



ANÁLISE DOS PARÂMETROS DESCRITIVOS DE ONDA COLETADOS POR ONDÓGRAFO DE PRODUÇÃO NACIONAL

Pedro Octavio Foloni Sousa^{1*}

*Elias de Castro Nadaf*²

*Leonardo Ferraz*³

*Luiz Alexandre A. Guerra*⁴

*André L. T. Mendes*⁵

RESUMO

O presente estudo apresenta uma análise preliminar dos parâmetros descritivos de onda obtidos por dois ondógrafos diferentes: o *MessenOcean* UCMO-1, de fabricação nacional, e o *AXYS Next Wave II*. Ambos os sensores foram instalados no centro de gravidade de uma boia *AXYS 3M* e submetidos a testes de campo, na Baía de Santos, no período entre dezembro de 2022 e abril de 2023. Com o objetivo de avaliar a correlação entre as medições dos sensores, foram plotadas as séries temporais dos parâmetros de cada sensor, bem como seus gráficos de dispersão, e calculadas as métricas estatísticas RMSE, MAE e correlação de *Pearson*. Os resultados mostraram uma correlação forte nas medições da altura de onda, e indicaram a necessidade de realizar esforços analíticos adicionais para descrever as diferenças observadas nos parâmetros direção média de ondas e período de pico.

¹ 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

² 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

³ Engenheiro Mecânico pela UNIP, e colaborador técnico na área de eletrônica do projeto REMO Observacional. Email: leonardo-fg1980@gmail.com

⁴ Oficial do Quadro Técnico da Reserva Não Remunerada, Oceanógrafo, D.Sc., e Profissional NS Master PETROBRAS/CENPES. Email: laguerra@petrobras.com.br

⁵ Oceanógrafo, D.Sc., e Profissional NS Sênior PETROBRAS/CENPES. Email: andreltm@petrobras.com.br

Palavras-chave: medição de ondas, ondógrafo, análise comparativa, Baía de Santos.

ABSTRACT:

The present study provides a preliminary analysis of the data obtained by two different wave sensors: the Messen-Ocean UCMO-1, made in Brazil, and the AXYS Next Wave II. Both sensors were installed at the center of gravity of an AXYS 3M buoy and subjected to field tests between December 2022 and April 2023. To evaluate the correlation between the sensor measurements, the time series of parameters for each sensor were plotted, along with their scatter plots. Statistical such as RMSE, MAE and Pearson correlation were calculated. The results show a strong correlation in Wave Height, and indicated the need for additional analytical efforts to describe the observed differences in the mean wave direction and peak period parameters.

Keywords: wave measurements, wave sensor, comparative analysis, Santos Basin

1. INTRODUÇÃO

A medição das ondas do mar é fundamental para diversas aplicações, como previsão de tempo, monitoramento de processos costeiros e projetos de engenharia costeira, entre outras. Atualmente, existe uma ampla variedade de sensores com esse propósito. Esses sensores, comumente chamados de ondógrafos, apresentam diferentes métodos de aquisição,

princípios de funcionamento, precisão e acurácia. Um dos métodos mais aceitos consiste na utilização de acelerômetros combinados com giroscópios e bússolas. Sistemas desse tipo são capazes de reproduzir os principais descritores de onda. No entanto, as incertezas na medição aumentam de acordo com a qualidade desses componentes e o algoritmo de processamento por trás do *hardware*.

De maneira geral, há uma grande carência de informações de ondas na costa brasileira. Dentre os principais entraves, está o alto custo associado à compra e importação de sensores de ondas. Diante dessa problemática, é estratégico promover o desenvolvimento de tecnologias nacionais, visando à redução de custos e ampliação da capacidade de monitoramento meteoceanográfico em Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB).

Nesse contexto, o projeto “Pesquisa e Desenvolvimento para Consolidação da Tecnologia da Boia Meteoceanográfica Nacional” surge como uma iniciativa relevante, visando aprimorar o conhecimento sobre o clima de ondas na costa brasileira. Resultado de uma parceria entre o Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) e a Petrobras, o projeto é parte integrante da Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO) e tem como objetivo contribuir para o desenvolvimento de sistemas de medição de ondas, bem como fornecer informações em apoio às atividades de meteorologia e oceanografia do Brasil, visando a segurança da navegação, salvaguarda da vida humana no mar e o aumento da eficiência das operações *offshore*, em conjunto com o Programa Nacional de Boias (PNBOIA).



Dentro do escopo deste projeto, encontra-se a validação de um sistema ondógrafo nacional, o *MessenOcean* UCMO-1, referido neste documento como SBG. Esse sistema foi desenvolvido por meio da integração de um sensor inercial de movimento do tipo AHRS (sensor referenciado por atitude e direção), que utiliza tecnologia MEMS (sistemas microeletromecânicos). O presente estudo compara os resultados obtidos por esse ondógrafo com os dados do sistema *AXYS Next Wave II* (G2), ambos instalados em um mesmo casco naval de uma boia *AXYS-3M* (Figura 1). Essa boia foi fundeada na Baía de Santos, no Campo de Sapinhoá, no dia 9 de dezembro de 2022.

Utilizando métodos estatísticos, foi possível avaliar a qualidade das medições realizadas. Em geral, observou-se uma alta correlação entre as medições de altura de onda obtidas pelos dois sistemas. No entanto, foram identificadas diferenças significativas, principalmente em relação à direção média e ao período de pico.

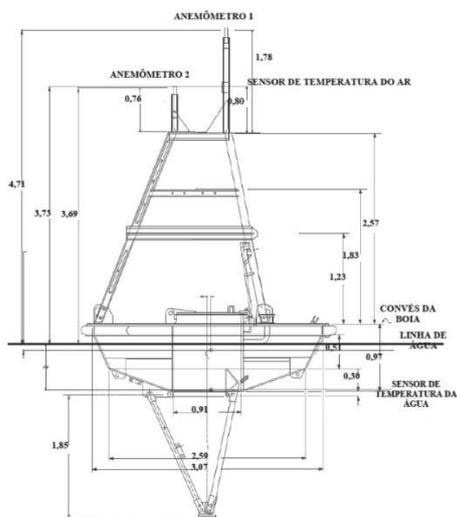


Figura 1 – Desenho técnico do casco *AXYS 3M*. Fonte: *Operations/Maintenance/reference manual for buoy base watchman 100 payloads: Brazilian Navy 3M ODAS*

2. DADOS E MÉTODO

2.1. Área de Estudo

A boia *AXYS-3M*, identificada como *AX24*, foi fundeada no dia 9 de dezembro de 2022 no Campo de Sapinhoá, na Baía de Santos, em uma profundidade de 2200m, na posição geográfica de latitude 25,8643°S e longitude 43,0437°W (Figura 2), utilizando o Navio Oceanográfico *Antares* (H-40).

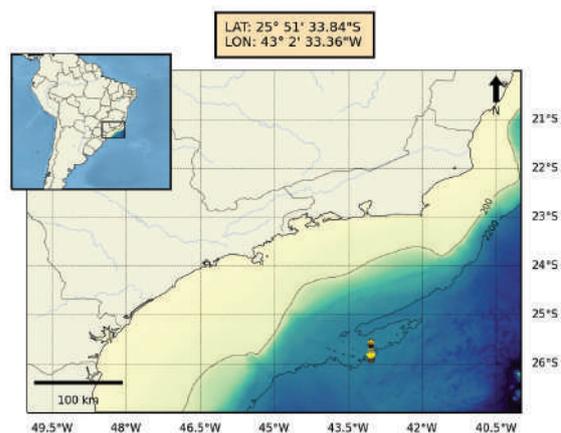


Figura 2 – Mapa de localização da boia *AX24*. Painel superior: Território Brasileiro com demarcação na sub-região de interesse. Painel inferior: Região aproximada, compreendendo a Baía de Santos e o ponto de fundeio da boia

2.2. Sistemas Ondógrafos

O sistema *UCMO-1* (SBG) é composto por uma unidade de medição inercial (IMU) que integra três giroscópios, três magnetômetros e três acelerômetros. O elemento sensor utilizado é o SBG *ELLIPSE 2-A-G4A2-B1*, que fornece dados precisos de orientação em 6 graus de liberdade. Ele é capaz de realizar as medições necessárias para estimar os

parâmetros de ondas, como *heave*, acelerações xyz e os ângulos de Euler (SBG Systems, 2016). Os dados coletados pelo sistema são processados utilizando um filtro *Kalman* estendido, conforme descrito em SBG Systems (2016).

Os dados brutos do sensor e a informação de proa da boia são enviados continuamente para o *datalogger*. A cada hora, esses dados são integrados para calcular os parâmetros de ondas, gerando as séries processadas correspondentes.

O sistema *NextWave II* (G2) utiliza três acelerômetros e três giroscópios para medir os movimentos da boia com seis graus de liberdade. Os giroscópios medem a rotação tridimensional da boia, que é calculada a partir das posições instantâneas dos eixos x, y e z. O modelo G2 emprega um algoritmo exclusivo baseado na Transformada Rápida de *Fourier* (FFT) para resolver as equações não-lineares que relacionam os movimentos da boia com as acelerações e as taxas angulares medidas pelos sensores. O *software* de análise de movimento é baseado no sistema de medição de movimento inercial MOTAN, que é amplamente utilizado para medir os movimentos de modelos de navios e outras estruturas em tanques de ondas e tanques de reboque (Macisaac & Naeth, 2013).

Ambos os ondógrafos foram instalados no centro de gravidade de uma boia AXYS 3M (Figura 1) feita de alumínio soldado. A boia possui um diâmetro de 3,4m e é composta por seis compartimentos de flutuação estanques, além de um compartimento central também estanque, destinado ao *datalogger*, eletrônicos, baterias e sensores.

2.3. Dados

Neste estudo, foram analisados os dados horários de altura, período e direção média de ondas, que foram obtidos a partir das séries de movimentos medidas em alta frequência pelos sensores mencionados anteriormente. A análise abrangeu o período de 10 de dezembro de 2022 até 3 de abril de 2023.

Cabe ressaltar que os dados de movimento coletados em alta frequência são exclusivamente armazenados no *datalogger* e processados internamente, não estando disponíveis para análise no momento, devido à continuidade da operação da boia no mar até a presente data. Assim, este estudo concentrou-se estritamente nos dados resultantes do processamento espectral, que foram transmitidos via satélite. A partir deste ponto, esses dados horários serão referidos como séries brutas de parâmetros de onda.

2.4. Análise Estatística

A similaridade e ajuste entres os dados proveniente de ambos os sistemas foram quantificados através de quatro métricas estatísticas: RMSE, MAE, correlação de *Pearson* e dispersão. Tanto as séries brutas quanto as séries filtradas dos parâmetros de onda foram consideradas no cálculo dessas métricas

2.5. Dispersão

O gráfico de dispersão foi usado para investigar a existência de uma possível



relação entre os dados, avaliando se os valores convergem para um modelo linear. Nesse procedimento, é buscado um ajuste que minimize a variância dos pontos em relação a uma reta. O coeficiente de ajuste indica se o modelo de regressão linear se ajusta aos dados avaliados. Um valor próximo de 1 indica que os valores dos dados estão mais correlacionados (Thomson & Emery, 2014).

2.6. Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)

O RMSE é uma medida estatística que calcula o erro médio de um modelo preditivo em relação aos dados observados. Embora considere erros de diferentes magnitudes, o RMSE pode ser influenciado de forma desproporcional por erros maiores. No presente estudo, foi usado para avaliar as diferenças entre os valores obtidos pelos diferentes sensores (FEENSTRA *et al.*, 2019). O RMSE é definido como:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_j^2}$$

Onde:

e_j^2 representa o quadrado do erro entre as medições (dado_{SBG} - dado_{G2}).

n representa o número total de amostragens

j representa a indexação temporal dos dados

2.7. Erro médio absoluto (MAE)

O MAE é uma medida de erro amplamente utilizada para avaliar a precisão

de um modelo. Ele é calculado como a média dos valores absolutos das diferenças entre as previsões do modelo e os valores reais observados. O MAE mede a magnitude média dos erros em um conjunto de previsões, sem considerar se as previsões estão subestimando ou superestimando os valores reais. Um valor menor de MAE indica que o modelo tem uma melhor precisão em suas previsões.

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |e_j|$$

Onde:

$|e_j|$ representa o módulo do erro entre as medições (dado_{SBG} - dado_{G2}).

n representa o número total de amostragens.

j representa a indexação temporal dos dados.

2.8. Correlação de Pearson

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 forte correlação. Já mais próximo de zero, indica correlação fraca. A equação para o coeficiente de correlação é:

$$\text{Correl}(X, Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}$$

Onde: \bar{x} e \bar{y} são as médias da amostra média (G2) e média (SBG)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados do ondógrafo SBG foram comparados com os dados obtidos pelo G2. As séries temporais brutas passaram por um controle de qualidade inicial, no qual foram excluídos todos os dados com *flags* indesejadas. A tabela 1 apresenta os registros válidos (*flag* 0) e os dados descartados. Os resultados mostraram uma performance geral superior do ondógrafo G2, com mais de 98% das amostras válidas em relação ao total. Por outro lado, o SBG teve 93,6% de dados válidos para o parâmetro com menor disponibilidade (período) e 97,9% de amostragens válidas para o parâmetro de maior disponibilidade (altura). Para esta série damos o nome de série bruta.

Além desta série bruta foram conduzidas análises sobre séries filtradas, neste processo ocorreu a exclusão de todo dado cuja magnitude é superior à média multiplicada por 2 desvios padrão ou de

magnitude inferior à média multiplicada por menos 2 desvios padrão. Este processo acabou invalidando dados de eventos extremos (passagem de frentes frias) contudo mantém-se coerência com o objetivo principal do trabalho, de comparação entre as séries obtidas.

3.1. Análise das séries brutas e filtradas

Em uma primeira abordagem foram analisadas as séries temporais, brutas e filtradas, para Altura, Período e Direção, assim como o erro entre as respectivas medições ao longo do tempo (Figuras 3 a 5), fornecendo um bom panorama a respeito do comportamento geral do sensor, para cada um dos parâmetros amostrados. Também foram tomadas as estatísticas básicas dos parâmetros amostrados por cada sensor, levando em consideração tanto os dados brutos (Tabela 2) quanto os dados filtrados (Tabela 3).

Tabela 1 – Porcentagens de dados válidos e inválidos, para cada parâmetro amostrado (“H” para altura, “T” para período e “Dir” para Direção Média) e respectivo sensor. *Flag* 0: dados considerados válidos; *Flag* 1: “missing values”; *Flag* 2: valores fora dos limites de medição dos sensores; *Flag* 6: valores duplicados; *Flag* 8: verificação de consistência temporal dos dados; *Flag* 9: valores fora dos limites climatológicos. Número total (N) de amostras horárias: 2608

	G2 (H)	SBG (H)	G2 (T)	SBG (T)	G2 (Dir)	SBG (Dir)
Flag 0 (%)	98,95	97,89	98,00	93,60	99,53	94,00
Flag 1 (%)	0,22	0,98	0,22	-	0,22	-
Flag 2 (%)	0,36	1,02	0,07	5,02	-	-
Flag 6 (%)	0,25	0,07	1,38	1,38	0,25	0,15
Flag 8 (%)	0,15	-	-	-	-	-
Flag 9 (%)	0,07	0,04	0,33	-	-	-



3.1.1. Altura de onda

Comparando os resultados obtidos para Altura, houve uma boa convergência entre os resultados do sensor de referência e o ondógrafo SBG. Nos painéis do lado esquerdo da figura temos as séries temporais dos dados de altura de onda dos dois sensores, sendo o painel superior correspondendo

direito). Observando as séries brutas podemos visualizar que ambos os sensores apresentaram dados duvidosos que fogem da tendência da curva. As estatísticas referentes às séries de ambos os ondógrafos estão listados na Tabela 2 e 3 (brutos e filtrados respectivamente). Com base na tabela é possível afirmar que de maneira geral o SBG subestima os valores das maiores

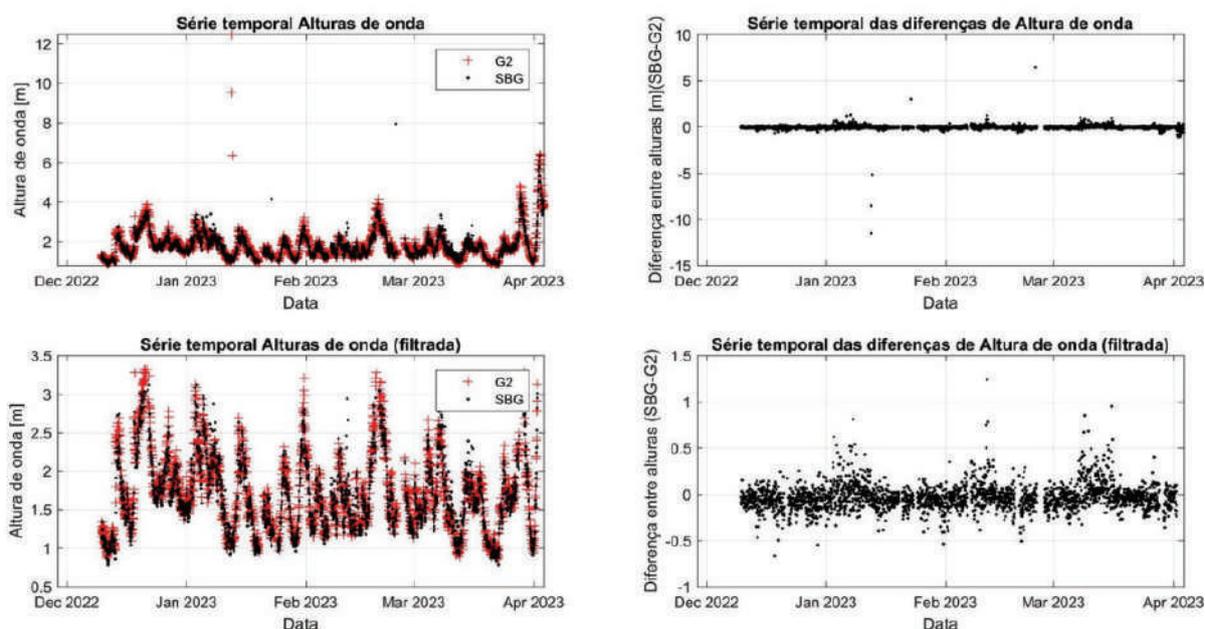


Figura 3 – Plotagem das séries temporais brutas, painéis superiores, e filtradas, painéis inferiores. Painel superior esquerdo série temporal com os dados de Altura de onda de ambos os sensores, Painel superior direito série temporal do erro associado às medições. Painel inferior esquerdo série temporal dos dados de altura filtrados, Painel inferior direito série temporal do erro associado às medições, filtrados

aos dados brutos e o painel inferior com os dados filtrados. Observa-se uma tendência entre as duas séries com um pequeno *offset* entre uma e outra. Os painéis do lado direito da figura representam o erro entre medições, ou seja, a diferença entre os valores medidos entre um sensor e outro, tanto para os dados brutos (superior direito) quanto para os dados filtrados (inferior

alturas de onda registradas. Em relação ao erro associado observamos um bom comportamento em torno do “zero” com pequenas oscilações positivas e negativas. Após a filtragem os limites superiores e inferiores (máximos e mínimos) foram ajustados dentro de um intervalo de confiança de 95%, sendo que as maiores magnitudes foram as mais afetadas pelo método.

3.1.2. Período de onda

As comparações entre os dados de Período de onda não foram tão satisfatórias, quanto o desempenho obtido para as Alturas de onda. A Figura 4 evidencia um desvio maior entre as curvas de ambas as séries e uma quantidade maior de pontos deslocados da curva de tendência, com atenção especial para as amostragens do G2, que nesse caso, apresentou elevado número de pontos dispersos e Período máximo de 28,6 s, na série filtrada este máximo e outros valores destoantes foram invalidados, o Período máximo contabilizado caiu substancialmente ao passo que o mínimo sofreu menor influência do método de filtragem. Nesse caso, de maneira geral, o SBG subestimou os valores, sobretudo dos maiores Períodos de onda. O erro assume uma forte tendência em

torno do zero com oscilações negativas e positivas mais expressivas.

3.1.3. Direção média de onda

A análise de direção exigiu uma filtragem mais rigorosa, tendo em vista que amostragens no limite inferior (próximas a zero graus) e no limite superior (próximas a 360 graus) podem conduzir a erros irreais nas análises estatísticas, foi estabelecido um intervalo de confiança de 20° a 340°, sob o qual foram feitas as análises das séries filtradas e posteriores análises de incerteza. Os piores resultados obtidos envolveram os dados de direção das ondas. A série amostrada pelo SBG apresenta aparência ruidosa e desvios largos comparados aos dados do G2, o mesmo comportamento é observado nas séries do erro entre medições.

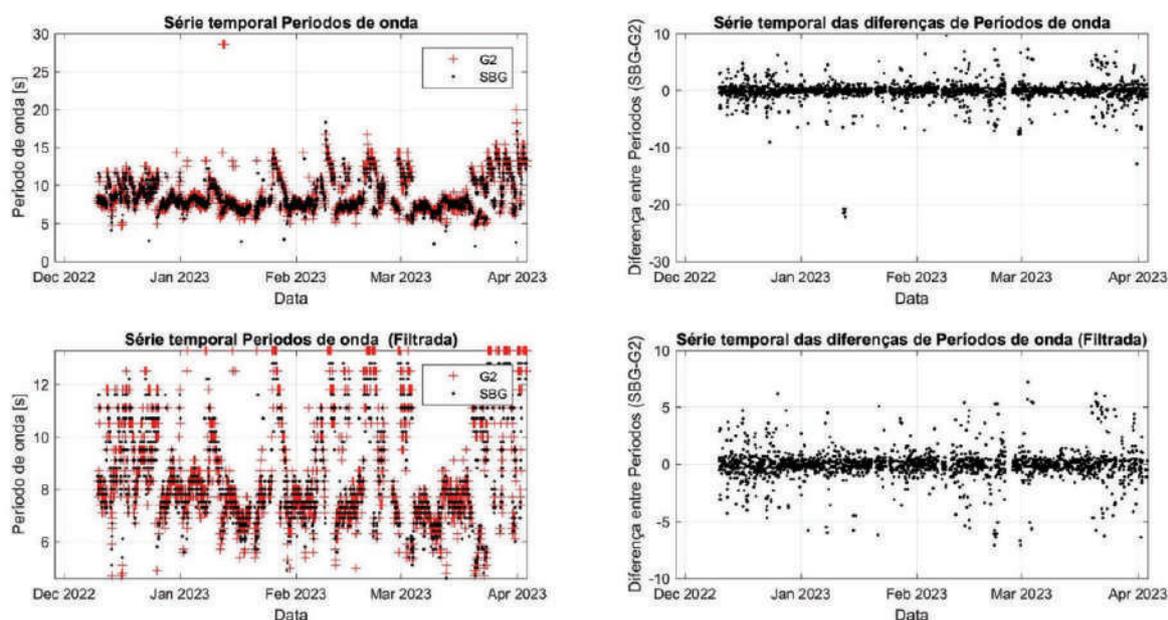


Figura 4 – Plotagem das séries temporais brutas, painéis superiores, e filtradas, painéis inferiores. Painel superior esquerdo série temporal com os dados de Período de onda de ambos os sensores, Painel superior direito série temporal do erro associado às medições. Painel inferior esquerdo série temporal dos dados de Período filtrados, Painel inferior direito série temporal do erro associado às medições, filtrados

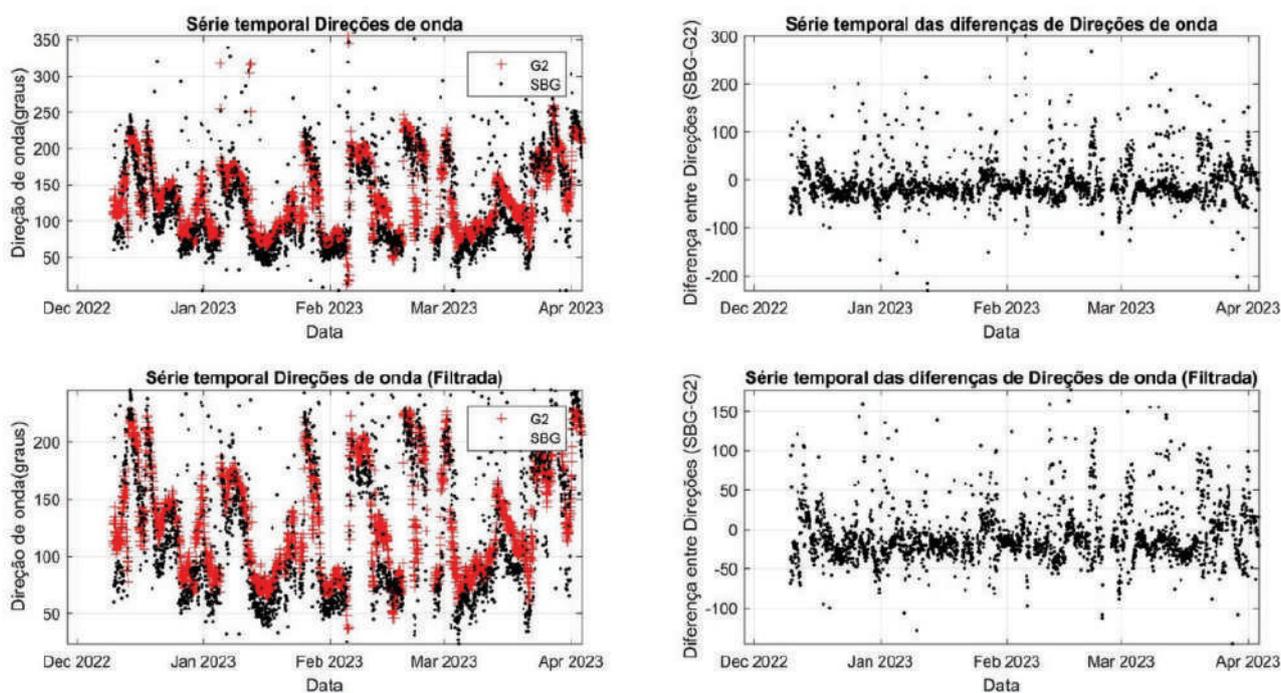


Figura 5 – Plotagem das séries temporais brutas, painéis superiores, e filtradas, painéis inferiores. Painel superior esquerdo série temporal com os dados de Direção de onda de ambos os sensores, Painel superior direito série temporal do erro associado às medições. Painel inferior esquerdo série temporal dos dados de Direção filtrados, Painel inferior direito série temporal do erro associado às medições, filtrados

Tabela 2 – Estatísticas básicas individuais de cada sensor e do erro entre eles, para cada parâmetro dos dados brutos

	Máx	Mín	Média	Desvio Padrão
G2 (H)	12,48m	0,86m	1,8187m	0,753m
SBG (H)	7,95m	0,78m	1,7719m	0,6768m
Erro (H)	6,43m	-11,48m	-0,0464m	0,3694m
G2 (T)	28,6s	4,7s	8,9157s	2,5132s
SBG (T)	18,3s	2s	8,8211s	2,1914s
Erro (T)	9,6s	-22,2s	-0,1508s	1,8101s
G2 (Dir)	355°	12°	130,2273°	49,3522°
SBG (Dir)	351°	4°	122,8675°	61,8395°
Erro (Dir)	300°	-231°	-7,2365°	41,3189°

Tabela 3 – Estatísticas básicas individuais de cada sensor e do erro entre eles, para cada parâmetro dos dados filtrados

	Máx	Mín	Média	Desvio Padrão
G2 Filt (H)	3,32m	0,86m	1,7097m	0,4938m
SBG Filt (H)	3,12m	0,78m	1,6677m	0,4746m
Erro Filt (H)	1,24m	-0,67m	-0,0333m	0,1391m
G2 Filt (T)	13,3s	4,7s	8,6092s	1,9985s
SBG Filt (T)	12,8s	4,6s	8,5438s	1,8038s
Erro Filt (T)	7,2s	-7,1s	-0,0496s	1,3249s
G2 Filt (Dir)	228°	36°	128,6440°	46,8078°
SBG Filt (Dir)	246°	23°	119,7270°	57,3735°
Erro Filt (Dir)	177°	-146°	-9,3672°	34,0095°

3.1.4. Histogramas direcionais

Para melhor compreensão e visualização dos resultados obtidos foram criados histogramas direcionais para Altura e Período de cada sensor (Figura 5) os histogramas ilustram apenas os dados com

frequência relativa (porcentagem sobre o total) significativa. Posteriormente estes resultados foram transformados em tabelas, nas quais, descrições mais detalhadas sobre estes resultados podem ser encontradas, estas tabelas estão no item 7 (Apêndice) deste trabalho.

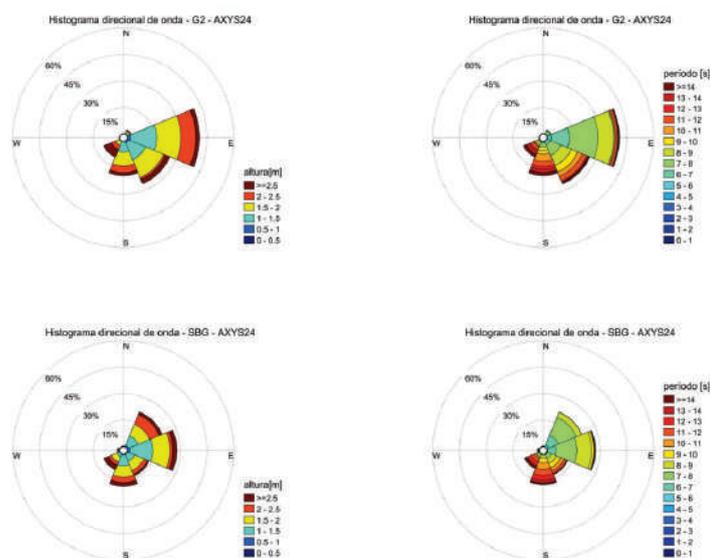


Figura 6 – Histogramas direcionais para Altura e Período. Painéis superiores dados do ondógrafo G2. Painéis inferiores, dados SBG



Assumindo os dados ondógrafo G2 como a representação da verdade de campo, pode-se aferir que o SBG começa a subestimar as amostras de classes de onda com maiores alturas e superestima a ocorrência de ondas com altura inferior a 0,5m. Em relação ao Período, o SBG se mostrou menos eficiente em amostrar períodos superiores a 13 segundos, além de ter registrado ondas com Períodos inferiores a 4 segundos que não foram expressivas na série do G2. A situação mais crítica ocorre com os dados de direção. O SBG superestimou em mais de 20% a ocorrência de ondas de NE e registrou cerca de 10% menos que o G2 para ondas do quadrante S e SE.

enfatizando apenas determinado aspecto das características do erro, sendo assim uma combinação de métricas são, geralmente necessárias, para acessar a performance das medições.

De acordo com as comparações do erro médio quadrático para os três parâmetros em análise, a métrica mostrou erros satisfatórios para as Alturas, tanto nas séries brutas como nas filtradas, contudo, as séries de dados filtrados apresentam melhor performance.

Apesar de o método ter apresentado um valor absoluto baixo para o Período (RMSE bruto = 1,816 e RMSE filtrado =

Tabela 4 – Resultado das métricas de comparação entre os dados dos dois sensores, para cada parâmetro analisado, séries brutas e séries

	RMSE	MAE	Corr. Pearson
Altura (m)	0,3772	0,1268	0,8716
Período (s)	1,8159	0,8631	0,7160
Direção (°)	41,9395	29,7835	0,7459
Altura Filtrada (m)	0,1430	0,1026	0,9576
Período Filtrado (s)	1,3256	0,7470	0,7495
Direção Filtrada (°)	35,2690	27,2972	0,8022

3.2. Análises estatísticas e incertezas

Para determinar o erro, três métricas estatísticas foram empregadas, a saber: RMSE, MAE e Correlação de *Pearson*. Os resultados obtidos para cada uma das métricas estão listados na Tabela 4. O emprego de uma única métrica fornece apenas uma projeção dos erros da amostra,

1,32), o erro é significativo pois, quando comparado à média, observamos que 1,8s de erro corresponde a cerca de 20% da magnitude da média dos Períodos.

Assim como o RMSE, o MAE é um método amplamente utilizado na quantificação de erro de modelos, porém o MAE tende a apresentar erros menores que o RMSE, pois seus cálculos fornecem o

mesmo peso aos erros (Chai & Draxler, 2014). O RMSE tende a se tornar maior que o MAE à medida que a magnitude dos erros se torna mais variável (Willmott & Matsuura, 2005). De acordo com Chai & Draxler (2014), o RMSE é uma métrica mais adequada quando o erro tem distribuição normal.

Dessa maneira, a razão RMSE/MAE, indiretamente, expressa a proporção de *outliers* nas análises, sendo a maior a quantidade de *outliers* quanto menor for a razão RMSE/MAE. Assim, pode-se concluir que os dados de altura e direção média de ondas são os que contêm, respectivamente, maior e menor número de dados espúrios.

O coeficiente de correlação de *Pearson* indica a relação com que as métricas variam. Nesse indicador, é possível verificar que, mesmo o período e a direção das ondas apresentando flutuações consideráveis em relação ao ondógrafo padrão, as variações temporais são, na maioria das vezes, no mesmo sentido.

3.2.1. Dispersão

Analisando os gráficos de dispersão para Alturas, temos uma distribuição bem homogênea em torno da reta de tendência, resultando em um coeficiente angular de 0,96853 e *offset* de 0,10224, indicando boa convergência dos resultados. Após a filtragem, no painel esquerdo, o valor de *offset* cai cerca de 24%.

Para Período de onda, a análise de regressão linear apresentou coeficiente angular (p1) de 0,83 e um *offset* de 1.7 (p2) para os dados brutos. Com a filtragem, observamos uma redução no coeficiente angular, indicando possível inadequabilidade do método, pois possíveis valores válidos podem ter sido considerados *outliers* durante a aplicação do filtro.

Para os valores de direção, o gráfico de dispersão apresentou coeficiente de reta p1 igual a 0,5955 e um *offset* de 57° indicando fraca correlação entre as séries. Após a filtragem (figura 9, painel direito) o cenário melhora mas continua insatisfatório.

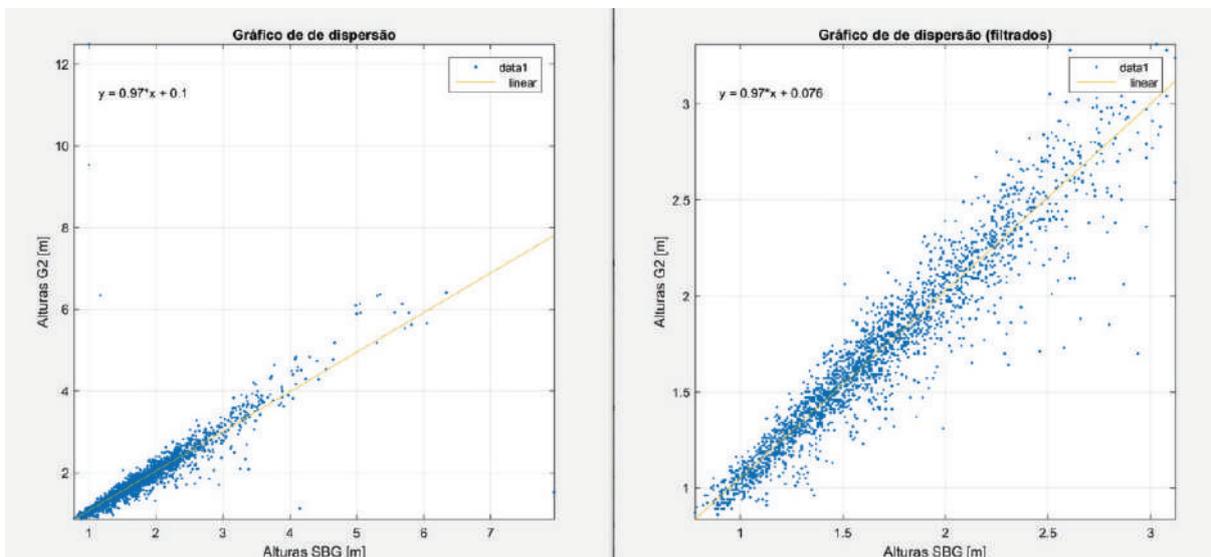


Figura 7 – Gráficos de dispersão para dados de Altura de onda brutos (esquerda) e filtrados (direita). Canto superior equação da reta de tendência e seus respectivos parâmetros

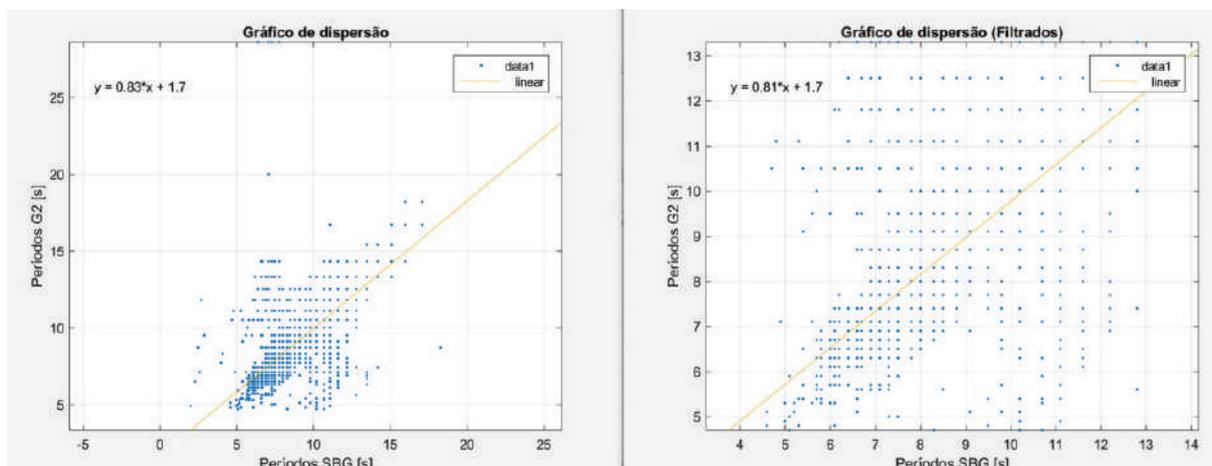


Figura 8 – Gráficos de dispersão para dados de Período de onda brutos (esquerda) e filtrados (direita). Canto superior equação da reta de tendência e seus respectivos parâmetros

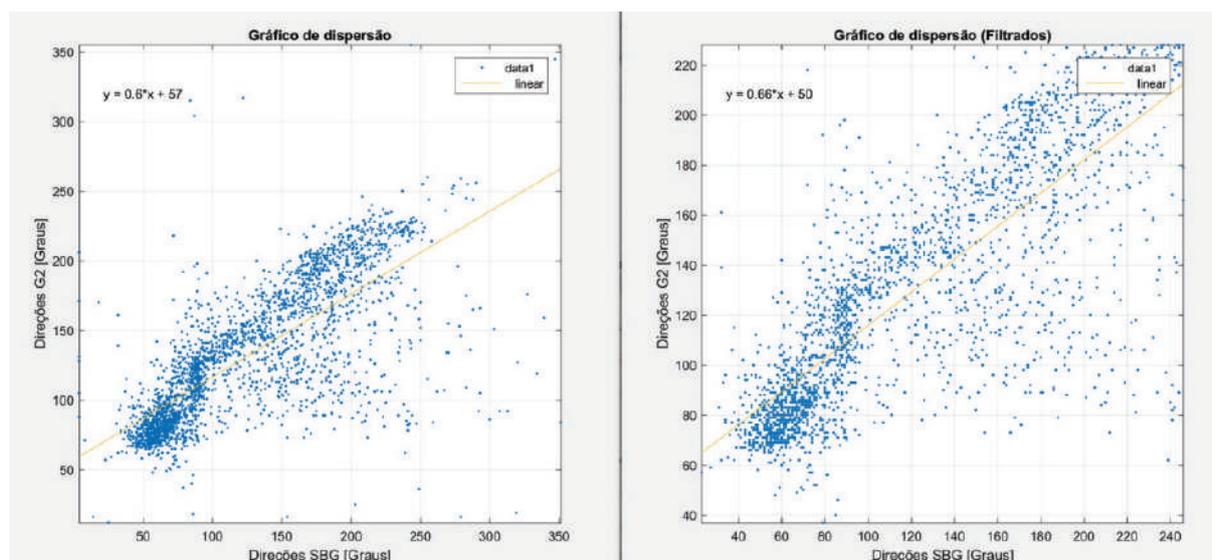


Figura 9 – Gráficos de dispersão para dados de Direção média de onda. Painel esquerdo: Dados brutos. Painel direito: Dados filtrados. Nos cantos superiores de cada painel equação da reta de tendência e seus respectivos parâmetros

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O resultado das filtrações indica que a distribuição de probabilidades das variáveis apresenta assimetria de natureza leptocúrtica. É importante ressaltar que o método de filtração afeta mais os extremos superiores do que os inferiores.

De maneira geral, a maior parte dos erros concentra-se nos extremos, tanto para período quanto para altura. Os valores mais baixos e mais altos apresentam fraca correlação entre os registros de cada sensor.

Ao comparar os valores de RMSE e MAE, observa-se que o SBG apresenta erros elevados para Período e direção média das ondas. As métricas estatísticas

utilizadas, sobretudo do RMSE, diminuem quando as séries temporais são filtradas.

Embora a correlação de *Pearson* indique variações no mesmo sentido, ao realizar a regressão linear, constata-se que o grau de dispersão dos dados de direção das ondas é muito elevado, ficando bastante abaixo do esperado em comparação com os dados de Período e, sobretudo, Altura.

Dessa forma, conclui-se que os dados de altura são satisfatórios, enquanto o período e a direção das ondas são considerados, respectivamente, aceitáveis e insatisfatórios.

As possíveis causas para a grande diferença na comparação dos dados de direção das ondas são: interferência magnética, falta de calibração da bússola, impropriedades no algoritmo de conversão dos dados, ajustes na banda do filtro de Kalman e o método de discretização dos parâmetros.

Por fim, é importante ressaltar que este trabalho não esgota o assunto

e que mais investigações devem ser realizadas com o objetivo de identificar a causa das distorções encontradas, visando o aperfeiçoamento da qualidade dos dados adquiridos pelas plataformas do PNBOIA/REMOBs.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS) e pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), com investimentos de recursos oriundos das cláusulas de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P,D&I) autorizadas pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), por meio dos Termos de Cooperação nº 2019/0206-1 e nº 2019/0207-8, como parte do Projeto REMO. Os autores agradecem ao Comandante do NOc Antares e à sua tripulação pela dedicação e esforço no bem-sucedido lançamento da boia AX24.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRANDON FEENSTRA, *et al*, *Performance evaluation of twelve low-cost PM2.5 sensors at an ambient air monitoring site*, *Atmospheric Environment*, Volume 216, 2019.

CHAI, T., & DRAXLER, R. R. *Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE) - Arguments against avoiding RMSE in the literature*. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>.

LIMA, JOSE ANTONIO MOREIRA *et al*. *design and implementation of the oceanographic modeling and observation network (remo) for operational oceanography and ocean forecasting*. *Brazilian Journal of Geophysics*, [S.l.], v. 31, n. 2, p. 210 - 228, june 2013. ISS N2764-8044. Available at: <<https://SBGf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/290>>. Date accessed: 27 apr. 2023. doi:<http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v31i2.290>.



MACISAAC, C., & NAETH, S. TRIAXYS Next Wave II Directional Wave Sensor the evolution of wave measurements. OCEANS 2013 MTS/IEEE - San Diego: An Ocean in Common. SBG SYSTEMS. Ellipse Series. Datasheet, 1–9. Recuperado de http://www.SBG-systems.com/docs/Ellipse_Series_Leaflet.pdf.

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

WILLMOTT, C. AND MATSUURA, K.: Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the Root Mean Square Error (RMSE) in assessing average model performance, *Clim. Res.*, 30, 79–82, 2005. 1526, 1527, 1528, 1529.

7. APÊNDICE

Ondógrafo SBG									
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL (%)
0-0.5m	0	1,148954	1,887567	0,451375	0,697579	0,246204	0,082068	0,041034	4,55478
0.5-1.0m	0,369307	13,78744	23,79975	10,66886	13,254	5,293394	0,697579	0,246204	68,11654
1.0-1.5m	0,082068	7,919573	2,790316	3,241691	4,513746	2,544112	0,697579	0,082068	21,87115
1.5m-2.0m	0,041034	0,123102	1,395158	0,164136	1,066886	1,395158	0,082068	0	4,267542
2.0-2.5m	0	0	0	0	0,082068	0,574477	0,041034	0	0,697579
2.5-3.0m	0	0	0	0	0	0,369307	0	0	0,369307
3.0-3.5m	0	0	0	0	0	0,082068	0	0	0,082068
3.5-4.0m	0	0	0,041034	0	0	0	0	0	0,041034
TOTAL (%)	0,492409	22,97907	29,91383	14,52606	19,61428	10,50472	1,600328	0,369307	100

Ondógrafo G2									
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL (%)
0-0.5m	0	0,038447	2,153018	1,153403	0,153787	0	0	0	3,498654
0.5-1.0m	0,307574	1,883891	28,25836	21,26105	13,76394	2,806613	0	0	68,28143
1.0-1.5m	0	0,884275	10,1115	2,268358	5,151865	3,652441	0,384468	0,038447	22,49135
1.5m-2.0m	0	0	0,269127	1,499423	0,230681	2,114571	0	0	4,113802
2.0-2.5m	0	0	0	0	0,192234	0,730488	0	0	0,922722
2.5-3.0m	0	0	0	0	0	0,346021	0	0	0,346021
3.0-3.5m	0	0	0,038447	0	0	0,230681	0	0	0,269127
3.5-4.0m	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.0-4.5m	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5-5.0m	0	0	0	0	0	0	0,038447	0	0,038447
5.0-5.5m	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5-6.0m	0	0	0	0	0	0	0	0,038447	0,038447
TOTAL (%)	0,307574	2,806613	40,83045	26,18224	19,4925	9,880815	0,422914	0,076894	100



Ondógrafo SBG									
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL (%)
2-3s		0	0	0,085911	0,085911	0	0	0	0,171821
3-4s		0	0	0	0	0	0	0	0
4-5s		0	0,085911	0,128866	0,042955	0	0,042955	0	0,300687
5-6s		0	1,37457	0,300687	0,257732	0	0,085911	0	2,0189
6-7s	0,128866	6,572165	5,24055	0,472509	0,128866	0,171821	0,171821	0,042955	12,92955
7-8s	0,085911	12,28522	13,2732	2,534364	0,730241	0,816151	0,386598	0,042955	30,15464
8-9s	0,042955	3,565292	9,106529	3,30756	1,975945	1,245704	0,214777	0	19,45876
9-10s	0	0	1,589347	2,963918	2,835052	0,515464	0,214777	0	8,118557
10-11s	0,085911	0,085911	0,515464	2,233677	4,166667	1,073883	0,042955	0,042955	8,247423
11-12s	0,128866		0	0,257732	1,632302	3,694158	1,804124	0,085911	7,603093
12-13s	0	0	0,042955	0,601375	3,221649	2,534364	0,128866	0	6,52921
13-14s	0	0	0,042955	0,128866	1,675258	0,902062	0,128866	0,042955	2,920962
14-15s	0	0	0	0	0,773196	0,730241	0,042955	0	1,546392
TOTAL (%)	0,472509	23,96907	30,58419	14,26117	19,20103	9,92268	1,417526	0,171821	100

Ondógrafo G2									
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL (%)
4-5s		0	0	0,389257	0,077851	0,038926	0,038926	0	0,544959
5-6s	0,038926	0,038926	2,218762	0,155703	0,467108	0,038926		0	2,95835
6-7s	0,194628	0,661736	10,1596	2,101985	0,311405	0,233554	0,077851	0	13,74076
7-8s	0,038926	1,712729	16,30985	6,578435	2,296613	0,661736	0,155703	0	27,75399
8-9s	0,038926	0,389257	8,991826	6,344881	2,374465	1,401323	0,077851	0,038926	19,65745
9-10s	0	0	0,544959	4,009342	1,907357	0,89529	0,038926	0	7,395874
10-11s	0	0,038926	0,62281	2,724796	4,281822	0,467108	0,038926	0	8,174387
11-12s	0	0	1,206695	2,763721	2,802647	1,634877	0	0	8,407941
12-13s	0	0	0,467108	0,700662	1,595952	1,050993	0	0	3,814714
13-14s	0	0	0,27248	0,350331	1,907357	1,907357	0	0	4,437524
14-15s	0	0	0,116777	0,467108	1,206695	1,323472	0	0	3,114052
TOTAL (%)	0,311405	2,841573	41,30012	26,27482	19,19035	9,653562	0,389257	0,038926	100

Ondógrafo SBG												
	4-5s	5-6s	6-7s	7-8s	8-9s	9-10s	10-11s	11-12s	12-13s	13-14s	14-15s	TOTAL (%)
0-0.5m	0,041	0,410004	0,533005	1,312013	1,02501	0,246002	0,738007	0,328003	0	0	0	4,633046
0.5-1.0m	0,246002	1,517015	10,94711	21,44321	11,64412	5,494055	5,945059	5,781058	3,690037	1,107011	0,615006	68,42968
1.0-1.5m	0	0	1,599016	7,298073	6,724067	1,148011	1,271013	0,861009	1,599016	1,066011	0,205002	21,77122
1.5m-2.0m	0	0	0	0,164002	0,369004	1,107011	0,246002	0,533005	1,107011	0,410004	0,164002	4,100041
2.0-2.5m	0	0	0	0	0,041	0	0,041	0	0,123001	0,287003	0,246002	0,738007
2.5-3.0m	0	0	0	0	0	0	0	0	0,041	0,041	0,205002	0,287003
3.0-3.5m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,041	0,041
TOTAL (%)	0,287003	1,927019	13,07913	30,2173	19,8032	7,99508	8,241082	7,503075	6,560066	2,911029	1,476015	100

Ondógrafo G2												
	4-5s	5-6s	6-7s	7-8s	8-9s	9-10s	10-11s	11-12s	12-13s	13-14s	14-15s	TOTAL (%)
0-0.5m	0,155703	0,350331	0,467108	0,89529	0,62281	0,077851	0,62281	0,155703	0,038926	0	0	3,386532
0.5-1.0m	0,389257	2,608019	11,40522	19,69638	11,87232	5,021409	5,799922	6,811989	2,06306	1,595952	1,284547	68,54807
1.0-1.5m	0	0	1,868431	7,006617	6,461658	1,362398	1,440249	0,856364	1,050993	1,595952	1,089918	22,73258
1.5m-2.0m	0	0	0	0,155703	0,700662	0,934216	0,311405	0,428182	0,467108	0,817439	0,311405	4,126119
2.0-2.5m	0	0	0	0	0	0	0	0,116777	0,155703	0,350331	0,194628	0,817439
2.5-3.0m	0	0	0	0	0	0	0	0,038926	0,038926	0,038926	0,116777	0,233554
3.0-3.5m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,038926	0,116777	0,155703
TOTAL (%)	0,544959	2,95835	13,74076	27,75399	19,65745	7,395874	8,174387	8,407941	3,814714	4,437524	3,114052	100