

## POSICIONAMENTO DINÂMICO DE PLATAFORMAS PETROLÍFERAS FLUTUANTES COM O USO DE LÓGICA NEBULOSA

Márcio Yamamoto<sup>1</sup>, Celso K. Morooka<sup>2</sup>, Ivan R. Guilherme<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP/FEM/DEP – Caixa Postal 6122  
CEP13083-970 – Campinas – SP/Brasil, [marcioy@dep.fem.unicamp.br](mailto:marcioy@dep.fem.unicamp.br)

<sup>2</sup> Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP/FEM/DEP – Caixa Postal 6122  
CEP13083-970 – Campinas – SP/Brasil, [morooka@dep.fem.unicamp.br](mailto:morooka@dep.fem.unicamp.br)

<sup>3</sup> Universidade Estadual Paulista, UNESP/DEMAC/IGCE  
Rio Claro – SP/Brasil, [ivan@rc.unesp.br](mailto:ivan@rc.unesp.br)

**Resumo** – Este trabalho visa o estudo de diferentes técnicas de controle possíveis de aplicação em Sistemas de Posicionamento Dinâmico (DPS) de embarcações flutuantes, comparando o controlador clássico Proporcional-Integral-Derivativo (PID) com o controlador nebuloso. Para isso foi necessária adotar um modelo matemático para a dinâmica da embarcação, bem como para as forças ambientais (vento, correnteza e ondas) que atuam sobre ela. Com base neste estudo foi implementado um simulador numérico de DPS, no domínio do tempo, para realizar o comparativo dos diferentes controladores aplicados.

Palavras-Chave: Perfuração de poços marítimos, Sistema de Posicionamento Dinâmico, Controle Nebuloso.

**Abstract** – This paper aims to study different control techniques, applied in Dynamic Positioning System (DPS) of vessels, comparing the Proportional-Integral-Derivative (PID) controller with Fuzzy controller. For this it was necessary to adopt a mathematical model to the vessel's dynamics, as well as for the environment forces (wind, current and waves) that they act on it. With base in this study a numerical simulator of DPS was implemented, in the time domain, to carry through the comparative degree of the different applied controllers.

Keywords: Drilling of offshore wells, Dynamic Positioning System, fuzzy controller.

## 1. Introdução

Para as operações marítimas de Exploração & Produção de óleo e gás, em lâminas d'água superiores a 300m, em geral se faz necessário o uso de plataformas flutuantes de perfuração do tipo navio ou plataforma flutuante semi-submersível. Para que estas embarcações realizem suas tarefas de prospecção no mar é necessário que a embarcação tenha a capacidade de se posicionar, ou seja, de se manter estacionária sobre um certo ponto desejado. É necessário para isso que ela seja dotada de equipamentos que produzam forças que se contraponham as forças ambientais (vento, correntes e ondas) atuantes sobre a sonda flutuante de perfuração.

No caso mais comum e em lâminas d'água de até cerca de 1000m, normalmente se faz uso de âncoras. Utiliza-se um sistema de ancoragem múltipla, com 8 a 12 linhas de âncoras em uma mesma embarcação. No entanto, operando em águas cada vez mais profundas, a utilização de âncoras passa a exigir equipamentos cada vez mais pesados e, para o seu manuseio, de barcos cada vez mais potentes, até que se torne antieconômico ou impraticável o seu uso.

Assim surgiu a necessidade de independência em relação à profundidade da lâmina d'água, dada pelo Sistema de Posicionamento Dinâmico (DPS), onde um controlador (computador), recebe informações de posicionamento da embarcação e dos parâmetros ambientais (ventos, correntes e ondas), provenientes de sensores. O controlador comanda a ação dos propulsores instalados no casco da embarcação, que geram forças e momentos para contrabalançar as forças ambientais de forma manter a embarcação estável, sobre a locação. Um DPS, de maneira geral, é constituído, portanto, por um sistema de sensores (posicionamento e parâmetros ambientais), um controlador, um sistema de propulsão e um sistema de geração de potência. Mas seria impraticável manter uma embarcação totalmente estacionária sobre a locação, por isso o controlador mantém a embarcação dentro de um raio de tolerância no plano horizontal. Este raio de tolerância, em geral em torno de 3% a 6% da lâmina d'água, varia em função dos equipamentos da superfície, da operação a ser executada e da lâmina d'água de operação. Este deslocamento horizontal é denominado *offset*.

Neste trabalho, inicialmente, pretendemos implementar um simulador numérico para apenas 1 grau de liberdade da plataforma, mais precisamente na direção do movimento de deriva (*sway*) da plataforma, a fim de comparar o DPS equipado com controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) com o DPS equipado com controle nebuloso. Os diferentes DPS serão submetidos às mesmas condições ambientais a fim de se verificar o desempenho de cada um dos controladores.

## 2. Modelagem Matemática da Plataforma Flutuante

Nesta seção será apresentada a modelagem matemática utilizada neste trabalho.

### 2.1. Equação do Movimento

Uma plataforma flutuante pode ser modelada como um sistema massa-mola-amortecedor não-linear, e neste trabalho foi utilizada a equação integral-diferencial de Cummins (1962).

$$(M + m)\ddot{x} + \int_{-\infty}^{\infty} K(t - \tau) \cdot \dot{x}(\tau) d\tau + B \cdot |\dot{x}| \cdot \dot{x} + c \cdot x = F \quad (1)$$

Onde:

M: massa;

m: massa adicional constante independente da frequência;

K(t): função de memória;

B: coeficiente de amortecimento viscoso;

c: restauração hidrostática;

x,  $\dot{x}$ ,  $\ddot{x}$ : posição, velocidade e aceleração, respectivamente;

F: somatório das forças agindo sobre a embarcação.

A massa adicional constante e a função de memória vêm das Equações 2 e 3, respectivamente.

$$m = a(\omega) + \frac{1}{\omega} \cdot \text{Im} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau) \cdot e^{i\omega\tau} d\tau \right] \quad (2)$$

$$K(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} b(\omega) \cdot e^{-i\omega t} d\omega \quad (3)$$

Onde:

a( $\omega$ ): massa adicional em função da frequência;

$b(\omega)$ : coeficiente de amortecimento potencial em função da frequência;  
 m: massa adicional constante independente da frequência;  
 K(t): função de memória;  
 i: unidade imaginária.

## 2.2. Esforços de Onda

Os esforços devido à ação de ondas, no domínio do tempo, podem ser modelados pelos dois primeiros termos da série de Volterra, como propôs Dalzell (1976). Onde a primeira parcela da Equação 4 representa os esforços lineares de primeira ordem, proporcionais a amplitude de onda, e a segunda parcela representa os esforços não-lineares, proporcionais ao quadrado da amplitude de onda.

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau) \cdot \zeta(t - \tau) d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_2(\tau_1, \tau_2) \cdot \zeta(t - \tau_1) \cdot \zeta(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \quad (4)$$

Onde:

$h_1(t)$ : função resposta ao impulso de primeira ordem;

$h_2(t)$ : função resposta ao impulso de segunda ordem;

$\zeta(t)$ : amplitude de onda.

Apesar de utilizarmos neste trabalho um computador do tipo PC equipado com Pentium 4 de 1,7GHz e 512Mbyte de memória RAM para processar esta simulação, a tempo de processamento era cerca de 5 horas, devido principalmente à integral dupla da Equação 4. Para melhorar este desempenho foi adotado a aproximação proposta por Newman (1974).

$$F(t) = \sum_{j=1}^N \zeta_j \cdot |H_1(\omega_j)| \cdot \text{sen}(\omega_j \cdot t + \phi_1(\omega_j)) + 2 \cdot \left( \sum_{j=1}^N \zeta_j \cdot \sqrt{H_2(\omega_j, \omega_j)} \cdot \cos(\omega_j \cdot t + \phi_2(\omega_j, \omega_j)) \right)^2 \quad (5)$$

Onde:

$H_1(\omega)$ : função de transferência de primeira ordem;

$H_2(\omega_i, \omega_k)$ : função de transferência de segunda ordem;

$\phi_1(\omega)$ : fase da função de transferência de primeira ordem;

$\phi_2(\omega_i, \omega_k)$ : fase da função de transferência de segunda ordem;

$\zeta_j$ : amplitude da i-ésima onda.

Nesta aproximação assumimos que uma onda irregular é composta pela superposição de várias ondas regulares como mostra a equação 6.

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^N \zeta_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \varepsilon_i) \quad (6)$$

Onde:

$\zeta_i$ : amplitude da i-ésima onda;

$\omega_i$ : frequência da i-ésima onda;

$\varepsilon_i$ : fase aleatória da i-ésima onda.

O uso da aproximação de Newman (1974) melhorou em muito o desempenho, reduzindo o tempo de processamento para cerca de 10 minutos.

## 2.3. Esforços de Vento e Correnteza

A equação 7 mostra os esforços devido à ação do vento e da correnteza, e foram modelados seguindo a teoria da força de arrasto.

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C \cdot A \cdot |V - \dot{x}| \cdot (V - \dot{x}) \quad (7)$$

Onde:

$\rho$ : densidade do ar/água;

C: coeficiente de arrasto;

A: área projetada do elemento;

V: velocidade do vento/partícula fluída;

$\dot{x}$ : velocidade da embarcação.

Para se determinar o coeficiente de arrasto, a plataforma foi discretizada em 176 painéis, e para os painéis de forma cilíndrica foi dado um coeficiente de arrasto de 0,5, e para os painéis planos foi dado um coeficiente de arrasto de 1,0.

#### 2.4. Sistema Propulsor

Podemos modelar os propulsores como sendo um sistema de 1ª Ordem, conforme Lopes (1990). Na Equação 8 temos o empuxo no domínio Laplaciano.

$$E(s) = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad (8)$$

Onde:

E(s): Empuxo no domínio Laplaciano;

$\tau$  : Constante de tempo do propulsor;

s: Operador Laplaciano.

### 3. Sistema de Posicionamento Dinâmico

O posicionamento dinâmico de uma embarcação é um problema de controle, onde devemos manter um ou mais parâmetros estáveis, ou pelo menos dentro de uma faixa de tolerância. O parâmetro, neste caso, se trata da posição da embarcação.

#### 3.1. Controle Proporcional-Integral-Derivativo

O controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID), é uma técnica de controle clássica, onde o sinal de erro  $e(t)$  é geralmente obtido da subtração entre o sinal de referência e o sinal de realimentação.

O controlador PID fornece um termo proporcional, um termo de integração e um termo derivativo ao processo, conforme mostra a Equação 9.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) \cdot dt + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

Onde:

$K_p$ : ganho proporcional;

$K_i$ : ganho integral;

$K_D$ : ganho derivativo.

Na Figura 1 temos o diagrama de blocos do controlador PID.

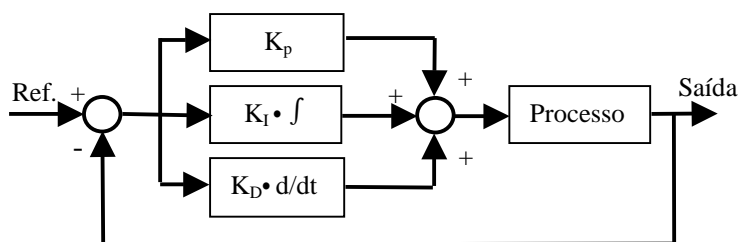


Figura 1: Diagrama de bloco de um sistema com controlador PID.

Neste trabalho o controlador PID foi sintonizado utilizando o Método de Ciclo Máximo (Ultimate) de Ziegler-Nichols, conforme descrito em Bolton (1995).

#### 3.2. Controle Nebuloso

O controlador nebuloso utiliza-se de regras lógicas no algoritmo de controle, com a intenção de descrever em uma rotina, a experiência humana, intuição e heurística empregadas no controle de um processo. Ao contrário dos controladores convencionais que utilizam algoritmos de controle descritos analiticamente através de equações algébricas ou diferenciais, do modelo matemático do processo a ser controlado.

O controlador nebuloso, veja Figura 2, é composto basicamente por uma interface de “fuzzificação”, que transforma, utilizando variáveis linguísticas nebulosas, as entradas do sistema do domínio real para o domínio nebuloso. Na Base de Regras Nebulosas é onde estão depositadas todo o conhecimento utilizado para se controlar o sistema. O processo de inferência nebuloso é feito utilizando as variáveis linguísticas e as regras armazenadas na Base de Regras. E

as saídas nebulosas resultantes do processo de inferência retornam ao domínio real através da interface de “desfuzzificação”.

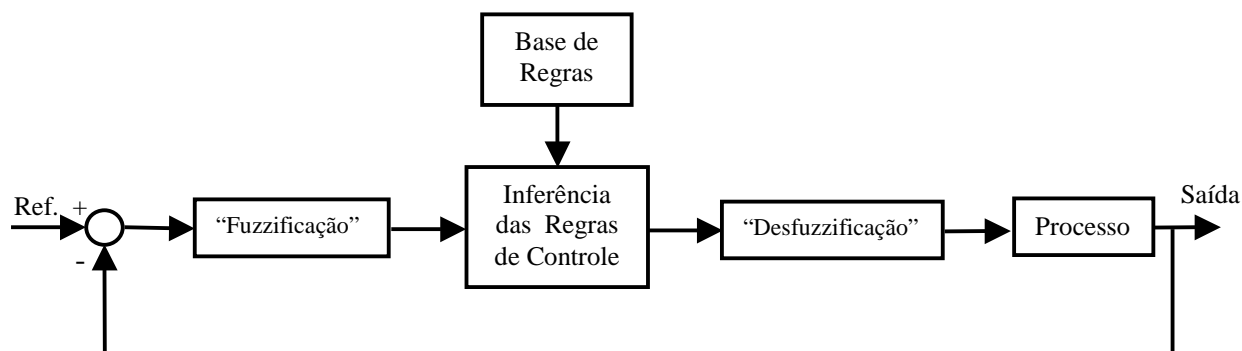


Figura 2: Diagrama de blocos de um sistema com controlador nebuloso.

As regras utilizadas são do tipo:

$$R_i : \text{Se } \langle x = A_i \rangle \text{ E } \langle y = B_i \rangle \text{ então } \langle z = C_i \rangle \quad (10)$$

Onde:

$R_i$  : i-ésima regra da Base de Regras;

x, y e z: são variáveis lingüísticas nebulosas;

$A_i$ ,  $B_i$  e  $C_i$  : são termos lingüísticos nebulosos associados as variáveis lingüísticas x, y e z, respectivamente.

Neste trabalho consideramos o operador lógico E o mínimo entre os valores das funções de pertinência, dos dois termos associado ao operador,  $\min(\mu_x(a), \mu_y(b))$ ;

A função de implicação utilizada é a proposta em Mamdani (1975), correspondendo a função mínimo. O método de “desfuzzificação” empregado neste trabalho foi o Método do Centro-de-Gravidade, descrito em Simões e Shaw (1999).

#### 4. Resultados Iniciais

Para obtenção destes resultados iniciais, foi utilizada como modelo a plataforma semi-submersível para estudos comparativos da *Internartional Towing Tank Conference* (ITTC), a mesma plataforma utilizada por Vardaro (1991). Foi considerada uma lâmina d’água de 1000m, uma correnteza de 0,86m/s e a incidência de uma onda regular de 3m de altura com período igual a 9,0s. Num primeiro momento, foi modelado o mesmo sistema de amarração utilizado por Vardaro (1991) a fim de validar o simulador.

Na Figura 3 (a), estão apresentados os resultados da primeira simulação, onde a plataforma está sob a ação de uma correnteza de 0,86m/s. Foram avaliados os casos em que a plataforma está simplesmente ancorada (Ancoragem), com DPS equipado com controlador PID e dois DPS equipados com controladores nebulosos distintos, no primeiro controlador nebuloso denominado de “FUZZY”, são avaliadas a posição e a velocidade da plataforma, e no segundo controlador fuzzy, denominado de “FUZZY\_Cor” são avaliados a posição da plataforma e a o quadrado da velocidade da correnteza.

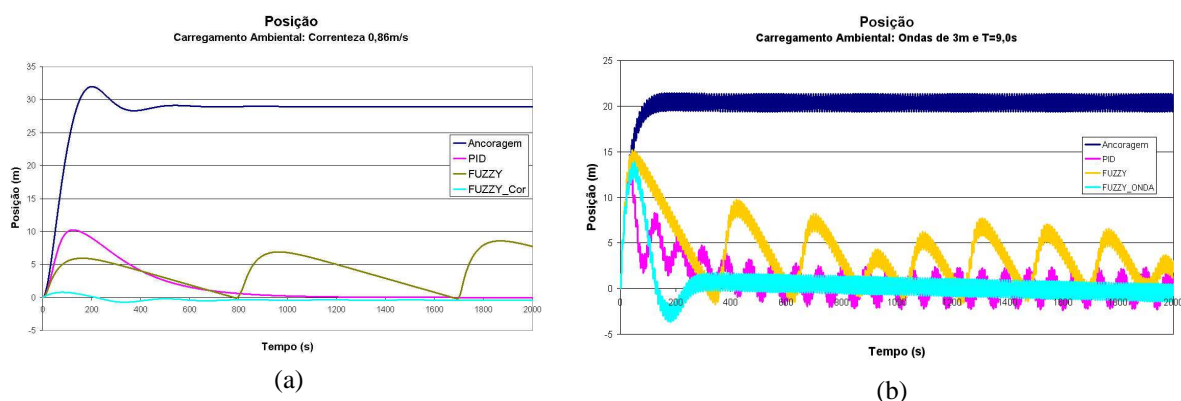


Figura 3: Gráfico da posição na direção de deriva, comparação entre a plataforma simplesmente ancorada, e a plataforma equipada com diferentes controladores DPS.

Na Figura 3(b) estão apresentados os resultados da segunda simulação sob a ação de ondas regulares de 3m de altura e período de 9,0s. Foram avaliados os casos em que a plataforma está simplesmente ancorada (Ancoragem), com DPS equipado com controlador PID e dois DPS equipados com controladores nebulosos distintos, no primeiro controlador nebuloso denominado de “FUZZY”, são avaliadas a posição e a velocidade da plataforma, e no segundo controlador fuzzy, denominado de “FUZZY\_ONDA” são avaliados a posição da plataforma e a altura da onda.

Como podemos observar na Figura 3(a), o controlador “FUZZY\_Cor” apresenta um ótimo desempenho, e o controlador “FUZZY” apresenta uma característica pulsante, possivelmente, por não considerar o termo integral, como faz o controle PID. O controlador PID apresenta um bom desempenho, convergindo para zero. E o sistema simplesmente ancorado (sem posicionamento dinâmico) apresenta um desempenho satisfatório, mantendo a posição a cerca de 30m da referência, conforme projeto original do sistema de amarração da plataforma.

Na Figura 3(b), o controlador “FUZZY\_ONDA” apresenta um ótimo desempenho, e o controlador “FUZZY” continua apresentando uma característica pulsante por não avaliar o termo integral. Neste caso o controlador PID apresentou um bom desempenho, mas com um movimento harmônico com frequência menor do que a frequência de excitação. O sistema ancorado apresentou um desempenho satisfatório, mantendo a plataforma em cerca de 20m da origem.

## 5. Conclusões

O controlador PID possui um algoritmo bem simples e um bom desempenho, mas apresenta uma certa dificuldade em sintonizar o controlador, ou seja, determinar os 3 ganhos do controlador, e para isso é necessário modelar matematicamente o sistema e linearizar em torno do ponto de operação.

Já no controlador nebuloso não é necessário modelar o sistema, o controlador é sintonizado baseado no conhecimento de um especialista em manobrar a plataforma.

## 6. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e a ANP – Agência Nacional do Petróleo, pelo apoio a este trabalho de pesquisa.

## Referências

- Aalbers, A. B.; Nienhuis, U. Recent Developments in Simulation and Real Time Control of Dynamic Positioning and tracking, *Hydrodynamics: Computations, Model Tests and Reality*, Elsevier Science Publishers B. V., 345-354, 1992.
- Bolton, W. *Engenharia de Controle*, Makron Books, São Paulo, 1995.
- Chakrabarti, S.K. *Hydrodynamics of Offshore Structures*, Computational Mechanics Publication, 1987.
- Cummins, W. E. The Impulse Response Function and Ship Motions, *Schiffstechnik*, vol. 47, n. 9, 1962.
- Dalzell, J. F. Application of the Functional Polynomial Model to the Ship Added Resistance Problem, *11<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics, University College, Londres*, 1976.
- DONHA, D. C. Design of Dynamic Semisubmersible Platform Positioning Control System, 22nd Annual OTC. OTC 6257, Houston, 1990.
- Inoue, Y.; Du, J. An Application of Fuzzy Control Theory in Dynamic Positioning System, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 174, 389-396, 1993.
- MAMDANI, E. H.; ASSOLIAN S. (1975). “An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller”. *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 7, N. 1, pp 1-13.
- MORGAN, M. J. *Dynamic Positioning of Offshore Vessels*, PPC Books Division, The Petroleum Publishing Co, 1978.
- MOROOKA, C. K.; DO AMARAL, W. C.; LOPES, C. A. Dynamic Positioning of Horizontal Motion of a Drilling Vessel during Heading Changes, *OMAE 1991*, Offshore Technology, Volume I-B, 679-686, 1991.
- NEWMAN, J. N. Second-order, Slowly-varying Forces on Vessels in Irregular Waves. In Proc. International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, ed. R. E. D. Bishop and W. G. Price, pp. 182-186, Mechanical Engineering Publications Ltd., London, 1974.
- PINKSTER, J. A.; NIENHUIS, U. Dynamic Positioning of Large Tankers at Sea, *18<sup>th</sup> Annual OTC*, OTC 5208, Houston, 1986.
- SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. Controle e Modelagem Fuzzy, Editora Edgard Blücher Ltda. e FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, São Paulo, 1999.
- TANNURI, E. A.; PESCE, C. P.; DONHA, D. C. Assisted Dynamic Positioning System for a FPSO Based on Minimization of a Cost Function, Biblioteca de Engenharia Mecânica, Naval e Oceânica – EPMN.
- VARDARO, E.; MOROOKA, C. K. Simulations of Horizontal Motions of a Floating Platform Under Ocean Waves, Wind and Current, *International Offshore Engineering*, 9<sup>th</sup> International Symposium on Offshore Engineering, John Wiley & Sons, 57-71, Rio de Janeiro, 1995.