

## Comportamento de Monobóias em Águas Profundas

**Carlos Levi**

**Antonio C. Fernandes**

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Cx. Postal 68 508

Rio de Janeiro, CEP 21 945-970, Brasil

**Marcelo Teixeira**

**Maurício Aratânia**

PETROBRAS

Rio de Janeiro, Brazil

**RESUMO:** A indústria de petróleo offshore, no Brasil, avança rapidamente para lâminas d'água cada vez maiores, já tendo atingido marcas recordes superiores a 1800 m de profundidade. Acompanhando esta tendência, a aplicação de sistemas de produção utilizando bóias de ancoragem e de sustentação de riser de exportação de óleo- Sistemas Monobóias-, já incluem operações pioneiras em lâminas d'água de até 830 m. Nestas faixas de profundidades, alguns aspectos do projeto do sistema monobóia podem se tornar críticos e alterar substantivamente o seu comportamento.

Neste trabalho discutem-se alguns pontos que podem introduzir importantes modificações nas características operacionais da monobóia. Os resultados e conclusões aqui relatados foram identificados durante estudos realizados sobre o comportamento de uma monobóia instalada na Bacia de Campo, R.J., operando em profundidade da ordem de 830 m.

**Palavras-chave:** hidrodinâmica, monobóias, sistemas flutuantes

### 1. INTRODUÇÃO

Sistemas monobóias dedicados à operação de exportação de petróleo offshore vêm demonstrando ser uma alternativa bastante adequada em vários empreendimentos no Brasil, e em outros países. Dentre as suas principais vantagens destacam-se a sua concepção simples e econômica; rapidez na instalação e segurança na operação; possibilidade de antecipar a retirada e transferência do óleo diretamente por navios-tanque, evitando, portanto, a necessidade de significativos investimentos em construção e manutenção de dispendiosas redes de oleodutos.

A configuração típica de sistemas monobóias (Fig. 1) consiste de uma grande bóia (15 a 20 m de diâmetro) cujo posicionamento no local de operação é garantido por um conjunto de linhas de amarração (ou ancoragem). Este sistema de amarração é dimensionado para servir de ponto de ancoragem para um ou dois navios-tanques simultaneamente. O primeiro navio, em geral, em regime de operação contínua de armazenamento do óleo (navio-reservatório), conecta-se à bóia através de uma estrutura rígida (“yoke”) ou flexível (“hawser”). O segundo navio, utilizado para a operação de transferência do óleo para depósitos em terra conecta-se ao navio-reservatório através de um segundo hawser.

No Brasil, os sistemas monobóias começaram a ser operados no final da década de setenta. Comparando-se com outras estruturas offshore mais complexas, as suas vantagens fizeram a opção monobóia uma escolha natural em vários dos empreendimentos localizados na Bacia de Campos, litoral norte do Estado do Rio de Janeiro. Atualmente, o escoamento de óleo baseado em sistemas monobóias atinge cerca de 60% da produção nacional. As condições meteorológicas moderadas normalmente encontradas nos campos offshore do Brasil, talvez possam explicar o seu excelente desempenho operacional, cujos índices de falhas ou acidentes podem ser considerados bastante baixos. Este indicativo de sucesso já foi plenamente demonstrado em operações até 400 m de profundidade. Agora, novos desafios à tecnologia monobóia estão surgindo quando se pretende atingir lâminas d’água superiores a 800 m.

Este trabalho apresenta resultados e conclusões obtidos durante estudos de revisão dos conceitos até aqui adotados no projeto de sistemas monobóias, visando a adaptação das suas características para a operação numa região de lâmina d’água de 830 m, na Bacia de Campos, R. J.

Uma conclusão que se tornou evidente já na fase inicial dos estudos refere-se à alta sensibilidade refletida na dinâmica da monobóia quando, às vezes, relativamente pequenas alterações são feitas em alguns parâmetros do seu projeto.

Em lâminas d’água muito profundas, surge a necessidade do uso de linhas de ancoragem mais leves para conciliar o aumento de peso devido ao maior comprimento das linhas com as pequenas dimensões da bóia. Fernandes et al., 1998, discutem o uso de cabos de poliéster como uma alternativa capaz de reduzir o peso total das linhas de ancoragem e ainda assim manter o nível de restauração horizontal do sistema de amarração compatível com as solicitações impostas pelo navio-reservatório e/ou navio-aliviador submetidos às condições ambientais (ondas, ventos e correntezas) presentes na área de operação.

O mar local- como é definida a condição de mar da própria região de geração das ondas pelo vento- caracteriza-se por ondas de pequeno comprimento (no caso da Bacia de Campos, da ordem do diâmetro da bóia), pouco energéticas mas com um alto índice de ocorrência. Para estruturas de grandes dimensões (por exemplo: Plataformas Semi-Submersíveis, Tension Leg-TLP, embarcações de grande porte etc.), este tipo de onda não chega a produzir nenhum efeito prático mais relevante no seu comportamento. No entanto, devido às pequenas dimensões típicas da bóia, as frequências naturais dos seus movimentos angulares podem apresentar valores faixa das frequências das ondas de maior ocorrência desse mar local.

No caso específico de sistemas monobóias em operação na Bacia de Campos, relatos feitos a partir de observações in loco dão conta da existência de um comportamento bastante característico apresentado por algumas bóias, associado a oscilações em frequências relativamente altas. Devido ao seu ritmo e movimentos típicos, este comportamento lembra, em alguns aspectos, o manejo de um pandeiro. Por analogia, o fenômeno ressonante observado durante a operação da monobóia foi batizado de “efeito-pandeiro”.

Na Bacia de Campos, R. J., os registros das ondas levantados na região de operação das

bóias indicam que mais de 70% das ocorrências correspondem a ondas típicas de mar local. Nessas condições de operação, torna-se importante atuar no projeto do sistema monobóia de modo a prevenir ou, pelo menos, atenuar os eventuais efeitos ressonantes do movimento local da bóia. Esta análise, por sua vez, exige uma cuidadosa investigação sobre a dinâmica local da bóia, que deve cobrir toda a faixa de deslocamentos horizontais (offsetes) e direções impostos à bóia pelos movimento do(s) navio(s) ancorado(s).

## 2. ANÁLISE GERAL

Em águas muito profundas, o maior peso das linhas de ancoragem e do riser acarreta dificuldades extras no projeto do sistema monobóia. O uso de cabos de material mais leves nas linhas de ancoragem já demonstrou ser uma alternativa adequada permitindo arranjos de amarração com desempenho bastante satisfatório. Cabos de poliéster vêm sendo utilizados para diminuir a carga vertical suportada pela bóia e podem ter comportamento mecânico compatível com as solicitações impostas pela dinâmica da monobóia. Uma discussão sobre as propriedades mecânicas e outras características de cabos de poliéster pode ser encontrada em Fernandes et al., 1998.

Os movimentos resultantes da ação do vento, correntes, e deriva lenta e baixa frequência em mar irregular, superpostos às respostas de 1ª ordem excitadas pelas ondas atuando sobre o(s) navio(s) amarrado(s) à boia são os principais efeitos responsáveis pelo nível das cargas extremas atuantes nas linhas de ancoragem, riser e hawser.

A maioria dos trabalhos desenvolvidos para determinar valores extremos da tensão atuando nas linhas baseia-se nas respostas dos modos horizontais do conjunto navio(s)/linhas de ancoragem, desprezando-se a influência da bóia (por exemplo: Faltinsen e outros, 1979; Wichers, 1998). Na verdade, existem disponíveis no mercado vários códigos comerciais já validados, em condições de produzir resultados confiáveis para estas aplicações (por exemplo: ARIANE, TERMSIM II, entre outros; ver também Fernandes e Aratanha, 1996, para uma discussão detalhada a respeito). De uma maneira geral, estes códigos utilizam teorias consagradas e validadas pelo seu uso na prática, e fornecem resultados considerados satisfatórios para simulações, no domínio do tempo, do comportamento global de sistemas flutuantes amarrados. Num trabalho mais recente, Hwang, 1997, avança no tratamento do problema desta dinâmica global e discute solução incluindo efeitos do acoplamento dos movimentos da bóia e do navio, ambos excitados simultaneamente pelas ondas.

## 3. ANÁLISE ESTÁTICA

O primeiro aspecto a ser investigado na análise do movimento local da monobóia será o seu comportamento (quasi) estático induzido pelo deslocamento horizontal de grandes amplitudes do(s) navio(s) a ela ancorado(s). Estes deslocamentos são dominados pelas respostas de baixa frequência e de deriva lenta do(s) navio(s) excitados pelo mar irregular, e caracterizam-se por suas grandes amplitudes de oscilação e longos períodos, Faltinsen e outros, 1979.

A Figura 1d mostra uma representação esquemática do sistema de forças aplicadas à monobóia durante o seu deslocamento a partir da posição de equilíbrio. Durante estas excursões, a bóia, puxada pelo navio através do hawser, fica submetida a variações e desequilíbrios das tensões no sistema de amarração e riser. Estas modificações promovem alterações na condição de flutuação da monobóia, alterando seus valores de calado e trim/banda.

Torna-se, portanto, necessário quantificar os efeitos decorrentes das modificações das propriedades hidrostáticas da bóia e da variação das tensões nas linhas de amarração, riser e hawser sobre as características da restauração vertical da dinâmica da bóia.

Resultados numéricos baseados na configuração do sistema monobóia descrita na Figura 1 (dimensões e layout correspondem a sistemas atualmente em operação na Bacia de Campos) foram utilizados para mostrar a mudança das condições de equilíbrio estático da bóia após terem sido impostos deslocamentos horizontais em diferentes direções. A faixa de deslocamentos cobre valores típicos observados nos sistemas monobóias operando com navio-reservatório de porte médio (120 kTDW) submetidos a condições ambientais usuais para a região da Bacia de Campos.

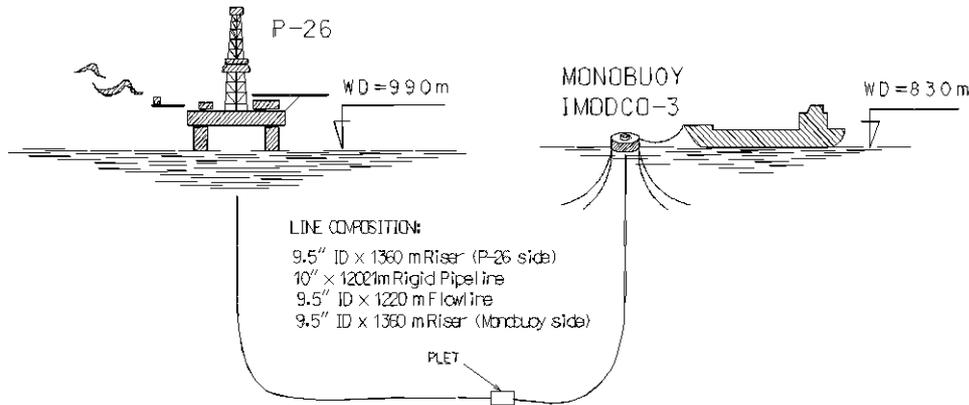
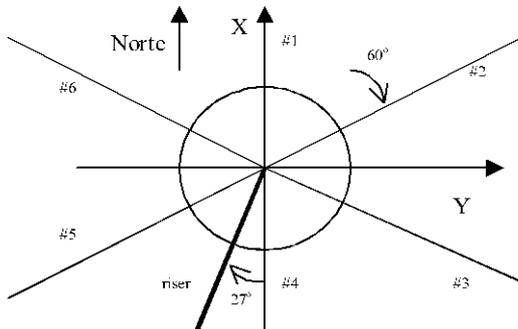


Figura 1a: Arranjo do Sistema Monobóia (Escudero e outros., 1998).



**Composição das Linhas (topo para o fundo):**

|                      |       |
|----------------------|-------|
| Amarra (76 mm):      | 55 m  |
| Poliester (5"):      | 15 m  |
| Amarra(76 mm):       | 9 m   |
| Poliester (5"):      | 450 m |
| Amarra (76 mm):      | 40 m  |
| Poliester (5"):      | 450 m |
| Cabo de Aço (86 mm): | 90 m  |
| Amarra (76 mm):      | 990 m |

Figura 1b: Arranjo das Linhas de Amarração e do Riser.

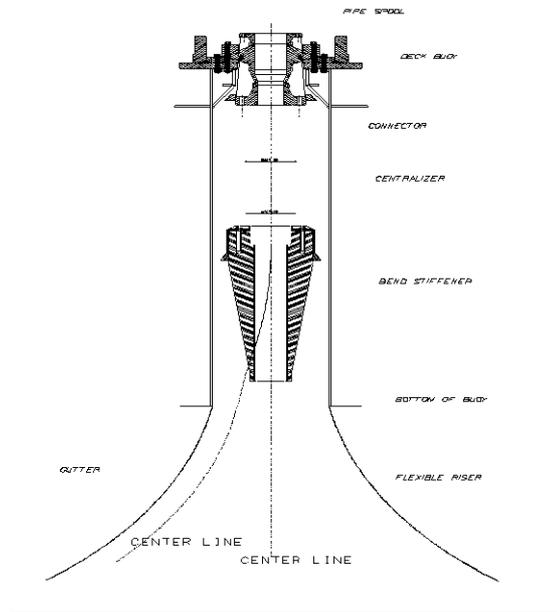
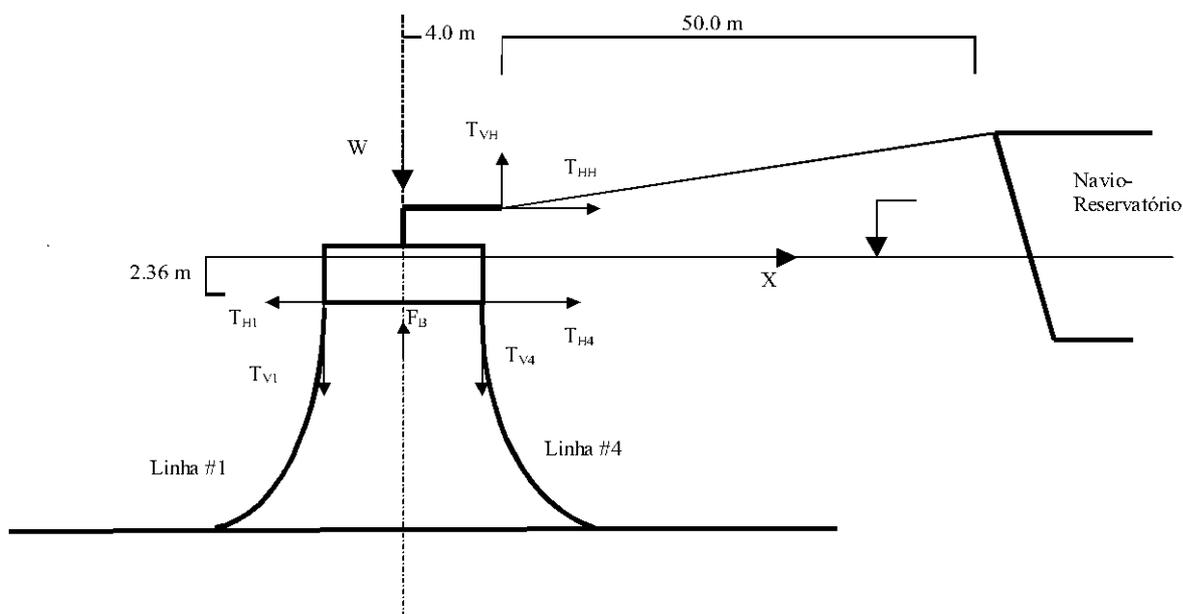


Figura 1c: Conexão Riser-Bóia (Escudero e outros, 1998)



**Figura 1d: Esquema Ilustrativo das Forças Estáticas Atuando na Bóia**

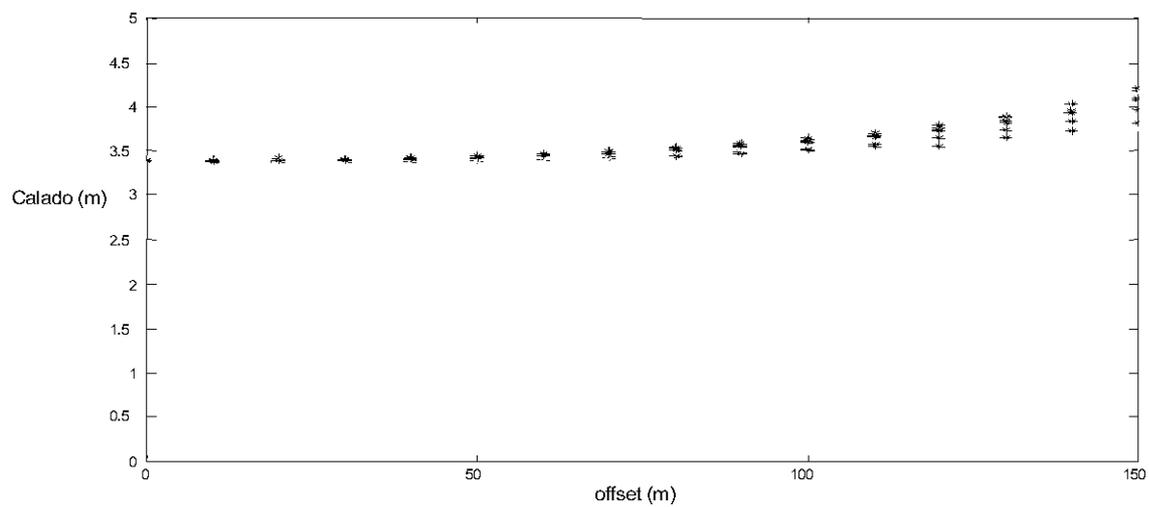
Os resultados apresentados a seguir (Fig. 2) mostram a variação do calado e do trim da monobóia em função dos deslocamentos horizontais impostos através do hawser. Os resultados a Fig. 2(a) indicam que, mesmo no caso de grandes excursões, observam-se apenas pequenas variações do calado da bóia. No exemplo considerado, o valor de calado máximo obtido não chegou a ultrapassar o pontal da monobóia (4,6 m).

Por outro lado, as variações na inclinação da bóia (trim e banda- Figs. 2(b) and 2(c) respectivamente) atingem valores que devem alterar significativamente as características de restauração para movimentos angulares da bóia.

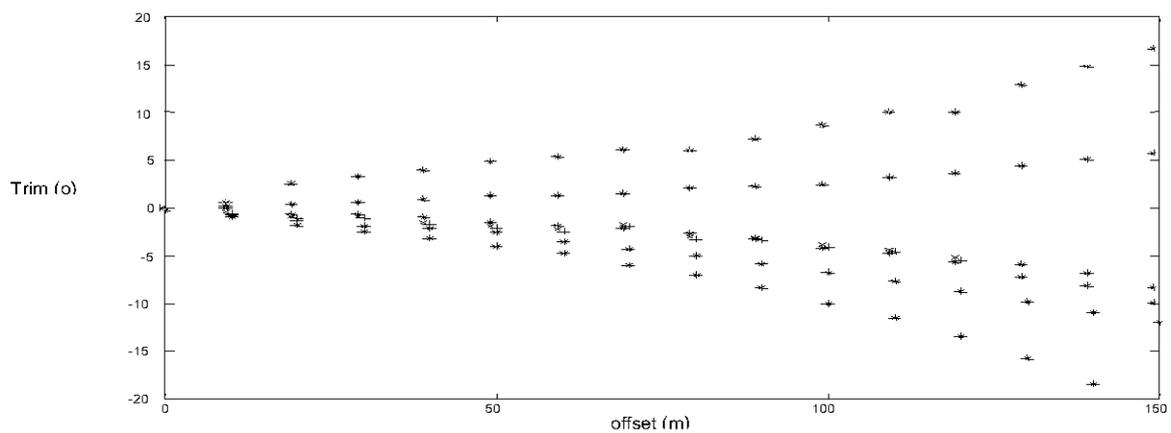
Estes efeitos podem ser avaliados através da variação dos períodos naturais correspondentes aos movimentos vertical (heave) e angulares (pitch e roll) da bóia. Na determinação destes períodos naturais considerou-se a inércia (seca) da bóia e as forças e momentos de restauração hidrostáticos e devidos à ação das linhas de amarração, riser e hawser, de acordo com o esquema representado na Fig. 1d.

Os gráficos apresentados na Fig. 3 mostram os resultados da variação dos períodos naturais da bóia adotada na presente discussão. Nestes resultados, destacam-se os seguintes aspectos considerados relevantes para a análise da dinâmica da bóia:

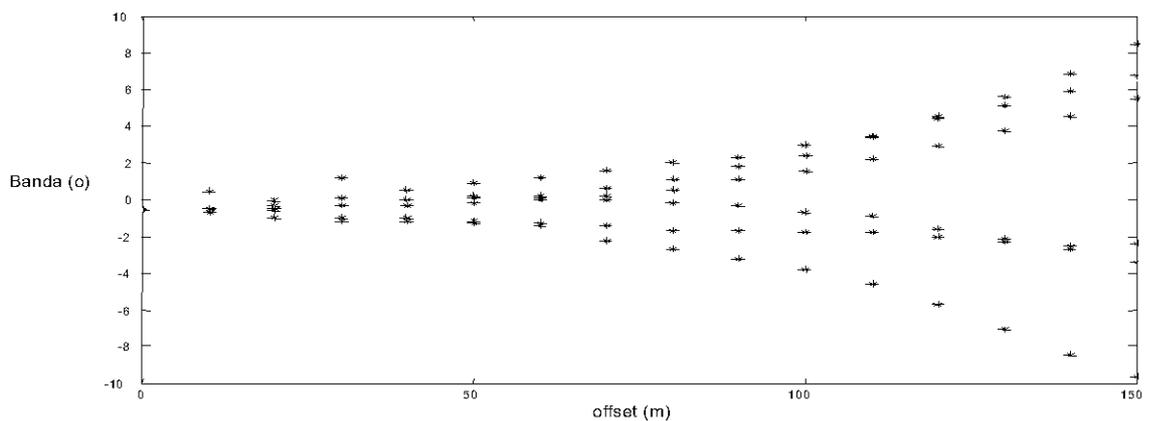
- o período natural da oscilação vertical (heave) não terá uma influência muito crítica no comportamento final da bóia. A sua variação apresenta pequena dispersão para toda a faixa de valores dos deslocamentos horizontais. O período natural de heave situa-se sempre abaixo de 2.5 s, portanto, numa região de ondas pouco energéticas e já fora da faixa de maior ocorrência na Bacia de Campos (entre 3 e 8s, ver Tabela 1, PETROBRAS, 1995) ;
- o período natural de pitch/roll, por outro lado, apresenta uma banda mais larga de variação, e seus valores se encontram no interior dos limites da faixa de períodos que inclui as ondas mais energéticas, e também as ondas de maior ocorrência na região da Bacia de Campos (ver Tabela 1, PETROBRAS, 1995).



(a)

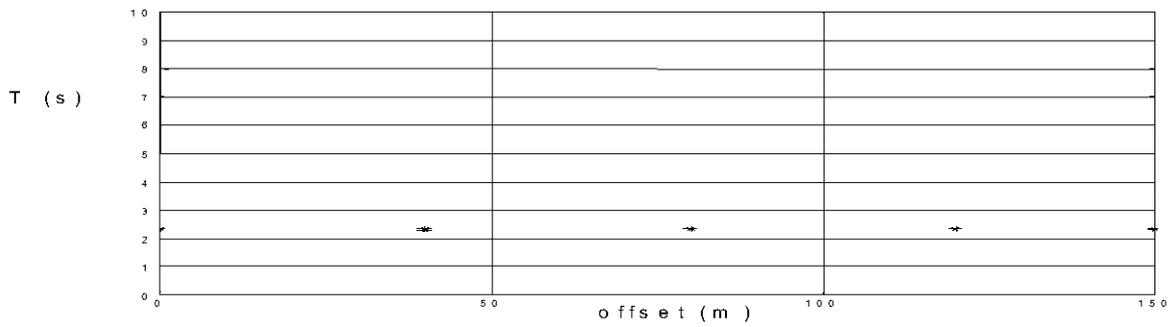


(b)

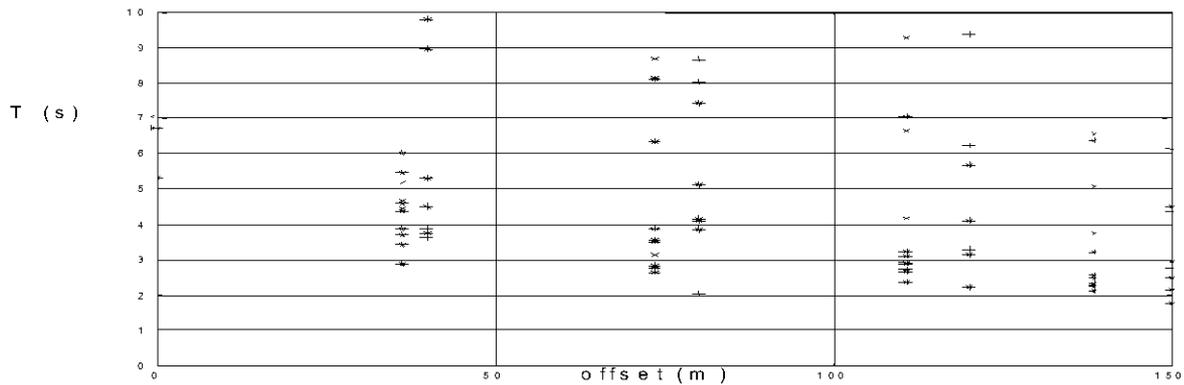


(c)

**Figura 2: Influência do deslocamento estático da bóia sobre o calado (a); ângulo de trim (b) e ângulo de banda (c). Para diferentes direções.**



(a)

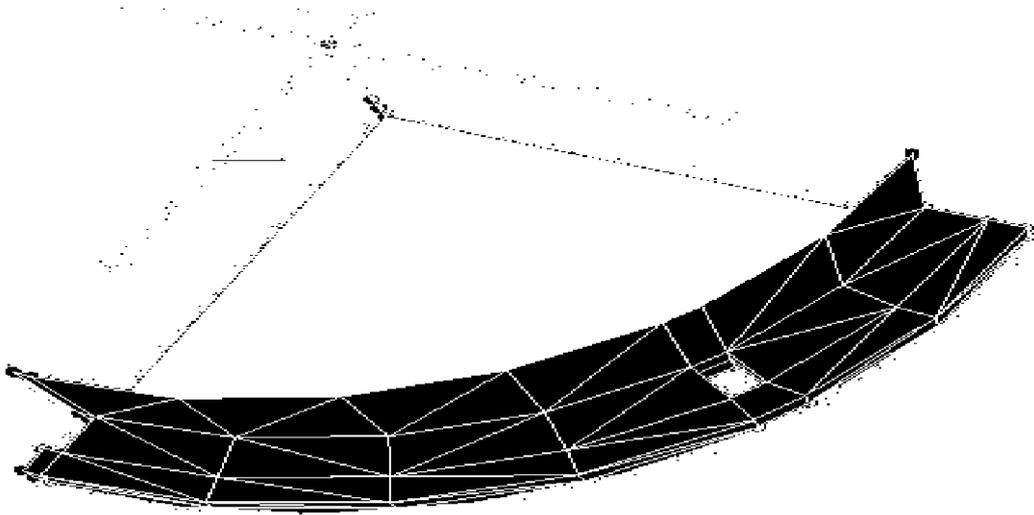


(b)

**Figura 3: Influência do deslocamento estático no período natural da bóia: (a) heave; (b) pitch/roll. Para diferentes direções de deslocamento.**

#### 4. MOVIMENTO LOCAL

Neste item serão discutidos aspectos da investigação desenvolvida para caracterizar o comportamento local da bóia. A identificação das condições ressonantes da bóia pode ser facilitada por uma análise baseada no domínio da frequência. A qualidade dos resultados desta análise depende da capacidade do modelo matemático conseguir representar os efeitos físicos mais relevantes, incluindo aí alguns efeitos não-lineares (por exemplo: influência da dinâmica das linhas e do riser, amortecimento viscoso da bóia, entre outros.). Inicialmente, a massa adicional e o amortecimento potencial da bóia foram determinados levando-se em conta a influência do efeito da difração do escoamento e detalhes da geometria da bóia que pudessem ser considerados relevantes. Isto incluiu a incorporação da saia (com aberturas) cujo efeito amortecedor no movimento da bóia deverá ser significativo. A Figura 4 mostra a versão discretizada da bóia (um quarto) utilizada na determinação das inércias adicionais pelo programa WAMIT, 1996. Nestes cálculos não foram incluídos os efeitos das linhas de amarração, riser ou hawser.

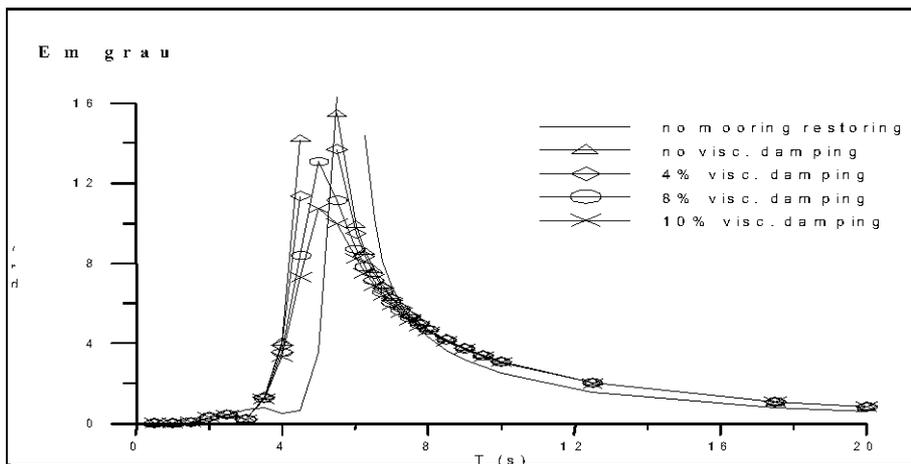


**Figura 4: Representação parcial (um quarto) da geometria da bóia (simétrica em relação aos planos xz e yz). Inclui saia e aberturas.**

A influência das inércias adicionais e amortecimentos das linhas de amarração e do riser foi incorporada à análise através de simulações no tempo desenvolvidas com o apoio do programa ARIANE, 1992. Nestas simulações, foram consideradas excitações por ondas regulares em diferentes frequências. As respostas periódicas assim obtidas forneceram uma aproximação para os efeitos não lineares impostos pelas linhas de amarração e riser no comportamento da bóia no domínio da frequência. Desta forma, portanto, foi possível calcular-se as funções de transferência para os movimentos verticais da bóia (heave, pitch e roll), e através delas identificar-se as condições ressonantes da bóia.

A discussão a seguir, destaca as respostas de pitch da bóia por representar o comportamento ressonante mais crítico do exemplo adotado nesta análise. A Figura 5, a seguir, apresenta as funções de transferência correspondentes ao pitch da bóia. Na ausência de avaliações confiáveis que permitissem incorporar o efeito do amortecimento viscoso atuante na dinâmica da bóia, foi realizado um estudo paramétrico considerando-se diferentes níveis de amortecimento (4 ~ 10% do amortecimento crítico). O amortecimento viscoso reduz o nível da resposta ressonante mas não afetou significativamente a largura da banda no entorno do período ressonante da bóia (~ 4.5 segundos). Este período ressonante, situa-se na faixa do período das ondas de maior ocorrência na Bacia de Campos, ver PETROBRAS, 1995. Esta coincidência recomenda atenção aos aspectos relacionados à falha por fadiga dos componentes da monobóia.

A Figura 5 inclui ainda uma curva correspondente à função de transferência obtida sem incorporar a restauração imposta pelas linhas de amarração, riser e hawser (curva identificada por “no mooring restoring”). O valor modificado do período ressonante (~ 6.5 segundos) fornece uma indicação de como as linhas de amarração, riser e hawser podem afetar o comportamento dinâmico da bóia, alterando-lhe suas características de ressonância.



**Figure 5: Função de Transferência de Pitch.**

## 5. EFEITOS DE FADIGA

A distribuição da ocorrência de ondas na área petrolífera da Bacia de Campos, reflete a influência de um vento local bastante freqüente nesta área, responsável pela geração de um mar no qual predominam ondas de pequena altura ( $< 1.0$  m) e pequeno comprimento (período entre 3 e 8 segundos), ver PETROBRAS, 1995.

Pelos registros de campo apresentados na referência acima, mais de 70% das ocorrências correspondem a ondas de pequenas alturas com períodos na faixa ente 3 e 8 segundos. Os resultados apresentados na Figura 5 demonstram como uma bóia com dimensões típicas daquelas em operação na Bacia de Campos pode responder com oscilações não desprezíveis a estas ondas menores. A imediata conclusão que se impõe, recomenda a avaliação criteriosa dos riscos de fadiga dos componentes da bóia; em particular, dos elementos de conexão das linhas de amarração, riser e hawser com a bóia.

## 6. CONCLUSÃO

Resultados numéricos baseados na análise de uma configuração com dimensões típicas de sistemas monobóias em operação na Bacia de Campos demonstraram a necessidade de se desenvolver uma criteriosa análise do movimento local da monobóia a fim de avaliar com segurança eventuais riscos de falhas por fadiga em componentes estruturais e de conexão das linhas de amarração e riser da monobóia.

Na prática, devido às suas características de fabricação e dependendo da sua localização, o elemento de conexão entre o riser e a bóia pode estar sujeito a indesejáveis riscos de falha por fadiga. Neste caso, os cuidados devem ser ainda mais estritos uma vez que a ruptura do riser impõe a imediata interrupção da produção de óleo, com conseqüentes prejuízos financeiros e, o que seria ainda mais crítico, pode acarretar graves danos ambientais.

No caso de operação em águas profundas, as pequenas dimensões da bóia e os grandes comprimentos das linhas de ancoragem e riser tornam a dinâmica da bóia ainda mais sensível a pequenas variações de alguns parâmetros do projeto do sistema monobóia e podem provocar efeitos bastante críticos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores desejam manifestar seu reconhecimento à PETROBRAS que ofereceu mais esta oportunidade de se pesquisar novos problemas de engenharia. Expressam

também seus agradecimentos ao Sr. Sérgio Kroff pelo apoio durante o processamento dos cálculos da difração realizados nestas análises.

## **REFERÊNCIAS**

- ARIANE, 1992-** “Mooring Calculation Program ARIANE- User’s Guide”, Bureau Veritas, version 3.0, January;
- Escudero C. C., Sued J. P., Gonçalves R. C. F., 1998,** “10” Oil Riser Connected to Exporting Monobuoy in 830 m Water Depth in Marlim Field”, PETROBRAS- Internal Report;
- Faltinsen O. M., Kjaerland, O ., Liapis, N, and Walderhaug, H., 1979,** “Hydrodynamic Analysis of Tankers at Single Point Mooring System”, 2<sup>nd</sup> International Conference on Behaviour of Offshore Structures, London, U. K.;
- Fernandes A. C., Aratana M., 1996,** “Classical Assessment to the Single Point Mooring and Turret Dynamic Stability Problems”, Proceedings 15 th. Int. Symp. On Offshore Mech. And Arctic Eng.- OMAE, Florence, Italy;
- Fernandes A .C., Del Vecchio, C.J.M., Castro, G.A .V., 1998,** “Mechanical Properties of Polyester Mooring Cables”, ISOPE’98, Montreal, Canada;
- Hwang Y. –L., 1997,** “Dynamic Analysis for the Design of CALM System in Shallow and Deep Waters”, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 119, 151-157;
- PETROBRAS, 1995,** “Marlim Field Development: Meteocean, Soil Data and Bathymetry”, Internal Report;
- WAMIT- Version 5.2, 1996,** “A Radiation-Diffraction Panel Program for Wave-Body Interactions”, Dept. of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, , Cambridge- MA, Estados Unidos;
- Wichers J. E. W., 1988,** “A Simulation Model for a Single Point Moored Tanker”, Maritime Research Institute Netherlands, Wageningen, Publ. No. 797.

## **Deep Water Monobuoy Behavior**

### **Abstract**

Offshore oil industry in Brazil marches fast towards increasingly water depth. Recent achievements include record exploration in 1800 m water deep. In the wake of such a trend, oil production based on monobuoys systems has already been used in operations up to 830 m deep. For such water depths some aspects of the monobuoy design become critical and may cause dramatic changes in its behavior.

In this work, the authors discuss some of these points that can affect the buoy operational properties in very deep water. The results and comments are part of an investigation featuring an 830 m-deep monobuoy installation in Campos Basin, R.J.

**Keywords: hydrodynamics, monobuoy, floating structures**