



## **ESTUDO DA DINÂMICA E CONTROLE DE MULTICORPOS FLUTUANTES**

**Helio Mitio Morishita**

**Carlos Fucatu**

**Bruno Jean Jacques Cornet**

Departamento de Engenharia Naval e Oceânica- Universidade de São Paulo  
CEP 05508-900 -Av. Prof. Mello Moraes, 2231-Cidade Universitária, São Paulo  
tel. (011) 8185340; fax (011) 8185717; e-mail: hmmorish@usp.br

***Resumo.** Os sistemas FPSO-Turret e FPSO-DICAS durante a operação de alívio formam um caso particular de multicorpos flutuantes composto por dois navios conectados através de um cabo. Neste trabalho é efetuado uma análise comparativa da dinâmica destes dois sistemas quando eles estão sujeitos a ação da corrente, vento e onda. O estudo contempla, inicialmente, uma análise estática e, posteriormente, uma análise dinâmica para verificar a estabilidade do sistema. Os resultados mostram que é extremamente difícil prever a estabilidade do ponto de equilíbrio, e quando ele não é estável a dinâmica tende para um ciclo limite. Para evitar colisões são sugeridas algumas leis de controle sobre o navio aliviador.*

***Palavras-chave:** Fpso, Ciclo Limite, Dinâmica, Multicorpos*

### **1. INTRODUÇÃO**

A exploração de petróleo no Brasil vem sendo realizada cada vez mais em águas profundas e um dos sistemas de produção adotado é o FPSO (Floating, Production, Storage and Offloading), que é um navio tanque adaptado para processar e armazenar o petróleo extraído do fundo do mar. Para manter o posicionamento da embarcação dentro de determinados limites, a despeito das forças dos agentes ambientais, são adotadas duas soluções: a primeira é conhecida como FPSO-Turret, onde o navio pode girar livremente em torno de um eixo que é o próprio “turret”. Este “turret” é ancorado através de cabos e para ele convergem todos os “risers”. A segunda opção é o sistema conhecido como DICAS (Differentiated Compliance Anchoring System), onde o navio é ancorado por várias linhas de amarração com complacências diferenciadas entre a proa e a popa. Mas, em ambos os casos, a descarga do óleo do navio FPSO é efetuada para um navio dito aliviador. Durante a operação de descarga os dois navios são conectados através de um cabo (“hawser”). Nesta configuração tem-se um sistema de multicorpos flutuantes e o estudo da sua dinâmica é importante para orientar uma eventual ação de controle sobre o navio aliviador para evitar a colisão com o navio FPSO.

A dinâmica do sistema é determinada pelas magnitudes e direções relativas da corrente, vento e onda. A compreensão da dinâmica não é simples pois as equações do sistema são de ordem doze e não são lineares. Além disso, a dinâmica é influenciada também pelo carregamento dos navios. Considerando-se somente a corrente, o sistema formado pelo FPSO e o navio aliviador não apresenta nenhum ponto de equilíbrio estável e o movimento tende para um ciclo limite (Morishita e Cornet, 1998). O vento tende a estabilizar o sistema mas, agindo concomitantemente com a corrente, a estabilidade do sistema fica dependendo da direção e magnitude dos dois agentes. Quanto à onda, a sua ação depende do seu espectro.

Até o presente momento a ênfase dos pesquisadores tem sido em estudar a dinâmica de um único corpo (Nishimoto et al, 1995, Fernandes e Sphaier, 1997, Garza-Rios e Bernitsas, 1998, Simos et al, 1998). Já o estudo da dinâmica de multicorpos flutuantes, considerando um sistema FPSO-Turret e navio aliviador sob a ação da corrente é apresentado em Morishita e Cornet (1998). Naturalmente a previsão do movimento do sistema depende do modelo matemático adotado para o cálculo das forças ambientais. Neste trabalho é adotado para a força da corrente um modelo heurístico baseado na teoria de asa curta e que teve validação experimental (Leite et al, 1998). A principal característica deste modelo é a correção da força do fluido na direção de avanço do navio com o número de Reynolds. Esta correção conduz a resultados qualitativamente diferentes em relação aos outros modelos. Para o vento e onda são adotados modelos convencionais.

Neste trabalho é apresentado o estudo da dinâmica do navio aliviador acoplado a um FPSO-Turret e FPSO-DICAS e propostas algumas ações de controle sobre o navio aliviador para evitar a colisão entre os navios. Para avaliar a dinâmica do sistema, é efetuado, inicialmente, o cálculo estático. A partir deste ponto é analisado a dinâmica do sistema através de simulação em computador digital.

## 2. MODELO MATEMÁTICO

Nas Figs 1a e 1b são mostrados, respectivamente, os sistemas FPSO-Turret e FPSO-DICAS. A modelagem matemática é efetuada considerando-se sistemas de referência solidários à embarcação e um referencial inercial. Os eixos do sistema de coordenadas móvel coincidem com os eixos principais de inércia do navio e a sua origem está localizada no centro de gravidade da embarcação. Na Fig. 1 também está indicada a definição dos ângulos de aproamento dos navios bem como dos ângulos da velocidade da corrente, vento e onda.

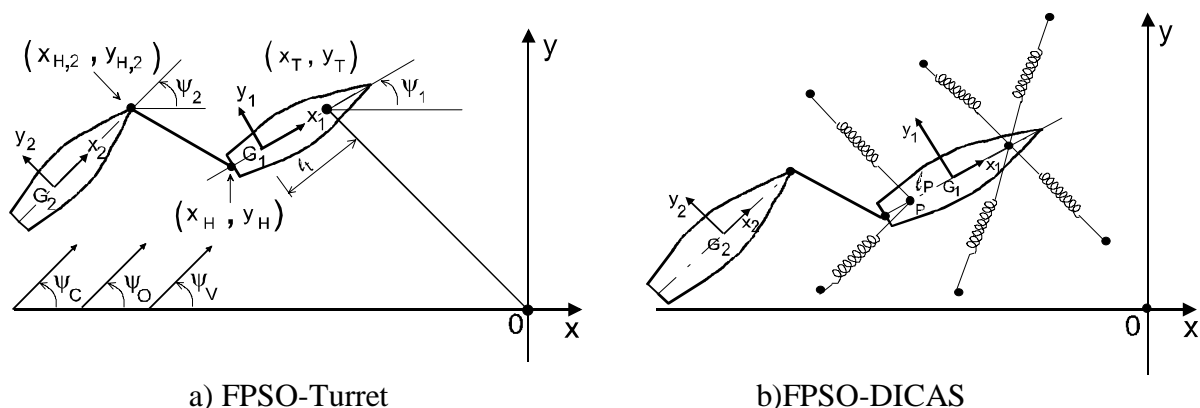


Figura 1 – Sistema FPSO-Turret e FPSO-DICAS

Com estas hipóteses as equações do movimento referentes ao eixo móvel, denominado de GXYZ, para cada embarcação, são dadas por:

$$(m - m_{11})\dot{u} = (m - m_{22})vr - (m_{11} - m_{22})v_c r + X \quad (1)$$

$$(m - m_{22})\dot{v} = (m_{11} - m)ur - (m_{11} - m_{22})u_c r + Y \quad (2)$$

$$(I_z - m_{66})\dot{r} = N \quad (3)$$

onde:  $m$  é a massa do veículo;  $m_{ii}$ ,  $i = 1, 2, 6$  são, respectivamente, as massas adicionais em avanço, deriva e guinada;  $u$  e  $v$  são, respectivamente, as velocidades de avanço e deriva;  $u_c$  e  $v_c$  são as velocidades da corrente relativas às direções  $GX$  e  $GY$  respectivamente;  $r$  é a velocidade angular;  $I_z$  é o momento de inércia em relação ao eixo  $GZ$ ;  $X$ ,  $Y$  e  $N$  representam as forças externas totais respectivamente nas direções de avanço, deriva e guinada; o ponto representa a derivada da variável em relação ao tempo.

A posição e aproamento de cada embarcação em relação ao referencial inercial são obtidas das seguintes equações:

$$\dot{x}_0 = u \cos \psi - v \sin \psi \quad (4)$$

$$\dot{y}_0 = u \sin \psi + v \cos \psi \quad (5)$$

$$\dot{\psi} = r \quad (6)$$

onde  $\dot{x}_0$  e  $\dot{y}_0$  são as velocidades da embarcação, respectivamente, nas direções  $OX$  e  $OY$ , e  $\psi$  é o ângulo de aproamento do veículo.

As componentes  $u_c$  e  $v_c$  da corrente são calculadas de:

$$u_c = V_c \cos(\psi_c - \psi) \quad (7)$$

$$v_c = V_c \sin(\psi_c - \psi) \quad (8)$$

onde:  $V_c$  e  $\psi_c$  são a velocidade e ângulo da corrente, respectivamente.

Os esforços  $X$ ,  $Y$  e  $N$  considerados neste trabalho são os devidos aos agentes ambientais, que são a corrente, o vento e a onda, o amortecimento devido ao movimento de guinada, modelado através da geração de vórtices na extremidade e “cross flow” e o “hawser”. No caso do FPSO há que incluir as forças do sistema de posicionamento, que depende do tipo do sistema, isto é, “turret” ou DICAS. A seguir são descritos os procedimentos utilizados para o cálculo destes esforços.

## 2.1. Determinação dos esforços

**Forças e Momento devido à Corrente.** As forças e momento devido à corrente são dados pelas equações (Leite et al., 1998):

$$F_{ci}(\beta, V) = \frac{1}{2} \rho T L^\alpha \cdot C_{ic}(\beta) \cdot |V_c|^2 \quad (9)$$

$$C_{ic}(\beta) = \left[ \frac{0,09375}{(\log(Re) - 2)^2} \frac{S}{TL} \right] \cos(\beta) + \frac{1}{8} \frac{\pi T}{L} (\cos(3\beta) - \cos(\beta)) \quad (10)$$

$$C_{2c}(\beta) = \sin(\beta) \left\{ \left[ C_Y - \frac{\pi T}{2L} \right] |\sin(\beta)| + \frac{\pi T}{2L} \sin^3(\beta) + \frac{\pi T}{L} \left[ 1 + 0,4 \frac{C_B B}{T} \right] |\cos(\beta)| \right\} \quad (11)$$

$$C_{6c}(\beta) = \sin(\beta) \left\{ \frac{-l_g}{L} \left[ C_Y - \frac{\pi T}{2L} \right] |\sin(\beta)| - \frac{\pi T}{L} \cos(\beta) - \left[ \frac{1 + |\cos(\beta)|}{2} \right]^2 \frac{\pi T}{L} \left[ \frac{1}{2} - 2,4 \frac{T}{L} \right] |\cos(\beta)| \right\} \quad (12)$$

sendo,  $i = \alpha = 1$  para a direção de avanço;  $i = 2$ ,  $\alpha = 1$  para a direção de deriva;  $i = 6$ ,  $\alpha = 2$  para a direção de guinada;  $L$ ,  $B$  e  $T$  são, respectivamente, o comprimento, a boca e o calado do navio;  $S$  a superfície molhada;  $C_B$  é o coeficiente de bloco;  $C_Y$  é o coeficiente de força lateral para corrente na transversal;  $Re$  é o número de Reynold's (baseado no comprimento  $L$ );  $l_g$  mede a distância longitudinal entre o centro de massa do casco e a seção média do navio;  $\beta$  é o ângulo de ataque definido por:

$$\beta = \text{atan2}(v - v_c, u - u_c) \quad (13)$$

**Forças e Momento devido ao Cross-flow.** A força e momento transversais devidos ao “cross-flow” podem ser determinados por (Simos et al, 1998):

$$Y_{CF} = -\frac{1}{2} \rho \cdot T_S \cdot \int C_D(\xi) \cdot (v + \psi \cdot \xi) \cdot |v + \psi \cdot \xi| d\xi \quad (14)$$

$$N_{CF} = -\frac{1}{2} \rho \cdot T_S \cdot \int C_D(\xi) \cdot (v + \psi \cdot \xi) \cdot |v + \psi \cdot \xi| \cdot \xi \cdot d\xi \quad (15)$$

onde  $C_D(\xi)$  é o coeficiente de arrasto transversal para cada estação;  $\xi$  é coordenada longitudinal da estação considerada em relação ao centro de massa do casco.

**Momento devido à emissão de vórtices na proa e na popa.** A componente do momento de guinada causada pela emissão de vórtices na proa e na popa é calculada por (Simos et al, 1998)

$$N_{tp} = -\frac{1}{16} \cdot \rho \cdot T \cdot C_D^{plate} \cdot L^4 \cdot \dot{\psi} \cdot |\dot{\psi}| \quad (16)$$

**Onda.** Foram consideradas parcelas de deriva média e deriva lenta da força de onda. A força de deriva média, que depende do ângulo de incidência da onda, é obtida, para um dado espectro a partir da seguinte expressão:

$$F_{dmi}(\chi) = 2 \int_0^{\infty} S(\omega) \cdot x_{dmi}(\chi, \omega) d\omega \quad (17)$$

onde:  $x_{dmi}(\chi, \omega)$ ,  $i=1,2,6$  são as funções de transferência quadráticas, respectivamente, nas direções de avanço, deriva e guinada;  $F_{dmi}(\chi, \omega)$ ,  $i=1,2,6$  representam as forças e momento

de deriva média das direções de avanço, deriva e guinada;  $\chi = \psi_o - \psi$ ;  $\psi_o$  é o ângulo da onda e  $S(\omega)$  é o espectro da onda do mar.

A força de deriva lenta é calculada a partir do seu espectro que é dado por (Aranha & Fernandes, 1994):

$$S_{xi}(\chi) = 8 \int_0^{\infty} S^2(\omega) \cdot x^2_{dmi}(\chi, \omega) \cdot d\omega \quad (18)$$

Neste trabalho foi considerado o espectro de Pierson-Moskovitz para a onda do mar.

**Vento.** As forças e momentos devidos ao vento são calculadas pela seguinte expressão:

$$F_{vi} = \frac{I}{2} \cdot C_{iv}(\phi) \rho_v \cdot V_v^2 \cdot A_i \cdot L_{BP}^j \quad (19)$$

onde:  $i = 1$  e  $j = 0$  na direção de avanço,  $i = 2$  e  $j = 0$  na direção de deriva,  $i = 6$  e  $j = 1$  na direção de guinada;  $C_{1v}$ ,  $C_{2v}$  e  $C_{6v}$  são coeficientes dados no relatório da OCIMF (1994);  $\phi = \psi_v - \psi$ ;  $\psi_v$  é o ângulo do vento;  $V_v$  é a velocidade do vento a uma altitude de 10 m;  $A_i$  é a área da seção transversal do navio;  $A_2 = A_6$  é a área da seções longitudinal do navio.

**Turret.** O “turret” é posicionado através de linhas de ancoragem e a sua força total sobre o FPSO foi modelada como uma mola, e as forças  $X_t$  e  $Y_t$  são calculadas através da seguinte equação:

$$X_t = K_t \cdot \sqrt{x_t^2 + y_t^2} \cos(\omega_t) \quad (20)$$

$$Y_t = K_t \cdot \sqrt{x_t^2 + y_t^2} \sin(\omega_t) \quad \omega_t = -\pi + a \tan 2(y_T, x_T) - \psi_1 \quad (21)$$

onde  $x_T$  e  $y_T$  são as coordenadas do ponto de conexão do ‘turret’ ao navio.

**Hawser.** A equação clássica da catenária foi usada para modelar o “hawser” considerando apenas sua massa própria e sua geometria como sendo simétrica em relação ao seu ponto médio ao longo do comprimento. A partir destas hipóteses, não há força vertical atuando no ponto médio do hawser e a relação entre a distância horizontal e a força horizontal é dada por (Morishita e Cornet, 1998):

$$\Delta x_H = \frac{F_H}{E \cdot A} + \frac{F_H}{w} \left[ a \sin \left( \frac{w \cdot L_h / 2}{F_H} \right) \right] \quad (22)$$

$$\Delta x_H = \left( \sqrt{(x_{H,1} - x_{H,2})^2 + (y_{H,1} - y_{H,2})^2} \right) / 2 \quad (23)$$

onde:  $\Delta x_H$  é a distância horizontal do hawser,  $F_H$  é a força horizontal do hawser,  $E$  é o módulo de elasticidade;  $A$  é a área transversal;  $w$  é o peso específico;  $L_h$  é o comprimento do hawser;  $x_{H,i}$ ,  $y_{H,i}$ ,  $i=1,2$  são as coordenadas da popa do navio FPSO e da proa do navio aliviador.

As projeções das forças do hawser sobre os navios FPSO e aliviador, são dadas por:

$$X_{H,i} = F_H \cdot \cos(\omega_i) \quad (24)$$

$$Y_{H,i} = F_H \cdot \sin(\omega_i) \quad i=1,2 \quad \omega_i = -\pi + a \tan 2(y_{H,1} - y_{H,2}, x_{H,1} - x_{H,2}) - \psi_i \quad (25)$$

**Amarras.** Considerando a situação inicial como sendo a do centro de gravidade na posição 0 do referencial fixo, a força das amarras pode ser considerada como uma força de mola linear dada de acordo com a Fig. 1 por molas fixas em um ponto na região da proa e outras fixas em um ponto da região da popa. Desta forma:

$$X_K = (X_{0,popa} + X_{0,proa}) \cos \psi + (Y_{0,popa} + Y_{0,proa}) \sin \psi \quad (26)$$

$$Y_K = (Y_{0,popa} + Y_{0,proa}) \cos \psi - (X_{0,popa} + X_{0,proa}) \sin \psi \quad (27)$$

$$N_K = (X_{0,popa} \cdot l_p - X_{0,proa} \cdot l_c) \sin \psi + (Y_{0,proa} \cdot l_c - Y_{0,popa} \cdot l_p) \cos \psi \quad (28)$$

$$X_{0,popa} = X_{3,0} - 2 \cdot K_3 \cdot \Delta x_{popa}; \quad Y_{0,popa} = Y_{3,0} - 2 \cdot K_3 \cdot \Delta y_{popa} \quad (29)$$

$$X_{0,proa} = X_{2,0} - 2 \cdot (K_1 + K_2) \cdot \Delta x_{proa}; \quad Y_{0,proa} = Y_{2,0} - 2 \cdot (K_1 + K_2) \cdot \Delta y_{proa} \quad (30)$$

onde:  $\Delta x_{proa}$  e  $\Delta y_{proa}$  indicam o deslocamento em relação à posição inicial de um centro fictício de amarração na proa do navio de produção;  $\Delta x_{popa}$  e  $\Delta y_{popa}$  o deslocamento de um centro fictício na popa do navio de produção;  $l_c$  e  $l_p$  indicam as distâncias entre estes centros e o centro de gravidade do navio carregador;  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  são as constantes de mola, respectivamente, dos pares de mola da proa até a popa.-  $X_{2,0}$ ,  $X_{3,0}$ ,  $Y_{2,0}$ ,  $Y_{3,0}$  são, respectivamente, as forças iniciais das molas na proa na direção X, das molas na popa na direção X, das molas da proa na direção Y e das molas da popa na direção Y.

Os centros descritos acima servem como simplificação para os cálculos considerando que todas as amarras na proximidade da proa estão amarradas em um mesmo ponto C, assim como as da popa em um ponto P.

### 3. ANÁLISE ESTÁTICA

Antes de proceder a análise dinâmica dos sistemas foi efetuado o cálculo estático para determinar as posições de equilíbrio. Estas posições podem ser calculadas anulando-se as velocidades de avanço, deriva e guinada das equações (1) a (3). Com isto tem-se um sistema de equações onde as incógnitas são os ângulos de aproamento dos dois navios. Para este estudo o ângulo da corrente foi sempre admitido como sendo  $\pi$  e o ângulo de repouso do FPSO-DICAS é zero. As soluções do sistema de equações foram obtidas numericamente devido a complexidade do modelo matemático que, além de ser não linear, possui vários coeficientes oriundos de tabelas e gráficos. A seguir são analisados os resultados, que estão apresentados na Tab. 1, em função da combinação da ocorrência da corrente, vento e onda. Nesta tabela a ação do agente ambiental considerado é indicado pelo seu ângulo e as soluções, quando ocorre a atuação conjunta de dois ou mais agentes, são em termos de intervalo dos aproamentos de equilíbrio, porque elas são dependentes das magnitudes relativas das velocidades da corrente e vento e espectro da onda.

a) FPSO-DICAS + Navio Aliviador

O ângulo de aproamento do FPSO, neste caso, é próximo de zero devido a rigidez do sistema de amarração, mesmo que haja ação simultânea e colinear dos agentes ambientais que é a pior condição em termos de esforço. Desta forma, não há maiores dificuldades em prever a sua posição de equilíbrio. Já o ângulo do navio aliviador depende da ação dos agentes ambientais. Se eles agirem isoladamente, o ângulo de equilíbrio será sempre defasado de  $\pi$ . Se, contudo, houver atuação simultânea de dois ou mais agentes, com ângulos distintos, o aproamento do navio dependerá da magnitude relativa das velocidades dos agentes, cujo intervalo possível é indicado na Tab.1

b) FPSO-Turret + Navio Aliviador

O estudo do equilíbrio do sistema FPSO-Turret é mais complexo pois, na presença da corrente, o ângulo de equilíbrio é influenciado pela posição do “turret” (Morishita e Cornet, 1998). Considerando-se somente a corrente, é possível provar que, se a distância do “turret” em relação à meia nau,  $l_t$ , for maior que um determinado valor crítico,  $l_{tcr}$ , a posição de equilíbrio será sempre zero. No entanto, se  $l_t$  for menor que  $l_{tcr}$  o FPSO-Turret apresenta três posições de equilíbrio que são  $\psi_I = 0$  e  $\psi_I = \pm\psi(l_t)$ . Convém ressaltar que a análise é efetuada para o ângulo da corrente igual a  $\pi$  e, conseqüentemente, o ângulo do navio aliador é sempre zero. No caso da ação isolada do vento e da onda, o ângulo dos dois navios coincidem e são colineares com a direção dos esforços. Neste caso não ocorre a bifurcação na solução de equilíbrio tal como no caso da corrente. Se for considerada a ação simultânea dos três agentes, as direções estáticas dos dois navios já não coincidem e o número das soluções bem como a posição relativa dos dois navios depende das magnitudes e ângulos relativos dos agentes ambientais. O intervalo das soluções possíveis está indicado na Tab. 1

Comparando-se as soluções estáticas dos dois sistemas verifica-se que, se o ângulo predominante dos agentes ambientais for entre  $-\pi/2$  e  $\pi/2$ , o navio aliviador tende a se aproximar do FPSO, já que este praticamente não se locomove. Esta configuração é insatisfatório sob o ponto de vista da segurança da operação de descarga do petróleo, e a solução é alterar a posição do ponto de conexão do “hawser” no FPSO, de popa para a proa, por exemplo, ou exigir uma atuação mais intensa do rebocador. Já no caso do sistema “turret” este problema não ocorre porque o FPSO muda de aproamento de acordo com os esforços dos agentes ambientais.

Tabela 1. Soluções de equilíbrio para o sistema multicorpo

Corrente	Vento	Onda	Fpso-Dicas	Fpso-Turret	Aliviador
$\pi$	-	-	0	$0; \pm\psi_1(l_t)$	0
-	$\psi_v$	-	$\approx 0$	$-\pi + \psi_v$	$-\pi + \psi_v$
-	-	$\psi_o$	$\approx 0$	$-\pi + \psi_o$	$-\pi + \psi_o$
$\pi$	$\psi_v$	-	$\approx 0$	$\min[\psi(l_t), -\pi + \psi_v] < \psi_1 < \max[\psi(l_t), \pi + \psi_v]$	$-\pi + \min(\pi, \psi_v) < \psi_2 < -\pi + \max(\pi, \psi_v)$
$\pi$	-	$\psi_o$	$\approx 0$	$\min[\psi(l_t), -\pi + \psi_o] < \psi_1 < \max[\psi(l_t), \pi + \psi_o]$	$-\pi + \min(\pi, \psi_o) < \psi_2 < -\pi + \max(\pi, \psi_o)$
$\pi$	$\psi_v$	$\psi_o$	$\approx 0$	$\min[\psi(l_t), -\pi + \psi_o, -\pi + \psi_v] < \psi_1 < \max[\psi(l_t), \pi + \psi_o, \pi + \psi_v]$	$-\pi + \min(\pi, \psi_v, \psi_o) < \psi_2 < -\pi + \max(\pi, \psi_v, \psi_o)$
-	$\psi_v$	$\psi_o$	$\approx 0$	$-\pi + \min(\psi_o, \psi_v) < \psi_1 < \min(\psi_o, \psi_v)$	$-\pi + \min(\psi_v, \psi_o) < \psi_2 < -\pi + \max(\psi_v, \psi_o)$

#### 4. ANÁLISE DINÂMICA

O propósito da análise dinâmica é verificar a estabilidade do ponto de equilíbrio calculada anteriormente, e em caso de instabilidade, averiguar a natureza da sua dinâmica. Pode-se afirmar que considerando-se somente a corrente e/ou a onda, não há posição de equilíbrio estável e o sistema tende para um ciclo limite. Isto foi constatado através de simulação dinâmica para vários pontos de equilíbrio. Vale ressaltar que o desequilíbrio é provocado pelo navio aliviador e ele ocorre porque o sentido dos momentos devidos a estes dois agentes ambientais são no mesmo sentido da rotação do veículo. A existência do ciclo limite pode ser comprovada, por exemplo, através da análise espectral, quando pode ser observada a existência de uma frequência fundamental nas doze equações de estado do sistema.

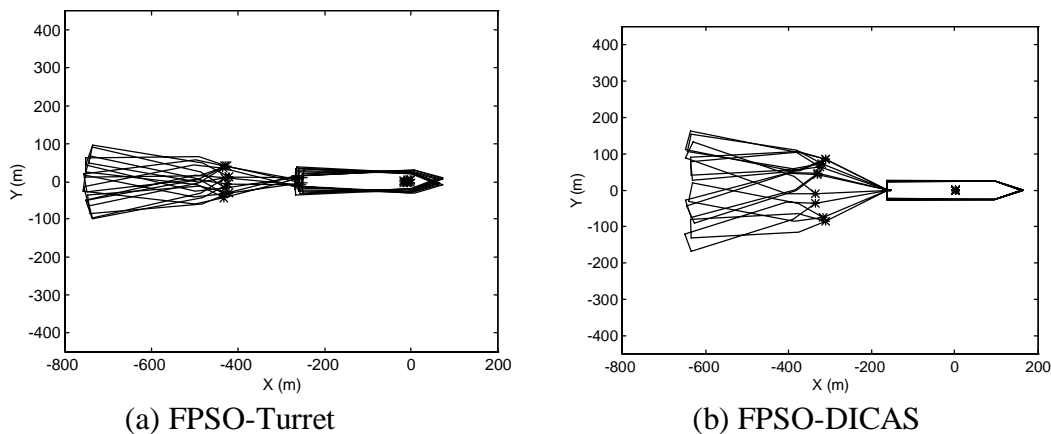
Considerando-se somente a corrente, verifica-se que nos dois sistemas ocorre uma aproximação excessiva do navio aliviador sobre o FPSO. Este fato normalmente não é previsto por simulações porque o coeficiente da força de avanço devido a corrente calculado pela equação (10) não é corrigido pelo número de Reynolds em função do comprimento do navio tal como é efetuado neste trabalho. Esta correção atenua a força da corrente, diminuindo o amortecimento quando o navio avança no sentido contrário à corrente e provocando, conseqüentemente, a aproximação do navio aliviador sobre o FPSO.

A onda tem efeito similar ao da corrente, isto é, tende a desestabilizar o sistema e este caminha para um ciclo limite. Já o vento tem o efeito contrário, isto é, sempre estabiliza o sistema. Considerando-se o efeito dos três agentes ambientais simultaneamente verifica-se que é extremamente difícil obter, para cada sistema, um procedimento geral para a verificação da estabilidade do ponto de equilíbrio, pois ele depende dos ângulos e magnitudes relativas do vento, corrente e onda e carregamento dos navios. Entretanto, pode-se afirmar que sem o vento não há posição de equilíbrio estável. E, se o vento não garantir a estabilidade do ponto de equilíbrio, ele reduz a amplitude do movimento oscilatório.

Neste trabalho são mostrados, como exemplo, os resultados de simulação para FPSO-DICAS e FPSO-Turret considerando-se o vento e a onda incidentes pela proa e a posição “turret” equivalente a 27% do comprimento do navio em relação à meia nau. As velocidades da corrente e do vento consideradas foram, respectivamente, 1 m/s e 10 m/s e a onda caracterizada por período médio de 8,5 s e altura significativa de 2,5 m. Com estas condições ambientais, no caso do FPSO-DICAS, só há uma posição de equilíbrio, sendo o aproamento dos dois navios iguais a zero. Já para o sistema FPSO-Turret existem 3 posições de equilíbrio, sendo os pares dos aproamentos do navio aliviador e o FPSO dados por  $(0^\circ, 0^\circ)$ ,  $(0^\circ, 2,3^\circ)$  e  $(0^\circ, -2,3^\circ)$ . Nas Figs. 2a e 2b são mostradas as vistas de topo dos movimentos das embarcações. Eles revelam que nenhuma solução é estável e que a dinâmica do sistema tende para um ciclo limite. O período típico deste movimento é em torno de 3000 s, sendo portanto, de baixa frequência. Cabe ressaltar também que no caso do sistema FPSO-Turret a amplitude do movimento do navio aliviador, em termos do ângulo de aproamento e deslocamento lateral, é menor do que o sistema DICAS. Isto ocorre porque o FPSO-Turret tem liberdade de rotação em torno do “turret” e isto acaba operando como um amortecedor de vibração.

Cabe ressaltar que na modelagem efetuada não foi considerada a influência de um corpo sobre o outro, principalmente na parte hidrodinâmica. Este efeito pode, eventualmente, afetar os resultados deste tipo de simulação.





(a) FPSO-Turret

(b) FPSO-DICAS

Figuras 2 Movimentos do FPSO-Turret e FPSO-DICAS

## 5. CONTROLE

Os resultados de simulação mostraram que, embora haja um movimento relativo, não há predição de colisão entre os navios. No entanto, este movimento é indesejável porque ele impõe tensões cíclicas no hawser, podendo provocar a sua fadiga. Além disto, a distância entre as embarcações não é grande pois o comprimento do “hawser” é, tipicamente, a metade do comprimento do navio. Sendo assim, mesmo que os cálculos teóricos indiquem segurança para a operação de alívio, para uma dada condição ambiental, nada impede que ela mude e tornar a operação de alívio perigosa. Desta forma, o navio aliviador, quando está conectado ao FPSO, necessita de um meio para garantir a segurança da operação. Para isto podem ser consideradas duas opções: a primeira é utilizar um rebocador para tracionar o navio aliviador e assim mantê-lo afastado da outra embarcação. A outra alternativa é utilizar um sistema de controle próprio do navio aliviador. Esta segunda opção é analisada neste trabalho. Um sistema de controle que certamente atenderia o navio aliviador seria o Sistema de Posicionamento Dinâmico. No entanto, como ele é complexo e caro procurou-se alternativas menos sofisticadas. Um controle simples é adotar sempre tração a ré utilizando o próprio hélice do navio. No entanto, esta solução, embora afaste o navio aliviador do FPSO, não elimina o ciclo limite e aumenta a tensão no “hawser”. A melhor alternativa para atenuar o ciclo limite é controlar o aproamento do navio aliviador. Efetuando a simulação com um controlador simples como Proporcional+Derivativo pode-se observar que, com o controlador do aproamento, o ciclo limite é praticamente eliminado. No caso particular do FPSO-Turret, o seu aproamento com o controle do navio aliviador é aquele determinado pelo cálculo estático. Naturalmente somente este controlador não é suficiente para atender todas as manobras requeridas para evitar acidentes. No entanto, a ação deste controlador, juntamente com o empuxo do propulsor principal, pode permitir manobrar convenientemente o navio aliviador.

## 6. CONCLUSÕES

Os estudos estático e dinâmico de dois sistemas, um FPSO-Turret e o outro FPSO-DICAS, ambos com o navio aliviador, mostrados neste trabalho revelaram que o equilíbrio de posição calculado estaticamente é, em geral, instável embora o movimento global tenda para um ciclo limite. Corrente e onda tendem a desestabilizar e o vento tende a estabilizar o sistema. Para evitar o ciclo limite, que é de baixa frequência, e também evitar acidentes devido a mudança das condições ambientais, é necessário utilizar um sistema de controle sobre o navio aliviador. Para reduzir a amplitude do ciclo limite, o controle do aproamento do

navio é suficiente. No entanto, ela não garante a segurança total da embarcação quando ocorre, principalmente, mudança nas condições ambientais e, desta forma, é necessário operar este sistema de controle juntamente com o propulsor principal do navio. Neste trabalho não foi levado em consideração a influência de uma embarcação sobre o outro, principalmente nas forças hidrodinâmicas. A incorporação deste efeito na dinâmica dos sistemas estudados neste trabalho é objeto de pesquisa futura.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Garza-Rios, L.O. and Bernitsas, M. M. (1998) Mathematical Model for the Slow Motion Dynamics of Turret Mooring Systems Report to the University of Michigan, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Ann Arbor, Publication No. 336
- Aranha, J.A. P e. Fernandes, A.C (1994) On the Second Order Low Frequency Force Spectrum, *Applied Ocean Research*
- Fernandes, A.C. and Sphaier, S. Dynamic Analysis of a FPSO System, *In: The Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol I. p:330-35., Honolulu, Hawaii
- Leite, A.J. P., Aranha, J.A .P., Umeda, C., de Conti, M.B. (1998) Current Forces in Tankers and Bifurcation of Equilibrium of Turret System: Hydrodynamic Model and Experiments, *Applied Ocean Research*
- Morishita, H. M. e Cornet, B. J. J. (1998) Dynamics of a turrert-EPSO and shuttle vessel due to current. In: IFAC CONFERENCE, FUKUOKA, 1998. CAMS'98: Control Applications in Marine Systems. Kyushu, 1998. P.101-6.
- Nishimoto, K, Brinati, H.L.and Fucatu, C.H (1995). Analysis of the Point Moored Tanker Using Manoeuvring Hidrodynamic Model, *In: Proceeding of the 14<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering*, Vol.1 Pt.B. p.253-61, Copenhagen
- OCIMF (1994) Predictions of Wind and Current Loads on VLCCs, Oil Companies International Marine Forum
- Simos, A . N., Tannuri, E.A, Pesce, C.P. (1998) Dynamics of a Turret-FPSO System and Hydrodynamic Model. *In: Proceeding of the 17<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference* , Lisbon

## **A STUDY OF THE DYNAMICS AND CONTROL OF FLOATING MULTIBODY SYSTEMS**

**Abstract.** The offloading operation of the FPSO-Turret and FPSO-DICAS are two particular cases of multibody systems consisting of two vessels in a tandem configuration. A comparative analysis of the dynamics of both systems under action of wind, wave and current is carried out. Firstly, the equilibrium positions are evaluated by static analysis and then dynamic analysis is performed in order to check the stability of the system. The results have shown that it is quite impossible to predict the stability of the equilibrium position easily since it depends on the relative angle and magnitude of the environmental efforts and displacement of ships as well. What's more in the case of the FPSO-Turret, the position of the turret alongside the ship affects the static and dynamic of the system. When the equilibrium is unstable, the dynamics of the system tends to a limit cycle. In order to avoid collision of the vessels, some control action over the shuttle tanker is suggested.

**Key- Words:** Fpso, Limit Cycle, Dynamics, Multibody,