

Problemas Presentes na Observação do Nível do Mar Visando a Definição do Datum Vertical de Grandes Redes Geodésicas

Roberto Teixeira Luz

Departamento de Geodésia – IBGE

Claudio Freitas Neves

UFRJ - COPPE - Programa de Engenharia Oceânica

XVII Congresso Brasileiro de Cartografia, setembro/1995, Salvador, BA

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é a investigação da influência das ondas de pequeno período (6 a 300 s) sobre a observação do nível médio do mar (NMM), raramente mencionadas como agente importante na composição da topografia do nível médio, i.e., a separação entre Geóide e nível médio. São analisados os efeitos dinâmicos das ondas de gravidade sobre os dispositivos tradicionais de observação do nível do mar e também sobre o próprio NMM. O principal resultado é a indicação de que as ondas podem causar um rebaixamento significativo do NMM, em relação à precisão requerida pela Geodésia e por outras aplicações que necessitam de dados de longo prazo.

ABSTRACT

This paper investigates the influence of short period waves (6 to 300 s) on the observation of mean sea level (MSL), which are seldom mentioned as being important part of sea surface topography, i.e., the separation between Geoid and MSL. The dynamic effects of gravity waves on the MSL and also on the conventional sea level measurement devices are analysed. The most important conclusion is that waves can cause a significant lowering of MSL, when compared with the precision needed by Geodesy and other long term applications.

INTRODUÇÃO

A hipótese de ser desprezível a separação entre nível médio do mar (NMM) e Geóide, já de longa data refutada conceitualmente pela Geodésia (Zilkoski et alii, 1991), somente nos últimos anos vem sendo de fato rejeitada, à medida em que aumentam os conhecimentos acerca dos efeitos "semi-permanentes" de vários agentes físicos sobre o NMM e, assim, podem ser esboçadas as primeiras técnicas para correção de tais efeitos (Merry & Vanicek, 1981). Dentre estes agentes, inclui-se, por exemplo, a pressão atmosférica, cujo efeito médio sobre o NMM é da ordem de -1 cm/mbar. Ao resultado final de todas essas influências, i.e., a separação entre NMM e Geóide, é dado o nome de topografia do nível médio (TNM).

O objetivo do presente trabalho é a investigação da influência das ondas de pequeno período (6 a 300 s) sobre a observação do NMM, raramente mencionadas pela bibliografia especializada como agente importante na composição da TNM. Tal estudo assume maior relevância quando se considera a recomendação, da Comissão Oceanográfica Intergovernamental (IOC/UNESCO) e de outras instituições científicas internacionais (NRC, 1987), de que qualquer estação de monitoramento de longo prazo do NMM localize-se em costa aberta, ou seja, em locais com alto grau de exposição às ondas do mar.

São analisados os efeitos dinâmicos das ondas de gravidade sobre os dispositivos tradicionais de observação do nível do mar e também sobre o próprio NMM. O principal resultado é a indicação de que as ondas podem causar um rebaixamento significativo do NMM, em relação à precisão requerida pela Geodésia e por outras aplicações que necessitam de dados de longo prazo. Tais estudos teóricos são complementados por experimentos de laboratório e ensaios com dados reais de nível do mar obtidos por estações maregráficas operadas pelo IBGE.

Não se questiona aqui a adequabilidade do NMM para a definição de um Datum Vertical, entendendo-se que tal discussão insere-se em um contexto mais amplo no panorama da Geodésia no Brasil.

CONSIDERAÇÕES GEODÉSICAS

Apesar de referida ao NMM no Porto de Imbituba, SC, determinado com observações coletadas entre 1949 e 1957, a rede altimétrica (Figura 1) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) estabeleceu conexões com a maioria das estações maregráficas existentes na costa brasileira. A cada conexão deste tipo, as altitudes da rede foram comparadas com aquelas oriundas do NMM local, permitindo então a construção de gráficos como o da Figura 2, que mostra a relação entre o NMM_{Imbituba}[49-57] e os NMM locais (Alencar, 1990).



Figura 1 – Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro

Quando as diferenças não se mostravam significativas, eram interpretadas como reflexo dos erros inerentes ao nivelamento geométrico. Tal é o caso da diferença entre Imbituba e Canavieiras, mostrada no gráfico. Aplicando, de forma simplista, o critério de controle de qualidade atualmente vigente no IBGE para o nivelamento de alta precisão (IBGE, 1983), poder-se-ia concluir que o nivelamento entre Imbituba e Canavieiras tem uma precisão de $1,1 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$, atendendo portanto à tolerância de $4 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$.

Diferenças maiores, como a de 29 cm entre Imbituba e Vitória – precisão de $7,5 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$ –, não se mostram coerentes com os resultados fornecidos por outros controles de qualidade, que indicam uma precisão interna da rede muito melhor que isso. Através do recurso ao conceito de topografia do nível médio resolve-se facilmente este problema, mostrando que, por exemplo, as observações referentes a Vitória podem apresentar influência das águas continentais, menos densas que a água do mar.

Outro problema suscitado pelo gráfico da Figura 2 diz respeito à precisão necessária para a observação do nível do mar. Sendo desejado que os diferentes NMM ao longo da costa sirvam de controle adicional ao nivelamento geométrico, as respectivas observações devem garantir uma precisão melhor que a da própria rede, de forma a não contaminá-la com erros externos. Considerando uma distância hipotética de 100 km entre estações maregráficas, a tolerância para o erro interno da

rede é de 4 cm. Assim, seria recomendável que o nível do mar observado em cada estação tivesse uma precisão no mínimo duas vezes melhor. Na prática, poderia ser usado o valor de 1 cm.

Com base em tais considerações, pode-se agora fazer uma análise dos modelos de marégrafos mais utilizados no Brasil.

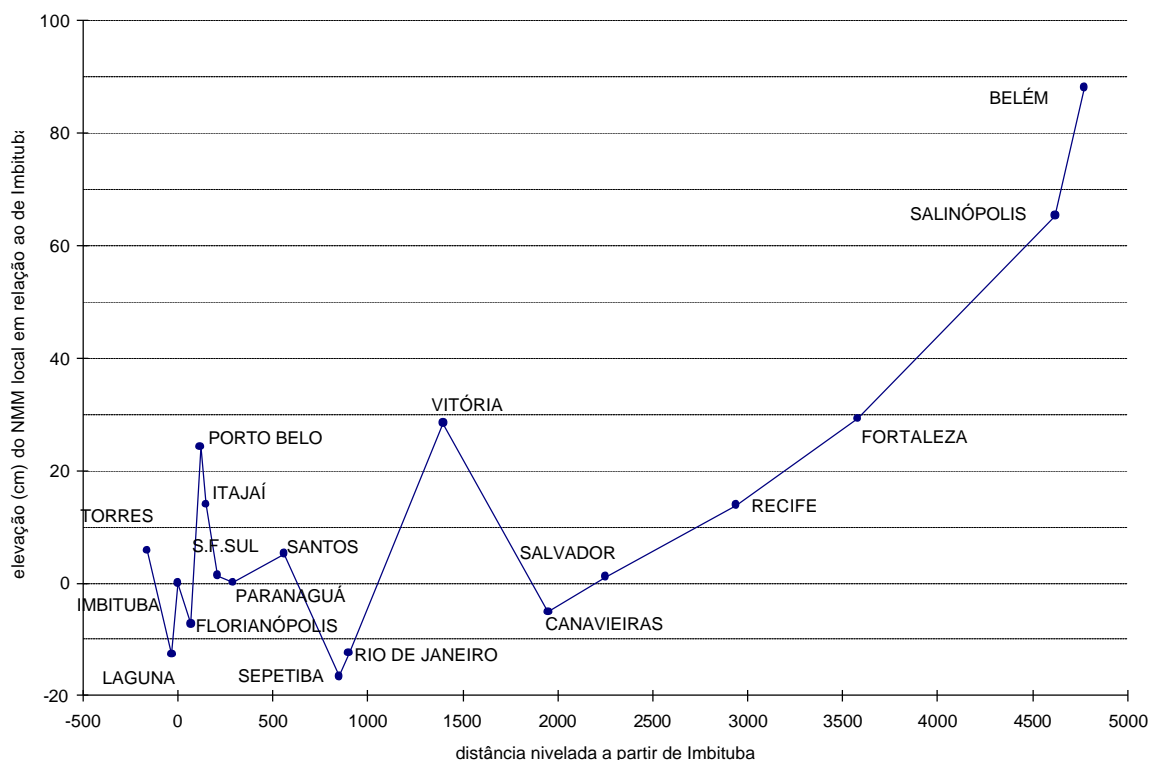


Figura 2 – (Fonte : Alencar, 1990) Diferenças entre o NMM em Imbituba e em alguns outros portos brasileiros

OBSERVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR

A imensa maioria das estações maregráficas brasileiras é do tipo convencional (Figura 3), ou seja, um flutuador instalado no interior de um tubo vertical (poço de tranqüilização), cujo interior comunica-se com o mar através de pequeno(s) orifício(s) em sua porção inferior. O movimento do flutuador é transmitido através de um cabo até o sistema gráfico de registro. O controle do nível de referência das observações é feito através da leitura de uma régua de marés, que por sua vez é conectada às RRNN da estação maregráfica (IOC, 1985).

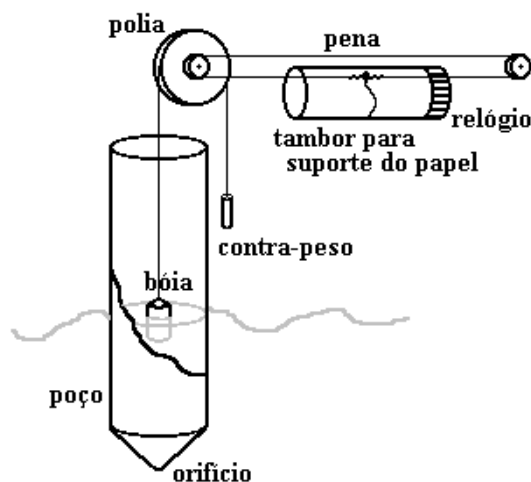


Figura 3 – (Fonte : IOC, 1985) Marégrafo convencional

Em oposição à aparente simplicidade de instalação e operação, este modelo apresenta diversos inconvenientes, considerando-se a operação com objetivos geodésicos. A utilização da régua para se fazer o controle da referência é um deles. Em locais sem absoluta proteção contra a incidência de ondas, estas impedem que a leitura da régua seja feita de forma precisa. Esta deficiência pode ser contornada com a utilização da chamada trena elétrica, que satisfaz plenamente à precisão requerida pela Geodésia.

O registro gráfico, além de reduzir a precisão das observações, constitui um enorme entrave para a rápida utilização das observações, já que a digitalização dos maregramas é um processo demorado e sujeito a muitos erros. A diminuição da precisão das observações depende da escala vertical utilizada no marégrafo. Considerando-se a escala 1:20 e o valor de 0.5 mm para a espessura da pena, a indeterminação no NA registrado graficamente chega a 1 cm. Também esta deficiência pode ser contornada; neste caso, com a utilização de conversores analógico-digitais (AD) e unidades digitais de armazenamento de dados.

Os problemas inerentes ao processo convencional de observação do nível do mar, sintetizados por Lennon & Mitchell (1992), originam-se principalmente da ação das ondas de alta frequência e das correntes, e das variações locais da densidade da água. Todas essas causas relacionam-se direta ou indiretamente à utilização do poço de tranquilização. Os efeitos das ondas e das correntes podem ser atribuídos à alteração do campo de pressões causada pelo poço, que leva à diminuição do NA em seu interior. As variações de densidade da água resultam no acúmulo de água de menor densidade no interior do poço, causando uma elevação do NA interno. Em casos extremos, a ação conjunta desses fatores resulta em erros de vários decímetros.

Outros modelos podem eventualmente estar sendo utilizados no Brasil, mas o caráter restrito de tal utilização leva à escolha do modelo convencional para a investigação ora apresentada. Além disso, serviu de diretriz para esta escolha o fato de que as estações operadas pelo IBGE (Copacabana e Macaé) são do tipo convencional.

INFLUÊNCIA DAS ONDAS SOBRE O NMM

A teoria das ondas de pequena amplitude (teoria linear) fornece as expressões para superfície livre (η) e potencial de velocidades (Φ) :

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (1)$$

$$\Phi = -\frac{Hg}{2\sigma} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t) \quad (2)$$

A equação de Bernoulli na superfície livre (SL) tem a forma

$$\frac{(\partial\Phi/\partial x)^2 + (\partial\Phi/\partial z)^2}{2} - \frac{\partial\Phi}{\partial t} + gz = C(t) \quad (3)$$

Promediando ao longo de um período, expandindo por Taylor até a SL e substituindo as expressões (1) e (2), obtém-se (e.g., Dean & Dalrymple, 1984)

$$\bar{\eta} = -\frac{H^2 k}{8 \sinh(2kh)} + \frac{\overline{C(t)}}{g} \quad (4)$$

A determinação de $C(t)$ é feita considerando-se η nulo em águas profundas. Assim procedendo, chega-se a $C(t)=0$. Portanto, à medida que a onda passa de águas profundas para águas intermediárias e rasas, η assume valor negativo cada vez mais acentuado, até que a onda arrebente. Este é o fenômeno conhecido como *wave setdown*, que estará presente nas observações de estações maregráficas localizadas na área de transição estabelecida acima, independentemente do tipo de marégrafo utilizado (acústico, pressão, flutuador etc).

Considerando uma praia de declividade suave e utilizando o critério de arrebentação progressiva (equação 6), obtém-se os valores de *setdown* constantes da Tabela 1.

Tabela 1 – Rebaixamento do NMM para ondas típicas

onda	rebaixamento (cm)				
	h=6m	h=5m	h=4m	h=3m	h=2m
H=2m, T=15s	3,9	4,7	6,0	8,0	–
H=2m, T=12s	3,7	4,5	5,8	7,9	–
H=1m, T=12s	0,9	1,1	1,4	2,0	3,0
H=1m, T=8s	0,8	1,0	1,3	1,8	2,7

Apesar de obtidos a partir da teoria linear, cuja aplicabilidade reduz-se à medida que a profundidade diminui, os resultados apresentados na Tabela 1 fornecem uma boa indicação da influência das ondas sobre o NMM. Como se pode observar, o rebaixamento por elas causado pode chegar a valores significativos, ainda mais quando pretende-se utilizar tal NMM na Geodésia. Cabe lembrar que, sendo dependente também da profundidade, esse efeito das ondas não é uniforme, assumindo valores diversos na preamar e na baixamar.

Como já mencionado, a expressão (4) é válida apenas até o ponto de arrebentação. A partir daí, outros efeitos dinâmicos passam a existir, originando, por sua vez, uma elevação do NMM (*wave setup*). A expressão de tal elevação é

$$\bar{\eta} = -\frac{\kappa^2 h_b}{16} + \frac{3\kappa^2 / 8}{1 + 3\kappa^2 / 8} (h_b - h) \quad (5)$$

na qual $\kappa=0,78$ e

$$h_b = H / \kappa \quad (6)$$

A Tabela 2 apresenta a elevação do NMM para as mesmas ondas constantes da Tabela 1.

Tabela 2 – Elevação do NMM para ondas típicas

onda	elevação (cm)			
	h=2m	h=1,5m	h=1m	h=0,5m
H=2m	0,7	10,0	19,3	28,5
H=1m	–	–	0,3	9,6

EFETOS DAS ONDAS SOBRE O NA DO TUBO

Noye (1974) apresenta a equação governante do movimento do NA no poço de tranquilização

$$\frac{d\eta_w}{dt} = \pm C_1 \sqrt{|K_1 \eta_w - K_p \eta|} \quad (7)$$

sendo

$$K_p = \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \quad (8)$$

$$K_1 = 1 + \frac{y_0 + \eta_w}{g\eta_w} \frac{d^2\eta_w}{dt^2} \quad (9)$$

$$C_1 = \frac{R\sqrt{2g}}{\sqrt{1-R^2}} \quad (10)$$

$$R = \frac{n_o A_o C_c}{A_w} \quad (11)$$

Para sua solução, obtida através de métodos numéricos, Noye considera ondas longas, o que permite simplificar a equação (7), chegando a

$$\frac{d\eta_w}{dt} = \pm C_1 \sqrt{|\eta_w - \eta|} \quad (12)$$

O gráfico da Figura 4 mostra a solução da equação (12) em função da frequência adimensional

$$\beta = \frac{\sigma}{C_1} \sqrt{\frac{H}{2}} \quad (13)$$

Tal gráfico fornece uma diretriz segura para o projeto de poços de tranquilização para estações maregráficas, de forma a evitar efeitos indesejáveis, como aquele reproduzido na Figura 5. O maior cuidado deve residir na escolha do diâmetro do(s) orifício(s), que assume papel importante no comportamento do NA interno no poço de tranquilização.

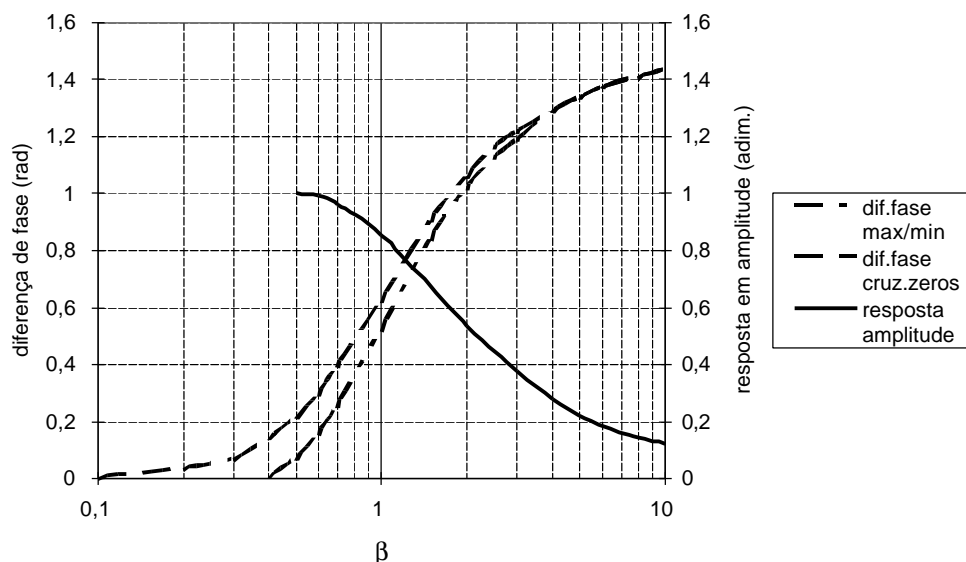


Figura 4 – (Fonte : Noye, 1974) Resposta do NA no poço de tranquilização a uma dada oscilação externa, em função da frequência adimensional β

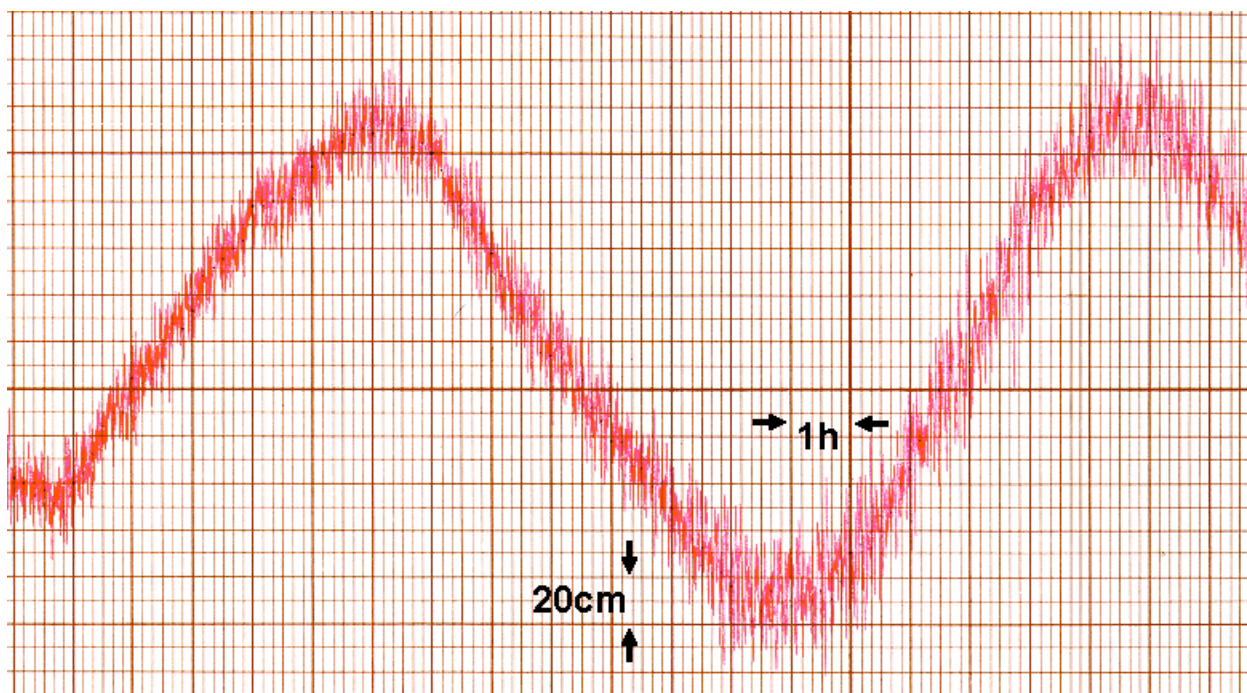


Figura 5 – Registro produzido pela Estação Maregráfica do Porto de Imbetiba, em Macaé, apresentando oscilações exageradas do NA do poço de tranquilização, possivelmente em função do superdimensionamento dos orifícios

ENSAIOS NUMÉRICOS

Foram realizadas simulações computacionais em que, através de um sistema de planilha eletrônica, a equação (12) foi resolvida para ondas não-lineares (teoria da função de corrente). Contrariamente ao que ocorre com a teoria linear, a teoria de função de corrente adequa-se tanto para águas profundas quanto para águas rasas, fornecendo portanto resultados mais confiáveis para as situações até aqui abordadas. Especialmente, a teoria da função de corrente prevê uma assimetria entre as elevações da crista e do cavado; no caso da equação (7), foi utilizado diretamente o resultado da pressão dinâmica, sem se lançar mão de um coeficiente de transferência como K_p .

Os resultados dessas simulações numéricas são apresentados no gráfico da Figura 6, em que podem ser apreciados não só os efeitos da atenuação da oscilação do NA interno, como também o próprio rebaixamento do NMM. É evidente nesta figura a assimetria entre a elevação e o rebaixamento do nível d'água no interior do tubo, reflexo de uma dinâmica externa não linear. Observa-se também a influência do diâmetro do orifício. Para um tubo de tranquilização com diâmetro de 30 cm, foram testados dois casos de relação A_o/A_w , a saber 1:10, conforme recomenda a Comissão Oceanográfica Intergovernamental, e 1:60, utilizada na Estação Maregráfica de Copacabana. Evidencia-se a importância da correta escolha das dimensões do orifício.

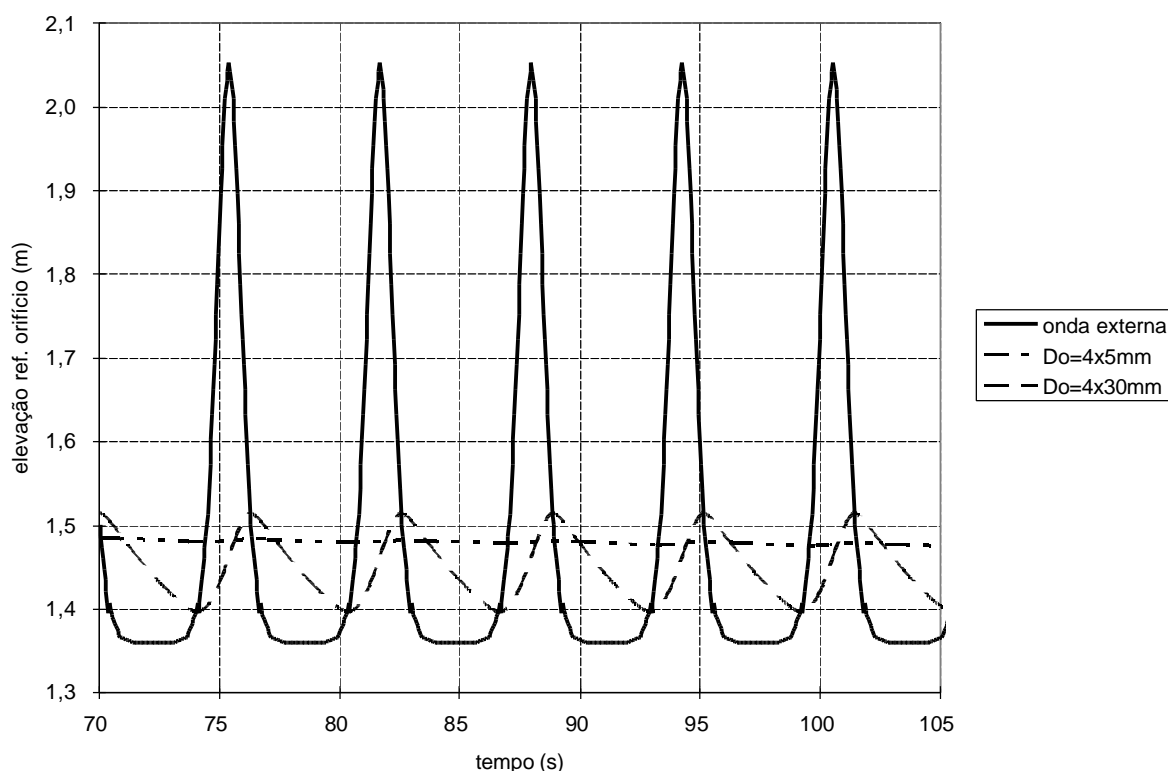


Figura 6 – Respostas do NA interno de um poço com 30 cm de diâmetro a uma onda não-linear (profundidade 1,8 m, altura 1 m, período 8 s), considerando quatro orifícios de 5 ou de 30 mm de diâmetro a 1,5 m de profundidade

CONCLUSÕES

Se, por um lado, a instalação de estações maregráficas em costa aberta evita uma indesejada interferência continental no NMM (variação da densidade da água em função de descarga fluvial etc), de outro, são introduzidos novos problemas, tais como o rebaixamento do NMM em função da ação das ondas de pequeno período. Uma solução para tal problema é a escolha de locais com profundidade suficiente para reduzir o efeito das ondas, bem como a utilização de estações maregráficas em que a filtragem de tais oscilações seja feita numericamente. Com isso, o poço de tranquilização passaria a atuar mais como proteção do flutuador contra corpos estranhos, e menos como filtro das oscilações de alta frequência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à DHN, à PETROBRÁS, a Furnas Centrais Elétricas, ao Laboratório de Instrumentação Oceanográfica da COPPE/UFRJ e ao CNPq pelo apoio à realização deste trabalho.

NOTAÇÃO

h	–	elevação da superfície livre em relação ao NMM
Φ	–	potencial de velocidade
H	–	altura da onda
S	–	freqüência angular ($2\pi/T$)
T	–	período da onda
k	–	número de onda ($2\pi/L$)
L	–	comprimento da onda
g	–	aceleração da gravidade
h	–	profundidade local
h_w	–	elevação da SL dentro do poço
y_0	–	profundidade do(s) orifício(s) ref. NMM
n_o	–	número de orifícios
A_o	–	área do(s) orifício(s)
A_w	–	área do poço
C_c	–	coeficiente de contração ($\approx 0,62$ para orifícios circulares)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alencar, J.C.M. (1990) Datum Altimétrico Brasileiro. Cadernos de Geociências 5. Diretoria de Geociências, IBGE. Rio de Janeiro.
- Carrera, G.; Vanícek, P. (1989) RESPONSE – A System for the Determination of Float-Type Tide Gauge Response Functions. DSS Research Contract. Fredericton.
- Dean, R.G.; Dalrymple, R.A. (1984) Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. Prentice-Hall. Englewood Cliffs.
- IBGE (1983) Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos. Boletim de Serviço nº 1602. IBGE. Rio de Janeiro.
- IOC (1985) Manual on Sea Level Measurement and Interpretation, vol. I. Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO. Paris.
- Lennon, G.W.; Mitchell, W.McL. (1992) The Stilling Well – a Help or a Hindrance ?. In: Joint IAPSO-IOC Workshop on Sea Level Measurements and Quality Control. IOC Workshop Report No. 81. IOC, UNESCO. Paris.
- Merry, C.L.; Vanícek, P. (1981) The Zero Frequency Response of Sea Level to Meteorological Influences. Technical Report No. 82. University of New Brunswick, Dept. of Surveying Engineering.
- Noye, B.J. (1974) Tide-well Systems. Journal of Marine Research 32(2), 129-194.
- NRC (1987) Responding to Changes in Sea Level – Engineering Implications. Committee on Engineering Implications of Changes in Relative Mean Sea Level, National Research Council. National Academy Press. Washington, DC.
- Zilkoski, D.B.; Balazs, E.I.; Bengston, J.M. (1991) Datum Definition Study for the North American Vertical Datum of 1988 (draft version). Vertical Network Branch, NGS-NOS-NOAA. Rockville.