Para levantamentos, por convenção, o sistema de coordenadas adotado é dextrógiro (FIGURA 02), com suas direções:

- O eixo X é orientado para o Leste;
- O eixo Y é orientado aponta para o Norte;
- O eixo Z é perpendicular ao plano XY e orientado para cima sobre a normal ou vertical.

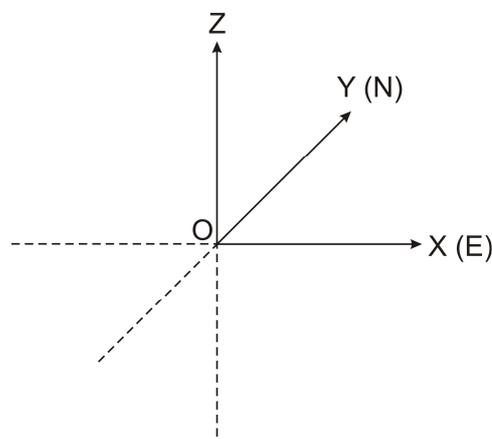


FIGURA 02 – SISTEMA DEXTRÓGIRO  
FONTE: Adaptada de SEEBER (2003)

Neste trabalho adotou-se um sistema de coordenadas local levógiro (FIGURA 03), sendo convencionado por:

- O eixo X é orientado para o Norte;
- O eixo Y obtido através de uma rotação de  $90^\circ$  no sentido horário a partir de X;
- O eixo Z aponta para cima sobre a vertical.

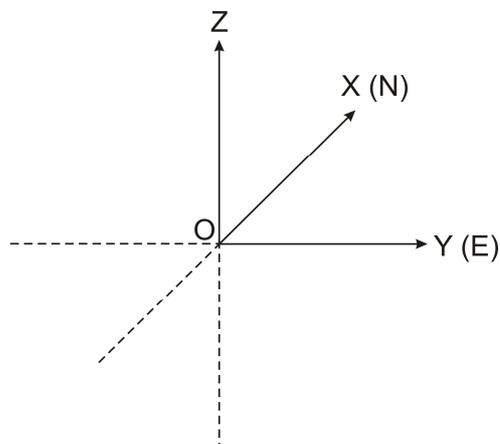


FIGURA 03 – SISTEMA LEVÓGIRO  
FONTE: Adaptada de SEEBER (2003)

### 2.3.2 Sistema de referência geocêntrico terrestre

O sistema de referência geocêntrico (FIGURA 04) é fixo em relação à Terra, com a origem no seu centro de gravidade. O eixo Z aponta para o pólo Norte. O eixo X é a interseção do plano definido pelo meridiano de Greenwich e o plano equatorial, e o eixo Y completa o sistema dextrógiro.

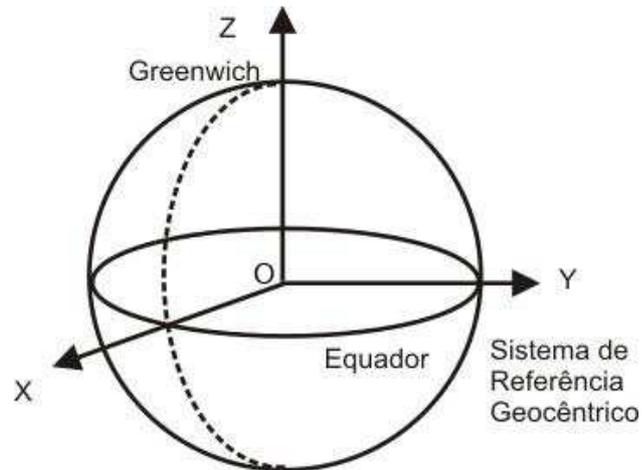


FIGURA 04 – SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO TERRESTRE  
 FONTE: Adaptada de SEEBER (2003)

### 2.3.3 Sistema de referência inercial geocêntrico

O sistema de referência inercial (FIGURA 05) possui origem no centro de gravidade da Terra. O eixo  $Z_1$  aponta para o pólo Norte celeste, o eixo  $X_1$  localiza-se no plano equatorial, direcionado ao ponto vernal ( $\gamma$ ), enquanto o eixo  $Y_1$  completa o sistema dextrógiro.

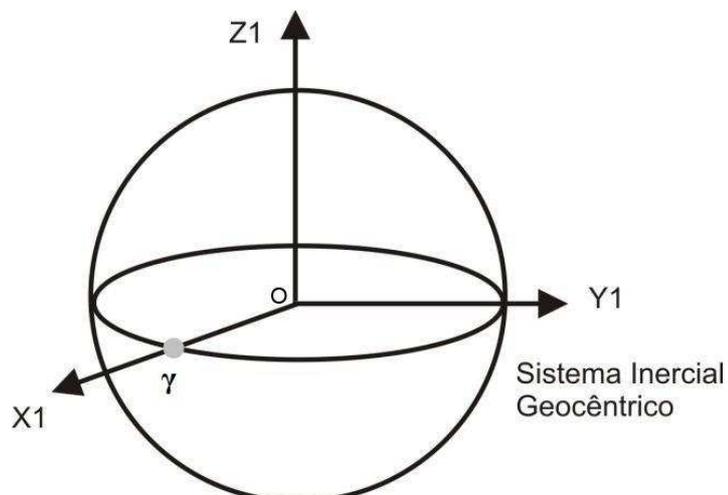


FIGURA 05 – SISTEMA DE REFERÊNCIA INERCIAL  
 FONTE: Adaptada de SEEBER (2003)

### 2.3.4 Sistema de coordenadas da embarcação

Durante a realização de um levantamento hidrográfico todas as determinações são realizadas em condições dinâmicas da embarcação, ou seja, com ela em movimento, sendo que estas devem estar referidas a um mesmo sistema de referência, com origem num ponto de referência.

Desta forma, faz-se necessário a definição de um sistema de coordenadas da embarcação (eixos R, P e W), como mostrado na FIGURA 06, ou seja, um sistema fixo à embarcação em um ponto de referência.

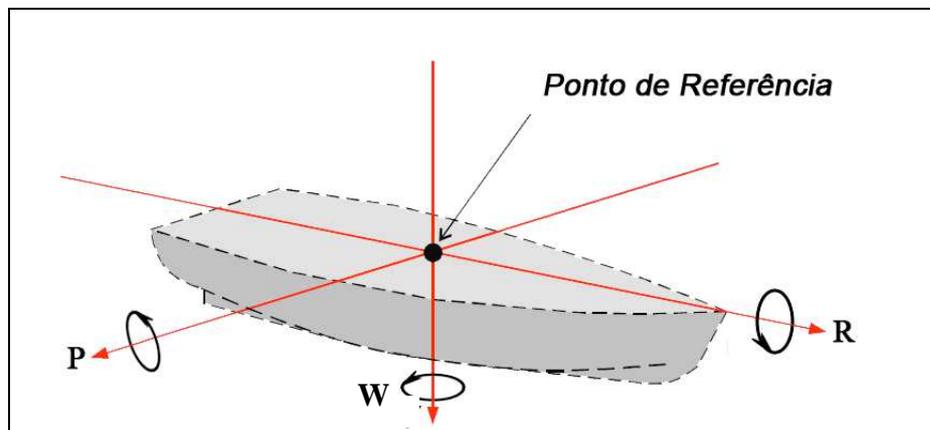


FIGURA 06 – SISTEMA DE EIXOS TRIORTOGONAL

FONTE: Adaptada de <<http://www.hidrografia.xpg.com.br>>. Acesso em 25 de Março de 2009

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 posicionados todos os sensores (seção 2.2) que se encontram a bordo desta embarcação, incluindo os que visam a determinação da sua atitude (seção 2.3.4.1) e do afundamento (*heave*<sup>2</sup>).

A convenção dos eixos se dará da seguinte forma:

---

<sup>2</sup> *Heave* é o movimento vertical relativo de um transdutor causado pela dinâmica marinha que corresponde a sua coordenada vertical média, em um período de tempo predeterminado. Ele deverá ser sentido pelo sensor, acrescido do *heave* induzido.

- Eixo R: é longitudinal à embarcação. Positivo no sentido popa-proa e representa o eixo do balanço (*roll*);
- Eixo P: é transversal à embarcação. Positivo para boreste<sup>3</sup> e representa o eixo de caturro (*pitch*) e
- Eixo W: é perpendicular ao plano formado pelos eixos R e P (FIGURA 06) da embarcação. Positivo no sentido do Nadir da embarcação, formando um sistema dextrógiro. Ele representa o eixo da guinada (*yaw*).

#### 2.3.4.1 Atitude da embarcação

As embarcações durante os levantamentos hidrográficos sofrem movimentos angulares ao redor dos eixos que compõem o sistema de coordenadas da embarcação (figura 06) consistindo na atitude desta embarcação. Ela é medida por meio de sensor de movimento ou inercial (seção 2.2.1).

Os movimentos angulares são classificados em: movimento de balanço (*roll*), movimento de arfagem ou caturro (*pitch*) e movimento de guinada (*yaw*).

O *Roll* consiste na rotação da embarcação sobre o eixo longitudinal (eixo R) e é positivo quando boreste afunda (FIGURA 07):

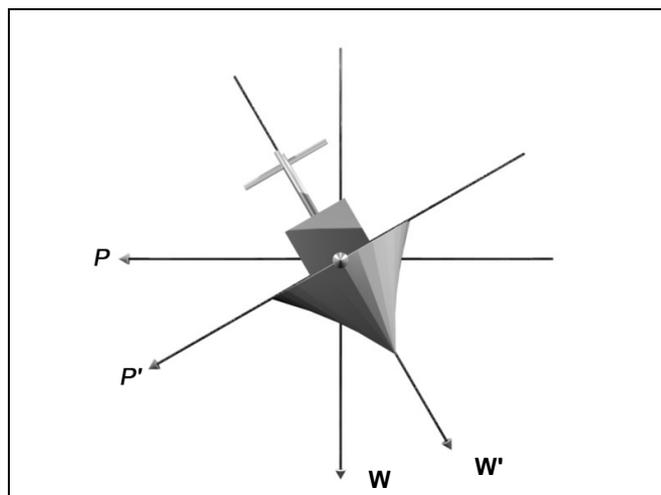


FIGURA 07 – MOVIMENTO DE ROLL

FONTE: Adaptada de <<http://www.hidrografia.xpg.com.br>>. Acesso em 25 de Março de 2009

<sup>3</sup> Boreste é o lado direito da embarcação olhando no sentido popa-proa.

O Pitch é a arfagem ou caturro, advém da rotação no eixo transversal (eixo P) e é positivo quando a proa sobe (FIGURA 08). Por sua vez as rotações de uma embarcação em torno do eixo transversal, devido à proa e da popa ser aumentado ou reduzido ao passar por sucessivas cristas e depressões das ondas é denominada de *pitching*.

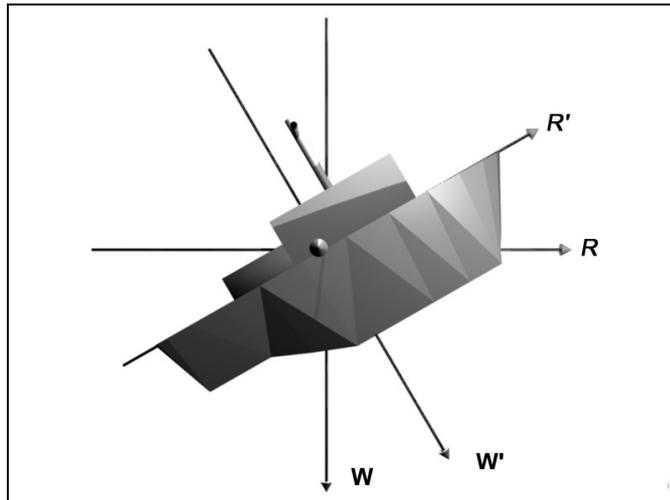


FIGURA 08 – MOVIMENTO DE PITCH

FONTE: Adaptada de <<http://www.hidrografia.xpg.com.br>>. Acesso em 25 de Março de 2009

O Yaw é a rotação do navio em torno do eixo vertical que passa pelo centro de gravidade do navio (eixo W) e é positivo quando a proa se desloca para boreste (FIGURA 09).

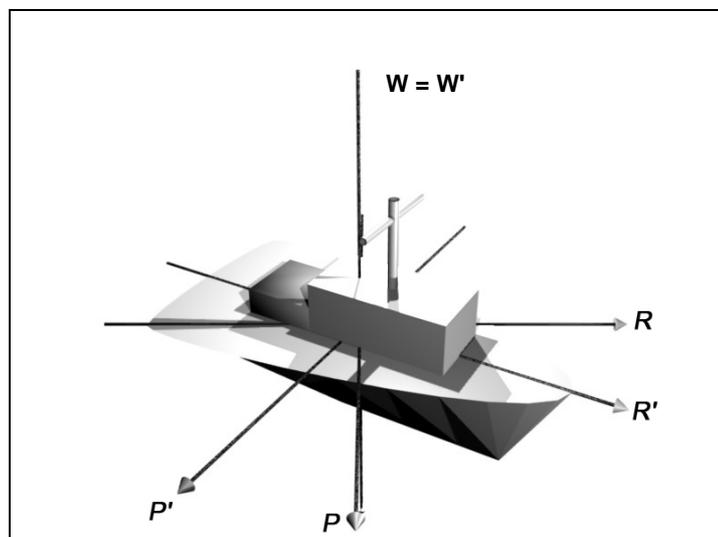


FIGURA 09 – MOVIMENTO DE YAW

FONTE: Adaptada de <<http://www.hidrografia.xpg.com.br>>. Acesso em 25 de Março de 2009

## 2.4 LEVANTAMENTO PLANIMÉTRICO

O levantamento planimétrico é uma técnica que permite realizar medições visando a determinação da posição planimétrica dos pontos (coordenadas X e Y) acima, sobre ou sob a superfície da Terra, almejando-se a futura representação deles, em projeção horizontal. Este levantamento compõe tradicionalmente um levantamento topográfico.

Diversos métodos de medição podem ser aplicados a este levantamento planimétrico como: poligonação, irradiação e interseção avante, as quais serão expostas na seqüência. Segundo Veiga *et.al.* (2007) o método da poligonação é uma das mais empregadas para a determinação de coordenadas de pontos em Topografia.

Pode-se dizer que uma poligonal formada em um levantamento consiste em uma série de linhas consecutivas onde os comprimentos e as direções serão conhecidas através de medições em campo. Este levantamento é realizado pelo método do caminhamento, o qual será exposto na seqüência.

### 2.4.1 Caminhamento

Segundo Fernandes (1996) o método do caminhamento (FIGURA 10) consiste em se percorrer o contorno da poligonal formada, pelo itinerário definido, medindo-se todos os ângulos (internos ou externos), os lados e uma orientação inicial. A partir destes dados e de uma coordenada de partida (coordenadas planimétricas do ponto O) pode-se calcular todas as coordenadas dos pontos que estão formando esta poligonal. Os vértices e os lados da poligonal são utilizados para o levantamento dos detalhes (acidentes topográficos) que existem em suas imediações e que sejam de interesse.

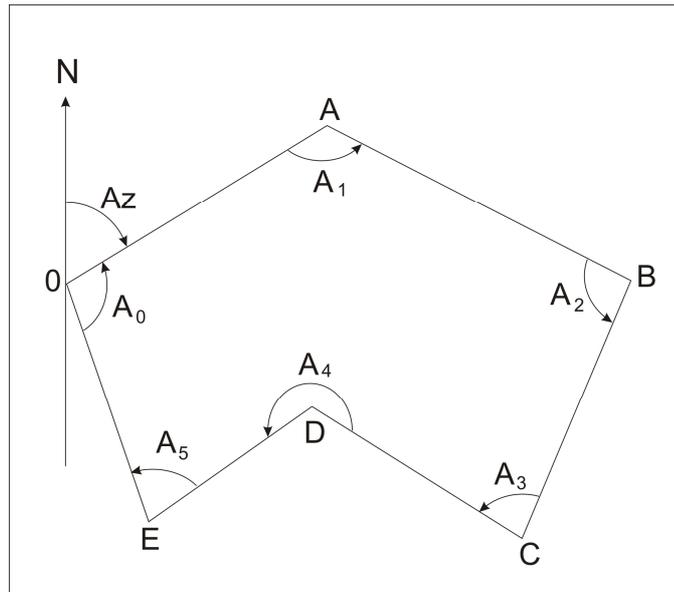


FIGURA 10 – MÉTODO DO CAMINHAMENTO  
 FONTE: Adaptada de FERNANDES (1996)

Segundo a NBR 13133 (ABNT, 1994) as poligonais podem ser classificadas em: principal, secundária e auxiliar, e elas ainda podem ser fechadas, enquadradas ou abertas. Na Figura 10 apresenta-se uma poligonal principal, ou seja, aquela que determina os pontos de apoio topográfico de primeira ordem; e fechada, ou seja, parte de um ponto com coordenadas conhecidas (ponto O) e retorna ao mesmo ponto (FIGURA 10). Sua principal vantagem é permitir a verificação dos erros de fechamento angular e linear. Maiores detalhes consultar, por exemplo, Espartel (1967), Fernandes (1996) e Veiga *et al.* (2007).

#### 2.4.2 Interseção à vante

As visadas na interseção à vante podem ser realizadas a partir de dois pontos de coordenadas conhecidas para o ponto de coordenadas desconhecidas (neste caso os sensores auxiliares na embarcação). Esse método é empregado para determinar as coordenadas planimétricas de pontos de apoio imediato com acesso difícil. Considerando o triângulo APB indicado na FIGURA 11, sendo as coordenadas planimétricas de A e B conhecidas, os azimutes de A para B e de B para A e a

distância AB calculadas, conforme solução do problema inverso, as coordenadas de P podem ser obtidas a partir da equação 02.

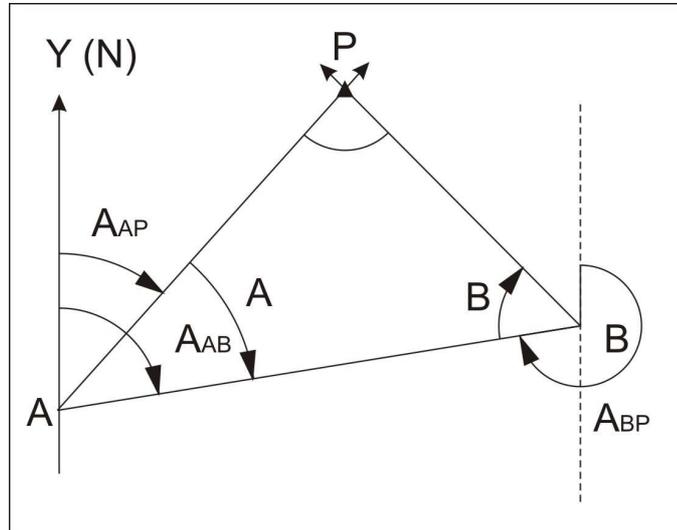


FIGURA 11 – INTERSEÇÃO À VANTE  
 FONTE: Adaptada de FERNANDES (1992)

As equações 02 e 03 apresentam os cálculos de partida na estação A e as equações 04 e 05 os cálculos de partida na estação B. O ângulo formado entre os alinhamentos AP e PB está indicado na equação 06 (Fernandes 1992).

$$\Delta X = AP \operatorname{sen} A_{AP} \Rightarrow X_P - X_A = AP \operatorname{sen} A_{AP} \Rightarrow X_P = AP \operatorname{sen} A_{AP} + X_A \quad (02)$$

$$\Delta Y = AP \cos A_{AP} \Rightarrow Y_P - Y_A = AP \cos A_{AP} \Rightarrow Y_P = AP \cos A_{AP} + Y_A \quad (03)$$

$$\Delta X = BP \operatorname{sen} A_{BP} \Rightarrow X_P - X_B = BP \operatorname{sen} A_{BP} \Rightarrow X_P = BP \operatorname{sen} A_{BP} + X_B \quad (04)$$

$$\Delta Y = BP \cos A_{BP} \Rightarrow Y_P - Y_B = BP \cos A_{BP} \Rightarrow Y_P = BP \cos A_{BP} + Y_B \quad (05)$$

$$P = 180^\circ - (A + B) \quad (06)$$

onde:

$AP$ : é a distância de A até P;

$BP$ : distância de B até P;

$A_{AP}$ : azimute do seguimento AP;

$A_{BP}$ : azimute do seguimento BP;

### 2.4.3 Irradiação

Segundo Veiga *et al.* (2007), a irradiação consiste em, a partir de uma linha de referência conhecida, medir um ângulo ( $\alpha$ ) e uma distância AP (FIGURA 12).

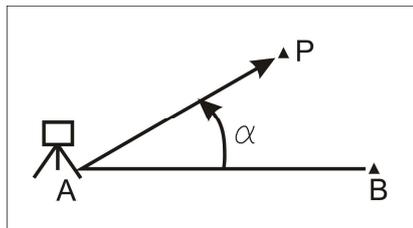


FIGURA 12 – IRRADIAÇÃO  
 FONTE: Adaptada de VEIGA *et al.* (2007)

A distância pode ser obtida utilizando uma trena, distanciômetro eletrônico, estação total ou obtida por métodos taqueométricos. Este método é muito empregado no levantamento de detalhes em campo.

## 2.5 LEVANTAMENTO ALTIMÉTRICO

De acordo com a NBR 14.166 (1994) o levantamento altimétrico ou nivelamento é aquele que objetiva, exclusivamente, a determinação das alturas relativas a uma superfície de referência dos pontos de apoio e/ou dos pontos de detalhe, pressupondo-se o conhecimento de suas posições planimétricas.

Basicamente três métodos são empregados para a determinação dos desníveis: nivelamento geométrico, trigonométrico e barométrico. Na seqüência apresenta-se apenas maiores informações sobre o nivelamento trigonométrico. Maiores detalhes consultar, por exemplo, Espartel (1967), Fernandes (1996) e Veiga *et al.* (2007).

### 2.5.1 Nivelamento trigonométrico

O nivelamento trigonométrico é aquele onde a medição dos desníveis entre pontos situados no terreno é realizada indiretamente, ou seja, a partir da determinação do ângulo vertical (de inclinação, zenital ou nadiral) da direção que os une e da distância (horizontal ou inclinada) entre estes. Assim, fundamenta-se na relação trigonométrica entre o ângulo e a distância medidos, levando em consideração a altura do centro do limbo vertical do teodolito ao terreno e a altura sobre o terreno do sinal visado (ABNT, 1994). Ele apresenta uma exatidão inferior quando comparado ao método de nivelamento geométrico, contudo há locais em que não há possibilidade em se aplicar o nivelamento geométrico.

De acordo com Gemael (1987) a equação 07, obtida para determinação do desnível entre os pontos A e B, só é válida para pequenas distâncias, considerando o plano como referência, não se levando em conta a curvatura da Terra, nem o efeito do da refração no ângulo zenital. Os efeitos supracitados devem ser levados em conta em lances longos, com visadas maiores de 100 m.

Na FIGURA 13 ilustra-se o nivelamento trigonométrico.

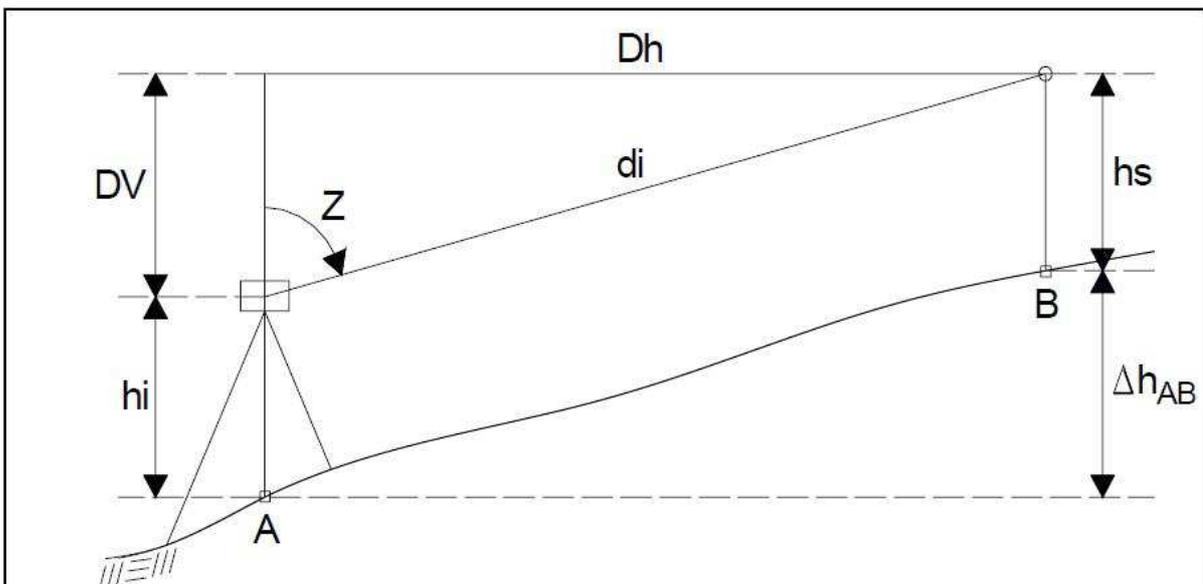


FIGURA 13 – NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO  
 FONTE: Adaptada de VEIGA *et al.* (2007)

onde:

$\Delta h_{AB}$ : é o desnível entre os pontos A e B sobre o terreno;

$h_i$ : é a altura do instrumento de medição;

$h_s$ : altura do alvo mirado;

$Z$ : é o ângulo zenital observado;

$d_i$ : é a distância inclinada medida;

$D_h$ : é a distância horizontal, e

$D_V$ : distância vertical.

O desnível entre os pontos A e B é obtido pela equação 07:

$$\Delta h_{AB} = h_i - h_s + D_h * \cot(Z) \quad (07)$$

## 2.6 ERROS EM MEDIÇÕES

Gemael (2004) afirma que as observações, mesmo sendo repetidas várias vezes, em condições supostamente iguais, vêm acompanhadas dos inevitáveis erros de medida, também chamados de erros de observação ou propriedades estatísticas das observações.

Estes erros são atribuídos à falibilidade humana, à imperfeição do equipamento utilizado e a influência das condições ambientais sobre as variáveis que afetam a medição.

Pode-se afirmar incondicionalmente que (WOLF e GHILANI, 1997):

1. nenhuma medida é exata;
2. toda medida contém erros;
3. o valor verdadeiro de uma medição nunca é conhecido, portanto, a exata dimensão dos erros presentes é sempre desconhecida.

Portanto, decorre a necessidade de se realizar medições em quantidades superabundantes. Desta forma é possível obter um valor que representa o valor mais provável da observação.

### 2.6.1 Fonte dos erros de observações

Os erros resultam de três fontes que são:

- Erros instrumentais: são causados por imperfeições na construção do instrumento ou no seu ajuste. Estão presentes independentemente se o equipamento é lido manualmente ou digitalmente;
- Erros naturais: são causados por mudanças nas condições do meio ambiente. Incluem as variações de pressão atmosférica, temperatura, vento, campos gravitacionais e os campos magnéticos;
- Erros pessoais: surgem devido às limitações humanas, tais como a capacidade de ler um micrômetro ou centrar uma bolha de um nível de bolha perfeitamente. As dimensões desses erros são afetadas pela habilidade pessoal para enxergar e pela destreza manual. Podem ser influenciados pela temperatura, cansaço e outras condições físicas que fazem com que os seres humanos se comportem de uma maneira menos precisa que sob condições ideais.

### 2.6.2 Classificação dos erros de observações

Os erros são classificados em (GEMAEL, 2004):

- Erros grosseiros: ocorrem pela desatenção do observador. Pode ser uma inversão de dígitos em uma anotação, por exemplo;
- Erros sistemáticos: se conhece a causa física, podendo desta forma ser minimizados por técnicas especiais de medição;
- Erros aleatórios: não se sabe a causa, ocorre ora num ora em outro sentido. Por apresentarem distribuição normal, tendem a se neutralizar quando o número de observações cresce.

### 2.6.3 Critério de Chauvenet

Quando uma grandeza  $y$  é medida  $n$  vezes, pode ocorrer que o desvio  $\sigma_{y_i}$  (equação 08) de uma determinada medida seja muito grande quando comparado com o desvio-padrão do conjunto de medidas. Isto pode acontecer devido a erros grosseiros ou eventuais falhas momentâneas do equipamento de medidas ou simplesmente, uma flutuação estatística excepcional. Em qualquer um dos casos, é razoável eliminar  $y_i$  do conjunto de dados (VUOLO, 1992).

$$\sigma_{y_i} = (y_i - \bar{y}) \quad (08)$$

onde:

$\bar{y}$  = a média do conjunto de medidas;

$y_i$  = é o valor da *i-ésima* medida.

O critério de Chauvenet é aplicado para que se possam eliminar as medidas que contenham erros grosseiros do conjunto de observações, assumindo que só restaram os erros aleatórios nas medições realizadas e assim poder aplicar inferências estatísticas ao conjunto de dados. Este critério somente pode ser aplicado para observações diretas (FERNANDES, 1992).

Ao aplicar o critério de Chauvenet para eliminar valores duvidosos, calcula-se o desvio médio e o desvio-padrão do conjunto de dados medidos. O critério de Chauvenet parte da suposição de que os resíduos das observações se distribuem normalmente. Segundo este critério, existe um erro limite  $k$  dado em função do número de medidas  $n$ .

Os valores de  $k$  em função do número de medidas  $n$  foram tabelados por Chauvenet onde alguns destes são apresentados na TABELA 02:

TABELA 02 – CRITÉRIO DE CHAUVENET

Número de medidas da série	Valor de k
4	1,534
5	1,645
6	1,732
7	1,803
8	1,863
9	1,915
10	1,960
11	2,000
12	2,037
13	2,070
14	2,100
15	2,128

FONTE: SERPA (1960)

A observação cujo desvio for maior que o erro limite **k**, deve ser rejeitada.

Para a apresentação dos dados finais, um novo valor médio e um novo desvio-padrão são calculados, sem incluir os pontos eliminados. Deve-se aplicar o critério apenas quando houver quatro ou mais observações no conjunto de dados.

## 2.7 TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS ENTRE DOIS ESPAÇOS

Segundo Klein (1939) a transformação geométrica é uma relação funcional entre objetos geométricos de dois espaços. O estudo geométrico de um objeto em dois espaços é geralmente feito através de um conjunto de pontos dados em ambos os espaços (LUGNANI, 1987).

A transformação geométrica pode ser ativa ou passiva (ARAKI, 2004):

- Transformação ativa: quando o sistema de referência permanece fixo e o objeto é transformado;

- Transformação passiva: quando o sistema de referência é transformado e o objeto permanece estacionário.

### 2.7.1 Transformação de corpo rígido

A transformação de corpo rígido é aquela em que o comprimento de um segmento não varia na transformação. Ela é constituída de três rotações e três translações. As rotações da transformação de corpo rígido são no sentido horário. Porém, como será realizada uma transformação passiva, os sinais das matrizes de rotações são iguais ao da transformação ativa no sentido horário.

- Rotação em torno do eixo X:

$$\begin{bmatrix} R \\ P \\ W \end{bmatrix}_{Embarcação} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(roll) & \text{sen}(roll) \\ 0 & -\text{sen}(roll) & \cos(roll) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{Local} \quad (09)$$

- Rotação em torno do eixo Y:

$$\begin{bmatrix} R \\ P \\ W \end{bmatrix}_{Embarcação} = \begin{bmatrix} \cos(pitch) & 0 & -\text{sen}(pitch) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(pitch) & 0 & \cos(pitch) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{Local} \quad (10)$$

- Rotação em torno do eixo Z:

$$\begin{bmatrix} R \\ P \\ W \end{bmatrix}_{Embarcação} = \begin{bmatrix} \cos(yaw) & \text{sen}(yaw) & 0 \\ -\text{sen}(yaw) & \cos(yaw) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{Local} \quad (11)$$

As rotações serão aplicadas na seguinte ordem:

$$M = R_{yaw} \times R_{pitch} \times R_{roll} \quad (12)$$

O que dá origem a matriz de rotações M, abaixo:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Seus elementos serão:

$$\begin{cases} m_{11} = \cos(pitch) \cos(yaw) \\ m_{12} = \cos(roll) \sin(yaw) + \sin(roll) \sin(pitch) \cos(yaw) \\ m_{13} = \sin(roll) \sin(yaw) - \cos(roll) \sin(pitch) \cos(yaw) \\ m_{21} = -\cos(pitch) \sin(yaw) \\ m_{22} = \cos(roll) \cos(yaw) - \sin(roll) \sin(pitch) \sin(yaw) \\ m_{23} = \sin(roll) \cos(yaw) + \cos(roll) \sin(pitch) \sin(yaw) \\ m_{31} = \sin(pitch) \\ m_{32} = -\sin(roll) \cos(pitch) \\ m_{33} = \cos(roll) \cos(pitch) \end{cases} \quad (14)$$

Logo, a transformação de corpo rígido no espaço se dá matricialmente por:

$$\begin{bmatrix} R \\ P \\ W \end{bmatrix}_{Embarcação} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{Local} + \begin{bmatrix} TX \\ TY \\ TZ \end{bmatrix}_{Translação} \quad (15)$$

onde:

$R$ ,  $P$  e  $W$  são as coordenadas no referencial da embarcação;  $m_{ij}$  são os elementos da matriz de rotação;  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  são as coordenadas no referencial local e  $TX$ ,  $TY$  e  $TZ$  são as translações em seus respectivos eixos.

Um exemplo de transformação de corpo rígido é mostrado na FIGURA 14:

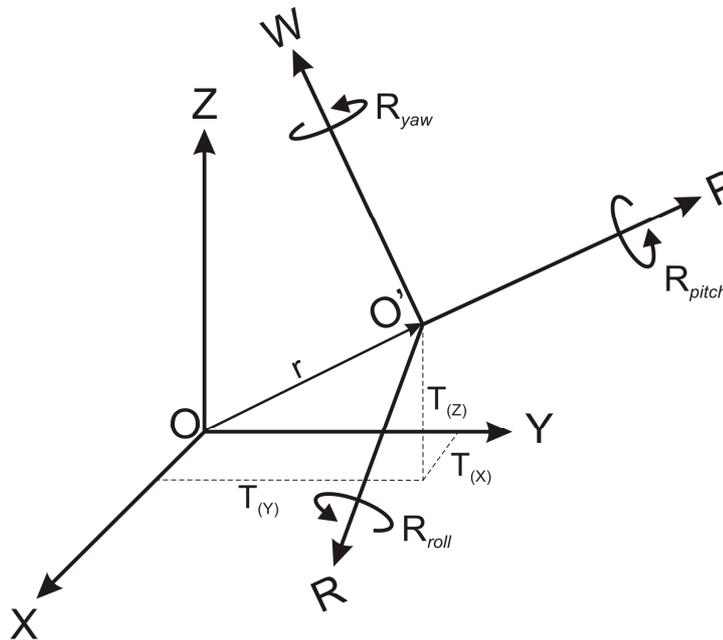


FIGURA 14 – TRANSFORMAÇÃO DE CORPO RÍGIDO.  
 FONTE: Adaptada de COSTA E SANTOS (1998).

## 2.8 AFASTAMENTOS

Cada sensor que produz uma informação para o navio possui sua posição original referida a um ponto, considerado o ponto de referência.

Quando um sensor de movimento está fixo em um determinado lugar, os afastamentos físicos em relação à origem do sistema da embarcação devem ser conhecidos, e assim pode-se obter a relação entre todos os sensores.

### 2.8.1 Convenção das rotações de Tate-Bryant

Quando uma embarcação está em movimento no oceano, as coordenadas obtidas pelos sensores sofrem os efeitos dos movimentos em torno dos seus três eixos.

As correções em rolamento (*roll*), arfagem (*pitch*) e guinada (*yaw*) são aplicadas através de três rotações.

Para correções negativas as rotações se apresentam como:

- Rotação em torno do eixo R:

$$\begin{bmatrix} R \\ P \\ W \end{bmatrix}_{\substack{\text{Embarcação} \\ \text{Corrigido}}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\text{roll}) & -\text{sen}(\text{roll}) \\ 0 & \text{sen}(\text{roll}) & \cos(\text{roll}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ P' \\ W' \end{bmatrix}_{\text{Embarcação}} \quad (16)$$

- Rotação em torno do eixo P:

$$\begin{bmatrix} R \\ P \\ W \end{bmatrix}_{\substack{\text{Embarcação} \\ \text{Corrigido}}} = \begin{bmatrix} \cos(\text{pitch}) & 0 & \text{sen}(\text{pitch}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(\text{pitch}) & 0 & \cos(\text{pitch}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ P' \\ W' \end{bmatrix}_{\text{Embarcação}} \quad (17)$$

- Rotação em torno do eixo W:

$$\begin{bmatrix} R \\ P \\ W \end{bmatrix}_{\substack{\text{Embarcação} \\ \text{Corrigido}}} = \begin{bmatrix} \cos(\text{yaw}) & -\text{sen}(\text{yaw}) & 0 \\ \text{sen}(\text{yaw}) & \cos(\text{yaw}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ P' \\ W' \end{bmatrix}_{\text{Embarcação}} \quad (18)$$

De acordo com a convenção de Tate-Bryant as rotações ocorrem:

$$R_{TB} = R_{\text{yaw}} \times R_{\text{pitch}} \times R_{\text{roll}} \quad (19)$$

Em sua forma matricial apresenta-se como:

$$R_{\text{yaw}} \times R_{\text{pitch}} \times R_{\text{roll}} = \begin{bmatrix} \cos(\text{yaw}) & -\text{sen}(\text{yaw}) & 0 \\ \text{sen}(\text{yaw}) & \cos(\text{yaw}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\text{pitch}) & 0 & \text{sen}(\text{pitch}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(\text{pitch}) & 0 & \cos(\text{pitch}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\text{roll}) & -\text{sen}(\text{roll}) \\ 0 & \text{sen}(\text{roll}) & \cos(\text{roll}) \end{bmatrix} \quad (20)$$

O que dá origem a matriz de rotações  $R_{TB}$ , abaixo:

$$R_{TB} = \begin{bmatrix} \cos(\text{yaw})\cos(\text{pitch}) & -\text{sen}(\text{yaw})\cos(\text{roll}) + \cos(\text{yaw})\text{sen}(\text{pitch})\text{sen}(\text{roll}) & \text{sen}(\text{yaw})\text{sen}(\text{roll}) + \cos(\text{yaw})\text{sen}(\text{pitch})\cos(\text{roll}) \\ \text{sen}(\text{yaw})\cos(\text{pitch}) & \cos(\text{yaw})\cos(\text{roll}) + \text{sen}(\text{yaw})\text{sen}(\text{pitch})\text{sen}(\text{roll}) & -\text{sen}(\text{roll})\cos(\text{yaw}) + \text{sen}(\text{yaw})\text{sen}(\text{pitch})\cos(\text{roll}) \\ -\text{sen}(\text{pitch}) & \cos(\text{pitch})\text{sen}(\text{roll}) & \cos(\text{roll})\cos(\text{pitch}) \end{bmatrix} \quad (21)$$

A equação final de correção utilizando a seqüência de *Tate-Bryan* apresenta-se:

$$\begin{bmatrix} R \\ P \\ W \end{bmatrix}_{\substack{\text{Embarcação} \\ \text{Corrigido}}} = R_{TB} \times \begin{bmatrix} R' \\ P' \\ W' \end{bmatrix}_{\text{Embarcação}} \quad (22)$$

### 3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Nessa seção será apresentada a área de estudo; os materiais empregados nos levantamentos de campo; a embarcação empregada nas observações com os sensores instalados a bordo.

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

Em abril de 2009 o Navio Hidrográfico SIRIUS esteve docado<sup>4</sup> no Complexo Naval da Ilha do Mocanguê (FIGURA 15), próximo a cidade de Niterói, estado do Rio de Janeiro, a fim de cumprir seu ciclo normal de manutenção. Naquela oportunidade, um grupo formado por representantes do Centro de Hidrografia da Marinha, da Universidade Federal do Paraná e da tripulação do navio estiveram a bordo com o propósito de determinar os afastamentos entre os sensores periféricos ao transdutor do Ecobatímetro Multifeixe (MBES) EM302, e suas incertezas.

---

<sup>4</sup> Docar é a operação de assentamento do navio sobre picadeiros em dique seco, a fim de possibilitar pleno acesso a suas partes submersas.



FIGURA 15 – COMPLEXO NAVAL MOCANGUÊ.  
FONTE: MARINHA DO BRASIL (2008)

### 3.2 EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS EMPREGADOS

Os materiais utilizados para o levantamento de campo foram:

- Estação total Leica TCR 407 (Precisão angular de 7" e precisão linear de 2 mm + 2 ppm);
- Prismas GPR 111;
- Prismas auto-adesivos 60 x 60 mm.

Acessórios:

- Tripé;
- Bipé;
- Bases nivelantes.

### 3.3 O NAVIO HIDROGRÁFICO SIRIUS

O Navio Hidrográfico SIRIUS (FIGURA 16) tem como missão coletar e processar dados hidrográficos, oceanográficos e geodésicos. Com isso, contribui para a produção de informações necessárias a construção e atualização das cartas náuticas além de documentos de auxílio à navegação sob a responsabilidade da DHN. Ele ainda proporciona dados para o conhecimento dos fatores físicos das áreas de operações do Poder Naval; realiza comissões de apoio logístico ao Posto Oceanográfico da Ilha da Trindade, o que ajuda na formação de universitários das áreas de biologia marinha e oceanografia, além de auxiliar os serviços meteorológicos marinhos e de sinalização náutica.



FIGURA 16 – O NAVIO HIDROGRÁFICO SIRIUS  
FONTE: MARINHA DO BRASIL (2009)

Na embarcação (FIGURA 17), foram identificados os sensores (seção 2.2) instalados ou a serem instalados, sendo que durante os levantamentos esta embarcação encontrava-se devidamente docada. Na TABELA 03 indicam-se estes sensores, a sua função, a situação no momento do levantamento e a identificação recebida durante o caminhamento realizado.

TABELA 03 – SENSORES NA EMBARCAÇÃO SIRIUS

SENSORES	FUNÇÃO	SITUAÇÃO	IDENTIFICAÇÃO
Antena GPS	Posicionamento	Instalada	21
Antena RTG	Posicionamento	Instalada	30
Antena SeaPath	Rumo	A instalar	25
Sistema Inercial	Atitude	A instalar	19
Transdutor do Ecobatímetro EM302	Profundidade	A instalar	-

FONTE: O AUTOR (2009)

A localização destes sensores está demonstrada na FIGURA 17.



FIGURA 17 – POSICIONAMENTO DOS SENSORES  
 FONTE: O AUTOR (2009)

O sensor inercial (seção 2.2.1) será instalado sobre o ponto de referência (FIGURA 41) para reduções das medidas dos afastamentos no interior da embarcação, ou seja, coincidente com a origem do sistema de coordenadas da embarcação.

O transdutor do ecobatímetro (seção 2.2.3) será instalado na quilha da embarcação na direção do eixo W, estando desta forma abaixo do sistema inercial.

Adesivos reflexivos foram colados nos sensores instalados e nas posições dos sensores a serem instalados, com exceção do transdutor do ecobatímetro, que não fará parte desta pesquisa.

## **4 MÉTODOS**

Nessa seção são apresentados os levantamentos realizados na área de estudo (seção 3.1) e o processamento dos dados observados. Inicialmente tratou-se dos marcos testemunhos implantados no dique possibilitando a definição do sistema de coordenadas local, apresentando-se a determinação das coordenadas planialtimétricas ajustadas destes marcos, após a depuração de erros nas observações realizadas. Posteriormente foram realizados os ajustamentos das observações e aplicado o teste de Qui-Quadrado. Na seqüência foram aplicados estes procedimentos para a determinação das coordenadas planialtimétricas dos sensores no sistema de coordenadas local e posteriormente transformadas para o sistema de coordenadas da embarcação.

Quatro marcos testemunhos foram materializados ao redor do dique Almirante Brasil a fim de estabelecer um sistema de coordenadas local (FIGURAS 18, 19 e 20) em dique seco.



FIGURA 18 – MARCOS TESTEMUNHOS  
FONTE: O AUTOR (2010)



FIGURA 19 – MARCOS TESTEMUNHOS  
FONTE: O AUTOR (2010)



FIGURA 20 – MARCOS TESTEMUNHOS  
FONTE: O AUTOR (2010)

Na FIGURA 21 apresenta-se uma imagem com vista superior do dique Almirante Brasil e um esquema da posição dos marcos testemunhos com a posição dos eixos X e Y do sistema de coordenadas local,



FIGURA 21 – MARCOS TESTEMUNHOS  
 FONTE: Adaptada do GOOGLE EARTH (2010)

O marco testemunho MT72106 foi adotado como a origem do sistema de coordenadas local com coordenadas (100,000; 100,000; 100,000), visando que todas as coordenadas obtidas posteriormente sejam positivas.

O eixo X do sistema é orientado de forma que passe pelo marco testemunho MT72108. O eixo Z coincide com a vertical do lugar. O eixo Y é obtido por uma rotação horária de 90° do eixo X o que completa um sistema de coordenadas levógiro, como indica a FIGURA 22.

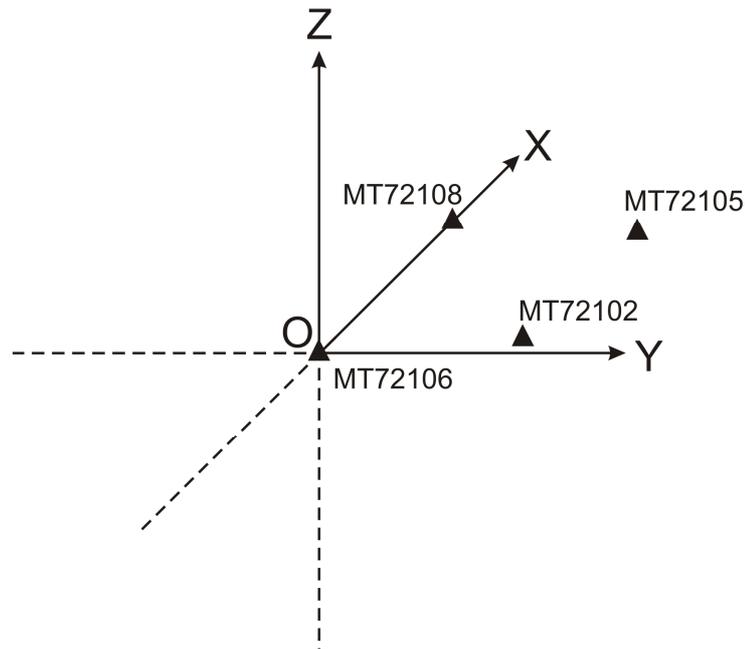


FIGURA 22 – SISTEMA DE COORDENADAS LOCAL DOS MARCOS TESTEMUNHOS  
 FONTE: O AUTOR (2010)

Os ângulos horizontais medidos na poligonal fechada (seção 2.4.1) formada pelos marcos testemunhos são internos, e contados a partir do eixo X em sentido horário. Na TABELA 04 indica-se uma convenção adotada para os marcos testemunhos (doravante denominados de pontos) localizados no dique seco e sendo o caminhamento (FIGURA 23) iniciado no ponto M01, seguindo para o M02, M03 e M04. Em cada uma das estações foi instalada a estação total (seção 3.2) medindo-se o ângulo horizontal, a distância inclinada, o ângulo zenital, bem como, a altura do instrumento e altura do prisma.

TABELA 04 – CONVENÇÃO DOS MARCOS TESTEMUNHOS

<b>Marco</b>	<b>Definição</b>	<b>Convenção</b>
MT72106	Origem do sistema de coordenadas local	M01
MT72102		M02
MT72105		M03
MT72108	Define o eixo X	M04

FONTE: O AUTOR (2010)

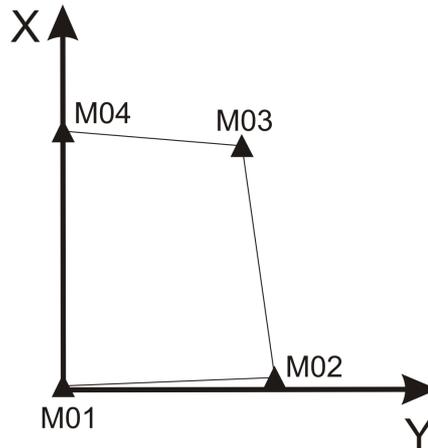


FIGURA 23 – POLIGONAL DOS MARCOS TESTEMUNHOS  
 FONTE: O AUTOR (2010)

Para cada ponto, 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, e a altura do prisma por meio da haste graduada. Os valores das observações realizadas, bem como seus respectivos desvios-padrão, são apresentados no Apêndice 1.

#### 4.1 DEPURAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS E CONTROLE DA QUALIDADE DAS OBSERVAÇÕES NOS MARCOS TESTEMUNHOS

Os valores dos ângulos horizontais (internos) e zenitais obtidos através do levantamento da poligonal foram inseridos em uma planilha, cedida pela Marinha do Brasil, a qual indica a observação em que o resíduo ultrapassa o erro-limite, com base no critério de Chauvenet (seção 2.6.3). 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 seguindo-se os passos indicados na seqüência.

As médias foram calculadas através da equação 23:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \quad (23)$$

onde:

$M$ : é a média;

$l_i$ : são as observações das distâncias;

$n$ : é o número de medidas.

Posteriormente, de posse dos valores mais prováveis, foram calculados os resíduos ( $v$ ) pela equação 24. Seguindo para o cálculo das variâncias ( $\sigma^2$ ) das observações conforme apresentado na equação 25.

$$v = M - l_i \quad (24)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1} \quad (25)$$

onde:

$\sum_{i=1}^n v_i^2$ : é a soma dos quadrados dos resíduos.

E por fim calcularam-se os desvios-padrão das observações de distâncias inclinadas através da equação 26:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (26)$$

Os itens 4.2, 4.3 e 4.4, que seguem, esclarecem os passos da rotina desenvolvida em ambiente Matlab para o cálculo das coordenadas dos marcos implantados no dique seco, bem como as estimativas de suas precisões.

## 4.2 DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS PLANIMÉTRICAS DOS MARCOS TESTEMUNHOS NO SISTEMA DE COORDENADAS LOCAL

As coordenadas planimétricas ajustadas dos marcos testemunhos (FIGURA 21) foram obtidas através do método combinado de ajustamento. As coordenadas aproximadas foram calculadas a partir das observações coletadas através do método de caminhamento (seção 2.4.1) topográfico e foram dadas pelas equações 27 e 28:

$$x_n = x_{n-1} + d \cdot \cos(\alpha) \quad (27)$$

$$y_n = y_{n-1} + d \cdot \sin(\alpha) \quad (28)$$

onde:

$d$ : distância reduzida ao plano;

$\alpha$ : ângulo horizontal.

O Modelo matemático funcional de ajustamento não linear é dado pelas equações 29 para as distâncias e 30 para os ângulos horizontais:

$$d_i = \sqrt{(x_{vante} - x_{ocupado})^2 + (y_{vante} - y_{ocupado})^2} \quad (29)$$

$$a_i = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{y_{vante} - y_{ocupado}}{x_{vante} - x_{ocupado}} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{y_{ocupado} - y_{ré}}{x_{ocupado} - x_{ré}} \right) \quad (30)$$

onde:

$x_{ocupado}$  e  $y_{ocupado}$ : são as coordenadas planimétricas do ponto ocupado;

$x_{vante}$  e  $y_{vante}$ : são as coordenadas planimétricas do ponto da visada de vante;

$x_{ré}$  e  $y_{ré}$ : são as coordenadas planimétricas do ponto da visada de ré.

As equações de condição para o método combinado de ajustamento são apresentadas pelas equações 31 e 32:

$$\sqrt{(x_{vante} - x_{ocupado})^2 + (y_{vante} - y_{ocupado})^2} - d_{medida} = 0 \quad (31)$$

$$tg^{-1}\left(\frac{y_{vante} - y_{ocupado}}{x_{vante} - x_{ocupado}}\right) - tg^{-1}\left(\frac{y_{ocupado} - y_{ré}}{x_{ocupado} - x_{ré}}\right) - \alpha_{medido} = 0 \quad (32)$$

cujo modelo de ajustamento é dado por:

$$F(X_a, L_a) = 0 \quad (33)$$

onde:

$X_a$ : vetor (u x 1) dos parâmetros ajustados;

$L_a$ : vetor (n x 1) das observações ajustadas;

$F$ : função não explícita que relaciona as observações e os parâmetros.

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

$$AX + BV + W = 0 \quad (34)$$

Sendo:  $A$  e  $B$  matrizes das derivadas parciais;  $X$  o vetor dos parâmetros;  $V$  o vetor dos resíduos e  $W$  o vetor erro de fechamento.

A solução da equação 34 é obtida através de:

$$X_i = -[A_i^t M_i^{-1} A_i]^{-1} A_i^t M_i^{-1} W_i \quad (35)$$

onde:

$$M = BP^{-1}B^t \quad (36)$$

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 34 em Dalmolin (2004) e Wolf e Ghilani (1997).

#### 4.3 DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS ALTIMÉTRICAS DOS MARCOS TESTEMUNHOS NO SISTEMA DE COORDENADAS LOCAL

As coordenadas altimétricas ajustadas dos marcos testemunhos (M01 a M04, FIGURA 23) foram obtidas utilizando o método paramétrico de ajustamento com a técnica dos Mínimos Quadrados.

O Modelo matemático funcional calcula os desníveis como a seguir:

$$desnível_i = z_{vante} - z_{ocupado} \quad (37)$$

cujo modelo de ajustamento é dado pela equação 38:

$$L_a = F(X_a) \quad (38)$$

onde:

$L_a$  é o vetor ( $n \times 1$ ) das observações ajustadas;

$X_a$  é o vetor ( $u \times 1$ ) dos parâmetros ajustados;

$F$  é o funcional que relaciona  $L_a$  e  $X_a$ .

E em sua forma linearizada é dado pela equação 39:

$$AX + L = V \quad (39)$$

Os valores ajustados são obtidos a partir da equação 40:

$$X = -N^{-1}U \quad (40)$$

onde:

$$N = A^T P A \quad (41)$$

$$U = A^T P L \quad (42)$$

$$P = \sigma_0^2 \Sigma_{Lb}^{-1} \quad (43)$$

sendo:  $A$  é a matriz das derivadas parciais;  $V$  o vetor dos resíduos;  $P$  a matriz dos pesos;  $\sigma_0^2$  variância da unidade de peso *a priori* e  $\Sigma_{Lb}^{-1}$  a matriz variância-covariância dos valores observados.

#### 4.4 TESTE DE QUI-QUADRADO DOS AJUSTAMENTOS REALIZADOS

A fim de avaliar a qualidade do ajustamento realizado, será realizado o teste de Qui-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.

$$\chi^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} (n - u) = \frac{V^T P V}{\sigma_0^2} \quad (44)$$

onde:

$\hat{\sigma}_0^2$  a variância *a posteriori*;  $\sigma_0^2$  a variância *a priori*;  $n$  o número de equações de observação e  $u$  o número de incógnitas.

#### 4.5 DEPURAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS E CONTROLE DA QUALIDADE DAS OBSERVAÇÕES DOS SENSORES E PONTOS AUXILIARES

Conforme exposto na seção 3.3 na embarcação em estudo, foram identificados cinco sensores listados na TABELA 03. Dentre estes sensores apresentados, almeja-se determinar as coordenadas de quatro deles no sistema

cartesiano local e posteriormente no sistema da embarcação, ilustrados na FIGURA 17.

Visando a determinação das coordenadas deles, fez-se necessário a utilização de 21 pontos auxiliares dos 23 que foram definidos (na Tabela 07 verifica-se que os pontos 27 e 28 não foram considerados). Alguns destes pontos foram materializados com chapas de aço inoxidável e para os outros utilizaram-se adesivos reflexivos. Os pontos auxiliares foram estabelecidos para que se pudessem realizar observações aos alvos quando não houvesse condições diretas de visada. A localização dos pontos auxiliares e sensores é apresentada nas figuras 24 a 39.



FIGURA 24 – POSIÇÃO DOS PONTOS 21, 30, 25, 24 E 29  
FONTE: O AUTOR (2010)

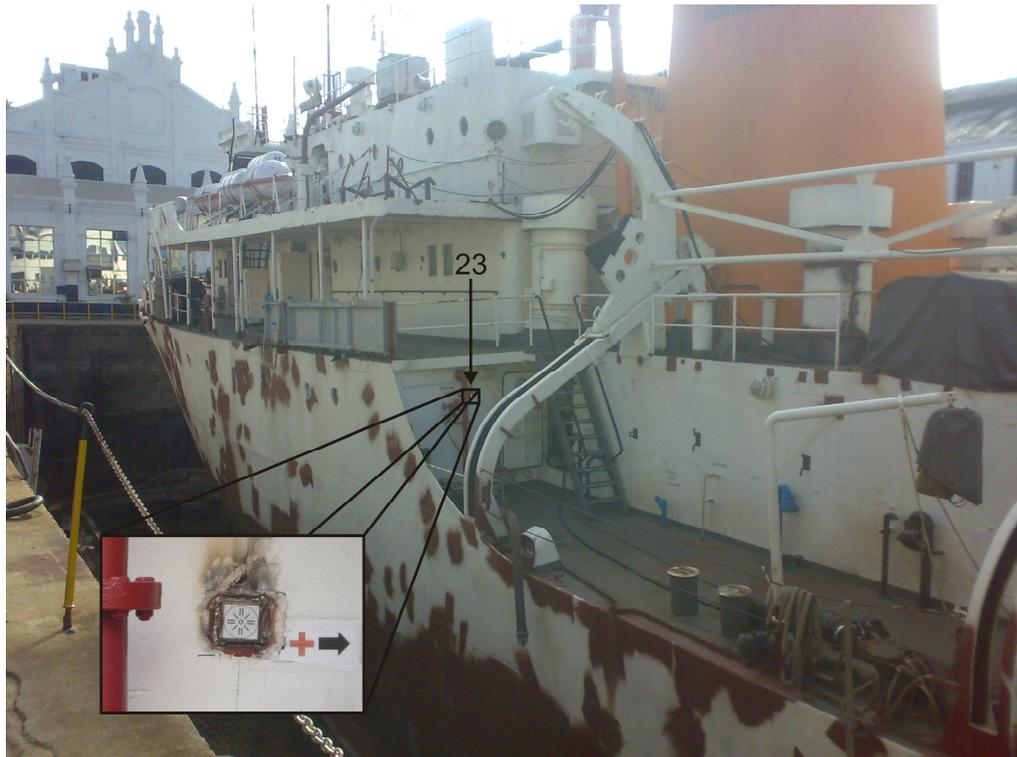


FIGURA 25 – POSIÇÃO DO PONTO 23  
 FONTE: O AUTOR (2010)



FIGURA 26 – POSIÇÃO DOS PONTOS 05, 06 E 22  
 FONTE: O AUTOR (2010)



FIGURA 27 – POSIÇÃO DOS PONTOS 07 E 08  
FONTE: O AUTOR (2010)



FIGURA 28 – POSIÇÃO DOS PONTOS 08 E 09  
FONTE: O AUTOR (2010)

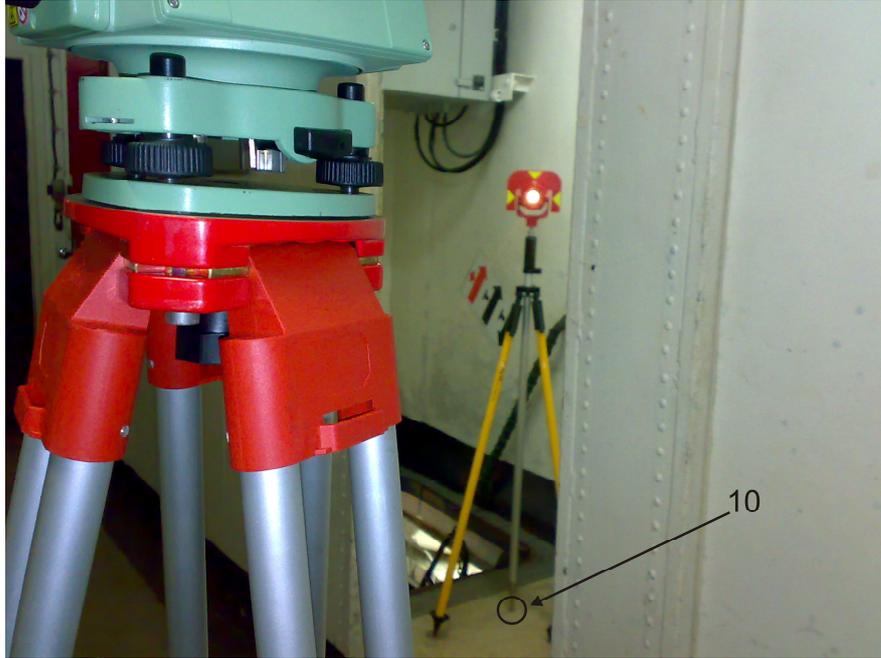


FIGURA 29 – POSIÇÃO DO PONTO 10  
 FONTE: O AUTOR (2010)



FIGURA 30 – POSIÇÃO DO PONTO 11  
 FONTE: O AUTOR (2010)



FIGURA 31 – POSIÇÃO DO PONTO 12  
FONTE: O AUTOR (2010)



FIGURA 32 – POSIÇÃO DO PONTO 13  
FONTE: O AUTOR (2010)



FIGURA 33 – POSIÇÃO DO PONTO 14  
FONTE: O AUTOR (2010)



FIGURA 34 – POSIÇÃO DOS PONTOS 15 E 16  
FONTE: O AUTOR (2010)



FIGURA 35 – POSIÇÃO DOS PONTOS 17 E 26  
FONTE: O AUTOR (2010)



FIGURA 36 – POSIÇÃO DO PONTO 19  
FONTE: O AUTOR (2010)



FIGURA 37 – POSIÇÃO DOS PONTOS 18 E 20  
FONTE: O AUTOR (2010)



FIGURA 38 – POSIÇÃO DO PONTO 27  
FONTE: O AUTOR (2010)



FIGURA 39 – POSIÇÃO DOS PONTOS 28 E 31  
FONTE: O AUTOR (2010)

Nesta fase do levantamento também se realizaram seis 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. Cabe aqui ressaltar que para a poligonal aberta (seção 4.7.1) foram realizadas dez séries de observações. Os valores destas observações e seus respectivos desvios são apresentados no Apêndice 2.

O controle de qualidade das observações dos 25 pontos empregados nesta fase do levantamento foi idêntico ao realizado nos marcos testemunhos (seção 4.5).

Os itens 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9, que seguem, esclarecem os passos da rotina desenvolvida em ambiente Matlab para o cálculo das coordenadas dos sensores e pontos auxiliares, bem como as estimativas de suas precisões.

#### 4.6 DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS PLANIMÉTRICAS AJUSTADAS DOS SENSORES E PONTOS AUXILIARES NO SISTEMA DE COORDENADAS LOCAL

Para o ajustamento das coordenadas planimétricas dos 4 sensores e dos 21 pontos auxiliares utilizou-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 pelo método de interseção à vante (seção 2.4.2) para os pontos 5, 6, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 29, 30, 31 (FIGURAS 20, 21, 22, 31 e 35). E para os demais pontos que não permitiam a utilização desta técnica, as coordenadas foram obtidas pelas equações 27 e 28 e aqui reescritas pelas equações 45 e 46:

$$x_n = x_{n-1} + d \cdot \cos(\alpha) \quad (45)$$

$$y_n = y_{n-1} + d \cdot \sin(\alpha) \quad (46)$$

onde:

$d$  = distância reduzida ao plano;

$\alpha$  = ângulo horizontal.

O modelo matemático funcional de ajustamento é dado por:

a) para as distâncias pela equação 29 e aqui reescrita pela equação 47:

$$d_i = \sqrt{(x_{vante} - x_{ocupado})^2 + (y_{vante} - y_{ocupado})^2} \quad (47)$$

b) para os ângulos, onde impôs-se algumas condições como segue:

1. Para ângulos menores que 90°:

$$a_i = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{x_{ré} - x_{ocupado}}{y_{ré} - y_{ocupado}} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{x_{vante} - x_{ocupado}}{y_{vante} - y_{ocupado}} \right) \quad (48)$$

2. Para ângulos entre 90° e 180°:

$$a_i = 180^\circ - \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{y_{ré} - y_{ocupado}}{x_{ré} - x_{ocupado}} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{y_{vante} - y_{ocupado}}{x_{vante} - x_{ocupado}} \right) \quad (49)$$

3. Para ângulos entre 180° e 270°:

$$a_i = 180^\circ + \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{y_{vante} - y_{ocupado}}{x_{vante} - x_{ocupado}} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{y_{ré} - y_{ocupado}}{x_{ré} - x_{ocupado}} \right) \quad (50)$$

4. Para ângulos acima de 270°:

$$a_i = 360^\circ + \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{y_{ré} - y_{ocupado}}{x_{ré} - x_{ocupado}} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{y_{vante} - y_{ocupado}}{x_{vante} - x_{ocupado}} \right) \quad (51)$$

#### 4.7 DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS ALTIMÉTRICAS DOS SENSORES E PONTOS AUXILIARES NO SISTEMA DE COORDENADAS LOCAL

Para encontrar 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 através de uma irradiação;
- Na terceira etapa, calcularam-se as coordenadas dos pontos que foram visados de vários pontos ocupados.

#### 4.7.1 Coordenadas altimétricas de alguns pontos auxiliares por meio de uma poligonal

A poligonal composta de quatorze pontos auxiliares possibilitou mediante um caminhamento a determinação das coordenadas altimétricas destes pontos. Inicialmente foi instalada a estação total no ponto 06 que fica no Convés principal a bombordo próximo à escada que leva ao Convôo da embarcação (FIGURA 26). Realizou-se a medida de ré no ponto 05 (FIGURA 26) e a medida de vante no ponto 07 (FIGURA 27), o caminhamento seguiu pelos pontos 08 (FIGURAS 27 e 28), ponto 09 (FIGURA 28) e ponto 10 (FIGURA 29). A partir do ponto 10 foi visado o ponto 11 (FIGURA 30), situado num compartimento inferior denominado Coberta de sargento. Do ponto 11 foram realizadas irradiações ao ponto origem (ponto 19, FIGURA 36) de coordenadas da embarcação que serão apresentadas na seção 4.7.2. A poligonal sobe para o compartimento superior à Coberta de sargento a partir do ponto 11, usando o ponto 12 (FIGURA 31) como vante, seguiu-se o caminhamento pelos pontos 13 (FIGURA 32) e 14 (FIGURA 33). A partir do ponto 14 a poligonal subiu para o compartimento superior que leva ao Convés 1 na proa onde foi visado o ponto 15 (FIGURA 34) seguindo para o ponto 16 (FIGURA 34) e fechando este caminhamento no ponto M04 (FIGURA 21) situado no dique.

As coordenadas altimétricas ajustadas destes 14 pontos foram obtidas empregando-se o método paramétrico de ajustamento, cujo modelo matemático funcional é representado pela equação 37 e aqui reescrito pela equação 52:

$$desnível_i = z_{vante} - z_{ocupado} \quad (52)$$

#### 4.7.2 Coordenadas altimétricas de alguns pontos auxiliares e de alguns sensores obtidos por meio de irradiação com visadas a partir de uma estação

Nove pontos dentre os quais sete deles (06, 18, 19, 20, 22, 23 e 31) estão localizados na embarcação. A coordenada altimétrica do ponto 05 situado no dique

(FIGURA 26) foi obtida a partir do ponto M01 (FIGURA 21) e na sequência foram obtidas as coordenadas altimétricas dos pontos 06, 22 e 23 (FIGURAS 25 e 26) usando o ponto 05 (FIGURA 26).

A partir do ponto 11 situado na embarcação (FIGURA 30) obtiveram-se as coordenadas altimétricas dos pontos 18, 19 e 20 (FIGURAS 36 e 37).

Dentre estes pontos está a origem do sistema de coordenadas da embarcação (ponto 19, FIGURA 36).

A partir do ponto M04 (FIGURA 21) realizou-se a irradiação para o ponto 29 (FIGURA 24) e deste para o ponto 31 (FIGURA 39).

As coordenadas altimétricas destes nove pontos foram estimadas através da propagação das variâncias, fixando-se o ponto ocupado, pois, da maneira como foi realizado o levantamento, não foi possível realizar o ajustamento pelo método dos Mínimos Quadrados com o modelo explícito em face da impossibilidade em se ocupar os pontos visados.

O modelo matemático utilizado para a propagação das variâncias e que estimou as cotas dos pontos é o apresentado na equação 53:

$$z_i = z_{i-1} + (d_i * \cos(dz)) + h_i - h_p \quad (53)$$

onde:

- $z_i$  = coordenada altimétrica do ponto no sistema cartesiano local;
- $z_{i-1}$  = coordenada altimétrica do ponto anterior no sistema cartesiano local;
- $d_i$  = distância inclinada entre os pontos visados;
- $dz$  = distância zenital;
- $h_i$  = altura do instrumento instalado no ponto;
- $h_p$  = altura do prisma instalado no ponto.

Então a expressão da propagação (DALMOLIN, 2004) é:

$$\Sigma_x = D \Sigma_{Lb} D^T \quad (54)$$

onde:

$$D = \frac{\partial F}{\partial X} \Big|_{X=Lb} \quad (55)$$

e

$$\Sigma_{Lb} = \begin{bmatrix} \sigma_{z_{i-1}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{di}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{dz}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{hi}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{hp}^2 \end{bmatrix} \quad (56)$$

onde:

$\sigma_{z_{i-1}}^2$  : variância da coordenada Z;

$\sigma_{di}^2$  : variância da distância inclinada;

$\sigma_{dz}^2$  : variância do ângulo zenital;

$\sigma_{hi}^2$  : variância da altura do instrumento;

$\sigma_{hp}^2$  : variância da altura do prisma.

#### 4.7.3 Coordenadas altimétricas de alguns pontos auxiliares e de alguns sensores obtidas por meio de irradiação com visadas de mais de uma estação

Um conjunto de seis pontos auxiliares (17, 21, 24, 25, 26 e 30), que compõem o levantamento tiveram observações realizadas a partir de, pelo menos, duas outras estações, sendo que as suas coordenadas altimétricas estimadas puderam ser calculadas através da propagação das variâncias.

A coordenada altimétrica do ponto 17 (FIGURA 35) foi determinada a partir dos pontos 29 (FIGURA 24), M03 e M04 (FIGURA 21) e do ponto 21 (FIGURA 24) a partir dos pontos M03, M01 (FIGURA 21) e ponto 05 (FIGURA 26).

Os pontos 29 (FIGURA 24), M03 e M04 (FIGURA 21) foram utilizados para determinar as coordenadas altimétricas dos pontos 24, 25 (FIGURA 24) e 26 (FIGURA 35). E por fim utilizaram-se os pontos 29 (FIGURA 24) e M04 (FIGURA 21) para determinar o ponto 30 (FIGURA 24).

Cada segmento que chega a estes pontos, como ilustrado na FIGURA 40, gera um valor de cota, e, por este motivo, seu valor final foi obtido pela média das cotas calculadas.

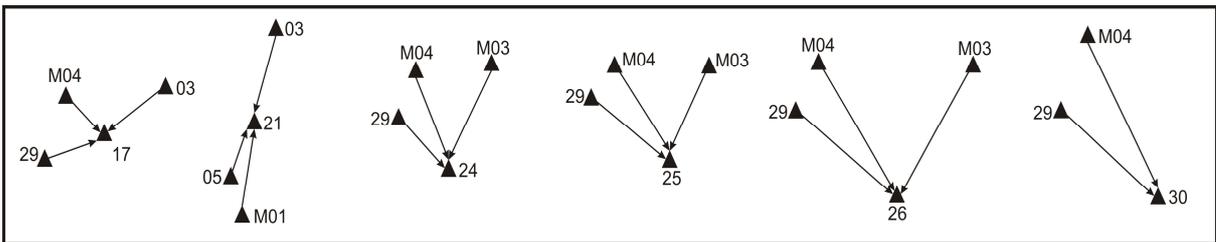


FIGURA 40 – IRRADIAÇÕES COM VÁRIAS COTAS  
FONTE: O AUTOR (2010)

Dentre estes pontos encontram-se os seguintes sensores: antena GPS (ponto 21), antena RTG (ponto 30), SeaPath (ponto 25), a FIGURA 24 apresenta a posição destes sensores.

As coordenadas Z no sistema de referencia cartesiano local destes seis pontos (17, 21, 24, 25, 26 e 30) foram estimadas após a propagação das variâncias.

#### 4.8 DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS PLANIALTIMÉTRICAS DOS SENSORES AUXILIARES NO SISTEMA DA EMBARCAÇÃO

Nessa seção apresenta-se a definição do sistema de coordenadas da embarcação SIRIUS e a transformação das coordenadas planialtimétricas locais para o sistema de coordenadas da embarcação.

#### 4.8.1 Definição do sistema de coordenadas 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 3.3) foi lançado ao mar em 1957, 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.

Em um dique cheio d'água a embarcação é atracada e estabilizada visando a marcação ao longo do costado da linha d'água estática possibilitando a determinação do plano RP. Tendo este plano como referência materializou-se chapas na parte externa e interna do navio, definindo os eixos RP.

Na construção de uma embarcação hidrográfica o seu centro de massa e a origem do sistema de referência são definidos. 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 a instalação de um sensor inercial, localizado exatamente sobre a mesma.

Como o centro de massa da embarcação está situado na praça de máquinas, esta origem (FIGURA 41) não coincide com o mesmo, mas próximo, visando assim, minimizar as vibrações e perturbações advindas da praça de máquinas sobre o sensor inercial.

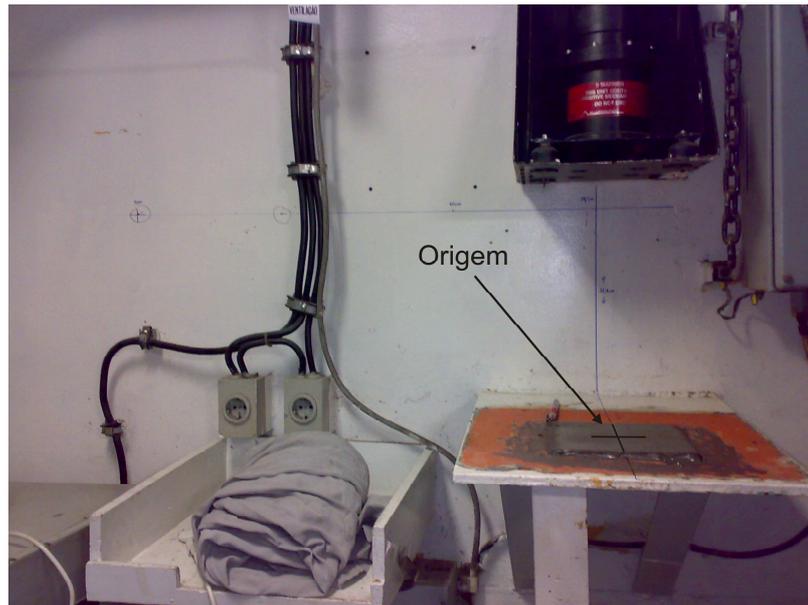


FIGURA 41 – ORIGEM DAS COORDENADAS DA EMBARCAÇÃO  
 FONTE: O AUTOR (2009)

#### 4.8.2 Transformação entre os sistemas de coordenadas

As coordenadas ajustadas obtidas encontram-se em um sistema de coordenadas local (FIGURA 22). Para que estas sejam transformadas para o sistema de coordenadas da embarcação faz-se necessário aplicar transformações, ou seja, rotacionar o eixo Z e posteriormente aplicar a transformação de corpo rígido (seção 2.7.1).

##### 4.8.2.1 Rotação em torno do eixo Z

Buscando deixar paralelos os eixos X e Y (sistema de coordenadas local, seção 2.3.1, FIGURA 03) com os eixos R e P (sistema de coordenadas da embarcação, seção 2.3.4, FIGURA 06), uma rotação foi feita em torno do eixo Z do sistema de coordenadas local do valor equivalente à guinada sofrida pela embarcação após ela ter sido docada.

Os pontos 06 e 22 (FIGURA 26) 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 2.3.4.1). Já em terra, os marcos M01 e M04 representam o eixo X. Logo, foi possível encontrar os ângulos entre estes dois eixos, e realizar a rotação em Z, com a seguinte equação:

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \frac{(y_{06} - y_{22})}{(x_{06} - x_{22})} \quad (57)$$

O valor encontrado para o ângulo de rotação em Z foi de  $-2,77^\circ$ , conforme ilustrado na FIGURA 42:

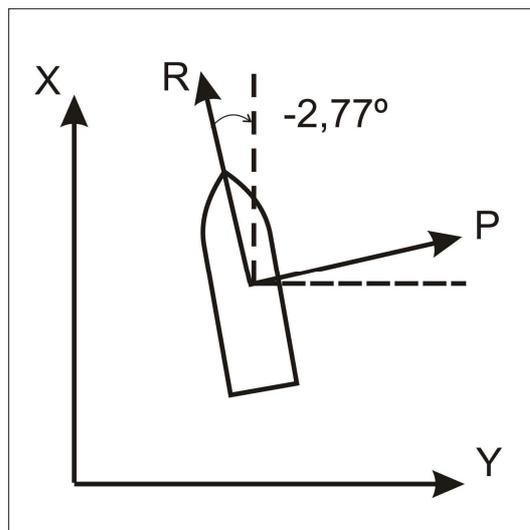


FIGURA 42 – GUINADA  
 FONTE: O AUTOR (2010)

#### 4.8.2.2 Transformação de Corpo Rígido

A seção 2.7.1 apresentou a transformação de Corpo Rígido, transformação passiva, que será aplicada empregando-se 5 pontos (06, 18, 20, 22, 26) cujas coordenadas são conhecidas no sistema da embarcação e no sistema local, como mostra a TABELA 05:

TABELA 05 – COORDENADAS DOS 5 PONTOS EM AMBOS OS SISTEMAS

Ponto	Coordenadas dos Pontos no Sistema da embarcação (metros)			Coordenadas dos Pontos no Sistema local (metros)		
	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

FONTE: O AUTOR (2010)

As coordenadas no sistema da embarcação foram calculadas através das medidas realizadas no interior do navio, com a estação total, utilizando a mesma metodologia para cálculo das coordenadas dos marcos testemunhos.

Para realizar a transformação de corpo rígido, primeiramente são calculados os coeficientes da transformação. Os elementos  $m_{ij}$  da matriz de rotação M (equação 13), bem como o vetor de translação são determinados.

O conhecimento dos valores dos ângulos de atitude não são necessários para a realização da transformação de corpo rígido, somente seus coeficientes, pois necessita-se das coordenadas dos pontos no sistema de coordenadas da embarcação. Para as correções de Tate-Bryant, são utilizados os ângulos de atitude, obtidos a partir de um sensor inercial.

Os coeficientes de transformação foram calculados pela equação 15, onde são conhecidos os valores das coordenadas de 5 pontos no sistema de coordenadas local e da embarcação e também os valores de:

- TX = Translação do eixo X em metros;
- TY=Translação do eixo Y em metros;
- TZ=Translação do eixo Z em metros.

Posteriormente os coeficientes de transformação foram 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) que a embarcação sofreu no momento da docagem, esta correção foi aplicada como se explica na seqüência.

#### 4.9 DETERMINAÇÃO DOS AFASTAMENTOS

É necessário realizar as devidas correções nas coordenadas obtidas no sistema da embarcação quanto aos movimentos de rolamento (R) e arfagem (P) a que a embarcação sofreu após a sua docagem (FIGURAS 07 e 08).

Os valores dos ângulos a serem corrigidos foram cedidos pelo Centro de Armas da Marinha (CAM), sendo:

- Rolamento: +55';
- Arfagem: -9';
- Guinada: -2,77°.

O ângulo de guinada foi calculado e corrigido antes da transformação entre os sistemas (seção 4.8.2).

As rotações foram aplicadas, seguindo a convenção de Tate-Bryant conforme apresentada na seção 2.8.1.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresenta-se nesta seção as análises e discussões para os resultados alcançados mediante o exposto na seção 4. Apresenta-se em subseções as análises e discussões para os marcos testemunhos implantados no dique e para os sensores instalados na embarcação, bem como, para os demais pontos auxiliares.

### 5.1 COORDENADAS LOCAIS DOS MARCOS TESTEMUNHOS

Os valores obtidos com a aplicação do exposto nas seções 4.1, 4.2, 4.3 para as coordenadas ajustadas dos marcos testemunhos no sistema de referencia local, bem como, os seus desvios-padrão encontram-se indicados na TABELA 06. Segundo exposto na seção 4 o ponto M01 (MT72106) foi definido como a origem do sistema de coordenadas local e as suas coordenadas locais adotadas foram iguais a 100,000m ; 100,000m ; 100,000m, para X, Y e Z, respectivamente.

TABELA 06 – COORDENADAS AJUSTADAS DOS MARCOS TESTEMUNHOS

<b>Marco</b>	<b>X (m)</b>	<b>Desvio (m)</b>	<b>Y (m)</b>	<b>Desvio (m)</b>	<b>Z (m)</b>	<b>Desvio (m)</b>
M01	100,000	± 0,000	100,000	± 0,000	100,000	± 0,000 m
M02	100,382	± 0,008	126,504	± 0,010	100,108	± 0,0002 m
M03	186,661	± 0,005	119,739	± 0,010	100,098	± 0,0002 m
M04	185,457	± 0,000	100,000	± 0,000	100,089	± 0,0002 m

FONTE – O AUTOR (2010)

### 5.1.1 Análise dos resultados planimétricos e altimétricos

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.

## 5.2 COORDENADAS DOS SENSORES E DOS PONTOS AUXILIARES NO SISTEMA LOCAL

Os valores obtidos com a aplicação do exposto nas seções 4.5, 4.6, 4.7 para as coordenadas ajustadas dos sensores e dos pontos auxiliares no sistema de referencia local, bem como, os seus desvios-padrão encontram-se indicados na TABELA 07.

TABELA 07 – COORDENADAS DOS SENSORES E PONTOS AUXILIARES NO SISTEMA LOCAL

Ponto	Sensores	X (m)	Desvio (m)	Y (m)	Desvio (m)	Z (m)	Desvio (m)
05	-	118.021	± 0,001	97.970	± 0,003	99.987	± 0,011
06	-	127.941	± 0,028	106.951	± 0,062	98.325	± 0,001
07	-	140.336	± 0,028	106.290	± 0,072	98.284	± 0,057
08	-	141.271	± 0,028	109.532	± 0,073	98.489	± 0,063
09	-	161.392	± 0,029	107.864	± 0,050	98.316	± 0,081
10	-	163.082	± 0,029	109.315	± 0,049	98.345	± 0,082
11	-	166.188	± 0,027	108.489	± 0,052	95.752	± 0,083
12	-	162.708	± 0,026	109.242	± 0,047	98.336	± 0,082
13	-	161.506	± 0,024	107.897	± 0,047	98.309	± 0,082
14	-	159.525	± 0,022	107.758	± 0,049	98.265	± 0,082
15	-	156.612	± 0,019	106.330	± 0,055	100.506	± 0,080
16	-	164.966	± 0,016	105.275	± 0,033	100.612	± 0,075
17	-	177.995	± 0,011	108.954	± 0,009	101.403	± 0,056
18	-	164.280	± 0,116	108.627	± 0,051	95.726	± 0,001
<b>19</b>	<b>Inercial</b>	<b>163.365</b>	<b>± 0,033</b>	<b>110.637</b>	<b>± 0,051</b>	<b>97.390</b>	<b>± 0,001</b>
20	-	163.276	± 0,029	108.681	± 0,052	96.542	± 0,001
<b>21</b>	<b>GPS</b>	<b>143.055</b>	<b>± 0,033</b>	<b>110.220</b>	<b>± 0,121</b>	<b>116.001</b>	<b>± 0,014</b>
22	-	122.163	± 0,033	107.231	± 0,060	98.342	± 0,014
23	-	141.448	± 0,056	106.283	± 0,018	99.988	± 0,014
24	-	161.180	± 0,050	109.717	± 0,051	105.283	± 0,000
<b>25</b>	<b>SeaPath</b>	<b>161.584</b>	<b>± 0,009</b>	<b>109.726</b>	<b>± 0,018</b>	<b>105.941</b>	<b>± 0,005</b>
26	-	173.308	± 0,010	109.175	± 0,011	101.425	± 0,000
27	-	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	-	-	-
29	-	173.664	± 0,002	97.061	± 0,003	100.023	± 0,014
<b>30</b>	<b>RTG</b>	<b>160.755</b>	<b>± 0,034</b>	<b>113.198</b>	<b>± 0,054</b>	<b>108.127</b>	<b>± 0,000</b>
31	-	161.627	± 0,079	106.447	± 0,083	95.289	± 0,017

FONTE: O AUTOR (2010)

Verificam-se na FIGURA 43 os valores dos desvios-padrão obtidos e indicados na TABELA 07. Verifica-se que os desvios-padrão para os valores da coordenada X foram inferiores a 0,116 m, para os valores da coordenada Y foram inferiores a 0,121 m e para a coordenada Z foram inferiores a 0,083m. Constata-se que os desvios-padrão para as coordenadas ajustadas deles no sistema de referencia local foram inferiores a 0,083m. O maior desvio-padrão para o sensor inercial foi para a coordenada Y no valor de 0,051m; para o sensor GPS foi para a

coordenada Y no valor de 0,121m; para o sensor SeatPath foi para a coordenada Y no valor de 0,018m e para o sensor RTG foi para a coordenada Y no valor de 0,054m.

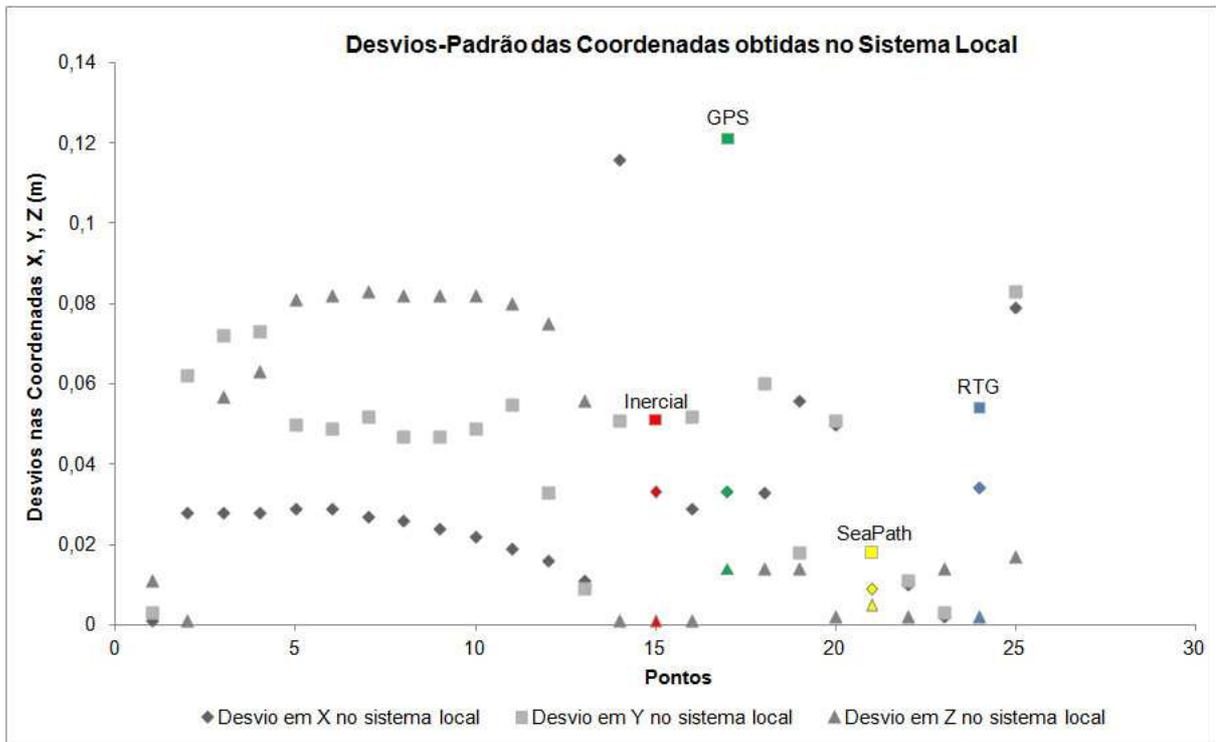


FIGURA 43 – DESVIOS-PADRÃO OBTIDOS PARA AS COORDENADAS NO SISTEMA LOCAL  
 FONTE: O AUTOR (2010)

### 5.2.1 Análise dos resultados planimétricos

Para a verificação da qualidade dos resultados, recorreu-se ao teste qui-quadrado, onde a hipótese nula foi testada ao nível de significância de 5%, e não foi rejeitada por este teste, garantindo assim a confiabilidade dos resultados obtidos para as coordenadas no sistema local.

### 5.2.2 Análise dos resultados altimétricos

Para a verificação da qualidade destes resultados foi aplicado procedimento idêntico aos anteriores, porém foi rejeitado quando a hipótese nula foi testada a um nível de significância de 5%. Ressalta-se que a poligonal aberta que permitiu a aplicação do ajustamento pelo método dos mínimos quadrados não contém todos os sensores, porém a origem do sistema da embarcação foi visada a partir desta poligonal. Portanto a provável causa deve estar associada ao fato de que os valores foram em sua maioria estimados através da propagação das variâncias. Contudo os desvios apresentados na altimetria não comprometem os resultados em termos das exigências do fabricante do ecobatímetro que fornecem os valores máximos (TABELA 09) esperados para os afastamentos.

### 5.3 COEFICIENTES DA TRANSFORMAÇÃO DE CORPO RÍGIDO

Os valores dos coeficientes da transformação de corpo rígido bem como das translações encontram-se indicados na TABELA 08:

TABELA 08 – COEFICIENTES DA TRANSFORMAÇÃO DE CORPO RÍGIDO

<b>Coeficientes</b>	<b>Valor</b>
$m_{11}$	0,998934316163712
$m_{12}$	0,0484130568354146
$m_{13}$	0,00014840610202782
TX	-168,561845511113 m
$m_{21}$	-0,0483690019066825
$m_{22}$	0,99865274616908
$m_{23}$	-3,61243568356429e-005
TY	-102,581882259464 m
$m_{31}$	-2,55795384873636e-013
$m_{32}$	-5,6843418860808e-014
$m_{33}$	-1,00000000000034
TZ	97,3900000000867 m

FONTE – O AUTOR (2010)

#### 5.4 AFASTAMENTOS (COORDENADAS) DOS PONTOS AUXILIARES E DOS SENSORES EM RELAÇÃO À ORIGEM DO SISTEMA DA EMBACAÇÃO

De acordo com o manual de instalação do ecobatímetro EM302, as precisões esperadas nas medições dos afastamentos estão apresentadas na TABELA 09:

TABELA 09 – PRECISÕES ESPERADAS NAS MEDIÇÕES DOS AFASTAMENTOS

Sensor	Valor Esperado	
Sensor de movimento	Horizontal	$\pm 0,1$ m
Posicionador	Horizontal	$\pm 0,1$ m
	Vertical	$\pm 0,02$ m

FONTE: ADAPTADO DO MANUAL DE INSTALAÇÃO DO ECOBATÍMETRO EM302

Após a realização da seção 4.8.1, 4.8.2, os afastamentos (coordenadas) dos pontos auxiliares e dos sensores em relação à origem do sistema da embarcação, assim como os seus desvios-padrão, obtidos na seção 4.9 encontram-se indicados na TABELA 10:

TABELA 10 – AFASTAMENTOS DOS SENSORES E PONTOS AUXILIARES EM RELAÇÃO À ORIGEM DO SISTEMA DE COORDENADAS DA EMBARCAÇÃO E SEUS DESVIOS-PADRÃO

Pt	Sensores	R (m)	Desvio R (m)	P (m)	Desvio P (m)	W (m)	Desvio W (m)
06	-	-35,567	± 0,028	-1,952	± 0,062	-0,873	± 0,001
07	-	-23,218	± 0,028	-3,212	± 0,072	-0,885	± 0,057
08	-	-22,126	± 0,028	-0,017	± 0,073	-1,041	± 0,063
09	-	-2,107	± 0,029	-2,658	± 0,050	-0,963	± 0,081
10	-	-0,349	± 0,029	-1,290	± 0,049	-0,975	± 0,082
11	-	2,718	± 0,027	-2,307	± 0,052	1,594	± 0,083
12	-	-0,726	± 0,026	-1,345	± 0,047	-0,966	± 0,082
13	-	-1,993	± 0,024	-2,631	± 0,047	-0,956	± 0,082
14	-	-3,978	± 0,022	-2,675	± 0,049	-0,908	± 0,082
15	-	-6,963	± 0,019	-3,924	± 0,055	-3,161	± 0,080
16	-	1,331	± 0,016	-5,379	± 0,033	-3,312	± 0,075
17	-	14,520	± 0,011	-2,318	± 0,009	-4,409	± 0,056
18	-	0,820	± 0,116	-2,077	± 0,051	1,629	± 0,001
<b>19</b>	<b>Inercial</b>	<b>0,000</b>	<b>± 0,033</b>	<b>0,000</b>	<b>± 0,051</b>	<b>0,000</b>	<b>± 0,001</b>
20	-	-0,182	± 0,029	-1,962	± 0,052	0,818	± 0,001
<b>21</b>	<b>GPS</b>	<b>-20,355</b>	<b>± 0,033</b>	<b>0,864</b>	<b>± 0,121</b>	<b>-18,546</b>	<b>± 0,014</b>
22	-	-41,325	± 0,033	-1,392	± 0,060	-0,865	± 0,014
23	-	-22,111	± 0,056	-3,245	± 0,018	-2,592	± 0,014
24	-	-2,248	± 0,050	-0,686	± 0,051	-7,899	± 0,002
<b>25</b>	<b>SeaPath</b>	<b>-1,846</b>	<b>± 0,009</b>	<b>-0,686</b>	<b>± 0,018</b>	<b>-8,558</b>	<b>± 0,005</b>
26	-	9,851	± 0,010	-1,877	± 0,011	-4,090	± 0,002
<b>30</b>	<b>RTG</b>	<b>-2,510</b>	<b>± 0,034</b>	<b>2,856</b>	<b>± 0,054</b>	<b>-10,686</b>	<b>± 0,002</b>
31	-	-1,935	± 0,079	-4,133	± 0,083	2,040	± 0,017

FONTE – O AUTOR (2010)

Os valores destacados na TABELA 10 em negrito correspondem aos afastamentos obtidos para os sensores da embarcação (TABELA 03), bem como, seus desvios-padrão.

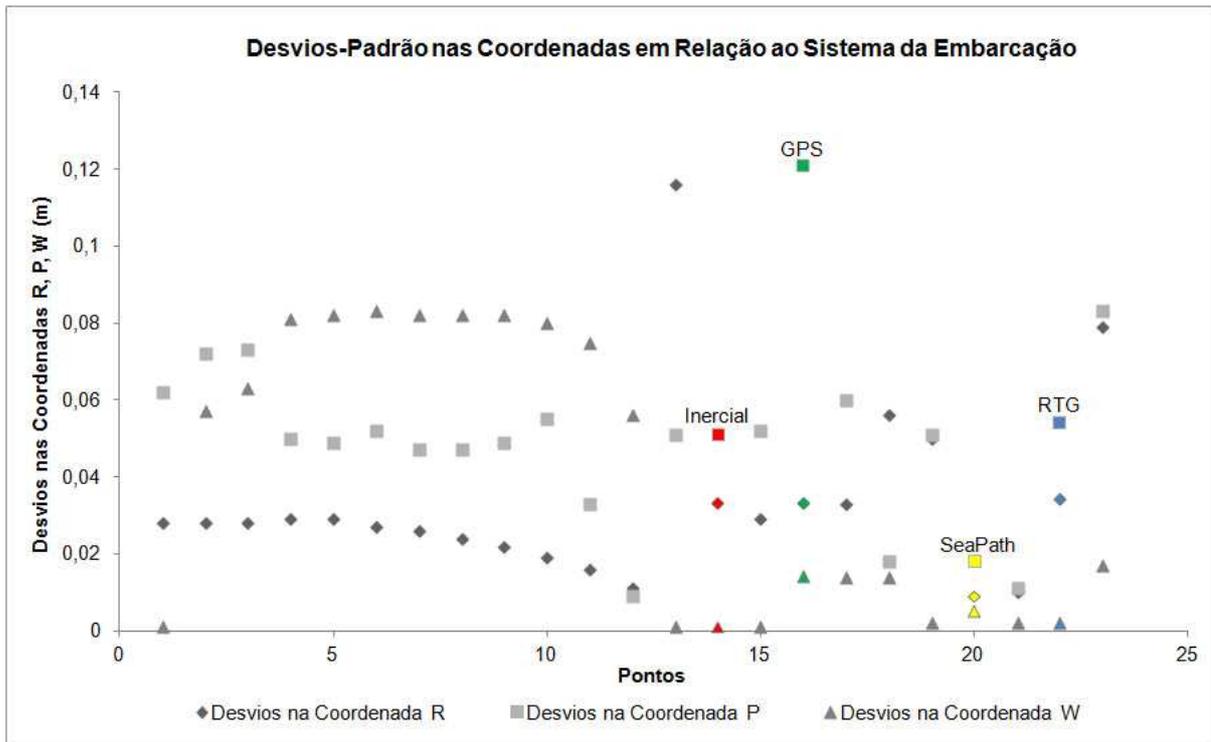


FIGURA 44 – DESVIOS-PADRÃO OBTIDOS PARA AS COORDENADAS EM RELAÇÃO À ORIGEM DO SISTEMA DA EMBARCAÇÃO  
 FONTE: O AUTOR (2010)

Verifica-se na FIGURA 44 os valores dos desvios-padrão obtidos para as coordenadas calculadas em relação à origem do sistema da embarcação, indicados na TABELA 10. Verifica-se que os desvios-padrão para os valores da coordenada R foram inferiores a 0,116 m, para os valores da coordenada P foram inferiores a 0,121 m e para a coordenada W foram inferiores a 0,083m. Constata-se que os desvios-padrão para as coordenadas no sistema em relação à origem do sistema da embarcação foram de inferiores a 0,083m. O maior desvio-padrão para o sensor inercial foi para a coordenada P no valor de 0,052m; para o sensor GPS foi para a coordenada P no valor de 0,121m; para o sensor SeatPath foi para a coordenada P no valor de 0,018m e para o sensor RTG foi para a coordenada P no valor de 0,054m.

#### 5.4.1 Análise dos resultados planimétricos

Os desvios-padrão das coordenadas dos sensores no sistema de referência da embarcação apresentados na TABELA 10, quando comparados com os desvios-padrão tabelados de acordo com o manual do fabricante do ecobatímetro apresentados na TABELA 09, observa-se que os resultados dos valores para as coordenadas horizontais se enquadram dentro do estabelecido. 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, onde está mais sujeita à instabilidade durante a realização das observações.

Outra possível causa é a de que como foi necessário estabelecer um sistema de coordenadas local, pois as coordenadas obtidas por rastreamento GPS dos pontos que definem o sistema local apresentaram valores elevados de multicaminhamento em função de algumas obstruções locais, a referência de azimute foi estabelecida entre os pontos M01 e M04, a fim de orientar a poligonal. No entanto, a obtenção do azimute por cálculo, propagou as incertezas para as coordenadas horizontais dos pontos mais distantes de partida da poligonal. Esse problema poderia ser amenizado com a utilização de giroteodolito.

Para a verificação da qualidade dos resultados, recorreu-se ao teste de Qui-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 afastamentos planimétricos.

#### 5.4.2 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, verifica-se que os resultados estão de acordo com as exigências do

fabricante do ecobatímetro. 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%. A causa provável pode ser devido aos valores terem sido em sua maioria estimados através da propagação de variâncias. Apesar disto os desvios apresentados na altimetria não comprometem os resultados em termos das exigências do manual do ecobatímetro.

Sugere-se que novos testes sejam realizados a fim de constatar as causas que levaram à rejeição do teste global.

## 6 SÍNTESE DA METODOLOGIA

Apresenta-se nesta seção uma síntese da metodologia aplicada ao navio Hidrográfico SIRIUS a fim de determinar os afastamentos entre os sensores auxiliares ao ecobatímetro multifeixe EM302 em relação ao ponto de referência da embarcação (origem do sistema de coordenadas da embarcação).

Deve-se inicialmente buscar um local que permita a docagem da embarcação. Este dique deverá apresentar condições de se implantar marcos geodésicos que irão materializar um sistema local de coordenadas, ou ainda que seja livre de obstruções ao seu entorno, permitindo assim rastreios de satélites artificiais possibilitando a obtenção de coordenadas geodésicas para agregar à metodologia apresentada.

Definir a origem do sistema de coordenadas da embarcação.

Efetuar as medições angulares e lineares dos pontos necessários a determinação dos afastamentos dos sensores instalados na embarcação no sistema local de coordenadas.

Efetuar medidas angulares e lineares a partir do sistema de coordenadas da embarcação de alguns pontos, no mínimo 3, para que se possa aplicar a transformação de corpo rígido.

Aplicar testes estatísticos para a depuração de erros grosseiros nas observações.

Calcular as coordenadas planialtimétricas ajustadas dos marcos que definem o sistema de coordenadas local e a partir deles realizar as medições para se obter as coordenadas dos pontos localizados na embarcação.

Transformar as coordenadas obtidas no sistema local para o sistema de coordenadas da embarcação.

Corrigir os movimentos de rotação (rolamento, arfagem e guinada) sofridos pela embarcação no momento de docagem em relação ao sistema de coordenadas local.

Calcular os afastamentos em relação ao sistema de coordenadas da embarcação.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A metodologia apresentada e aplicada nesta dissertação visando a determinação dos afastamentos entre os sensores numa embarcação hidrográfica foi estabelecida com sucesso, e pode ser utilizada em outras embarcações hidrográficas.

O referencial cartesiano local foi satisfatoriamente definido e materializado apresentando desvios-padrão de no máximo 0,010 m.

A origem do sistema de coordenadas da embarcação em estudo não se situa no centro de massa da embarcação, o qual neste caso encontra-se na casa de máquinas do navio. Este fato inviabiliza a instalação de sensores neste ponto, como o sensor inercial. Esta origem foi satisfatoriamente materializada e determinada, apresentou desvios-padrão de no máximo 0,051 m.

A obtenção das coordenadas dos sensores no sistema de coordenadas da embarcação mostrou-se eficaz, apesar das aproximações realizadas, as transformações entre referenciais apresentaram-se confiáveis.

A metodologia empregada apresentou-se viável para a determinação dos afastamentos entre os sensores auxiliares em relação ao ponto de referência da embarcação, e com pequenos ajustes nos procedimentos e condições do levantamento de campo, uma melhora considerável na qualidade dos *offsets* pode ser alcançada. Também se apresenta uma metodologia nacional que pode ser empregada nas embarcações hidrográficas.

Para o referencial cartesiano local recomenda-se que em trabalhos futuros sejam implantados pelo menos cinco pilares de centragem forçada, os quais devem ter as suas coordenadas altimétricas em relação à rede altimétrica de primeira ordem. Também deve ser realizado um nivelamento geométrico com visadas iguais entre eles a fim de se obter uma maior precisão na obtenção dos desníveis, e que sejam efetuadas visadas cruzadas entre os pontos que definem o referencial a fim de formar triângulos para uma maior rigidez na geometria do polígono formado entre os pontos, gerando assim, um maior número de graus de liberdade para o ajustamento das observações. Recomenda-se que se trabalhe com um referencial geocêntrico local, de forma que todos os referenciais envolvidos sejam geocêntricos.

Em relação à origem do sistema de coordenadas da embarcação é recomendável que a origem do sistema se afaste o mínimo possível do centro de massa da embarcação e ainda que se conheçam os afastamentos entre a origem do sistema de coordenadas e o centro de massa da embarcação com precisão.

Recomenda-se que um cuidadoso planejamento seja realizado para qualquer tipo de levantamento. Neste caso, pelas particularidades da embarcação, é recomendada a repetição do levantamento altimétrico com nivelamento e contra nivelamento trigonométrico para melhorar a qualidade dos resultados, haja vista a impossibilidade de se realizar um nivelamento geométrico no interior da embarcação.

Recomenda-se a utilização de uma transformação que leve em consideração o fator de escala entre os sistemas, visto que ele sempre existe.

O levantamento de campo apresentou algumas dificuldades técnicas. A coleta de dados foi dificultada por alguns fatores como: o tempo disponível para efetuar o levantamento; o movimento de pessoas na embarcação; as condições de deslocamento dentro da embarcação; a impossibilidade de repetir um novo levantamento quando da rejeição pelo teste de aderência; os reparos que estavam ocorrendo na embarcação simultaneamente à execução do levantamento; a impossibilidade de obter as coordenadas da embarcação referente à origem, pela falta de condições e equipamentos específicos; a impossibilidade de visadas cruzadas entre os pontos M01 e M03 e entre os pontos M02 e M04, pois a embarcação encontrava-se docada entre estes.

Superadas estas dificuldades, com os dados obtidos, verificou-se que a qualidade das coordenadas dos pontos que definem o referencial cartesiano local, bem como dos *offsets*, encontram-se dentro dos padrões aceitáveis, exceto a coordenada P do GPS a qual ficou muito próximo do valor sugerido.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. SBEE. 2ª edição. Curitiba, 2003.

\_\_\_\_\_. **Refração fotogramétrica**. Boletim de Geodésia n. 24. Departamento de Geociências. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1980.

ARAKI, H. **Fotogrametria**. Apostila do Curso de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13133: Execução de levantamento topográfico**. Rio de Janeiro, 1994. 35p.

\_\_\_\_\_. **NBR 14.166: Rede de Referência Cadastral Municipal – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1998. 23p.

CLARKE, J. E. H. **A reassessment of vessel coordinate systems: what is that we really aligning?** US Hydrographic Conference, 2003.

COSTA, M. F; SANTOS, M. **Compatibilização entre sistemas Geodésicos**. In COBRAC 98 - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Florianópolis - SC. 1998. Disponível em: (<http://geodesia.ufsc.br/Geodesiaonline/arquivo/cobrac98/080/080.htm>). Acesso em 03 de abril de 2009.

DALMOLIN, Q. **Ajustamento por mínimos quadrados**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. Curso de pós-graduação em Ciências Geodésicas. Editora da UFPR, Curitiba, 2004.

De LIMA, S. R. S. **Integração GPS/INS utilizando sensores inerciais baseados em sistemas microeletromecânicos (MEMS)**. Tese. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, 2005.

ESPARTEL, L. **Curso de Topografia**. 9. ed. Editora Globo S.A. Rio de Janeiro, 1967.

FERNANDES, R. A. **Comentário sobre o Critério de Chauvenet**. Anais Hidrográficos. Tomo XLIX. DHN. Niterói, 1992.

\_\_\_\_\_. **Topografia Costeira**. DHN. Niterói, 1996. Disponível em: [www.hidrografia.xpg.com.br](http://www.hidrografia.xpg.com.br). Acesso em 25 de março de 2009.

FERNANDES, R. A. SOUZA, A. V. – **O básico de um levantamento hidrográfico**. DHN. Niterói, 2009.

FONSECA, M. M. **Arte Naval**. 4. ed. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação Geral da Marinha, 1985, 916p.

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

HYDROGRAPHIC SERVICE OF CANADA. **Positioning and alignment survey of the EM1002 Multibeam Echosounder and the POS/MV320 motion sensor**. Shelburne, 2003.

HUET, G. **Plano de emergência individual**. MARINHA DO BRASIL, Diretoria de Portos e Costas, Gerência de meio ambiente. Seminário ECOBRASIL, 2008. Disponível em: (<http://www.antaq.gov.br/portal/pdf/Palestras/SeminarioEcoBrasil-2008/PlanoEmergencialIndividualMarinha.pdf>). Acesso em 22 de agosto de 2010.

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

\_\_\_\_\_. **Manual on Hydrography**, Publication M-13. Monaco, 2005.

KLEIN, F. **Elementary mathematics from and advanced standpoint**. Dover publications, Inc, 1939.

KRUEGER, C. P. **Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito marinho**. Universidade Federal do Paraná. Tese de Doutorado em Ciências Geodésicas. Curitiba, 1996.

LUGNANI, J.B. **Introdução à Fototriangulação**. Editora UFPR. Curitiba, 1987.

MEGERIAN, S. KOUSHANFAR, F. QU, G. VELTRI, G. POTKONJAK, E. **Exposure in wireless sensor networks: theory and practical solutions**. Wireless Networks, Kluwer Academic Publishers, ISSN 1022-0038, vol. 8, no. 5, 2002.

MIGUENS, A. P. **Navegação: A Ciência e a arte – Volume I – Navegação Costeira, Estimada e em Águas Restritas**. Rio de Janeiro. Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1996, 1822 p.

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 03 de maio de 2010.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS. Descrição, fundamentos e aplicações**. 2.<sup>a</sup> edição. Editora UNESP. Presidente Prudente, 2008.

MONAHAN, D. WELLS, D. E. **IHO SP 44 Standards for Hydrographic Surveys and demands of the new century**. Canadá, 2000. Disponível em: [www.omg.unb.ca/omg/papers/MONAGHAN.PDF](http://www.omg.unb.ca/omg/papers/MONAGHAN.PDF). Acesso em 27 de Março de 2009.

MUÑOZ A. X. R. VALENZUELA R. **Simulación e implementación de un sistema de estabilidad en barcos mediante um microcontrolador**. Escuela Politécnica Nacional, 2007.

RAMOS, A. M. **Aplicação, investigação e análise da metodologia de reduções batimétricas através do método GPS diferencial preciso**. Dissertação. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, 2007.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications**. Berlin: Walter de Gruyter, 2003.

SERPA, A. F. P. **Geodésia Aplicada a Hidrografia**. Curso de Especialização de Hidrografia e Navegação para Oficiais. Volume III. Niterói, 1960.

VEIGA, L. A. K. ZANETTI, M. A. Z. FAGGION, P. L. **Fundamentos de Topografia**. Apostila do curso de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria de erros**. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 1992.

WOLF, P. R., GHILANI, C. D. **Adjustment Computations: statistics and least squares in surveying an GIS**. John Wiley & Sons. New York, 1997.

<http://www.mar.mil.br/dhn/dhn/index.html>. Acesso em 25 de maio de 2009.

<http://www.hidrografia.xpg.com.br>. Acesso em 25 de Março de 2009

## APÊNDICE 1

Valores das observações do caminhamento realizado nos marcos testemunhos:

### RESUMO DOS ÂNGULOS HORIZONTAIS OBSERVADOS NOS MARCOS TESTEMUNHOS

Estação Ocupada	Altura do Instrumento	Estação Visada	Altura do Prisma	Origem	Ângulo Horizontal			Desvio Padrão
M01	1,612 m	M02	1,300 m	M04	89°	11'	18",80	± 1",72
M02	1,608 m	M03	1,300 m	M01	86°	22'	28",50	± 1",10
M03	1,569 m	M04	1,300 m	M02	90°	59'	06",00	± 0",73
M04	1,582 m	M01	1,300 m	M03	93°	32'	34",00	± 0",52

FONTE: O AUTOR (2010)

### RESUMO DOS ÂNGULOS VERTICAIS OBSERVADOS NOS MARCOS TESTEMUNHOS

Estação Ocupada	Altura do Instrumento	Estação Visada	Altura do Prisma	Origem	Ângulo Vertical			Desvio Padrão
M01	1,612 m	M02	1,300 m	M04	90°	26'	26",17	± 0",74
M02	1,608 m	M03	1,300 m	M01	90°	12'	37",50	± 0",16
M03	1,569 m	M04	1,300 m	M02	90°	48'	17",83	± 0",42
M04	1,582 m	M01	1,300 m	M03	90°	14'	57",83	± 0",44

FONTE: O AUTOR (2010)

### RESUMO DAS DISTÂNCIAS OBSERVADAS NOS MARCOS TESTEMUNHOS

Estação Ocupada	Altura do Instrumento	Estação Visada	Altura do Prisma	Origem	Distância Inclinada	Desvio Padrão
M01	1,612 m	M02	1,300 m	M04	26,508 m	± 0,001 m
M02	1,608 m	M03	1,300 m	M01	86,545 m	± 0,001 m
M03	1,569 m	M04	1,300 m	M02	19,778 m	± 0,001 m
M04	1,582 m	M01	1,300 m	M03	85,458 m	± 0,001 m

FONTE: O AUTOR (2010)

## APÊNDICE 2

Valores das observações realizadas nos sensores e pontos auxiliares:

### RESUMO DOS ÂNGULOS HORIZONTAIS OBSERVADOS NOS SENSORES E PONTOS AUXILIARES

Estação Ocupada	Altura do Instrumento	Estação Visada	Altura do Prisma	Origem	Ângulo horizontal			Desvio-padrão
M01	1,584 m	05	1,300 m	M04	353°	35'	28",92	± 1",01
05	1,552 m	22	1,300 m	M01	252°	19'	57",00	± 0",74
05	1,552 m	23	0,000 m	M01	205°	57'	54",90	± 1",77
05	1,552 m	06	1,300 m	M01	228°	32'	32",38	± 1",72
M03	1,560 m	17	1,300 m	M04	324°	43'	27",88	± 0",94
M03	1,560 m	24	0,000 m	M04	295°	01'	21",80	± 1",68
M03	1,560 m	25	0,850 m	M04	295°	19'	40",50	± 1",47
M03	1,560 m	26	1,300 m	M04	311°	49'	44",30	± 1",33
M03	1,560 m	27	1,300 m	M04	266°	13'	42",00	± 1",35
27	1,552 m	28	0,000 m	M03	254°	55'	28",00	± 1",62
M04	1,512 m	26	1,400 m	M03	056°	21'	47",60	± 1",27
M04	1,512 m	17	1,300 m	M03	043°	15'	44",60	± 1",49
M04	1,512 m	24	0,000 m	M03	071°	38'	30",30	± 1",20
M04	1,512 m	29	1,300 m	M03	107°	28'	50",00	± 0",65
M04	1,512 m	25	0,850 m	M03	071°	22'	44",60	± 1",70
M04	1,512 m	30	0,000 m	M03	065°	29'	21",50	± 1",31
29	1,582 m	26	1,300 m	M04	078°	03'	37",58	± 1",09
29	1,582 m	30	0,000 m	M04	115°	01'	54",60	± 2",29
29	1,582 m	25	0,850 m	M04	119°	57'	10",88	± 2",27
29	1,582 m	24	0,000 m	M04	120°	46'	02",80	± 1",63
29	1,582 m	31	0,000 m	M04	128°	03'	48",75	± 1",53
29	1,582 m	17	1,300 m	M04	056°	18'	57",90	± 1",68

FONTA: O AUTOR (2010)

## RESUMO DOS ÂNGULOS VERTICAIS OBSERVADOS NOS SENSORES E PONTOS AUXILIARES

Estação ocupada	Altura do instrumento	Estação visada	Altura do prisma	Origem	Ângulo Vertical			Desvio-padrão
					°	'	"	
M01	1,584 m	05	1,300 m	M04	090°	56'	18",17	± 0",49
05	1,552 m	22	1,300 m	M01	100°	35'	35",58	± 0",45
05	1,552 m	23	0,000 m	M01	093°	34'	09",88	± 0",52
05	1,552 m	06	1,300 m	M01	098°	08'	20",50	± 0",18
M03	1,560 m	17	1,300 m	M04	084°	25'	03",30	± 0",82
M03	1,560 m	24	0,000 m	M04	082°	28'	10",80	± 0",75
M03	1,560 m	25	0,850 m	M04	079°	17'	18",38	± 0",85
M03	1,560 m	26	1,300 m	M04	086°	27'	41",00	± 0",50
M03	1,560 m	27	1,300 m	M04	090°	39'	20",60	± 0",40
27	1,552 m	28	0,000 m	M03	122°	46'	03",25	± 0",53
M04	1,512 m	26	1,400 m	M03	085°	25'	57",80	± 0",77
M04	1,512 m	17	1,300 m	M03	083°	04'	20",25	± 0",72
M04	1,512 m	24	0,000 m	M03	081°	59'	25",00	± 0",65
M04	1,512 m	29	1,300 m	M03	091°	18'	23",60	± 0",33
M04	1,512 m	25	0,850 m	M03	078°	35'	30",92	± 0",33
M04	1,512 m	30	0,000 m	M03	076°	52'	59",13	± 0",52
29	1,582 m	26	1,300 m	M04	084°	36'	53",00	± 0",54
29	1,582 m	30	0,000 m	M04	072°	29'	30",20	± 0",34
29	1,582 m	25	0,850 m	M04	073°	27'	25",75	± 0",28
29	1,582 m	24	0,000 m	M04	078°	13'	58",00	± 0",84
29	1,582 m	31	0,000 m	M04	112°	28'	44",63	± 0",24
29	1,582 m	17	1,300 m	M04	083°	28'	53",10	± 0",53

FONTE: O AUTOR (2010)

## RESUMO DAS DISTÂNCIAS OBSERVADAS NOS SENSORES E PONTOS AUXILIARES

Estação ocupada	Altura do Instrumento	Estação Visada	Altura do Prisma	Distância Inclínada	Distância Reduzida	Desvio-padrão
05	1,552 m	22	1,300 m	10,321 m	10,145 m	± 0,001 m
05	1,552 m	23	0,000 m	24,906 m	24,858 m	± 0,001 m
05	1,552 m	06	1,300 m	13,382 m	13,382 m	± 0,001 m
M03	1,560 m	17	1,300 m	13,836 m	13,836 m	± 0,001 m
M03	1,560 m	24	0,000 m	27,571 m	27,333 m	± 0,010 m
M03	1,560 m	25	0,850 m	27,489 m	27,010 m	± 0,001 m
M03	1,560 m	26	1,300 m	17,052 m	17,019 m	± 0,001 m
M03	1,560 m	27	1,300 m	21,478 m	21,477 m	± 0,001 m
27	1,552 m	28	0,000 m	11,676 m	9,818 m	± 0,004 m
M04	1,512 m	26	1,400 m	15,273 m	15,225 m	± 0,001 m
M04	1,512 m	17	1,300 m	11,741 m	11,655 m	± 0,001 m
M04	1,512 m	24	0,000 m	26,332 m	26,075 m	± 0,015 m
M04	1,512 m	29	1,300 m	12,176 m	12,173 m	± 0,001 m
M04	1,512 m	25	0,850 m	26,280 m	25,761 m	± 0,001 m
M04	1,512 m	30	0,000 m	28,754 m	28,004 m	± 0,001 m
29	1,582 m	26	1,300 m	12,167 m	12,113 m	± 0,001 m
29	1,582 m	30	0,000 m	21,682 m	20,678 m	± 0,001 m
29	1,582 m	25	0,850 m	18,273 m	17,517 m	± 0,001 m
29	1,582 m	24	0,000 m	18,161 m	17,779 m	± 0,001 m
29	1,582 m	31	0,000 m	16,519 m	15,264 m	± 0,006 m
29	1,582 m	17	1,300 m	12,656 m	12,574 m	± 0,043 m

FONTE: O AUTOR (2010)

## RESUMO DOS ÂNGULOS HORIZONTAIS OBSERVADOS NA POLIGONAL ABERTA

Estação Ocupada	Altura do Instrumento	Estação Visada	Altura do Prisma	Origem	Ângulo Horizontal			Desvio-padrão
06	1,546 m	07	1,300 m	05	134°	49'	06	1,546 m
07	1,525 m	08	1,300 m	06	256°	57'	07	1,525 m
08	1,530 m	09	1,300 m	07	101°	24'	08	1,530 m
09	1,525 m	10	1,300 m	08	225°	21'	09	1,525 m
10	1,390 m	11	0,085 m	09	124°	28'	10	1,390 m
11	1,456 m	18	1,300 m	10	10°	45'	11	1,456 m
11	1,456 m	19	0,000 m	10	337°	37'	11	1,456 m
11	1,456 m	20	0,000 m	10	11°	07'	11	1,456 m
11	1,456 m	12	0,400 m	10	2°	39'	11	1,456 m
12	1,474 m	13	1,455 m	11	240°	24'	12	1,474 m
13	1,472 m	14	1,526 m	12	135°	48'	13	1,472 m
14	1,545 m	15	1,553 m	13	202°	04'	14	1,545 m
15	1,572 m	16	1,491 m	14	326°	41'	15	1,572 m
16	1,562 m	17	1,604 m	15	202°	56'	16	1,562 m
17	1,480 m	M04	1,611 m	16	114°	01'	17	1,480 m

FONTE: O AUTOR (2010)

## RESUMO DOS ÂNGULOS VERTICAIS OBSERVADOS NA POLIGONAL ABERTA

Estação Ocupada	Altura do Instrumento	Estação Visada	Altura do Prisma	Origem	Ângulo Vertical			Desvio-padrão
06	1,546 m	07	1,300 m	05	91°	12'	06	1,546 m
07	1,525 m	08	1,300 m	06	90°	13'	07	1,525 m
08	1,530 m	09	1,300 m	07	91°	02'	08	1,530 m
09	1,525 m	10	1,300 m	08	94°	55'	09	1,525 m
10	1,390 m	11	0,085 m	09	140°	25'	10	1,390 m
11	1,456 m	18	1,300 m	10	95°	27'	11	1,456 m
11	1,456 m	19	0,000 m	10	87°	04'	11	1,456 m
11	1,456 m	20	0,000 m	10	102°	52'	11	1,456 m
11	1,456 m	12	0,400 m	10	66°	40'	11	1,456 m
12	1,474 m	13	1,455 m	11	91°	20'	12	1,474 m
13	1,472 m	14	1,526 m	12	89°	36'	13	1,472 m
14	1,545 m	15	1,553 m	13	55°	10'	14	1,545 m
15	1,572 m	16	1,491 m	14	89°	43'	15	1,572 m
16	1,562 m	17	1,604 m	15	86°	22'	16	1,562 m
17	1,480 m	M04	1,611 m	16	97°	18'	17	1,480 m

FONTE: O AUTOR (2010)

## RESUMO DAS DISTÂNCIAS OBSERVADAS NA POLIGONAL ABERTA

Estação Ocupada	Altura do Instrumento	Estação Visada	Altura do Prisma	Distância Inclínada	Distância Reduzida	Desvio-padrão
06	1,546 m	07	1,300 m	12,416 m	12,413 m	± 0,001 m
07	1,525 m	08	1,300 m	3,375 m	3,375 m	± 0,001 m
08	1,530 m	09	1,300 m	20,194 m	20,191 m	± 0,001 m
09	1,525 m	10	1,300 m	2,236 m	2,228 m	± 0,001 m
10	1,390 m	11	0,085 m	5,045 m	3,214 m	± 0,001 m
11	1,456 m	18	1,300 m	1,921 m	1,912 m	± 0,001 m
11	1,456 m	19	0,000 m	3,551 m	3,546 m	± 0,001 m
11	1,456 m	20	0,000 m	2,993 m	2,918 m	± 0,001 m
11	1,456 m	12	0,400 m	3,876 m	3,559 m	± 0,001 m
12	1,474 m	13	1,455 m	1,804 m	1,804 m	± 0,001 m
13	1,472 m	14	1,526 m	1,985 m	1,985 m	± 0,001 m
14	1,545 m	15	1,553 m	3,951 m	3,243 m	± 0,001 m
15	1,572 m	16	1,491 m	8,422 m	8,422 m	± 0,001 m
16	1,562 m	17	1,604 m	13,566 m	13,539 m	± 0,001 m
17	1,480 m	M04	1,611 m	11,751 m	11,656 m	± 0,001 m

FONTE: O AUTOR (2010)