



ESTUDOS DE DERIVA DE SONDAS DE PERFURAÇÃO COM SISTEMA DE POSICIONAMENTO DINÂMICO CONSIDERANDO DIFERENTES MODELOS HIDRODINÂMICOS

Bernardo Ferreira Fortini Pimentel^a

Thaís Macedo Lucas^a

Juliana Souza Baioco^{a,b}

Fabício Nogueira Correa^a

Carl Horst Albrecht^a

Breno Pinheiro Jacob^a

bernardo.ffp@lamcso.coppe.ufrj.br

thaismacedo@lamcso.coppe.ufrj.br

jsbaioco@lamcso.coppe.ufrj.br

fabricao@lamcso.coppe.ufrj.br

carl@lamcso.coppe.ufrj.br

breno@lamcso.coppe.ufrj.br

^a COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, LAMCSO – Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas Offshore, Cidade Universitária - Ilha do Fundão, Avenida Pedro Calmon, S/N, CEP 21941-596, Rio de Janeiro - RJ - Brasil.

^b TEQ/ E.Engenharia/UFF – Departamento de Engenharia Química e Petróleo - Escola de Engenharia – Universidade Federal Fluminense, Rua Passo da Pátria, 156, S 305, Bloco D, Campus Praia Vermelha, São Domingos, Niterói RJ, Brasil.

Abstract. *O processo de perfuração de poços é de vital importância para a exploração de petróleo. Através da perfuração, abre-se o contato do reservatório para o sistema de produção, permitindo assim a produção de hidrocarbonetos. Contudo, assim como outras diversas etapas do processo de exploração de petróleo, o processo de perfuração está sujeito a falhas. No que tange à sonda de perfuração com sistema de posicionamento dinâmico, pode ocorrer falha do sistema de posicionamento, por um blackout da sonda. Quando há a necessidade de desconexão com o poço, a embarcação começa a derivar podendo colidir com qualquer estrutura offshore que esteja posicionada nas proximidades. Assim, é importante analisar o comportamento das sondas em deriva para calcular a direção e raio de deriva*

para evitar acidentes. O presente trabalho apresenta uma comparação entre as derivas de uma sonda semi-submersível calculadas com base em um Modelo de Difração e um Modelo Híbrido. O Modelo Híbrido incorpora as forças de primeira ordem da Equação de Morison, as forças de Froude-Krylov e as forças de segunda ordem oriundas da Teoria Potencial. O Modelo de Difração/Radiação baseia-se na Teoria Potencial, a qual não incorpora os efeitos devido à viscosidade do fluido. Neste caso, as forças de arrasto hidrodinâmicas são calculadas a partir de coeficientes provenientes de ensaios experimentais ou numéricos, seja através do uso de um método de interpolação direta ou através do método de Obokata. Deste modo, as derivas geradas por ambos os métodos são comparadas com aquelas geradas pelo modelo Híbrido.

Keywords: *Sondas de Perfuração, Análise de Deriva, Modelos Hidrodinâmicos.*

1 INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo tem sido fomentada a cada dia com as novas descobertas de campos de petróleo e com o avanço em águas profundas. Essas descobertas têm incorporado novos desafios ao processo de perfuração de poços, o qual é de vital importância para a exploração de petróleo. Através da perfuração é estabelecido o contato com reservatório, permitindo assim a produção de hidrocarbonetos.

Contudo, assim como outras diversas etapas do processo de exploração e produção de petróleo, a etapa de perfuração está sujeita a falhas. Essas falhas podem ocorrer na broca, na coluna, como também no sistema de posicionamento dinâmico da sonda de perfuração. A falha a ser estudada é a última mencionada que pode ocorrer devido um *blackout* da sonda.

Quando um *blackout* ocorre e há a necessidade de desconexão com o poço, a embarcação começa a derivar podendo colidir com qualquer estrutura *offshore* que esteja posicionada nas proximidades. Esse cenário é bem preocupante em especial na Bacia de Campos onde a região é congestionada, contendo diferentes tipos de obstáculos tais como equipamentos submarinos e plataformas.

Assim, é importante analisar o comportamento das sondas em deriva para calcular a direção e raio de deriva para evitar acidentes. A partir dessa análise é possível definir uma área de exclusão que minimize a probabilidade de colisão. Para a definição dessa área deve-se considerar não apenas o comportamento da deriva, como também a probabilidade de ocorrer o *blackout* e da duração da deriva devido ao *blackout*.

O presente trabalho visa apresentar um estudo da etapa inicial da definição dessa área de exclusão que compreende a análise de deriva. Para tal foi efetuada uma comparação entre as derivas resultantes de uma sonda semi-submersível, calculadas com base em um Modelo Híbrido e um modelo de Difração cujo arrasto hidrodinâmico quadrático foi representado a partir de dois métodos: interpolação direta e Obokata.

2 FORMULAÇÃO DOS MODELOS HIDRODINÂMICOS

Para a análise da deriva é necessário compreender os tipos de modelos hidrodinâmicos existentes e avaliar qual melhor se adequa a determinado tipo de unidade flutuante. No presente estudos são apresentados dois modelos para a sonda semi-submersível: Modelo de Difração e Modelo Híbrido.

O Modelo de Difração/Radiação baseia-se na Teoria Potencial, a qual não incorpora os efeitos devido à viscosidade do fluido. Já o Modelo Híbrido incorpora as forças de primeira ordem da Equação de Morison, as forças de Froude-Krylov e as forças de segunda ordem oriundas da Teoria Potencial.

2.1 Modelo de Difração

O modelo de Difração/Radiação é adequado quando as dimensões do sistema *offshore* não são pequenas em relação ao comprimento de onda e espera-se que a presença do corpo altere de forma significativa o campo de ondas na sua vizinhança, gerando efeitos de difração, interferência e radiação de ondas pelo corpo.

O modelo matemático tridimensional de Difração/Radiação é uma generalização do modelo bidimensional que representa a “Teoria de Onda”. Enquanto o modelo da “Teoria de

Onda” tem por objetivo apenas determinar velocidades e acelerações do fluido, sem considerar a presença do corpo, o modelo de Difração / Radiação considera a presença do corpo e tem por objetivo determinar as cargas que resultam da movimentação do fluido induzida pelas ondas.

2.1.1 Forças Geradas pela Movimentação do Fluido induzida pelas Ondas

Para calcular as forças geradas pela movimentação do fluido induzida pelas ondas é necessário o conhecimento dos coeficientes de força de onda da embarcação a ser estudada. Esses coeficientes podem ser obtidos através de programas de análise hidrodinâmica. Os coeficientes gerados são:

- a) Coeficientes de Força de Onda de Primeira Ordem: representa a resposta de força da embarcação sob a ação de uma onda de amplitude unitária, em termos da amplitude de cada grau de liberdade dos movimentos.
- b) Coeficientes de Força de Onda de Segunda Ordem (ou de Força de Deriva – *Drift Forces* ou *Quadratic Transfer Functions* - QTF): coeficiente que fornece a força de deriva associada à onda regular com frequência ω_i e amplitude unitária.
- c) Matrizes de Massa Adicional: dependentes da frequência por representar a partir de coeficientes de massa a força que o fluido exerce sobre a embarcação devido a aceleração relativa fluido-estrutura..
- d) Matrizes de Amortecimento Potencial: dependentes da frequência por representar a partir de coeficientes de amortecimento a força dissipativa gerada pelo movimento do corpo próximo à superfície livre, o que equivale à consideração de efeitos de perda de energia ou amortecimento.
- e) Matriz de Restauração Hidrostática Linear: representa a relação linear entre força e deslocamento da embarcação em relação à sua posição original. A multiplicação desta matriz pelo vetor de deslocamento da unidade flutuante ao longo do tempo fornece um incremento/decremento de empuxo instantâneo do casco.

2.1.2 Forças Geradas pela Correnteza

Os coeficientes de arrasto hidrodinâmico quadráticos podem ser determinados através de ensaios de túnel de vento em modelos reduzidos ou a partir de ensaios numéricos utilizando CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Eles são obtidos apenas no plano horizontal para várias direções de incidência da correnteza. A força de arrasto hidrodinâmico pode ser determinada a partir da seguinte equação:

$$F_{C_j}(t) = \frac{1}{2} C_{C_j} A \rho [V_c(z_r)]^2 \quad (1)$$

Onde j é o grau de liberdade global; z_r é a cota de referência para cálculo da vel. da corrente $V_c(z_r)$; C_{C_j} é o coeficiente de força (ensaios ou tabelas padrões); ρ é a densidade da água; A é a área exposta à correnteza. Cabe mencionar que nesta equação o sinal da força é determinado apenas pelo sinal do coeficiente hidrodinâmico.

Outras formulações para o cálculo das forças de correnteza têm sido propostas como o modelo de Obokata (Obokata, 1987; Obokata e Nakashima, 1988). No modelo de Obokata, a força hidrodinâmica é obtida integrando-se as contribuições seccionais ao longo do

comprimento da unidade flutuante através das seguintes expressões, em função de coeficientes adimensionais de forças e momento de correnteza $C_{1c}(\psi)$, $C_{2c}(\psi)$ e $C_{6c}(\psi)$:

$$\begin{aligned} Fc_1 &= X_{1stat} + X_{1dyn} = 0.5\rho T \int_{-L/2}^{L/2} [C_{1c}(\psi_{crx}) V_{crx}^2] d\ell \\ Fc_2 &= X_{2stat} + X_{2dyn} = 0.5\rho T \int_{-L/2}^{L/2} [C_{2c}(\psi_{crx}) V_{crx}^2] d\ell \\ Fc_6 &= X_{6stat} + X_{6dyn} = 0.5\rho TL^2 C_{6c}(\psi_{cr}) V_{cr}^2 + 0.5\rho T \int_{-L/2}^{L/2} [C_{2c}(\psi_{crx}) V_{crx}^2 - C_{2c}(\psi_{cr}) V_{cr}^2] d\ell \end{aligned} \quad (2)$$

Onde ρ é a massa específica da água; T é o calado da unidade flutuante; L é o comprimento da unidade flutuante; V_{crx} é a velocidade seccional relativa da correnteza, dada por $V_{crx} = \sqrt{u_{cr}^2 + (v_{cr} - \dot{x}_6)^2}$; e u_{cr} e v_{cr} são as componentes da velocidade da corrente em relação à unidade flutuante. A derterminação de V_{crx} está ilustrada na Figura 1.

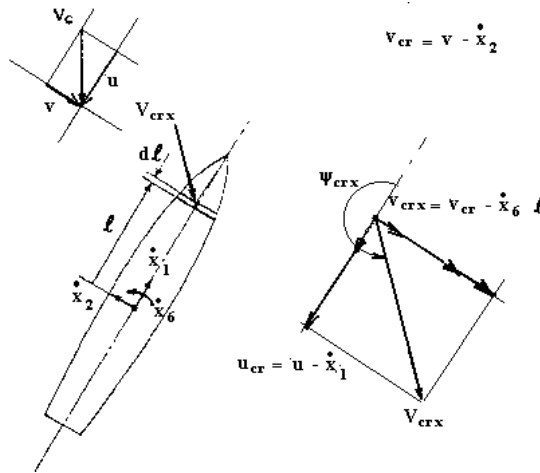


Figura 1. Velocidade seccional relativa da correnteza. Fonte: Obokata (1987)

O modelo de Obokata visa incluir o efeito de amortecimento gerado pelo movimento dinâmico de Yaw do navio.

2.1.3 Forças Geradas pelo Vento

As cargas de vento atuam sobre a área exposta do casco e do convés das plataformas flutuantes. As condições de vento usadas em projeto devem ser apropriadamente determinadas a partir de dados coletados, consistentes com os outros parâmetros ambientais que ocorrem simultaneamente. O cálculo da carga de vento em unidades flutuantes é efetuado através da seguinte expressão:

$$Fv_j(t) = \frac{1}{2} C_{vj} A \rho_{ar} [V_v(z_r, t)]^2 \quad (3)$$

Onde j é o grau de liberdade global; z_r é a cota de referência para cálculo da velocidade do vento $V_v(z_r, t)$; C_{v_j} é o coeficiente de arrasto ao vento obtido através de ensaios experimentais ou numéricos (CFD). A é a área exposta ao vento; ρ_{ar} é a densidade do ar; $V_v(z_r, t)$ é a velocidade do vento, medida em uma determinada altura de referência, e tomada como a média para um certo período de tempo.

Cabe mencionar que, de forma análoga a equação (1), o sinal da força é determinado apenas pelo sinal do coeficiente hidrodinâmico.

2.2 Modelo Híbrido

O Modelo Híbrido utilizado incorpora as forças de primeira ordem da Equação de Morison, as forças de Froude-Krylov e as forças de segunda ordem oriundas da Teoria Potencial. Essa combinação é devido ao fato de que a utilização somente da fórmula de Morison para o cálculo das cargas no casco de uma embarcação composta por membros cilíndricos, implicaria em assumir algumas simplificações; e o mesmo também ocorre para aplicação somente da Teoria da Difração. Desta forma, o modelo Híbrido tenta contemplar características positivas de mais de uma formulação, representando um modelo numérico mais realístico quanto possível.

Vale destacar que o modelo Híbrido apresentado descreve apenas as forças geradas pela movimentação do fluido devido às ondas e correnteza; a parcela de força devida ao vento é igual à descrita no item 2.1.3 e é somada às parcelas de onda e correnteza no vetor de cargas ambientais.

2.2.1 Formulação de Morison

A formulação de Morison (Morison *et al.*, 1950) é bastante difundida em aplicações práticas para o cálculo das forças de fluidos em corpos esbeltos, com dimensão transversal característica D pequena em comparação com o comprimento de onda λ . Assim, uma das premissas da aplicação da fórmula de Morison é que os membros reticulados de uma unidade flutuante não possuem dimensões suficientes para afetar o fluxo do fluido incidente, ignorando a perturbação da onda causada pela presença do corpo.

Desta forma, a fórmula de Morison é baseada no conceito de que a força exercida pelo fluido é composta por uma parcela de arraste e uma parcela de inércia. A parcela de arraste está a efeitos viscosos, proporcional às velocidades do fluido e do corpo; a parcela de inércia é proporcional às acelerações do fluido e do corpo. A equação de Morison pode ser expressa da seguinte forma:

$$F = \frac{1}{2} \rho_w D C_d |\dot{u} - \dot{x}| (\dot{u} - \dot{x}) + \rho_w \frac{\pi D^2}{4} (C_m \ddot{u} - C_a \ddot{x}) \quad (4)$$

Onde: ρ_w é a massa específica do fluido; D é a dimensão transversal característica do corpo (usualmente o diâmetro de um membro cilíndrico); $\dot{u}$; $\dot{x}$; $\ddot{u}$; $\ddot{x}$ são as velocidades e acelerações do fluido e do corpo, respectivamente; C_d , C_m e C_a são os coeficientes adimensionais que devem ser calibrados a partir da observação de resultados experimentais.

2.2.2 Formulação de Froude-Krylov

Em estruturas em que as forças inerciais preponderam sobre as forças viscosas, contudo a estrutura é ainda relativamente pequena de modo que a sua presença não afete significativamente o fluxo das partículas fluidas, a formulação de Froude-Krylov poderia ser aplicada (Chakrabarti, 1987).

Esta formulação se baseia no conceito de que a força que incide sobre o corpo é devida à pressão gerada pela passagem da onda atuante sobre a superfície do corpo. Assim, a força total na estrutura é obtida pela integração da componente de pressão da parte submersa do corpo numa determinada direção.

$$\begin{aligned} F_x &= C_H \iint_S p n_x dS \\ F_y &= C_V \iint_S p n_y dS \end{aligned} \quad (5)$$

Onde F_x e F_y são as componentes horizontal e vertical respectivamente da força resultante no corpo; n_x e n_y são as componentes horizontal e vertical do vetor normal à superfície do corpo; C_H e C_V são coeficientes de força horizontal e vertical, os quais são determinados empiricamente; S é a área da superfície molhada do corpo flutuante; p é pressão da onda não perturbada.

2.2.3 Teoria Potencial

A Teoria Potencial é empregada em casos onde os membros da unidade flutuante são considerados relativamente grandes, de modo a perturbar a passagem da onda que incide sobre a estrutura. Essa perturbação gera efeitos de difração e radiação. Assim, a pressão da onda é modificada devido à presença do corpo.

Neste caso, são consideradas parcelas de segunda ordem como o amortecimento potencial (irradiação de ondas) e forças de deriva (difração e reflexão de ondas), as quais não são avaliadas por Morison.

2.2.4 Formulação Completa

Por fim, o modelo Híbrido para o cálculo das forças correspondentes à movimentação do fluido, devido às ações ambientais de onda e correnteza, é composto pelas parcelas atribuídas às formulações anteriormente apresentadas. A expressão completa para o cálculo das forças é descrita por:

$$F = f_{Md} + f_{Mm} + f_{FK} + f_D + f_{PD} \quad (6)$$

Onde f_{Mm} e f_{Md} , correspondem aos termos de inércia e arraste da fórmula de Morison, normais e axiais ao eixo do membro; f_{FK} representa a parcela de força de Froude-Krylov; f_D representa às forças de Deriva Média e Lenta; f_{PD} corresponde às forças de Amortecimento Potencial.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Cenário, Configuração e Parâmetros

Os diversos modelos hidrodinâmicos foram testados e analisados a partir de um modelo de unidade flutuante representativa. A modelagem computacional baseou-se no software SITUA/Prosim (Jacob, 2006). Para analisar a deriva foi determinada, inicialmente, a geometria da plataforma com suas dimensões principais: Comprimento (L) = 108,2m, Boca (B) = 74,68m e Calado (T) = 25,45m e os diâmetros dos componentes estruturais conforme especificados na Figura 2 e Tabela 1. Os coeficientes hidrodinâmicos de arrasto e massa adicional dos membros utilizados na formulação híbrida são calculados por uma ferramenta numérica do próprio programa, levando em conta a característica geométrica das seções, seguindo as recomendações da seção 4 da norma DNV (1996).

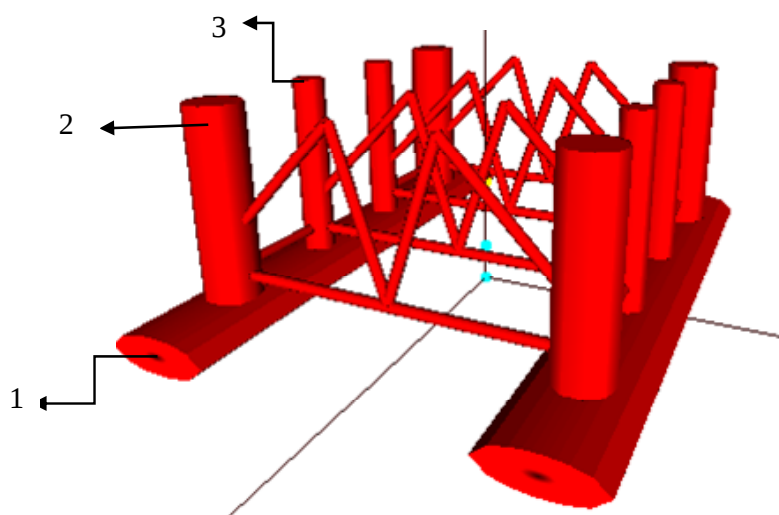


Figura 2. Modelo tridimensional

Tabela 1. Dimensões principais

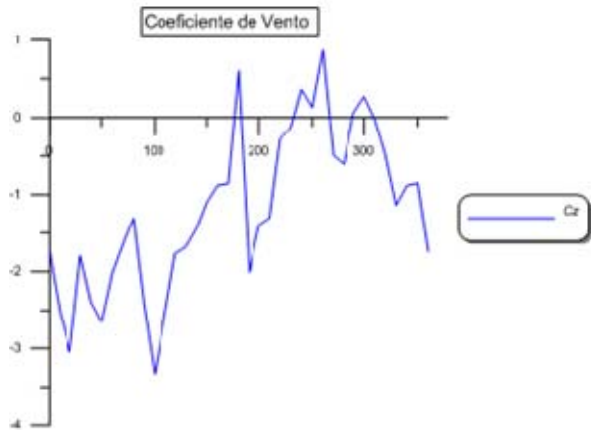
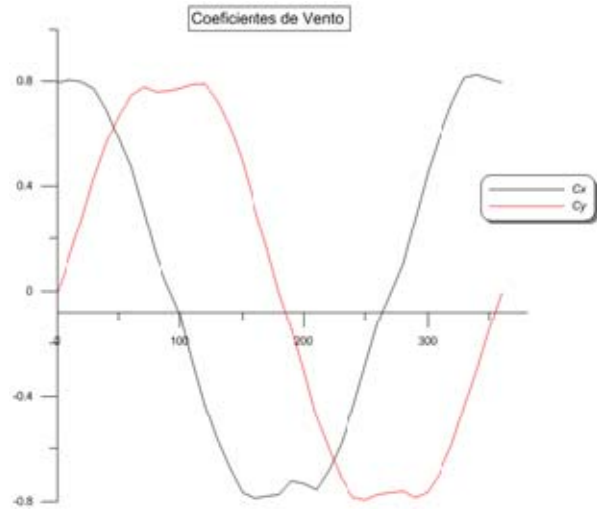
Estrutura	Comprimento (m)	Diâmetro em y (m)	Diâmetro em z (m)
1	108.204	15.24	6.4
2	34.327	9.89	9.89
3	34.327	5.818	5.818

Outro parâmetro essencial para a determinação da geometria é a posição Centro de Gravidade (CG) sendo: $x_g = 0$ m, $y_g = 0$ m e $z_g = 20,52$ m e o peso da embarcação $P = 305600$ KN.

Como consequência da geometria, estão os coeficientes de vento e correnteza, apresentados a seguir:

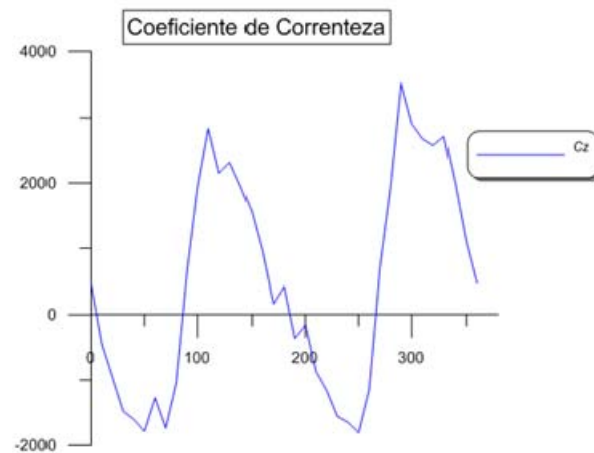
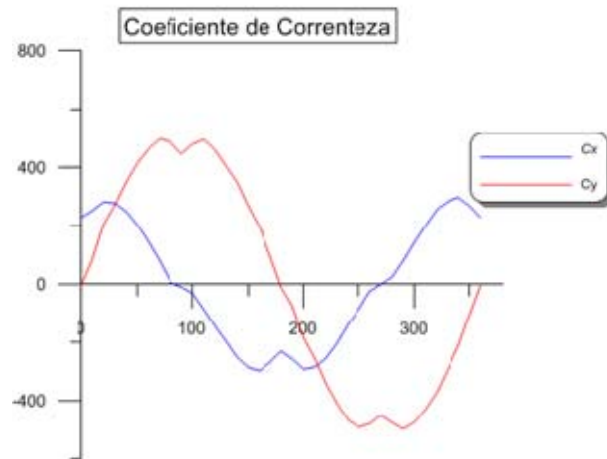
• Coeficiente de Vento:

Ang	Cx	Cy	C _{Mz}
0	0.80	-0.01	-1.74
10	0.81	0.12	-2.53
20	0.80	0.27	-3.04
30	0.77	0.43	-1.79
40	0.69	0.56	-2.39
50	0.58	0.67	-2.65
60	0.47	0.75	-2.02
70	0.31	0.78	-1.65
80	0.14	0.76	-1.30
90	0.02	0.76	-2.42
100	-0.09	0.77	-3.33
110	-0.27	0.79	-2.57
120	-0.44	0.79	-1.77
130	-0.57	0.73	-1.69
140	-0.68	0.63	-1.45
150	-0.77	0.49	-1.10
160	-0.79	0.33	-0.88
170	-0.78	0.17	-0.86
180	-0.77	-0.01	0.60
190	-0.72	-0.14	-2.01
200	-0.73	-0.31	-1.39
210	-0.75	-0.48	-1.30
220	-0.68	-0.60	-0.28
230	-0.58	-0.71	-0.13
240	-0.44	-0.78	0.36
250	-0.28	-0.79	0.13
260	-0.12	-0.77	0.87
270	-0.01	-0.77	-0.50
280	0.10	-0.76	-0.61
290	0.28	-0.79	0.06
300	0.45	-0.76	0.27
310	0.59	-0.69	-0.02
320	0.72	-0.59	-0.49
330	0.81	-0.44	-1.13
340	0.82	-0.30	-0.89
350	0.81	-0.14	-0.85
360	0.80	-0.01	-1.74



• Coeficiente de Correnteza:

Ang	CDx	CDy	CDz
0	231	-3	459
10	255	86	-460
20	284	207	-971
30	280	274	-1485
40	252	353	-1611
50	204	417	-1794
60	145	465	-1280
70	80	499	-1745
80	7	489	-1057
90	-8	448	635
100	-29	480	1927
110	-84	497	2833
120	-142	463	2144
130	-196	406	2311
140	-251	350	1945
150	-285	269	1551
160	-297	198	939
170	-267	97	160
180	-230	-8	423
190	-256	-74	-370
200	-291	-184	-165
210	-284	-254	-879
220	-253	-340	-1166
230	-201	-410	-1566
240	-136	-468	-1655
250	-85	-491	-1814
260	-23	-480	-1159
270	1	-451	679
280	26	-475	1920
290	82	-498	3515
300	145	-474	2903
310	203	-426	2676
320	259	-371	2575
330	287	-290	2711
340	300	-212	1960
350	271	-105	1100
360	231	-3	459



Nos casos em estudo, foram analisados três modelos hidrodinâmicos para o cálculo da deriva:

- Modelo de Difração utilizando o modelo de Obokata para a força de correnteza;
- Modelo de Difração utilizando a interpolação direta dos coeficientes de correnteza;
- Modelo Híbrido cujos coeficientes de arrasto de todos os membros são ajustados proporcionalmente a cada instante de tempo para coincidir com os coeficientes globais de correnteza apresentados anteriormente.

Em cada modelo foram aplicados 12 casos de carregamento ambiental (Corrente, Vento e Onda), dos quais 8 são alinhados com as coordenadas cardeais (N,NE,E,SE,S,SW,W,NW) e 4 são condições típicas da Baía de Campos. Abaixo estão representadas esquematicamente as características das condições ambientais (Tabela 2 e Tabela 3), com as seguintes considerações:

VVEL - Velocidade média de 10 minutos do vento medido a 10m (m/s) .

VDIR - Direção do vento em relação ao norte (azimutal) (de onde vem) (graus).

HS - Altura significativa de onda. Para mar bimodal é a altura da primeira componente. (m)

TP - Período de pico da onda. Para mar bimodal é o período da primeira componente (seg.)

DI - Direção de incidência da onda em relação ao norte (azimutal) (de onde vem). Para mar bimodal é a direção da primeira componente. (graus)

CVEL - Velocidade da corrente na superfície (m/s)

CDIR - Direção da corrente na superfície, em relação ao Norte (azimutal) (para onde vai) (m/s)

Tabela 2. Condições Típicas da Baía de Campos

	VVEL	VDIR	HS	TP	DIR	CVEL	CDIR
Carregamento 1	8	221	1.62	5.6	210	0.41	101
Carregamento 2	5.9	312	1.91	9.5	345	3.68	299
Carregamento 3	3.9	286	1.66	8.1	339	1.76	132
Carregamento 4	2.6	249	1.59	8.8	349	2.21	231

Tabela 3. Condições Ambientais Alinhadas

	VVEL	VDIR	HS	TP	DIR	CVEL	CDIR
Carregamento 1 - N	1	180	1	10	180	1	0
Carregamento 2 - NE	1	225	1	10	225	1	45
Carregamento 3 - E	1	270	1	10	270	1	90
Carregamento 4 - SE	1	315	1	10	315	1	135
Carregamento 5 - S	1	0	1	10	0	1	180
Carregamento 6 - SO	1	45	1	10	45	1	225
Carregamento 7 - O	1	90	1	10	90	1	270
Carregamento 8 - NO	1	135	1	10	135	1	315

Após obtidas todas as características que determinam geometria do casco e as condições ambientais, utilizou-se o software SITUA-Prosím para a determinação da deriva da sonda de perfuração. O procedimento realizado para a tomada de resultados baseou-se na fixação da unidade numa posição inicial (alinhada para leste) sem ajuste de aproamento, ou seja, sem nenhum alinhamento prévio da embarcação com os carregamentos ambientais. Dados de posição foram tomados a cada 5 minutos num período total de 1 hora e 30 minutos para cada condição ambiental. Na seção 3.2, é possível encontrar os gráficos que ilustram com detalhes as trajetórias das derivas e seus respectivos raios de alcance.

3.2 Resultados

3.2.1 Deriva

Os diagramas abaixo são os resultados das simulações de análise de deriva da sonda de perfuração em termos de direção e alcance da deriva em metros, para os três modelos hidrodinâmicos. No item 3.3, encontra-se a interpretação dos resultados com base na teoria dos modelos em análise.

a) Obokata:

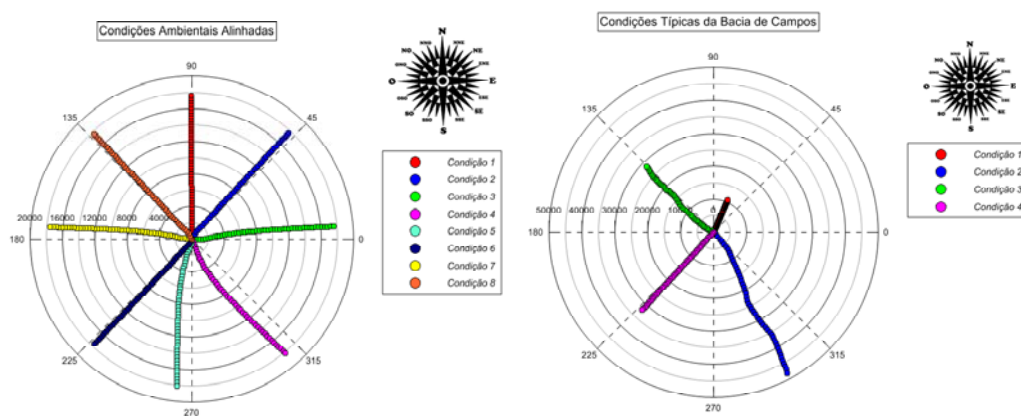


Figura 3. Resultado para o Modelo de Difração utilizando Obokata

b) Interpolação Direta:

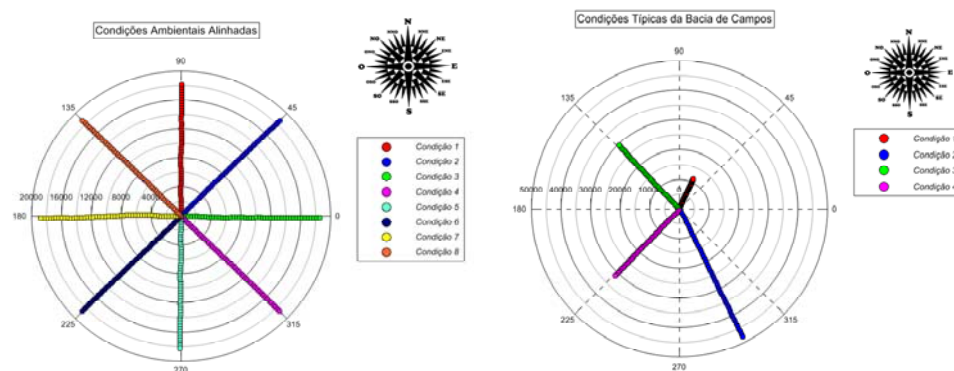


Figura 4. Resultado para o Modelo de Difração utilizando Interpolação Direta

c) Híbrido:

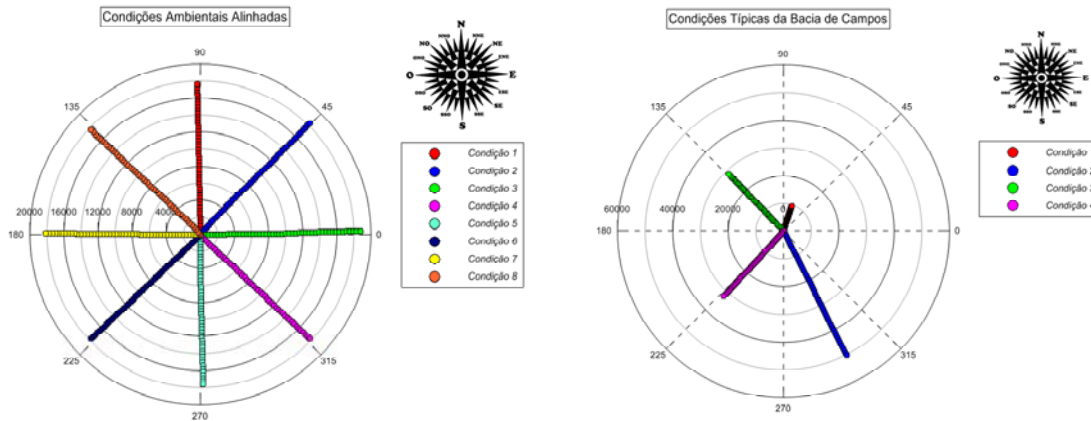


Figura 5. Resultado para o Modelo Híbrido

Tabela 4. Comparação entre as posições finais das deriva nas condições ambientais alinhadas

	Drift em 1h30min			Diferença		Discrepância	
	Obokata	Interp. Dir.	Hibrido	Obokata	Interp. Dir.	Obokata	Interp. Dir.
Cond. 1	17628	18112	17575	53	537	0,3%	3,1%
Cond. 2	17647	18621	18274	-627	347	3,4%	1,9%
Cond. 3	17593	18507	18734	-1141	-227	6,1%	1,2%
Cond. 4	18161	18626	17797	364.3	829	2,0%	4,7%
Cond. 5	18130	18216	17618	512	598	2,9%	3,4%
Cond. 6	17634	18615	17764	-130	851	0,7%	4,8%
Cond. 7	17591	18738	18112	-521	626	2,9%	3,5%
Cond. 8	17592	18642	17737	-145	905	0,8%	5,1%

Tabela 5. Comparação das posições finais das deriva nas condições ambientais da Bacia de Campos

	Drift em 1h30min			Diferença		Discrepância	
	Obokata	Interp. Dir.	Hibrido	Obokata	Interp. Dir.	Obokata	Interp. Dir.
Cond. 1	10600	11156	9444	1156	1712	12.2%	18,1%
Cond. 2	48172	48227	50343	-2171	-2116	4.3%	4,2%
Cond. 3	28302	29470	28714	-412	756	1.4%	2,6%
Cond. 4	31988	31290	31988	0	-698	0.0%	2,2%

3.2.2 Surge, Sway e Yaw

Esta seção tem como objetivo apresentar os resultados de Surge, Sway e Yaw de dois casos apresentados anteriormente, o primeiro no qual os dados mais aproximaram-se de uma condição final comum e o segundo no qual houve maior discrepância dos resultados.

Inicialmente serão apresentados os resultados da Condição 8 - NO (Condições Ambientais Alinhadas), onde houve boa concordância entre os resultados (Figura 6 e Figura 7) embora o movimento de yaw do modelo de interpolação direta tenha fugido dos demais modelos, não tendo sido estabilizado seu movimento angular, seus resultados finais de passeio ficaram bons. Tanto o modelo de Obokata quanto o modelo Híbrido estabilizaram o movimento dinâmico de yaw e buscaram aproamentos coerentes.

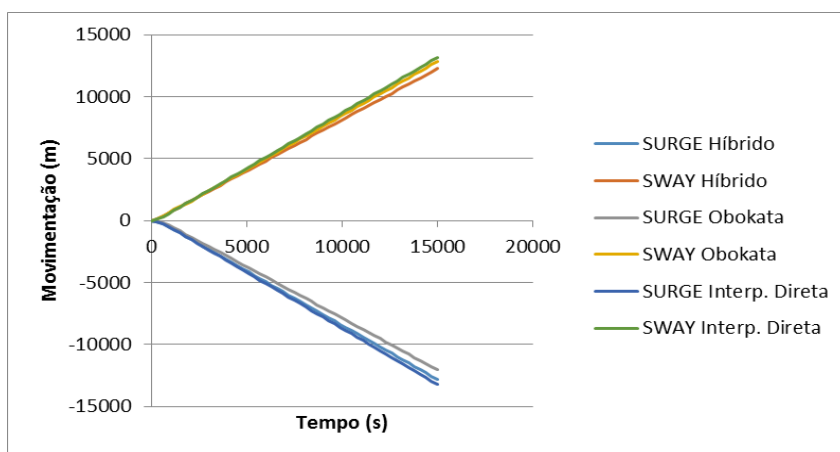


Figura 6. Surge e Sway para a Condição 8 - NO

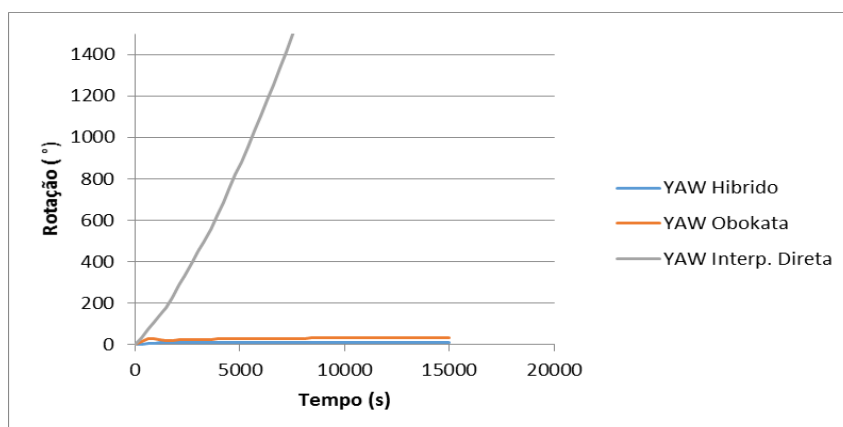


Figura 7. Yaw para a Condição 8 - NO

Em contrapartida, houve maior discrepância entre os dados na Condição 4 – SE (Condições Ambientais Alinhadas), conforme mostrado na Figura 8 e Figura 9. Neste caso, o aproamento médio de deriva do modelo de Obokata e Híbrido apresentaram diferenças de aproximadamente 180 graus. Quanto ao modelo de interpolação direta, mais uma vez não atingiu estabilidade angular.

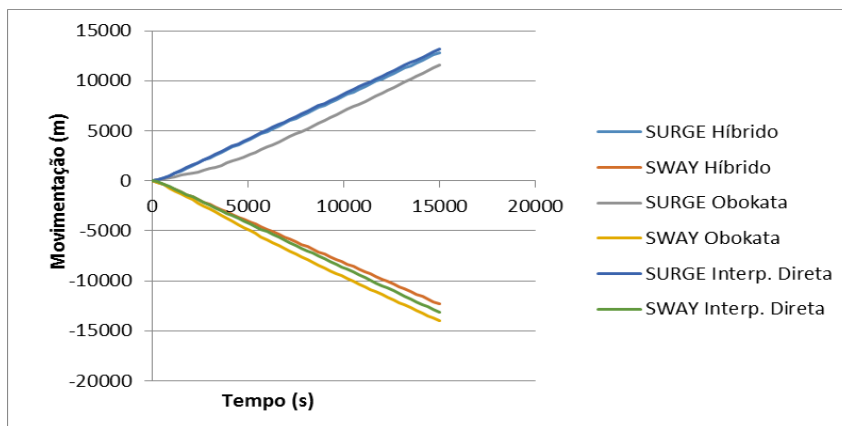


Figura 8. Surge e Sway para a Condição 4 - SE

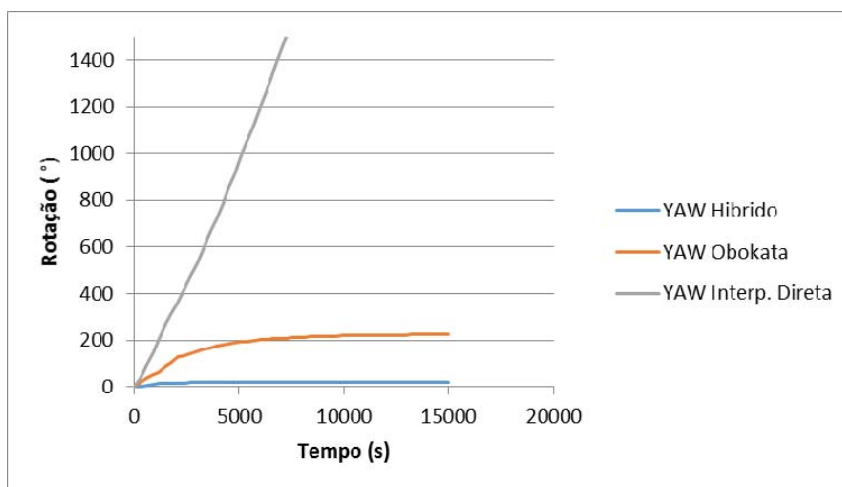


Figura 9. Yaw para a Condição 4 - SE

3.3 Análises dos Resultados

A partir dos dados de deriva obtidos pela simulação computacional e ilustrados nos diagramas de deriva apresentados no item 3.2.1, verificou-se algumas leves discrepâncias entre os três modelos hidrodinâmicos.

Como o modelo de Interpolação Direta não leva em consideração o amortecimento do movimento de giro (Yaw), a sonda permanece girando durante toda deriva, sem estabilizar o ângulo de Yaw, como ocorre no modelo Obokata e Híbrido.

A trajetória de deriva, tanto o ângulo quanto o raio, de todos os modelos estão compatíveis, apresentando pequenas diferenças, apenas devido à diferença de estabilização inicial de cada modelo.

Como o Yaw da embarcação é determinante para definição da deriva, pode-se explicar o motivo de o modelo Híbrido e Obokata terem tido uma deriva maior do que a do modelo de Interpolação Direta.

Como o amortecimento de giro é considerado tanto no modelo Obokata, que inclui o amortecimento em Yaw pelo movimento dinâmico de Yaw, quanto no modelo Híbrido, que

pela própria formulação de Morison também dissipa o movimento dinâmico de *Yaw*, a plataforma consegue atingir, por estes dois modelos, um aproamento constante de deriva.

No caso estudado, a sonda é praticamente simétrica, não havendo tanta discrepância entre os coeficientes de correnteza de proa e popa da embarcação. Entretanto, quando não houver simetria, os resultados obtidos poderão apresentar grandes diferenças.

4 INTERPOLAÇÃO DIRETA COM AMORTECIMENTO

Como analisado anteriormente, o método da Interpolação Direta não avalia fielmente o efeito de deriva uma vez que não há fonte de dissipação de energia de *yaw* devido ao próprio giro da unidade flutuante. Dessa forma, novas simulações foram realizadas levando em consideração um amortecimento linear capaz de ajudar o modelo a atingir um aproamento estável e coerente com os resultados obtidos pelos dois outros modelos.

Foram analisados 2 casos de amortecimento linear, o primeiro com uma amortecimento de 10^6 ton e o segundo de 10^8 ton. Para o primeiro amortecimento tem-se:

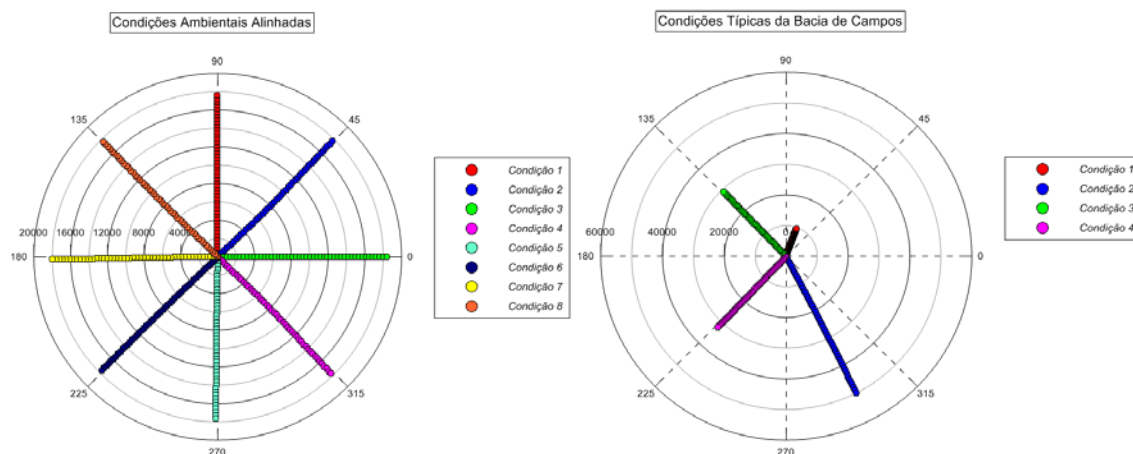


Figura 10. Amortecimento de 10^6 ton para o *Yaw*

Já para o segundo coeficiente, são apresentadas as novas derivas:

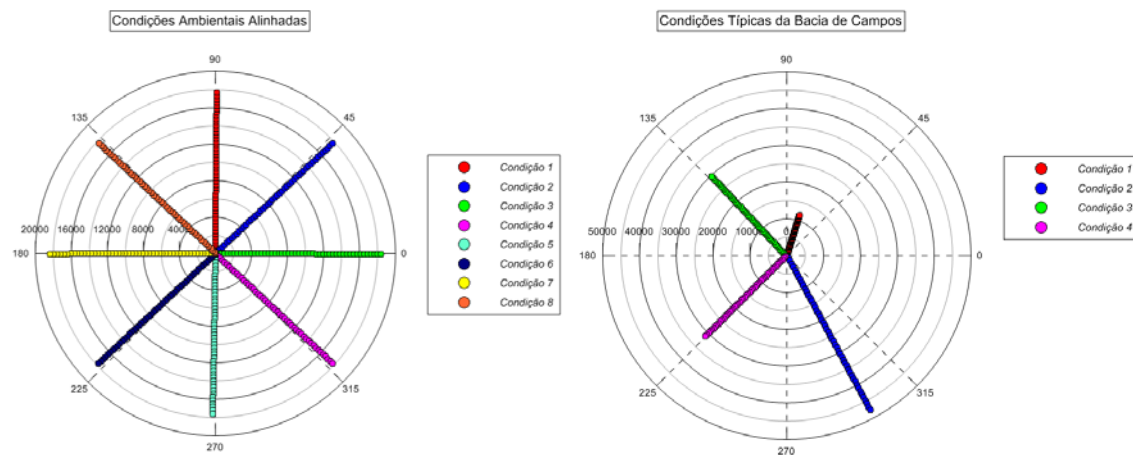


Figura 11. Amortecimento de 10^8 ton para o *Yaw*

Para a avaliação do Yaw, os dados levantados resultaram num aproamento final da unidade flutuante, fato este que não ocorria anteriormente quando a embarcação não parava de rotacionar. Comparamos o resultado com aquilo que havia sido obtido com os modelos Híbridos e Obokata.

Em todas as simulações realizadas com o modelo de interpolação direta com amortecimento externo de Yaw, o giro foi estabilizado, conforme os gráficos a seguir:

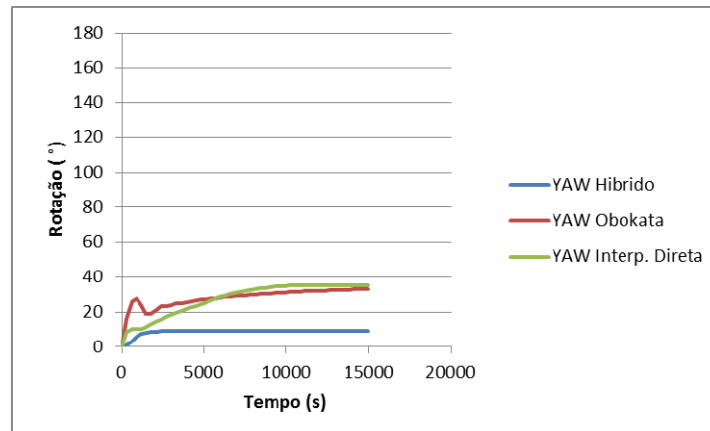


Figura 12. Amortecimento de 10^6 ton para o Yaw para carregamento ambiental 8 alinhado

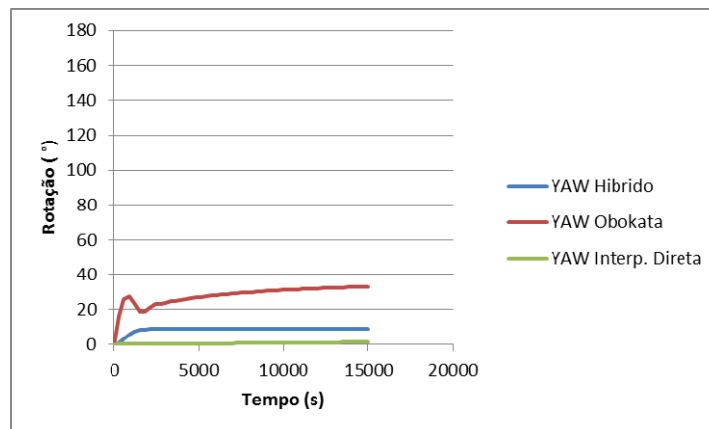


Figura 13. Amortecimento de 10^8 ton para o Yaw para carregamento ambiental 8 alinhado

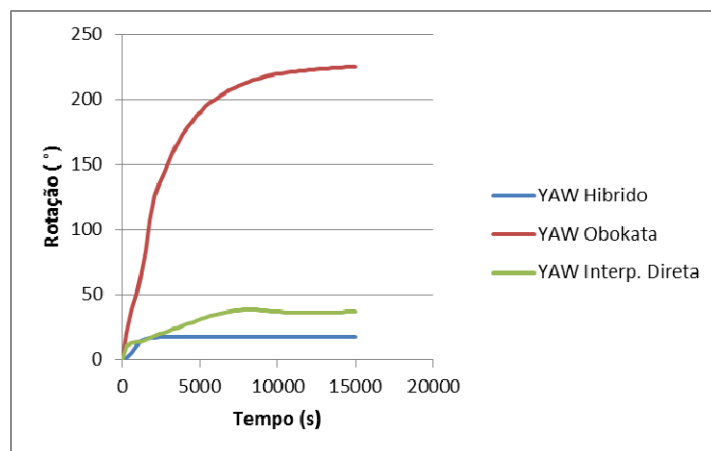


Figura 14. Amortecimento de 10^6 ton para o Yaw para carregamento ambiental 4 alinhado

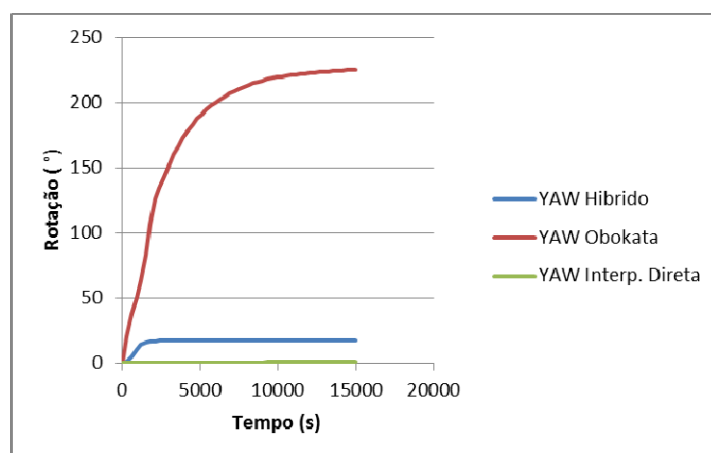


Figura 15. Amortecimento de 10^8 ton para o Yaw para carregamento ambiental 4 alinhado

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados, pode-se observar que em termos de distância de deriva, os três modelos hidrodinâmicos (Modelo de Difração utilizando o modelo de Obokata para a força de correnteza; Modelo de Difração utilizando a interpolação direta dos coeficientes de correnteza; e Modelo Híbrido) apresentaram respostas próximas, com uma discrepância máxima de 12,2% em 1h e 30 min, comparando o modelo de Obokata com o Híbrido e de 18% comparando o modelo de Interpolação Direta com o Híbrido. Com relação ao giro da plataforma, os três modelos não apresentaram o mesmo comportamento de giro. Embora o modelo híbrido e de Obokata tenham estabilizado seu movimento angular, adquirindo um aproamento de deriva, o modelo de interpolação direta teve comportamento contrário, girando indefinidamente, sem alcançar um aproamento de deriva.

Diante dos resultados obtidos, deve-se reforçar a importância em conhecer de forma efetiva o amortecimento de yaw de uma sonda. Esta informação não é obtida nos ensaios de arrasto tradicionais, pois estes buscam apenas reportar os coeficientes decorrentes da incidência de fluido sobre a embarcação, e não dos coeficientes obtidos pelo giro do próprio corpo. Se um amortecimento externo adequado for introduzido nos três modelos, a diferença

em relação ao giro da embarcação reduzirá. Este procedimento terá ainda mais relevância quando sondas mais assimétricas forem modeladas e o aproamento de deriva impactar ainda mais na trajetória de deriva da sonda.

Por fim, o estudo apresentado indica que os três modelos podem ser capazes de simular a deriva de uma sonda devido a um blackout. No entanto, dependem, principalmente com relação ao modelo de interpolação direta, de que se façam simulações em tanques de prova ou em programas CFD para estimar amortecimentos devidos aos movimentos angulares de uma sonda.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio da Petrobras através de diversos projetos sobre sistemas *offshore* que têm sido realizados em parceria com o LAMCSO, e que levaram a valiosas discussões e sugestões para a geração dos modelos representativos empregados nos estudos aqui efetuados.

REFERÊNCIAS

Chakrabarti, S.K., *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Computational Mechanics Publications / Springer-Verlag, 1987.

DNV, *Rules for Classification of Mobile Offshore Units: Structures and Equipment Main Class*. Parte 3, Capítulo 1, Julho 1996.

Jacob, B.P., *Programa Prosim: Simulação Numérica do Comportamento de Unidades Flutuantes Ancoradas*. Versão 3.0, Manual Teórico, COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2006.

Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W., et al, "The Force Exerted by Surface Waves on Piles", *Petrol. Trans.*, AIME, no 189, 1950.

Obokata, J. "On the Basic Design of Single Point Mooring Systems (1st report)", *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, vol.161, June 1987.

Obokata, J.; Nakashima, T. "On the Basic Design of Single Point Mooring Systems (2nd report)", *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, vol.163, June 1988.