



AVALIAÇÃO E EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÕES OCEANOGRÁFICAS EM BOIAS

Igor Afonso Fragoso

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientadores: Nelson Violante de Carvalho

Carlos Eduardo Parente
Ribeiro

Rio de Janeiro
Novembro de 2018

AVALIAÇÃO E EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÕES OCEANOGRÁFICAS
EM BOIAS

Igor Afonso Fragoso

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro, D. Sc.

Prof. Fabio Nascimento de Carvalho, D. Sc.

Prof. Marcos Nicolas Gallo, D. Sc.

Prof. Andre Luiz Belem, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
NOVEMBRO DE 2018

Fragoso, Igor Afonso

Avaliação e Expressão da Incerteza de Medições Oceanográficas em Boias / Igor Afonso Fragoso – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XVI, 97 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Nelson Violante de Carvalho

Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 83-87.

1. Incerteza. 2. BMO. 3. Medição. I. Carvalho, Nelson Violante de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

*Medir com paquímetro, marcar com giz e cortar com machado.
(anedotário popular – autor desconhecido)*

DEDICATÓRIA

À minha esposa, Vera, pelo seu amor incondicional, que me sustentou e incentivou em todos os momentos dessa inesperada e difícil empreitada.

À meus pais Scylla e Albertina (in memoriam), pelos inesgotáveis exemplos de amor e amizade.

AGRADECIMENTOS

À Deus, inteligência suprema, causa primária de todas as coisas¹.

Aos meus orientadores Carlos Eduardo Parente Ribeiro e Nelson Violante de Carvalho e muito especialmente ao Eng^o Fábio Nascimento de Carvalho, pela oportunidade, inesgotável paciência, incentivo e confiança em mim depositados, para que este trabalho fosse realizado com qualidade.

Aos membros da banca examinadora, pela atenção e disposição na análise deste trabalho e à CAPES, pelo suporte financeiro.

Aos colegas do LIOc, em particular Luiz Felipe, Henrique e Marlon pela paciência e presteza em fornecer dados e informações.

Ao Inmetro, muito particularmente na pessoa do Mestre Paulo Roberto Guimarães Couto, pelo grande ser humano e profissional que é, por sua amizade, incentivo e estímulo, sem os quais este trabalho não teria sido levado a termo da forma com está elaborado.

Ao PNBOIA, REMO e Petrobras, pelos dados de medições com boias e que estão disponíveis para análises.

À minha mui querida e amada esposa Vera, por ser meu porto seguro e eterna incentivadora, sem a qual nada faria sentido.

¹ O Livro dos Espíritos, p. 1, Allan Kardec - 1857

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO E EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÕES OCEANOGRÁFICAS EM BOIAS

Igor Afonso Fragoso

Novembro/2018

Orientadores: Nelson Violante de Carvalho

Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Programa: Engenharia Oceânica

O conceito de incerteza de medição considera como resultado não um único valor, mas um intervalo onde o valor da grandeza medida estará incluído, com um grau de confiança especificado. Esta definição condiciona então que a incerteza sempre é associada a uma medição e não somente ao seu processo, ou seja, toda medição tem a sua respectiva incerteza.

O campo de aplicação da avaliação e expressão da incerteza de medição abrange todas as atividades de medição, da medição de campo ou chão de fábrica à pesquisa fundamental, estabelecendo os procedimentos para tal. O presente trabalho propõe sua aplicação em medições realizadas no ambiente marinho, com base em dados disponíveis para os usuários, seguindo as orientações constantes no Guia de Expressão da Incerteza de Medição (GUM - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement).

Como forma de exemplificação, foram avaliadas as incertezas de medições efetuadas por boias meteo-oceanográficas do PNBOIA e REMO, de vento, ondas e correntes marinhas. Essas avaliações demonstraram que as incertezas associadas aos dados das séries temporais são muito influenciadas pelos seus estimadores e que estudos sobre o assunto são fortemente recomendados.

Os resultados obtidos não contemplam todas as fontes de incerteza que poderiam impactar nas medições avaliadas, no entanto, fica evidenciado que a avaliação e expressão da incerteza das medições analisadas, tornam os resultados mais realistas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EVALUATION AND EXPRESSION OF UNCERTAINTY OF OCENOGRAPHICS MEASUREMENTS ON BUOYS

Igor Afonso Fragoso

November/2018

Advisors: Nelson Violante de Carvalho

Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Department: Ocean Engineering

The concept of measurement uncertainty considers as a result not a single value but an interval where the value of the measured quantity will be included with a specified degree of confidence. This definition then determines that uncertainty is always associated with a measurement and not only with its process, that is, every measurement has its respective uncertainty.

The field of application of measurement uncertainty measurement and expression covers all measurement activities, from field or floor measurement to fundamental research, establishing procedures for this. The present work proposes its application in measurements made in the marine environment, based on data available to users, following the guidelines in the Guide to Expression of Uncertainty in Measurement (GUM).

As an example, we evaluated the uncertainties of measurements made by PNBOIA and REMO meteo-oceanographic buoys of wind, waves and marine currents. These assessments have shown that the uncertainties associated with time series data are strongly influenced by their estimators and that studies on the subject are strongly recommended.

The results obtained do not include all the sources of uncertainty that could impact the measured measurements, however, it is evidenced that the evaluation and expression of the uncertainty of the analyzed measurements, make the results more realistic.

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	1
1.1 - Justificativa	1
1.2 - Objetivo.....	8
1.3 - Estrutura do trabalho.....	9
2 - MEDIÇÕES DE PARÂMETROS AMBIENTAIS COM EQUIPAMENTOS INSTALADOS EM BOIAS	10
2.1 - Data Buoy Cooperation Plan - DBCP	10
2.2 - PNBOIA, PIRATA, REMO E SIMCOSTA	12
2.3 - Medição de velocidade do vento	13
2.3.1 - Anemômetro de Hélice	16
2.3.2 - Anemômetro Ultrassônico.....	17
2.4 - Medição de ondas.....	21
2.5 - Medição de corrente marinha.....	29
3 - AVALIAÇÃO E EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO SEGUNDO O GUM	33
4 - ANÁLISES E RESULTADOS.....	51
4.1 - Avaliação da Incerteza de Medição de Velocidade do Vento	54
4.1.1 - Anemômetro de Hélice – velocidade do vento (conversão para a altura de referência)	54
4.1.2 - Anemômetro de Hélice – direção do vento	56
4.1.3 - Anemômetro Ultrassônico – velocidade do vento	59
4.1.4 - Anemômetro Ultrassônico – direção do vento.....	64
4.2 - Avaliação de Incerteza de Medição de Onda	66
4.2.1 - Medição de onda – altura significativa	67
4.2.2 - Medição de onda – altura máxima	69
4.2.3 - Medição de onda – período	70
4.2.4 - Medição de onda - direção	72
4.3 - Avaliação de Incerteza de Medição de Corrente Marinha	74
5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS FUTURAS	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Boias de 12m de diâmetro do NDBC.	1
Figura 2 - Gráfico representativo das variações de altura e período de uma onda.....	5
Figura 3 - Exemplo de uma medição de altura de onda para surfe.	6
Figura 4 - Ilustração da ancoragem de boias.	7
Figura 5 - Dados originais de medição de velocidade do vento da boia Cabo Frio 2, com uma casa decimal (arquivo Bcabo_frio_argos.csv).	8
Figura 6 - Dados qualificados da boia Cabo Frio 2, com nove casas decimais (arquivo cabofrio2.csv).	8
Figura 7 - Mapa de boias do DBCP e de parcerias internacionais.	11
Figura 8 - Portal da NDBC.	11
Figura 9 - Mapa de localização das boias do PNBOIA (fixas e de deriva).....	12
Figura 10 - Anemômetros da boia Cabo Frio 2	15
Figura 11 - Anemômetro de hélice R.M. Young, modelo 05106.	16
Figura 12 - Princípio de funcionamento do medidor ultrassônico por tempo de trânsito.	18
Figura 13 - Estação Vaisala WXT520 para medição de parâmetros atmosféricos.	19
Figura 14 - Ilustração dos caminhos de medição do anemômetro ultrassônico.	19
Figura 15 - Representação esquemática do espectro de ondas que ocorrem no oceano.....	21
Figura 16 - Parâmetros característicos de ondas oceânicas.	22
Figura 17 - Superposição de frentes de ondas de diferentes parâmetros.	22
Figura 18 - Graus de liberdade associados aos eixos ortogonais de um sistema de coordenadas.....	23
Figura 19 - Graus de liberdade associados aos eixos ortogonais imaginários em uma BMO.	24
Figura 20 - Ilustração de uma boia e os sistemas de coordenadas da boia e da Terra.	25
Figura 21 - Ilustração da boia com os eixos dos acelerômetros y e z definidos e os eixos equivalentes no sistema de coordenadas local.....	25
Figura 22 - Exemplo de um espectro direcional de ondas.....	27
Figura 23 - Unidade TRIAXYS Directional Wave Sensor da Axys.....	28
Figura 24 - Sensor Hippy-40 (Datawell) para medição de heave, pitch and roll.	28
Figura 25 - Ilustração de funcionamento de um perfilador acústico.....	30
Figura 26 - Representação da medição de velocidade por um perfilador acústico com transdutor.	31

Figura 27 - perfilador acústico RD Workhorse Long Ranger 75-kHz.	31
Figura 28 - Etapas que envolvem a avaliação da incerteza de medição.	35
Figura 29 - Exemplo de um Diagrama de Causa-Efeito.	39
Figura 30 - Série temporal adotada para a avaliação da incerteza de medição de velocidade do vento com anemômetro de hélice.	40
Figura 31 - Mapa de localização da boia Cabo Frio 2.	41
Figura 32 - Diagrama de Causa-Efeito para a medição de velocidade com anemômetro de hélice.	41
Figura 33 - Balanço de Incerteza Combinada para medição da velocidade do vento com anemômetro de hélice.	50
Figura 34 - Balanço de Incertezas Combinadas, comparando as incertezas expandidas em função da estimativa para δ_{rep} , para medição de velocidade do vento com anemômetro de hélice.	53
Figura 35 - Influência do heave na conversão para 10m (fonte: acervo LIOc).	55
Figura 36 - Diagrama Causa-Efeito para direção do vento com anemômetro de hélice.	57
Figura 37 - Série temporal de direção do vento medida com anemômetro de hélice. .	57
Figura 38 - Balanços de incertezas para medição da direção do vento com anemômetro de hélice.	58
Figura 39 - Mapa de localização da boia BMOBR-05.	59
Figura 40 - Série temporal de velocidade do vento medida com anemômetro ultrassônico.	60
Figura 41 - Balanço de incertezas para medição da velocidade do vento com anemômetro ultrassônico.	61
Figura 42 - Exemplo de uma BMO submetida a um tilt constante (fonte: https://www.mbari.org/unique-three-way-partnership-yields-new-ocean-monitoring-buoy/)	62
Figura 43 - Efeito do tilt na medição de velocidade com anemômetro ultrassônico.	63
Figura 44 - Série temporal de direção do vento medida com anemômetro ultrassônico.	65
Figura 45 - Balanço de incertezas para medição de direção do vento com anemômetro ultrassônico.	66
Figura 46 - Série temporal de altura de onda (h_s e $h_{m\acute{a}x}$).	67
Figura 47 - Balanços de Incertezas Combinadas para medição de altura significativa de onda.	68
Figura 48 - Balanços de Incertezas Combinadas para medição de altura máxima de onda.	70

Figura 49 - Série temporal de período de onda.....	71
Figura 50 - Balanços de Incertezas Combinadas para medição do período de onda. .	72
Figura 51 - Série temporal de direção de onda.	73
Figura 52 - Balanços de Incertezas Combinadas para medição de direção de onda. .	74
Figura 53 - Representação esquemática do vetor velocidade da corrente marinha. ...	76
Figura 54 - Série temporal de corrente marinha.....	77
Figura 55 - Balanço de incerteza para a medição com perfilador acústico.....	79
Figura 56 - Gráfico de variação de U_{v46} em função da estimativa de incerteza de fd . 79	
Figura 57 - Comparativo entre as incertezas expandidas, em função da estimativa para δ_{rep} , para o perfilador acústico.....	80
Figura 58 - Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de velocidade do vento com anemômetro de hélice.	88
Figura 59 - Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de direção do vento com anemômetro de hélice.	89
Figura 60 - Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de velocidade do vento com anemômetro ultrassônico.....	90
Figura 61 - Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de direção do vento com anemômetro ultrassônico.....	91
Figura 62 - Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de direção de onda.....	91
Figura 63 - Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de altura significativa de onda.	92
Figura 64 - Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de altura máxima de onda.	92
Figura 65 - Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de período de onda.....	93
Figura 66 - Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de corrente marinha a 46m de profundidade, com perfilador acústico.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição das estimativas das fontes de incerteza das grandezas de entrada.	44
Tabela 2 – Definição das fontes para o cálculo da incerteza de medição de velocidade com anemômetro de hélice.....	46
Tabela 3 – Incertezas Padrão associadas às fontes – velocidade do vento com anemômetro de hélice.	46
Tabela 4 – Coeficientes de Sensibilidade – vel. do vento c/ anemômetro de hélice....	47
Tabela 5 - Componentes de incertezas – velocidade do vento.	47
Tabela 6 - Definições das fontes para o cálculo da incerteza de conversão para 10m.	54
Tabela 7 - Definições das fontes para o cálculo da incerteza de conversão para 10m, considerando a média dos valores de h_s como valor estimado.....	55
Tabela 8 - Cálculos da avaliação da incerteza de medição de direção do vento com anemômetro de hélice.	57
Tabela 12 - Cálculos da avaliação da incerteza de medição de velocidade do vento com anemômetro ultrassônico.	61
Tabela 13 - Influência do tilt na medição de velocidade com anemômetro ultrassônico.	63
Tabela 14 - Cálculos da avaliação da incerteza de medição de direção do vento com anemômetro ultrassônico.....	65
Tabela 15 - Cálculos da avaliação da incerteza de medição de direção do onda.....	73
Tabela 16 - Cálculos da avaliação da incerteza de medição de onda significativa.....	68
Tabela 17 - Cálculos da avaliação da incerteza de medição de máxima altura de onda.	69
Tabela 18 - Cálculos da avaliação da incerteza de medição de período de onda.	71
Tabela 19 - Cálculos da avaliação da incerteza de medição de período de onda.	78

GLOSSÁRIO

Algarismos significativos - algarismos que têm importância na delimitação da margem de erro numa medição, garantindo quais podem ser considerados com valor correto e aquele(s) de valor(es) duvidoso(s).

Erro aleatório - Componente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível. Os erros aleatórios dum conjunto de medições repetidas formam uma distribuição que pode ser resumida por sua esperança matemática ou valor esperado, o qual é geralmente assumido como sendo zero, e por sua variância (V.I.M., item 2.19 - NOTA 2). O erro aleatório é igual à diferença entre o erro de medição e o erro sistemático (idem - NOTA 3).

Erro de medição - Diferença entre o valor medido duma grandeza e um valor de referência (V.I.M., item 2.16).

Erro sistemático - Componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível. O erro sistemático e suas causas podem ser conhecidos ou desconhecidos. Pode-se aplicar uma correção para compensar um erro sistemático conhecido (V.I.M., item 2.17 - NOTA 2). O erro sistemático é igual à diferença entre o erro de medição e o erro aleatório (idem - NOTA 3).

Exatidão de medição ou exatidão (accuracy of measurement; accuracy) - Grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro dum mensurando (V.I.M., item 2.13).

Fator de abrangência; fator de expansão - Número maior do que um pelo qual uma incerteza-padrão combinada é multiplicada para se obter uma incerteza de medição expandida. Um fator de abrangência é geralmente simbolizado por k (V.I.M., item 2.38 - NOTA).

Grandeza - Propriedade dum fenômeno, dum corpo ou duma substância, que pode ser expressa quantitativamente sob a forma dum número e duma referência (V.I.M., item 1).

GUM - *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*; Guia para Expressão da Incerteza de Medição.

Incerteza (ou incerteza de medição) - Corresponde ao parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas (V.I.M., item 2.26).

Incerteza-padrão - Incerteza de medição expressa na forma dum desvio-padrão (V.I.M., item 2.30).

Incerteza-padrão combinada - Incerteza-padrão obtida ao se utilizarem incertezas-padrão individuais associadas às grandezas de entrada num modelo de medição (V.I.M., item 2.31).

Incerteza de medição expandida - Produto duma incerteza-padrão combinada por um fator maior do que o número um. O fator depende do tipo de distribuição de probabilidade da grandeza de saída e da probabilidade de abrangência escolhida (V.I.M., item 2.35 - NOTA 1). O termo “fator” nesta definição se refere ao fator de abrangência (idem - NOTA 2).

Inmetro - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, é uma autarquia federal, vinculada ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, que atua como Secretaria Executiva do Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Conmetro), colegiado interministerial, que é o órgão normativo do Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Sinmetro)², assegurando rastreabilidade dos padrões nacionais aos padrões do BIPM.

Medição - Processo de obtenção experimental dum ou mais valores que podem ser, razoavelmente, atribuídos a uma grandeza. A medição pressupõe uma descrição da grandeza que seja compatível com o uso pretendido dum resultado de medição, segundo um procedimento de medição e com um sistema de medição calibrado que opera de acordo com o procedimento de medição especificado, incluindo as condições de medição (V.I.M., item 2.1 - NOTA 3).

² <http://www.inmetro.gov.br/inmetro/oque.asp>

Mensurando - Grandeza que se pretende medir (V.I.M., item 2.3).

Precisão de medição ou precisão - Grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas. A precisão de medição é geralmente expressa numericamente por características como o desvio-padrão, a variância ou o coeficiente de variação, sob condições especificadas de medição (V.I.M., item 2.15 – NOTA 1). O termo “precisão de medição” é algumas vezes utilizado, erroneamente, para designar a exatidão de medição (idem – NOTA 4) .

Resultado de medição - Conjunto de valores atribuídos a um mensurando, juntamente com toda outra informação pertinente disponível. Um resultado de medição é geralmente expresso por um único valor medido e uma incerteza de medição. Caso a incerteza de medição seja considerada desprezável para alguma finalidade, o resultado de medição pode ser expresso como um único valor medido. Em muitos domínios, esta é a maneira mais comum de expressar um resultado de medição (V.I.M., item 2.9 - NOTA 2).

Resolução - Menor variação da grandeza medida que causa uma variação perceptível na indicação correspondente (V.I.M., item 2.44).

Tendência de medição; erro de justeza (measurement bias; bias) - Estimativa dum erro sistemático (V.I.M., item 2.18).

V.I.M. - Vocabulário Internacional de Metrologia.

1- INTRODUÇÃO

1.1 – Justificativa

O conceito de incerteza, como uma maneira de qualificar o resultado de uma dada medição, é considerado relativamente novo, muito embora seja consenso que a avaliação e a expressão da incerteza de uma medição, seguindo orientações de âmbito mundial, seja melhor compreendido e comparado, desde que o método utilizado seja de conhecimento e de aplicação geral. Dessa forma, medições realizadas em diferentes locais podem ser avaliadas e comparadas entre si³.

Medições no ambiente marinho sempre oferecem dificuldades, quer seja pela logística necessária e consequentes custos envolvidos, no planejamento dessas medições, na qualificação/treinamento do pessoal técnico, quer seja pelas características inerentes ao próprio ambiente⁴, como ilustrado na Figura 1.



Figura 1 - Boias de 12m de diâmetro do NDBC.

Os dados coletados nessas medições serão o ponto de partida para desenvolvimentos, análises e processamento e modelagens numéricas, que poderão vir a ser adotados nas várias áreas do conhecimento, no âmbito da engenharia naval,

³ GUM – Terceira Edição Brasileira - INMETRO, 2003.

⁴ <http://www.ndbc.noaa.gov/images/buoys/12m1.jpg>

oceânica e costeira, oceanografia, meteorologia, biologia dentre outros. Sendo assim, estes dados devem retratar o melhor possível a realidade medida e o seu tratamento deve contemplar a determinação e aplicação das correções que se fizerem necessárias. Com isso, sob o ponto de vista metrológico, tanto mais realistas serão os resultados apresentados, quanto mais cuidados sejam dispensados no tratamento dos dados que lhes sirvam de gênese.

Em trabalhos acadêmicos voltados para as áreas de Engenharia Oceânica e Costeira e Oceanografia, via de regra, são necessárias medições em campo para obtenção dos dados imprescindíveis ao seu desenvolvimento e as medições de ventos, ondas e correntes marinhas, não deveriam se limitar simplesmente à estrita observância das orientações dos fabricantes, quanto ao correto manuseio, instalação e configuração dos equipamentos. Em verdade, deseja-se obter um dado que, julga-se, seja minimamente representativo do fenômeno sob observação. Entretanto, diferentemente de uma “medição estática”, onde os fenômenos envolvidos sejam conhecidos e comparáveis com outras medições existentes, no mar não há como saber-se qual serão as amplitudes das variações das grandezas, confiando-se unicamente nos dados coletados pelos equipamentos. Aqui, então, o conceito de incerteza de medição ganha ainda mais importância. O objetivo não é uma forma de questionar o desempenho dos equipamentos envolvidos nos processos de medição, visto que seu emprego está mais do que consolidado pela comunidade internacional. A proposta é avaliar a qualidade do resultado da medição realizada, que é função não só do equipamento em si, mas de sua correta calibração e configuração, da estrutura e processos necessários a medição e das características peculiares do meio ambiente no qual serão aplicados.

Historicamente, em 1978, o Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) entendendo que não havia uniformização na expressão da incerteza de medição, delegou ao Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), a tarefa de elaborar um parecer sobre o assunto. O BIPM concluiu que havia a necessidade de se chegar a um consenso sobre um procedimento único para a expressão da incerteza de medição, que fosse aceito e implementado internacionalmente. Foi criado um grupo de trabalho, que elaborou em 1980 a Recomendação INC-1, intitulada “Expressão de Incertezas Experimentais”. Essa recomendação foi aprovada em 1981 e ratificada em 1986, sendo conferida à Organização Internacional de Normalização (ISO), a responsabilidade de desenvolver um guia detalhado.

Surge então o GUM - *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (Guia para Expressão da Incerteza de Medição), idealizado e estabelecido pelas instituições listadas a seguir:

- Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)
- International Electrotechnical Commission (IEC)
- International Federation of Clinical Chemistry (IFCC)
- International Organization for Standardization (ISO)
- International Union for Pure and Applied Chemistry (IUPAC)
- International Union for Pure and Applied Physics (IUPAP)
- International Organization of Legal Metrology (OIML)

Na presente dissertação foi utilizada como referência a versão 2008 do guia⁵, (versão mais atual) disponível para descarregamento gratuito no sítio do Inmetro, que no Brasil é a autoridade máxima no âmbito da metrologia⁶. Dentre outras atribuições, o Inmetro executa as políticas nacionais de metrologia e da qualidade e verifica a observância das normas técnicas e legais, no que se refere às unidades de medida, métodos de medição, medidas materializadas e instrumentos de medição.

O GUM caracteriza a qualidade de uma medição pelo tratamento dos erros sistemáticos e aleatórios em bases semelhantes, e descreve métodos para tanto. Esses métodos se aprofundam nos resultados obtidos inicialmente por uma “análise de erros”, e os colocam em uma base probabilística por meio do conceito de *incerteza de medição*. A incerteza de medição pode ser entendida então, como a medida de quanto se acredita conhecer o valor verdadeiro essencialmente único de um mensurando, refletindo um conhecimento incompleto do mesmo⁷. Dessa forma, a noção de *confiança* torna-se muito importante, pois os resultados de uma medição precisam ser considerados e quantificados em termos de probabilidades que expressem esses graus de confiança. Um desafio no campo da medição é saber qual a melhor forma de expressar o que se conheceu sobre o mensurando. A expressão dos valores dos erros sistemático e aleatório obtidos na medição, juntamente com uma melhor estimativa do mensurando, era uma abordagem frequentemente utilizada antes da introdução do GUM. O guia provê uma forma diferente de pensar a medição, em particular sobre como expressar a qualidade percebida do resultado de uma medição. Em vez de expressar o resultado da medição fornecendo uma melhor estimativa do

⁵ http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteudo/iso_gum_versao_site.pdf

⁶ <http://www.inmetro.gov.br/inmetro/oque.asp>

⁷ Idem

mensurando, juntamente com informação sobre os valores dos erros sistemático e aleatório (na forma de uma *análise de erros*), a abordagem do GUM expressa o resultado de uma medição como uma melhor estimativa do mensurando, acompanhada de uma incerteza de medição associada.

O campo de aplicação abrange todas as atividades de medição, do chão de fábrica à pesquisa fundamental, estabelecendo regras para avaliar e expressar a incerteza de medição, que podem ser seguidas em vários níveis de exatidão. Assim sendo, as orientações do GUM se aplicam a um vasto universo de medições, a saber:

- manter o controle da qualidade e a garantia da qualidade na produção;
- respeitar e fazer cumprir leis e regulamentos;
- calibrar padrões e instrumentos e executar ensaios, através de um sistema nacional de medição, de forma a obter a rastreabilidade até os padrões nacionais;
- desenvolver, manter e comparar padrões físicos de referência nacional e internacional, incluindo materiais de referência;
- *conduzir pesquisa básica, pesquisa aplicada e desenvolvimento na ciência e na engenharia.*

Destaca-se o último campo de aplicação do GUM, pois vai de encontro ao que se propõe com o presente trabalho. A aplicação de normas e procedimentos da qualidade em processos envolvendo medições, usualmente desenvolvidos em laboratórios acadêmicos, não é bem documentada. No entanto a experiência indica que essa não é uma prática comum como descrito por Nascimento et. al. (2015). Independentemente das alegações que possam vir a ser determinantes para a não adoção dessas práticas, isso demonstra a não familiaridade com o real significado e proposta dessas normas e orientações, já que com a sua aplicação e observância, promove-se a constante melhoria dos processos de medição.

Expressar um resultado de medição, não deveria apenas significar a mera reprodução de uma informação fornecida por um instrumento, uma planilha eletrônica ou um programa de cálculo matemático. A manipulação dos dados coletados em quaisquer plataformas de medição deve, dentre outras considerações, respeitar os limites impostos pela resolução dos instrumentos e métodos de medição.

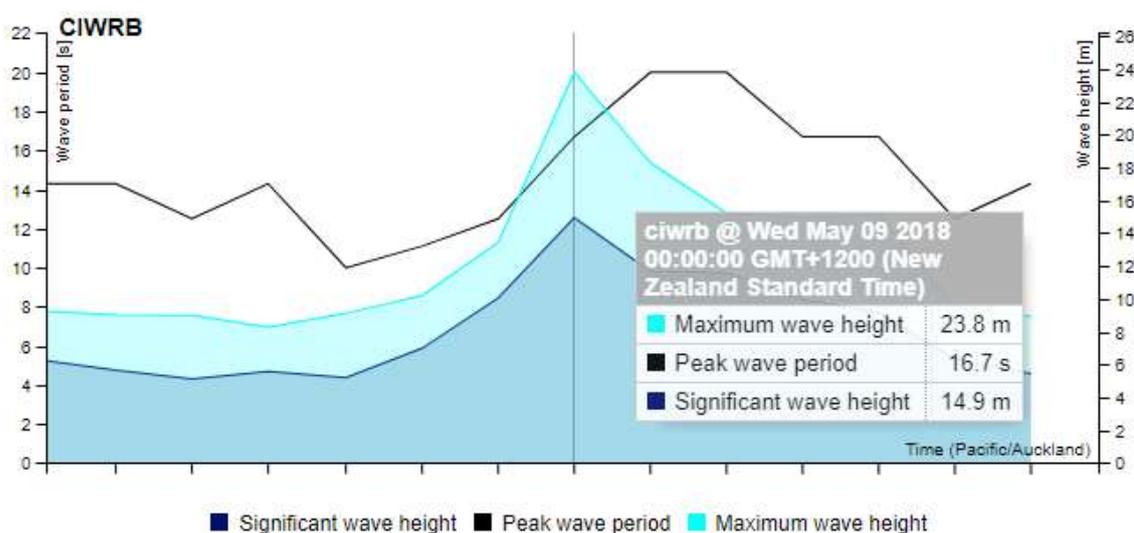
A prática demonstra que o número de casas decimais na expressão do resultado da medição de uma dada grandeza, mesmo que se utilize um instrumento cujas especificações o credenciem à categoria de padrão, não possui maior significação se

o mesmo não for utilizado da forma correta ou ainda se o processo de medição possa ser afetado por outros agentes, sem que se dê a devida consideração.

Em vista disso percebe-se que, em geral, poucas publicações se atêm à correta representação de resultados de suas medições⁸, que ainda assim não ficam imunes a certas “invigilâncias”.

Como retrata a Figura 2, ainda que o resultado de 23,8m seja aceitável, do ponto de vista metrológico, o texto afirma que o recorde de altura máxima anterior foi de 22,03m. Nessas medições, o sensor de altura de onda é da Axys (TRIAXYS directional wave buoy)⁹, que possui uma exatidão (acurácia) especificada de $\pm 1\%$, o que representa algo em torno de 0,22m para a referida medição, certamente restringiria o resultado para uma casa decimal, ou menor, caso a incerteza dessa medição fosse avaliada e fornecida.

May 09, 2018
A RECORD WAVE HEIGHT MEASURED IN THE SOUTHERN OCEAN
Last night, the MetOcean Solutions wave buoy moored in the Southern Ocean recorded a massive 23.8 m wave.



“This is a very exciting event and to our knowledge it is largest wave ever recorded in the Southern Hemisphere,” says Senior Oceanographer Dr Tom Durrant. “Our own previous record was one year ago when we measured a 19.4 m wave, and before that in 2012 an Australian buoy recorded a maximum individual wave (Hmax) of 22.03 m. So, this is a very important storm to capture, and it will add greatly to our understanding of the wave physics under extreme conditions in the Southern Ocean.”

Figura 2 – Gráfico representativo das variações de altura e período de uma onda.

⁸ <http://www.metocean.co.nz/news/2018/5/9/a-record-wave-height-measured-in-the-southern-ocean>

⁹ <http://axystechnologies.com/wp-content/uploads/2013/11/TRIAXYS-Next-Wave-II-The-Evolution-of-Wave-Sensor.pdf>

Ademais, o resultado reportado ao que tudo indica, também não considerada a influência da linha de fundeio na movimentação da boia e consequentemente na medição.

O hábito de se expressar resultados de medições com casas decimais que na prática absolutamente nenhum significado possuem, também se observa quando se expressa o resultado da medição de altura de ondas na prática do surfe¹⁰, por exemplo, como demonstrado na Figura 3, onde o atleta, com uma altura de 183,25 cm teria surfado uma onda de 3109,63 cm. Nesse caso específico, além da improvável capacidade de medir valores com resolução de 0,1 mm, a incerteza associada ao método de medição é ainda mais determinante, pois leva em conta a medida da prancha como escala, como referência absoluta para toda a medição. Além disso, a metodologia para escolha do que seria a crista e a base da onda, nada tem de ortodoxa e mesmo que o instrumento ou *software* utilizado para a medição possua uma resolução condizente com o número de casas decimais expressas no resultado da medição, expressá-las dessa forma dá uma falsa ideia do resultado. Ainda aqui, outro aspecto a se considerar é com relação à resolução da imagem em pixels na vertical que, admitindo-se seja de 1 pixel/mm, para representar valores com a resolução indicada, seria necessário que o processamento gerasse uma imagem da ordem de 310.000 pixels.

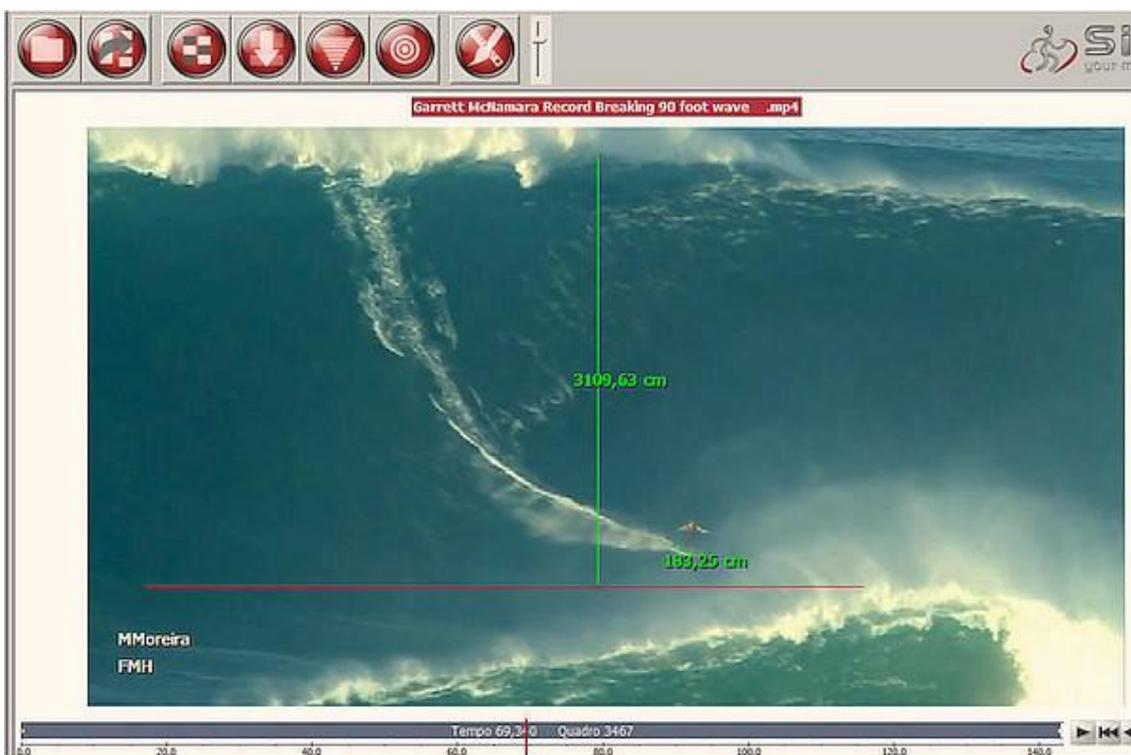


Figura 3 – Exemplo de uma medição de altura de onda para surfe.

¹⁰ <https://www.surftotal.com/entrevistas/exclusivas/item/468-miguel-moreira-explica-medicao-de-ondas>

Em outro exemplo, a boia de Rio Grande do PNBOIA, em outubro de 2016 deslocou-se por quilômetros de seu local de fundeio original, devido as severas condições de mar naquele período. Sabendo-se que a poita desse tipo de boia pesa algo em torno de 2T, esse deslocamento certamente distendeu inteiramente sua linha de fundeio e é bem provável que essa boia tenha sido parcialmente submersa durante os eventos que determinaram esse deslocamento (Figura 4). Ao longo do tempo onde ocorreram tais eventos, as medições continuaram, seus os dados não foram descartados e nenhuma informação sobre o ocorrido é mencionada, ficando a cargo única e exclusivamente do usuário, a percepção do fato e a escolha de utilizar esses dados ou não, que certamente tiveram sua incerteza aumentada.

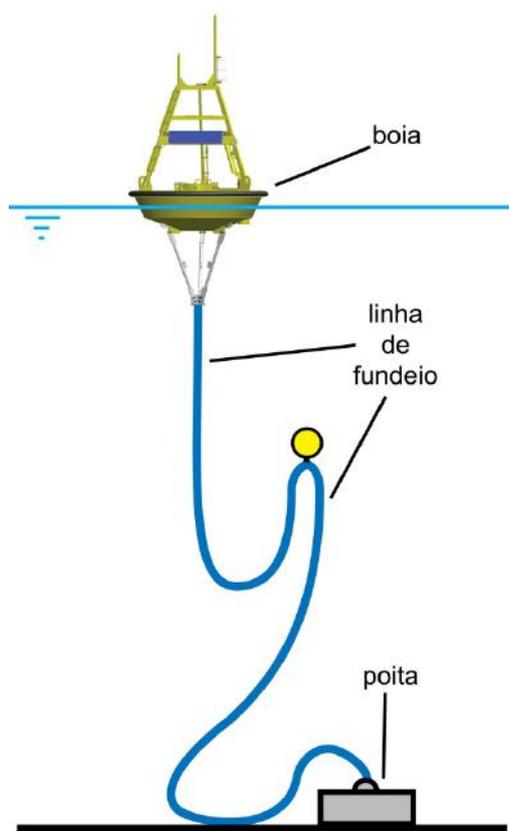


Figura 4 – Ilustração da ancoragem de boias.

Ainda sobre os dados do PNBOIA disponíveis para análise e processamento pelos usuários, observa-se que em casos como o da medição de velocidade do vento, em comparação aos dados originais (Figura 5 - coluna **avg_wind_int1**), são incorporados Algarismos significativos espúrios aos dados de velocidade, como resultado do processo de qualificação e conversão dos valores para a altura de 10m (Figura 6 – coluna **Wspd**).

flag	position_status	battery_voltage	solar_current	boot_times	flood_level	avg_wind_int1	wind_gust1
1	0.0	13.4	0.6	1.0	0.0	6.6	8.3
2	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0
1	0.0	13.4	0.6	2.0	0.0	6.9	8.5
2	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0
2	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0
1	0.0	12.8	0.0	5.0	0.0	7.7	9.2
2	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0
2	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0
2	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0
2	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0	-99999.0
1	0.0	12.7	0.0	1.0	0.0	6.2	8.6

Figura 5 - Dados originais de medição de velocidade do vento da boia Cabo Frio 2, com uma casa decimal (arquivo Bcabo_frio_argos.csv).

# Epoca	Lat	Lon	Year	Month	Day	Hour	Minute	Battery	bHead	Wspd
1,47E+09	-23,632	-42,199	2016	7	20	18	21	13,4	-9999	7,497531971
1,47E+09	-23,628	-42,202	2016	7	20	19	21	-9999	279	7,497531971
1,47E+09	-23,629	-42,202	2016	7	20	20	21	-9999	270	10,32268895
1,47E+09	-23,629	-42,204	2016	7	20	21	21	12,8	-9999	8,36681104
1,47E+09	-23,627	-42,2	2016	7	20	22	21	-9999	267	8,36681104
1,47E+09	-23,628	-42,2	2016	7	20	23	21	-9999	270	8,801450575

Figura 6 - Dados qualificados da boia Cabo Frio 2, com nove casas decimais (arquivo cabofrio2.csv).

1.2 – Objetivo

Tendo em vista o exposto, o objetivo do presente trabalho não é condenar medições ou sistemas de medição, mas tão somente demonstrar a importância da avaliação e expressão da incerteza de medições de grandezas meteo-oceanográficas, em todas as etapas de desenvolvimento em C&T. A aplicação das orientações do GUM na análise e processamento de dados coletados possibilita:

- avaliar a incerteza dos resultados de medições de onda, velocidade do vento e de correntes marinhas com instrumentos instalados em boias meteo-oceanográficas;
- indicar onde melhorias possam ser aplicadas aos processos de medição e processamentos numéricos;
- uniformização de análise de dados coletados em medições com boias meteo-oceanográficas;
- tornar mais realistas os resultados das medições, segundo as especificações dos equipamentos empregados nas medições;

- evidenciar a necessidade de maior atenção quanto a importância da metrologia associada aos processos de medição, análise e processamento de dados obtidos com equipamentos meteo-oceanográficos.

1.3 - Estrutura do trabalho

O trabalho será estruturado de forma que o Capítulo 2 contempla uma visão atual dos equipamentos e as metodologias de medição existentes, para as medições ambientais com boias, especificamente ventos, ondas e correntes marinhas.

Além das características principais dos equipamentos, também são relacionadas as referências encontradas, quando aplicáveis, e as análises pertinentes quanto à aplicabilidade destes equipamentos em suas funções.

O Capítulo 3 discorre sobre a metodologia para avaliação e expressão da incerteza de medição segundo o GUM, com a exemplificação das etapas.

No Capítulo 4 são aplicados os conceitos já definidos, em estudos de casos, a partir de dados obtidos em medições em campo. Neste capítulo ficam definidos os critérios para utilização do método descrito no GUM, para estimativa das incertezas expandidas relacionadas às medições de onda, velocidade do vento e corrente marinha.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais sobre as análises realizadas e baseadas nas orientações descritas nos capítulos anteriores, assim como propostas para trabalhos futuros.

2 - MEDIÇÕES DE PARÂMETROS AMBIENTAIS COM EQUIPAMENTOS INSTALADOS EM BOIAS

Medições de parâmetros ambientais nos oceanos são de relevante importância para a descrição, conhecimento, modelagem e previsão de fenômenos atmosféricos/climáticos locais e globais. Em função dessa necessidade, o uso de boias instrumentadas tornou-se ferramenta essencial para a obtenção dos dados “in situ”. Fundeadas ou de deriva (movem-se pela ação das correntes superficiais), essas boias meteo-oceanográficas (BMO's) coletam dados continuamente e integram redes mundiais de medição de parâmetros ambientais, ao longo de todos os oceanos¹¹.

2.1 – Data Buoy Cooperation Plan - DBCP

Nos Estados Unidos, o Data Buoy Cooperation Plan (DBCP)¹² é parte integrante do National Weather Service (NWS), da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Dispõe de uma extensa rede própria de coleta de dados meteo-oceanográficos, ao longo de todos os oceanos que, em parceria com outras instituições internacionais, coleta dados ambientais que fornecem informações meteorológicas e oceanográficas. É um centro de excelência, que possui toda a estrutura para testes, reparos e desenvolvimento dos equipamentos integrados às boias (Figura 7).

De uma maneira geral, as boias de fundeio possuem características construtivas específicas, em função da aplicação, dotadas de equipamentos que coletam dados de diversas grandezas meteorológicas e oceanográficas, como velocidade e direção do vento e de correntes marinhas, direção, altura e período de ondas, salinidade, pressão atmosférica, temperatura etc.

Os dados coletados são processados e armazenados localmente e posteriormente, em determinadas janelas de tempo, são transmitidos via satélite para uma estação central. Esses dados ficam disponíveis para consulta em portais na internet, como o National Data Buoy Center¹³ (NDBC), como ilustrado na Figura 8.

¹¹ <http://www.jcommops.org/dbcp/network/maps.html> - acesso em 25/09/2017.

¹² Idem

¹³ <http://www.ndbc.noaa.gov/> - acesso em 26/07/2017.

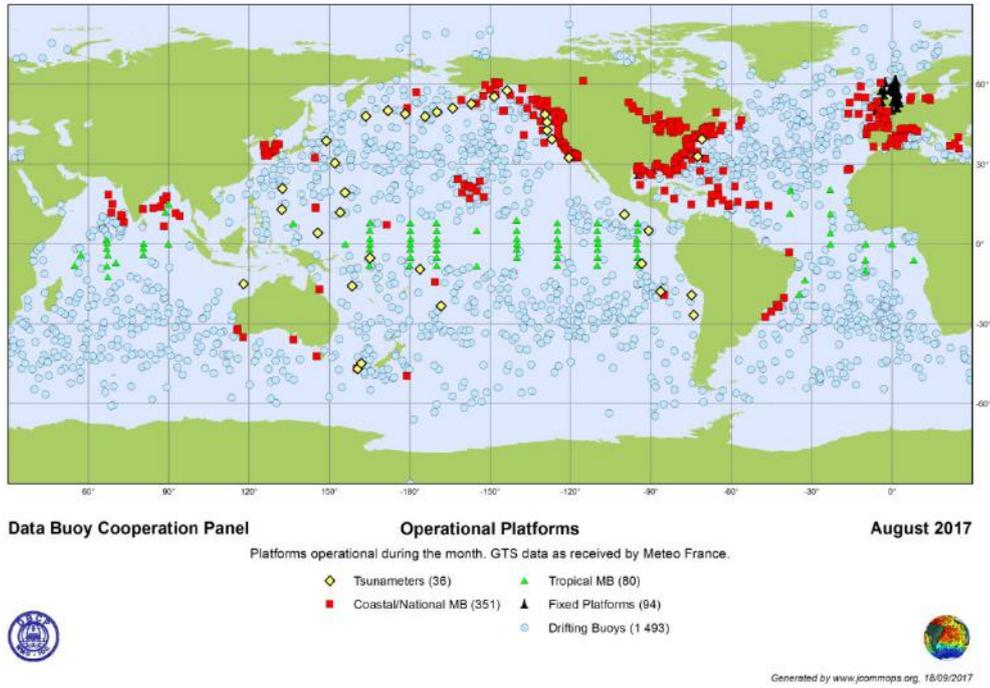


Figura 7 – Mapa de boias do DBCP e de parcerias internacionais.

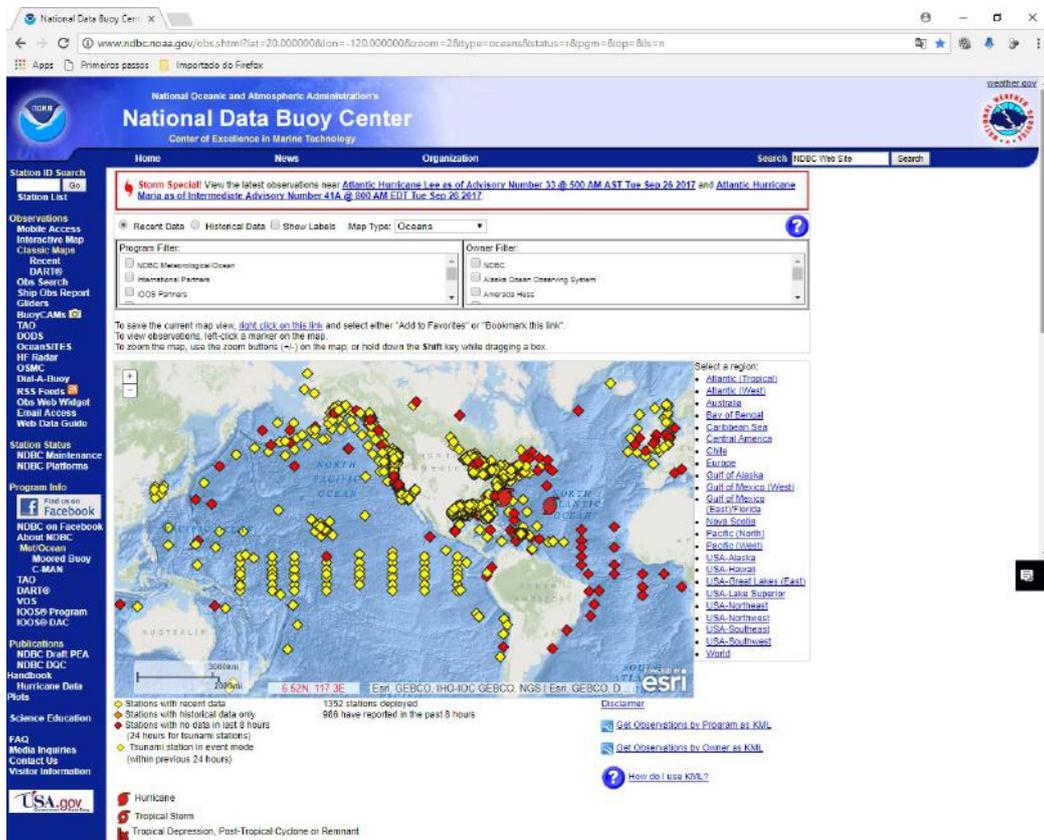


Figura 8 – Portal da NDBC.

2.2 – PNBOIA, PIRATA, REMO E SIMCOSTA

No Brasil o PNBOIA¹⁴, uma das contrapartidas brasileiras ao GOOS (Global Ocean Observing System), é um dos programas que objetiva a coleta de dados oceanográficos e meteorológicos no Atlântico, por meio de rede de boias fixas e de deriva (Figura 9), em apoio às atividades de meteorologia e oceanografia no Brasil. Integram o programa, as instituições:

- SECIRM - Secretaria da Comissão Interministerial de Recursos do Mar;
- Marinha do Brasil (DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação e CHM - Centro de Hidrografia da Marinha);
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais;
- FURG - Fundação Universidade Federal do Rio Grande do Sul;
- IOUSP - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo;
- MMA - Ministério do Meio Ambiente;
- IEAPM - Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira;
- PETROBRAS – PETROBRAS.

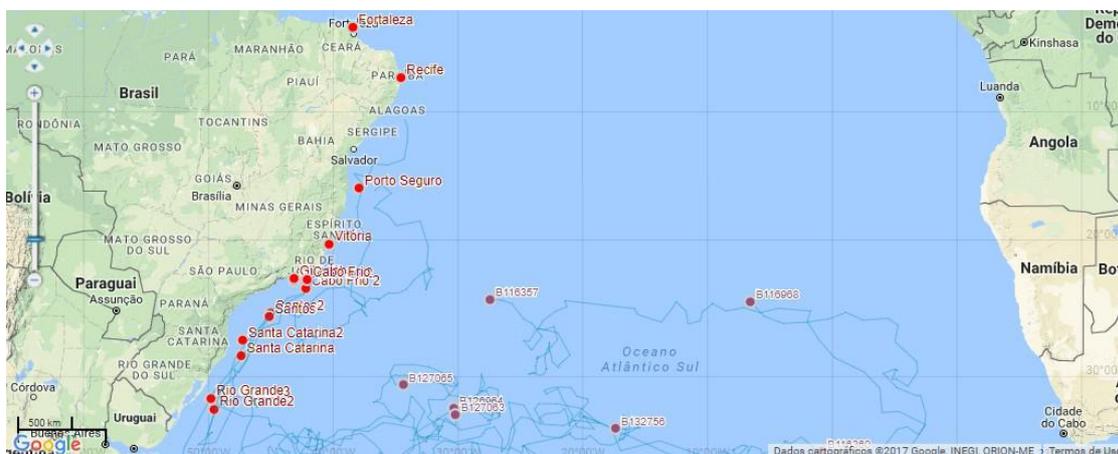


Figura 9 – Mapa de localização das boias do PNBOIA (fixas e de deriva).

As boias do PNBOIA, a exemplo do NDBC, são equipadas com diversos instrumentos, que possibilitam a coleta de dados meteo-oceanográficos, como velocidade, direção e rajadas de vento, temperatura do ar, pressão atmosférica, ponto de orvalho, umidade relativa, radiação solar, temperatura do ar e da superfície do mar, velocidade e direção de correntes marinhas (várias profundidades), ondas (período, alturas significativa e

¹⁴ <http://www.goosbrasil.org/pnboia/>

máxima, direção e espalhamento), salinidade e fluorescência¹⁵, assim como PIRATA, REMO e SIM COSTA. Dependendo do programa e do tipo de boia, variam os tipos de grandezas cujos dados são coletados.

Na sequência, serão abordadas as metodologias de medição das grandezas meteorológicas, cujas incertezas de medição serão avaliadas.

2.3 – Medição de velocidade do vento

Ventos tem origem na diferença de pressão atmosférica entre regiões distintas (Martins et. Al., 2007) e a medição da sua velocidade com boias no oceano é um desafio, devido às variações de direção e orientação da boia.

A Camada Limite Superficial é definida como a região que vai de 0 até 100 e 120m de acima da superfície (Gisler, 2009), caracterizada por grandes variações de temperatura, umidade e velocidade dos ventos.

Uma descrição do perfil vertical médio do vento, para uma atmosfera neutra e estável, com base na física da camada limite de Prandtl, pode ser representada pelo perfil logarítmico do vento¹⁶, que depende de parâmetros, como a velocidade da tensão de cisalhamento v^* , a altura z acima do solo, o comprimento de rugosidade z_0 e a constante de von Kármán, k , como na equação (1).

$$v(z) = \frac{v^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

Onde:

- z - altura vertical;
- v^* - velocidade de atrito (definida como a raiz quadrada da relação entre a tensão superficial e a densidade $\rightarrow v^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$);
- k - constante de von Karman (usualmente = 0,40 - Stull - 1988);
- z_0 - comprimento de rugosidade aerodinâmica.

¹⁵ Boletim Informativo Soamar Campinas - Abril 2015

¹⁶ R. Gasch and J. Tvele (eds), Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation (Solarpraxis AG, Alemanha, 2002).

Para um comprimento de rugosidade conhecido, a aplicação da equação (1) para duas alturas diferentes, resulta numa equação muito útil.

$$v_2 z_2 = v_1 z_1 \times \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} \quad (2)$$

Na equação (2), sabendo-se a velocidade do vento v_1 na altura z_1 , pode-se determinar a velocidade do vento v_2 na altura z_2 se o comprimento de rugosidade z_0 é dado.

A rugosidade da superfície do mar é menor em comparação com as superfícies terrestres, sendo essa a principal razão para as velocidades do vento mais altas encontradas nesse meio. No entanto, a rugosidade não é constante com a velocidade do vento, mas depende, dentre outras, do campo de ondas presente, que por sua vez também depende da velocidade do vento, do alcance a montante (distância até o ponto de medição), da profundidade da água etc (Lange et. al., 2004).

Tome-se como exemplo a boia Cabo Frio 2 do PNBOIA, que é equipada com dois anemômetros do tipo hélice, instalados em suporte específico (3,73m e 4,71m da linha d'água), como retratado na Figura 10. Como se pode observar, em função das alturas dos anemômetros em relação à linha d'água, há necessidade de conversão dos dados medidos *in situ*, para a altura de referência de 10m.

O método utilizado pelo NDBC para ajustar as velocidades do vento ao nível de referência padrão é descrito por W. T. Liu et al. (1979). O método resolve iterativamente equações que envolvem as trocas de impulso, calor e vapor de água na interface ar-mar para chegar ao perfil de velocidade do vento na camada limite atmosférica inferior.

Um método simplificado é descrito por Segal e Pielke (1987) e S. A. Hsu et al. (1994). Muito embora o NDBC utilize o método de Liu, testes foram realizados pela instituição¹⁷, que indicaram resultados muito satisfatórios, em comparação com o método de maior complexidade. A relação entre velocidades é descrita pela equação (3):

$$u_2 = u_1 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^p \quad (3)$$

Onde:

- z_1 – altura desejada;

¹⁷ http://www.ndbc.noaa.gov/adjust_wind.shtml.

- z_2 – altura de referência;
- u_2 – velocidade do vento na altura de referência desejada z_2 ;
- u_1 - a velocidade do vento medida a altura z_1 ;
- p – expoente equivalente a 0,11.

Em Hsu et. al. (1992), através de dados de medições de velocidade do vento, realizadas sob variadas condições de altura, fica demonstrado que o valor adotado para o expoente p , é adequado para utilização no mar.

Esse método simplificado foi utilizado para a conversão dos dados de velocidade do vento medidos à altura do mastro-suporte dos anemômetros (z_1), para a altura de referência padrão de 10m (z_2), em ambos os arquivos de dados utilizados.

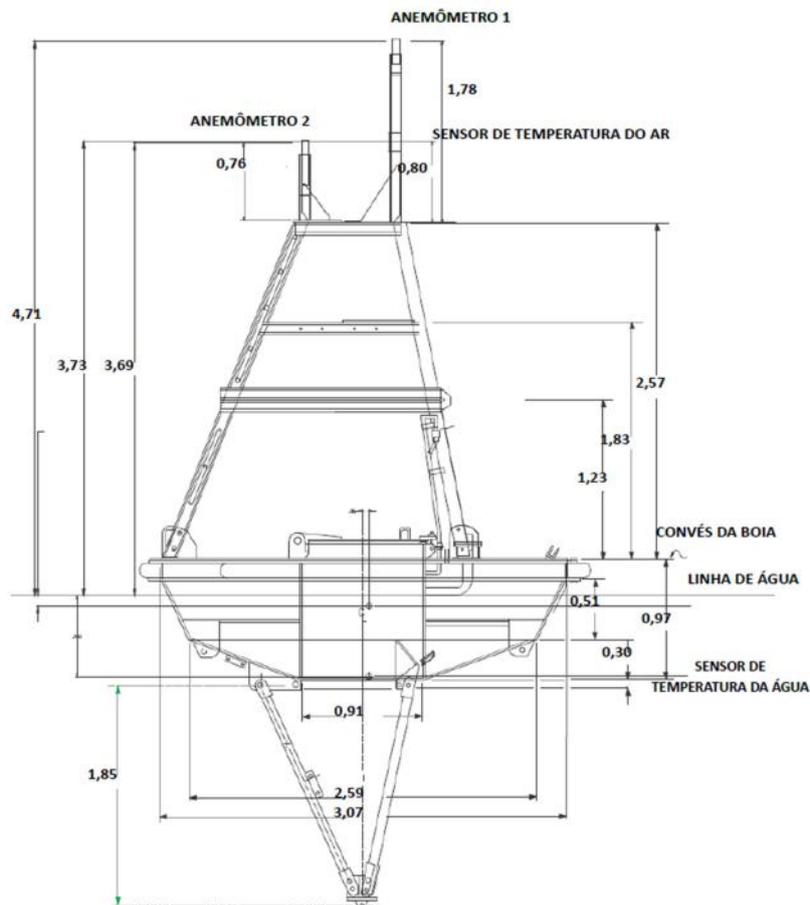


Figura 10 – Anemômetros da boia Cabo Frio 2

Para medição de velocidade e direção do vento com boias, são utilizados anemômetros de hélice e ultrassônico, descritos a seguir.

2.3.1 – Anemômetro de Hélice

Indicados pelo W.M.O (World Meteorological Organization)¹⁸, seu emprego em medição de velocidade do vento é por demais consagrado, dadas as suas características de simplicidade, robustez e confiabilidade, conforme ilustrado na Figura 11, que retrata o modelo 05106 da R.M. Young¹⁹.



Figura 11 – Anemômetro de hélice R.M. Young, modelo 05106.

Nesse tipo de medidor, o corpo possui um formato aerodinâmico, que se assemelha a uma fuselagem de avião, dotado de um hélice à frente, que se movimenta devido ao vento incidente, e um leme na parte posterior, que posiciona o equipamento de acordo com a direção do vento. Internamente, fixado no mesmo eixo do hélice, há um disco, fabricado em material magnético polarizado. Próximo ao disco há um sensor indutivo que é sensibilizado pelas variações do campo magnético, função da velocidade de rotação. Um circuito eletrônico converte essas variações de campo magnético em tensão elétrica, cuja frequência varia em função da velocidade.

A expressão para o cálculo da velocidade é dada por:

$$U = Mf + B \quad (4)$$

Onde:

- M - fator multiplicador;
- f - número de pulsos por segundo (frequência em Hz);

¹⁸ DBCP Technical Document No. 8 - Guide to Moored Buoys and other Ocean Data Acquisition Systems – 1996.

¹⁹ Referência para o anemômetro Young

- B - offset.

Para a medição da direção do vento, instalado no eixo móvel de suporte do anemômetro, há um potenciômetro excitado por uma fonte de tensão fixa, cujo cursor movimenta-se com o corpo do anemômetro. O sinal de saída do cursor é uma tensão proporcional à posição de todo o conjunto, que é referenciado ao norte magnético. Nesse caso, tem-se a seguinte expressão:

$$d = y \times V \quad (5)$$

Onde:

- y - fator multiplicador para conversão de tensão para graus (0,142);
- V - tensão de excitação (Volts).

Como usualmente anemômetros de hélice têm seu desempenho avaliado estaticamente em túneis de vento, as especificações acima resumidas, não consideram a influência de possíveis movimentos sob os quais o instrumento esteja sendo submetido, como os que são inerentes à condição de mar, quando instalado em boia meteo-oceanográfica.

2.3.2 – Anemômetro Ultrassônico

Os medidores de velocidade do vento do tipo ultrassônico instalados em boias meteo-oceanográficas, por vezes operam em conjunto aos medidores de hélice. A utilização de medidores ultrassônicos para medir velocidade foi discutida inicialmente em meados da década de 50 (Scotland - 1955). Com o desenvolvimento da tecnologia de materiais e recursos de processamento embarcado, foram definidos métodos de aceitação²⁰ e testes de desempenho (Sturgeon et. al – 2005), para aplicação em terra.

Medidores ultrassônicos por tempo de transito, com o empregado na presente avaliação, os transdutores emitem e recebem o ultrassom, cuja velocidade é alterada com a passagem de um fluido através do caminho do ultrassom (Almeida - 2004), conforme ilustrado na Figura 12, onde C é a velocidade do som no fluido, V_w é a velocidade do fluido e θ o ângulo entre o escoamento do fluido e o caminho do ultrassom.

²⁰ ISO16622: 2002, Meteorology - Sonic anemometers/thermometers – Acceptance test methods for mean wind measurements.

A partir da relação entre t_{12} e t_{21} , pode-se determinar a velocidade do fluido, sem que esta seja afetada por alterações das condições do meio, como temperatura, pressão, densidade, ou seja, independente de C . Em vista disso, a velocidade do fluido poderá ser determinada segundo a equação (6), a seguir:

$$V_w = \frac{L}{2 \times \cos\theta} \times \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) \quad (6)$$

O anemômetro ultrassônico, cujas características serão abordadas no presente trabalho, é uma estação de medição de parâmetros atmosféricos, modelo *Weather Transmitter WXT520*, de fabricação da Vaisala Corporation²¹ (Figura 13), dotada de um sensor de vento denominado WINDCAP.

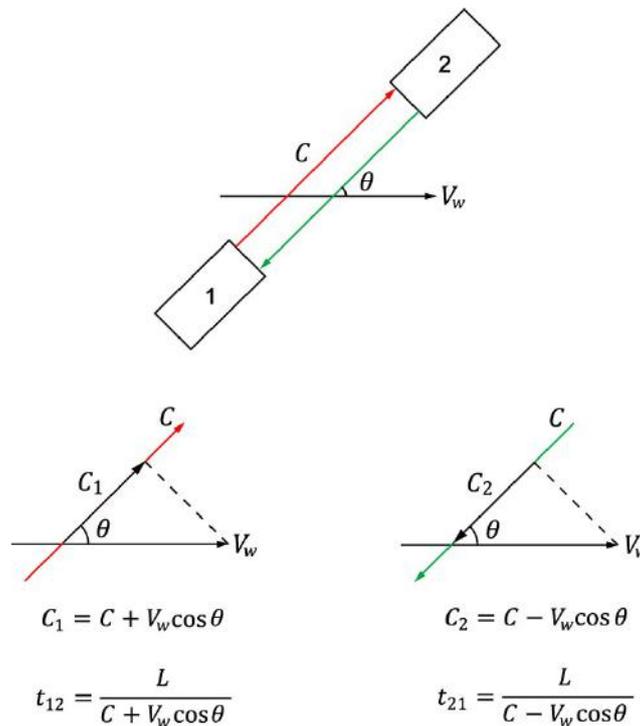


Figura 12 – Princípio de funcionamento do medidor ultrassônico por tempo de trânsito.

²¹ Referência para o anemômetro ultrassônico



Figura 13 – Estação Vaisala WXT520 para medição de parâmetros atmosféricos.

O sensor de vento é composto de três sensores igualmente espaçados no plano horizontal, que emitem e recebem os sinais de ultrassom. É medido o tempo de trânsito (também chamado de tempo de vôo) em ambos os sentidos, ao longo dos três caminhos estabelecidos pelo conjunto de transdutores, sendo que esse tempo de trânsito dependerá da velocidade e direção do vento ao longo dos caminhos do ultrassom²² (Figura 14).

Nesse instrumento, a exatidão da medição está ligada diretamente à medida da distância L entre os transdutores, e a medição dos seis tempos de trânsito (t_1 a t_6) permite que a velocidade seja calculada para cada um dos três caminhos ultrassônicos, sendo que, de acordo com o processo de medição do fabricante, os valores para dois trajetos são suficientes para determinar a velocidade e a direção do vento, considerando a componente vetorial paralela ao caminho do ultrassom.

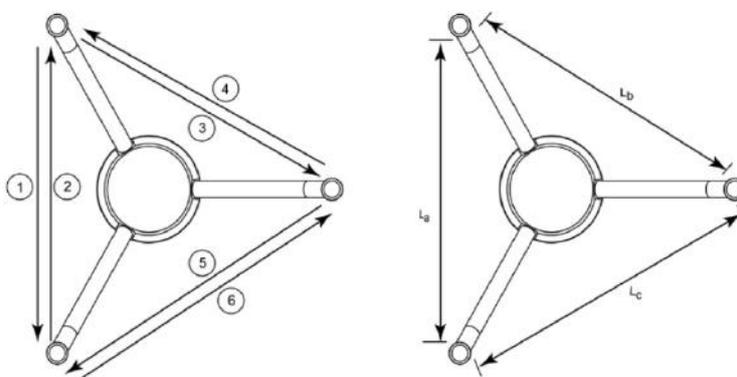


Figura 14 – Ilustração dos caminhos de medição do anemômetro ultrassônico.

²² Referência para Figura

A configuração dos três transdutores como um triângulo equilátero, fornece três conjuntos de vetores de base possíveis e as combinações produzem medições bidirecionais nos caminhos A, B e C. Essas medições são usadas para determinar os componentes da velocidade do vento paralelos a cada um dos três caminhos.

O algoritmo do equipamento resolve algebricamente as medições dos seis tempos de transito, obtendo a velocidade do vento e sua direção, já que a equação (6) é aplicada para cada par de transdutores (1-2; 2-3; 3-1), considerando dois dos trajetos cujos sinais sejam considerados de boa qualidade. A velocidade do vento é determinada, a partir da seguinte equação:

$$V = 0,5 \times L \times \left(\frac{1}{t_f} - \frac{1}{t_r} \right) \quad (7)$$

Onde:

- V - velocidade do vento;
- L - distância entre dois transdutores;
- t_f - Tempo de trânsito no sentido direto;
- t_r - Tempo de trânsito no sentido inverso.

Devido à ausência de informações objetivas sobre a metodologia utilizada pelo fabricante para o cálculo específico da direção do vento, mesmo com a ciência de que o mesmo está baseado nas projeções dos vetores de velocidade do vento e seu ângulo em relação aos trajetos escolhidos, qualquer inferência nesse cálculo poderia levar a erro na avaliação da incerteza, por não reproduzir com fidelidade o que é realizado pelo equipamento

A menos das características construtivas do equipamento, como o alinhamento dos transdutores e o seu correto desempenho, toda a manipulação de sinais e dados é realizada pelo *hardware* e controlado pelo *software* embarcados.

Independente do tipo de equipamento para medição da velocidade do vento, o WMO²³ especifica que a resolução mínima do medidor seja de 0,5 m/s para reportar a velocidade e 1° para direção.

Assim como os anemômetros de hélice, os ultrassônicos também têm seu desempenho avaliado estaticamente em túneis de vento, não considerando a influência de possíveis movimentos sob os quais o instrumento esteja sendo

²³ W.M.O. – Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation – 2014 Edition - MEASUREMENT OF METEOROLOGICAL VARIABLES – Part I, item 5.1.2, pg 168.

submetido, como aqueles que ocorrem, quando instalado em boia meteo-oceanográfica. No Capítulo 4 é avaliada a influência de um tilt constante na medição de velocidade com anemômetro ultrassônico.

2.4 – Medição de ondas

Ondas ocorrem no oceano com características diferentes, em termos de período e amplitude²⁴, como ilustrado na Figura 15.

A caracterização de uma onda implica em se conhecer parâmetros básicos que a definam, como comprimento, amplitude e a profundidade onde se propaga e, de acordo com Dean e Dalrymple, (1984), teoricamente, outros parâmetros como aceleração e velocidade podem ser obtidos à partir deles.

A elevação da superfície²⁵, definida por $\eta(x,t)$, é função da amplitude da onda a , em um dado instante t e uma dada posição x (Figura 16).

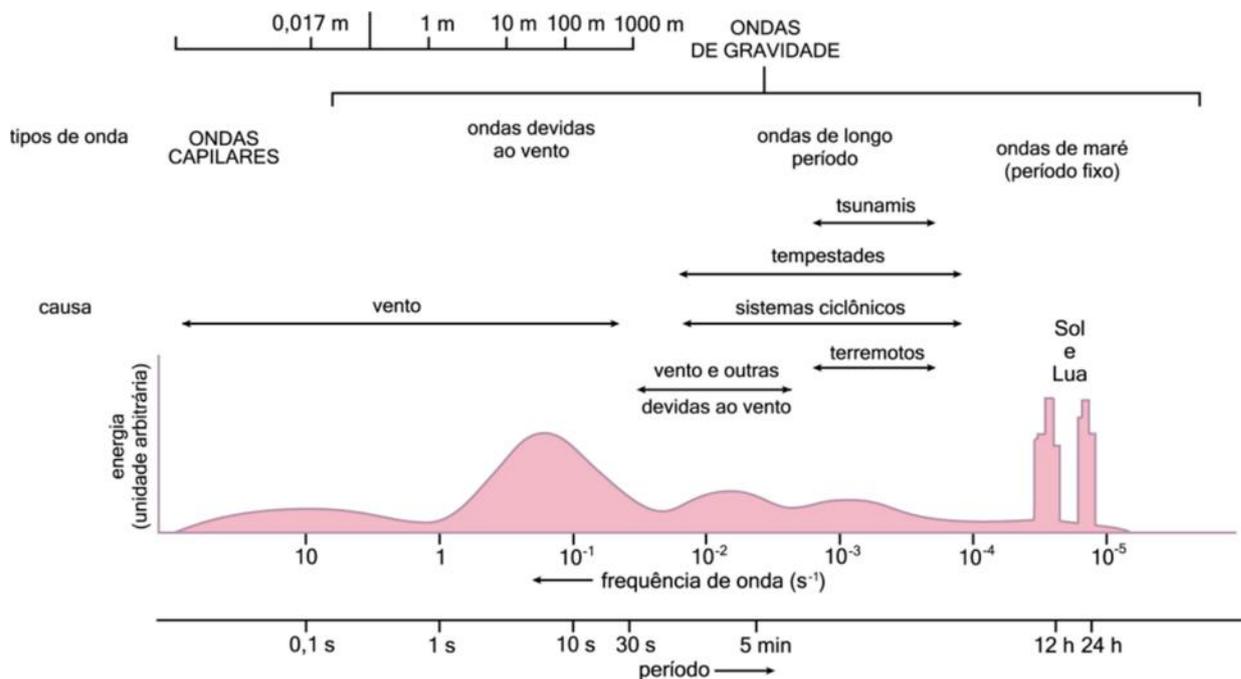


Figura 15 - Representação esquemática do espectro de ondas que ocorrem no oceano.

²⁴ Open University -1989 – adaptado.

²⁵ Dean e Dalrymple, 1984 - adaptado

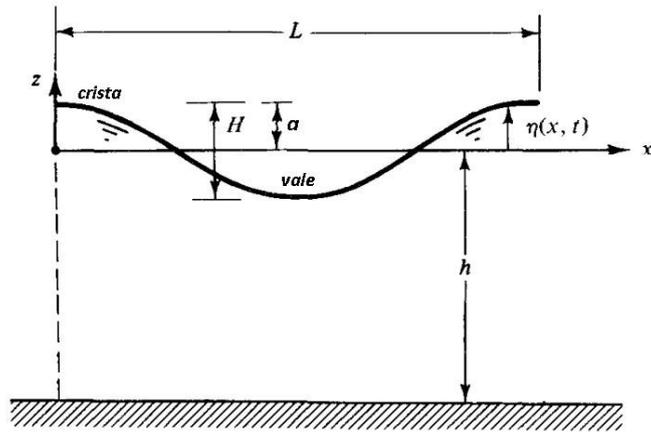


Figura 16 – Parâmetros característicos de ondas oceânicas.

O oceano é uma superposição de frentes de onda²⁶ com diferentes parâmetros (Figura 17). Em consequência, diferentemente do ideal, que seria a utilização de um *array* de sensores, a medição de direção de ondas por boias meteo-oceanográficas não é trivial.

Para esse tipo de medição, são utilizados sistemas que integram vários sensores.

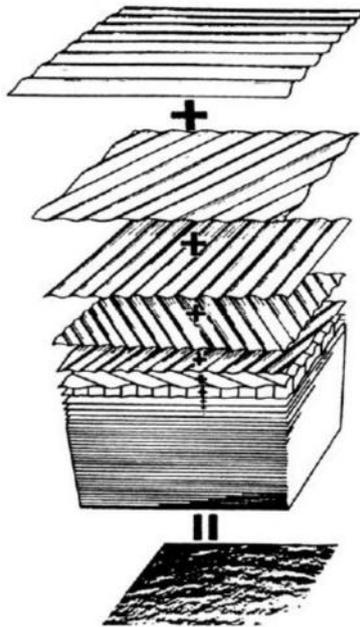


Figura 17 - Superposição de frentes de ondas de diferentes parâmetros.

²⁶ Pierson, 1958

Tais sistemas compõem-se de sensores de estado sólido (Figura 18), integrados e encapsulados em invólucros apropriados, denominados *dispositivos MEMS* (Micro Electro-Mechanical Systems).

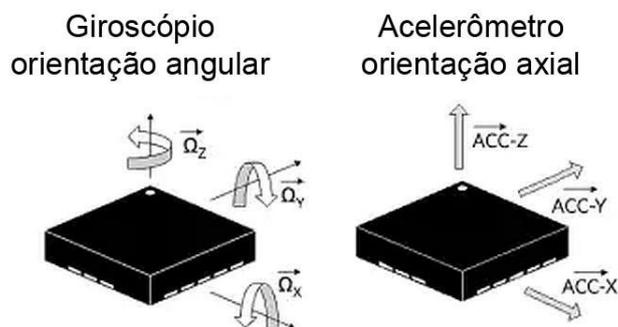


Figura 18 – Graus de liberdade associados aos eixos ortogonais de um sistema de coordenadas.

Os acelerômetros e giroscópios presentes nesses sistemas de medição compõem uma *unidade de medição inercial* (IMU) cujas medições, em conjunto com algoritmos de integração específicos, resolvem as séries temporais de *heave-pitch-roll* referentes aos movimentos de uma BMO. Uma IMU, quando tem seus dados processados por um algoritmo de navegação, é capaz de fornecer informações de orientação angular, velocidade e posição do corpo no qual está fixada, constituindo assim, um Sistema de Navegação Inercial (Inertial Navigation System - INS), conforme Moraes (2015).

Os acelerômetros medem as acelerações em torno dos eixos ortogonais que, quando duplamente integradas no tempo, fornecem os deslocamentos (*surge*, *sway* e *heave*). Os giroscópios medem as velocidades em torno dos eixos ortogonais que, quando integradas, informam a rotação do corpo sobre o próprio eixo (*pitch*, *yaw* e *roll*). A combinação dessas medidas, associadas a algoritmos computacionais específicos, permite a medição da direção de ondas (Moraes, 2015). A Figura 19 ilustra os seis graus de liberdade dos movimentos de uma BMO²⁷.

²⁷ Moraes, 2015 – adaptado

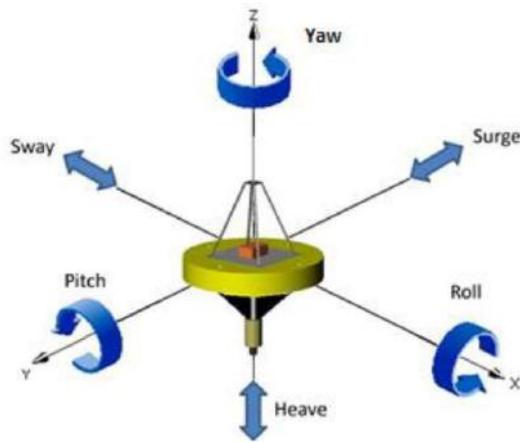


Figura 19 – Graus de liberdade associados aos eixos ortogonais imaginários em uma BMO.

Através das séries temporais medidas pelos sensores²⁸ (Figura 20), é possível determinar a elevação da superfície do mar (η) e suas inclinações ortogonais (η_y e η_x) que, por sua vez, permitirão a determinação de outros parâmetros inerentes a um estado de mar, pela obtenção de espectros cruzados, auto espectros e o espectro direcional de ondas, $S(f, \theta)$.

De acordo com Tucker, (1989), se considerarmos o centro de massa da boia como a origem do sistema cartesiano, as equações simplificadas de *heave* (8), *roll* (9) e *pitch* (10), obtidas pelos acelerômetros e giroscópios integrantes do sistema de medição fixado em uma BMO, serão:

$$\eta(x, y, t) = a \cos(kx \cos(\theta) + ky \sin(\theta) - \omega t - \varepsilon) \quad (8)$$

$$\eta_x(t) = -ak \cos(\theta) \sin(kx \cos(\theta) + ky \sin(\theta) - \omega t - \varepsilon) \quad (9)$$

$$\eta_y(t) = -ak \sin(\theta) \sin(kx \cos(\theta) + ky \sin(\theta) - \omega t - \varepsilon) \quad (10)$$

O deslocamento vertical, *heave*, é obtido pela dupla integração da aceleração vertical, a partir das medições das acelerações nos eixos x, y e z, pela IMU da boia, mas referenciadas a um sistema de coordenadas fixo da unidade inercial, que se movimenta juntamente com o casco²⁹, como indicado na Figura 21. O índice “N” (relativo à Navegacional) refere-se ao sistema de coordenadas local e “B” (relativo à *Body*), o sistema de coordenadas da boia. Esse sistema de coordenadas local difere

²⁸ Moraes, 2015 – adaptado.

²⁹ Idem

das medições de acelerações e velocidades angulares realizadas pela IMU, pois apresenta seu eixo z fixo e perpendicular à superfície da Terra (Moraes, 2015).

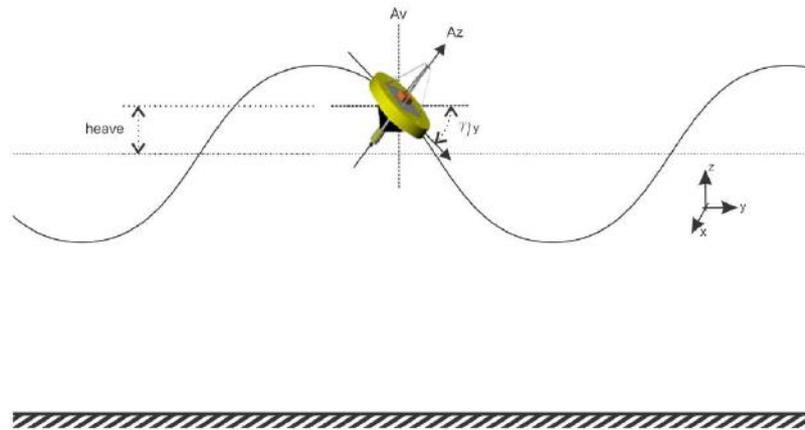


Figura 20 – Ilustração de uma boia e os sistemas de coordenadas da boia e da Terra.

Embora existam diferentes formas de se estimar o *heave* de uma boia (Bender III, Guinasso, et al., 2010), um método considerado mais exato (Moraes, 2015), realiza a transformação do sistema de coordenadas da boia (índice “B”), para o sistema de coordenadas local (índice “N”), utilizando uma matriz de rotação (XSENS, 2010), definida por C_B^N .

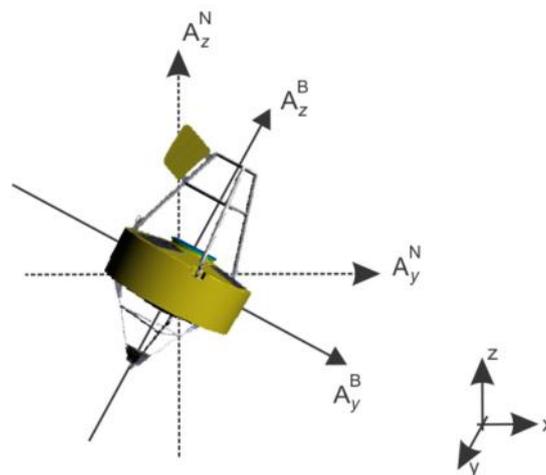


Figura 21 - Ilustração da boia com os eixos dos acelerômetros y e z definidos e os eixos equivalentes no sistema de coordenadas local.

Para tanto, são utilizadas as medições fornecidas pelo INS (Sistema de Navegação Inercial) correspondentes às três acelerações e às três orientações angulares (*pitch*, *roll* e *yaw*).

$$C_N^B = \begin{bmatrix} (\cos\theta \cos\psi) & (\sin\phi \sin\theta \cos\psi - \cos\phi \sin\psi) & (\cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi) \\ (\cos\theta \sin\psi) & (\sin\phi \sin\theta \sin\psi + \cos\phi \cos\psi) & (\cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi) \\ -\sin\theta & \sin\phi \cos\theta & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[A^N] = C_N^B \times [A^B] \quad (12)$$

Onde:

- ϕ - roll;
- ψ - yaw;
- θ - pitch;
- A^B - vetor de acelerações A_x^B , A_y^B e A_z^B , medido pela IMU no referencial do casco da boia.

A aceleração do eixo z no referencial da Terra (A_z^E) é equivalente à aceleração vertical, e a partir das equações (11) e (12), é dada por:

$$A_z^E = A_x^B(\sin\theta) + A_y^B(\sin\phi \cos\theta) + A_z^B(\cos\phi \cos\theta) \quad (13)$$

Onde:

- A_z^E - vetor de acelerações A_x^E , A_y^E e A_z^E , no referencial da Terra.

Obtendo-se o *heave*, é possível determinar outros parâmetros de onda, como altura significativa (h_s), altura máxima ($h_{m\acute{a}x}$), altura média (h_{med}) etc.

A direção de onda é determinada pelo espectro direcional, que pode ser considerado como a distribuição de densidade de energia da onda, em relação à frequência (f) e direção (θ) (Pinho, 2003).

O espectro direcional pode ser expresso pelo produto do espectro pontual $S(f)$ com a função de espalhamento angular de energia, $D(f, \theta)$:

$$S(f, \theta) = S(f) \times D(f, \theta) \quad (14)$$

A Figura 22 exemplifica um espectro direcional de ondas obtido por um sensor TriAxys da AXYS Technologies³⁰, onde o eixo das abscissas representa a frequência da onda em Hertz e o eixo das ordenadas sua direção em graus. A escala de cores indica a intensidade da energia para uma dada frequência e direção.

Através do desenvolvimento de Longuet-Higgins et al. (1963) para boias heave-pitch-roll, a equação (14) pode ser rescrita:

$$S(f, \theta) = C_{11}(f) \left\{ \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2} + \frac{Q_{12}(f)}{kC_{11}(f)} \cos\theta + \frac{Q_{13}(f)}{kC_{11}(f)} \sin\theta + \frac{C_{22}(f) - C_{33}(f)}{k^2 C_{11}(f)} \cos 2\theta + \frac{2C_{23}(f)}{k^2 C_{11}(f)} \cos 2\theta \right] \right\} \quad (15)$$

Os termos representados por C_{ij} são denominados de co-espectros, enquanto os termos Q_{ij} , de espectros de quadratura, os índices de 1, 2 e 3 substituem, respectivamente, η (*heave*), η_x (*roll*) e η_y (*pitch*) por simplicidade. Na equação (15) o termo $C_{11}(f)$ é igual a $S(f)$ e o restante da equação equivale a $D(f, \theta)$.

Dessa forma, é possível obter o espectro direcional de ondas a partir das correlações cruzadas das series de *heave*, *pitch* e *roll* adquiridas pela IMU da BMO.

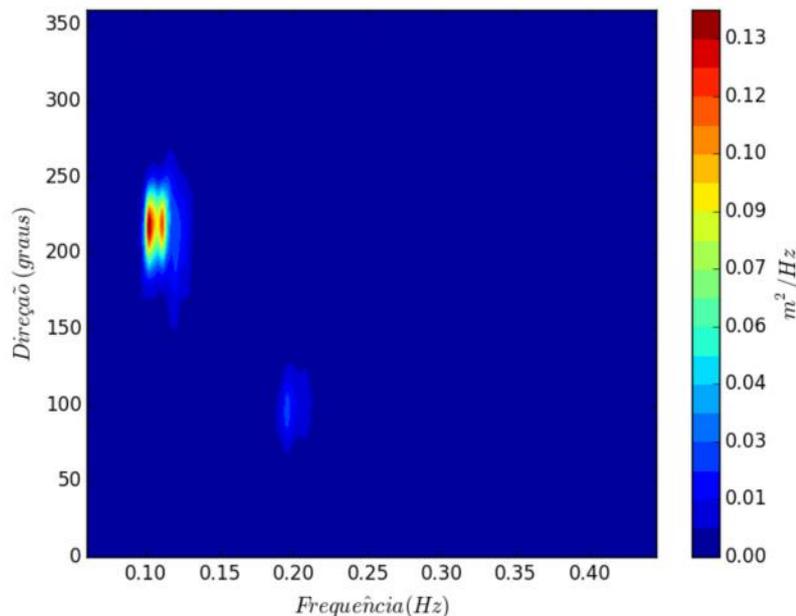


Figura 22 - Exemplo de um espectro direcional de ondas.

³⁰ TriAxys da AXYS Technologies, adaptado de Moraes, 2015.

Na avaliação da incerteza de medição de ondas, foram utilizados os dados coletados pelo sistema da Axys³¹, como ilustrado na Figura 23, instalado na boia Cabo Frio 2, do PNBOIA (Marinha do Brasil). A Figura 24 mostra o sensor de onda Hippy-40³² da Datawell BV.



Figura 23 – Unidade TRIAXYS Directional Wave Sensor da Axys.



Heave	Scale	1.0 V/m, maximum range ± 10 m (analog output)		
	Scale accuracy	< 0.5% of measured value after calibration		
	(gain error)	< 1.0% of measured value after 3 year		
	Zero-offset	< 30 cm (300 mV), typically 3 cm		
	Noise	< 1 cm peak - peak		
	Frequency response	Period	Amplitude transfer	Phase-shift
		30 s	-28.6%	+98°
20 s		-8.5%	+64.5°	
15 s		-3.0%	+47°	
10 s		-0.7%	+30.5°	
5 s		-0.1%	+15°	
2.5 s	0.0%	+7.5°		
Pitch-roll	Output	output is proportional to the sine of angle γ between axis and horizontal plane		
	Scale	10 siny (in Volts)		
	Scaling error	< 0.5%		
	Zero offset	< 0.5°		
	Zero stability	< 1° after quick rotation around vertical		
		< 0.5° with time, over one year		
	Noise	< 0.05° peak		
Bandwidth	low pass third order filter, up to 1 Hz: amplitude transfer within 1% linear phase shift equal to 0.06 seconds up to 5 Hz: within 6 dB			

Figura 24 – Sensor Hippy-40 (Datawell) para medição de heave, pitch and roll.

³¹ Moraes, 2015 – adaptado

³² Datawell BV - http://www.datawell.nl/Portals/0/Documents/Brochures/datawell_brochure_hippy-40_b-12-01.pdf.

Esse sensor é considerado referência para medição de parâmetros de ondas, sendo empregado nessa função pelo NDBC.

Não foram encontradas referências que especifiquem valores mínimos para exatidão, resolução ou qualquer outro requisito para medição de onda.

2.5 – Medição de corrente marinha

Nesse tipo de medição com boias são empregados perfiladores acústicos, que medem um perfil de velocidades e direções das correntes marinhas.

Seu funcionamento consiste na emissão de pulsos acústicos (pings) em uma dada frequência que ao colidir com obstáculos, se dispersam e uma parcela retorna ao equipamento. A diferença entre as frequências do pulso emitido e a do pulso de retorno é denominada *doppler shift*, e segue a equação (16)³³:

$$F_d = 2 \times F_f \times \left(\frac{V}{c}\right) \quad (16)$$

Onde:

F_d – frequência doppler (doppler shift);

F_f – frequência do pulso emitido (fonte);

V – velocidade relativa de deslocamento dos espalhadores (*scatterers*);

c – velocidade do som no meio (m/s).

Sabendo-se a velocidade do som no meio, o período de tempo entre a emissão e recepção do pulso sonoro indica a distância que ele percorreu e determina a localização das partículas que originaram o sinal refletido. Medindo continuamente o sinal de retorno de um único pulso, o equipamento obtém a velocidade para diferentes distâncias do transdutor. O perfil de velocidades obtido é então dividido em faixas ou células³⁴, as quais representam a média do sinal refletido para um determinado período, como ilustrado na Figura 25.

³³ SonTek / Xylem Inc.- Acoustic Doppler Profiler Principles of Operation (2000)

³⁴ SonTek / Xylem Inc.- Acoustic Doppler Profiler Principles of Operation (2000)

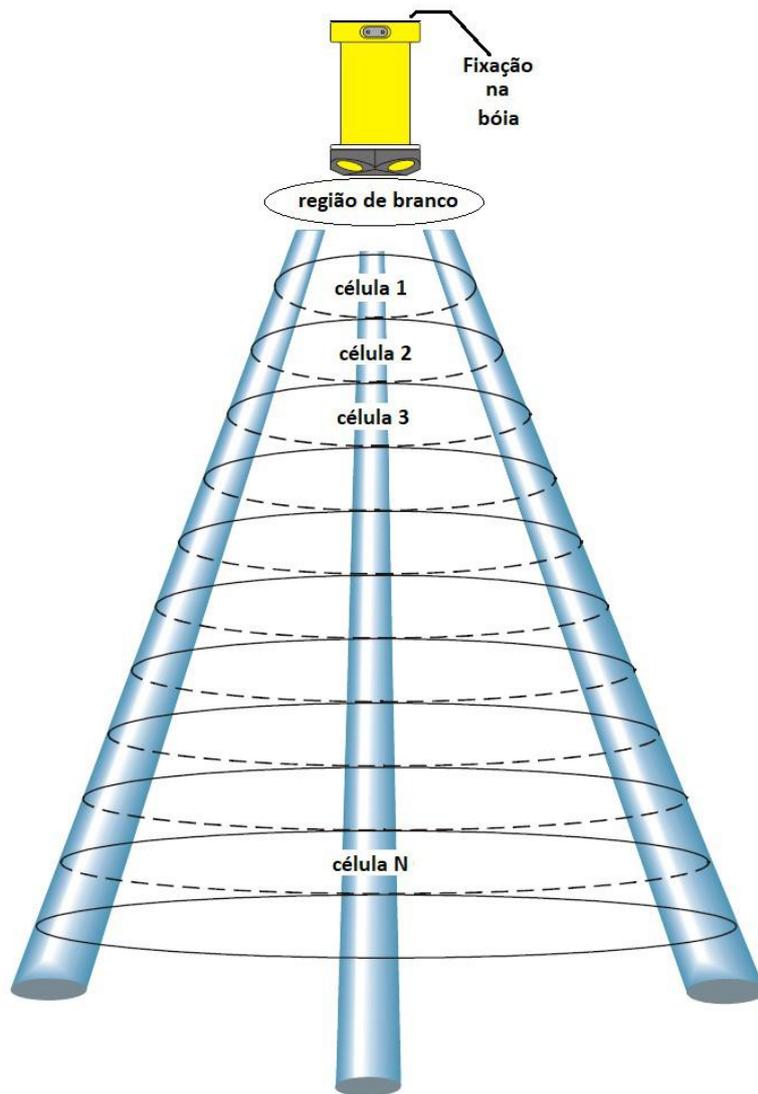


Figura 25 – Ilustração de funcionamento de um perfilador acústico.

O Perfilador Acústico calcula o componente da velocidade de fluxo relativo (V) na direção de cada feixe acústico³⁵ a partir de F_d (Figura 26).

Para uma dada profundidade de célula, a partir da equação (16), a velocidade é calculada conforme se segue:

$$V = F_d \times \frac{c}{2 \times F_s \times \cos\theta} \quad (17)$$

³⁵ RD Instruments - <http://www.teledynemarine.com>

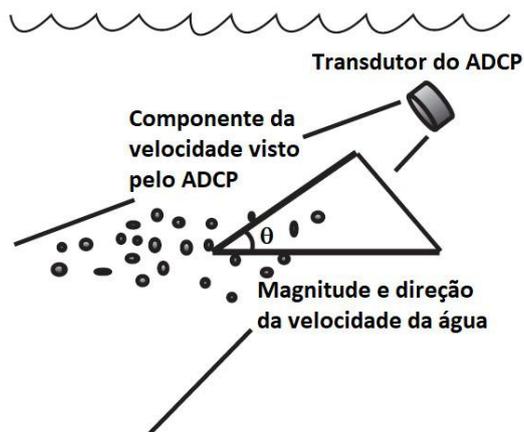


Figura 26 – Representação da medição de velocidade por um perfilador acústico com transdutor.

Onde θ é o ângulo entre o vetor de velocidade relativa dos espalhadores (scatterers) e a linha entre o pulso de retorno do perfilador acústico.

Em um perfilador acústico, o número de transdutores pode variar, sendo usualmente constituído de três a quatro transdutores. As velocidades medidas são a projeção das velocidades ortogonais no eixo do feixe acústico, relativas ao posicionamento dos transdutores.

Em função do fabricante, os modelos possuirão recursos e características próprias, mas de forma geral, o funcionamento do perfilador acústico obedece ao descrito.

O modelo de perfilador acústico cujas características serão abordadas nesse trabalho é o *Workhorse Long Ranger 75-kHz* de quatro feixes, fabricado pela RD Instruments (Figura 27), que utiliza três feixes para medir a velocidade e um quarto que se destina à redundância e avaliação da qualidade dos dados.



Figura 27 – perfilador acústico RD Workhorse Long Ranger 75-kHz.

Informações relativas às compensações realizadas pelo equipamento para correção de inclinação, compasso e heave nas medições de velocidade, direção e profundidade de corrente marinha, não estão presentes no arquivo de dados disponível. Como essas compensações ocorrem independentemente de qualquer intervenção do usuário, incluindo as estimativas dessas correções, a avaliação de incerteza ficaria mais completa.

Excetuando as características construtivas do equipamento (ângulo dos transdutores em relação o eixo vertical e o desempenho dos diversos sensores), sua melhor *performance* está vinculada à correta configuração dos diversos parâmetros existentes no programa de controle.

No presente trabalho, será admitido que o equipamento estivesse instalado e configurado adequadamente, seguindo as orientações de manuais e documentos de referência do fabricante.

Assim como no caso de medição de ondas, não foram encontradas referências que especifiquem valores mínimos para exatidão, resolução ou qualquer outro requisito para medição de correntes marinhas com perfilador acústico.

3 – AVALIAÇÃO E EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO SEGUNDO O GUM

De acordo com o GUM, temos que o processo de medição é o ato de atribuir um valor a alguma variável física, operando sensores e instrumentos, em conjunto com procedimentos de aquisição. Na medida ideal, o valor atribuído pela medição seria o valor real da variável física que se pretende medir. No entanto, o processo de medição e os erros devidos a fatores ambientais introduzem incertezas na medições. Para dar alguma medida de confiança ao valor medido, os erros de medição devem ser identificados e estimados os seus efeitos prováveis sobre o resultado.

Na grande maioria dos casos o mensurando não é medido diretamente, ou seja, ele é o resultado da combinação de outras grandezas. Dessa forma, primeiramente há que se descrever essas relações:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \quad (18)$$

Nesse caso, Y é a grandeza de saída, que por sua vez é função das grandezas de entrada X_1, X_2, X_3 etc. As grandezas de entrada podem ser também mensurandos e serem funções de outras grandezas, que contém correções e fatores de correção para efeitos sistemáticos. Nesse raciocínio, a relação funcional f pode se tornar muito complexa, a ponto de não poder ser escrita de modo explícito.

O GUM interpreta a função f de modo mais amplo como sendo a função que contém todas as grandezas, incluindo todas as correções e fatores de correção que possam contribuir com um componente significativo da incerteza para o resultado de medição.

Na prática existem inúmeras fontes de incerteza, associadas às grandezas de entrada, como por exemplo:

- a) definição incompleta do mensurando;
- b) realização imperfeita da definição do mensurando;
- c) amostragem não-representativa – a amostra medida pode não representar o mensurando definido;
- d) conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;
- e) erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos;

- f) resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;
- g) valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência;
- h) valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo de redução de dados;
- i) aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição;
- j) variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.

A Recomendação INC-1 (1980) do BIPM, sobre a qual se fundamenta o GUM, agrupa os componentes da incerteza em duas categorias baseadas em métodos específicos de avaliação, denominadas em *Tipos "A" e "B"*.

O objetivo das classificações é indicar duas maneiras diferentes de avaliar os componentes da incerteza, sendo que ambos os tipos são baseados em distribuições de probabilidade e os componentes de incerteza resultantes de cada tipo são quantificados por variâncias ou desvios padrão. Resumindo:

- **Avaliação do Tipo A** - método de avaliação da incerteza pela análise estatística de séries de observações, como por exemplo, o desvio padrão da média de uma série temporal.
- **Avaliação do Tipo B** - método de avaliação da incerteza por outros meios que não a análise estatística de séries de observações, como por exemplo, especificações do instrumento de medição.

A variância estimada u_2 é calculada a partir de uma série de observações repetidas, caracterizando um componente de incerteza obtido de uma avaliação do Tipo A, sendo conhecida como variância s_2 estatisticamente estimada. O desvio padrão u , obtido pela raiz quadrada positiva de u_2 , é por vezes denominada incerteza padrão do Tipo A. Para um componente de incerteza obtido por uma avaliação do Tipo B, a variância estimada u_2 é avaliada, usando-se o conhecimento disponível, e o desvio padrão estimado u é, por vezes, denominado incerteza padrão do Tipo B.

Assim, uma incerteza padrão do Tipo A é obtida a partir de uma função densidade de probabilidade, derivada da observação de uma distribuição de frequência, enquanto que uma incerteza padrão Tipo B é obtida de uma suposta função densidade de

probabilidade, baseada no grau de credibilidade de que um evento vá ocorrer. Como se observa, ambos os enfoques empregam interpretações reconhecidas de probabilidade.

Os procedimentos descritos no GUM, englobando todas as orientações para a determinação da incerteza de uma medição, podem ser aplicados em um sem número de medições, inclusive em medições no mar. Seu caráter genérico faculta essa interpretação e sua aplicação deveria ser amplamente difundida de forma a adotar em suas práticas técnicas, os fundamentos baseados em normas e recomendações de organizações pertinentes, como a ISO.

De maneira esquemática, a avaliação da incerteza de medição segundo os critérios descritos³⁶, envolve as etapas indicadas na Figura 28.

A parte superior esquerda da figura (delimitada pelas linhas tracejadas) refere-se à obtenção de uma estimativa y e da grandeza de saída Y e da incerteza-padrão associada $u(y)$, em função das incertezas-padrão $u(x_1), \dots, u(x_N)$, que por sua vez são decorrentes das fontes de incerteza relacionadas na função de medição Y . Quanto mais fontes de incerteza sejam relacionadas, tanto mais completa será a avaliação, tornando mais realista o resultado na medição. O restante da figura refere-se à determinação de um intervalo de abrangência para Y .

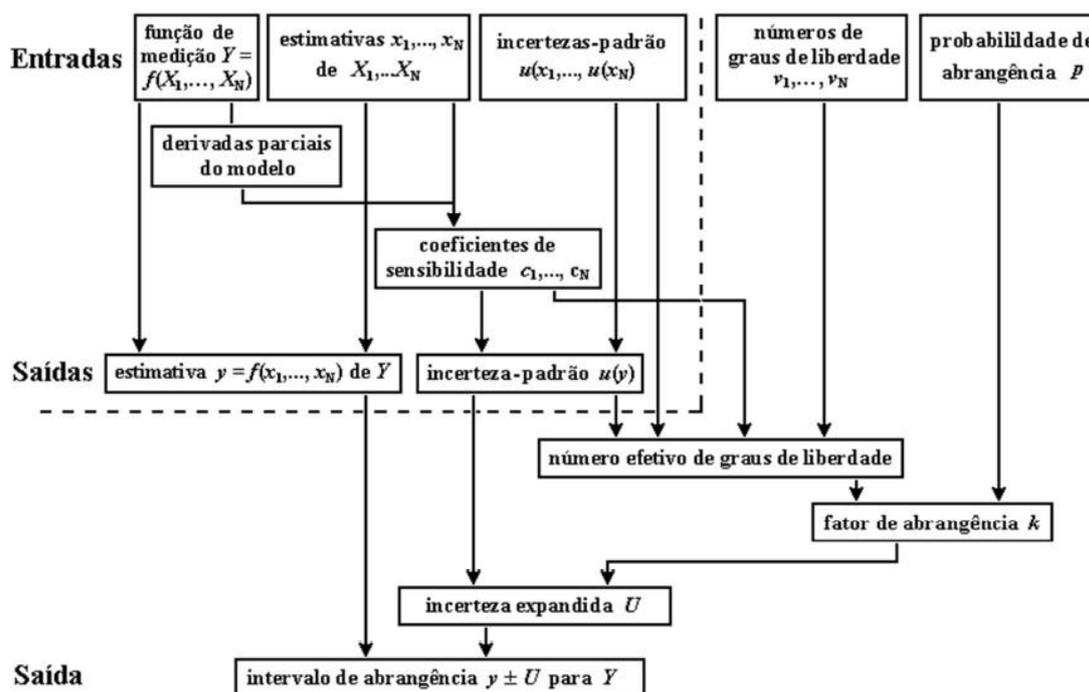


Figura 28 – Etapas que envolvem a avaliação da incerteza de medição.

³⁶ Introgum_2009.pdf - http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes_avulsas.asp

A preocupação com a qualidade dos resultados deveria sempre ser antecedida pelo cuidado com a fonte dos dados: equipamentos calibrados, procedimentos de medição que contemplem, senão todas, mas o maior número de situações passíveis de ocorrência e que podem alterar a qualidade dos dados coletados, planejamento das medições, capacitação dos colaboradores envolvidos, dentre outras.

Se por um lado há vastas referências sobre a aplicação dos conceitos aqui resumidos na indústria em geral e laboratórios de calibração, não se encontra muitas referências relacionadas à medições realizadas no ambiente marinho, sobretudo quando equipamentos de medição são fixados à estruturas que, de alguma forma, sofrem a ação de ondas, marés, vento etc. Os fabricantes dos equipamentos, em geral, apenas informam nos manuais as características mais importantes, sob o ponto de vista técnico, como exatidão (acurácia), resolução, repetibilidade, dentre outras. Evidentemente que tais informações são importantes, mas não deveriam ser as únicas.

A partir da realidade de que um equipamento passou a ser adotado como o *estado da arte* em dada medição, muito embora seguir as orientações do fabricante seja essencial para a boa prática, nem sempre tal procedimento signifique a plena garantia de medições totalmente isentas dos inúmeros fatores que a influenciam e que podem afetar ou superar sua capacidade de medição. A experiência mostra que no campo, sobretudo no ambiente marinho, inúmeras situações passíveis de ocorrência e não contempladas nos manuais, podem alterar a qualidade dos dados coletados. Assim, o conceito de incerteza de medição, passa a ter relevância maior, sobretudo em trabalhos técnico-científicos e os procedimentos de expressão e avaliação de incerteza de medição, como os descritos no GUM, podem e devem ser adaptados às características inerentes à estes ambientes.

Conforme o prefácio do ISO GUM 2008, ele tem como objetivos:

- promover informação tão completa quanto possível sobre como se chega a uma declaração de incerteza;
- fornecer uma base para a comparação internacional de resultados de medição.

Adicionalmente o guia pode ser utilizado também como o gerenciador técnico do processo de medição e ao longo do desenvolvimento deste trabalho, eventualmente,

outras citações, procedimentos e orientações poderão ser inseridas, de acordo com a necessidade.

As etapas da avaliação da incerteza obedecem à sequência que se segue, exemplificando a aplicação à medição de velocidade do vento com anemômetro de hélice.

i. Definição do mensurando.

A partir da equação (4), explicitando o mensurando v_{ah} como a velocidade do vento medida por um anemômetro de hélice, obtém-se a equação a seguir:

$$v_{ah} = M \times f + B \quad (19)$$

De acordo com documentação do fabricante³⁷:

- Pelo processo de fabricação do hélice, pode-se adotar o valor do offset (B) como igual a zero;
- Para o modelo 05106 considerado, M possui valor de 0,098 para conversão para m/s;
- Exatidão (acurácia) - $\pm 0,3$ m/s;
- A resolução especificada é de $\pm 0,098$ m/s.

Segundo um estudo realizado por Skey, North and Swail (2013)³⁸, com duas boias meteo-oceanográficas equipadas com anemômetros semelhantes ao modelo sob estudo, os efeitos relacionados aos movimentos de *pitch* e *roll* não tiveram influência significativa na medição de velocidade do vento, quando comparado à medição em uma plataforma fixa, próxima à uma das boias.

Pond (1968) descreve que para um tilt menor que 10° , o erro na velocidade do vento devido à inclinação variável do mastro onde o anemômetro esteja instalado, são considerados insignificantes (menos de 3%). Já para inclinações de 23° e 29° , o erro aumenta para 15% e 23%, respectivamente.

³⁷ Instruction Manual – Wind Monitor Series, Campbell Scientific Inc. - 2017

³⁸ Measurement of Winds and Waves from a NOMAD buoy in High Seastates, 2013.

Segundo Gilhousen (1998), análises do NDBC chegaram a resultados semelhantes a Pond (1968), concluindo que os efeitos dos movimentos da BMO na medição de velocidade do vento são insignificantes. Já segundo Howden et. al. (2007), por serem equipamentos de operação mecânica, estão sujeitos a falhas, sobretudo em velocidades acima de 27 m/s.

Os autores não definem uma correlação exata entre os movimentos aos quais a boia está submetida e a velocidade medida e as informações são consideradas estimativas, com base em estudos específicos. Ainda de acordo com Skey et. al. (1998), admitindo-se o princípio de que o movimento de subida e descida de uma onda pela BMO é praticamente simétrico, os efeitos relativos à tais movimentos se anulam.

Como não foram encontradas referências sobre outros possíveis fatores que influenciem as medições de velocidade do vento, especificamente o estado de mar e variações da camada limite na superfície (rugosidade), muito embora as referências citadas de alguma forma contemplem o assunto, para avaliação das medições de velocidade do vento com anemômetro de hélice, não serão consideradas essas influências. Também não serão consideradas outras influências como desgaste mecânico, atmosfera marinha, tilt constante etc. No entanto, ainda assim indica-se esses como “fatores não definidos” (δ_{nd}), sendo que mais adiante, na avaliação da incerteza das medições com anemômetro ultrassônico, será considerada a influência de um tilt constante.

ii. Diagrama de causa-efeito.

O diagrama de causa-efeito objetiva, por meio de uma representação gráfica, facilitar a identificação de fatores que influenciam o resultado de uma medição. Para elaboração do diagrama, faz-se necessário descrever a relação entre a grandeza sob medida (mensurando) e as fontes de incerteza. Assim, o diagrama será tão mais completo e ilustrativo, quantas sejam as fontes de incerteza identificadas e suas inter-relações, como ilustrado na Figura 29 (Elaine et. al., 2014).

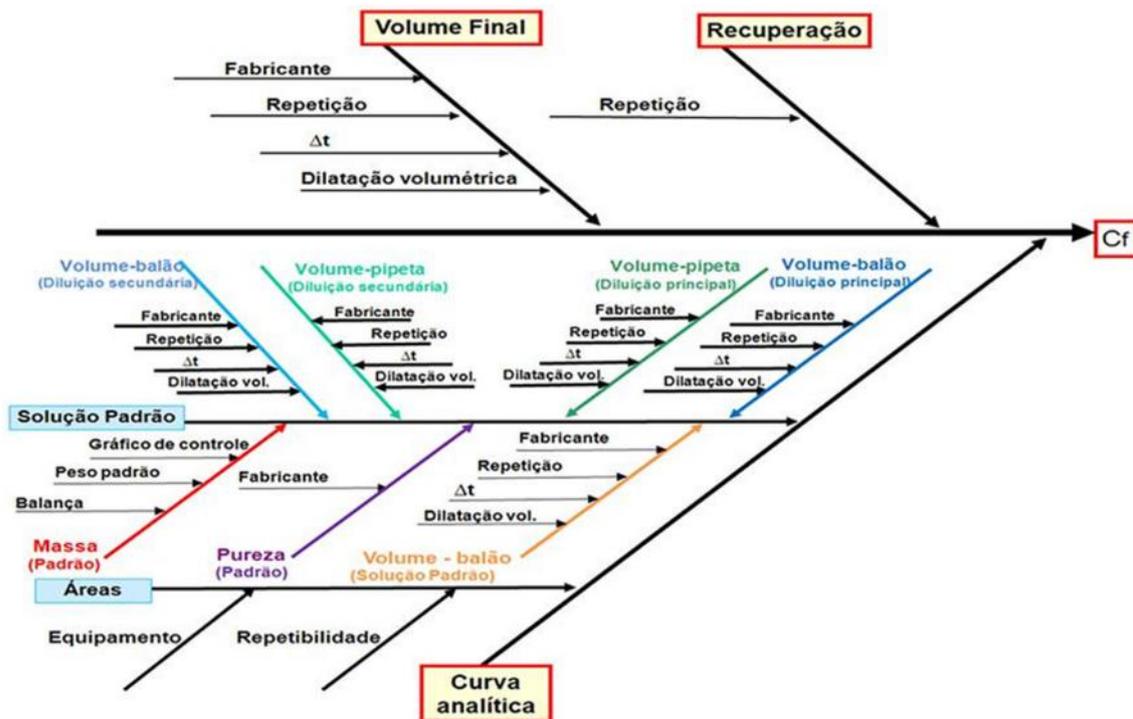


Figura 29 – Exemplo de um Diagrama de Causa-Efeito.

No caso exemplificado, a partir da equação (20), propõe-se a seguinte relação:

$$v_{ah} = f(f, \delta_{exat}, \delta_{res}, \delta_{rep}, \delta_{nd}) \quad (20)$$

Onde:

- f – frequência medida;
- $(\delta_{exat})_{ah}$ – parcela da incerteza devida à exatidão de velocidade do anemômetro para medição de velocidade;
- $(\delta_{res})_{ah}$ – parcela da incerteza devida à resolução de velocidade do anemômetro para medição de velocidade;
- $(\delta_{rep})_{ah}$ – parcela da incerteza devida à série temporal de velocidade com anemômetro de hélice.
- $(\delta_{nd})_{ah}$ – parcela da incerteza devida aos *fatores não definidos*.

Os *fatores não definidos* representam as fontes de incerteza que não foram ou não puderam ser estimadas, mas que afetam essa e todas as medições aqui avaliadas. Entretanto, por não ter com estimá-las com as informações disponíveis, essa parcela não será considerada nas avaliações.

Nessa avaliação da incerteza de medição adotou-se uma série de registros de medição de velocidade do vento com um dos anemômetros de hélice (a BMO estudada possui dois anemômetros instalados), referentes à BMO Cabo Frio 2, da Marinha do Brasil e integrante do Programa PNBOIA, localizada na costa do Rio de Janeiro (Figura 31), lançada em 20/07/2016.

Na consulta ao sítio³⁹, estavam disponíveis dados específicos dessa BMO (arquivo Bcabo_frio_argos.csv) e os designados “Novos dados qualificados” (arquivo cabofrio2.csv), sendo que este último arquivo é o resultado de um procedimento de validação.

Do total de medições listadas no arquivo, foram utilizados os dados horários de velocidade e direção do vento, compreendendo a data de início de operação da boia, até o dia 26/09/2016, totalizando 1000 valores iniciais de medições. A Figura 30 ilustra a série temporal da medição de velocidade do vento com anemômetro de hélice.

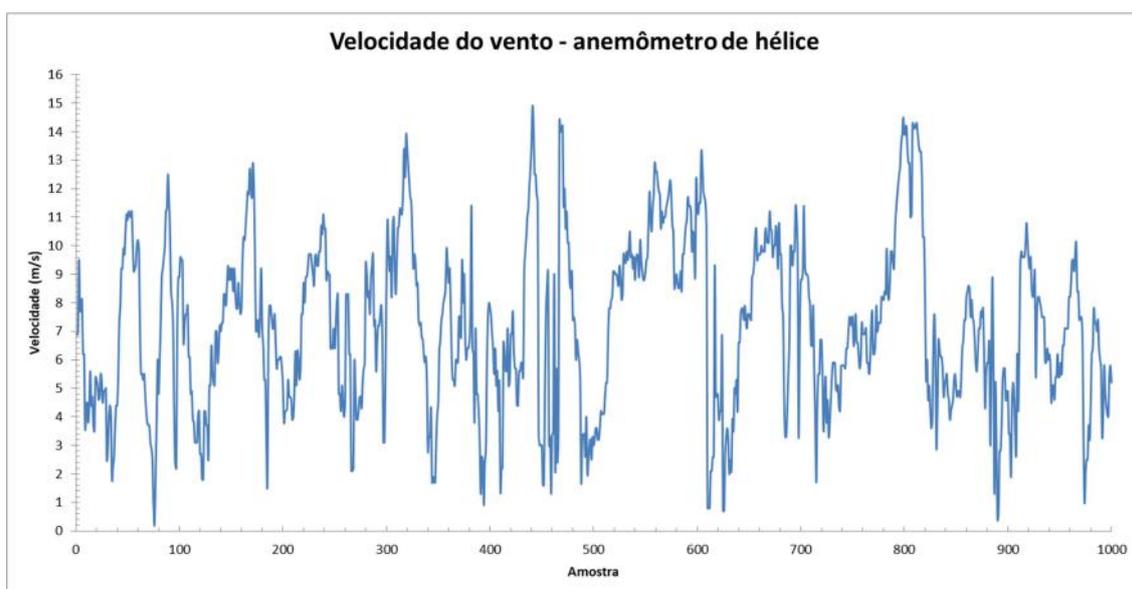


Figura 30 - Série temporal adotada para a avaliação da incerteza de medição de velocidade do vento com anemômetro de hélice.

A escolha desse período para avaliação deve-se ao fato de que, presumivelmente, o anemômetro estivesse com calibração recente, configurado convenientemente e ainda não ter sofrido a ação de agentes que degradassem seu funcionamento (desgaste mecânico, vandalismo, atmosfera marinha etc).

³⁹ <http://www.goosbrasil.org/pnboia/dados/> - consulta em 28/03/2018

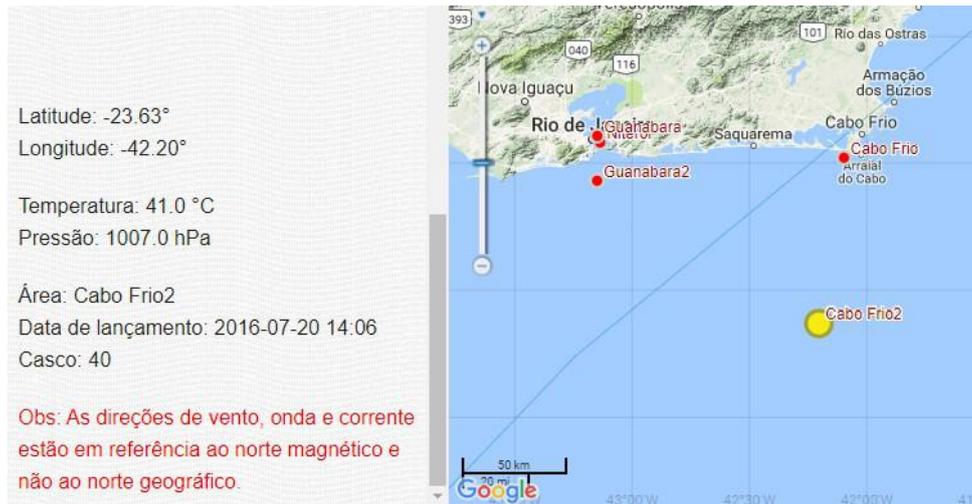


Figura 31 – Mapa de localização da boia Cabo Frio 2.

Assim sendo, a relação proposta entre as grandezas de entrada consideradas e a velocidade do vento será:

$$v_{ah}(m/s) = 0,098 \times f + (\delta_{exat})_{ah} + (\delta_{res})_{ah} + (\delta_{rep})_{ah} \quad (21)$$

A Figura 32 retrata o diagrama em questão.

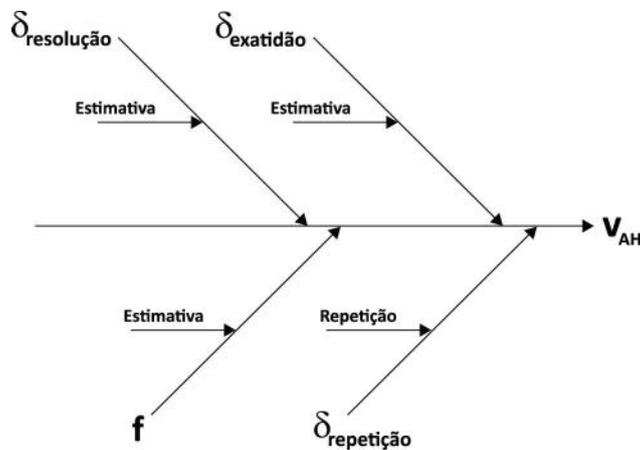


Figura 32 – Diagrama de Causa-Efeito para a medição de velocidade com anemômetro de hélice.

Uma vez definidas as fontes de incerteza, passa-se à aplicação do método em uma série de registros de medições reais.

iii. Avaliação das incertezas-padrão das grandezas de entrada do mensurando.

Com base em informações e especificações existentes em manuais, dados construtivos, certificados de calibração e na análise estatística de séries de dados das medições, passa-se a estimativa das incertezas relativas as fontes, doravante denominadas incertezas-padrão.

Em função do tipo de fonte de incerteza, a estimativa de incerteza a ser considerada terá particularidades⁴⁰. Para fontes de incerteza como resolução, acurácia (precisão), histerese e repetibilidade de um instrumento, por exemplo, usualmente adota-se como estimativa a metade do valor declarado pelo fabricante. Especificações que envolvam dimensões, parâmetros angulares e fatores de conversão, estima-se a incerteza-padrão como a ordem de grandeza do menor algarismo significativo da especificação do fabricante. Já para uma série temporal das medições, adota-se o desvio-padrão da média das leituras/medidas efetuadas⁴¹.

Na sequencia, deve-se determinar qual será a distribuição de probabilidade para cada fonte de incertezas, dependendo das informações disponíveis. De acordo com o GUM, cada estimativa de entrada e sua incerteza padrão associada são obtidas de uma distribuição de valores possíveis da grandeza de entrada. Essa distribuição de probabilidade pode ser baseada na freqüência, isto é, em uma série de observações ou pode ser uma distribuição *a priori*. Avaliações do Tipo A dos componentes da incerteza padrão são fundamentadas em distribuições de freqüência, enquanto que avaliações do Tipo B são fundamentadas em distribuições *a priori*.

Em avaliações do Tipo B, caso só seja possível estimar fronteiras limites para uma estimativa de incerteza de grandeza de entrada X_i , dentro de um intervalo a . e a_+ e se a diferença entre esses limites for designada por $2a$ (distribuição retangular simétrica), então a incerteza-padrão é determinada segundo a equação (22):

$$u(X_i) = \frac{X_i}{\sqrt{3}} \quad (22)$$

Em termos práticos, essa distribuição retangular aplica-se aos casos de estimativas relativas à precisão, resolução, histerese etc. Entretanto, em certos casos, é mais

⁴⁰ http://www.redemetrologica.com.br/uploads/pages/15/1405816078_DOC_128.pdf

⁴¹ <http://www.portalaction.com.br/incerteza-de-medicao>

realista esperar que valores perto dos limites, sejam menos prováveis do que os que estejam perto do ponto médio da distribuição. É, então, razoável substituir a distribuição retangular simétrica, por uma distribuição triangular.

Assim, supondo-se tal distribuição para a incerteza de grandeza de entrada, teremos que:

$$u(X_i) = \frac{X_i}{\sqrt{6}} \quad (23)$$

Para os casos de avaliações do Tipo A, onde haja uma série de n medições, define-se uma distribuição normal ou t -Student, para fontes de incerteza relativas à média dessa série, como se segue, onde s é o desvio-padrão:

$$u(\bar{X}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (24)$$

Quando um instrumento possua um certificado de calibração, nele irão constar informações que serão necessárias à determinação dessa distribuição específica. Desse certificado serão obtidas a incerteza expandida da calibração do instrumento $U(X_i)$ e o fator de abrangência k . Assim, a incerteza padrão para esse caso será dada por:

$$u(X_i) = \frac{U(X_i)}{k} \quad (25)$$

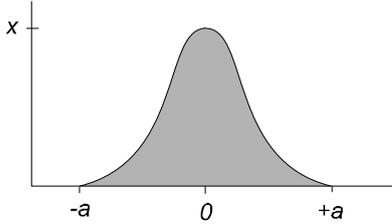
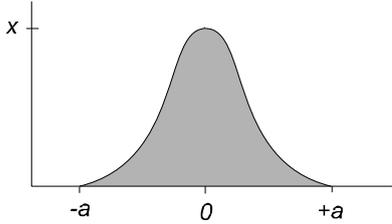
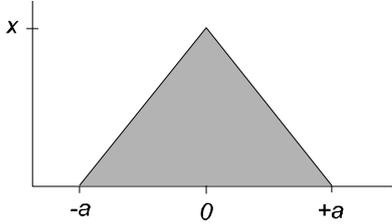
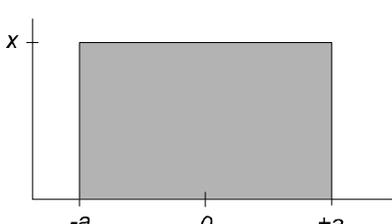
A Tabela 1 resume as distribuições das estimativas das fontes de incerteza das grandezas de entrada.

Um fato de importância relaciona-se com as unidades das grandezas de entrada do mensurando, cujas unidades devem estar no Sistema Internacional (SI), pois desta forma a unidade do mensurando resultante também estará no SI.

Conforme citado no Capítulo 1 (item 1.1, Figuras 5 e 6), os dados das medições de velocidade apresentam um número de algarismos significativos de desacordo com a resolução especificada para o anemômetro. Dessa forma, para efeito da avaliação da incerteza, adotou-se os dados qualificados, com os valores de velocidade referenciados à altura de 4,71m a partir da linha d'água, de acordo com a equação (2) e com número de algarismos significativos em concordância com a resolução do

anemômetro. Ao final, é avaliada igualmente a incerteza relativa à conversão para 10m, com base no intervalo de registros considerado.

Tabela 1 – Distribuição das estimativas das fontes de incerteza das grandezas de entrada.

Fonte de Incerteza	Distribuição de Probabilidade	Divisor
<p>Incerteza herdada da calibração de equipamentos e padrões</p>	<p>Normal ou t-Student, de acordo com o certificado de calibração</p> 	<p>Valor do coeficiente k no certificado de calibração</p>
<p>Desvio padrão da média de um conjunto de n medições repetidas</p>	<p>t-Student</p> 	<p>\sqrt{n}</p>
<p>Valores máximos e mínimos de variação ($\pm a$) e o valor mais provável</p>	<p>Triangular</p> 	<p>$\sqrt{6}$</p>
<p>Valores máximos e mínimos de variação ($\pm a$), como a resolução, exatidão do equipamento etc.</p>	<p>Retangular</p> 	<p>$\sqrt{3}$</p>

Obtendo-se $v_{ah} = 7,2 \text{ m/s}$ como a média dos 1000 valores do arquivo de dados adotado e considerando o fator de conversão $M = 0,098$, o valor da frequência $f = 73 \text{ Hz}$ é calculada pela equação:

$$f = \frac{v_{ah}}{0,098} \quad (26)$$

Para a estimativa de incerteza da frequência (ei_f), admitiu-se 1% do valor de f calculado, ou seja, 0,73 Hz. De acordo com o procedimento descrito anteriormente, considera-se que a função da distribuição de probabilidade dessa fonte de incerteza é retangular e, portanto como uma avaliação do tipo B, é dado pela expressão:

$$uv_{ah}(f) = \frac{ei_f}{\sqrt{3}} \quad (27)$$

Onde:

ei_f - é a estimativa de incerteza para a frequência f ;

As incertezas referentes às fontes exatidão e resolução, também são consideradas distribuições de probabilidade retangulares e seus valores são calculados pelas expressões a seguir:

$$uv_{ah}(\delta_{exat}) = \frac{(ei_{exat})_{vah}}{\sqrt{3}} \quad (28)$$

$$uv_{ah}(\delta_{res}) = \frac{(ei_{res})_{vah}}{\sqrt{3}} \quad (29)$$

Onde:

$(ei_{exat})_{vah}$ - estimativa de incerteza da exatidão de velocidade do anemômetro de hélice;

$(ei_{res})_{vah}$ - estimativa de incerteza da resolução de velocidade do anemômetro de hélice.

Para os valores adotados em ambas estimativas, serão consideradas a metade dos valores especificados pelo fabricante.

Para a fonte referente às medições, adota-se o desvio padrão (s), relativo ao número de registros considerados ($n = 1000$). Nesse caso, tem-se uma avaliação do tipo A, considerando-se uma distribuição normal. Nesse caso, o divisor será \sqrt{n} .

$$uv_{ah}(\delta_{rep}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (30)$$

A Tabela 2 resume, então, as definições das fontes para o cálculo da incerteza de medição de velocidade com anemômetro de hélice.

Tabela 2 – Definição das fontes para o cálculo da incerteza de medição de velocidade com anemômetro de hélice.

Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Tipo	Distribuição	Divisor	Unidades
f	73	0,01	0,73	B	retangular	$\sqrt{3}$	Hz
δ_{exat}	0,3	(exatidão)/2	0,15	B	retangular	$\sqrt{3}$	m/s
δ_{res}	0,098	(resolução)/2	0,049	B	retangular	$\sqrt{3}$	m/s
δ_{rep}	7,2	desvio-padrão	3,00	A	normal	\sqrt{n}	m/s

A Tabela 3 relaciona o resultado do cálculo das incertezas padrão das fontes, com base nas equações (26) a (30).

Tabela 3 – Incertezas Padrão associadas às fontes – velocidade do vento com anemômetro de hélice.

Incerteza Padrão		Unidades
$u(f)$	0,42	s^{-1}
$u(\delta_{exat})_{vah}$	0,1	m/s
$u(\delta_{res})_{vah}$	0,03	m/s
$u(\delta_{rep})_{vah}$	0,1	m/s

iv. Cálculos dos coeficientes sensibilidade do mensurando em relação a cada uma das suas grandezas de entrada.

Em linhas gerais, os coeficientes de sensibilidade cs descrevem como a estimativa de saída Y varia com alterações nos valores das estimativas de entrada $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ ⁴², como indicado na equação (31). Conhecendo-se a expressão que relaciona a grandeza de saída com as grandezas de entrada, as derivadas parciais de cada uma, em relação à saída, definem os coeficientes de sensibilidade.

$$cs_i = \frac{\partial f}{\partial X_i} \quad (31)$$

Onde:

- f – relação entre as grandezas de entrada e a grandeza de saída;
- X_i – grandezas de entrada.

⁴² Guia para a Expressão da Incerteza de Medição - Terceira Edição Brasileira.

A Tabela 4 lista os coeficientes de sensibilidade em função das fontes de incerteza determinadas.

Tabela 4 – Coeficientes de Sensibilidade – vel. do vento *c/* anemômetro de hélice.

Coeficientes de Sensibilidade	Unidades	
$\frac{\partial v_{ah}}{\partial f} = cs_f = 0,098$	0,098	m
$\frac{\partial v_{ah}}{\partial \delta_{exat}} = cs_{exat} = \delta_{exat}$	1	m/s
$\frac{\partial v_{ah}}{\partial \delta_{res}} = cs_{res} = \delta_{res}$	1	m/s
$\frac{\partial v_{ah}}{\partial \delta_{rep}} = cs_{rep} = \delta_{rep}$	1	m/s

v. Componentes de incertezas.

As componentes de incerteza $u_i(Y)$ são obtidas pela multiplicação das incertezas-padrão $u(X_i)$ pelos respectivos coeficientes de sensibilidade $cs(X_i)$. As componentes são assim obtidas:

$$uv_{ah}(x_i) = cs_i(x_i) \times u(x_i) \quad (33)$$

Onde:

- $uv_{ah}(x_i)$ - componente de incertezas da velocidade referente a cada fonte;
- $cs_i(x_i)$ - coeficiente de sensibilidade da velocidade em relação a cada grandeza de entrada;
- $u(x_i)$ - incerteza referente a cada fonte de entrada.

A Tabela 5 resume, então, as contribuições das incertezas para a velocidade do vento com anemômetro de hélice.

Tabela 5 – Componentes de incertezas – velocidade do vento.

Componentes de Incerteza	Unidades	
$uv_{ah}(f) = c_i f \times u(f)$	0,04	m/s
$uv_{ah}(\delta_{exat}) = c_i \delta_{exat} \times u(\delta_{exat})$	0,1	m/s
$uv_{ah}(\delta_{res}) = c_i \delta_{res} \times u(\delta_{res})$	0,03	m/s
$uv_{ah}(\delta_{rep}) = c_i \delta_{rep} \times u(\delta_{rep})$	0,1	m/s

As Componentes de Incerteza indicam o peso que cada uma na Incerteza Combinada.

vi. Incerteza Combinada.

A Incerteza Combinada uc , relacionada todas as incertezas de entrada. Quanto mais fontes forem identificadas e seus valores estimados, linhas serão adicionadas na planilha de cálculos, tornando o resultado da avaliação mais.

No exemplo, a Incerteza Combinada $uc(v_{ah})$ é obtida a partir da raiz quadrada do somatório dos quadrados das componentes de incerteza de cada fonte, conforme a expressão:

$$uc(v_{ah}) = \sqrt{[uv_{ah}(M)]^2 + [uv_{ah}(f)]^2 + [uv_{ah}(\delta_{exat})]^2 + [uv_{ah}(\delta_{res})]^2 + [uv_{ah}(\delta_{rep})]^2} \quad (34)$$

Substituindo os valores, obtém-se uma incerteza combinada $uc(v_{ah}) = 0,2 \text{ m/s}$.

vii. Número de graus de liberdade efetivos.

O grau de liberdade associado à incerteza combinada $uc(v_{ah})$, chamado grau de liberdade efetivo v_{eff} , pode ser estimado por meio da fórmula de Welch-Satterthwaite, baseada em uma avaliação do tipo A, a partir da série de registros adotada (para $n = 1000$), como se segue:

$$v_{eff} = \frac{uc(v_{ah})^4}{\left\{ \frac{[cs(\delta_{rep}) \times u(\delta_{rep})]^4}{n-1} \right\}} \quad (35)$$

No caso específico da corrente avaliação, o resultado da equação (41) é $v_{eff} = 15948$.

O número efetivo dos graus de liberdade irá determinar o perfil da distribuição t -Student que será utilizada para definir o fator de abrangência k , a seguir.

viii. Fator de abrangência.

É um fator multiplicador adimensional da Incerteza Combinada $uc(v_{ah})$. Será obtido pela aplicação do grau de liberdade efetivo v_{eff} em t -Student. Em termos gerais, é

uma medida de confiabilidade que nesse caso é 1,96 para a probabilidade de abrangência de 95%.

ix. Incerteza Expandida.

A Incerteza Expandida será dada pela multiplicação do fator de abrangência k , pela incerteza combinada $uc(v_{ah})$.

Assim, a Incerteza Expandida da medição da velocidade com anemômetro de hélice, $U(v_{ah})$ é calculada por:

$$U(v_{ah}) = k \times uc(v_{ah}) = \pm 0,4 \text{ m/s} \quad (36)$$

Onde:

- k - fator de abrangência;
- $uc(v_{ah})$ - incerteza combinada para a medição de velocidade com anemômetro de hélice.

Substituindo-se os valores correspondentes, o resultado da medição de velocidade do vento⁴³ com o anemômetro de hélice na altura de 4,71m será:

$$v_{ah} = \left\{ \begin{array}{l} (7,2 \pm 0,4) \text{ m/s} \\ 7,2 \text{ m/s} \pm 5,6 \% \end{array} \right\}$$

Na Figura 33 é representado um gráfico do Balanço de Incerteza Combinada da velocidade do vento com anemômetro de hélice. O gráfico evidencia quais fontes de incertezas mais impactam nessa medição.

Observa-se que a fonte de incerteza com maior impacto na medição de velocidade com o anemômetro de hélice é a relativa à série temporal (51%). Essa preponderância deve-se à escolha da estimativa de incerteza, como o desvio-padrão da média da série temporal analisada. Esse pode não ser o melhor estimador para séries de dados ambientais, como será melhor abordado no próximo capítulo.

A segunda preponderante é a exatidão a qual, de certa forma, é alinhada com a sua resolução. Tal fato não significa propriamente um problema, visto que a orientação do

⁴³ A Figura 63 em Anexos (Item I) reproduz a planilha utilizada na avaliação.

WMO⁴⁴ sobre a resolução para esse tipo de medição (0,5 m/s) é superior a resolução especificada pelo fabricante do equipamento e, dessa forma, é suficiente para o fim à que se propõe.

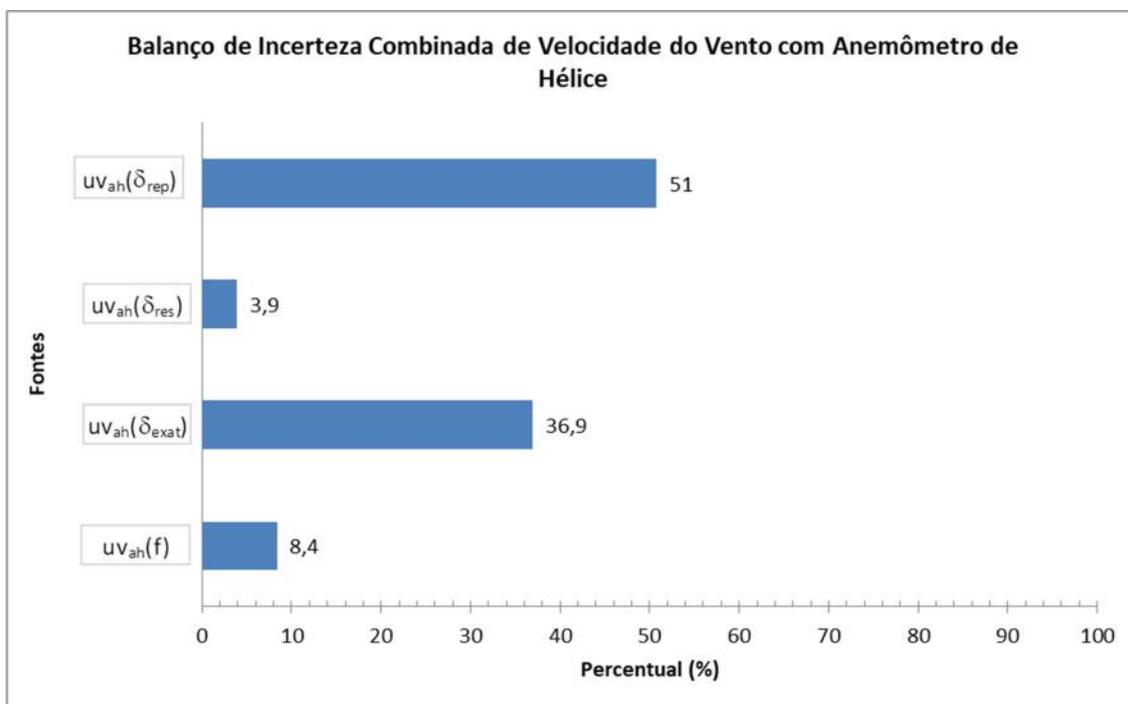


Figura 33 – Balanço de Incerteza Combinada para medição da velocidade do vento com anemômetro de hélice.

⁴⁴ WMO - Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation – 2012, pág. 1.5-2, item 5.1.2.

4 – ANÁLISES E RESULTADOS

No presente capítulo, continua-se a aplicação da metodologia descrita aos dados de medições realizadas por equipamentos instalados nas boias Cabo Frio 2 do PNBOIA e da REMO (BMOBR-05 e BMOP-04).

Cabe salientar que as avaliações das incertezas das medições aqui desenvolvidas, a partir de arquivos de dados obtidos de medições reais de instrumentos instalados em BMO's, não têm por objetivo principal analisar o comportamento, nem as características das grandezas envolvidas. Caberá a cada usuário, no âmbito de sua área de conhecimento, aplicar a metodologia a ser descrita às suas análises.

As séries de dados das medições, não necessariamente representam fenômenos meteo-oceanográficos específicos. Entretanto, as avaliações das incertezas de quaisquer medições devem ser calculadas e suas fontes qualificadas. Este procedimento auxiliará a busca pela melhoria da qualidade destes processos de coleta de dados.

Para efeito do presente trabalho, os dados avaliados são considerados como *mensurandos variáveis*⁴⁵. Entretanto, os estimadores, sobretudo do tipo A⁴⁶, com relação às series temporais de medições meteo-oceanográficas, deverão ser escolhidos com o devido cuidado. Pode-se considerar que, nesses casos, provavelmente o desvio padrão da média das amostras consideradas, não é a melhor representação da estimativa dessa fonte de incerteza específica. No entanto, optar-se por um estimador igual a zero, significará não considerar as influências de fontes de incerteza inerentes à medição em si, no cálculo da incerteza expandida.

Se essas fontes de incertezas são significativas em medições controladas, como as realizadas em laboratórios de calibração, não há porque supor que não sejam em medições relacionadas a experimentos de campo ou laboratoriais.

Como o GUM orienta que o conhecimento prévio de medições anteriores e do comportamento do mensurando, podem nortear as definições dessas estimativas, outros estimadores podem ser utilizados. Essa possibilidade objetiva a uma melhor representatividade da variação dessa fonte na incerteza expandida.

⁴⁵ G. Jr., Armando Albertazzi – Fundamentos da Metrologia Industrial e Científica.

⁴⁶ GUM, item 2.3.2 avaliação do Tipo A (da incerteza): método de avaliação da incerteza pela análise estatística de séries de observações.

Uma opção para esses casos, avaliada no presente trabalho, pode ser o *desvio de Allan*, obtido pela raiz quadrada da Variância de Allan. O desvio de Allan (obtido pela variância de Allan - equação 37) consiste de uma análise no domínio do tempo, originalmente proposta por David W. Allan (1966), para o estudo da estabilidade da frequência de osciladores que apresentam não estacionariedade como característica dos seus sinais. No entanto, tal método pode ser utilizado em estudos de resultados de medições realizadas por outros equipamentos, como apresentado por Moraes (2015).

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(m-1)} \sum_{i=1}^{m-1} (\overline{y_{i+1}} - \overline{y_i})^2} \quad (37)$$

Onde:

- y – série temporal;
- τ – intervalo e tempo entre amostras (1h);
- m – número de amostras (1000);
- $\overline{y_{i+1}} - \overline{y_i}$ – diferença entre dados sequenciais.

Para o exemplo do capítulo 3, observa-se a Figura 34. Nela estão representados os Balanços de Incertezas Combinadas para a medição de velocidade do vento com anemômetro de hélice, levando-se em conta os estimadores relativos à série temporal: zero, desvio de Allan e esvio padrão da média dos dados. A título de comparação, o gráfico também retrata as incertezas expandidas em função da estimativa escolhida.

Nas avaliações seguintes, os gráficos de Balanço de Incertezas Combinadas seguirão o mesmo procedimento.

Observa-se que, mesmo admitindo-se como zero, na estimativa relativa à série temporal, a redução da incerteza expandida não é significativa. Isso demonstra que a inclusão da fonte de incerteza relativa à série temporal é fundamental. O questionável é qual estimador a ser utilizado para cada tipo de dado ambiental, para o qual deverão ser feitos estudos específicos.

Como já mencionado, a identificação das fontes de incerteza de uma medição é uma das etapas mais importantes de qualquer avaliação. Tal identificação, no caso dos instrumentos instalados em BMO's, não é trivial e não foram encontradas referências na literatura, que relacionem essas fontes com os mensurandos considerados, a não ser aquelas relacionadas às especificações dos instrumentos, fornecidas pelos

fabricantes. Muito embora as avaliações de incerteza fiquem limitadas, nestes casos, a impossibilidade de se considerar um número maior de fontes envolvidas nas medições não invalida a aplicação da metodologia e tão pouco os resultados obtidos. Por fim, por simplificação de aplicação do método, admite-se que todas as grandezas de entrada não sejam correlacionadas.

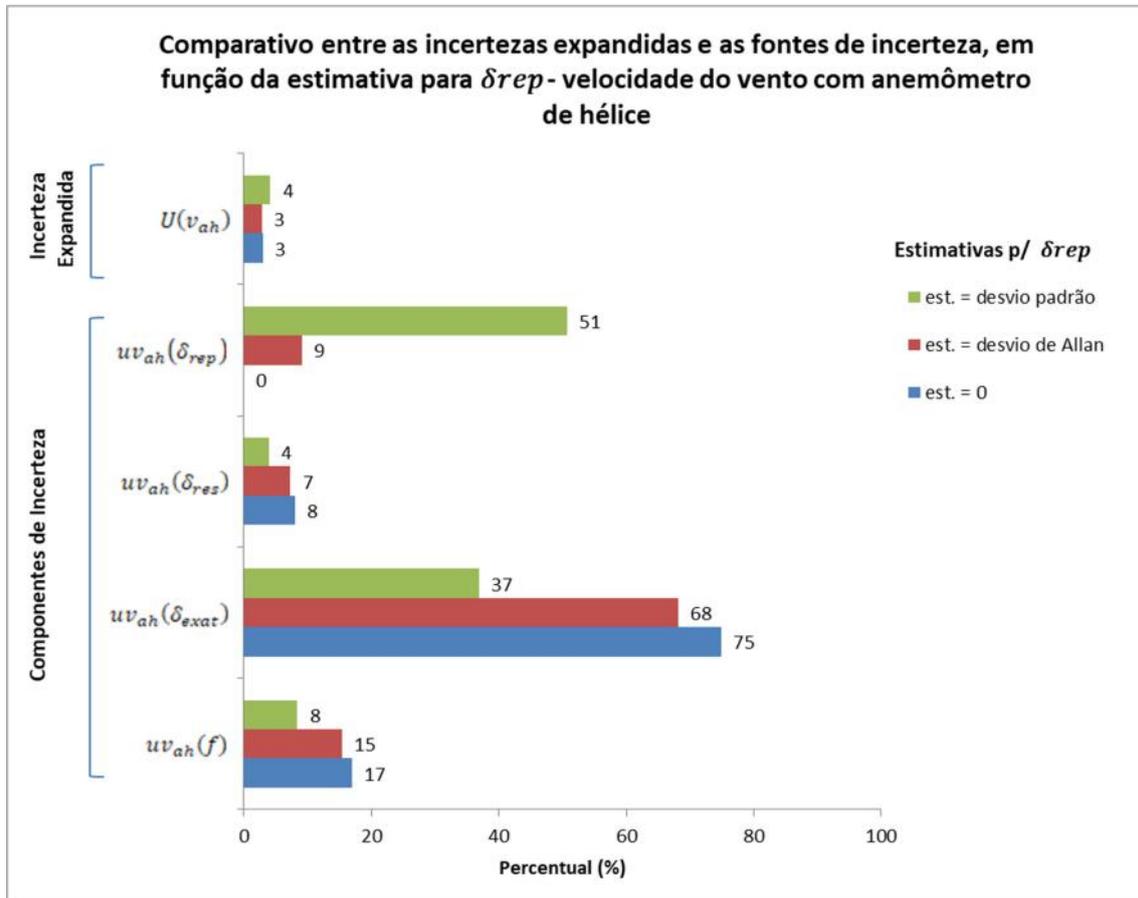


Figura 34 – Balanço de Incertezas Combinadas, comparando as incertezas expandidas em função da estimativa para δ_{rep} , para medição de velocidade do vento com anemômetro de hélice.

Pelo gráfico retratado na figura acima, observa-se que a adoção do desvio de Allan como estimador para a fonte de incerteza devida à série temporal, pode ser apropriada, mas sua adoção deve ser confirmada com estudos específicos.

4.1 – Avaliação da Incerteza de Medição de Velocidade do Vento

O procedimento já abordado no capítulo anterior, não contemplou a avaliação da incerteza da conversão do valor de velocidade calculado, para a altura de referência de 10m.

4.1.1 – Anemômetro de Hélice – velocidade do vento (conversão para a altura de referência)

Conforme já mencionado, os dados qualificados foram referenciados à altura do mastro de suporte do anemômetro, que é 4,71m, fazendo-se necessário converter o resultado, para a altura de referência de 10m. Dessa forma, de acordo com a equação (3), a relação entre as fontes de incerteza e a velocidade na altura de 10m, admitindo-se $z_2 = 10m$ como constante, teremos que:

$$(v_{ah})_{10} = f((v_{ah})_{4,71}, z_1, p) \quad (38)$$

Substituindo-se os valores correspondentes, a Tabela 6 resume as definições dos parâmetros para o cálculo da incerteza dessa conversão para a medição de velocidade.

Tabela 6 – Definições das fontes para o cálculo da incerteza de conversão para 10m.

Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Tipo	Distribuição	Divisor	Unidade
v_1	7,2	$uc(v_{ah})_{,71}$	0,6	A	normal	1,96	m/s
z_1	4,71	ordem de grandeza do menor algarismo significativo	0,01	B	retangular	$\sqrt{3}$	m
p	0,11	ordem de grandeza do menor algarismo significativo	0,01	B	retangular	$\sqrt{3}$	adimens.

Procedendo-se aos cálculos pertinentes, obtém-se então a velocidade e a incerteza expandida para a altura padrão de 10m.

$$(v_{ah})_{10} = \left\{ \begin{array}{l} (7,8 \pm 0,4) \text{ m/s} \\ 7,8 \text{ m/s} \pm 5,6\% \end{array} \right\}$$

Cabe ressaltar que a equação (3) utilizada para conversão da altura de medição para a de referência a 10m, admite que o anemômetro esteja instalado em uma estrutura

fixa. No entanto, uma boia está submetida à movimentos verticais devido às ondas, sendo muito mais suscetível a tal influência, quando comparado à uma embarcação maior, por exemplo (Figura 35).

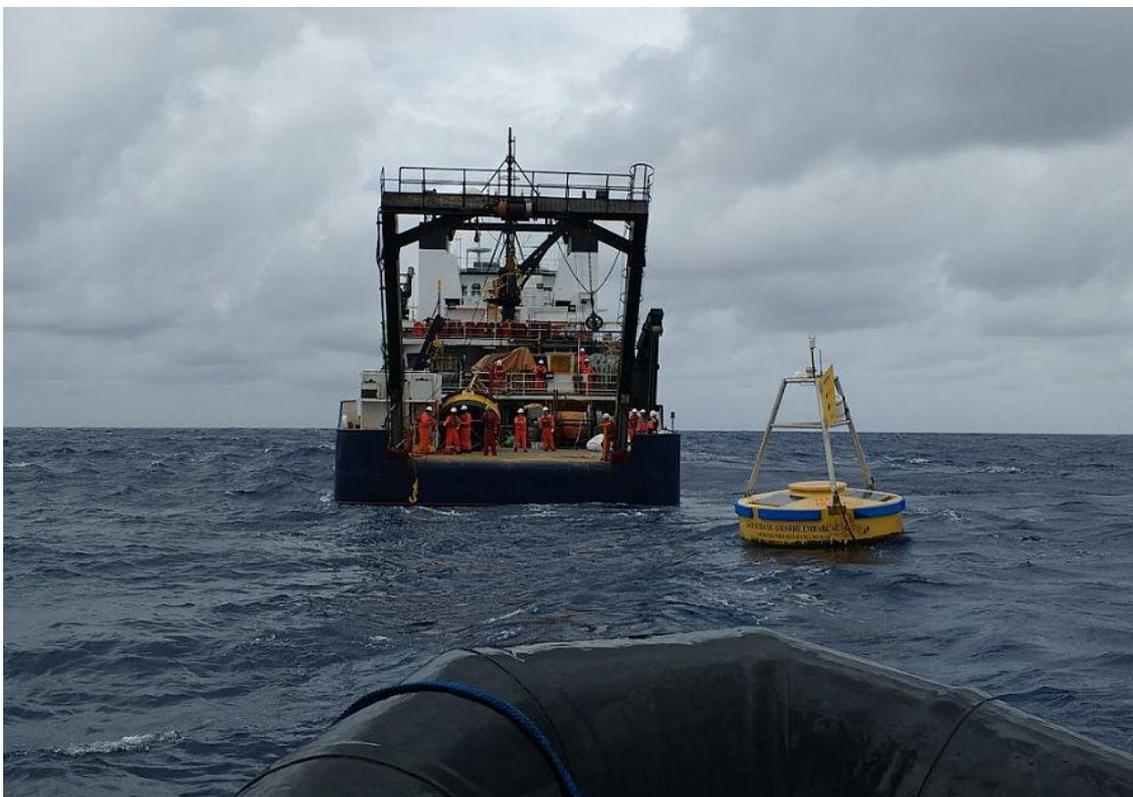


Figura 35 – Influência do *heave* na conversão para 10m (fonte: acervo LIOc).

Em vista disso, pode-se verificar uma situação mais realista, supondo-se a influência da oscilação média das ondas significativas no período observado, tendo em vista que todas as medições realizadas pela boia são simultâneas. Nesse caso, a média de ondas significativas, observando-se o mesmo número de amostras ($n = 1000$) e mesmo intervalo de tempo, a partir do arquivo de dados utilizado (arquivo cabofrio2.csv) é $h_s = 2,14 \text{ m}$. Adota-se assim, h_s como a nova estimativa para z_1 .

Considerando a nova estimativa e valor estimado para z_1 , temos o resumo das definições das fontes de incerteza, retratado na Tabela 7.

Efetuando o procedimento já descrito para os cálculos pertinentes, temos que a velocidade média do vento, na altura de referência de 10m, considerando a influência da média de h_s será:

$$(v_{ah})_{10} = \left\{ \begin{array}{l} (7,8 \pm 0,6) \text{ m/s} \\ 7,8 \text{ m/s} \pm 8\% \end{array} \right\}$$

Tabela 7 – Definições das fontes para o cálculo da incerteza de conversão para 10m, considerando a média dos valores de h_s como valor estimado.

Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Tipo	Distribuição	Divisor	Unidade
v_1	7,2	$uc(v_{ah})_{4,71}$	0,6	A	normal	1,96	m/s
z_1	4,71	média dos valores de h_s	2,14	B	retangular	$\sqrt{3}$	m
p	0,11	ordem de grandeza do menor algarismo significativo	0,01	B	retangular	$\sqrt{3}$	adimens.

Independente se o aumento observado na incerteza da medição será ou não significativo, a adoção de estimativas mais realistas indicará uma maior atenção na análise dos dados, o que levará a uma maior confiança no resultado informado.

4.1.2 – Anemômetro de Hélice – direção do vento

Seguindo o mesmo procedimento descrito no item anterior, a partir da equação (5), propõe-se a relação entre as grandezas de entrada e a direção do vento.

$$d_{ah} = f(V, \delta_{res}, \delta_{rep}, \delta_{nd}) \quad (39)$$

Onde:

- V – tensão de excitação (Volts);
- $(\delta_{res})_{dah}$ – parcela da incerteza devida à resolução de direção do anemômetro de hélice;
- $(\delta_{rep})_{dah}$ – parcela da incerteza devida à amostra de dados de direção.
- $(\delta_{nd})_{ah}$ – parcela da incerteza devida aos *fatores não definidos*.

A relação proposta será:

$$d_{ah}(^\circ) = 0,142 \times V + (\delta_{res})_{dah} + (\delta_{rep})_{dah} + \delta_{nd} \quad (40)$$

O Diagrama de Causa-Efeito fica como descrito a seguir (Figura 36).

A Figura 37 reproduz a série temporal da medição de direção do vento com anemômetro de hélice.

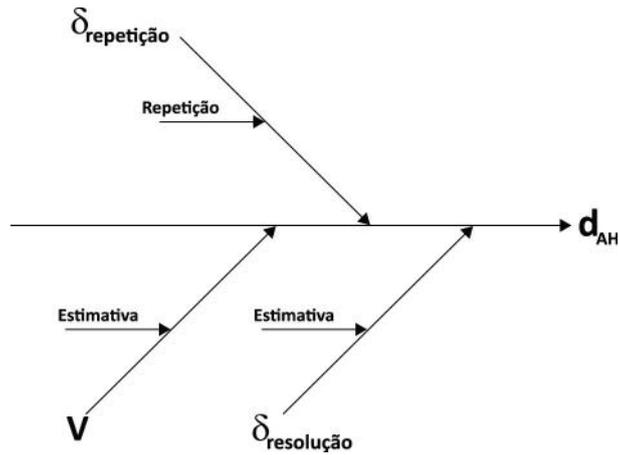


Figura 36 – Diagrama Causa-Efeito para direção do vento com anemômetro de hélice.

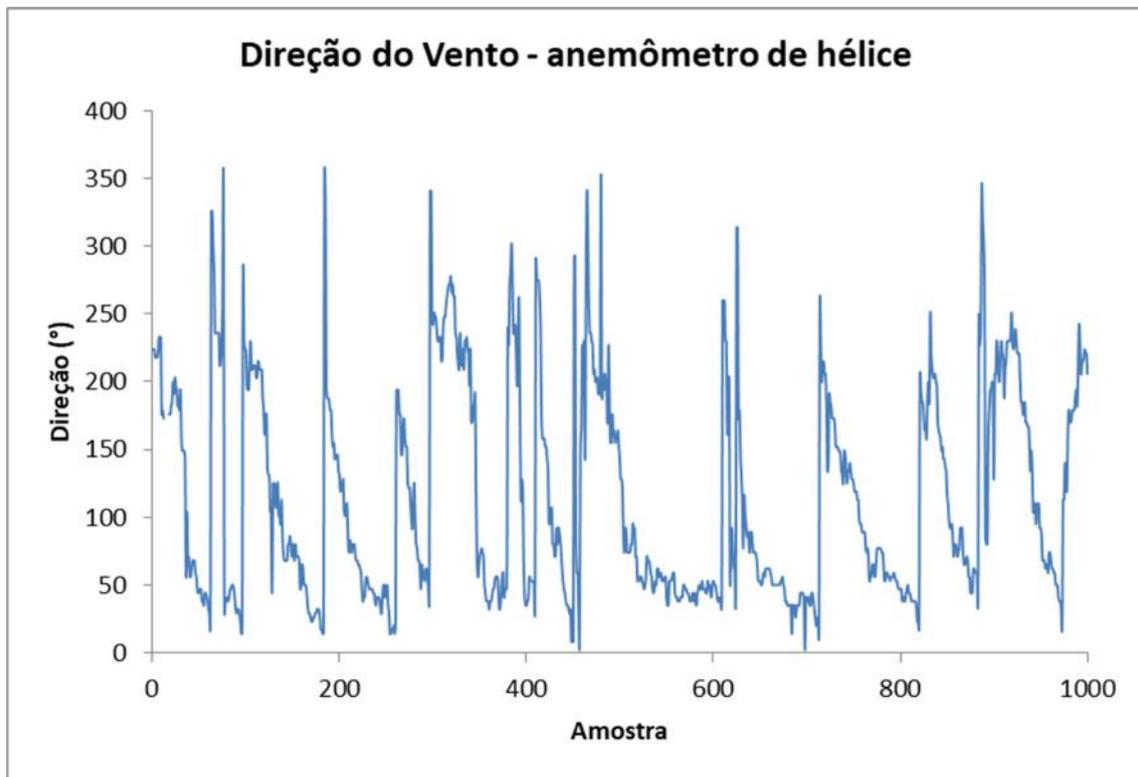


Figura 37 - Série temporal de direção do vento medida com anemômetro de hélice.

Os cálculos relativos às etapas são resumidos na Tabela 8. Nas avaliações seguintes, será adotado o mesmo critério de resumo dos resultados de cada etapa.

Na Figura 38, temos os Balanços de Incertezas Combinadas, em função do estimador para fonte devida à série temporal (δ_{rep}).

Tabela 8 – Cálculos da avaliação da incerteza de medição de direção do vento com anemômetro de hélice.

Relação entre as fontes de incerteza consideradas (direção do vento com anemômetro de hélice)							
$d_{ah}(\text{°}) = 0,142 \times V + (\delta_{res})_{dah} + (\delta_{rep})_{dah}$							
Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Distribuição	Tipo	Divisor	Unidades
V	2500	ordem de grandeza do menor algarismo significativo	1	retangular	B	$\sqrt{3}$	mV
$(\delta_{res})_{vau}$	0,5	(resolução)/2	0,25	retangular	B	$\sqrt{3}$	°
$(\delta_{rep})_{vau}$	115,00	desvio padrão das amostras	78,50	normal	A	\sqrt{n}	°
Incertezas Padrão		Coeficientes de Sensibilidade		Componentes da Incerteza		Unidades	
$u(V)$	0,58	$(cs)_V$	0,14	$ud_{au}(\delta_{rep})$	0,14	°	
$u(\delta_{res})$	0,14	$(cs)_{\delta_{res}}$	1	$ud_{au}(\delta_{exat})$	1	°	
$u(\delta_{rep})$	2,5	$(cs)_{\delta_{rep}}$	1	$ud_{au}(\delta_{rep})$	1	°	
Incerteza Combinada		Graus de Liberdade Efetivos		Fator de Abrangência		Incerteza Expandida	
$uc(d_{ah})$	0,04m	$veff = 1808$		1,96		$U(d_{ah})$	$\pm 6^\circ$

O resultado para essa medição é corretamente expresso como se segue:

$$d_{ah} = \begin{cases} (115 \pm 6)^\circ \text{ ou} \\ 115^\circ \pm 5\% \end{cases}$$

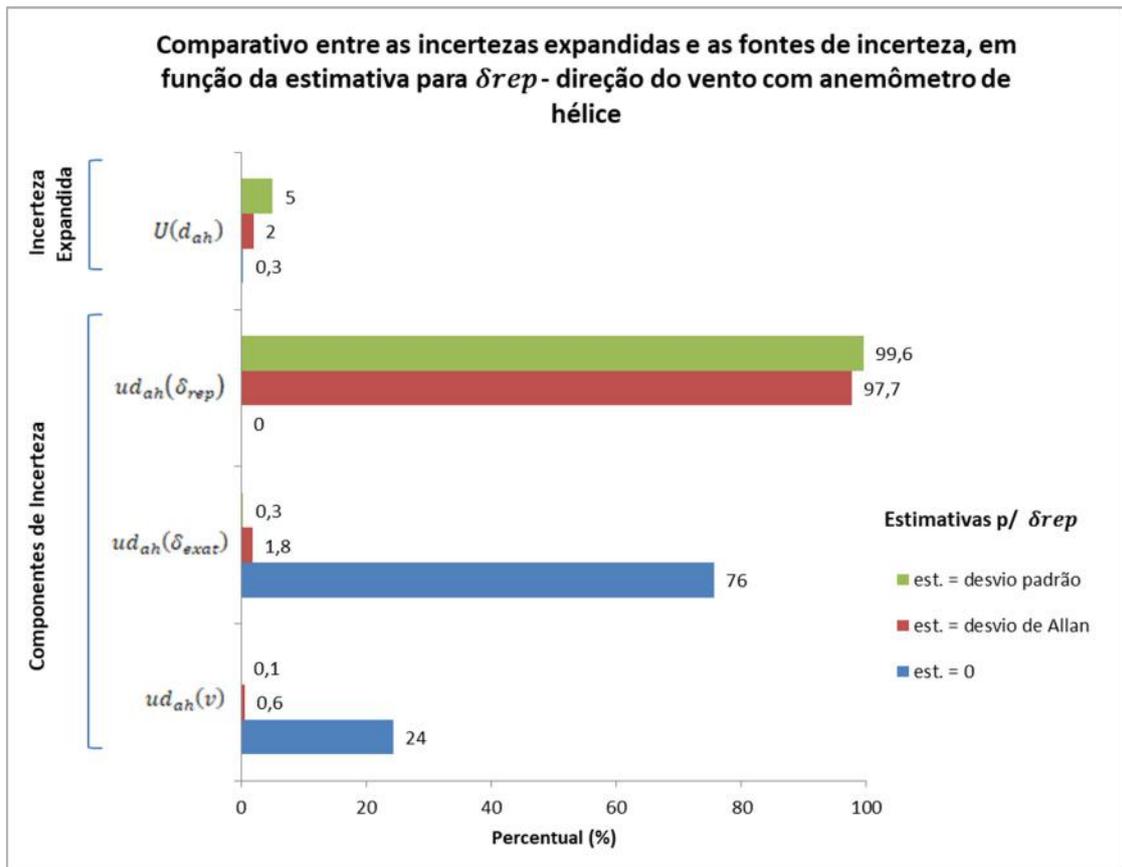


Figura 38 - Balanços de incertezas para medição da direção do vento com anemômetro de hélice.

O gráfico da Figura 38, também compara as incertezas expandidas em função desse estimador específico.

Observa-se pelo gráfico, que ambos os estimadores para a série temporal são inapropriados, o que talvez tenha relação com o fato de que a medição de direção não apresentar um comportamento de fácil tratamento estatístico. Tal fato reforça a necessidade de um estudo específico, para a determinação de um melhor estimador.

4.1.3 – Anemômetro Ultrassônico – velocidade do vento

Para a presente avaliação da incerteza de medição de velocidade e direção do vento com anemômetro ultrassônico, adotou-se uma série de registros de medição (arquivo CF01_201611_BMOP05.csv) referentes à boia BMOBR-05⁴⁷, do projeto REMO (Petrobras/COPPE), localizada a sudeste de Cabo Frio, RJ, lançada inicialmente em março de 2015 (Figura 39).

Do total de medições listadas no arquivo, foram utilizados 1000 registros de velocidade do vento, entre as datas de 22/03 a 04/04/2016, obtendo-se a média de 6,4 m/s, com um desvio padrão de 3,1 m/s. Os valores coletados estão referenciados à altura de instalação do equipamento na BMO, que corresponde a 3,8m a partir da linha d'água. Ao final, é avaliada a influência de um tilt constante de 10°, como também a incerteza relativa à conversão para 10m, de acordo com a equação (4), tendo como base o intervalo de registros considerado.

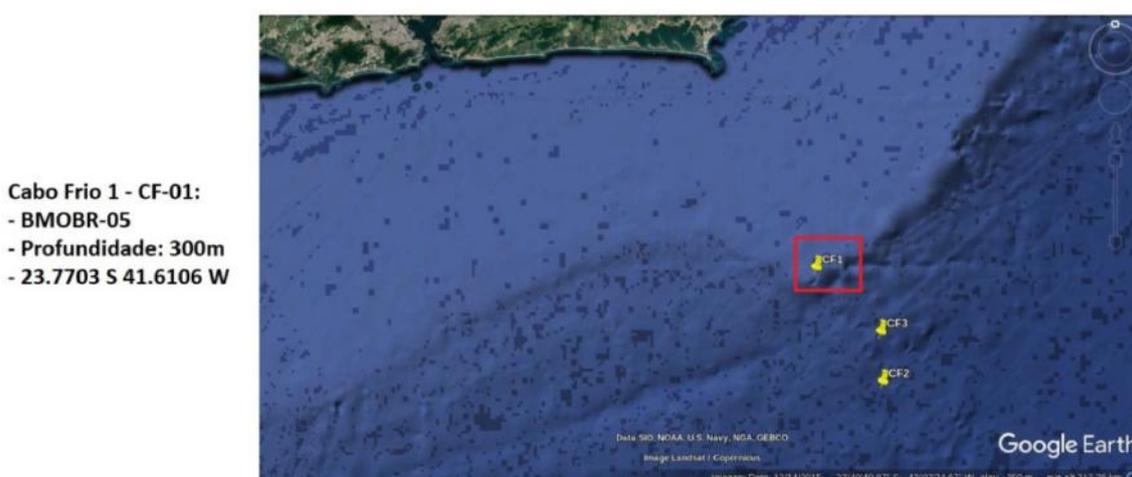


Figura 39 – Mapa de localização da boia BMOBR-05.

⁴⁷ Apresentacao_GOOSBR_2017.pdf – acervo LIOc.

Na Figura 40 encontra-se a reprodução da série temporal relativos à medição de velocidade do vento com anemômetro ultrassônico.

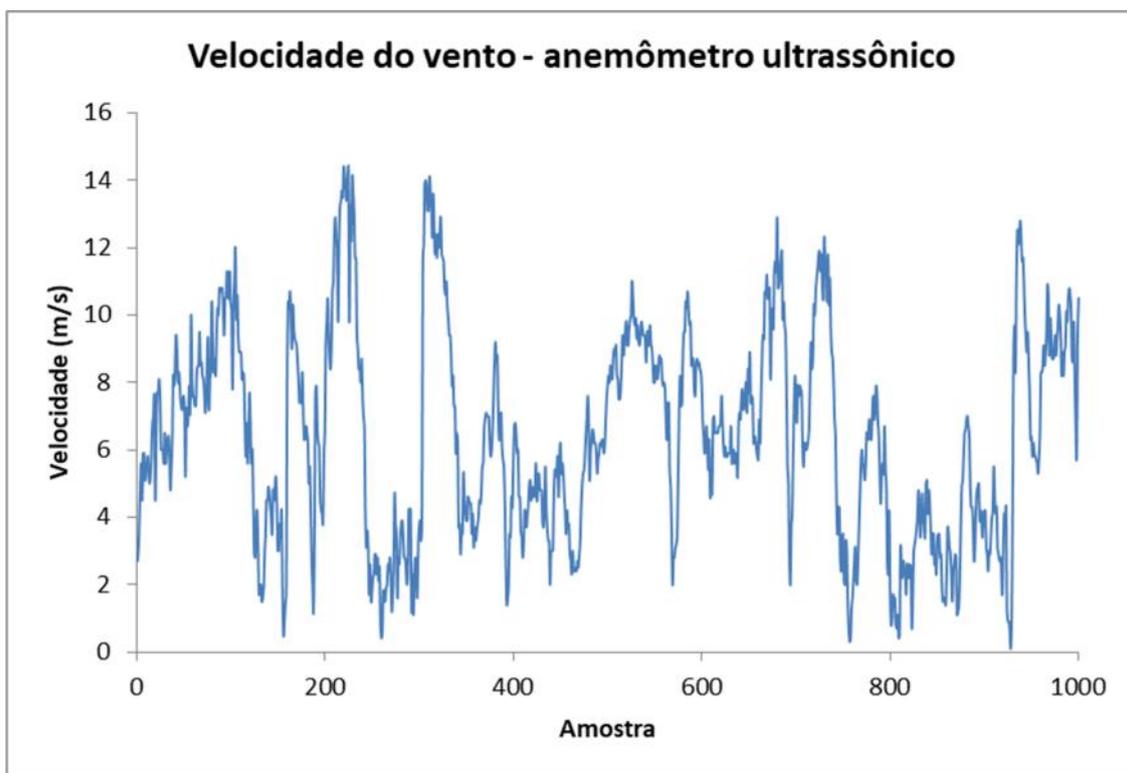


Figura 40 - Série temporal de velocidade do vento medida com anemômetro ultrassônico.

Pelas dimensões fornecidas pelo fabricante do medidor ultrassônico, obtém-se o valor de $L = 0,0987 \text{ m}$, que corresponde à distância entre transdutores. Tomando-se por base a velocidade média relativa a série temporal adotada, obtém-se $\Delta t = 0,0077 \text{ s}$.

Assim, seguindo o procedimento adotado, a Tabela 12 resume os cálculos efetuados, para a avaliação da incerteza de medição de velocidade do vento com anemômetro ultrassônico.

No gráfico de Balanço de Incertezas apresentado na Figura 41, identifica-se que as componentes da incerteza possuem pesos diferentes, dependendo do estimador.

Pelo gráfico acima, observa-se que adotando-se o desvio de Allan como estimador para a série temporal, obtém-se um melhor resultado. Como visto anteriormente, tal fato não significa que esse estimador seja o indicado para todas as medições de velocidade com anemômetro ultrassônico.

Tabela 9- Cálculos da avaliação da incerteza de medição de velocidade do vento com anemômetro ultrassônico.

Relação entre as fontes de incerteza consideradas							
$v_{au}(m/s) = [0,5 \times L \times (\Delta t)^{-1}] + (\delta_{exat})_{vau} + (\delta_{res})_{vau} + (\delta_{rep})_{vau}$							
Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Distribuição	Tipo	Divisor	Unidades
L	0,0987	ordem de grandeza do menor algarismo significativo	0,0001	retangular	B	$\sqrt{3}$	m
Δt	0,0077	ordem de grandeza do menor algarismo significativo	0,0001	retangular	B	$\sqrt{3}$	s
$(\delta_{exat})_{vau}$	0,3	(exatidão)/2	0,05	retangular	B	$\sqrt{3}$	m/s
$(\delta_{res})_{vau}$	0,1	(resolução)/2	0,15	retangular	B	$\sqrt{3}$	m/s
$(\delta_{rep})_{vau}$	6,4	desvio padrão das amostras	3,1	normal	A	\sqrt{n}	m/s
Incertezas Padrão		Coeficientes de Sensibilidade		Componentes da Incerteza		Unidades	
$u(L)$	0,0001	$(cs)_L$	0,0039	$uv_{au}(L)$	0,0000002		m
$u(\Delta t)$	0,0001	$(cs)_{\Delta t}$	832,6	$uv_{au}(\Delta t)$	0,048		s
$u(\delta_{rep})$	0,0980	$(cs)_{\delta_{exat}}$	1	$uv_{au}(\delta_{rep})$	0,098		m/s
$u(\delta_{exat})$	0,0866	$(cs)_{\delta_{res}}$	1	$uv_{au}(\delta_{exat})$	0,087		m/s
$u(\delta_{res})$	0,0289	$(cs)_{\delta_{rep}}$	1	$uv_{au}(\delta_{rep})$	0,029		m/s
Incerteza Combinada		Graus de Liberdade Efetivos		Fator de Abrangência		Incerteza Expandida	
$uc(v_{au})$	0,14 m/s	$veff = 4437$		1,96	$U(v_{au})$		$\pm 0,3$ m/s

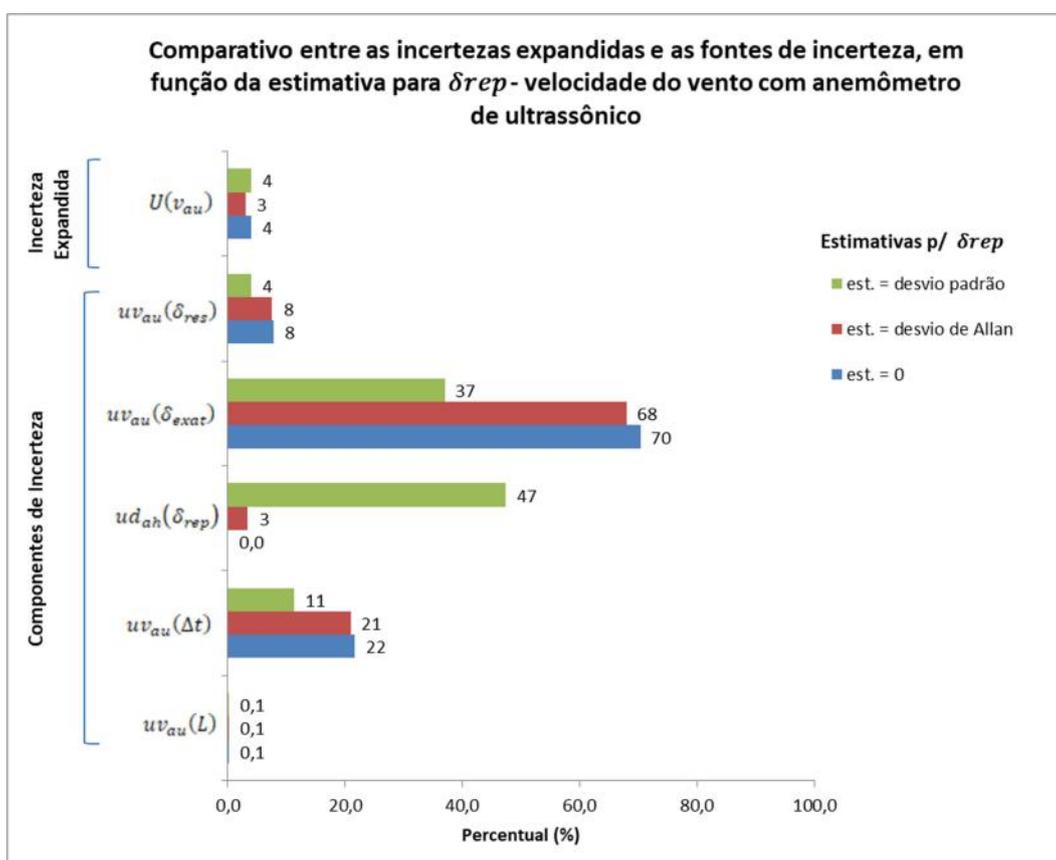


Figura 41 – Balanço de incertezas para medição da velocidade do vento com anemômetro ultrassônico.

Independente do peso da fonte de incerteza relativo à exatidão, considera-se que esta é adequada à finalidade da medição, visto não haver referências sobre quaisquer especificações mínimas para medição de velocidade do vento com esse tipo de equipamentos instalado em boia.

Da mesma maneira que o anemômetro de hélice, a partir da equação (3) avalia-se a incerteza relacionada à conversão da medida da velocidade média de 3,8m para a altura de referência de 10m. Teremos então que:

$$v_{au10} = \begin{cases} (7,1 \pm 0,4) \text{ m/s ou} \\ 7,1 \text{ m/s} \pm 5,2 \% \end{cases}$$

No caso do anemômetro ultrassônico, também se pode avaliar a influência das ondas, assim como no anemômetro de hélice. No entanto é importante ressaltar outra possibilidade, principalmente para esse tipo de medidor, cuja medição de velocidade é calculada com base em vetores e suas projeções, que se trata da influência de um tilt constante, na medição de velocidade. Nessas condições, como ilustra a Figura 42, o sensor ultrassônico de vento medirá uma velocidade que, em verdade, será uma projeção do vetor velocidade do vento (Figura 43).

Nessa análise, admitindo-se que a boia apresente um tilt θ constante, a equação (7) será reescrita como se segue:

$$v_{au} = 0,5 \times L \times \left(\frac{1}{\Delta t}\right) \times \cos(\theta) \quad (41)$$

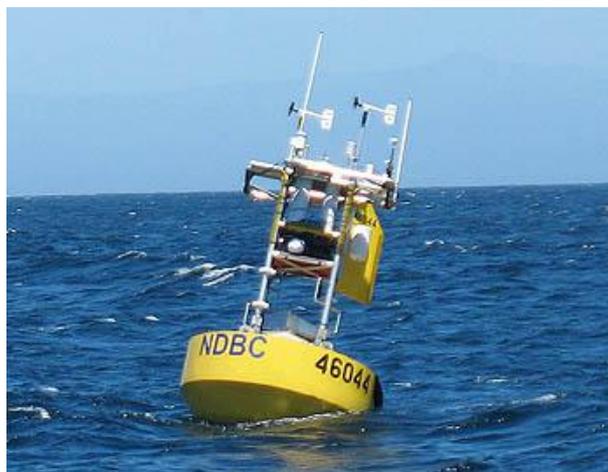


Figura 42 – Exemplo de uma BMO submetida a um tilt constante (fonte: <https://www.mbari.org/unique-three-way-partnership-yields-new-ocean-monitoring-buoy/>)

Para analisar como as variações do tilt da boia influenciam na medição de velocidade com o anemômetro ultrassônico, leva-se em conta as seguintes premissas:

- O vento se propagando sempre na mesma direção;
- Adota-se, por exemplo, um intervalo de variação para o tilt de 0° e 15°;
- Adota-se os mesmos valores para $\Delta t = t_f - t_r$ e para L , de acordo com o anteriormente descrito na avaliação de incerteza.

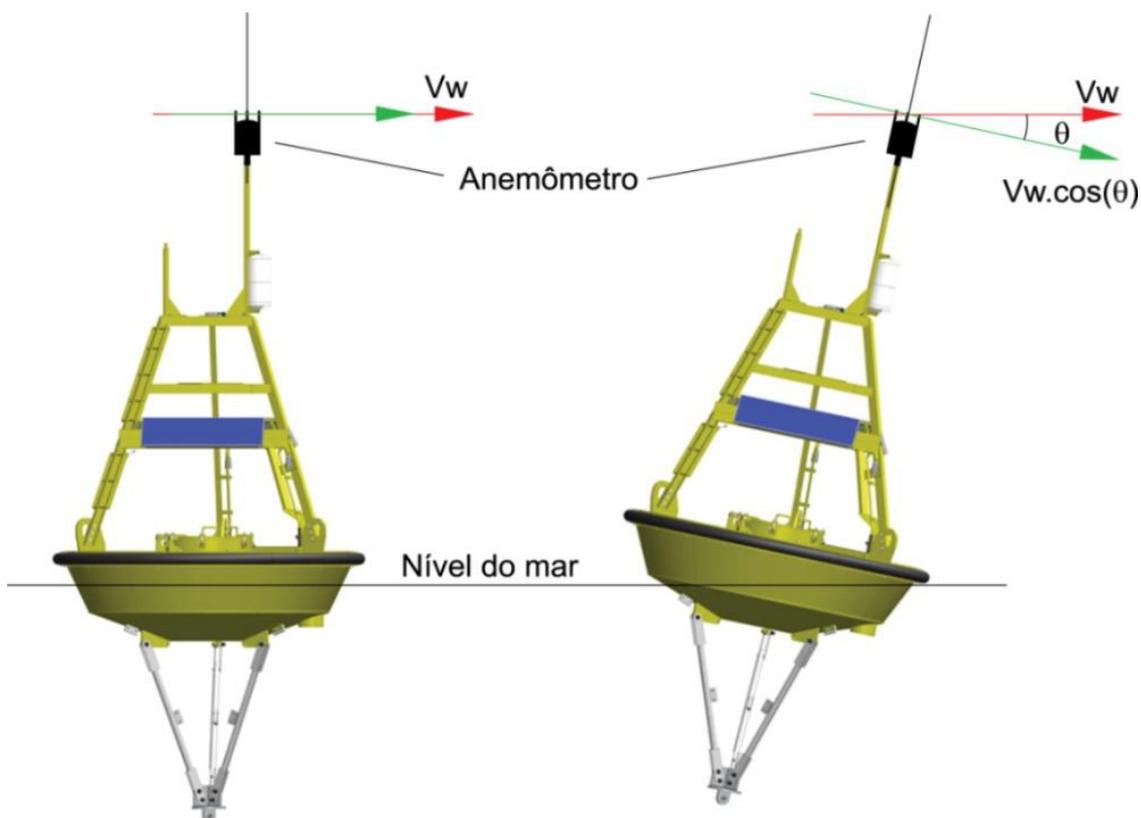


Figura 43 – Efeito do tilt na medição de velocidade com anemômetro ultrassônico.

Substituindo-se os valores, teremos o que resume a Tabela 13, que resume os resultados obtidos.

Tabela 10– Influência do tilt na medição de velocidade com anemômetro ultrassônico.

θ (°)	L (°)	Δt (s)	v (m/s)	Erro (%)
0	0,0987	0,0077	6,41	0
5			6,38	-0,4
10			6,31	-1,5
15			6,19	-3,4

O erros percentuais calculados não estão sendo analisados, nem o impacto que estes venham a acarretar. A análise em questão indica tão-somente, que erros não compensados, ocorrem ao longo da medição, em função da variação do posicionamento do instrumento. Caso o anemômetro medisse o tilt e fizesse as correções necessárias, na avaliação da incerteza seriam levadas em consideração as fontes relacionadas à medição do tilt e a relacionada ao fator ou método de correção empregado.

4.1.4 – Anemômetro Ultrassônico – direção do vento

Para a direção do vento, a avaliação da incerteza dessa medição utilizará como base a exatidão informada pelo fabricante e as informações relativas à análise estatística de 1000 registros do mesmo arquivo de dados utilizado anteriormente.

A Figura 44 reproduz a série temporal de medição de direção do vento com anemômetro ultrassônico.

A Tabela 14 resume as etapas e os cálculos efetuados, para a avaliação da incerteza de medição de direção do vento com o equipamento.

O resultado dessa medição de direção média do vento com anemômetro ultrassônico será corretamente expresso como se segue:

$$d_{au} = \begin{cases} (113 \pm 4)^\circ & \text{ou} \\ 113^\circ \pm 4\% \end{cases}$$

Para essa avaliação, o gráfico dos Balanços de Incertezas Combinadas é retratado na Figura 45.

O gráfico retrata que a parcela da incerteza devido à série temporal é a que possui maior peso na incerteza expandida $U(d_{au})$, independente do estimador adotado. Tal fato reforça a necessidade de mais estudos, valendo os mesmos comentários feitos para a medição de direção do vento com anemômetro de hélice.

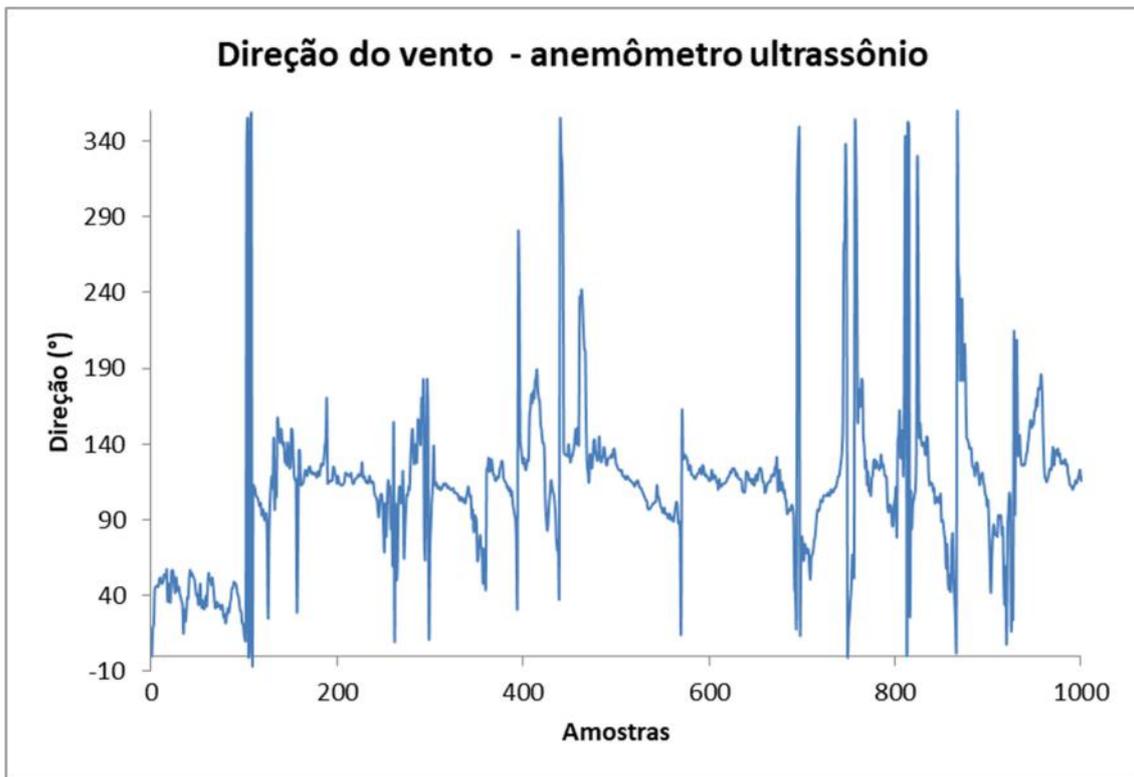


Figura 44 - Série temporal de direção do vento medida com anemômetro ultrassônico.

Tabela 11- Cálculos da avaliação da incerteza de medição de direção do vento com anemômetro ultrassônico.

Relação entre as fontes de incerteza consideradas (direção do vento com anemômetro ultrassônico)							
$d_{au} (^{\circ}) = (\delta_{exat})_{dau} + (\delta_{res})_{dau} + (\delta_{rep})_{dau}$							
Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Distribuição	Tipo	Divisor	Unidades
$(\delta_{exat})_{vau}$	1	(exatidão)/2	0,5	retangular	B	$\sqrt{3}$	°
$(\delta_{res})_{vau}$	3	(resolução)/2	1,5	retangular	B	$\sqrt{3}$	°
$(\delta_{rep})_{vau}$	113,0	desvio padrão das amostras	51,0	normal	A	\sqrt{n}	°
Incertezas Padrão	Coeficientes de Sensibilidade		Componentes da Incerteza		Unidades		
$u(\delta_{rep})$	1,6128	$(cs)_{\delta_{exat}}$	1	$uv_{au}(\delta_{rep})$	1,6128	°	
$u(\delta_{exat})$	0,8660	$(cs)_{\delta_{res}}$	1	$uv_{au}(\delta_{exat})$	0,8660	°	
$u(\delta_{res})$	0,2887	$(cs)_{\delta_{rep}}$	1	$uv_{au}(\delta_{rep})$	0,2887	°	
Incerteza Combinada	Graus de Liberdade Efetivos	Fator de Abrangência		Incerteza Expandida			
$uc(d_{au})$	2°	$veff = 1742$	1,96	$U(d_{au})$	$\pm 4^{\circ}$		

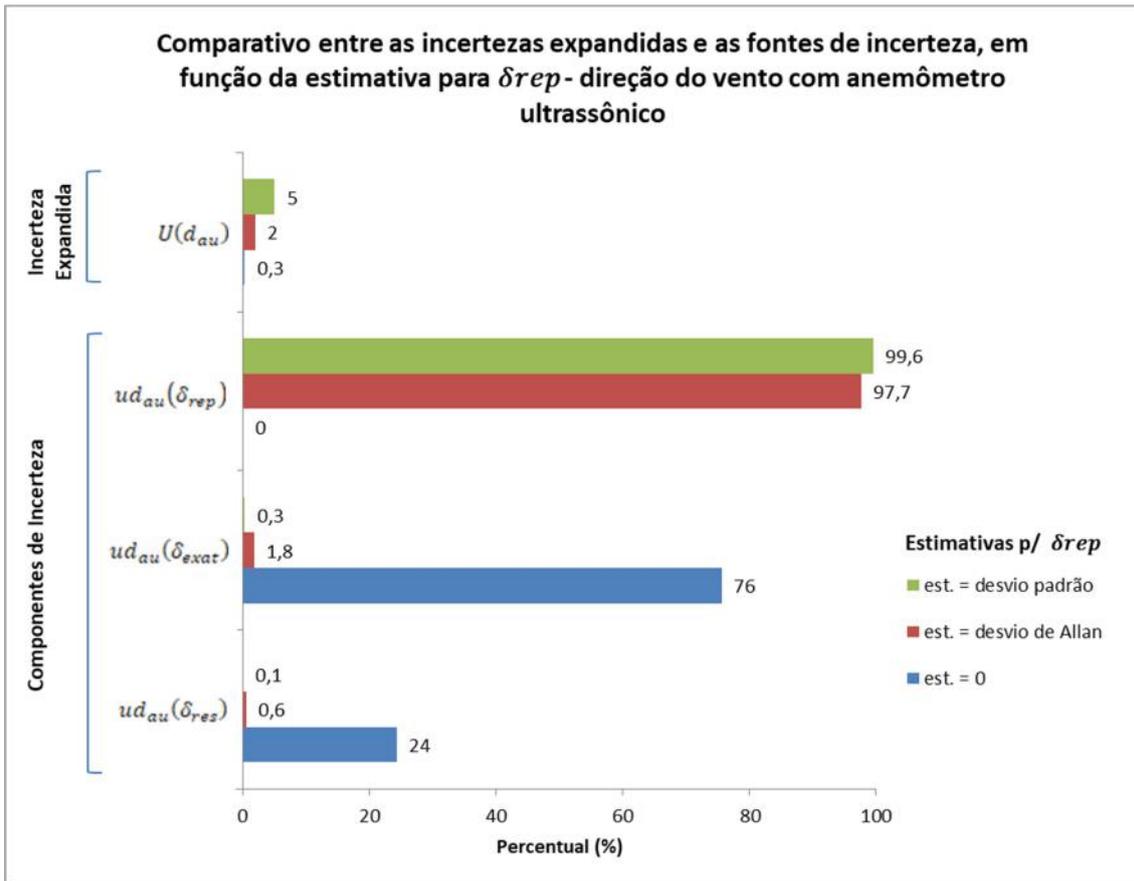


Figura 45 – Balanço de incertezas para medição de direção do vento com anemômetro ultrassônico.

4.2 – Avaliação de Incerteza de Medição de Onda

Como descrito no subitem 2.4, todo o processo de manipulação das medidas dos acelerômetros e giroscópios é resolvido pelo sistema embarcado. Os resultados informados nos arquivos de dados, não contemplam as “medições internas”, e os fabricantes não divulgam seus processos de medição, muito menos os algoritmos empregados na determinação dos parâmetros de ondas. Ainda assim, serão avaliadas as incertezas das medições de direção, altura (máxima e significativa) e período de onda.

Muito embora existam inúmeras publicações sobre medições dessas grandezas com boias meteo-oceanográficas, não foram encontradas referências específicas sobre a avaliação de incerteza nesse tipo de medição.

4.2.1 – Medição de onda – altura significativa

Como na avaliação anterior, teremos a média de uma série de medições, a resolução e a exatidão do equipamento como fontes de incerteza. Na Figura 46 tem-se a série temporal adotada na avaliação. Estão retratadas as séries de altura significativa e altura máxima de onda.

Em consequência, o resultado da medição de altura significativa de onda, deve ser corretamente expresso como se segue:

$$h_s = \begin{cases} (2,14 \pm 0,07) \text{ m ou} \\ 2,14 \text{ m} \pm 3 \% \end{cases}$$

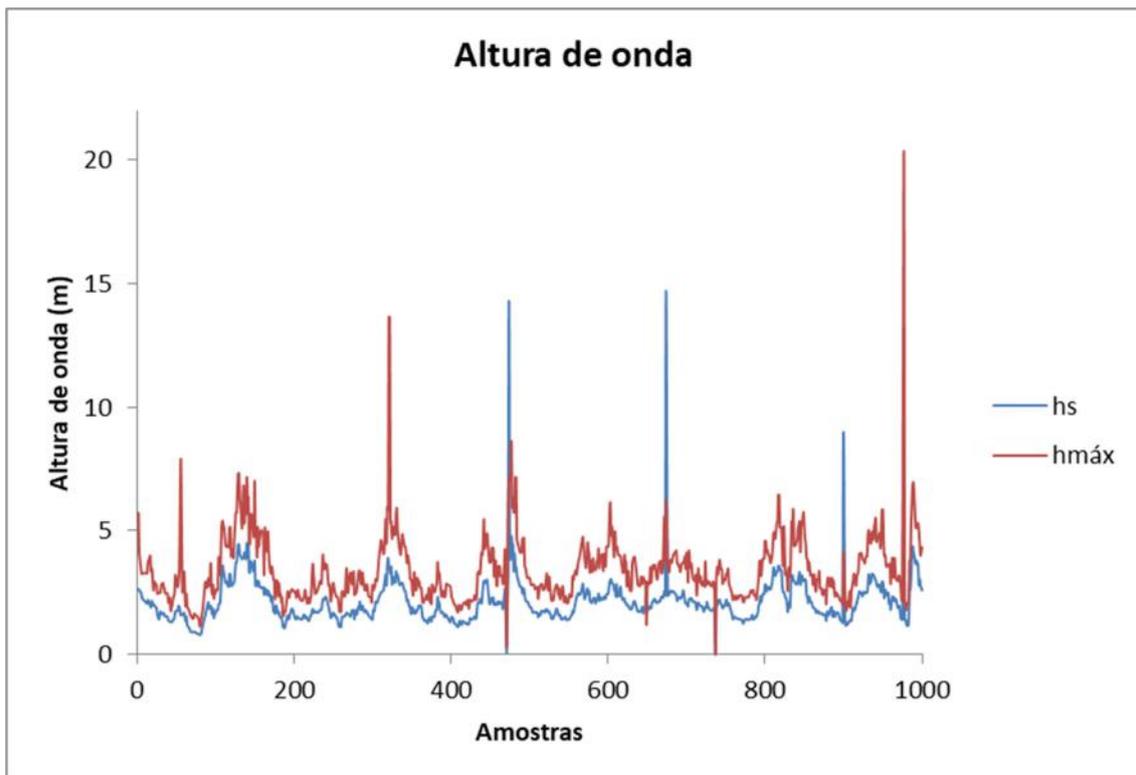


Figura 46 - Série temporal de altura de onda (h_s e $h_{máx}$).

Na Tabela 16 a seguir, estão relacionados os parâmetros calculados.

Tabela 12- Cálculos da avaliação da incerteza de medição de onda significativa.

Relação entre as fontes de incerteza consideradas (altura significativa de onda)							
$h_s(m) = (\delta_{exat})_{h_s} + (\delta_{res})_{h_s} + (\delta_{rep})_{h_s}$							
Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Distribuição	Tipo	Divisor	Unidades
$(\delta_{exat})_{vau}$	0,02	(exatidão)/2	0,011	retangular	B	$\sqrt{3}$	m
$(\delta_{res})_{vau}$	0,01	(resolução)/2	0,005	retangular	B	$\sqrt{3}$	m
$(\delta_{rep})_{vau}$	2,14	desvio padrão das amostras	1,10	normal	A	\sqrt{n}	m
Incertezas Padrão		Coeficientes de Sensibilidade		Componentes da Incerteza		Unidades	
$u(\delta_{rep})$	0,0348	$(cs)_{\delta_{exat}}$	1	$uv_{au}(\delta_{rep})$	0,0348	m	
$u(\delta_{exat})$	0,0062	$(cs)_{\delta_{res}}$	1	$uv_{au}(\delta_{exat})$	0,0062	m	
$u(\delta_{res})$	0,0029	$(cs)_{\delta_{rep}}$	1	$uv_{au}(\delta_{rep})$	0,0029	m	
Incerteza Combinada		Graus de Liberdade Efetivos		Fator de Abrangência		Incerteza Expandida	
$uc(h_s)$	0,04m	veff = 1077		1,96		$U(h_s)$	$\pm 0,07m$

A Figura 47, reproduz o gráfico dos Balanços de Incertezas Combinadas para a medição de h_s .

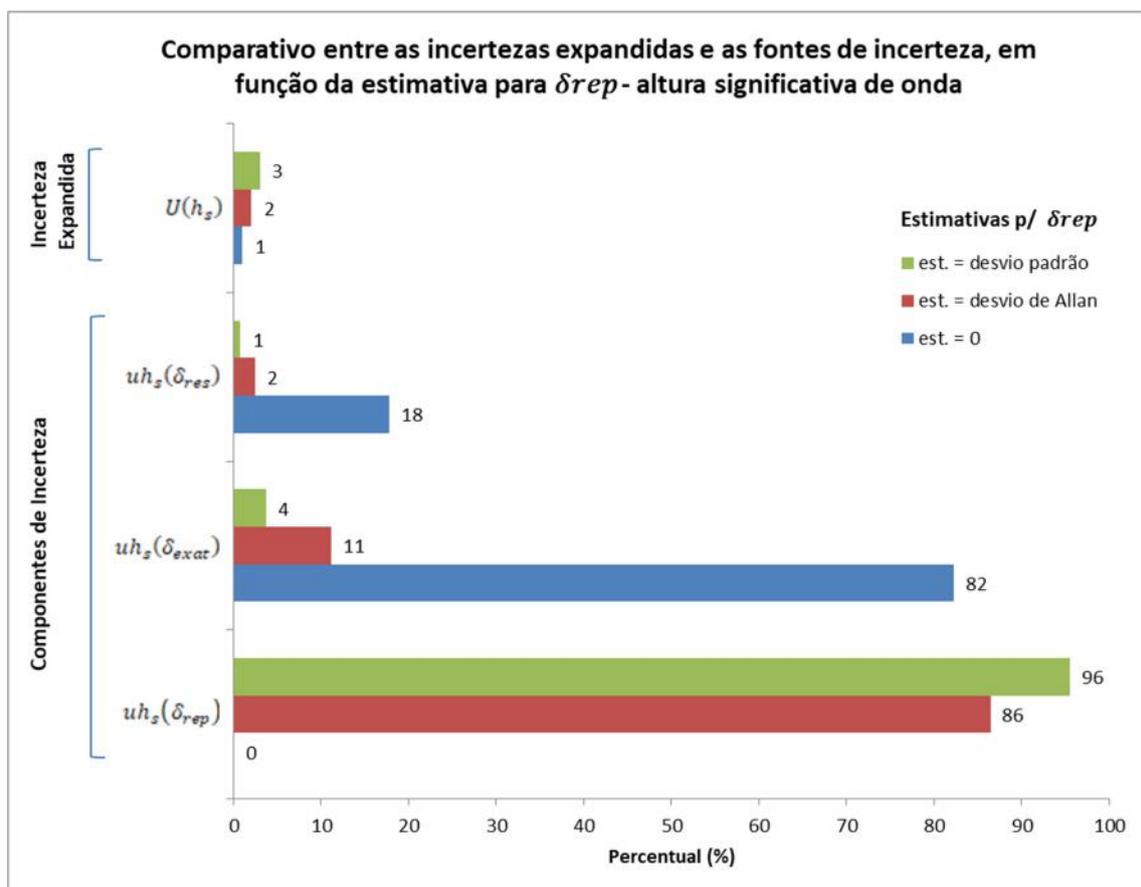


Figura 47 – Balanços de Incertezas Combinadas para medição de altura significativa de onda.

Pelo gráfico acima, a dispersão retratada por $u h_s(\delta_{rep})$ indica que, independente do estimador adotado, o peso dessa fonte de incerteza é predominante em relação a

incerteza expandida $U(h_s)$. Nesse caso, estudos são necessários para se determinar um estimador que seja mais representativo dessa fonte de incerteza.

4.2.2 – Medição de onda – altura máxima

Aqui teremos basicamente o mesmo procedimento empregado na avaliação anterior, a menos da exatidão e da média da série temporal. Os cálculos das etapas da avaliação encontram-se na Tabela 17.

Tabela 13- Cálculos da avaliação da incerteza de medição de máxima altura de onda.

Relação entre as fontes de incerteza consideradas (máxima altura de onda)							
$h_m(m) = (\delta_{exat})_{hm} + (\delta_{res})_{hm} + (\delta_{rep})_{hm}$							
Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Distribuição	Tipo	Divisor	Unidades
$(\delta_{exat})_{vau}$	0,03	(exatidão)/2	0,017	retangular	B	$\sqrt{3}$	m
$(\delta_{res})_{vau}$	0,01	(resolução)/2	0,005	retangular	B	$\sqrt{3}$	m
$(\delta_{rep})_{vau}$	3,39	desvio padrão das amostras	1,39	normal	A	\sqrt{n}	m
Incertezas Padrão		Coeficientes de Sensibilidade		Componentes da Incerteza		Unidades	
$u(\delta_{rep})$	0,044	$(cs)_{\delta_{exat}}$	1	$uv_{au}(\delta_{rep})$	0,044	m	
$u(\delta_{exat})$	0,010	$(cs)_{\delta_{res}}$	1	$uv_{au}(\delta_{exat})$	0,010	m	
$u(\delta_{res})$	0,003	$(cs)_{\delta_{rep}}$	1	$uv_{au}(\delta_{rep})$	0,003	m	
Incerteza Combinada		Graus de Liberdade Efetivos		Fator de Abrangência		Incerteza Expandida	
$uc(h_{max})$	0,05m	veff = 1109		1,96		$U(h_{max})$	$\pm 0,09m$

O resultado da medição de altura máxima de onda é expresso como se segue:

$$h_m = \begin{cases} (3,39 \pm 0,09) m \text{ ou} \\ 3,39 m \pm 3 \% \end{cases}$$

Seguindo o critério de apresentação da Componentes de Incerteza, a Figura 48 reproduz o gráfico do Balanço de Incertezas. O gráfico apresenta resultado semelhante ao anterior e dessa forma, valem os mesmos comentários feitos quanto a avaliação de incerteza de altura significativa de onda.

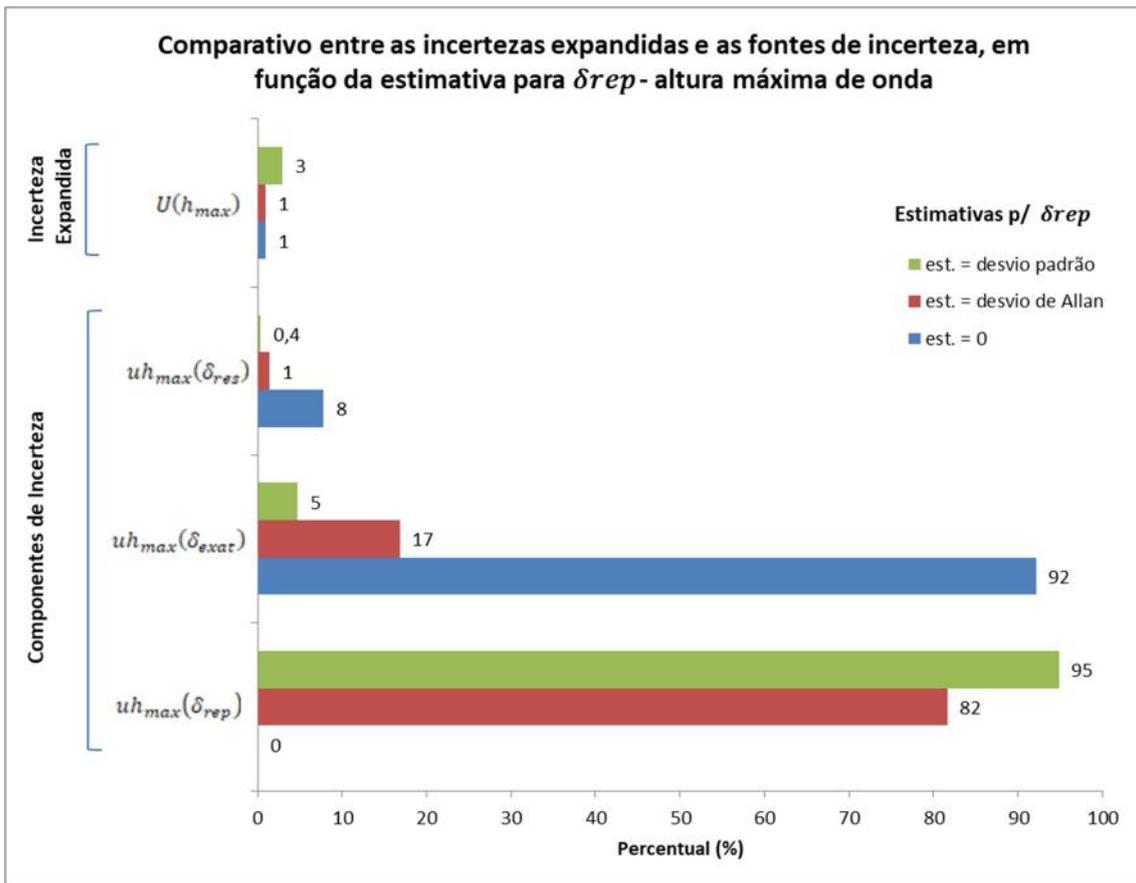


Figura 48 – Balanços de Incertezas Combinadas para medição de altura máxima de onda.

4.2.3 – Medição de onda – período

A Figura 49 representa a série temporal considerada na presente avaliação de incerteza.

Seguindo o mesmo critério adotado nas avaliações anteriores, a Tabela 18 engloba as informações acerca dos cálculos relativos à avaliação.

O resultado da medição do período de onda deve ser corretamente expresso como se segue:

$$t_o = \begin{cases} (10,0 \pm 0,2) \text{ s ou} \\ 10,0 \text{ s} \pm 2 \% \end{cases}$$

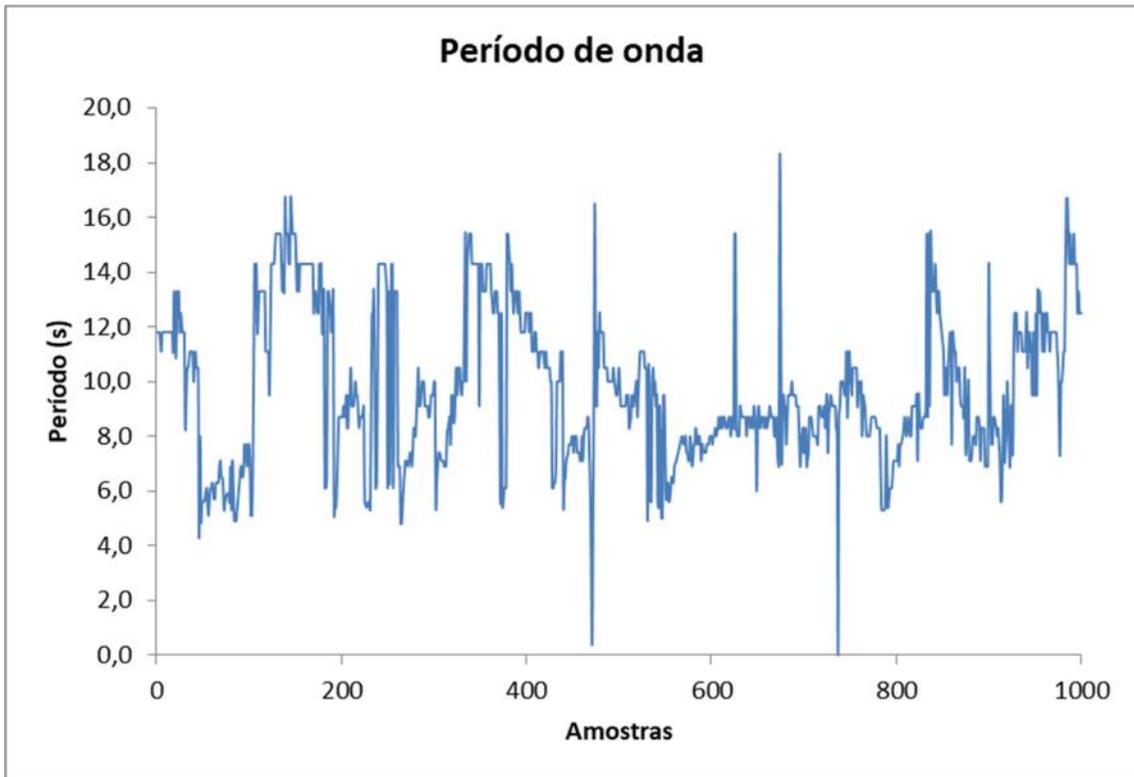


Figura 49 - Série temporal de período de onda.

Tabela 14- Cálculos da avaliação da incerteza de medição de período de onda.

Relação entre as fontes de incerteza consideradas (período de onda)							
$t_o(s) = (\delta_{exat})_{t_o} + (\delta_{res})_{t_o} + (\delta_{rep})_{t_o}$							
Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Distribuição	Tipo	Divisor	Unidades
$(\delta_{exat})_{vau}$	0,1	(exatidão)/2	0,05	retangular	B	$\sqrt{3}$	s
$(\delta_{res})_{vau}$	0,1	(resolução)/2	0,05	retangular	B	$\sqrt{3}$	s
$(\delta_{rep})_{vau}$	10,00	desvio padrão das amostras	3	normal	A	\sqrt{n}	s
Incertezas Padrão		Coeficientes de Sensibilidade		Componentes da Incerteza		Unidades	
$u(\delta_{rep})$	0,1	$(cs)\delta_{exat}$	1	$uv_{au}(\delta_{rep})$	0,044	s	
$u(\delta_{exat})$	0,03	$(cs)\delta_{res}$	1	$uv_{au}(\delta_{exat})$	0,010	s	
$u(\delta_{res})$	0,03	$(cs)\delta_{rep}$	1	$uv_{au}(\delta_{rep})$	0,003	s	
Incerteza Combinada		Graus de Liberdade Efetivos		Fator de Abrangência		Incerteza Expandida	
$uc(t_o)$	0,1s	veff = 1403		1,96		U(t_o)	±0,2s

A Figura 50 a seguir, ilustra o gráfico de Balanços de Incertezas Combinadas.

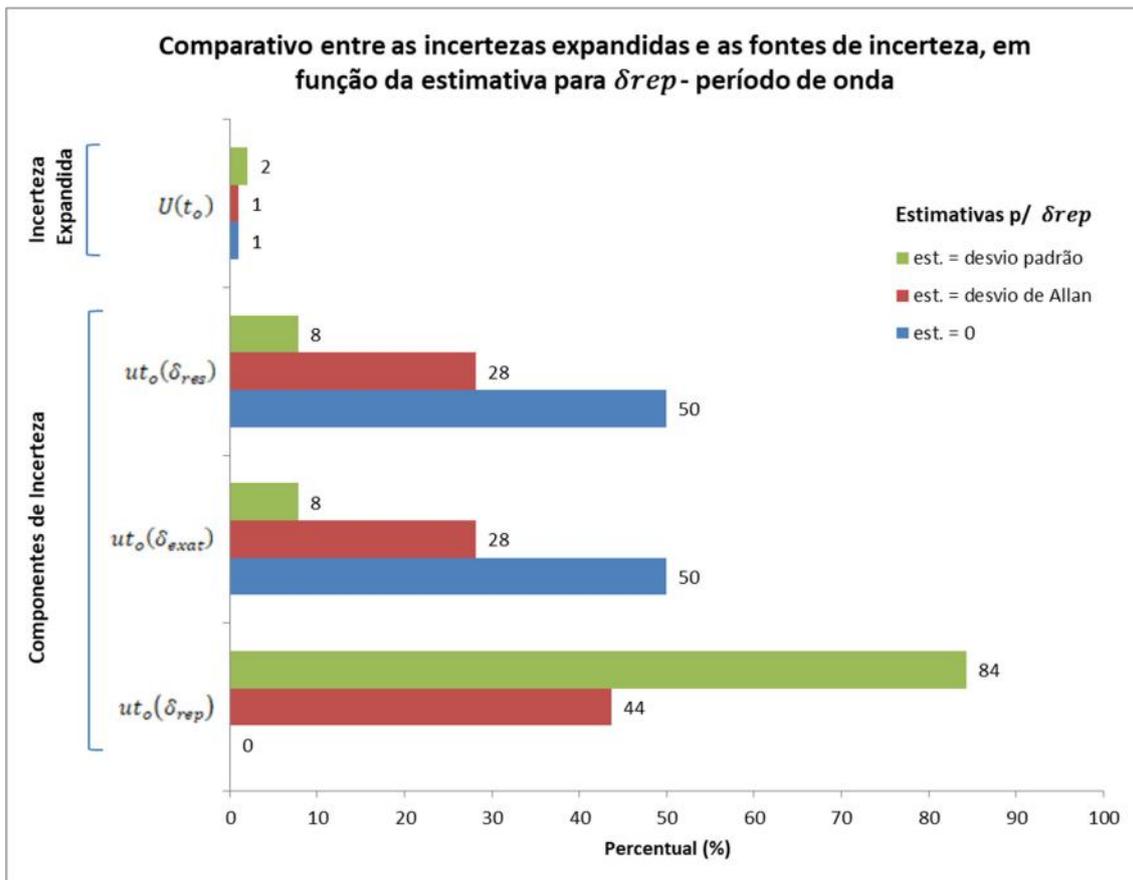


Figura 50 – Balanços de Incertezas Combinadas para medição do período de onda.

Pelo gráfico, observa-se que tanto a exatidão como a resolução, têm a mesma significância, independente do estimador escolhido para a série temporal. Além disso, para essa medição, o desvio de Allan, como estimador apresenta um resultado melhor. No entanto, isso não significa que para todas as condições de mar, esse estimador seja o que melhor represente a parcela de incerteza devida à série temporal medida. Mais uma vez, também neste caso, estudos são necessários até mesmo para o caso de se concluir que essa fonte de incerteza, sempre terá o maior peso em relação à incerteza expandida.

4.2.4 – Medição de onda - direção

Nessa avaliação de incerteza, mesmo admitindo-se a metodologia descrita no subitem citado, sem a comprovação do método empregado pelo fabricante, a avaliação da incerteza fica restrita às informações existentes, no tocante à exatidão, resolução e parâmetros estatísticos da amostra de dados utilizada.

Para as avaliações, foi utilizado o arquivo de dados cabofrio2.csv, cuja série temporal é representada na Figura 51. Conforme adotado em itens anteriores, a partir do arquivo de dados, a Tabela 15 resume os parâmetros calculados.

O resultado dessa medição, deve ser corretamente expresso como se segue:

$$d_o = \begin{cases} (125 \pm 3)^\circ \text{ ou} \\ 125^\circ \pm 3\% \end{cases}$$

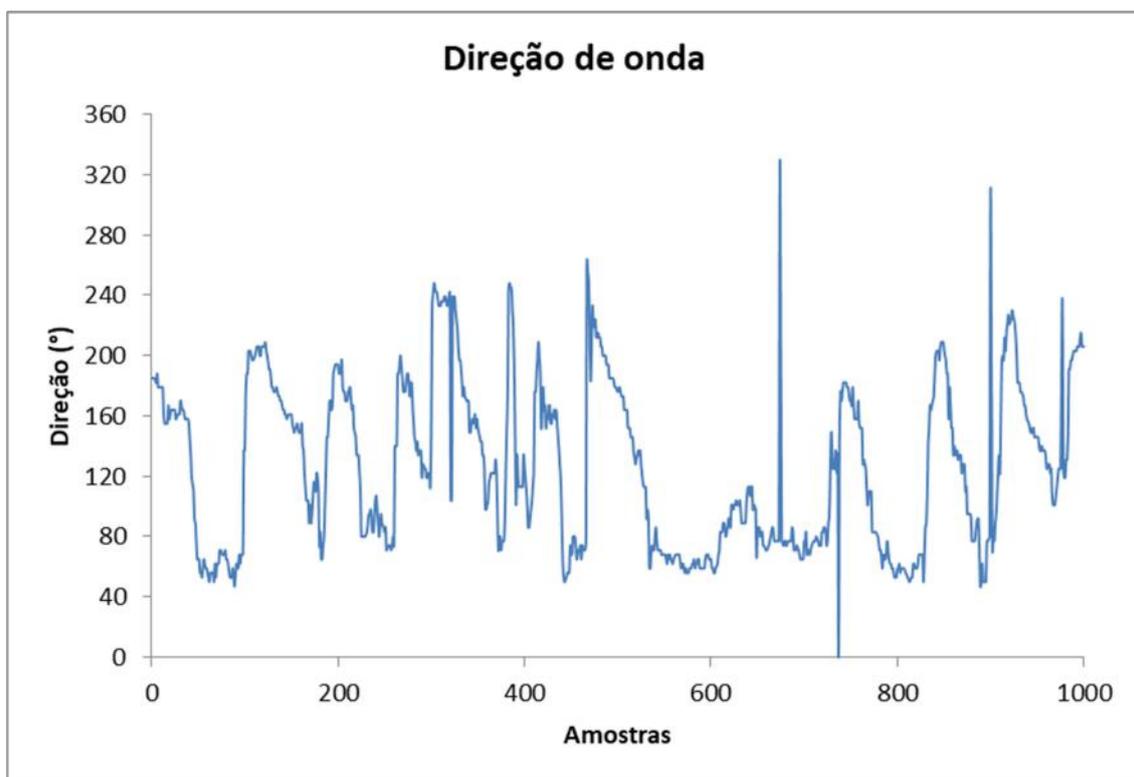


Figura 51 - Série temporal de direção de onda.

Tabela 15- Cálculos da avaliação da incerteza de medição de direção do onda.

Relação entre as fontes de incerteza consideradas (direção de onda)							
$d_o (^\circ) = (\delta_{\text{exat}})_{do} + (\delta_{\text{res}})_{do} + (\delta_{\text{rep}})_{do}$							
Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Distribuição	Tipo	Divisor	Unidades
$(\delta_{\text{exat}})_{\text{vau}}$	1	(exatidão)/2	0,5	retangular	B	$\sqrt{3}$	°
$(\delta_{\text{res}})_{\text{vau}}$	1	(resolução)/2	0,5	retangular	B	$\sqrt{3}$	°
$(\delta_{\text{rep}})_{\text{vau}}$	125	desvio padrão das amostras	51,0	normal	A	\sqrt{n}	°
Incertezas Padrão		Coeficientes de Sensibilidade		Componentes da Incerteza		Unidades	
$u(\delta_{\text{rep}})$	1,6	$(cs)_{\delta_{\text{exat}}}$	1	$uv_{\text{au}}(\delta_{\text{rep}})$	1,6		°
$u(\delta_{\text{exat}})$	0,3	$(cs)_{\delta_{\text{res}}}$	1	$uv_{\text{au}}(\delta_{\text{exat}})$	0,3		°
$u(\delta_{\text{res}})$	0,3	$(cs)_{\delta_{\text{rep}}}$	1	$uv_{\text{au}}(\delta_{\text{rep}})$	0,3		°
Incerteza Combinada		Graus de Liberdade Efetivos		Fator de Abrangência		Incerteza Expandida	
$uc(d_o)$	2°	$\nu_{\text{eff}} = 1126$		1,96		$U(d_o)$	$\pm 3^\circ$

A Figura 52 retrata de Balanços de Incertezas Combinadas (Figura 49), a exemplo de situações já avaliadas.

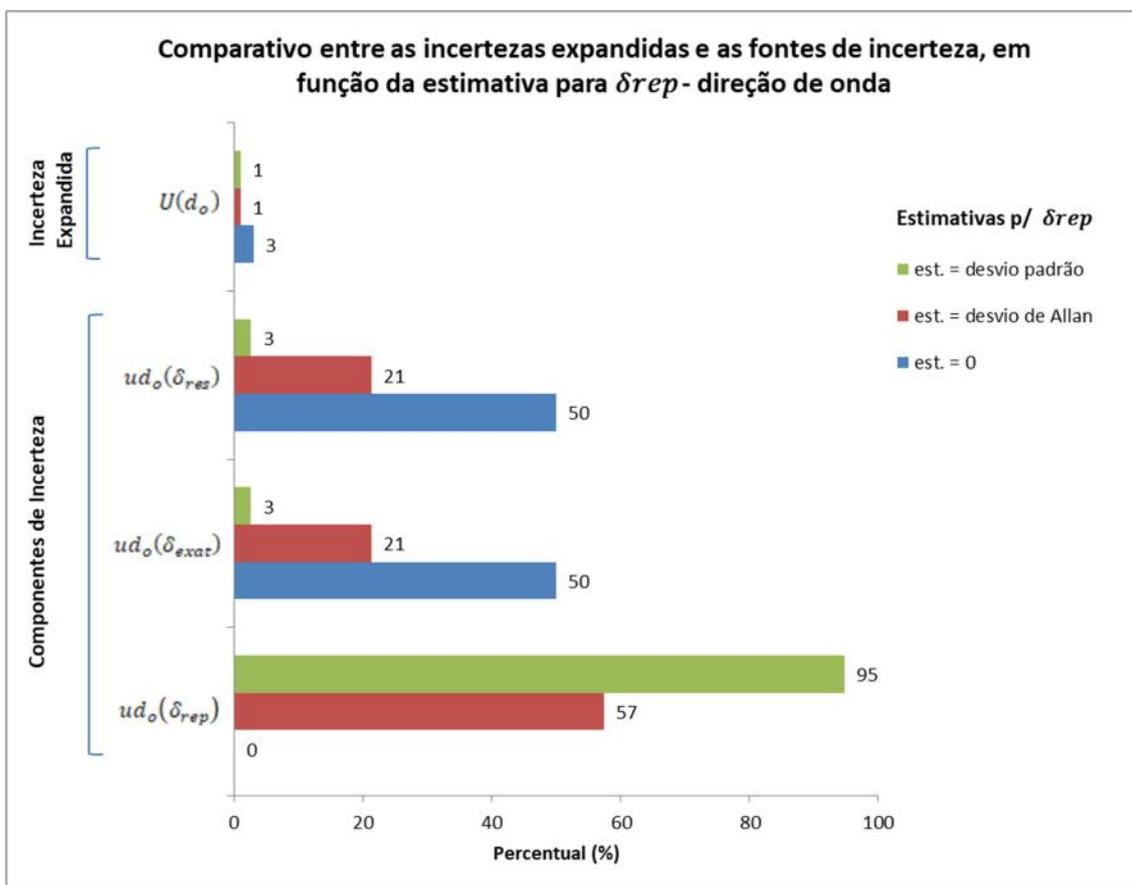


Figura 52 – Balanços de Incertezas Combinadas para medição de direção de onda.

O gráfico acima retrata condição semelhante à observada para outras medições de direção, quais sejam os itens 4.1.2 e 4.4.4. Nesse caso, mais uma vez, a parcela da incerteza devido à série temporal é a que possui maior peso na incerteza expandida $U(d_o)$, independente do estimador adotado. Assim, valem os mesmos comentários feitos para os itens já citados.

4.3 – Avaliação de Incerteza de Medição de Corrente Marinha

Não foram encontradas referências específicas sobre a avaliação de incerteza de medição de correntes marinhas, com perfilador acústico instalado em BMO. Muito embora existam trabalhos que abordem a estimativa de incerteza de medição de velocidade com este tipo de equipamento, como Simpson (2001), Castro e Muste (2007) e Kim et. al (2010), estes baseiam-se em medições com os dispositivos

instalados em barcos, no levantamento de perfil de fundo e na determinação de vazões em rios, assim como Huang (2012) e Lee et. al. (2014) descrevem sua utilização em medição de vazões em canais abertos. Nesses trabalhos, das fontes de incerteza levantadas, a grande maioria está relacionada à configuração dos parâmetros de funcionamento do equipamento, outras dependem de especificações do fabricante e apenas uma refere-se às condições ambientais e de operação. Ainda assim, os autores não estabeleceram nem quantificaram a relação entre as fontes mencionadas e a velocidade da corrente.

Quando instalado em boia o perfilador acústico estará sujeito aos movimentos inerentes às condições do mar (*pitch*, *roll* e *heave*), agindo em toda a estrutura da boia. Ainda que esses movimentos possam ser compensados pelo processamento interno do perfilador, em função das medições de sensores próprios, existem limites para tanto. Em Seim e Edward (2008), os resultados da comparação entre os dois tipos de instalação não foi conclusivo, pois foi constatado que o perfilador acústico instalado não estava corretamente configurado. Já Locke e Crout (2009), em estudo semelhante, validam as medidas obtidas por um perfilador acústico montado em BMO.

Para efeito da presente avaliação da incerteza de medição, é assumido que o perfilador acústico esteja corretamente configurado, montado apropriadamente na estrutura da boia e esta fundeada de forma a estar direcionada ao norte magnético da Terra. Assim sendo, a partir da equação (7), admite-se que os espalhadores deslocam-se de forma que $\theta = 70^\circ$, conforme ilustrado na Figura 53.

Conseqüentemente, a relação entre os parâmetros de entrada e a velocidade da corrente pode ser simplificada expressa como:

$$v_{adcp} = f_d \times \frac{c}{0,684 \times F_s} \quad (42)$$

O parâmetro f_d é calculado internamente pelo perfilador acústico, a partir da determinação da função de autocorrelação do eco de retorno do feixe emitido (Thompson & Emery, 2014). Para efeito dos cálculos pertinentes, f_d foi estimado a partir da média dos dados da magnitude da velocidade da corrente, medidos por um perfilador acústico (boia CF02_BMOP-04), com base em 1000 medidas realizadas para uma célula à 46m de profundidade (arquivo DPL1_004.000). A partir da equação (85), obtemos f_{d46} igual a 7Hz. É importante salientar que a avaliação de incerteza de

medição de velocidade com perfilador acústico, deverá ser realizada para cada profundidade.

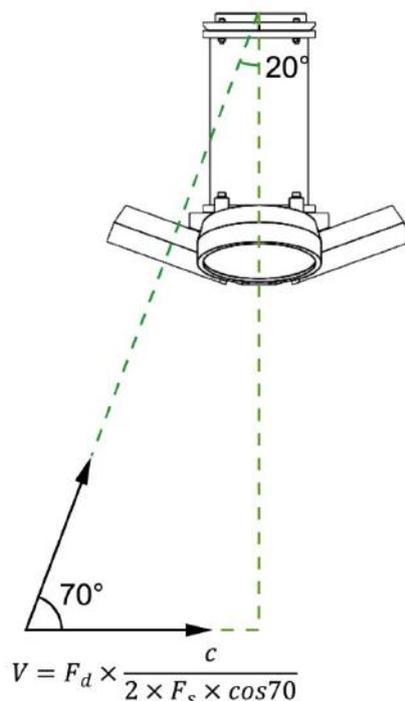


Figura 53 – Representação esquemática do vetor velocidade da corrente marinha.

O parâmetro f_d é calculado internamente pelo perfilador acústico, a partir da determinação da função de autocorrelação do eco de retorno do feixe emitido (Thompson & Emery, 2014). Para efeito dos cálculos pertinentes, f_d foi estimado a partir da média dos dados da magnitude da velocidade da corrente, medidos por um perfilador acústico (boia CF02_BMOP-04), com base em 1000 medidas realizadas para uma célula à 46m de profundidade (arquivo DPL1_004.000). A partir da equação (85), obtemos f_{d46} igual a 7Hz. É importante salientar que a avaliação de incerteza de medição de velocidade com perfilador acústico, deverá ser realizada para cada profundidade.

Outro parâmetro que é mantido fixo é a velocidade de propagação do som na água (c), independente da profundidade e gradientes de temperatura e salinidade.

De acordo com Urick (1983)⁴⁸, a variação da velocidade do som na água, em função da temperatura, salinidade e profundidade é dada por:

⁴⁸ Principle of Underwater Sound, 34th edition, McGraw Hill, 1983. Table 5.2, pg. 113.

$$c = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,01T) \times (s - 35) + 0,016D \quad (43)$$

Onde:

T – temperatura em graus Celsius;

s – salinidade em partes por milhão (ppm);

D – é a profundidade de medição em metros.

Para uma mesma profundidade e temperatura, ainda que a salinidade varie 5 ppm, a velocidade do som na água irá variar em torno de 0,4%. De forma análoga, para uma mesma salinidade e profundidade, uma variação de 10°C acarretará uma variação aproximada de 2% na velocidade do som. Dessa forma, será adotada a velocidade de 1.500 m/s como valor para a propagação do som na água do mar, admitindo-se uma variação de $\pm 2\%$.

Na Figura 54 encontra-se representada a série temporal de corrente marinha, adotada nessa avaliação.

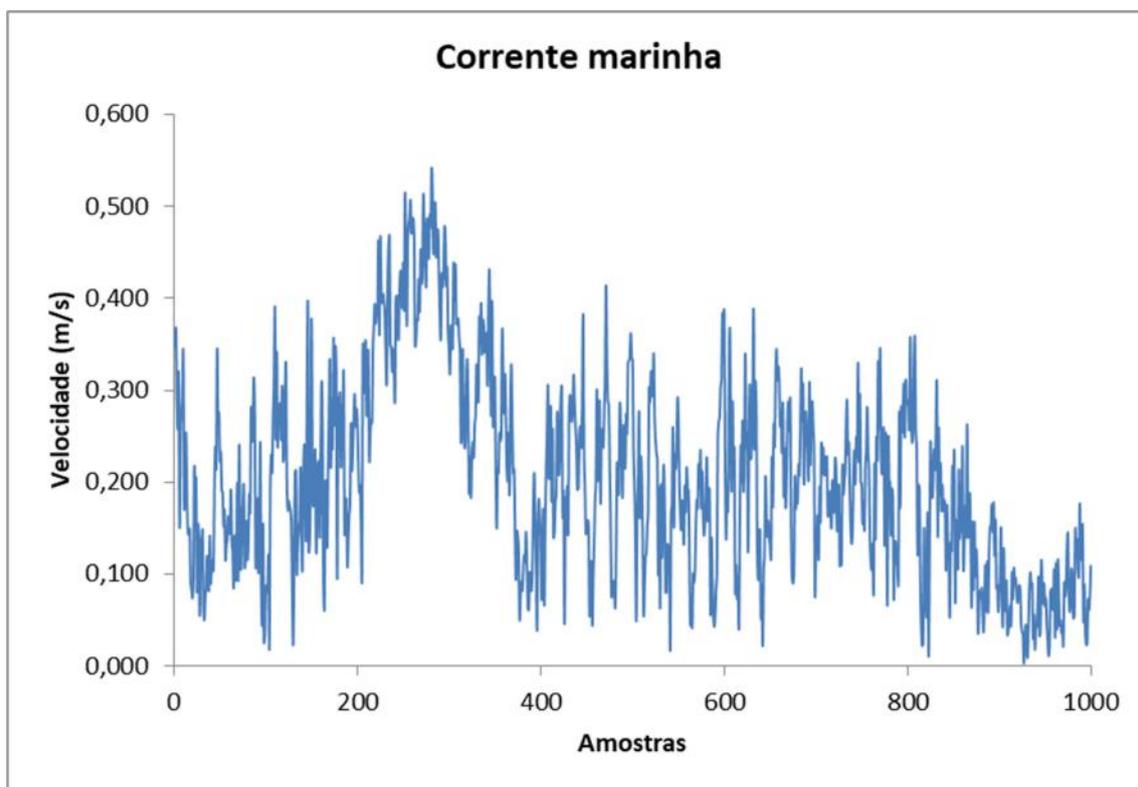


Figura 54 - Série temporal de corrente marinha.

As estimativas das outras fontes seguem o mesmo critério já abordado nas avaliações anteriores. Assim, temos que a Tabela 19 reporta e resume os resultados calculados.

O resultado da medição de velocidade da corrente marítima com perfilador acústico, deve ser corretamente expresso como se segue:

$$v_{46} = \begin{cases} (0,210 \pm 0,014) \text{ m/s ou} \\ 0,210 \text{ m/s} \pm 7 \% \end{cases}$$

Tabela 16 - Cálculos da avaliação da incerteza de medição de período de onda.

Relação entre as fontes de incerteza consideradas (velocidade da corrente marinha com perfilador acústico)							
$v_{adcp} = F_d \times \frac{c}{0,684 \times F_s} + (\delta_{rep})_{adcp} + (\delta_{exat})_{adcp} + (\delta_{res})_{adcp}$							
Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Distribuição	Tipo	Divisor	Unidades
fd_{46}	7	5%	0,35	retangular	B	$\sqrt{3}$	Hz
fs	76800	ordem de grandeza do menor algarismo significativo	1	retangular	B	$\sqrt{3}$	Hz
c	1500	2%	30	retangular	B	$\sqrt{3}$	m/s
$(\delta_{rep})_{ADCP}$	0,21	desvio padrão das amostras	0,10	normal	A	\sqrt{n}	m/s
$(\delta_{exat})_{ADCP}$	0,007	(exatidão)/2	0,0035	retangular	B	$\sqrt{3}$	m/s
$(\delta_{res})_{ADCP}$	0,00001	(resolução)/2	0,00001	retangular	B	$\sqrt{3}$	m/s
Incertezas Padrão		Coeficientes de Sensibilidade		Componentes da Incerteza		Unidades	
$u(fd_{46})$	0,2	$(cs)_{fd_{46}}$	0,029	$uv_{46}(fd_{46})$	0,0058	m/s	
$u(fs)$	0,58	$(cs)_{fs}$	-0,000003	$uv_{46}(fs)$	-0,000002	m/s	
$u(c)$	17,32	$(cs)_c$	0,00013	$uv_{46}(c)$	0,002	m/s	
$u(\delta_{rep})$	0,003	$(cs)_{\delta_{rep}}$	1	$uv_{46}(\delta_{rep})$	0,003	m/s	
$u(\delta_{exat})$	0,002	$(cs)_{\delta_{exat}}$	1	$uv_{46}(\delta_{exat})$	0,002	m/s	
$u(\delta_{res})$	0,000006	$(cs)_{\delta_{res}}$	1	$uv_{46}(\delta_{res})$	0,000006	m/s	
Incerteza Combinada		Graus de Liberdade Efetivos		Fator de Abrangência		Incerteza Expandida	
$uc(v_{au})$	0,007 m/s	$veff = 24806$		1,96		$U(v_{46})$	$\pm 0,014 \text{ m/s}$

O gráfico de Balanço de Incerteza Combinada (Figura 55), retrata o peso das componentes de incerteza, apenas.

Como se observa no gráfico, o maior peso na incerteza combinada fica por conta da fonte relativa à f_d (frequência doppler). Tal fato se dá porque as estimativas definidas para as fontes, sobre as quais não há especificações, podem ter sido superestimadas. No entanto, admite-se que o perfilador acústico possa “identificar” as frequências de retorno com uma melhor resolução.

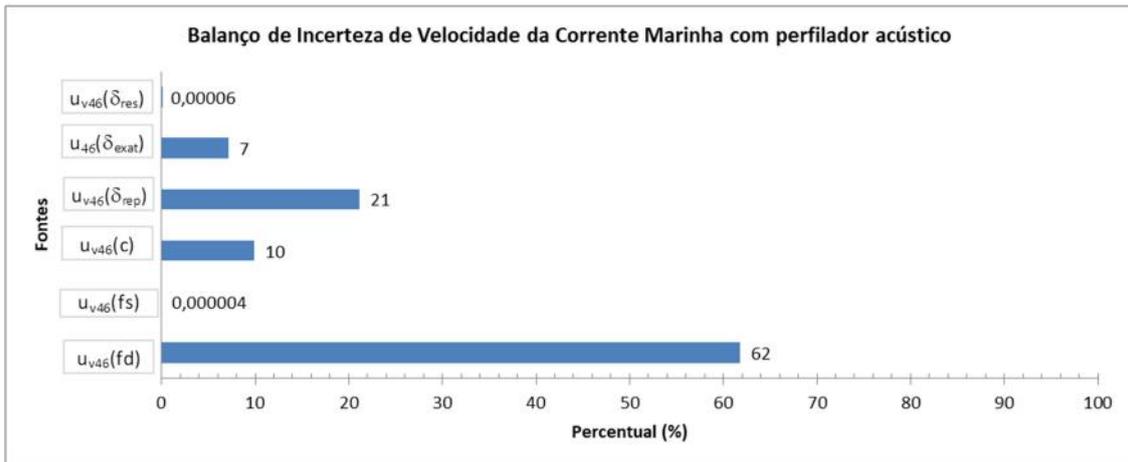


Figura 55- Balanço de incerteza para a medição com perfilador acústico.

Dessa forma, o valor estimado para a fonte de incerteza f_d , pode ser alterado para menos, o que terá impacto significativo na incerteza expandida. Entretanto, $U(v_{46})$ tenderá para a estabilização a partir de uma estimativa de 1% para f_d , conforme indicado no gráfico retratado na Figura 56.

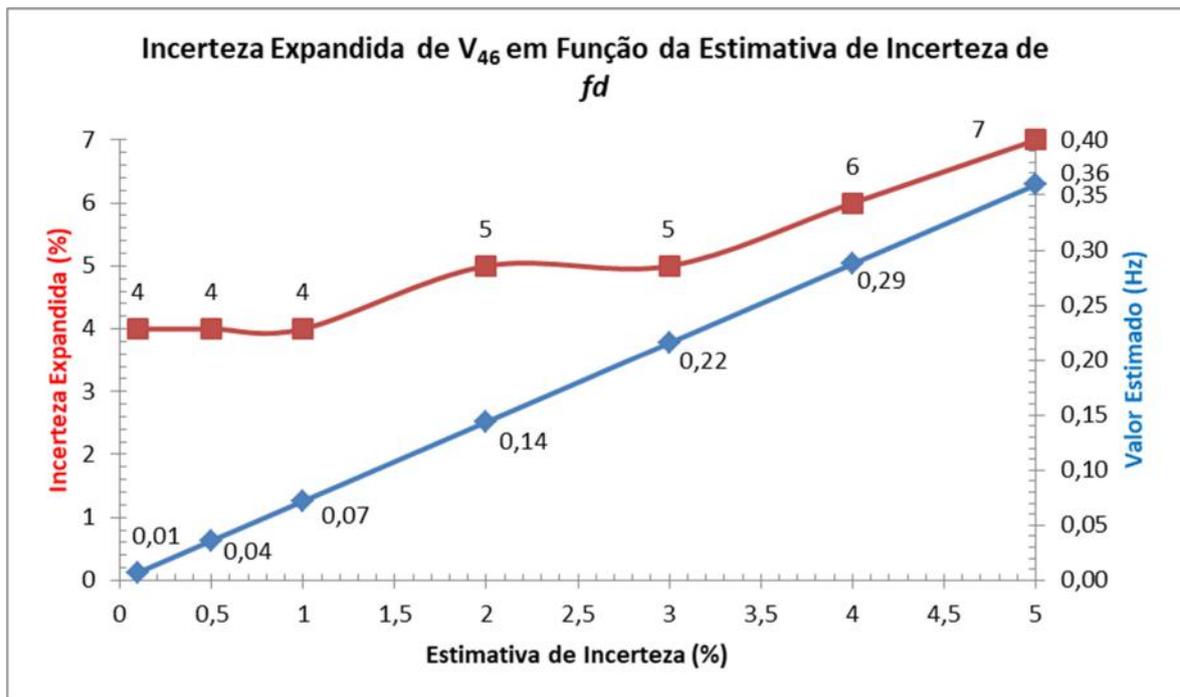


Figura 56 – Gráfico de variação de $U(v_{46})$ em função da estimativa de incerteza de f_d .

Em vista disso, considere-se 1% para a estimativa relativa à f_d e estimadores diferentes para a fonte devida à série temporal, conforme já abordado em avaliações anteriores. Teremos, então, na Figura 57 um comparativo dos novos Balanços de

Incertezas Combinadas da medição com o perfilador acústico, em função dos novos estimadores.

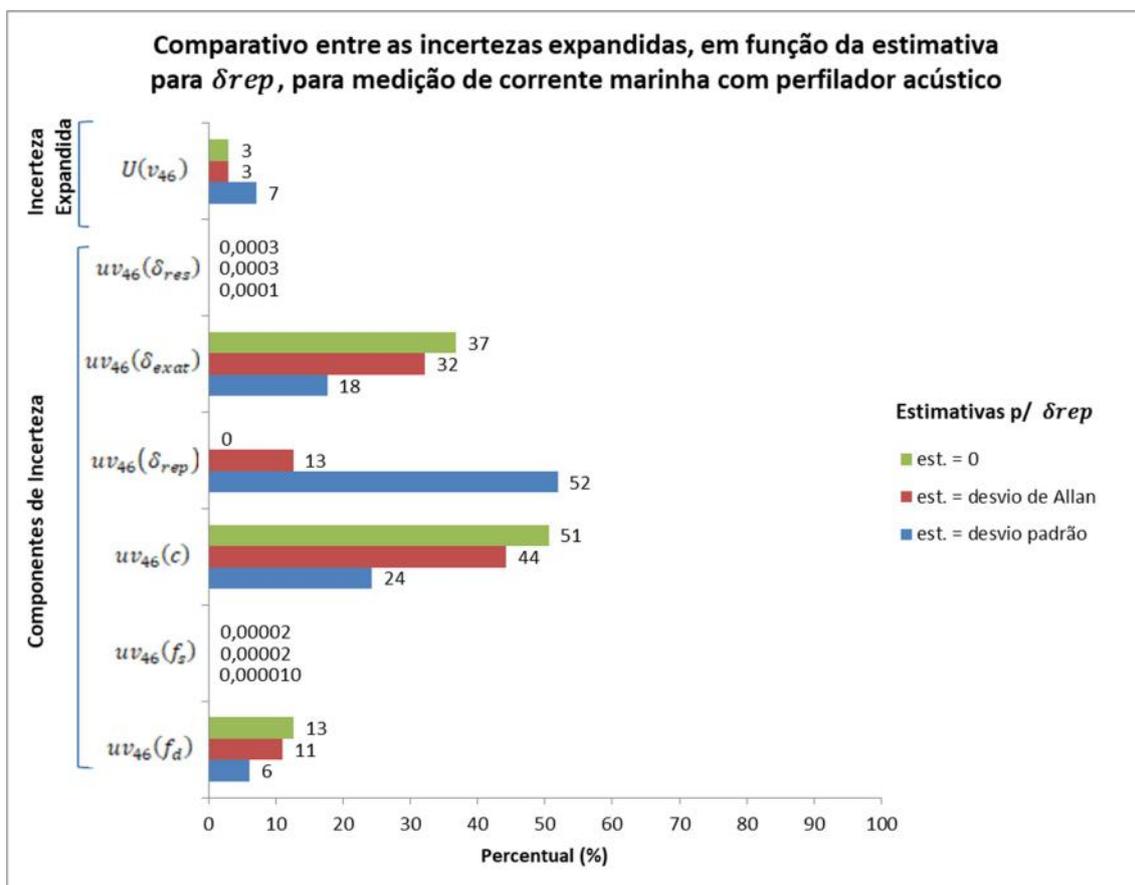


Figura 57 - Comparativo entre as incertezas expandidas, em função da estimativa para δ_{rep} , para o perfilador acústico.

Pelo gráfico, observa-se que além da nova estimativa para f_d , a adoção do desvio de Allan como estimador para a fonte de incerteza relativa à série temporal, reduziu sua significância na incerteza expandida. Em contrapartida, outras fontes passam a ter maior relevância em $U(v_{46})$. Cabe salientar que a fonte referente à velocidade do som, também tem seu estimador definido pelo usuário, igualmente requerendo um estudo mais aprofundado para sua correta definição.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS FUTURAS

Ao longo do trabalho demonstrou-se que os procedimentos descritos no GUM devem ser aplicados em medições meteo-oceanográficas, não havendo erro em avaliar-se uma série temporal sob o ponto de vista metrológico. Porém, nas avaliações de séries temporais referentes as medições de tais parâmetros, é de suma importância levar em consideração o conhecimento sobre o comportamento do mensurando sob análise. Como o próprio GUM preconiza, este conhecimento permite inferir estimativas de incerteza mais condizentes com a realidade, sobretudo quanto a estimativa de incerteza relacionada à uma série temporal.

A importância do cálculo das incertezas associadas a uma medição mostrou-se uma excelente forma de busca de imperfeições nos processos de aquisição de dados. Ao longo dos estudos sobre medições de vento notou-se que não considerar a influência do *heave* e de um *tilt* constante da boia acarreta em erros de medição que subestimam as avaliações das incertezas dessas medições. Caso fossem consideradas, seriam adicionadas mais duas fontes de incerteza nas avaliações.

É sabido que a medição de ondas apresenta um grande número de fontes de incerteza. No entanto, nem todas foram incluídas na avaliação de incerteza por não dispor-se de informações concretas. Como exemplo, pode-se citar o RAO (Response Amplitude Operator) da boia e da linha de fundeio, que devem figurar como fontes de incerteza independentes e certamente também influenciarão o estimador da série temporal do respectivo mensurando. Neste caso específico, estudos podem vir a demonstrar que o estimador da série temporal, pode até ser função direta dos seus próprios valores. Como exemplo, será que o estimador de uma série de altura de onda é o mesmo para séries com H_s menores que 1m, próximos de 2m ou maiores de 8m?

Na avaliação da incerteza a partir dos dados do perfilador acústico não foi possível considerar a influência das fontes relativas ao *tilt*. Esse processo é realizado internamente e o equipamento não fornece os dados das medições realizadas por esses sensores específicos. Em relação à frequência doppler não há informações sobre exatidão e/ou resolução do equipamento. De igual forma, observou-se que a velocidade do som na água tem forte relevância para a incerteza expandida. Assim, o cálculo da Incerteza Expandida para este tipo de equipamento fica bastante prejudicado e limitado às informações fornecidas pelo fabricante.

Os responsáveis pelo controle e divulgação de dados meteo-oceanográficos deveriam disponibilizar as informações sobre a calibração dos instrumentos instalados (Certificados de Calibração) e sobre os métodos de coleta dos dados. Seria desejável também que para cada parâmetro calculado a partir de séries temporais (como Hs) a respectiva Incerteza Expandida fosse apresentada. Essas informações são importantes, pois incorporam especificações dos instrumentos instalados como também dos padrões utilizados, complementando as avaliações e dariam uma maior confiabilidade aos resultados das medições.

Como observado, para medições meteo-oceanográficas, a escolha do estimador mais apropriado não é trivial. Um mesmo estimador pode ser apropriado para certas avaliações e não ser para outras. Esse fato indica a necessidade de maiores estudos, que possibilitem a determinação de estimadores mais realistas para cada tipo de grandeza. Os quais sejam corretamente representativos das fontes relativas às séries temporais desses parâmetros.

Assim sendo, o assunto não se esgota aqui, já que estudos futuros são necessários, principalmente os relacionados à determinação dos estimadores das fontes de incerteza relacionadas às séries temporais. Como cada grandeza tem comportamento físico próprio, há que se desenvolver estudos específicos para cada uma. Por fim, há ainda um caminho a ser percorrido, na direção de uma convergência entre a metrologia, a instrumentação, a oceanografia e a meteorologia marinha. Mas o presente trabalho resume uma proposta de mudança de paradigma, fundamentada em uma metodologia amplamente utilizada e de fácil assimilação e utilização, que pode ser desenvolvida em simples planilhas eletrônicas ou em aplicativos específicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTAZZI, Armando - **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial** – Primeira Edição – Manole, 2008.

ALLAN, D. W. **Statistics of Atomic Frequency Standards**. Proceedings of the IEEE, vol. 54, no. 2, 1966. 221-230.

Bernhard LANGE et. al - **Importance of thermal effects and sea surface roughness for offshore wind resource assessment** - Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 92, pg 959–988, 2004.

Carlos Alberto Ferreira GISLER – **Análise do Perfil de Vento na Camada Limite Superficial e Sistemas Meteorológicos Atuantes no Centro de Lançamento de Alcântara** – Dissertação de Mestrado – INPE - São José dos Campos – SP – 2009.

David B. Gilhousen – **An Accuracy Statement for Meteorological Measurements Obtained from NDBC Moored Buoys**,
ftp://ftp.nodc.noaa.gov/nodc/archive/arc0056/0070493/1.1/data/0-data/Gilhousen_1986_MDS.pdf - 1986.

DBCP Technical Document No. 8 - **Guide to Moored Buoys and other Ocean Data Acquisition Systems** – 1996 -
<https://www.wmo.int/pages/prog/amp/mmop/documents/dbcp/Dbcp8/>.

Elaine Arantes Jardim Martins et. al. - **Avaliação de Incerteza de Medição na Determinação de Interferentes Endócrinos em Água Superficial por Cromatografia Gasosa com Detecção por Espectrometria de Massas** - XIII International Conference on Engineering and Technology Education, March 16 - 19, 2014, Guimarães, PORTUGAL.

F.R. MARTINS et. al - **O aproveitamento da energia eólica** - Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30, nº 1, 1304 (2008).

GOOSBRASIL - <<http://www.goosbrasil.org/pnboia/>> - acesso em novembro 2017.

GOOSBRASIL - <<http://www.goosbrasil.org/gloss/dados/>> - acesso em novembro 2017.

GUM – **Guia para Avaliação e Expressão da Incerteza de Medição** - Terceira Edição Brasileira - INMETRO, 2003 -
<http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteudo/iso_gum_versao_site.pdf> - versão 2008.

G. W. K. Moore et. al. - **Buoy Observations from the Windiest Location in the World Ocean, Cape Farewell, Greenland** - Geophysical Research Letters, vol. 35, L18802, September/2008.

Hening Huang – 2012 - **Uncertainty Model for In Situ Quality Control of Stationary ADCP Open-Channel Discharge Measurement** – Journal of Hydraulic Engineering © ASCE – January/2012.

Harrison Henri dos Santos NASCIMENTO et. al. - **Gestão metrológica dos laboratórios experimentais da Escola Politécnica da UFBA: um estudo preliminar** – Congresso Brasileiro de Metrologia - Bento Gonçalves – RS – 2015.

Harvey E. Seim e Catherine R. Edward - **Comparison of Buoy-Mounted and Bottom-Moored perfilador acústico Performance at Gray's Reef** - Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 24, 2008.

Introdução ao GUM - **Introsum_2009.pdf** – http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes_avulsas.asp.

ISO16622: 2002, Meteorology - **Sonic anemometers/thermometers – Acceptance test methods for mean wind measurements.**

JCOMM - <http://www.jcommops.org/dbcp/network/maps.html> - acesso em outubro 2017.

Jongmin Kim et. al – 2010 - **Experimental Study on Uncertainty Assessment of ADCP Discharge Measurement Using GUM Framework** - 36th IAHR World Congress, Netherlands, June – July/2015.

J. P. Dugan et. al. - **Decontamination of Wind Measurements from Buoys Subject to Motions in a Seaway** - Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 8, no. 1, pg. 85-95, February/1991.

Juan A. González-Castro e Marian Muste - **Framework for Estimating Uncertainty of perfilador acústico Measurements from a Moving Boat by Standardized Uncertainty Analysis** - Journal of Hydraulic Engineering, vol. 133, Issue 12, December/2007.

Kyutae Lee et. al. - **Uncertainty in open channel discharge measurements acquired with StreamPro perfilador acústico** - Journal of Hydrology, no. 509, pg. 101–114, 2014.

L. C. BENDER III et. al. - **A Comparison of Methods for Determining Significant Wave Heights - Applied to a 3m Discus Buoy during Hurricane Katrina**. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 27, June/2010.

LIOc - **Apresentacao_GOOSBR_2017.pdf**.

L. K. Locke e R. Crout - **A Study on the Validity of Buoy Mounted Acoustic Doppler Profilers: A COMPARISON OF UPWARD AND DOWNWARD LOOKING SYSTEMS IN ONSLOW BAY, NC** – Oceans Conference, 26-29 October/2009.

Michael C. STURGEON – 2005 - **Wind Tunnel Tests of Some Low-Cost Sonic Anemometers** - <[https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-82-TECO_2005/Posters/P3\(36\)_USA_8_Sturgeon.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-82-TECO_2005/Posters/P3(36)_USA_8_Sturgeon.pdf)>.

Michael R. Simpson – **Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler** - United States Geological Survey, OPEN-FILE REPORT 01-1 – California/2001.

Michael S. LONGUET-HIGGINS et. al. – **Observations of the directional spectrum of the sea waves using the motions of a floating buoy**. Proceedings of the Conference on Ocean Wave Spectra. Maryland, EUA: Prentice-Hall. 1963.

M. J. TUCKER - **Interpreting Directional Data From Large Pitch-Roll-Heave Buoys**. **Ocean Engineering**, vol. 16, no. 2, pg. 173-192, 1989.

M. SEGAL e R. A. PIELKE - **The Extrapolation of Vertical Profiles of Wind Speed within the Marine Atmospheric Surface Layer Using the p Formula** – Journal of Applied Meteorology, vol. 27, pg 174-181, February/1988.

MORAES, Luiz Felipe Maciel Vieira de - **Caracterização de Sensores Inerciais do Tipo MEMS para Medição Direcional de Ondas Utilizando Boias Heave-Pitch-Roll** – Dissertação de Mestrado – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, setembro/2015.

NDBC - <<http://www.ndbc.noaa.gov/>> - acesso em outubro 2017.

NDBC - <http://www.ndbc.noaa.gov/adjust_wind.shtml> - acesso em janeiro 2018.

OPEN UNIVERSITY - **Waves, Tides and Shallow-Water Processes**, Second Edition, 1989.

Pierre Queffelec – 1991 - **Accuracy of Wind Measurements Performed on Buoys, Ship, and Island during the TOSCANE-2 Experiment** - Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 8, no. 1, pg. 835-855, December/1991.

PIERSON, Jr., Willard J. et. al. – **Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics**. Hydrogr. Off. Publ., No. 603; U.S. Navy Hydrographic Office, Washington, D.C. 1958.

QARTOD Manuals - <https://www.oceanbestpractices.net/handle/11329/336>.

Robert G. DEAN e Robert A. DALRYMPLE - **Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists**. Singapore: Scientific World, v. 2 of Avanced Series on Ocean Engineering, 1984.

RD Instruments – **ADCP** <<http://www.teledynemarine.com>>.

Richard E. Thomson e William J. Emery – **Data Analysis Methods in Physical Oceanography** – Third Edition – ELSEVIER, 2014.

R. M. SCOTLAND - **The Measurement of Wind Velocity by Sonic Means** - Journal of Meteorology, vol. 12, pg 386-390, January/1955.

R.M. YOUNG COMPANY, Meteorological Instruments - Instructions - **Wind Monitor - model 05106** <[http://www.youngusa.com/Manuals/05106-90\(N\).pdf](http://www.youngusa.com/Manuals/05106-90(N).pdf)>.

Robert J. Urick – **Principle of Underwater Sound**, 34th edition, McGraw Hill, 1983. Table 5.2, pg. 113.

S. A. HSU et al. - **Determining the Power-Law Wind-Profile Exponent under Near-Neutral Stability Conditions at Sea** - Journal of Applied Meteorology, vol. 33, pg 757-765, June/1994.

S.G.P. Skey et. al. - **Measurement of Winds and Waves from a NOMAD buoy in High Seastates** – 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting - Florida, January /1998.

SonTek / Xylem Inc. – **ADP** <<https://www.sontek.com/adp-acoustic-doppler-profiler>>.

S. Pond – **Some Effects of Buoy Motion on Measurements of Wind Speed and Stress** - Journal of Geophysycal Research, vol. 73, no. 2, pg. 507-512, January/1998.

Stephan Howden et. al. - **Hurricane Katrina Winds Measured by a Buoy-Mounted Sonic Anemometer** – Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 25, no. 4, April/2008.

Suelen Trindade ROBALLO - **Escoamento Atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA): Parte II – Ensaios no Túnel de Vento** - Revista Brasileira de Meteorologia, vol.24, n.1, pp.87-99, 2008.

Vaisala Weather Transmitter - **WXT520 User Guide** - 2012

<<https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/M210906EN-C.pdf>>.

Vocabulário Internacional de Metrologia (**V.I.M.**) –

<www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf>.

Will Ribamar Mendes ALMEIDA - **Anemômetro Baseado no Método de Tempo de Trânsito: Estudo comparativo de arquiteturas, avaliação de incertezas e implementação** – Dissertação de Mestrado – São Luis – MA, setembro/2004.

WMO - <https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-109_TECO-2012/Session1/P1_27_Wauben_Experiences_sonic_wind_sensors.pdf> - acesso em outubro 2017.

WMO no. 8 - **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation** – 2012 <https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_8_en-2012.pdf>.

W. T. LIU et al. - **Bulk Parameterization of Air-Sea Exchanges of Heat and Water Vapor Including the Molecular Constraints at the Interface** – Journal of The Atmospheric Sciences, vol. 36, pg 1722-1735, September/1979.

ANEXOS

I – Reprodução das planilhas auxiliares na avaliação da incerteza

Avaliação de Incerteza de Medição de Velocidade do Vento - Anemômetro de Hélice.							
Dados de entrada	Equação do Mensurando: $v_{ah} = 0,098 \cdot f + \delta_{exat} + \delta_{res} + \delta_{rep}$		Arquivo Origem: cabofrio2.csv	Dados (n)		1000	amostras
				Vel. Média	Desvio Padrão	7,2	m/s
Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Tipo	Distribuição	Divisor	Unidades
f	73	1%	0,73	B	retangular	$\sqrt{3}$	Hz(s ⁻¹)
δ_{exat}	0,3	(exatidão)/2	0,15	B	retangular		m/s
δ_{res}	0,098	(resolução)/2	0,049	B	retangular		m/s
δ_{rep}	7,2	desvio padrão das amostras	3,0	A	normal	\sqrt{n}	m/s
Incertezas Padrão	u(f)		0,420				Hz
	u(δ_{exat})		0,1				m/s
	u(δ_{res})		0,03				m/s
	u(δ_{rep})		0,1				m/s
Coeficientes de Sensibilidade	$\partial v_{ah}/\partial f$	0,098	0,098				m/s
	$\partial v_{ah}/\partial \delta_{exat}$	δ_{exat}	1				m/s
	$\partial v_{ah}/\partial \delta_{res}$	δ_{res}	1				m/s
	$\partial v_{ah}/\partial \delta_{rep}$	δ_{rep}	1				m/s
Componentes da Incerteza	$uv_{ah}(f) = 0,098 \cdot u(f)$		0,04				m/s
	$uv_{ah}(\delta_{exat}) = \delta_{exat} \cdot u(\delta_{exat})$		0,1				m/s
	$uv_{ah}(\delta_{res}) = \delta_{res} \cdot u(\delta_{res})$		0,03				m/s
	$uv_{ah}(\delta_{rep}) = \delta_{rep} \cdot u(\delta_{rep})$		0,1				m/s
Incerteza Combinada	$uc(v_{ah}) = \{[uv_{ah}(f)]^2 + [uv_{ah}(\delta_{exat})]^2 + [uv_{ah}(\delta_{res})]^2 + [uv_{ah}(\delta_{rep})]^2\}^{1/2}$		0,2				m/s
Graus de Lib. Efetivos	$v_{eff} = uc(v_{ah})^4 / [u(\delta_{rep})^4 / (n-1)]$		15984				adimens.
Fator de Abrangência	k		1,96				adimens.
Incerteza Expandida	$U(v_{ah}) = uc(v_{ah}) \cdot k$		0,4				m/s

Figura 58 – Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de velocidade do vento com anemômetro de hélice.

Avaliação de Incerteza de Medição de Direção do Vento - Anemômetro de Hélice.							
Dados de entrada	Equação do Mensurando: $d_{ah} = 0,142 \cdot V + \delta_{res} + \delta_{rep}$		Arquivo Origem: cabofrio2.csv	Dados (n)		1000	amostras
				Dir. Média		115	°
				Desvio Padrão		78,5	°
Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Tipo	Distribuição	Divisor	Unidades
V	2500	ordem de grandeza do menor algarismo significativo	1	B	retangular	$\sqrt{3}$	mV
δ_{res}	0,5	(resolução)/2	0,25	B	retangular		°
δ_{rep}	115,0	desvio padrão das amostras	78,53	A	normal	\sqrt{n}	°
Incertezas Padrão	$u(V)$				0,6		mV
	$u(\delta_{res})$				0,14		°
	$u(\delta_{rep})$				2,48		°
Coeficientes de Sensibilidade	$\partial d_{ah}/\partial V$	0,142			0,142		°
	$\partial d_{ah}/\partial \delta_{res}$	δ_{res}			1		°
	$\partial d_{ah}/\partial \delta_{rep}$	δ_{rep}			1		°
Componentes da Incerteza	$u(d_{ah}(V)) = 0,142 \cdot u(V)$				0,08		°
	$u(d_{ah}(\delta_{res})) = \delta_{res} \cdot u(\delta_{res})$				0,14		°
	$u(d_{ah}(\delta_{rep})) = \delta_{rep} \cdot u(\delta_{rep})$				2,48		°
Incerteza Combinada	$uc(dah) = \{[udah(V)]^2 + [udah(\delta_{res})]^2 + [uvah(\delta_{rep})]^2\}^{1/2}$				2,49		°
Graus de Lib. Efetivos	$veff = uc(dah)^4 / [u(\delta_{rep})^4 / (n-1)]$				1007		adimens.
Fator de Abrangência	k				1,96		adimens.
Incerteza Expandida	$U(d_{ah}) = uc(d_{ah}) \cdot k$				5		°

Figura 59 – Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de direção do vento com anemômetro de hélice.

Avaliação de Incerteza de Medição de Velocidade do Vento - Anemômetro de Ultrassônico						
Dados de entrada	Equação do Mensurando: $v_{au} = 0,5 \times L \times (1/\Delta t) + \delta_{rep} + \delta_{exat} + \delta_{res}$		Arquivo Origem: CF01_201611_BMOP05.csv	Dados (n)	1000	amostras
				Vel. Média	6,4	m/s
				Desvio Padrão	3,1	m/s
Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Distribuição	Divisor	Unidades
L	0,0987	ordem de grandeza do menor algarismo significativo	0,0001	retangular	$\sqrt{3}$	m
Δt	0,0077		0,0001	retangular		s
δ_{rep}	6,4	desvio padrão das amostras	3,1	retangular	\sqrt{n}	m/s
δ_{exat}	0,3	(resolução)/2	0,15	retangular	$\sqrt{3}$	m/s
δ_{res}	0,1	(exatidão)/2	0,05	retangular		m/s
Incertezas Padrão	u(L)		0,0001			m
	u(Δt)		0,0001			s ⁻¹
	u(δ_{rep})		0,0980			m/s
	u(δ_{exat})		0,0866			m/s
	u(δ_{res})		0,0289			m/s
Coeficientes de Sensibilidade	$\partial v_{au}/\partial L$	0,5/ Δt	0,0039			s ⁻¹
	$\partial v_{au}/\partial \Delta t$	0,5*L/ Δt^2	832,6			m/s ²
	$\partial v_{au}/\partial \delta_{rep}$	1	1			adimens.
	$\partial v_{au}/\partial \delta_{exat}$	1	1			adimens.
	$\partial v_{au}/\partial \delta_{res}$	1	1			adimens.
Componentes da Incerteza	$uv_{au}(L) = (0,5/Dt)*u(L)$		2E-07			m/s
	$uv_{au}(\Delta t) = (0,5*L/\Delta t^2)*u(\Delta t)$		0,048			m/s
	$uv_{au}(\delta_{rep}) = 1*u(\delta_{rep})$		0,098			m/s
	$uv_{au}(\delta_{exat}) = 1*u(\delta_{exat})$		0,087			m/s
	$uv_{au}(\delta_{res}) = 1*u(\delta_{res})$		0,029			m/s
Incerteza Combinada	$uc(v_{au}) = \{[uv_{au}(L)]^2 + [uv_{au}(\Delta t)]^2 + [uv_{au}(\delta_{rep})]^2 + [uv_{au}(\delta_{exat})]^2 + [uv_{au}(\delta_{res})]^2\}^{1/2}$		0,14			m/s
Graus de Lib. Efetivos	$v_{eff} = uc(v_{au})^4/[u(\delta_{rep})^4/(n-1)]$		4437			adimens.
Fator de Abrangência	k		1,96			adimens.
Incerteza Expandida	$U(v_{au}) = uc(v_{au}) \cdot k$		0,3			m/s

Figura 60 – Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de velocidade do vento com anemômetro ultrassônico.

Avaliação de Incerteza de Medição de Direção do Vento - Anemômetro de Ultrassônico						
Dados de entrada	Equação do Mensurando: $d_{au} = \delta_{rep} + \delta_{exat} + \delta_{res}$		Arquivo Origem: CF01_201611_BMOP05.csv	Dados (n)	1000	amostras
				Dir. Média	113	
				Desvio Padrão	51	
Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Distribuição	Divisor	Unidades
δ_{rep}	113	desvio padrão das amostras	51	retangular	\sqrt{n}	°
δ_{exat}	3	(resolução)/2	1,5	retangular	$\sqrt{3}$	°
δ_{res}	1	(exatidão)/2	0,5	retangular		°
Incertezas Padrão	$u(\delta_{rep})$		1,6128			°
	$u(\delta_{exat})$		0,8660			°
	$u(\delta_{res})$		0,2887			°
Coeficientes de Sensibilidade	$\partial d_{au}/\partial \delta_{rep}$	1	1			adimens.
	$\partial d_{au}/\partial \delta_{exat}$	1	1			adimens.
	$\partial d_{au}/\partial \delta_{res}$	1	1			adimens.
Componentes da Incerteza	$ud_{au}(\delta_{rep}) = 1 * u(\delta_{rep})$		1,613			°
	$ud_{au}(\delta_{exat}) = 1 * u(\delta_{exat})$		0,866			°
	$ud_{au}(\delta_{res}) = 1 * u(\delta_{res})$		0,289			°
Incerteza Combinada	$uc(d_{au}) = \{[ud_{au}(\delta_{rep})]^2 + [ud_{au}(\delta_{exat})]^2 + [ud_{au}(\delta_{res})]^2\}^{1/2}$		2			°
Graus de Lib. Efetivos	$v_{eff} = uc(d_{au})^4 / [u(\delta_{rep})^4 / (n-1)]$		1742			adimens.
Fator de Abrangência	k		1,96			adimens.
Incerteza Expandida	$U(d_{au}) = uc(d_{au}) \cdot k$		4			°

Figura 61 – Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de direção do vento com anemômetro ultrassônico.

Avaliação de Incerteza de Medição de Direção de Onda						
Dados de entrada	Equação do Mensurando: $d_o = \delta_{rep} + \delta_{exat} + \delta_{res}$		Arquivo Origem: cabofrio2.csv	Dados (n)	1000	amostras
				Dir. Média	125	
				Desvio Padrão	52	
Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Distribuição	Divisor	Unidades
δ_{rep}	125	desvio padrão das amostras	52	retangular	\sqrt{n}	°
δ_{exat}	3	(exatidão)/2	1,5	retangular	$\sqrt{3}$	°
δ_{res}	1	(resolução)/2	0,5	retangular		°
Incertezas Padrão	$u(\delta_{rep})$		1,6444			°
	$u(\delta_{exat})$		0,8660			°
	$u(\delta_{res})$		0,2887			°
Coeficientes de Sensibilidade	$\partial d_o/\partial \delta_{rep}$	1	1			adimens.
	$\partial d_o/\partial \delta_{exat}$	1	1			adimens.
	$\partial d_o/\partial \delta_{res}$	1	1			adimens.
Componentes da Incerteza	$ud_o(\delta_{rep}) = 1 * u(\delta_{rep})$		1,644			°
	$ud_o(\delta_{exat}) = 1 * u(\delta_{exat})$		0,866			°
	$ud_o(\delta_{res}) = 1 * u(\delta_{res})$		0,289			°
Incerteza Combinada	$uc(d_o) = \{[ud_o(\delta_{rep})]^2 + [ud_o(\delta_{exat})]^2 + [ud_o(\delta_{res})]^2\}^{1/2}$		2			°
Graus de Lib. Efetivos	$v_{eff} = uc(d_o)^4 / [u(\delta_{rep})^4 / (n-1)]$		1710			adimens.
Fator de Abrangência	k		1,96			adimens.
Incerteza Expandida	$U(d_o) = uc(d_o) \cdot k$		4			°

Figura 62 – Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de direção de onda.

Avaliação de Incerteza de Medição de Altura Significativa de Onda						
Dados de entrada	Equação do Mensurando: $h_s = \delta_{rep} + \delta_{exat} + \delta_{res}$		Arquivo Origem: cabofrio2.csv	Dados (n)	1000	amostras
				Alt. Sig. Média	2,14	m
				Desvio Padrão	1,10	m
Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Distribuição	Divisor	Unidades
δ_{rep}	2,14	desvio padrão das amostras	1,10	retangular	\sqrt{n}	m
δ_{exat}	0,02	(exatidão)/2	0,011	retangular	$\sqrt{3}$	m
δ_{res}	0,01	(resolução)/2	0,005	retangular		m
Incertezas Padrão	$u(\delta_{rep})$		0,0348		m	
	$u(\delta_{exat})$		0,0062		m	
	$u(\delta_{res})$		0,0029		m	
Coeficientes de Sensibilidade	$\partial h_s / \partial \delta_{rep}$	1	1		adimens.	
	$\partial h_s / \partial \delta_{exat}$	1	1		adimens.	
	$\partial h_s / \partial \delta_{res}$	1	1		adimens.	
Componentes da Incerteza	$uh_s(\delta_{rep}) = 1 * u(\delta_{rep})$		0,035		m	
	$uh_s(\delta_{exat}) = 1 * u(\delta_{exat})$		0,006		m	
	$uh_s(\delta_{res}) = 1 * u(\delta_{res})$		0,003		m	
Incerteza Combinada	$uc(h_s) = \{[uh_s(\delta_{rep})]^2 + [uh_s(\delta_{exat})]^2 + [uh_s(\delta_{res})]^2\}^{1/2}$		0,04		m	
Graus de Lib. Efetivos	$veff = uc(h_s)^4 / [u(\delta_{rep})^4 / (n-1)]$		1077		adimens.	
Fator de Abrangência	k		1,96		adimens.	
Incerteza Expandida	$U(h_s) = uc(h_s) \cdot k$		0,07		m	

Figura 63 – Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de altura significativa de onda.

Avaliação de Incerteza de Medição de Altura Máxima de Onda						
Dados de entrada	Equação do Mensurando: $h_m = \delta_{rep} + \delta_{exat} + \delta_{res}$		Arquivo Origem: cabofrio2.csv	Dados (n)	1000	amostras
				Alt. Máx. Média	3,39	m
				Desvio Padrão	1,39	m
Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Distribuição	Divisor	Unidades
δ_{rep}	3,39	desvio padrão das amostras	1,39	retangular	\sqrt{n}	m
δ_{exat}	0,03	(exatidão)/2	0,017	retangular	$\sqrt{3}$	m
δ_{res}	0,01	(resolução)/2	0,005	retangular		m
Incertezas Padrão	$u(\delta_{rep})$		0,0441		m	
	$u(\delta_{exat})$		0,0098		m	
	$u(\delta_{res})$		0,0029		m	
Coeficientes de Sensibilidade	$\partial h_m / \partial \delta_{rep}$	1	1		adimens.	
	$\partial h_m / \partial \delta_{exat}$	1	1		adimens.	
	$\partial h_m / \partial \delta_{res}$	1	1		adimens.	
Componentes da Incerteza	$uh_m(\delta_{rep}) = 1 * u(\delta_{rep})$		0,044		m	
	$uh_m(\delta_{exat}) = 1 * u(\delta_{exat})$		0,010		m	
	$uh_m(\delta_{res}) = 1 * u(\delta_{res})$		0,003		m	
Incerteza Combinada	$uc(h_m) = \{[uh_m(\delta_{rep})]^2 + [uh_m(\delta_{exat})]^2 + [uh_m(\delta_{res})]^2\}^{1/2}$		0,05		m	
Graus de Lib. Efetivos	$veff = uc(h_m)^4 / [u(\delta_{rep})^4 / (n-1)]$		1109		adimens.	
Fator de Abrangência	k		1,96		adimens.	
Incerteza Expandida	$U(h_m) = uc(h_m) \cdot k$		0,09		m	

Figura 64 – Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de altura máxima de onda.

Avaliação de Incerteza de Medição de Período de Onda						
Dados de entrada	Equação do Mensurando: $t_o = \delta_{rep} + \delta_{exat} + \delta_{res}$		Arquivo Origem: cabofrio2.csv	Dados (n)	1000	amostras
				Per. Médio	10	s
				Desvio Padrão	2,7	s
Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Distribuição	Divisor	Unidades
δ_{rep}	10	desvio padrão das amostras	3	retangular	\sqrt{n}	s
δ_{exat}	0,1	(exatidão)/2	0,05	retangular	$\sqrt{3}$	s
δ_{res}	0,1	(resolução)/2	0,05	retangular		s
Incertezas Padrão	$u(\delta_{rep})$		0,0949			s
	$u(\delta_{exat})$		0,0289			s
	$u(\delta_{res})$		0,0289			s
Coeficientes de Sensibilidade	$\partial t_o / \partial \delta_{rep}$	1	1			adimens.
	$\partial t_o / \partial \delta_{exat}$	1	1			adimens.
	$\partial t_o / \partial \delta_{res}$	1	1			adimens.
Componentes da Incerteza	$u_{t_o}(\delta_{rep}) = 1 * u(\delta_{rep})$		0,095			s
	$u_{t_o}(\delta_{exat}) = 1 * u(\delta_{exat})$		0,029			s
	$u_{p_o}(\delta_{res}) = 1 * u(\delta_{res})$		0,029			s
Incerteza Combinada	$uc(t_o) = \{[u_{t_o}(\delta_{rep})]^2 + [u_{t_o}(\delta_{exat})]^2 + [u_{p_o}(\delta_{res})]^2\}^{1/2}$		0,1			s
Graus de Lib. Efetivos	$v_{eff} = uc(t_o)^4 / [u(\delta_{rep})^4 / (n-1)]$		1403			adimens.
Fator de Abrangência	k		1,96			adimens.
Incerteza Expandida	$U(t_o) = uc(t_o) \cdot k$		0,2			s

Figura 65 – Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de período de onda.

Avaliação de Incerteza de Medição de Velocidade da Corrente Marinha com ADCP						
Dados de entrada	Equação do Mensurando: $V_{46} = fd \times (c/0,684 \times fs) + \delta_{rep} + \delta_{exat} + \delta_{res}$		Arquivo Origem: DPL1_004.000	Dados (n)	1000	amostras
				Vel. Média	0,21	m/s
				Desvio Padrão	0,1	m/s
Fontes	Valor	Estimativa	Valor Estimado	Distribuição	Divisor	Unidades
fd_{46}	7	5%	0,35	retangular	$\sqrt{3}$	Hz
fs	76800	ordem de grandeza do menor algarismo significativo	1	retangular		Hz
c	1500	2%	30	retangular		m/s
δ_{rep}	0,21	desvio padrão das amostras	0,1	retangular	\sqrt{n}	m/s
δ_{exat}	0,0070	(exatidão)/2	0,0035	retangular	$\sqrt{3}$	m/s
δ_{res}	0,00001	(resolução)/2	0,00001	retangular		m/s
Incertezas Padrão	$u(fd_{46})$		0,20			Hz
	$u(fs)$		0,58			Hz
	$u(c)$		17,32			m/s
	$u(\delta_{rep})$		0,003			m/s
	$u(\delta_{exat})$		0,002			m/s
$u(\delta_{res})$		0,000006			m/s	
Coeficientes de Sensibilidade	$\partial V_{46}/\partial fd_{46}$	$c/0,684 \times fs$	0,029			m/s.Hz
	$\partial V_{46}/\partial fs$	$(-fd \times c) / (0,684 \times fs^2)$	-0,000003			m/s.Hz
	$\partial V_{46}/\partial c$	$fd/(0,684 \times fs)$	0,00013			m/s ²
	$\partial V_{46}/\partial \delta_{rep}$	1	1			adimens.
	$\partial V_{46}/\partial \delta_{exat}$	1	1			adimens.
$\partial V_{46}/\partial \delta_{res}$	1	1			adimens.	
Componentes da Incerteza	$uV_{46}(fd_{46}) = (c/0,684 \times fs) \times u(fd_{46})$		0,0058			m/s
	$uV_{46}(fs) = [(-fd_{46} \times c) / (0,684 \times fs^2)] \times u(fs)$		-0,000002			m/s
	$uV_{46}(c) = [fd_{46}/(0,684 \times fs)] \times u(c)$		0,002			m/s
	$uV_{46}(\delta_{rep}) = 1 \times u(\delta_{rep})$		0,003			m/s
	$uV_{46}(\delta_{exat}) = 1 \times u(\delta_{exat})$		0,002			m/s
$uV_{46}(\delta_{res}) = 1 \times u(\delta_{res})$		0,000006			m/s	
Incerteza Combinada	$uc(V_{46}) = \{[uV_{46}(fd_{46})]^2 + [uV_{46}(fs)]^2 + [uV_{46}(c)]^2 + [uV_{46}(\delta_{rep})]^2 + [uV_{46}(\delta_{exat})]^2 + [uV_{46}(\delta_{res})]^2\}^{1/2}$		0,007			m/s
Graus de Lib. Efetivos	$veff = uc(V_{46})^4 / [u(\delta_{rep})^4 / (n-1)]$		24806			adimens.
Fator de Abrangência	k		1,96			adimens.
Incerteza Expandida	$U(V_{46}) = uc(V_{46}) \cdot k$		0,014			m/s

Figura 66 – Reprodução da planilha de avaliação de incerteza de medição de corrente marinha a 46m de profundidade, com perfilador acústico.

II – Reprodução das especificações técnicas dos equipamentos

1) Anemômetro de hélice:

YOUNG
Model 05106 Wind Monitor MA

The Wind Monitor MA is an accurate and reliable wind sensor specifically designed for the rigors of the marine environment.

The wind speed sensor is a four blade helicoid propeller. Unique transducer produces a pulse signal without electrical contacts or slip rings.

The wind direction sensor is a durable molded vane. Vane angle is sensed by a precision potentiometer housed in a sealed chamber. With a known voltage applied to the potentiometer, the output voltage is directly proportional to vane angle.

All materials are carefully selected for corrosion resistance and maximum durability in the harsh marine environment. Extremely durable oversized ceramic bearings are used throughout. In addition to being more wear resistant, ceramic bearings are more corrosion resistant in environments that are hostile to steel bearings. The instrument mounts on standard 1 inch pipe.

For specific applications, separate signal conditioning devices are available. Model 05603C Wind Sensor Interface offers calibrated 0-5VDC outputs for wind speed and wind direction. Model 05631C Wind Line Driver provides calibrated 4-20 mA current signals for each channel, useful in high noise areas or for long cables of up to several



Specifications

Range:
Wind speed: 0-100 m/s (224 mph)
Azimuth: 360° mechanical, 355° electrical (5° open)

Accuracy:
Wind speed: ±0.3 m/s (0.6 mph) or 1% of reading
Wind direction: ±3 degrees

Threshold:*
Propeller: 1.1 m/s (2.4 mph)
Vane: 1.1 m/s (2.4 mph)

Dynamic Response:*
Propeller distance constant (63% recovery) 2.7 m (8.9 ft)
Vane delay distance (50% recovery) 1.3 m (4.3 ft)
Damping ratio: 0.3
Damped natural wavelength: 7.4 m (24.3 ft)
Undamped natural wavelength: 7.2 m (23.6 ft)

Power Requirement:
Potentiometer excitation: 15 VDC maximum

Operating Temperature:
-50 to +60° C

Signal Output:
Wind speed: magnetically induced AC voltage, 3 pulses per revolution. 1800 rpm (90 Hz) = 8.8 m/s (19.7 mph)
Azimuth: analog DC voltage from conductive plastic potentiometer – resistance 10K Ω, linearity 0.25%, life expectancy – 50 million revolutions

2) Anemômetro ultrassônico:

WXT520

WEATHER MULTI-SENSOR

Technical Data

Wind		Barometric pressure	
Speed		Range	600 ... 1100 hPa
range	0 ... 60 m/s	Accuracy	±0.5 hPa at 0 ... +30 °C (+32 ... +86 °F) ±1 hPa at -52 ... +60 °C (-60 ... +140 °F)
response time	250 ms	Output resolutions and units	0.1 hPa, 10 Pa, 0.0001 bar, 0.1 mmHg, 0.01 inHg
accuracy	0 ... 35 m/s		
	±0.3 m/s or ±3%, whichever is greater		
	±5%		
output resolutions and units	35 m/s ... 60 m/s 0.1 m/s, 0.1km/h, 0.1 mph, 0.1 knots		
Direction		Relative humidity	
azimuth	0 ... 360°	Range	0 ... 100 %RH
response time	250 ms	Accuracy	±3 %RH within 0 ... 90 %RH ±5 %RH within 90 ... 100 %RH
accuracy	±3°	Output resolution and unit	0.1 %RH
output resolution and unit	1°	General	
		Operating temperature	-52 ... +60 °C (-60 ... +140 °F)

3) Direção de onda:

Resolution/Accuracy

	RANGE	RESOLUTION	ACCURACY
HEAVE	±20 m	0.01 m	Better than 1%
PERIOD	1.5 to 33 sec	0.1 sec	Better than 1%
DIRECTION	0 to 360°	1°	3°
WATER TEMP.	-5 to +50°C	0.1°C	±0.5°C



www.axystechnologies.com | 1.250.655.5850 | info@axys.com



4) Perfilador acústico (ADCP):

Profile Parameters

Not designed for use on moving vessels

Velocity accuracy: $\pm 1\%$ of the water velocity $\pm 0.5\text{cm/s}$.
Velocity resolution: 0.1cm/s
Velocity range: $\pm 5\text{m/s}$ (default)
 $\pm 10\text{m/s}$ (maximum)
Depth cell size: 4–32m
Number of depth cells: 1–128
Ping rate: 1Hz (typical)

Echo Intensity Profile

Vertical resolution: depth cell size
Dynamic range: 80dB
Precision: $\pm 1.5\text{dB}$ (relative measure)

Transducer and Hardware

Beam angle: 20°
Configuration: 4-beam
Internal memory: Two PCMCIA slots; one memory card included
Communications: RS-232 or RS-422; ASCII or binary output at 1200–115,400 baud.



RD Instruments
Acoustic Doppler Solutions
www.rdinstruments.com

Power

DC input: 20–60VDC. Four internal alkaline battery packs.
Voltage: 42V DC (new) 28VDC (depleted)
Capacity (each pack): @ 0°C : 400 Watt hours
Transmit at 35V:
• 1000W (max power)
• 80W (lower power, Long Range mode)
• 20W (low power, BroadBand mode)

Standard Sensors

Temperatures (mounted on transducer):

Range: -5° to 45°C
Precision: $\pm 0.4^\circ\text{C}$
Resolution: 0.01°

Tilt: Range: $\pm 15^\circ$
Accuracy: $\pm 0.5^\circ$
Precision: $\pm 0.5^\circ$
Resolution: 0.01°

Compass (fluxgate type, includes built-in field calibration feature):

Accuracy: $\pm 2^\circ$
Precision: $\pm 0.5^\circ$
Resolution: 0.01°
Maximum tilt: $\pm 15^\circ$

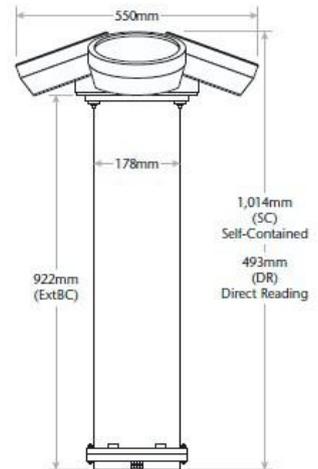
Pressure Sensor:

Accuracy: $\pm 5\text{m}$

Available Options

- 3000m pressure-rated configuration
- External Battery Case (ExtBC)
- Mooring accessories: In line and bottom mount accessories available from Flotation Technologies and Mooring Systems.
- Remote head configurations
- Memory: Up to 2 gigabytes

Dimensions



RD Instruments

9855 Businesspark Avenue, San Diego, CA 92131 USA

Tel. +1-858-693-1178 • Fax +1-858-695-1459 • E-mail: sales@rdinstruments.com

RD Instruments Europe, Les Nertières, 5 allée Hector Pintus, 06610 La Gaude, France

Tel. +33-49-211-0930 • Fax +33-49-211-0931 • E-mail: rdi@rdieurope.com



Specifications subject to change without notice. Rev. 0104