

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Modelos Polinomiais Aplicados à Análise de *Risers*

AUTORES:

Fernando Jorge Mendes de Sousa

Luís Volnei Sudati Sagrilo

Edison Castro Prates de Lima

INSTITUIÇÃO:

COPPE / UFRJ

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

Modelos Polinomiais Aplicados à Análise de *Risers*

Abstract

Until recently, risers were designed considering only few regular sea analyses and high safety factors. The increase of the computers processing capability and the simultaneous reduction of their costs, however, allowed riser designers to change their project procedures. Nowadays, risers can be designed considering not only much more analyses, but also more complex ones.

Following this new tendency, methodologies that aim to reduce the computational costs of random analyses represent an important research line.

The main purpose of this work is to develop a methodology based on polynomial models to predict time series of a riser response parameter. This methodology considers as inputs the movements of the platform caused by wind, wave and current. The desired response parameter investigated in this paper is the top tension, although the procedure to evaluate stresses is very similar.

This methodology can be applied in the initial phases of the riser project, accelerating the selection of a structure that satisfies project criteria, and in the representation of the riser dynamic response in coupled analyses, reducing their computational costs.

Introdução

Nos últimos anos, os técnicos envolvidos com o projeto de *risers* e linhas de ancoragem têm convivido com duas situações opostas: se por um lado o aumento do poder de processamento e a redução de custos dos computadores tende a reduzir o custo computacional das análises necessárias à avaliação destas estruturas, por outro as análises vêm crescendo em número de forma acelerada e tornando-se mais complexas.

Neste sentido, procedimentos que tenham como objetivo reduzir custos computacionais de análises aleatórias representam uma importante linha de pesquisas. Um exemplo deste tipo de metodologia é a predição de séries temporais; através da simulação de uma pequena análise (janela de treinamento), parâmetros de resposta são relacionados aos movimentos da plataforma (Figura 1a) através de uma função de transferência não-linear. Uma vez que estes movimentos podem ser determinados sem a necessidade de executar a análise completa (análises desacopladas), é possível estimar a série temporal completa dos parâmetros de resposta desejados aplicando a função de transferência a estes movimentos (Figura 1b).

Este procedimento permite, dentre outras possibilidades, a determinação de valores máximos e mínimos dos parâmetros de resposta (e os instantes de ocorrência). É possível também, através da avaliação dos parâmetros estatísticos das séries temporais, estimar valores extremos destes parâmetros.

Assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia baseada em procedimentos numéricos polinomiais para estimar séries temporais de parâmetros de resposta em função dos movimentos da plataforma. No atual estágio de desenvolvimento do trabalho, o parâmetro estimado é a tração considerando cargas ambientais atuando no plano do *riser*. A consideração de cargas

tridimensionais e procedimentos para avaliação de tensões no topo e no TDP serão estudados em trabalhos futuros.

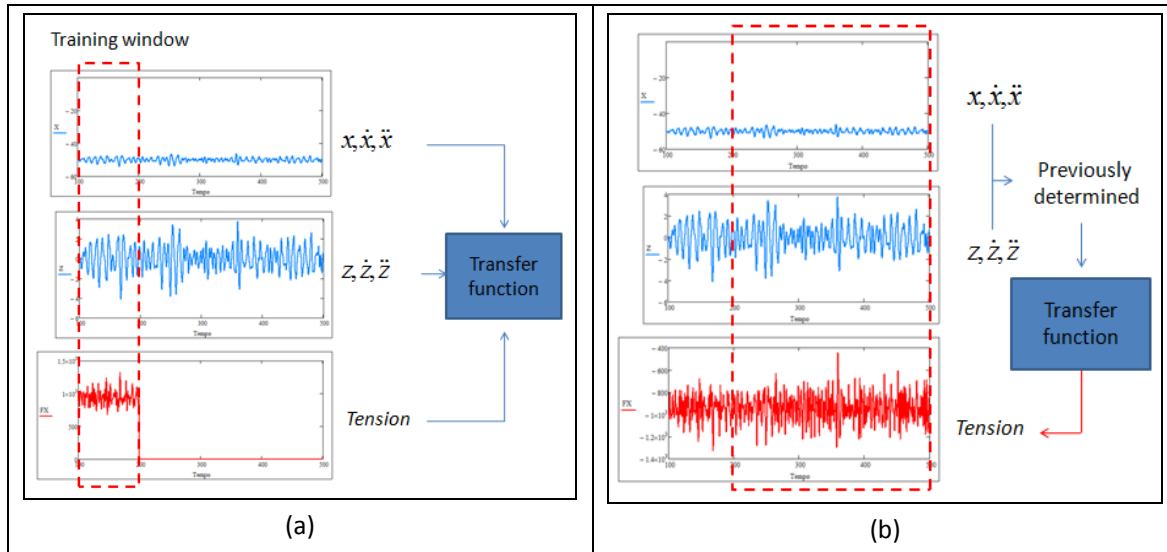


Figura 1 – (a) Janela de treinamento e (b) Estimativa das séries temporais.

Modelos Polinomiais

Em muitas situações, em função da dificuldade de estabelecer modelos matemáticos que representem um dado problema, é usual adotar modelos baseados em testes para representar o comportamento dinâmico de um sistema. Esta linha de pesquisas é conhecida na literatura como Identificação de Sistemas (AGUIRRE [1]).

As técnicas de identificação representam uma forma de abordagem semi-empírica, que pode ser resumida como o desenvolvimento de modelos matemáticos simplificados que permitam a predição da resposta de sistemas dinâmicos em função de alguns parâmetros de entrada pré-selecionados (dados experimentais, por exemplo). Estas técnicas não exigem, necessariamente, um conhecimento prévio sobre os parâmetros do sistema (MORETIN e TOLOI [6]).

Dentro do escopo de predição de séries temporais empregando métodos polinomiais aplicados à análise de *risers*, GOBAT e GROSENBAUGH [4] propuseram um modelo simplificado com considerações físicas (“caixa cinza”) para estimar a tração no topo de linhas de ancoragem submetidas somente a movimentos de *heave*, representada pela Equação (1):

$$T(t) = M(1 + \Delta\tau)a(t) + \sqrt{3\left(\frac{1}{2}\rho C_d \Delta\tau d H\right)^2 \sigma_v^2 + \sqrt{3}\rho M(1 + \Delta\tau)C_d \Delta\tau d H \sigma_a} v(t) \quad (1)$$

Nesta expressão, $T(t)$ representa a tração, M e C_d são a massa e o coeficiente de arrasto efetivos (coeficientes a serem estimados), $v(t)$ e $a(t)$ são a velocidade e a aceleração de *heave* (σ_v e σ_a – desvios-padrão) e os termos restantes representam parâmetros físicos do problema (diâmetro da linha, lâmina d’água e densidade da água, por exemplo).

SAGRILO *et al* [9] propuseram um modelo polinomial para avaliar séries temporais de parâmetros de resposta no topo de *risers* submetidos também a movimentos de *heave* somente. A expressão proposta é apresentada na Equação (2):

$$r(t) = a_0 + a_1 h(t) + a_2 \dot{h}(t) + a_3 \ddot{h}(t) + a_4 h(t)^2 + a_5 \dot{h}(t)^2 + a_6 \ddot{h}(t)^2 + a_7 \ddot{h}(t) + a_8 h(t)\dot{h}(t) + a_9 h(t)\ddot{h}(t) + a_{10} \dot{h}(t)\ddot{h}(t) + a_{11} h(t)\ddot{h}(t) \quad (2)$$

Nesta expressão, $r(t)$ representa a série temporal do parâmetro de resposta desejado, os a_i 's são os coeficientes da função de transferência não-linear e $h(t), \dot{h}(t), \ddot{h}(t), \ddot{h}(t)$ representam o *heave* e suas derivadas.

PASCOAL *et al* [7] propuseram um modelo polinomial para representar a tração no topo de linhas de ancoragem submetidas a movimentos de *surge* somente. Este modelo é representado pela Equação (3):

$$T(t) = a_1 x(t) + a_2 x(t)^3 + a_3 \dot{x}(t) + a_4 \ddot{x}(t) + a_5 x(t)^2 \dot{x}(t) + a_6 x(t) \dot{x}(t)^2 + a_7 x(t)^2 \ddot{x}(t) + a_8 x(t) \ddot{x}(t)^2 + a_9 \ddot{x}(t)^3 + a_{10} \dot{x}(t)^2 \ddot{x}(t) + a_{11} \dot{x}(t) \ddot{x}(t)^2 + a_{12} \dot{x}(t)^3 + a_{13} x(t) \dot{x}(t) \ddot{x}(t) \quad (3)$$

Nesta expressão, $T(t)$ representa a série temporal de tração, os a_i 's são os coeficientes da função de transferência não-linear e $x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t), \ddot{x}(t)$ representam o *surge* e suas derivadas.

Todos os modelos anteriores podem ser representados por expressões da forma:

$$\begin{bmatrix} y(t_1) \\ \vdots \\ y(t_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1(t_1) & \cdots & p_n(t_1) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ p_1(t_N) & \cdots & p_n(t_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix} \quad \text{ou} \quad \mathbf{Y} = \mathbf{P}\boldsymbol{\Theta} + \mathbf{E} \quad (4)$$

onde $\mathbf{Y}$ é a variável dependente, os p_i 's são denominados preditores ou regressores, os a_i 's são os coeficientes da função de transferência-não linear, e os e_i 's são os erros associados à aproximação de $\mathbf{Y}$ por $\mathbf{P}\boldsymbol{\Theta}$.

Esta forma de representação, com toda a sua simplicidade, levanta alguns aspectos importantes sobre os procedimentos de predição. Ela deixa claro, por exemplo, que a seleção dos p_i 's e a forma de calcular os a_i 's são muito importantes. O próximo item deste trabalho discute o processo de seleção de preditores. A determinação dos coeficientes da função de transferência-não linear (os a_i 's) envolve a solução de sistemas de equações que surgem quando o erro associado à expressão $\| \mathbf{Y} - \mathbf{P}\boldsymbol{\Theta} \|$ é minimizado (SOUZA [11]), e que, em muitos casos, geram matrizes mal condicionadas; por isso, neste trabalho foi utilizado um algoritmo SVD (PRESS *et al* [8]). Outras opções para o cálculo dos coeficientes da função de transferência são o método de Gram-Schmidt e a transformação de Householder [3].

Seleção dos Preditores

A seleção dos preditores é uma das fases mais importantes no desenvolvimento de procedimentos numéricos polinomiais. Os preditores podem ser selecionados a partir de todo o conhecimento disponível sobre o sistema, incluindo termos de entrada (por exemplo, movimentos), termos da resposta obtidos na janela de treinamento, pela combinação entre estes termos e por termos / combinações de termos com atrasos.

No caso de *risers* e linhas de ancoragem, os termos de entrada são os movimentos nos seis graus de liberdade e suas derivadas. Uma vez que neste trabalho só são analisadas cargas ambientais atuando no plano da linha, os termos de entrada selecionados são o *surge*, o *heave* e suas derivadas. Deve-se observar que estes termos devem ser computados no ponto de conexão do *riser* / linha de ancoragem.

Um ponto importante que deve ser observado é que a tração no topo pode ser considerada composta por duas parcelas: uma média ou “estática”, função do peso e do *offset*, e uma “dinâmica”, função das cargas de onda. Assim, o problema de predição de séries temporais de tração pode ser dividido também em duas partes. Uma vantagem deste tipo de abordagem é que a incerteza associada à parcela estática é significativamente menor do que a associada à parcela dinâmica, e que muitas vezes as duas parcelas possuem ordens de grandeza diferentes.

Para exemplificar o procedimento adotado neste trabalho para selecionar os preditores, foi utilizado um exemplo bastante simples, composto por um *riser* rígido em catenária conectado a um FPSO em uma lâmina d’água de 500m. O programa ANFLEX [2] foi utilizado na análise, que considerou *offsets* variando de -10% a 10% da lâmina d’água e movimentos verticais variando de -10m a 10m. Não foram consideradas cargas de corrente, e a expressão selecionada para representar a tração, com um erro inferior a 1%, é dada pela Equação (5), onde X_{st} e Z_{st} representam os deslocamentos de *surge* e *heave*:

$$F_{st}(t) = a_0 + a_1 X_{st} + a_2 X_{st}^2 + a_3 X_{st}^3 + a_4 X_{st}^4 + a_5 Z_t + a_6 Z_{st}^2 + a_7 Z_{st}^3 + a_8 X_{st} Z_{st} + a_9 X_{st}^2 Z_{st} + a_{10} X_{st} Z_{st}^2 \quad (5)$$

A seleção de preditores para representar a parcela dinâmica é uma tarefa muito mais complexa. A quantidade de preditores aumenta rapidamente à medida que cresce o número de parâmetros de entrada (em função dos termos cruzados), que aumenta o grau do polinômio utilizado e quando se consideram termos com atrasos.

Desta forma, para selecionar um conjunto de preditores adequado, três conjuntos foram comparados:

- 1º grupo: 9 preditores (1, $\dot{X}$, $\dot{Z}$, $\ddot{X}$, $\ddot{Z}$, $|\dot{X}|$, $|\dot{Z}|$, $|\ddot{X}|$, $|\ddot{Z}|$);
- 2º grupo: grupo 1 + termos quadráticos ($\dot{X}|\dot{X}|$, $\dot{X}\dot{Z}$, $\dot{X}\ddot{X}$, $\dot{X}\ddot{Z}$, $\dot{Z}|\dot{Z}|$, $\dot{Z}\ddot{X}$, $\dot{Z}\ddot{Z}$, $\ddot{X}^2$, $\ddot{X}\ddot{Z}$, $\ddot{Z}^2$), totalizando 19 preditores;
- 3º grupo: grupo 2 + termos cúbicos, totalizando 37 preditores.

Nesta comparação foram utilizadas janelas de treinamento de 2% das series completas (10800s). Uma análise completa dos resultados obtidos, incluindo a avaliação do tamanho da janela de treinamento necessária, pode ser encontrada em SOUSA [11]. As conclusões mais importantes podem ser resumidas nos seguintes pontos:

- Os três grupos de coeficientes estimaram os parâmetros estatísticos das séries temporais de tração de forma eficiente;
- Os três grupos de coeficientes também identificaram os cinco picos mais importantes de tração nas séries dinâmicas. OS grupos 2 e 3 identificaram os picos na ordem correta, enquanto o grupo 1 inverteu a importância de alguns destes picos;
- OS menores erros na estimativa dos valores máximos observados e dos valores extremos de tração foram obtidos pelo Segundo grupo de coeficientes, apresentando erros inferiores a 5% considerando somente a parcela dinâmica.

Desta forma, o segundo grupo de preditores foi selecionado para a representação da parcela dinâmica da tração. A Figura 2a apresenta uma comparação entre parte de uma série temporal de

trações obtida pelo ANFLEX e pela metodologia proposta, e a Figura 2b apresenta uma comparação entre os espectros destes sinais.

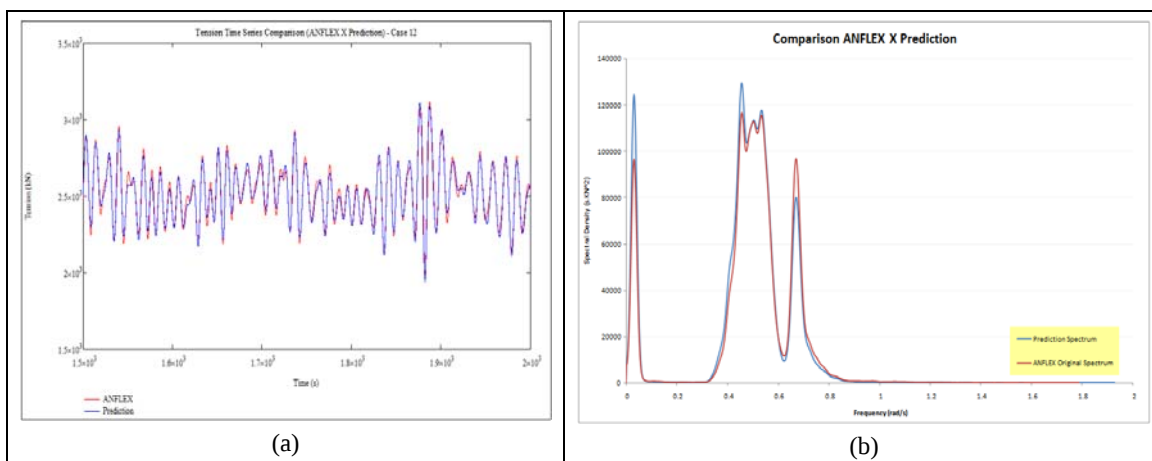


Figura 2 – (a) Comparação entre sinais, e (b) Comparação entre espectros dos sinais gerados pelo ANFLEX e pela metodologia proposta.

Exemplo – Riser Conectado a um FPSO Turret

Para avaliar a metodologia proposta em um caso mais complexo, foi selecionado um exemplo composto por um *riser* em catenária livre conectado a um FPSO *Turret*, em uma lâmina d'água de 1100m. Este exemplo inclui corrente, onda, movimentos de baixa frequência e três níveis de *offset* (0%, 5% e 10%), considerando tanto condições *far* quanto *near*. A Figura 3 apresenta a configuração analisada e a Tabela 1 apresenta as propriedades da linha.

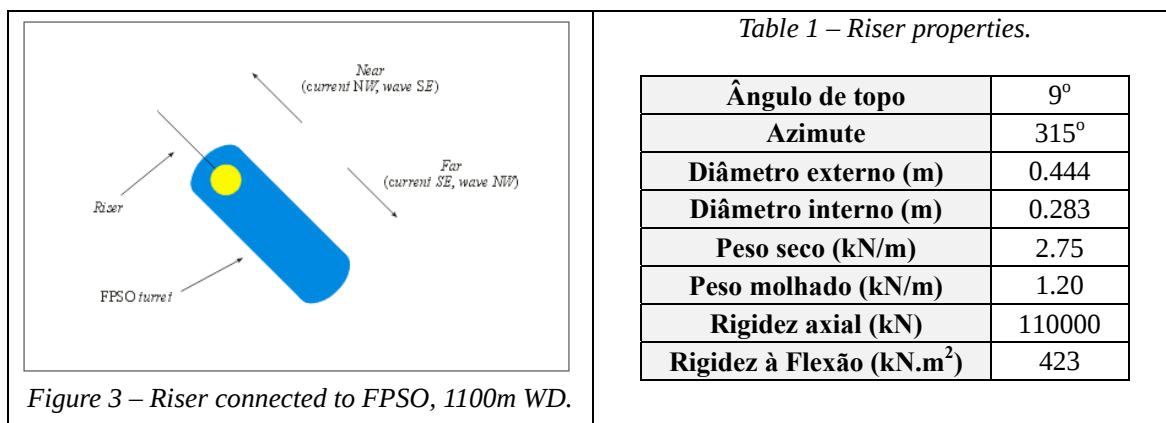


Figure 3 – Riser connected to FPSO, 1100m WD.

Quatro estados de mar distintos foram utilizados nas análises, cada um definido por uma combinação de onda e corrente. Para cada estado de mar foram analisados três *offsets* distintos, e duas sementes foram utilizadas na geração dos sinais de elevação da superfície do mar. Desta forma, 24 estados de mar foram analisados (SOUSA [11]). Para definir as características dos vários estados de mar foi utilizada a distribuição de parâmetros ambientais apresentada em SAGRILO *et al* [10]. As velocidades de corrente na superfície (V_{CS}) e no fundo (V_{CF}) foram consideradas totalmente correlacionadas a H_s (altura significativa da onda). Maiores detalhes sobre os casos analisados podem ser encontrados em SOUSA [11].

Todos os estados de mar foram simulados com um tempo total de 4000s, e janelas de treinamento de 10% deste total foram utilizadas, considerando ainda um *cutoff* de 200s (*cutoff* + janela de

treinamento = 600s). Janelas de treinamento superiores a 10% da série total não implicaram em resultados melhores (SOUSA [11]).

A Tabela 2 apresenta alguns dos resultados obtidos na comparação entre o ANFLEX e a metodologia proposta. Foram selecionados para comparação alguns parâmetros estatísticos dos sinais (média e desvio-padrão) e os valores máximos observados (e seus instantes de ocorrência), bem como os valores extremos mais prováveis para tempestades com 3h de duração, estimados através do procedimento Weibull-Tail (ZURITA [13]). Como pode ser observado, os erros nas estimativas dos parâmetros estatísticos e dos valores máximos observados / extremos foram pequenos. Além disso, em somente 5 dos casos aqui apresentados os instantes de ocorrência dos valores máximos observados não foram estimados corretamente. Entretanto, nestes casos os picos foram todos identificados dentre os quatro mais importantes nas séries estimadas.

Tabela 2 – Resultados da comparação ANFLEX X Metodologia proposta.

<i>Offset</i>	<i>Estado de mar</i>	<i>Seed</i>	<i>Origem</i>	<i>Média (kN)</i>	<i>STDV (kN)</i>	<i>Máximo observado (kN)</i>	<i>T_{Máximo} (s)</i> ¹	<i>Valor extremo (kN)</i> ²
0%	1	1	ANFLEX	2222.67	88.21	2514.12	539.60	2563.27
			PRED	2222.52	86.91	2505.42	539.70	2546.18
0%	1	2	ANFLEX	2222.78	88.28	2535.18	486.50	2583.21
			PRED	2222.35	90.50	2546.19	486.60	2578.01
0%	2	1	ANFLEX	2240.99	129.58	2650.07	1720.30	2753.30
			PRED	2239.41	131.95	2673.50	3669.60	2757.33
0%	2	2	ANFLEX	2241.20	130.29	2731.31	1886.70	2756.22
			PRED	2239.94	131.57	2699.57	1876.20	2760.48
5%	1	1	ANFLEX	2345.60	97.95	2668.58	539.70	2720.65
			PRED	2345.57	96.20	2657.04	539.80	2709.01
5%	1	2	ANFLEX	2345.74	98.09	2695.45	486.60	2750.48
			PRED	2345.25	100.27	2708.75	486.70	2746.03
5%	2	1	ANFLEX	2369.16	143.86	2822.39	1720.50	2943.93
			PRED	2367.45	146.25	2848.96	3669.80	2947.59
5%	2	2	ANFLEX	2369.29	144.59	2907.23	1886.90	2943.58
			PRED	2367.52	146.47	2882.68	1876.30	2957.11
10%	1	1	ANFLEX	2495.58	110.33	2852.58	539.90	2923.93
			PRED	2495.70	107.65	2840.14	540.00	2907.26
10%	1	2	ANFLEX	2495.85	110.54	2892.40	486.80	2954.82
			PRED	2495.29	112.62	2912.76	486.80	2951.73
10%	2	1	ANFLEX	2524.80	161.75	3038.64	3670.30	3170.91
			PRED	2522.88	163.95	3067.22	3669.90	3175.90
10%	2	2	ANFLEX	2524.82	162.62	3115.68	1887.20	3173.84
			PRED	2522.18	165.33	3109.44	1876.40	3194.36

¹ Instante de ocorrência do pico máximo de tração;
² Valor extremo mais provável, estimado pelo procedimento *Weibull-Tail* (Zurita [12]).

Finalmente, para concluir a avaliação da metodologia proposta foram feitos testes para verificar se coeficientes obtidos nas análises de um determinado estado de mar poderiam ser utilizados na

estimativa de tração de outros estados de mar. Os resultados deste estudo indicam que somente coeficientes obtidos na análise de estados de mar semelhantes (variando somente a semente para geração dos sinais de elevação da superfície do mar) podem ser intercambiados.

Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia baseada em procedimentos numéricos polinomiais para predição de séries temporais de tração no topo de *risers*. Segundo a metodologia proposta, somente uma pequena parcela da análise total precisa ser simulada, com o objetivo de avaliar os coeficientes da função de transferência não-linear que relaciona os movimentos, velocidades e acelerações no ponto de conexão do *riser* à tração. Desta forma, em uma análise aleatória de 3-h, a redução de custos computacionais pode atingir 94%.

Uma possível aplicação desta metodologia é a determinação da resposta do *riser* nas etapas iniciais de projeto. Após a seleção de uma estrutura que atenda aos critérios de avaliação pré-estabelecidos, análises mais detalhadas são realizadas, e assim economiza-se no custo das análises de estruturas que não atenderiam aos critérios desejados. As expressões calibradas podem ser empregadas ainda para representar *risers* ou linhas de ancoragem em análises acopladas simplificadas, reduzindo de forma significativa o custo computacional deste tipo de análise.

A função de transferência não-linear é composta por 30 termos (11 “estáticos” e 19 “dinâmicos”). Os coeficientes dinâmicos variam em função do estado de mar; estados de mar idênticos, gerados a partir de sementes distintas, possuem os mesmos coeficientes.

As próximas etapas do trabalho incluem a avaliação de tração considerando cargas ambientais atuando fora do plano da linha (em andamento), e a avaliação de tensões no topo e no TDP.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Agência Nacional de Petróleo pelo apoio financeiro, através do programa PRH-35.

Referências Bibliográficas

1. AGUIRRE, L.A., RODRIGUES, G.G., JÁCOME, C.R.F., 1998. “Identificação de Sistemas Não-Lineares Utilizando Modelos NARMAX Polinomiais – Uma Revisão e Novos Resultados”. *Controle & Automação*, SBA, vol. 9, nº 2.
2. ANFLEX, 2005. *Análise não Linear de Risers e Linhas de Ancoragem*. Manual de Entrada de Dados, Versão 5.11, PETROBRAS/CENPES e COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
3. CHEN, S., BILLINGS, S.A., LUO, W., 1989. “Orthogonal Least Squares Methods and Their Application to Non-Linear System Identification”. *International Journal of Control*, vol. 50, nº 5, p. 1873-1896.
4. GOBAT, J.I., GROSENBAUGH, M.A., 2001. “A Simple Model for Heave-Induced Dynamic Tension in Catenary Moorings”. *Applied Ocean Research* 23, p. 159-174.

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

5. MATOS, N.A.F., 2005. *Predição de Séries Temporais para Análise Dinâmica de Estruturas Offshore*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
6. MORETIN, P.A., e TOLOI, C.M.C., 2006. *Análise de Séries Temporais*, 2ª Edição, Editora Edgard Blücher.
7. PASCOAL, R., HUANG, S., BARLTROP, N., GUEDES SOARES, C., 2005. "Equivalent Force Model for the Effect of Mooring Systems on the Horizontal Motions". *Applied Ocean Research* 27, p. 165-172.
8. PRESS, W.H., TEUTOLSKY, S.A., VETTERLING, W.T., FLANNERY, B.P., 1992. *Numerical Recipes in Fortran*. Press Syndicate of the University of Cambridge.
9. SAGRILO, L.V.S., SIQUEIRA, M.Q., ELLWANGER, G.B., LIMA, E.C.P., RIBEIRO, E.J.B., LEMOS, C.A.D., 2000. "On the Extreme Response of Heave-Excited Flexible Risers". *Applied Ocean Research* 22, p. 225-239.
10. SAGRILO, L.V.S., LIMA, E.C.P., SOUSA, F.J.M., DANTAS, C.M.S., SIQUEIRA, M.Q., TORRES, A.L.F.L., 2005. "Steel Lazy Wave Riser Design: API-RP-2RD and DNV-OS-F201 Criteria". *Proceedings of the OMAE Conference*, OMAE05/67040, Halkidiki, Greece, June 12-17.
11. SOUSA, F.J.M., 2008. *Modelos Polinomiais Aplicados à Análise de Risers e Linhas de Ancoragem*. Exame de Qualificação de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
12. SOUSA, F.J.M., 2009. "Polynomial Models Applied to the Analysis of Slender Marine Structures". *Proceedings of the OMAE Conference*, OMAE2009/79926, Honolulu, EUA, 31 de Maio a 5 de Junho.
13. ZURITA, B.I., 1999. *Análise Estatística de Valores Extremos de Séries Temporais Gaussianas e Não Gaussianas*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.