

## ANÁLISE DINÂMICA DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO FLUTUANTE DE PETRÓLEO ATRAVÉS DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Jhonny Leonidas Merma Tiquilloca, Hélio Mitio Morishita, Marcelo Godoy Simões

Depto de Engenharia Mecânica – Escola Politécnica da USP  
Av. Prof. Mello Moraes, 2231  
CEP 05508-900 – São Paulo - SP  
e-mail: [jhonnym, hmmorish, mgs]@usp.br

**Resumo.** Neste trabalho descreve-se o desenvolvimento de um simulador para análise do comportamento dinâmico de navios ancorados os assim chamados FPSO (*Floating Production Storage and Offloading System*) através de Redes Neurais Multicamadas. A simulação dos esforços hidrodinâmicos de navios amarrados tem características não lineares que tornam adequada a utilização de redes neurais para sua modelagem. Visando evitar as dificuldades de modelos matemáticos e métodos de identificação tradicionais, propõe-se um modelamento neural para identificar a dinâmica do sistema, permitindo que medições reais sejam incorporadas no sistema final.

**Palavras-Chaves:** Redes Neurais, Navios Ancorados, Simulação Dinâmica, FPSO.

### 1 INTRODUÇÃO

Navios tanque ancorados são utilizados pela indústria do petróleo como Sistemas de Produção Flutuante de Armazenamento e Descarga (*FPSO*). Atualmente a tecnologia *FPSO* é uma nova tendência em unidades de produção flutuantes, como opção às atuais plataformas semi-submersíveis; tal fato ocorre devido ao alto custo desta última e relativamente baixo custo da primeira. A conversão de antigos navios em *FPSO*, com sistemas de amarração tipo *Turret* (Fig. 1), têm-se tornado uma solução interessante não só economicamente como ecologicamente viável, pelo fato de estar-se criando uma reutilização para os antigos petroleiros, resultado do contínuo sucateamento da atual frota mundial.

Como a exploração do petróleo ocorre cada vez mais em águas profundas, a Petrobrás desenvolveu tecnologia própria. Assim as unidades *FPSO* tem sido amplamente utilizadas na costa brasileira. Tal solução é motivada pelo baixo custo sendo a principal vantagem que o mesmo navio armazena o petróleo produzido.

Associado ao sistema é utilizado um navio de transporte em configuração *Tandem* (Fig. 1) para propósito de descarregamento. Quando um navio ancorado é submetido às ações do vento, ondas e correnteza, pode apresentar movimentos indesejáveis os movimentos de baixa frequência,

os que acontecem próximos à frequência natural do sistema de ancoramento, tendem a ter considerável amplitude.

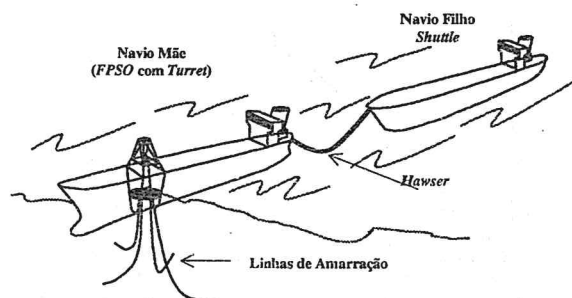


Fig. 1: FPSO com turret e navio Shuttle amarrados em Tandem

### 1.1 Comportamento Dinâmico de Navios Amarrados

Em função das características construtivas, as plataformas semi-submersíveis não apresentam problemas de aproamento em relação ao vento, sendo praticamente insensíveis à ação de ondas. De uma maneira geral, pode-se dizer que as plataformas são estruturas relativamente estáveis quando sujeitas às condições ambientais. Já no caso de navios, qualquer que seja o sistema de amarração dependendo das variáveis envolvidas, tais como porte do navio, condição de calado, direção e intensidade de corrente, vento e ondas, posição do turret, pré-tensão das linhas, pode-se ocorrer comportamento instável com movimentos de baixa frequência e de grande amplitude.

A instabilidade tem como consequência o aparecimento de altos picos de tensão no sistema de amarração. Assim, a predição da estabilidade de navios amarrados é de extrema importância para o projeto do sistema de amarração. Existem várias formas de se fazer a predição do comportamento dinâmico:

- Ensaio de modelos reduzidos em tanque de provas.
- Estudo da estabilidade do sistema, através das equações características.

- Análise do comportamento no domínio da frequência.
- Simulação dinâmica no domínio do tempo.
- Modelamento dinâmico através de Redes Neurais.

## 2 MODELO MATEMÁTICO

É descrito neste ítem a formulação geral do modelo matemático e a dinâmica do movimento de navios amarrados; em seguida, são descritos cada um dos modelos matemáticos das forças ambientais.

### 2.1 Sistema de Coordenadas

Para o estudo dos movimentos do navio adotou-se três sistemas de coordenadas, como ilustra a (Fig. 2). O primeiro **OXYZ**, é fixo à terra. O segundo e o terceiro **Gx<sub>i</sub>xy<sub>i</sub>**, (i=1,2), são solidários à embarcação e seus eixos coincidem com os eixos principais de inércia e a sua origem está localizada no centro de gravidade do navio.

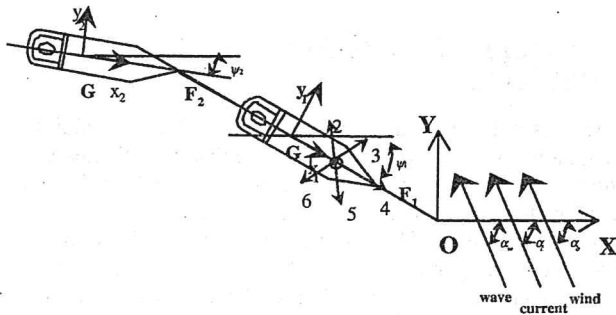


Fig. 2: Sistema de coordenadas

A equação do movimento de cada navio referido ao referencial inercial, e já considerando as forças de reação hidrodinâmicas são dadas por:

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

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

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

Onde:  $m$  é a massa do veículo;  $m_{ii}$ ,  $i = 1, 2, 6$  são, respectivamente, as massa adicionais em avanço, deriva e guinada;  $u_c$  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 derivada em relação ao tempo da variável.

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

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

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

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

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

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

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

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

Onde:  $V_c$  e  $\psi_c$  são a velocidade e direção da corrente, respectivamente.

As forças  $X$  e  $Y$  e momento  $N$  embora dependam do navio podem ser expressadas de uma forma geral através do seguinte conjunto de equações:

$$X = X_{c_i} + X_{v_i} + X_{o_i} + X_{h_i} + X_{t_i} \quad (9)$$

$$Y = Y_{c_i} + Y_{v_i} + Y_{h_i} + Y_{o_i} + Y_{t_i} \quad (10)$$

$$N = N_{c_i} + N_{v_i} + N_{o_i} + Y_{v_i} e_{v_i} + Y_{h_i} e_{h_i} \varepsilon + Y_{t_i} e_{t_i} \quad (11)$$

onde:  $i = 1, 2$ , referem-se, respectivamente aos navios aliviador e FPSO- Turret; os índices  $c$ ,  $v$ ,  $o$ ,  $h$  e  $t$  referem-se, respectivamente, a corrente, vento, onda, *hawser*, *turret*;  $e_{h_i}$ ,  $e_{v_i}$  e  $e_{t_i}$  são respectivamente, as distâncias entre o centro de gravidade e os pontos de aplicação das forças do *hawser*, do vento e o *turret*.

#### 2.1.1 Força da corrente

As forças e momentos hidrodinâmicos segundo Takashina, que atuam no navio foram obtidas a partir de ensaios realizados com modelos cativos, e são dadas por:

$$X_c = \frac{1}{2} \rho L D U^2 (X'_u u' + X'_{vr} v' r') \quad (12)$$

$$Y_c = \frac{1}{2} \rho L D U^2 (Y'_v v' + Y'_{vvv} v'^3 + Y'_{vvvv} v'^5 + Y'_{ur} u' r' + Y'_{ur|r} u' r' |r'| + Y'_{v|r} v' |r'|) \quad (13)$$

$$N_c = \frac{1}{2} \rho L^2 D U^2 (N'_v v' + N'_{uv} u' v' + N'_{uvv} u' v'^3 + N'_r r' + N'_{uv|r} u' v' |r'| + N'_{vvr} v'^2 r') \quad (14)$$

onde:  $u'$  e  $v'$  são as velocidades não dimensionais de avanço, deriva e guinada, respectivamente:

$$u' = \frac{u}{V} \quad (15)$$

$$v' = \frac{v}{V} \quad (16)$$

$$r' = \frac{rL}{V} \quad (17)$$

$$V = (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (18)$$

As forças e momento devido à corrente são levadas em conta no modelo, substituindo as velocidades absolutas de avanço e deriva,  $u$  e  $v$ , nas equações (12, 13 e 14) pelas correspondentes velocidades relativas,  $u_r$  e  $v_r$  do navio em relação ao meio fluido.

#### 2.1.2 Força do vento

As componentes da força do vento atuantes na parte não submersa do casco e na superestrutura do navio são calculadas através das fórmulas:

$$X_v = \frac{1}{2} \rho_a C v_x (\psi_{vr}) \{A_t + (H - D)B\} V_{vr}^2 \quad (19)$$

$$Y_v = \frac{1}{2} \rho_a C v_y (\psi_{vr}) \{A_t + (H - D)L\} V_{vr}^2 \quad (20)$$

$$N_v = \frac{1}{2} \rho_a C_{v_z} (\psi_{vr}) \{A_t + (H - D)L\} LV_{vr}^2 - F_v(2)x_v \quad (21)$$

onde  $A_t$  : área transversal da super-estrutura;  $A_l$  é a área longitudinal da super-estrutura;  $H$  é o pontal;  $D$  calado;  $L$  é o comprimento do navio

### 2.1.3 Força da onda

Foram consideradas parcelas de deriva média e deriva lenta da força da onda

### 2.1.4 Força de deriva média de ondas

A força de deriva média, depende da incidência da onda, e é obtida para um dado espectro, a partir da seguinte expressão:

$$F_{dm1}(x_1) = 2 \int_0^{\infty} S(\omega) x_{dm}(x, \omega) d\omega \quad (22)$$

$$F_{dm2}(x_1) = 2 \int_0^{\infty} S(\omega) y_{dm}(x, \omega) d\omega \quad (23)$$

$$F_{dm6}(x_1) = 2 \int_0^{\infty} S(\omega) n_{dm}(x, \omega) d\omega \quad (24)$$

$x$  é a direção de incidência da onda;  $\omega$  é a frequência da onda harmonica

### 2.1.5 Força de deriva lenta de onda

Para cada incidência de onda os espectros de forças de deriva lenta podem ser obtidos pelo cruzamento espectral já conhecido:

$$Sx_i(x, u) = 8 \int_0^{\infty} S(\omega) S(\omega + \mu) \left[ F_{dmi} \left( x, \omega + \frac{\mu}{2} \right) \right]^2 d\omega \quad (25)$$

onde:  $\mu = \omega_1 - \omega_2$  frequência diferença.

$$F_{dmi}(x, t) = \sum_0^{\infty} Cn_i(x, \mu) \cos(\mu t + \phi) \quad (26)$$

onde :

$$Cn_i(x, \mu) = \sqrt{2S_{xi}(x, \mu)\Delta\mu} \quad \text{para } i = 1, 2, 6$$

$$\Delta\mu = \mu_1 - \mu_2$$

$\phi$  = fase aleatória ( $0 \sim 2\pi$ ) gerada numericamente.

### 2.1.6 Força no Turret

O turret é posicionado através de linhas de ancoragem e foi modelada como uma mola, e as forças  $X_i$  e  $Y_i$  são calculadas por:

$$X_i = K_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\omega) \quad (27)$$

$$Y_i = K_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin(\omega) \quad (28)$$

$$\omega = -\pi + a \tan 2(y_T, x_T) - \psi \quad (29)$$

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

### 2.1.7 Força no 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 é dada por:

$$\Delta x_H = \frac{F_H}{E.A} + \frac{F_H}{w} \left[ a \operatorname{sen} \left( \frac{w.L_h / 2}{F_H} \right) \right] \quad (30)$$

$$\Delta x_H = \frac{1}{2} \left( \sqrt{(x_{H,1} - x_{H,2})^2 + (y_{H,1} - y_{H,2})^2} \right) \quad (31)$$

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 de mãe e da proa do navio filho.

## 3 MODELAGEM BASEADA EM REDES NEURAIS

Os métodos clássicos para simulações de veículos oceânicos são baseados em modelos matemáticos cujos coeficientes são obtidos através de ensaios com modelos em escala reduzida. Esse procedimento nem sempre consegue reproduzir toda a dinâmica do sistema, já a o modelamento mediante redes neurais consegue, através da observação das principais variáveis, identificar e reproduzir a dinâmica do sistema, por mais complexa que ela seja.

Como a utilização de modelagem matemática clássica é difícil de se aplicar em um sistema real, uma metodologia baseada em redes neurais [23] facilita a utilização de medições reais.

### 3.1 Modelagem E Identificação

Os modelos hidrodinâmicos são tipicamente não lineares e devem ser linearizados. Com isso sua eficácia é restrita a uma pequena faixa de operação.

O modelo apresentado neste artigo identifica características estruturais de modelos de sistemas reais, isto inclui a identificação do modelo da estrutura na forma de equações diferenciais lineares e não lineares.

Como este sistema dinâmico tem comportamento temporal, as saídas com retardo de tempo são realimentadas, isto é necessário para modelar apropriadamente o sistema e incorporar a dinâmica como mostra a Fig. 3.

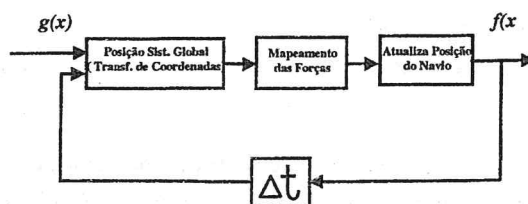


Fig.3 : Modelamento do Simulador Neural

A posição global do navio é estimada através de uma rede neural, que desenvolve a transformação de coordenadas do sistema local para o sistema inercial, conforme mostra a Fig. 4.

A rede tem como entrada a posição atual do navio no sistema global, e tem como saída os dados para o cálculo das forças que interagem com o mesmo.

Como as forças presentes no sistema estão ligadas internamente à posição do navio, seu cálculo será feito de duas formas distintas. A primeira forma de cálculo aplica-se para as forças com características lineares, cujos resultados são obtidos através de simples produtos algébricos, não sendo necessário a utilização de redes neurais. Estas forças são:  $F_i$  força inercial,  $F_v$  força do vento, A segunda forma para o caso das forças não lineares,  $F_o$  força da onda,  $F_{dl}$  força de deriva lenta,  $F_{dm}$  força de deriva média,  $F_{turret}$  força do *turret*  $F_{wd}$  força de amortecimento por deriva de onda. Neste segundo caso as redes neurais mostram sua grande vantagem.

As forças atuantes no sistema são simuladas conforme à rede neural estruturada na Fig. 4.

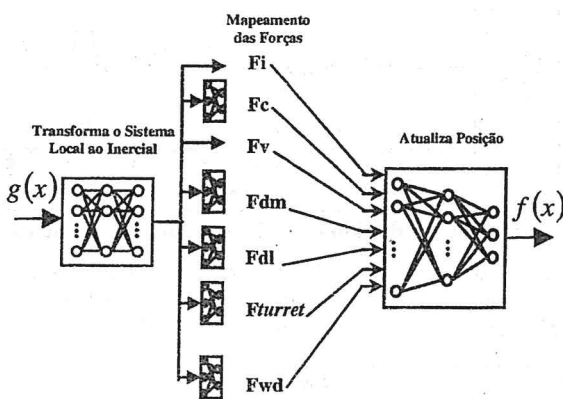


Fig. 4: Forças atuantes no simulador neural

O simulador pode ser definido como segue.

Entrada:  $g(x)$ ; C : Condições ambientais (vento, correnteza e ondas);  $f(x + \Delta t)$  : Deslocamento do navio

$$g(x) = [f(x + \Delta t), C] \quad (32)$$

Saída:  $f(x)$  : Deslocamento do navio.

$$f(x) = (x_1, x_2, x_6) \quad (33)$$

### 3.2 Operação do Simulador

A combinação de três redes neurais é usada no modelamento seguindo a configuração mostrada na Fig. 3. Tornando possível a variação livre dos parâmetros *feed-forward* e *feedback* do sistema de acordo ao estado do navio, tomando em conta as características não lineares das forças hidrodinâmicas em cada estágio, deste modo as redes neurais adquirem o conhecimento necessário para o modelamento através de aprendizado repetitivo pelo método de *back-propagation*.

A identificação do sistema começa no navio mãe, com a aquisição dos dados de entrada  $g(x)$  (condições ambientais e deslocamento inicial do navio), isto é realizado pela *rede neural I*, como mostra a Fig. 5, fornecendo na saída os esforços nas linhas de amarração (*turret*). Com as forças calculadas pela *rede neural I*, o modelo atualiza a nova posição do navio, tendo em consideração o esforço produzido no *hawser*, através da

*rede neural II*, o novo deslocamento do navio é realimentado com um retardo de tempo na *rede neural I*, fornecendo dinâmica ao sistema navio mãe.

No caso do navio filho (*shuttle*), existe uma dependência do deslocamento inicial do navio mãe, pelo que precisaremos realizar a transformação de coordenadas do sistema local do FPSO (origem no centro de gravidade do navio mãe), para o sistema local (origem no centro de gravidade do navio filho), o que é desenvolvido pela *rede neural III*.

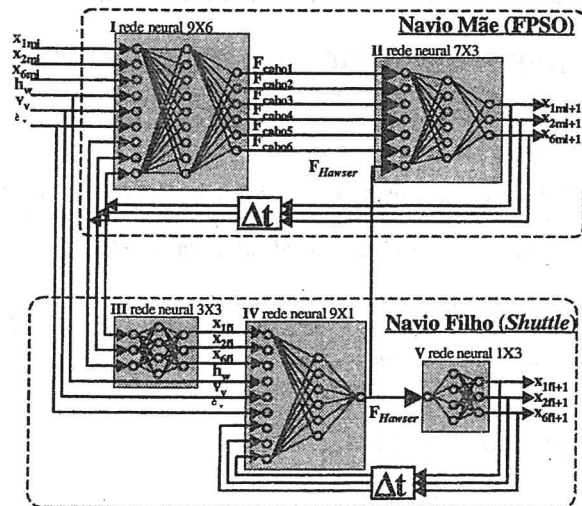


Fig. 5: Configuração para a estimativa dos esforços nas linhas de amarração.

Com os novos deslocamentos, já no sistema local (navio filho) e em conjunto com as condições ambientais a *rede neural IV*, realiza o cálculo do esforço no *hawser*. Por último a *rede neural V*, encarrega-se de produzir o próximo deslocamento do navio filho.

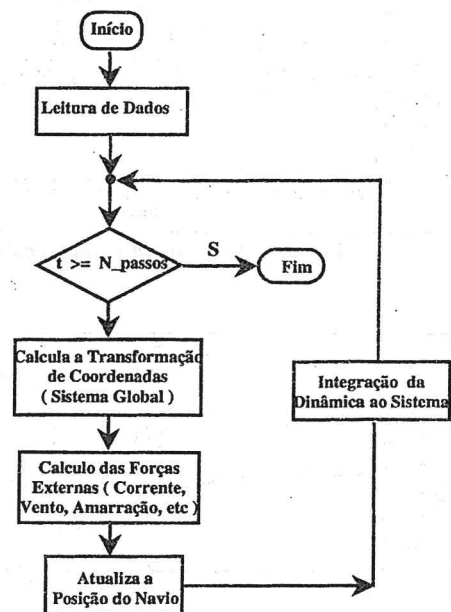


Fig. 6: Fluxograma da simulação

No sentido de outorgar uma dinâmica ao sistema a nova posição do navio é realimentada com um retardo de tempo. Deste modo o processo continua até atingir o número de passos fixado no começo da simulação como mostra o fluxograma da Fig. 6.

A implementação do código fonte do simulador das redes neurais foi escrito em linguagem C++ standard, para sua maior portabilidade. A plataforma de desenvolvimento do simulador esta baseada em computadores PC, e o treinamento das redes foi realizado em um processador *Pentium 266 MHz*.

#### 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

No sentido de examinar a validade do modelamento proposto, a simulação é feita usando dados que não foram utilizados no aprendizado.

Os resultados da simulação são comparados com os dados originais e os gerados pelas redes neurais. Além disso é apresentado o erro produzido na identificação do sistema

Para a estimação do esforços nas linhas de amarração através do simulador, considerou-se os seguintes dados para os navios em configuração *Tandem*:

Navio mãe (*FPSO*)

Comprimento L=320 m  
 Calado C=7 m  
 Boca B=54 m.  
 Pontal P=27 m  
 Turret com 6 linhas de ancoragem

Navio filho (*Shuttle*)

Comprimento L=250 m  
 Calado C=11.8 m  
 Boca B=39.4 m.  
 Pontal P=22.5 m

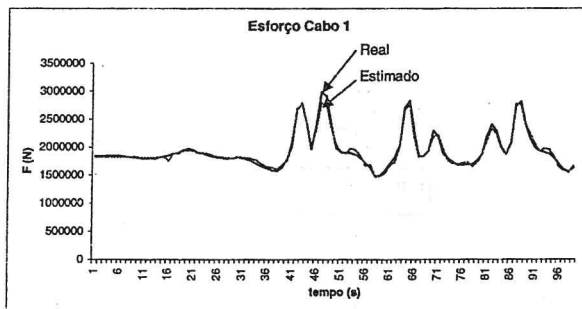


Fig. 7: Esforço produzido no cabo 1

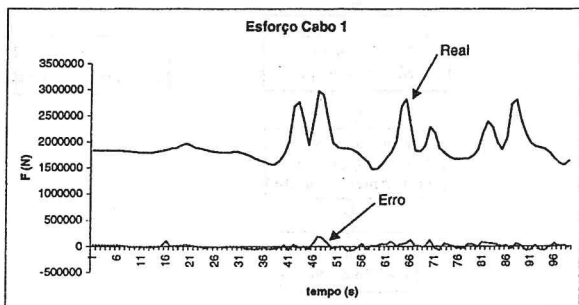


Fig. 8: Erro produzido na estimação do esforço no cabo 1

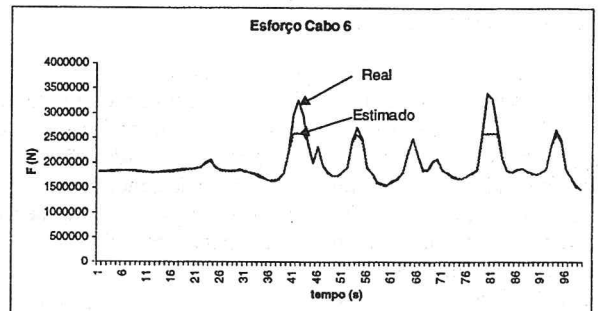


Fig. 9: Saída real e estimada dos esforços no cabo 6

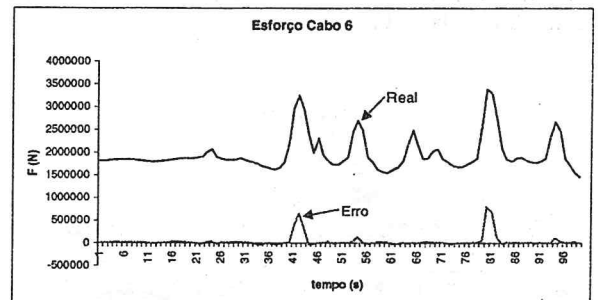


Fig. 10: Erro e produzido na estimação do esforço no cabo 6

No caso do cabo de ligação entre os dois navios (*Hawser*) o erro produzido na estimação foi considerável devido ao acoplamento entre os dois navios

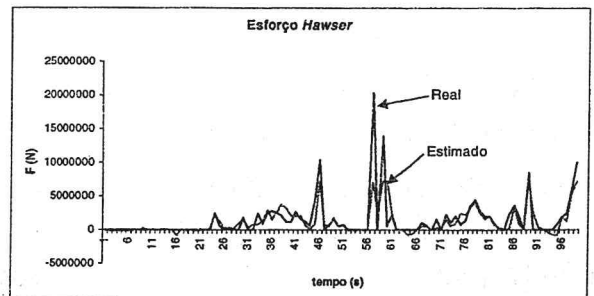


Fig. 11: Esforço produzido no cabo de ligação (*Hawser*)

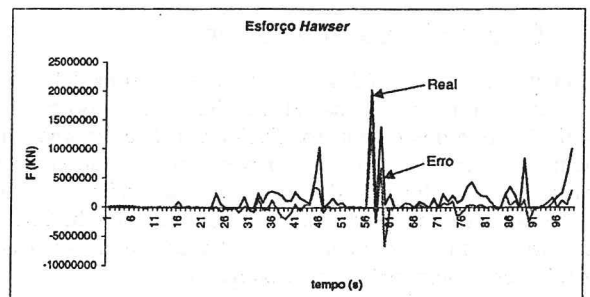


Fig. 12: Erro produzido na estimação do esforço no *Hawser*

## 5 CONCLUSÕES

Esse artigo monstro uma metodologia de modelagem de esforços de navios ancorados, utilizados em exploração de petróleo (FPSO), usando redes neurais artificiais.

Embora exista um modelo matemático, ele é muito complexo, por necessitar de parâmetros hidrodinâmicos provenientes de ensaios em escala reduzida. Além disso a dinâmica do FPSO é válida apenas em um modelo linearizado ao redor do ponto de equilíbrio. Uma rede neural permite a utilização de dados reais, a independência de parâmetros hidrodinâmicos e a validade da simulação em uma ampla faixa de operação.

Os resultados obtidos com o modelamento através redes neurais artificiais concordam com os dados experimentais mostrando a capacidade das redes neurais para modelar sistemas que variam no tempo com alta precisão e confiável resposta dinâmica.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte recebido da FINEP – RECOPE para esse projeto e do CNPq pelas bolsas concedidas. Reconhecemos também o valioso auxílio de Petronio Vieira Jr. e Sílvio Szafir.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- K. Nishimoto, Hernani L. Brinati, Carlos H. Fucatu, 1996, "Dynamic Analysis of FPSO with a Tandem Offloading System", Offshore Mechanics And Arctic Engineering", OMAE 1996.
- Takashina, J. 1986, "Ship Maneuvering Motion due to Tug Boats and its Mathematical Model", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, vol. 160, Dec.
- Morishita, H. M. e Cornet, B. J. J. 1998, "Dynamics of a Turret-FPSO and Shuttle Vessel due to Current", IFAC CONFERENCE, FUKUOKA, 1998.
- K. S. Narendra and K. Parthasarathy, "Identification And Control of Dynamical Systems Using Neural Networks", Transactions on Neural Networks, 1990.
- R. Lanzafame, G Santangelo, 1997, "A Neural Logic Program as a New Method For The Development of Fluids Thermodynamic Properties", Applied Modelling and Simulation, IASTED, 1997.
- Abo-Shosha, M. Ashour, nad F. Mohamed, 1997, "Building I/O Neural Simulator of Nuclear Power Reactor", Applied Modelling and Simulation, IASTED, 1997.
- Toshiari Shiotsuka, Akio Nagamatsu, Kazuo Yoshida and Mitsuru Nagaoka, "Active Control of Drive Motion of Four Wheel Steering Car with Neural Network", Concepts in Vehicle Dynamics and Simulation, SAE, 1994.
- Lefteri H. Tsoukalas, Robert E. Uhrig, "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering", 1997.
- Kevin Swingler, "Applying Neural Networks a Practical Guide", 1996.