



METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA MEDIÇÃO DE OFFSET DE EMBARCAÇÃO COM SISTEMA MULTIFEIXE.

Bruno Neves Baptista

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para medição de afastamento de sensores instalados em embarcações dotadas de sistemas multifeixe para aquisição de dados batimétricos. A metodologia pode ser aplicada em navios ou lanchas de sondagem. A base teórica do método discutido neste artigo utiliza conceitos matemáticos de álgebra linear e ajustamento de retas e planos por método dos mínimos quadrados (MMQ). O resultado do método são diferenças lineares e angulares entre equipamentos e sensores do sistema de aquisição de dados multifeixe, em consonância com recomendações dos fabricantes.

Palavras-chave: Controle Dimensional, medição de offset, ecobatímetros multifeixe, método dos mínimos quadrados, ajustamento de planos e linhas.

ABSTRACT

This work presents a methodology for offsets sensors measurements of vessels

¹ Oficial do Corpo da Armada. Professor do Magistério Militar do CIAARA. Email:bruno.neves@marinha.mil.br

that have a multibeam system for bathymetric data acquisition. The methodology can be applied to ships or small survey vessels. The theoretical basis of the method discussed in this article uses mathematical concepts of linear algebra and best fit of lines and planes by least squares method (LSM). The result of the method is linear and angular differences between equipment and sensors of the multibeam data acquisition system, according to manufacturers' recommendations.

Keywords: Dimensional control, offset measurement, multibeam echo bathymeters, least squares method, best fit plane, best fit line.

1. INTRODUÇÃO

O controle dimensional, também conhecido como medição de *offsets*, é uma das últimas etapas da instalação de um sistema multifeixe. Consiste em conhecer, de forma precisa e sistematizada, as diferenças lineares e angulares entre sensores do sistema multifeixe em relação a uma referência convenientemente conhecida (Sistema de Coordenadas da Embarcação - SCE). Essa atividade deve ser realizada todas as vezes que houver alterações físicas no posicionamento dos sensores que compõem o sistema multifeixe, como remoção de transdutores, sensores inerciais, antenas etc. (KONGSBERG MARITIME AS, 2012).

As medições devem ser realizadas em dique seco, pois é necessário que a embarcação esteja estática e estabilizada. Adicionalmente, deve-se ter acesso às

faces dos transdutores instalados no casco e demais equipamentos internos, como o sensor de movimento e atitude (*Inertial Measurement Unit - IMU*). Caso os afastamentos lineares e angulares não sejam conhecidos ou seus valores extrapolem tolerâncias especificadas pelo fabricante, os dados adquiridos apresentarão inconsistências técnicas e não poderão ser aproveitados para atualização de documentos náuticos, sendo necessária uma nova docagem para o retrabalho de medição de *offsets* (KONGSBERG MARITIME AS, 2012).

Não há métodos de calibração que possam contornar erros grosseiros oriundos de *offsets* incorretos ou fora de tolerâncias técnicas. A calibração (*patch test*) apenas compensa os desvios residuais entre o sensor de atitude e movimento, e os transdutores (OHI, 2010). Por esses motivos, principalmente pela impossibilidade de realizar medições a qualquer tempo (apenas com navio docado), faz-se necessário um método simples, a ser realizado por uma equipe reduzida e independente.

O método proposto neste artigo independe de um plano de referência físico, como o *Master Level*, que consiste em uma chapa de aço, fixa à estrutura do navio e a partir dela são medidos os ângulos de caturro e banda da embarcação no dique. A sistemática proposta utiliza como referência o plano de flutuação da embarcação em condições normais de banda e trim, o que traz a conveniência para ser empregado quando a quilha não é paralela à linha d'água.

Por ocasião da instalação de um sistema multifeixe novo, há obrigações do



vendedor a serem realizadas no Teste de Aceitação no Porto (do inglês *Harbour Acceptance Test - HAT*). Dentre outros serviços, o fabricante não renuncia à utilização de empresa especializada e experiente para o controle dimensional, dado sua grande importância para a qualidade dos dados adquiridos. O presente artigo é um estudo da metodologia empregada por essas empresas (PARKER, 2014; OVERATH & SAND, 2015), sob uma ótica executiva, a fim de fomentar discussões sobre metodologias para controle dimensional.

2. METODOLOGIA

2.1. Conceito Geral

Como ponto de partida, o manual de instalação do ecobatímetro multifeixe *Kongsberg EM2040* define como plano aquele que melhor se ajusta à superfície de flutuação da embarcação. Esse plano matemático será utilizado como referência para medições angulares.

A origem do sistema cartesiano tridimensional da embarcação (Sistema de Coordenadas da Embarcação – SCE) pode ter sua origem estabelecida em um local físico ou teórico (KONGSBERG MARITIME AS, 2012), sendo usual que esse local coincida com o a base do sensor de movimento. A *IMU* é um sensor que mede ângulos e acelerações e, devido ao seu princípio de funcionamento, é desejável que esteja instalada próximo ao centro de gravidade do navio. Entretanto, não há obrigatoriedade que a origem seja na base da *IMU*, podendo outro local apropriado ser utilizado como referência

(OVERATH & SAND, 2015). Por conveniência, as direções desse sistema obedecem à regra da mão direita e adotam as seguintes orientações (Figura 1):

- i. Eixo X – Positivo apontando para a proa.
- ii. Eixo Y – Positivo apontando para boreste.
- iii. Eixo Z – Positivo apontando para baixo.

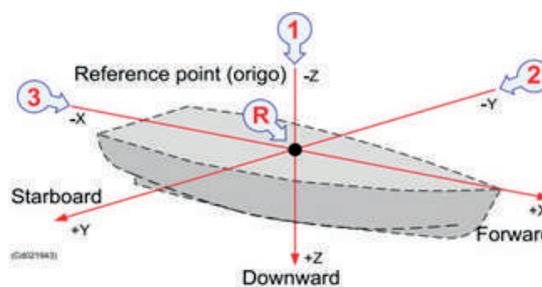


Figura 1 – Sistema de Coordenadas da Embarcação
(Fonte: Kongsberg Maritime)

Uma vez definidos os sentidos dos eixos do SCE, os valores das medições angulares obedecem ao sentido de rotação da “mão direita”, a saber:

- i. Rotação positiva no eixo X: movimento de Roll, com BB para cima.
- ii. Rotação positiva no eixo Y: movimento de Pitch, com proa para cima.
- iii. Rotação positiva no eixo Z: movimento de Yaw, com proa para boreste.

Até aqui tem-se uma definição qualitativa do plano de referência do SCE, porém há necessidade de um tratamento matemático formal que proporcione condições de extrair valores angulares e lineares. Antes de discutir como os planos e retas são definidos, serão brevemente apresentadas as técnicas utilizadas para a obtenção de coordenadas locais dos pontos interesse.

2.2. Obtenção das coordenadas locais dos pontos de interesse e suas representações

O Sistema de Coordenadas Local (SCL) é um plano topográfico nas proximidades da embarcação, com origem arbitrada. A orientação pode ser definida por conveniência e para facilitar a visualização espacial e coerência dos dados obtidos, recomenda-se que o eixo X possua aproximadamente a direção da proa da embarcação, porém não há obrigatoriedade técnica nesse aspecto, podendo até mesmo serem obtidas coordenadas na projeção UTM.

A obtenção de coordenadas é um trabalho topográfico clássico, realizado com apoio de Estação Total e deve empregar técnicas que promovam a maior acurácia possível. Neste artigo, não serão abordadas as metodologias topográficas empregadas, porém ressalta-se a importância de controle de erros e incertezas. Preferencialmente, deve ser estabelecida uma poligonal topográfica fechada e ajustada no perímetro da embarcação, com visadas para diversos pontos de interesse, por exemplo: linha d'água, linha de fé, *IMU*, transdutores, antenas e outros locais de interesse.

2.2.1. A quilha (Linha de fé)

A quilha materializa a linha de fé da embarcação, cuja direção será utilizada para posterior matriz rotação para transformação de coordenadas. Matematicamente, a direção da quilha é representada por um vetor, no plano XY do SCL. Há duas formas para determinar esse vetor:

i. Diferença entre duas coordenadas na quilha (Vante e Ré); e

ii. Ajustamento de uma reta que melhor se ajusta às diversas coordenadas obtidas na quilha.

Por se apoiar em apenas dois pontos, a primeira delas é substancialmente simples de se obter, porém pode conter erros na direção calculada, fruto de incertezas da medição, dificuldades topográficas para obtenção das coordenadas, ou desvios estruturais naturais da construção da embarcação. Por outro lado, quanto mais valores da quilha forem medidos (Figura 2), mais robusto será o valor final e esta será a técnica apresentada nesse artigo.



Figura 2 – Pontos de medição da quilha (Fonte: BAPTISTA, 2022)

Dado que as coordenadas medidas da quilha (Q) são:

$$Q_k = (X_k, Y_k, Z_k) \quad (1)$$

A reta que melhor se ajusta ao conjunto de pontos Q_k das coordenadas no plano horizontal (plano XY) da quilha e seu respectivo vetor diretor é definida pela equação 2, onde \hat{y} e \hat{x} são os pontos pertencentes à reta em questão e o vetor $\vec{v}=(a,b)$ define a direção dessa reta.

$$\hat{y} = \frac{-a}{b} \hat{x} - \frac{c}{b} \quad (2)$$

$$\vec{v}=(a,b) \quad (3)$$



Entende-se que em uma situação real e prática é impossível ter mais de 3 pontos concorrentes na mesma reta, por isso deve-se empregar ajustamento pelo MMQ (MIKHAIL e GRADE, 1981) e obter a reta que melhor representa os pontos da quilha (equação 2), acrescido de um resíduo (e_n), que corresponde ao afastamento da reta a uma coordenada (equação 4).

$$y_n = \frac{-a}{b} x_n - \frac{c}{b} + e_n \quad (4)$$

O termo e_n é o desvio entre um ponto qualquer e a reta ajustada. Esse valor é o resíduo, isolando e_n e elevando ao quadrado teremos a equação 5:

$$P(a,b,c) = \sum_{n=1}^k e_n^2 \quad (5)$$

A função $P(a,b,c)$, expressa o somatório dos e_n^2 , em função das variáveis (a,b,c) :

$$P(a,b,c) = \sum_{n=1}^k e_n^2 \quad (6)$$

Para se obter o menor valor possível de $P(a,b,c)$, deve-se derivar dessa equação e calcular os resultados de (a,b,c) para seu mínimo. Como há três variáveis, faz-se necessário aplicar a derivada parcial (operador Jacobiano) para cada uma e igualar a zero cada equação obtida.

$$\frac{\partial P}{\partial a} = 0; \frac{\partial P}{\partial b} = 0; \frac{\partial P}{\partial c} = 0 \quad (7)$$

Tem-se então um sistema linear possível, com três equações e três incógnitas.

O resultado desta etapa será o vetor diretor:

$$\vec{v} = (a, b) \quad (8)$$

Transladando para o caso concreto, tem-se o vetor diretor da reta que melhor se ajusta à linha de fé da embarcação e deste vetor obtém-se o ângulo de yaw, cujo método de cálculo será apresentado posteriormente.

2.2.2. Linha d'água (Plano de flutuação – Plano de Referência)

É mandatório que a linha d'água esteja definida em condições normais de trim e banda, conforme preconizado no manual de instrução do fabricante (Kongsberg Maritime AS, 2012). As coordenadas podem ser obtidas da marcação de calado, no mínimo em quatro pontos (alhetas e bochechas), porém recomenda-se o máximo de observações para melhor robustez do método matemático. É usual que os navios possuam pequenos cordões de solda (Figura 3) ao longo do constado para referenciar o local da linha de flutuação e facilitar a pintura da linha d'água. Esses cordões de solda poderão ser utilizados para as medições de interesse.



Figura 3 – Locais de medição da linha d'água (Fonte: BAPTISTA, 2022)

Dado que as coordenadas medidas da linha d'água são:

$$L_k = (X_k, Y_k, Z_k) \quad (9)$$

O plano de referência do SCE será aquele que melhor se ajusta às coordenadas L_k . De forma análoga à reta, entende-se que é impossível ter mais de três pontos reais concorrentes no mesmo plano, por isso deve-se empregar o MMQ e obter o plano que melhor se ajusta aos pontos da linha d'água.

O plano no R^3 é definido pela equação abaixo:

$$\hat{z} = \frac{-a}{c} \hat{x} - \frac{b}{c} \hat{y} - \frac{d}{c} \quad (10)$$

$$\vec{n} = (a, b, c) \quad (11)$$

O vetor \vec{n} é o vetor diretor do plano e é perpendicular a este (Figura 4).

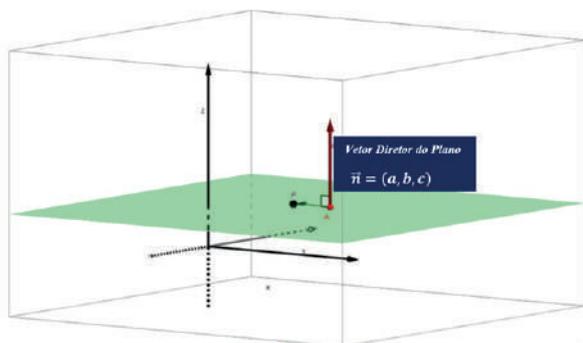


Figura 4 – Plano no R^3 (Fonte: BAPTISTA, 2022)

Reescrevendo a equação do plano de forma geral e acrescido o afastamento do ponto em relação ao plano (e_n), teremos:

$$z_n = \frac{-a}{c} x_n - \frac{b}{c} y_n - \frac{d}{c} + e_n \quad (12)$$

Isolando e elevando ao quadrado teremos:

$$e_n^2 = \left(\frac{a}{c} x_n + \frac{b}{c} y_n + z_n + \frac{d}{c} \right)^2 \quad (13)$$

A partir dos afastamentos quadráticos (e_n^2), a determinação do vetor diretor do plano $\vec{n} = (a, b, c)$ é calculado pelo mesmo modelo matemático utilizado para a obtenção da linha de fé.

Transladando para o caso concreto, tem-se o vetor diretor do plano que melhor se ajusta à linha de flutuação da embarcação e deste vetor conheceremos os ângulos de *roll* e *pitch*, cujo método de cálculo será apresentado posteriormente.

2.2.3. Obtenção das coordenadas dos sensores

A equipe de campo deve determinar quais sensores serão levantados para apresentarem desvios lineares e angulares. Usualmente, os transdutores, os sensores inerciais (*IMU*) e as antenas que fornecem o *heading* da embarcação precisam ter seus ângulos de montagem definidos. Os demais sensores e locais de interesse demandam apenas informações lineares.

O método para extrair informações angulares é similar ao apresentado no estabelecimento do plano de referência e direção da linha de fé, uma vez que é necessário conhecer os ângulos de *yaw*, *pitch* e *roll* desses sensores.

As técnicas para obter as coordenadas de interesse podem diferir caso a caso, entretanto, especial atenção deve ser dada ao par de coordenadas que serão utilizados para cálculo do ângulo de *yaw*, pois uma falha de procedimentos poderá gerar erros grosseiros e comprometer o cálculo dos demais



desvios angulares. Quando se fala em medição de base da *IMU* ou transdutores, refere-se a equipamentos com dimensões reduzidas e que não proporcionam grandes linhas de base. Uma boa técnica é utilizar hastes rígidas para estender a linha de base, apoiada em pontos definidos nos sensores. Dessa forma, as inevitáveis incertezas das medições proporcionarão menos impacto para o cálculo dos ângulos de *pitch* e *roll* e na direção de *yaw*. A Figura 5 apresenta um exemplo de medição de par de coordenadas da base da *IMU*, com respectivo apoio nos pinos de fixação do sensor, o que garante o alinhamento boreste-bombordo, possibilitando ao cálculo de *yaw*. A Figura 6 exemplifica a medição desse alinhamento na face de transdutores.

Uma vez determinado um par de pontos criteriosamente escolhidos para represen-



Figura 5 – Medição da orientação boreste-bombordo da base da *IMU*, com detalhe para o apoio fixo da régua metálica (Fonte: próprio autor)



Figura 6 – Exemplo de arranjo para medição de alinhamento de transdutor. (Fonte: OVERATH & SAND, 2017)

tarem a direção dos sensores (*yaw*), diversos outros pontos devem ser medidos para possibilitar a geração de um plano ajustado que representará os ângulos de *pitch* e *roll*. Esses demais pontos têm a obrigatoriedade apenas de serem medidos sob um instrumento que esteja fielmente paralelo ao sensor.

A localização do ponto central pode ser realizada por medição direta, ou média de observações. Cuidado especial deve ser tomado para que não haja alteração de cotas entre a face medida e o instrumento visado (adesivo refletor, prisma etc.). A equipe de campo deverá decidir qual método é mais adequado para cada situação.

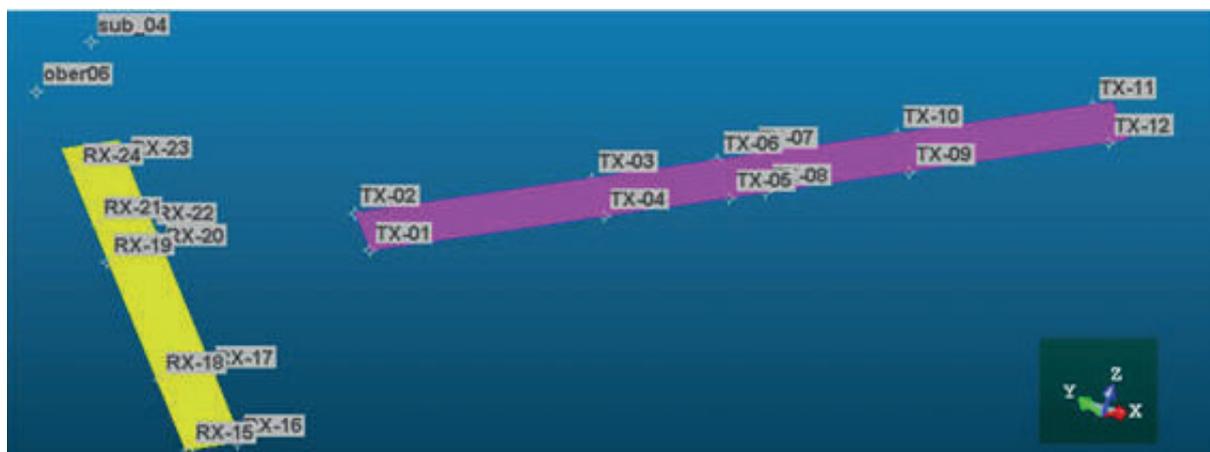


Figura 7 – Exemplo de medições de coordenadas ao longo de transdutores retangulares. (Fonte: OVERATH & SAND, 2015)

Caso o transdutor seja retangular, diversas medidas podem ser tomadas ao longo de seus lados, conforme mostrado na Figura 7. O ajustamento dessas coordenadas fornecerá o plano à face do transdutor (*roll* e *pitch*), bem como o alinhamento dos pontos de uma de suas arestas proverá a orientação (*yaw*).

2.2.4. Obtenção de ângulos com os vetores diretores

De posse dos vetores diretores, cujos procedimentos de cálculo são feitos por ajustamento de pontos da quilha ou linha d'água (itens 2.2.1 e 2.2.2), o ângulo é facilmente obtido por trigonometria simples.

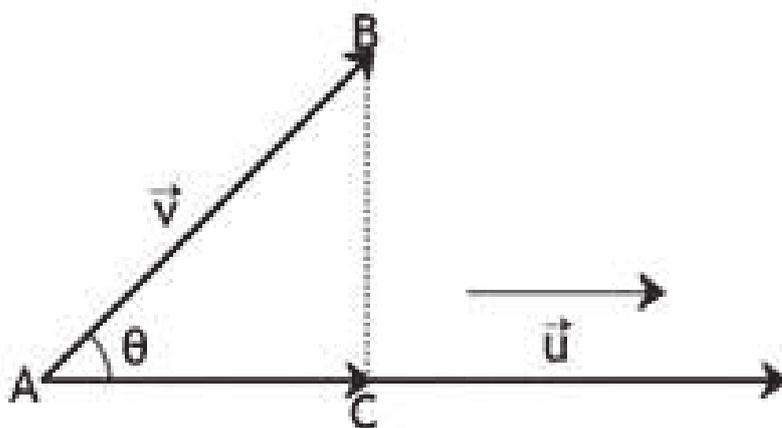
Caso uma das referências seja o eixo de um plano cartesiano, o ângulo pode ser

calculado por relação trigonométrica direta entre os elementos do vetor diretor.

Dado um vetor diretor no plano cartesiano $\vec{v}=(a,b)$, o ângulo que esse vetor faz com o eixo das abscissas é:

$$\tan\theta = \frac{b}{a} \quad (14)$$

Em algumas situações, pode ser necessário calcular o ângulo entre dois vetores conhecidos. Nesses casos, o produto escalar (Figura 8) fornecerá o ângulo desejado (equação 15), porém sem referência ao sentido de rotação (positivo ou negativo). Uma análise qualitativa deve ser realizada para definir a orientação em questão.



$$\cos\theta = \frac{\vec{AB} \cdot \vec{AC}}{|\vec{AB}| * |\vec{AC}|} \quad (15)$$

Figura 8 – Produto Escalar (Fonte: MACEDO, 2008)

2.2.5. Rotação e translação de sistemas de coordenadas

Nesta etapa, será abordada a revisão teórica para rotação e translação de

sistemas de coordenadas (SHOEMAKE, 1985).

A equação geral para transformação de sistema de coordenadas pode ser definida por:



$$P_{SCE} = Rot \cdot P_{SCL} \quad (16)$$

$$P_{SCE-O} = P_{SCE} - O_{SCE} \quad (17)$$

Onde P_{SCL} é a matriz coluna com as coordenadas do ponto no SCL. O ponto O_{SCE} é a origem arbitrada no SCE e P_{SCE-O} é o ponto rotacionado e transladado para uma origem arbitrada.

A matriz Rot é o produto da rotação nos três eixos, a saber:

- Rotação em X: movimento de *roll*, definida pela letra grega θ ;
- Rotação em Y: movimento de *pitch*, definida pela letra grega Φ ; e
- Rotação em Z: movimento de *yaw*, definida pela letra grega Ψ .

$$Rot_x(roll) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$Rot_y(pitch) = \begin{bmatrix} \sin(\Phi) & 0 & \cos(\Phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos(\Phi) & 0 & -\sin(\Phi) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$Rot_z(yaw) = \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & -\sin(\Psi) & 0 \\ \sin(\Psi) & \cos(\Psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

As rotações devem obedecer à sequência de Tait-Bryant (KUSS, 2006), portanto:

$$Rot = Rot_x \cdot Rot_y \cdot Rot_z \quad (21)$$

$$Rot = \begin{bmatrix} \cos(\Phi) * \cos(\Psi) & -\cos(\Phi) * \sin(\Psi) & \sin(\Phi) \\ \cos(\theta) * \sin(\Psi) + \cos(\Psi) * \sin(\Phi) * \sin(\theta) & \cos(\theta) * \cos(\Psi) - \sin(\Phi) * \sin(\theta) * \sin(\Psi) & -\cos(\Phi) * \sin(\theta) \\ \sin(\theta) * \sin(\Psi) - \cos(\theta) * \cos(\Psi) * \sin(\Phi) & \cos(\Psi) * \sin(\theta) + \cos(\theta) * \sin(\Phi) * \sin(\Psi) & \cos(\Phi) * \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (22)$$

Na prática, serão realizadas sucessivas rotações para converter as coordenadas do SCL para o SCE, como será visto no fluxograma de trabalho.

2.3. Fluxograma de Trabalho

Os conhecimentos teóricos necessários apresentados até aqui são fundamentais, porém não suficientes para desenvolver o trabalho de campo e gabinete. É importante a organização das etapas e saber manipular os dados em cada passo dos trabalhos. Para auxiliar o hidrógrafo nessa atividade, propõe-se o fluxograma abaixo, que será discutido neste capítulo.

1. Reconhecimento do local, embarcação e estabelecimento prévio dos pontos a serem materializados e levantados.
2. Levantamento e processamento (ajustamento) das coordenadas de interesse.
3. Ajustamento dos pontos que materializam a quilha da embarcação.
4. Cálculo do ângulo de *yaw* da embarcação.
5. Rotação das coordenadas do plano de referência em *yaw*.
6. Ajustamento dos pontos que materializam o plano de referência (linha d'água).
7. Cálculo do ângulo de *pitch* da embarcação.



8. Rotação das coordenadas do plano de referência em *pitch* (e *yaw*).
9. Ajustamento dos pontos que materializam o plano de referência (linha d'água).
10. Cálculo do ângulo de *roll*.
11. Rotação das coordenadas do plano de referência em *roll*.
12. Rotação das coordenadas dos sensores e pontos de interesse.
13. Verificação das rotações.
14. Criação dos planos ajustados dos sensores de interesse.
15. Cálculo da posição do plano da *IMU* e dos transdutores.
16. Cálculo dos desvios angulares do plano da *IMU* e dos transdutores.
17. Cálculo dos desvios das antenas que fornecem a proa da embarcação (*heading*).
18. Relatório.

2.3.1. Reconhecimento, levantamento topográfico e ajustamento dos pontos que materializam a quilha da embarcação (etapas 1 até 4)

Cada embarcação terá seus desafios próprios. Na primeira oportunidade, o encarregado da faina deverá organizar a equipe, separar o material necessário e realizar a visita ao navio, dique e imediações. Alguns tópicos são mandatórios e devem ser definidos nesta etapa, como por exemplo:

- a) Materialização dos pontos das poligonais de apoio;
- b) Identificação dos pontos que materializarão o plano de referência e linha de fé da embarcação;

c) Identificação de todos os sensores, antenas, transdutores etc.;

d) Reconhecimento do caminhamento topográfico interno necessário para acesso ao compartimento onde está localizado o sensor de movimento (*IMU*); e

e) Materializar pontos de apoio para medições auxiliares (medição de calado, por exemplo).

O levantamento topográfico determinará todas as coordenadas de interesse em relação ao SCL (Figura 9). É fundamental que essa etapa seja especialmente criteriosa, objetivando a melhor acurácia possível e determinante para a qualidade final dos resultados alcançados. É obrigatório que cada coordenada esteja acompanhada de sua respectiva incerteza. Dentre todas as coordenadas obtidas, aqueles referentes à quilha da embarcação terão utilidade prática nesta etapa para o cálculo da direção da linha de fé em relação ao SCL. Deverá ser determinada a reta no plano horizontal que melhor se ajusta a essas coordenadas e esse lugar geométrico bidimensional passará a representar a linha de fé e sua direção em relação ao plano cartesiano do SCL. O método matemático a ser utilizado é o ajustamento por mínimos quadrados (MMQ), descrito no item 2.2.1.

2.3.1.1. Cálculo de *yaw* da embarcação:

O vetor diretor da linha de fé é obtido por MMQ das coordenadas da quilha e aponta na direção que a embarcação se encontra no SCL (item 2.2.1). Essa direção é o ângulo de *YAW* que a embarcação possui e pode ser calculado por



trigonometria direta, ou produto escalar (item 2.2.4) com os elementos do vetor em questão. A Figura 9 apresenta os vetores em questão: na cor verde, a linha de fé e, em encarnado, o eixo do SCL.

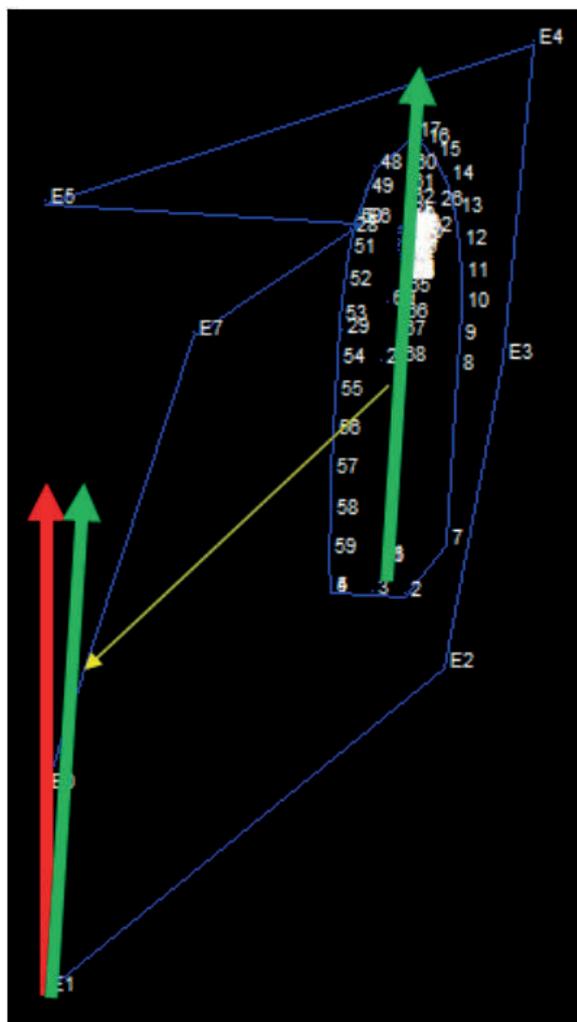


Figura 9 – Levantamento topográfico e representação do vetor linha de fé (verde) e orientação do SCL (vermelho). (Fonte: BAPTISTA, 2022)

Destaca-se que esse vetor é bidimensional no plano XY e especial atenção deve ser dada para o sinal desse ângulo. Caso o cálculo seja realizado de forma algébrica, o sinal será atribuído pelos cálculos trigonométricos, porém caso seja utilizado o método por produto escalar, o

valor sempre será positivo. No segundo caso, uma análise qualitativa deve ser realizada e o sinal do ângulo será atribuído manualmente (positivo para boreste). Esse valor é o ângulo de *yaw*, que será aplicado na próxima etapa do processamento.

2.3.2. Rotação das Coordenadas do plano de referência em *yaw*, estabelecimento do plano de referência e determinação dos ângulos de *pitch* e *roll* da embarcação (etapas 5 até 11).

O ângulo de *yaw* da embarcação, obtido através do vetor calculado no passo anterior, deve ser utilizado para rotacionar todas as coordenadas (item 2.2.5) do plano de referência, com sinal do ângulo de rotação oposto àquele previamente calculado. Opcionalmente, as coordenadas da quilha poderão ser igualmente rotacionadas para representação gráfica (Figura 10).

De posse das coordenadas da linha d'água, previamente rotacionadas em *yaw*, deve ser calculado um plano que melhor se ajusta a esses pontos, por meio do MMQ (item 2.2.2). Conforme supramencionado, o vetor calculado conterá valores de *banda* e *trim* da embarcação e pela convenção de Tait-Bryant (KUSS, 2006), o próximo ângulo a ser determinado deve ser *pitch*.

2.3.2.1. Cálculo de *pitch* da embarcação:

O vetor diretor do plano que melhor se ajusta às coordenadas da linha d'água é perpendicular a esse plano. O ângulo a ser calculado é o *pitch*, portanto

deve-se analisar os elementos desse vetor no plano XZ (Figura 11), ou seja:

$$\vec{n} = (abc) \quad (23)$$

$$PITCH = \tan^{-1}\left(\frac{a}{c}\right) \quad (24)$$

2.3.2.2. Cálculo de roll da embarcação:

O conjunto das coordenadas do plano de referência que foi previamente rotacionado de *yaw* deve ser rotacionado com o ângulo de *pitch* calculado no passo anterior. Essas coordenadas resultantes estão isentas dos ângulos já rotacionados (*yaw*

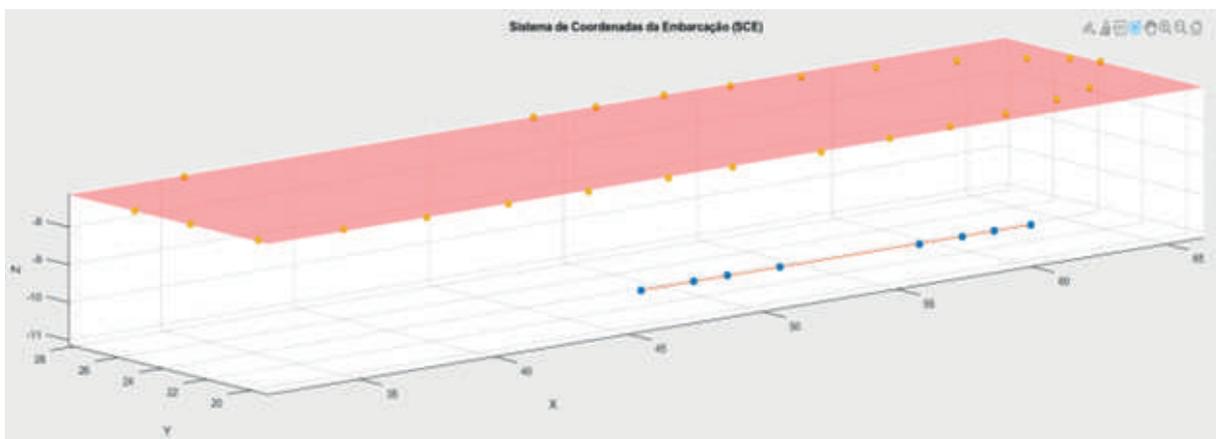


Figura 10 – Representação da quilha (pontos azuis) e plano de flutuação (pontos amarelos) rotacionados em *yaw*. (Fonte: BAPTISTA, 2022)

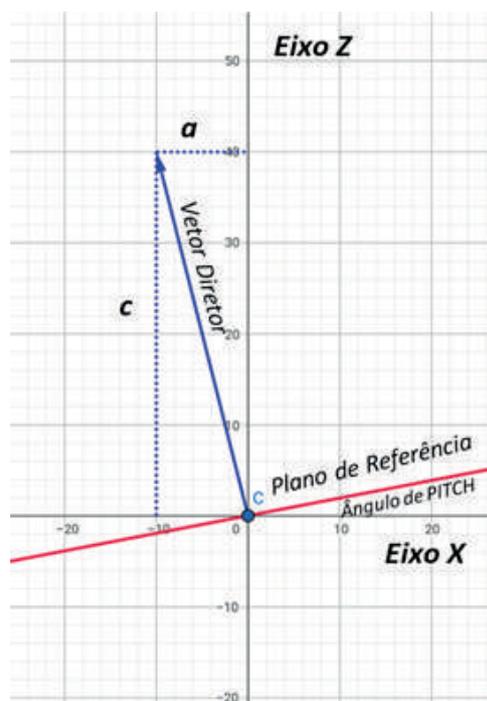


Figura 11 – Plano de referência (corte XZ) e vetor diretor. (Fonte: próprio autor)

e *pitch*), portanto, devem gerar um novo plano ajustado por MMQ, empregando os mesmos métodos anteriores. Finalmente, o valor de *roll* será calculado com base nos elementos do vetor diretor no plano YZ desse novo plano ajustado, ou seja:

$$ROLL = \tan^{-1}\left(\frac{-b}{c}\right) \quad (25)$$

Nesta etapa ficam definidos os ângulos que a embarcação possui no dique. Como uma forma de verificar se esses valores estão coerentes, uma rotação em *roll* pode ser aplicada ao conjunto de pontos previamente eliminados de *yaw* e *pitch*. Do resultado, gera-se um outro plano ajustado que deverá ter seu vetor diretor $\vec{v} = (0, 0, 1)$.



2.3.3. Rotação de coordenadas e determinação de posição e ângulos de montagem de sensores e relatório final (etapas 12 a 18).

Todas as coordenadas dos sensores devem ser rotacionadas dos ângulos de *yaw*, *pitch* e *roll* da embarcação. A origem do sistema de coordenadas pode ser deslocada para um local conveniente, sendo normalmente adotado o centro da base do sensor de atitude (item 2.2.5). Dado que todas essas coordenadas são solidárias ao navio, entende-se que agora estamos tratando das posições no Sistema de Coordenadas da Embarcação.

Os afastamentos lineares podem ser medidos diretamente por diferenças entre coordenadas. Os sensores que demandam conhecimento de seus ângulos de montagem devem ter suas coordenadas rotacionadas submetidas ao ajustamento por MMQ para planos e retas. Os vetores diretores resultantes devem ser analisados para extrair os ângulos de *yaw*, *pitch*, *roll* desses sensores, em relação ao SCE. Os procedimentos matemáticos para este fim já foram descritos neste artigo nos itens 2.3.1.1 (*yaw*), 2.3.2.1 (*pitch*) e 2.3.2.2 (*roll*).

O alinhamento do par de antenas que fornecerá o *heading* da embarcação deve ser calculado conforme o procedimento do cálculo de *yaw*, sendo dispensado o ajustamento, pois o vetor que expressa a direção do alinhamento dessas antenas será a diferença entre suas coordenadas, no plano XY. O valor numérico do desvio em *yaw* do par de antenas em relação à linha de fé pode ser calculado

por trigonometria direta ou produto escalar (item 2.2.4).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A metodologia apresentada resulta em distâncias lineares em relação ao ponto de origem arbitrado e afastamentos angulares em *roll*, *pitch* e *yaw*, em relação ao plano de referência adotado. No caso deste artigo, assim como recomendado em manual do fabricante de sistemas multifeixe, o plano de flutuação da embarcação foi escolhido como referência.

Na seção de metodologia deste artigo, foi possível verificar que é necessário coletar uma quantidade mínima de coordenadas para que o método seja viável, principalmente nas etapas diretamente ligadas ao ajustamento de planos e retas.

Para calcular o *yaw*, são necessárias apenas duas coordenadas que expressam a linha de fé da embarcação ou a orientação em *yaw* de sensores. Para os ângulos de *roll* e *pitch*, busca-se um mínimo de quatro registros de pontos que expressam o plano de referência da embarcação (linha d'água) ou o plano de sensores (face do transdutor ou base da IMU), a fim de possibilitar o ajustamento de planos por MMQ.

As coordenadas são obtidas em estruturas físicas da embarcação que podem ter sofrido deformações ao longo do tempo, ou as referências empregadas podem ter desvios oriundos de seus estabelecimentos, como por exemplo os cordões de solda que perenizam a linha d'água. No caso dos sensores, há dificuldades inerentes às dimensões reduzidas dos equipamentos ou falta de visadas adequadas com instrumentos

óticos. O hidrógrafo dificilmente saberá qual a quantidade desejável de coordenadas a serem obtidas para que possíveis desvios sejam minimizados estatisticamente. Até que um estudo direcionado ao tema seja desenvolvido, recomenda-se que sejam adquiridas, pelo menos, oito coordenadas para a definição do plano de referência do SCE, quatro para o plano de sensores e três para extrair direções (*yaw*). Essas coordenadas serão utilizadas para estabelecimento de planos e linhas ajustadas.

Uma forma empírica para expressar a qualidade das coordenadas obtidas topograficamente pode ser facilmente implementada logo após os ajustamentos. O cálculo de resíduos entre planos e retas ajustados aos respectivos pontos que originaram essas referências fornecerá uma estimativa da qualidade das medições (equações 5 e 13). Espera-se que os resíduos sejam da ordem de poucos milímetros, em consonância com a acurácia dos instrumentos e metodologias topográficas utilizados em campo.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi apresentado um método alternativo para medição de *offsets* que pode ser

aplicado em qualquer tipo de embarcação, seja uma pequena lancha hidrográfica, até navios de grande porte. O método é condizente com instruções constante nos manuais dos fabricantes de sistemas multiflexe e assemelhado aos procedimentos adotados por empresas reconhecidas que realizaram trabalhos similares em navios da DHN.

A base para o controle dimensional é um trabalho topográfico sólido e realizado com as melhores práticas de campo. O emprego de equipamentos de qualidade, em especial estação total com elevada acurácia, proporcionará resultados adequados.

Os *offsets* calculados devem ser lançados em *softwares* de aquisição ou processamento de dados hidrográficos e contribuirão para qualidade das informações batimétricas.

Dado que é possível calcular incertezas de todas as coordenadas e as relações matemáticas são conhecidas, torna-se possível realizar a propagação de incertezas para distâncias e ângulos. Recomenda-se para trabalhos futuros discutir a propagação de variâncias para cada coordenada e aplicar técnicas de teoria dos erros para extrair incertezas angulares de retas e planos ajustados por MMQ.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAPTISTA, B. N. Relatório de Medição de *Offset* no AvPqHoAspMoura. Niterói, 2022.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). *Publication C-13. Manual on Hydrography*. Mônaco, 2005. Disponível em: <https://www.iho.int/iho_pubs/IHO_Download.htm>. Acesso em: 13 fev. 2023.



KONGSBERG MARITIME AS. EM2040 Instruction Manual. Multibeam Beam Hydrographic Echo Sounder. Horten - Norway, 2012.

KUSS, P. Rotation Sequence. Disponível em: <http://www.omg.unb.ca/people/pimk/software/html/rotation_seq.html>. Acesso em: 4 abr. 2023.

MACEDO, M. A. Geometria analítica vetorial. Fortaleza: UAB/IFCE, 2008

MIKHAIL, E.; GRACIE, G. Analysis and Adjustment of Survey Measurements. VNR, Nova Iorque, 1981.

OVERATH & SAND. Moderne Methoden zur Einmessung von Vermessungsschiffen. Kloben, 2017.

OVERATH & SAND. Relatório *Offset* NPHoVitaldeOliveira. Singapura, 2015.

PARKER. Relatório de *Offset* do NHoAmorimdoValle. Niterói, 2014.

SHOEMAKE, K. Animating Rotation with Quaternion Curves Proc. SIGGRAPH 1985, pag. 245 - 254.

