



ANÁLISE PRELIMINAR DE DADOS BRUTOS DO MARÉGRAFO DE PRESSÃO PARA UTILIZAÇÃO EM LEVANTAMENTOS HIDROCEANOGRÁFICOS POR MEIO DE UMA SÉRIE TEMPORAL DE UMA SEMANA NO COMPLEXO NAVAL DA PONTA DA ARMAÇÃO

Elias de Castro Nadaf^{1*}
*Gregório Luiz Galvão Teixeira*²
*Pedro Foloni*³
*Leonardo Araujo Costa*⁴
*Leonardo Ferraz Garcia*⁵
*Heraldo Soares Caldeira*⁶

RESUMO

Um dos principais óbices da hidrografia está no levantamento de dados maregráficos de maneira remota, a fim de reduzir a sondagem ou definir *data* em regiões distantes da linha de costa. Uma das soluções que estão sendo aplicadas há algumas décadas é o uso de marégrafos de pressão. Embora ocorra a larga aplicação destes marégrafos, há necessidade da validação deles para as atividades fins. Este trabalho tem como objetivo a análise preliminar com dados de uma semana. Como método de comparação foram calculados parâmetros estatísticos – Desvio Padrão, Tendência, Correlação de *Pearson* e RMSE. Estes parâmetros foram compilados em um Diagrama de Taylor para auxiliar na tomada de decisão. Os resultados mostram que há uma instabilidade na aquisição durante o período de quadratura. Esse fato resultou em uma baixa incerteza nos dados do MP,

¹ Oficial do Corpo da Armada, M. Sc. em Meteorologia e Oceanografia Física pela *Naval Postgraduate School*, e Encarregado da Divisão de Oceanografia Operacional do CHM. Email: nadaf@marinha.mil.br

² Oceanógrafo físico, M. Sc. em Eng. Ambiental pela UFES, e Professor de Marés e Geologia e Geofísica do CIAARA,

³ Oceanógrafo pela USP, M. Sc. em Dinâmica Costeira pela USP, e colaborador técnico na área de eletrônica do projeto REMO Observacional. Email: p.foloni@gmail.com

⁴ Oceanógrafo pela UERJ e Engenheiro Mecatrônico pela UNICESUMAR, pós-graduação em sistemas offshore pela UFRJ, e colaborador técnico na área de eletrônica do projeto REMO Observacional.

⁵ Engenheiro Mecânico pela UNIP, e colaborador técnico na área de eletrônica do projeto REMO Observacional. Email: leonardo-fg1980@gmail.com

⁶ Oficial do Corpo da Armada (RM-1), M.Sc. em Sensoriamento Remoto pelo INPE, e Professor de Teoria dos Erros do CIAARA.

indicando, a princípio, uma inviabilidade do uso deste para fins hidrográficos.

Palavras-chave: Nível do Mar, Análise estatística, Diagrama de Taylor e Marégrafo de pressão.

ABSTRACT

One of the main hurdles in hydrography is the remote survey of tide data in order to bring sounding to the reference level or define data in regions far from the coastline. One of the solutions that has been applied for some decades is the use of pressure tide gauges. Despite the wide application of these tide gauges, there is a need to validate them for the core activity. The objective of this work is the preliminary data analysis of one week collection. As a method of comparison, the statistical parameters such as Standard Deviation, Trend, Pearson Correlation and RMSE were calculated. These parameters were compiled into a Taylor Diagram to assist in decision making. The results show that there is instability in the acquisition during at low tide. This resulted in a low uncertainty in the pressure tide gauge data, indicating, in principle, an impracticability of its use for hydrographic purposes.

Keywords: Sea Level, Statistical Analysis, Taylor Diagram and Pressure Tide Gauges.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento contínuo do nível do mar tem sua importância relatada há centenas de anos. Entre seus diversos

usos podemos destacar a previsão destes níveis em função, principalmente, da característica determinística da maré, e da definição dos *data* verticais, como por exemplo, o Nível de Redução (NR) (FRANCO, 2009). Ambas as aplicações estão estreitamente ligadas às atividades dos serviços hidrográficos distribuídos ao longo do globo.

Além da qualidade dos dados das séries temporais (BUSHNELL e WORTHINGTON, 2021), o seu comprimento influencia significativamente na confiabilidade dos parâmetros hidrográficos. Teixeira *et al.* (2017), analisaram séries temporais de 15 dias a 1 ano e observaram um impacto não linear do comprimento da série no estabelecimento das constantes harmônicas da maré, no Z_0 e no NR. Dessa maneira, o *Datum* náutico, o NR, é tão melhor estabelecido quanto maior a série temporal de nível do mar adquirida, e, por conseguinte, entende-se que a carta náutica que faz uso desse NR tem maior confiabilidade. Além das oscilações astronômicas, a maré e as variações não-astronômicas do nível médio do mar (NMM) também têm seus impactos diretos na segurança da navegação, principalmente pela sua baixa previsibilidade (COELHO, 2016; PRATS, 2017; MELO F^o, 2017; FUCHS *et al.*, 2021).

Tradicionalmente, o monitoramento operacional do nível do mar era feito através de marégrafos analógicos, grandes sistemas de engrenagem que, através de um sistema boia-contrapeso atrelado a uma relojoaria e de uma pena, transferiam os movimentos do nível mar para um papel, denominado maregrama (PUGH,



1987). Os principais óbices eram a troca do maregrama e, depois, a extração destes dados do papel para uma planilha de análise de dados.

Com o advento das registradoras digitais, a operacionalidade destes marégrafos foi aumentada, uma vez que elas permitem um maior tempo de registro sem a necessidade de interferência humana, assim como a aquisição de dados já digitalizados para se efetuar um pós-processamento.

O sistema boia-contrapeso, amplamente denominado marégrafo boia-contrapeso (MBC), é utilizado ainda hoje, em larga escala no monitoramento do nível do mar (NM) e apresenta erros significativos em regiões com condições severas de mar, devido às ondas e correntes (BUSHNELL e WORTHINGTON, 2021). A filtragem física feita através de furos no tubo onde o sistema é instalado permite a aquisição de dados com baixa taxa de ruído de alta frequência. Uma outra dificuldade do uso desse sistema para a obtenção de dados no NM é a necessidade de uma linha de costa para a sua fixação e, muitas vezes, do apoio em obras costeiras, necessitando, portanto, de um trabalho de alvenaria. Na Figura 1 está esquematizado o MBC que é estabelecido dentro do tubo amortizador.

Com o intuito de permitir uma maior flexibilidade na medição do NM, equipamentos como os sistemas de pressão (SP) ou o marégrafo de pressão (MP) vêm sendo aperfeiçoados até o nível de podermos adquirir dados com alto índice de confiabilidade, se comparados com o MBC. Estes sistemas são resistentes

a regiões polares, as quais apresentam cobertura recorrente de gelo, e a regiões da Bacia Oceânica em geral, resistindo a profundidade de milhares de metros (BUSHNELL e WORTHINGTON, 2021). Este tipo de marégrafo utiliza a variação da pressão hidrostática (p_m) através da piezeletricidade, para estimar as variações das alturas do nível do mar (h) em relação ao equipamento (Eq.1).

$$h(t) = \left(\frac{(p_m(t) - p_a(t))}{-\rho g} \right) - NMM \quad \text{Eq.1}$$

Os dados de pressão adquiridos devem ser corrigidos da pressão atmosférica (p_a), através de um barômetro próximo do local da medição e da densidade da água. Um dos problemas na utilização desses equipamentos está relacionado com a deriva de dados que ocorrem em sensores de baixa qualidade. Assim, testes comparativos do SP com outro de referência é uma forma de validar a função operacional do equipamento. Por fim, uma das principais vantagens do SP pode estar relacionada ao fato de não haver a necessidade da instalação dele junto à linha de costa. Este fato pode vir a contribuir com levantamentos hidrográficos em regiões remotas, afastadas da costa ou em locais em condições meteoceanográficas mais hostis.

A partir da comparação do potencial operacional dos sistemas boia-contrapeso e pressão, verifica-se que o conhecimento sobre a robustez da aquisição de dados de NM via SP é de suma importância para avanços das práticas hidrográficas operacionais. Sendo assim, este trabalho visa iniciar o procedimento de comparação

entre esses sistemas a partir de parâmetros estatísticos, pressupondo que é possível galgar resultados ajustados, que permitirão o uso do SP como forma redundante de monitoramento do NM.

1.1. Objetivos

Objetivo Geral

Conduzir um estudo preliminar de viabilidade do uso do marégrafo de pressão em substituição ao sistema boia-contrapeso por meio de uma série temporal de uma semana.

Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram definidos objetivos específicos, a saber:

- Estabelecer uma estação de monitoramento do nível do mar com um marégrafo de boia-contrapeso;
- Estabelecer um ponto de monitoramento do nível do mar com o marégrafo de pressão;
- Calcular parâmetros estatísticos individuais utilizando os dados brutos para ambas as séries temporais dos marégrafos de pressão e boia-contrapeso;
- Calcular a similaridade e coerência entre as curvas.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

A Estação Maregráfica de Teste (EMT), indicada na Figura 1, encontra-se no Sistema Estuarino da Baía de Guanabara (SEBG), localizado na cidade do Rio de Janeiro – RJ (Figura 2). Esta

estação está localizada no Complexo Naval da Ponta da Armação (CNPA), sede da hidrografia no Brasil.

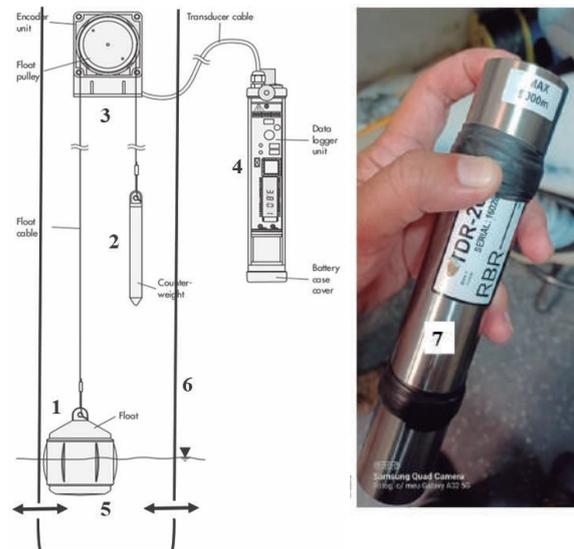


Figura 1 – À esquerda, o MBC Thalimedes da OTT, com seus seis componentes, roldana, registradora, orifícios do tubo e tubo amortizador. Adaptado de OTT (2023). E, à direita do MP TDR-2050 da RBR, com encapsulamento de titânio do sistema piezométrico. Fonte: Autores

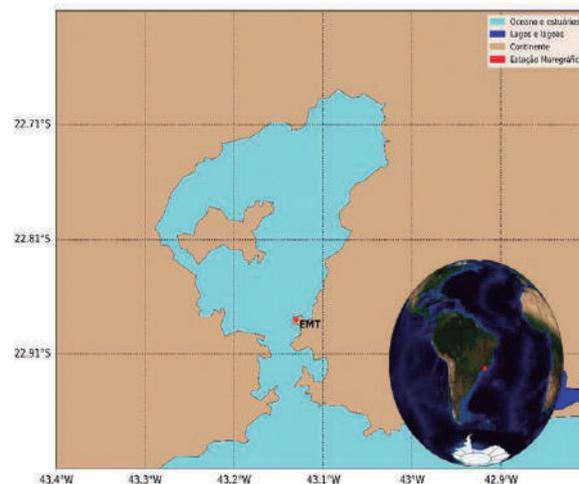


Figura 2 – Mapa da localização geográfica da área de estudo adjacente da EMPA, que está localizada no SEBG

2.2. Dados

Os dados de alturas do nível do mar foram adquiridos entre 12:00AM de 30/03/2023 e 11:00AM de 17/04/2023,



com uma taxa de aquisição de 5 min por meio de dois equipamentos que serão descritos a seguir.

O MBC utilizado foi o Thalimedes/OTT, como apresentado na Figura 1, que tem sua aquisição feita por meio de um sistema de boia e contrapeso e armazenado digitalmente em uma registradora. Suas dimensões são vantajosas uma vez que é viável a acomodação do sistema dentro do próprio tubulão. A estabilidade do sistema frente aos novos sistemas é comprovada, permitindo utilizá-lo como referência. Esse sistema é tradicionalmente utilizado na aquisição de dados de nível do mar na Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN), bem como nos principais serviços hidrográficos ao longo do globo.

O outro foi o MP TDR-2050/RBR. Sua flexibilidade e baixo custo de instalação é normalmente conflitado com a sua instabilidade. Internamente o sensor de pressão é composto basicamente de um sensor de pressão localizado na parte inferior, um microcontrolador e um chip de armazenamento, como mostrado na Figura 3.

2.3. Estatística

Como neste trabalho as séries temporais de nível do mar são referenciadas no nível médio do mar, as representações estatísticas serão utilizadas para a comparação e o cálculo das características individuais, e para observar a similaridade dessas séries (THOMSOM e EMERY, 2014). Para tanto serão calculados o desvio padrão, a raiz do erro quadrático médio e a correlação.

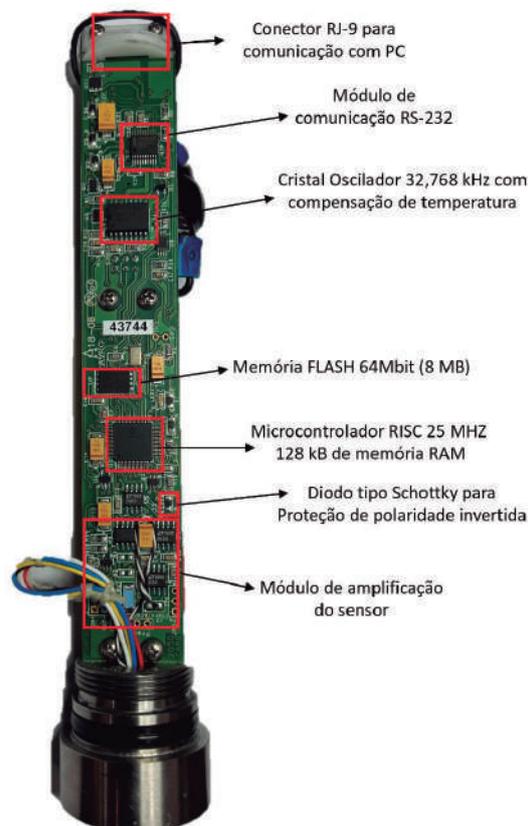


Figura 3 – Imagem esquematizada dos principais componentes do MP TDR-2050/RBR

2.3.1. Desvio Padrão (DP)

O desvio padrão é uma medida do grau de dispersão dos valores em relação ao valor médio. Devido à grande quantidade de dados, o desvio será calculado do DP populacional segundo a equação a seguir:

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad \text{Eq.2}$$

Onde: x_i é o valor na posição i na amostra, \bar{x} é o valor médio dos dados, e n é o tamanho da amostra.

2.3.2. Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)

Este parâmetro expressa a capacidade de previsão de modelos em relação aos dados de referência. Aqui ele será adotado para avaliar o erro dos dados dos marégrafos de pressão e radar em relação ao marégrafo de boia-contrapeso. Esse parâmetro será calculado de acordo com a equação abaixo

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2}{n}} \quad \text{Eq.3}$$

Onde: y são os valores dos dados observados pelos marégrafos de pressão e radar. \hat{y}_j são os valores de altura do marégrafo (MBC) e n é o tamanho da amostra.

2.3.3. Correlação de Pearson (CP)

O uso do coeficiente de correlação determina a relação entre duas propriedades. O coeficiente pode variar de +1 a -1. O valor de correlação mais próximo a 1 indica alta correlação. Já mais próximo de zero, indica baixa correlação. Nesse trabalho, correlacionamos os métodos entre si, em função da covariância de dois em dois, para avaliar se há uma relação linear entre os níveis não-astronômicos mais próximos da unidade.

A equação para o coeficiente de correlação é:

$$CP(X, Y) = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{Eq.4}$$

Onde: \bar{x} e \bar{y} são as médias amostrais.

2.3.4. Dispersão

O gráfico de dispersão nesse trabalho foi usado para ilustrar a possível relação entre os dados do nível médio diário de cada filtro. A técnica dos mínimos quadrados é uma das mais usadas para ajustar um parâmetro de modelo dependente y à variável independente x_i ($i=1, 2, \dots, N$), em termos de estimação linear, ou seja, os dados convergem para um modelo no qual os dados têm uma relação linear. Esse procedimento de mínimos quadrados é um ajuste que minimiza a variância dos pontos de dados da linha ajustada, ou seja, possui menos desvios dos dados. (THOMSON e EMERY, 2014).

2.4. Diagrama de Taylor (DT)

O DT é um método, proposto por Taylor (2001), que compila os principais parâmetros estatísticos para se efetuar a comparação entre modelos/testes e uma certa referência. Na Figura 4, apresenta-se a construção básica do diagrama, com valores de DP variando concentricamente, CP variando radialmente e, por fim, o RMSE entre os modelos/testes e a referência, representado nas linhas tracejadas.

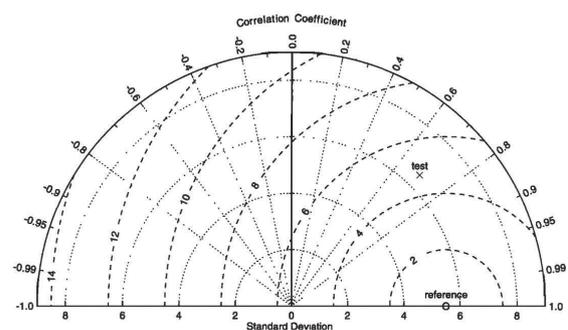


Figura 4 – Gráfico de espalhamento dos dados de maré do marégrafo de pressão. Fonte: Taylor (2001)



3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas figuras 5 e 6 estão apresentadas as curvas com os dados do marégrafo boia-contrapeso (MBC) em laranja; marégrafo de Radar (MR) em azul; marégrafo de pressão (MP) em verde e, por fim, dados do marégrafo de pressão com correção da pressão atmosférica (MPc) em vermelho. Todos os dados foram reduzidos da média, e, portanto, estão reduzidos do nível médio do mar, resultando, assim, em valores de níveis positivos e negativos.

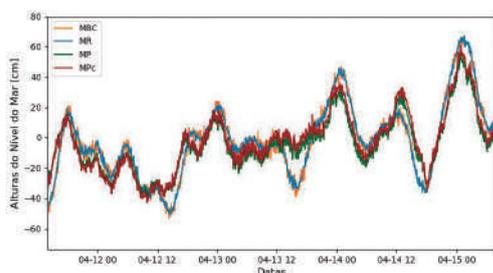


Figura 5 – Nível do mar reduzido ao NMM no período de quadratura. Fonte: Autores

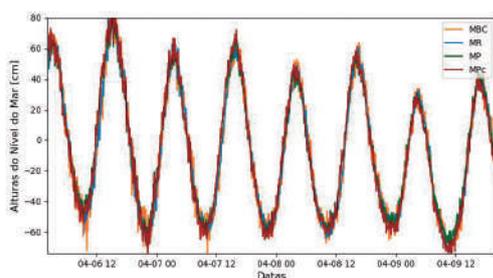


Figura 6 – Nível do mar reduzido ao NMM no período de sizígia. Fonte: Autores

Comparando-se os dados coletados pelo marégrafo de pressão com os dados dos marégrafos radar e de boia-contrapeso, no período de quadratura, exibidos na figura 5, é possível notar que o marégrafo de pressão não foi capaz de representar as variações de maré em determinados momentos desse ciclo. Não

obstante, ainda nos momentos em que as medições acompanham o MBC e o MR, as leituras não são representadas com precisão.

Em oposição ao período de quadratura, as medições do marégrafo de pressão para o período da sizígia, mostradas na figura 6, foram comparáveis às leituras dos marégrafos radar e boia-contrapeso, tanto em fase quanto em amplitude.

A tabela 1 mostra o desvio padrão, a correlação de *Pearson*, o erro médio quadrático e a tendência calculados para os marégrafos de pressão, marégrafo de pressão com correção da pressão atmosférica e o marégrafo radar.

Tabela 1 – Parâmetros estatísticos das amostras dos marégrafos de pressão, pressão corrigida e de Radar

Parâmetro	MP	MPc	MR
DP	32.83	34.42	35.56
CP	0.96	0.96	0.99
RMSE	9.27	9.92	4.40
Tendência	1.04	0.99	1.00

Apesar de os valores calculados para os desvios padrão serem próximos ao se aplicar a correção da pressão atmosférica, o desvio padrão dos dados coletados pelo marégrafo de pressão se torna mais próximo do marégrafo radar, utilizado como um dos instrumentos para comparação que se aproximam da realidade.

Nota-se, também, que o marégrafo de pressão e o respectivo resultado corrigido da pressão atmosférica apresentam menor correlação quando comparados ao marégrafo radar. Tal resultado é esperado e pode ser atribuído, em grande parte, à falha do marégrafo de pressão ao acompanhar

as medições no período de quadratura. Da mesma maneira, o erro médio quadrático (RMSE) é de aproximadamente 10 cm, o que é significativo para atividades de maré com aplicações hidrográficas, como salienta Silva *et al.* (2014).

Por fim, a tendência das séries temporais, em relação ao marégrafo boia-contrapeso, está bem ajustada, próxima da unidade.

A Figura 7 sintetiza graficamente os dados estatísticos obtidos nas análises realizadas anteriormente. O gráfico da esquerda mostra o espalhamento dos dados de maré do marégrafo de pressão (MP), marégrafo de pressão compensado da pressão atmosférica (MPc), maré do marégrafo de radar (MR) em relação ao marégrafo boia-contrapeso (MBC), que é a referência. Como esperado, o MR apresenta menor espalhamento, o que reflete em sua maior correlação com a referência. O gráfico da direita representa o Diagrama de Taylor dos dados do MP, MPc, MR e o MBC como referência (estrela preta).

de *Pearson* e o RMSE dos MP, MPc e MR, tomando-se como referência o MBC.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Dentro do escopo da análise estatística dos dados do MP nas atividades hidrográficas, avaliou-se a aplicabilidade destes dados como inviável. A incerteza do MP é de aproximadamente 10 cm, o que é considerado significativo nas atividades maregráficas. A limitação deste trabalho foi a série temporal curta, o que pode ter influenciado na estatística e não permitido a análise de alguma instabilidade na aquisição para o período específico. É visível a instabilidade da aquisição no período de quadratura, o que pode estar relacionado com a resolução de equipamento ou com a filtragem padrão, ou ainda pelo atraso em fase. Sendo assim, é recomendado o teste com outros MP com maiores quantidades de ciclos de maré. Fruto dessa

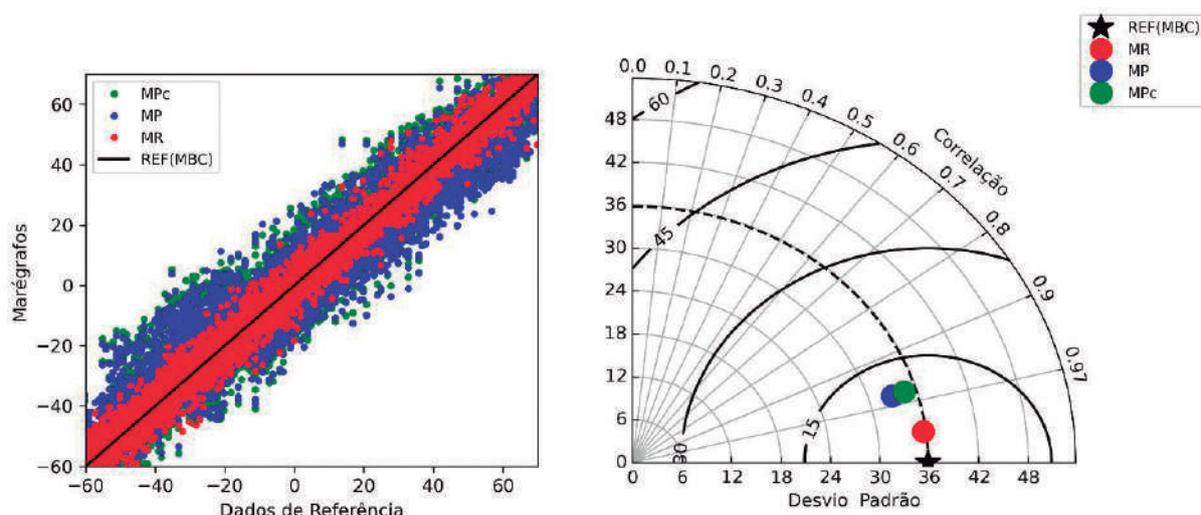


Figura 7 – À esquerda, o gráfico de espalhamento dos dados do marégrafo de pressão (MP), marégrafo de pressão compensado da pressão atmosférica (MPc), do marégrafo de Radar (MR) e a referência (linha preta), que representa o nível corrigido do marégrafo de boia e contrapeso (MBC). À direita, o Diagrama de Taylor dos dados do MP, MPc, MR e o MBC como referência (estrela preta). Fonte: Autores



recomendação, um MP foi instalado e adquirirá dados em um período de 30 dias para posterior comparação. Por fim, devido ao bom desempenho do equipamento no

período das maiores amplitudes, recomenda-se, também, o teste do equipamento em regiões de meso ou macromaré, como, por exemplo, a região norte do Brasil.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBIERI, E.; COE-NETO, R. *Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon Systems, Rio de Janeiro, Brazil*; KNOPPERS, B. A.; BIDONE, E. D.; ABRÃO, J. J., EDS.; UFF/FINEP: Rio de Janeiro, 1999.

BUSHNELL, M.; WORTHINGTON, H. *Manual for real-time quality control of water level data: a guide to quality control and quality assurance for water level observations. Version 2.1.* 2021.

FRANCO, A. A., *Marés: Fundamentos, Análise e Previsão.* DHN, 2ª edição. Niterói, 2009.

FUCHS, V.; TEIXEIRA, G.L.V.; NZUALO, T.N.M. *Estimation Of Nautical Chart Datum By The Statistical Method In Micro And Meso Tidal Regime: An Alternative To The Balay Harmonic Method. International Hydrographic Organization (IHO). The International Hydrographic Review*, v,26. 2021.

MELO Fº., E. *Maré Meteorológica na Costa Brasileira*, Tese Professor Titular, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio Grande, 328 p, Abril 2017.

OTT. *Operating Instructions, Shaft Encoder with Data Logger Thalimedes. Publication number: 55.430.000.B.E 03-0398.* 2023

PUGH, D. *TIDES, Surges and Mean Sea-Level.* John Wiley, London, 1987.

SILVA, G. N.; SOUZA, A. V.; PIMENTEL, V. B. *Zoneamento de maré.* Diretoria de Hidrografia e Navegação. Anais Hidrográficos – TOMO LXXI. Rio de Janeiro, 2014



TAYLOR, K. E. *Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram*, *J. Geophys. Res.*, 106(D7), 7183– 7192, 2001. doi:10.1029/2000JD900719.

TEIXEIRA, G.L.G. *et al.* Influência dos diferentes comprimentos de séries temporais na análise harmônica da maré astronômica na Baía de Sepetiba – Rio de Janeiro, Brasil. *Anais Hidrográficos / Diretoria de Hidrografia e Navegação*, T.73, p 103- 112. 2017.

THOMSON, R.E., and EMERY, W.J. *Data Analysis Methods In Physical Oceanography*. Elsevier. 3^o edition. Oxford, 2014.

