

Simulação e Análise de Sistema de Posicionamento Dinâmico

Vinicius Leite de Moraes Vêras
Glenan Assis do Lago
Eduardo Aoun Tannuri
Hélio Mitio Morishita

Vinicius Leite de Moraes Vêras
Glenan Assis do Lago

Eduardo Aoun Tannuri
Hélio Mitio Morishita

Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Av. Prof. Mello Moraes, nº 2231 – 05508-030 – Cidade Universitária – São Paulo – SP – Brasil Tel. 55-11-3091-5350 ramal 200
email: vinicius.veras@poli.usp.br

Resumo

Este trabalho apresenta os algoritmos de controle e filtragem utilizados comercialmente em Sistemas de Posicionamento Dinâmicos (SPDs). Os algoritmos foram implementados em um simulador computacional, que possui modelos complexos da dinâmica da embarcação e dos agentes ambientais. Com isso, puderam-se realizar simulações para a análise do desempenho dos controladores em situações críticas. Estes algoritmos estão também sendo implementados no laboratório de análise de SPDs, descrito no trabalho Glenan et al. (2005), apresentado neste congresso.

Abstract

This work presents control and filtering algorithms applied in commercial Dynamic Positioning Systems (DPS). The algorithms were implemented in a computational simulator, considering also complete models for the dynamics and hydrodynamics of vessels. Several simulations were performed, in order to evaluate the performance of the controller under critical situations. Such control algorithms are also being implemented in the DPS laboratory, under development in University of São Paulo. This laboratory is detailed in Glenan et al. (2005), presented in this congress.

1. Introdução

O sistema de controle utilizado em SPDs é composto por um filtro e um controlador Proporcional-Derivativo (PD). O filtro é responsável pela separação entre as componentes de movimento de alta e baixa frequência. As componentes de alta frequência não devem ser controladas, pois possuem média nula e exigiriam uma enorme potência do sistema propulsivo.

Grande parte dos SPDs comerciais utilizam técnicas baseadas em Filtros de Kalman, para a realização da filtragem. Estes possuem modelos internos da dinâmica da embarcação, o que permite a separação entre as componentes de alta e baixa frequência, simplesmente adotando-se modelos internos separados para estes dois tipos de movimentos. Adicionalmente, o Filtro de Kalman permite a fusão de medidas provenientes de diversos sistemas sensores, realizando a estimação ótima da posição e aproamento da embarcação considerando-se as várias medidas. Isto é particularmente interessante em SPDs, pois os mesmos operam com redundância dupla (e até tripla) em alguns sensores, para garantir confiabilidades. Além disso, a presença do modelo interno permite que o Filtro de Kalman estime a posição do navio mesmo na ausência total de novas medidas durante alguns minutos (*dead-reckoning*), o que aumenta mais ainda a confiabilidade do sistema de controle.

Neste trabalho será apresentada a estrutura do Filtro de Kalman usada em SPDs, considerando-se o modelo interno e o algoritmo de predição-correção. Um caso real de um petroleiro da Petrobrás é então simulado, a fim de se analisar o desempenho do controlador em face a condições reais de operação.

2. Modelagem do Sistema

O modelo dinâmico abaixo governa o movimento horizontal de uma embarcação em alto mar:

$$\begin{aligned}(M + M_{11})\ddot{x}_1 - (M + M_{22})\dot{x}_2\dot{x}_6 - M_{26}\dot{x}_6^2 + C_{11}\dot{x}_1 &= F_{1E} + F_{1T}; \\(M + M_{22})\ddot{x}_2 + M_{26}\ddot{x}_6 + (M + M_{11})\dot{x}_1\dot{x}_6 + C_{22}\dot{x}_2 &= F_{2E} + F_{2T}; \\(I_z + M_{66})\ddot{x}_6 + M_{26}\ddot{x}_2 + M_{26}\dot{x}_1\dot{x}_6 + C_{66}\dot{x}_6 &= F_{6E} + F_{6T}.\end{aligned}$$

Onde I_z é o momento de inércia, M é a massa do navio, M_{ij} são os elementos da matriz de massas adicionais, F_{iE} são as esforços de *surge*, *sway* e *yaw* causadas por fatores ambientais, como corrente, vento e ondas, e F_{iT} são as forças e momento gerados pelo sistema de propulsão. As variáveis \dot{x}_1 , \dot{x}_2 e \dot{x}_6 são as velocidades de surge, sway e yaw à meia-nau (Figura 1).

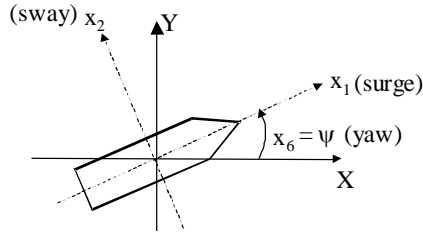


Figura 1: Sistema de coordenadas

A relação entre o vetor posição $\mathbf{X}_L = (X_L \ Y_L \ \psi_L)^T$ e velocidades no sistema de coordenadas $(\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_6)$ é dada por:

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \mathbf{T}(\psi) \cdot \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_6 \end{pmatrix}, \text{ com } \mathbf{T}(\psi_L) = \begin{pmatrix} \cos(\psi_L) & -\text{sen}(\psi_L) & 0 \\ \text{sen}(\psi_L) & \cos(\psi_L) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

As simulações apresentadas no trabalho consideram diversas ações ambientais, incluindo onda (derivadas média e lenta, forças de primeira ordem), vento (incluindo rajadas) e correnteza (incluindo a interação com ondas). Os modelos completos são apresentados no apêndice A.

3. Filtro de Kalman

Os SPDs comerciais utilizam o algoritmo de Filtro de Kalman (FK) para realizar a estimação da posição do navio. O FK incorpora um modelo do sistema (chamado de modelo interno), e considera os movimentos de baixa frequência separadamente aos de alta frequência. Isto permite que o FK estime as componentes de movimento isoladamente, o que é desejável para o controle, já que este deve atuar apenas em função dos movimentos de baixa frequência. A idéia de separar o modelo interno do FK em uma parcela de alta e uma de baixa frequência foi originalmente proposta por Balchen et al. (1976).

Como o modelo de baixa frequência possui não linearidades geométricas, deve-se utilizar a versão estendida do Filtro de Kalman (Filtro de Kalman Estendido – EKF).

Como mencionado, o modelo interno usado com o Filtro de Kalman é uma composição de três tipos de modelo. O primeiro descreve os comportamentos de baixa frequência. Já o segundo é um modelo de alta frequência, e representa uma aproximação linear do espectro de ondas marítimas, funcionando como um Shaping Filter. Existe ainda um terceiro modelo que representa as forças ambientais externas.

Para o controlador, interessará apenas o vetor de estados x_L , proveniente do modelo de baixa frequência e as estimativas das forças ambientais, que serão compensadas antes do controlador, em estilo *feed-forward*.

3.1 Modelo de Baixa Frequência

O modelo linear aproximado de baixa frequência segue a estrutura dos modelos encontrados em sistemas mecânicos, e pode ser escrito como:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_L + \mathbf{D}\dot{\mathbf{x}}_L = \mathbf{F}_{EL} + \mathbf{F}_T + \boldsymbol{\omega}_L$$

onde as matrizes \mathbf{M} e \mathbf{D} (massa e amortecimento) valem:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M + M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & M + M_{22} & M.x_G + M_{26} \\ 0 & M.x_G + M_{26} & I_Z + M_{66} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} B_{11} & 0 & 0 \\ 0 & B_{22} & B_{26} \\ 0 & B_{26} & B_{66} \end{pmatrix}$$

Para obtermos um modelo em equações de estados, devemos supor um vetor de estados $\mathbf{x}_L = (X_L \ Y_L \ \psi_L \ \dot{x}_{1L} \ \dot{x}_{2L} \ \dot{x}_{6L})^T$. Desta forma poderemos ter um modelo de primeira ordem da forma:

$$\dot{\mathbf{x}}_L = \mathbf{A}_L^{6 \times 6} \mathbf{x}_L + \mathbf{A}_{EL}^{6 \times 6} \mathbf{F}_E + \mathbf{E}_L^{6 \times 3} \boldsymbol{\omega}_L + \mathbf{B}_L^{6 \times 3} \mathbf{F}_T,$$

onde \mathbf{F}_T são as forças dos propulsores, \mathbf{F}_E as forças ambientais e vetor momento, \mathbf{M} a matriz de massas da embarcação e \mathbf{C} uma matriz de amortecimento. O índice L indica movimento de baixa frequência. $\boldsymbol{\omega}_L$ é um vetor 3x1 que contém ruídos gaussianos de média zero com matriz de covariância $\mathbf{Q}(\boldsymbol{\omega}_L \sim N(0, \mathbf{Q}_L))$. As matrizes assumem os valores abaixo.

$$\mathbf{A}_L^{6 \times 6} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{T}(\psi_L) \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{C}_{3 \times 3} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{A}_{EL}^{6 \times 6} = \mathbf{B}_L^{6 \times 3} = \mathbf{E}_L^{6 \times 3} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{M}^{-1} \end{pmatrix};$$

Caso tenhamos valores pequenos para o ângulo de guinada (yaw), podemos aproximar a matriz \mathbf{A}_L por:

$$\mathbf{A}_L = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{D} \end{pmatrix}.$$

3.2 Modelo de Alta Frequência

As ondas do mar são descritas pelo espectro de potência da altura da superfície livre $S(\omega)$. Assim, o espectro de potência do movimento de alta frequência x_{iH} do navio (P_{ii}) é calculado por:

$$P_{ii}(\omega) = RAO_i(\omega, \beta)^2 . S(\omega)$$

onde ψ é o ângulo de incidência de onda.

Um modelo linear para o movimento de alta frequência seria mais adequado para a aplicação do Filtro de Kalman. A equação abaixo mostra o movimento x_{iH} como saída de um sistema linear, cuja função de transferência é dada por $h(s)$. Este sistema é excitado por um ruído branco $H(s)$ gaussiano com potência espectral unitária ($P_{\omega_H \omega_H}(\omega) = 1$).

$$x_{iH}(s) = h(s) \cdot \omega_H(s)$$

Saelid et al. (1983) abordaram este problema e propuseram a seguinte função:

$$h(s) = \frac{2\zeta\omega_0\sigma_\omega \cdot s}{s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2}$$

sendo ζ um fator de amortecimento utilizado para melhor aproximar $P_{ii}(\omega)$ e ω_0 a frequência de pico do espectro $P_{ii}(\omega)$. A constante σ_ω é obtida por:

$$|h(j\omega)|^2 = \frac{4(\zeta\omega_0\sigma_\omega)^2 \omega^2}{(\omega - \omega_0)^2 + 4(\zeta\omega_0\omega)^2} \Rightarrow |h(j\omega_0)|^2 = \sigma_\omega^2 = P_{ii}(\omega_0)$$

ou seja, equivale à raiz quadrada do valor de pico de espectro do movimento de alta frequência. Este modelo escrito em variáveis de estado assume a forma:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{x_i} &= x_{iH} \\ \dot{x}_{iH} &= -2\zeta\omega_0x_{iH} - \omega_0^2\xi_{x_i} + \omega_{iH}, \text{ para } i=1, 2 \text{ ou } 6 \end{aligned}$$

O mesmo valor de ω_0 é utilizado para os três movimentos, pressupondo que a frequência de pico do espectro dos movimentos sejam aproximadamente iguais, próximas à frequência de pico da onda. O termo $2\zeta\omega_0\sigma_\omega$ é embutido no ruído branco, que passa a possuir potência espectral igual a $(2\zeta\omega_0\sigma_\omega)^2$. Assim, o vetor ω_H será composto por ruídos brancos gaussianos de média 0. Sua potência espectral deve ser ajustada para embutir o termo $2\zeta\omega_0\sigma_\omega$. Assim, sua matriz de covariância, para um determinado período de amostragem Δt deve valer $\mathbf{Q}_H = \frac{(2\zeta\omega_0\sigma_\omega)^2}{\Delta t} \mathbf{I}_{3 \times 3}$.

Definindo-se o vetor de estados $\mathbf{x}_H = (\xi_{x_1} \quad \xi_{x_2} \quad \xi_{x_3} \quad x_{1H} \quad x_{2H} \quad x_{6H})^T$, o modelo completo de alta frequência é dado por:

$$\dot{\mathbf{x}}_H = \mathbf{A}_H \mathbf{x}_H + \mathbf{E}_H \omega_H$$

$$\text{com } \mathbf{A}_H = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ -\omega_0^2 \mathbf{I}_{3 \times 3} & -2\zeta\omega_0 \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{pmatrix} ; \quad \mathbf{E}_H = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{pmatrix}$$

3.3 Forças Ambientais de Baixa Frequência

O modelo das forças ambientais de baixa frequência deve permitir uma variação lenta destas perturbações. Como não há dinâmica modelada aqui, assumimos que a entrada é apenas o ruído branco \mathbf{F}_{EL} . Sua matriz de covariância $\mathbf{Q}_{FL}(\omega_{FL} \sim N(0, \mathbf{Q}_{FL}))$ deve, portanto, ser ajustada por métodos empíricos, de tal forma que não permita variações com amplitudes demasiadamente altas nem baixas.

$$\dot{\mathbf{F}}_{EL} = \boldsymbol{\omega}_{EL}$$

Para os controladores baseados em Filtro de Kalman Estendido, tanto para uma quanto para 3 frequências, assumimos que a frequência de onda é um parâmetro lentamente variável, tendo uma dinâmica dada por:

$$\dot{\omega}_0 = \boldsymbol{\omega}_\omega \quad (\text{EKF-1})$$

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_{0X} & \dot{\omega}_{0Y} & \dot{\omega}_{0Z} \end{pmatrix}^T = \boldsymbol{\omega}_\omega \quad (\text{EKF-3})$$

onde $\boldsymbol{\omega}_\omega$ ($\boldsymbol{\omega}_\omega \sim N(0, \mathbf{Q}_\omega)$) é um vetor de ruído branco Gaussiano, sendo um vetor 3x1 para três frequências ou escalar para uma única frequência.

3.4 Modelo Completo

O modelo interno a ser utilizado no Filtro de Kalman será, portanto, um modelo linear com um vetor de estados em \mathfrak{R}^{15} . Este modelo descreve o comportamento a baixas frequências, a altas e os distúrbios ambientais de baixa frequência. O mesmo pode ser escrito como:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{F}_T + \mathbf{E}\boldsymbol{\omega}$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v}$$

com

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_L \\ \mathbf{x}_H \\ \mathbf{F}_{EL} \end{pmatrix} ; \quad \boldsymbol{\omega} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\omega}_L \\ \boldsymbol{\omega}_H \\ \boldsymbol{\omega}_{F_{EL}} \end{pmatrix} ; \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_L^{6 \times 6} & \mathbf{0}^{6 \times 6} & \mathbf{A}_{EL}^{6 \times 3} \\ \mathbf{0}^{6 \times 6} & \mathbf{A}_H^{6 \times 6} & \mathbf{0}^{6 \times 3} \\ \mathbf{0}^{3 \times 6} & \mathbf{0}^{3 \times 6} & \mathbf{0}^{3 \times 3} \end{pmatrix} ; \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_L^{6 \times 3} \\ \mathbf{0}^{6 \times 3} \\ \mathbf{0}^{3 \times 3} \end{pmatrix} ; \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \mathbf{E}_L^{6 \times 3} & \mathbf{0}^{6 \times 3} & \mathbf{0}^{6 \times 3} \\ \mathbf{0}^{6 \times 3} & \mathbf{E}_H^{6 \times 3} & \mathbf{0}^{6 \times 3} \\ \mathbf{0}^{3 \times 3} & \mathbf{0}^{3 \times 3} & \mathbf{I}^{3 \times 3} \end{pmatrix}$$

Os sinais medidos serão dados por:

$$\mathbf{z} = \begin{pmatrix} X_L + X_H + v_X \\ Y_L + Y_H + v_Y \\ \psi_L + \psi_H + v_\psi \end{pmatrix}.$$

O modelo abaixo é usado no algoritmo de Filtro de Kalman Discreto, sendo Δt o período de amostragem.

$$\mathbf{x}[k] = \mathbf{f}(\mathbf{x}[k-1], \mathbf{F}_T[k-1], \boldsymbol{\omega}[k-1])$$

$$\mathbf{z}[k] = \mathbf{H}.\mathbf{x}[k] + \mathbf{v}[k]$$

$$\mathbf{f}(\dots) = (\mathbf{A}(\mathbf{x}).\Delta t + \mathbf{I}).\mathbf{x}[k-1] + \mathbf{B}.\Delta t.\mathbf{F}_T[k-1] + \mathbf{E}.\Delta t.\boldsymbol{\omega}[k-1]$$

3.5 Filtro Estendido de Kalman

Sendo $\bar{\mathbf{x}}$ a estimativa a priori e $\hat{\mathbf{x}}$ a estimativa a posteriori do vetor de estados, \mathbf{X} a matriz de covariância dos erros e \mathbf{K} a matriz de ganhos de Kalman, o algoritmo do filtro de Kalman discreto é dado por:

Predição

$$\bar{\mathbf{x}}[k+1] = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}[k], \mathbf{F}_T[k], 0)$$

$$\bar{\mathbf{X}}[k+1] = \mathbf{\Phi}.\hat{\mathbf{X}}[k].\mathbf{\Phi}^T + \mathbf{\Gamma}.\mathbf{Q}.\mathbf{\Gamma}^T$$

Onde

$$\mathbf{\Phi} = \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{x} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}[k]}; \mathbf{\Gamma} = \mathbf{E}.\Delta t; \mathbf{Q} = \text{diag}(\mathbf{Q}_L \quad \mathbf{Q}_H \quad \mathbf{Q}_{FL} \quad \mathbf{Q}_\omega)$$

Correção

$$\mathbf{K}[k] = \bar{\mathbf{X}}[k].\mathbf{H}^T . (\mathbf{H}.\bar{\mathbf{X}}[k].\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$$

$$\hat{\mathbf{x}}[k] = \bar{\mathbf{x}}[k] + \mathbf{K}[k].\boldsymbol{\varepsilon}[k]$$

$$\hat{\mathbf{X}}[k] = (\mathbf{I} - \mathbf{K}[k].\mathbf{H}).\bar{\mathbf{X}}[k]$$

sendo a inovação dada por $\boldsymbol{\varepsilon}[k] = (\mathbf{z}[k] - \mathbf{H}.\bar{\mathbf{x}}[k])$.

O Filtro de Kalman Estendido para ajuste das 1 ou 3 frequências pode ser implementado facilmente adicionando-se um estado a mais para cada parâmetro (frequência) a ser ajustada, incluindo uma dinâmica.

No presente algoritmo, as equações escolhidas foram:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_X = \omega_{wx} \\ \dot{\omega}_Y = \omega_{wy} \\ \dot{\omega}_{Y_{aw}} = \omega_{w_{yaw}} \end{cases}.$$

Desta forma, o antigo vetor de estados \mathbf{x} foi aumentado para:.

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_L \\ \mathbf{x}_H \\ \mathbf{F}_{EL} \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Considerando-se a estimativa da frequência}} \mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_L \\ \mathbf{x}_H \\ \mathbf{F}_{EL} \\ \mathbf{w} \end{pmatrix}$$

Este método é uma generalização do Filtro de Kalman e de fácil implementação caso já se tenha o Filtro de Kalman já implementado.

4. Simulações

O controlador utilizado nas simulações é composto por três ações (Figura 2). Uma primeira ação é a de compensação das forças de vento. Uma medida de vento é filtrada inicialmente por um filtro digital com constante de tempo muito menor do que a mínima constante de tempo do modelo da embarcação. Em seguida é obtida uma estimativa das forças de vento através de um modelo de vento, que é compensada diretamente.

Há ainda um controlador PD, que compara a posição desejada com a melhor estimativa da posição atual obtida através do Filtro de Kalman e calcula os esforços de controle para minimizar tal erro.

A ação integral é obtida pela subtração das forças ambientais estimadas em baixa frequência pelo FK.

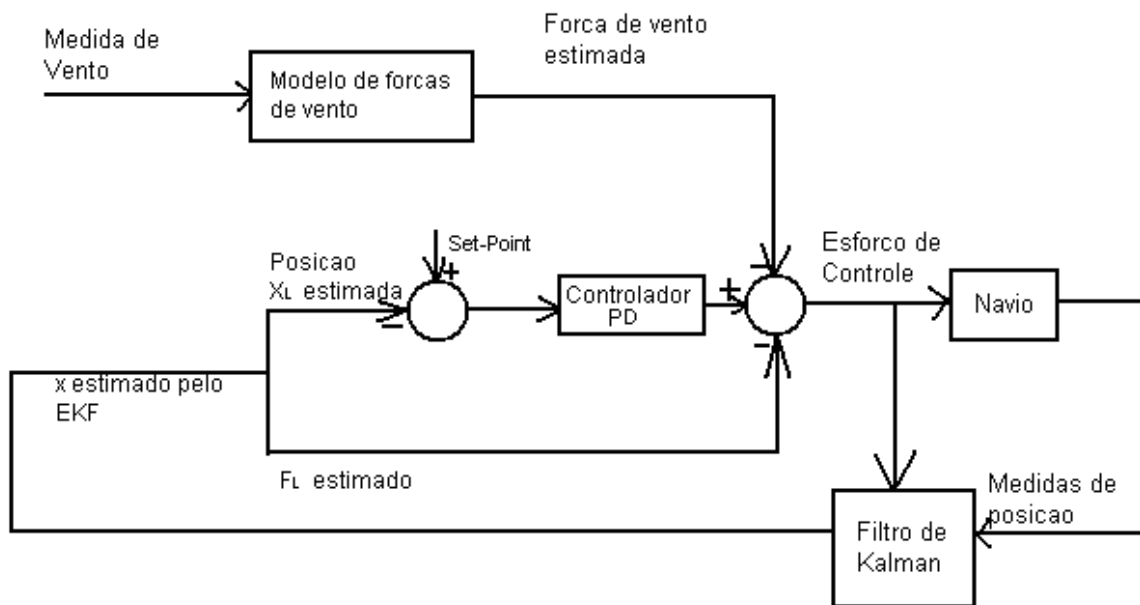


Figura 2: Estrutura do controlador

O controlador foi implementado em um simulador numérico, considerando uma embarcação real em operação nas águas brasileiras totalmente carregado. O principal objetivo desta simulação é verificarmos a eficiência do controlador em termos de posicionamento e filtragem. Foram consideradas perturbações ambientais como forças de vento, correnteza e ondas com intensidades normalmente presentes em operações na Baía de Campos (Figura 3). O algoritmo de filtragem utilizado foi o Filtro de Kalman Estendido

com estimação uma única frequência de onda, descrito como EKF-1 em (Tannuri et al., 2005). Escolhemos este algoritmo por ele ter uma maior robustez quando comparado com o EKF-3 (Tannuri et al., 2005), onde são obtidas três estimativas de frequência, uma para cada movimento.

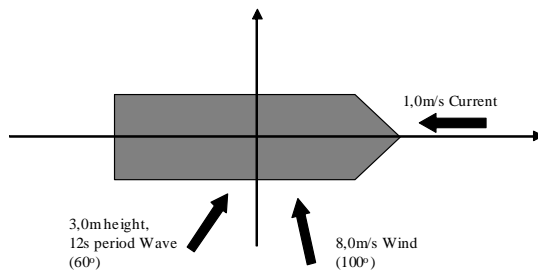


Figura 3: Condições ambientais consideradas na simulação

Os valores de referência para posição e aproamento foram nulos. Os movimentos da embarcação são apresentados na Figura 4. Após o transitório, podemos ver que os erros de posição são menores que 2m tanto para X quanto para Y, e menores que 0,5 grau para o movimento de yaw.

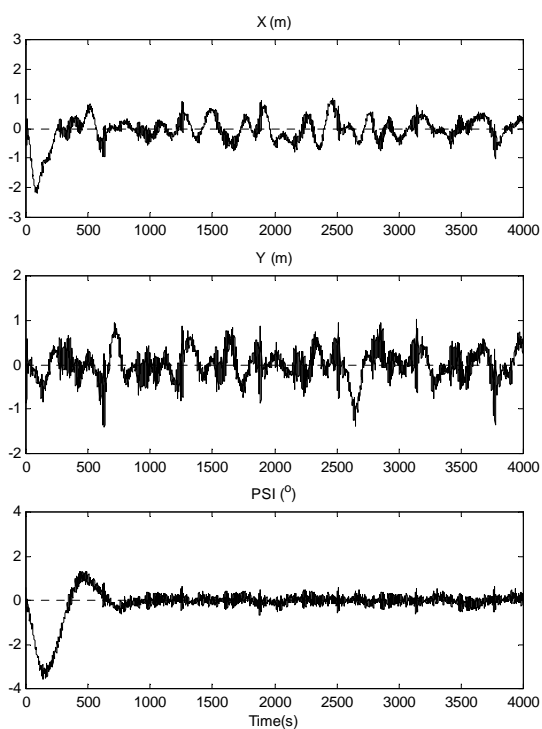


Figura 4: Movimentos da embarcação

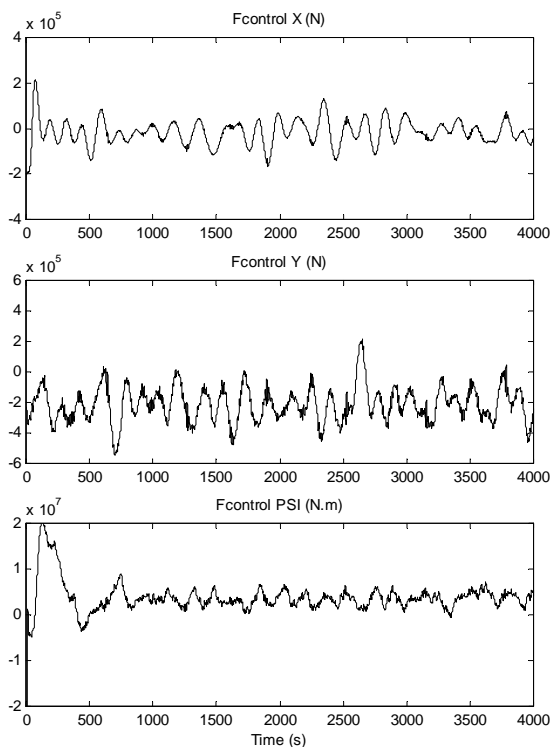


Figura 5: Esforços de controle

A estimativa da frequência de onda é apresentada na figura 6. Após o transitório de 500s, a estimativa de período de onda $2\pi/\omega_0$ apresenta uma oscilação entre 13,5s e 14,5s, diferente do período de pico de 12s.

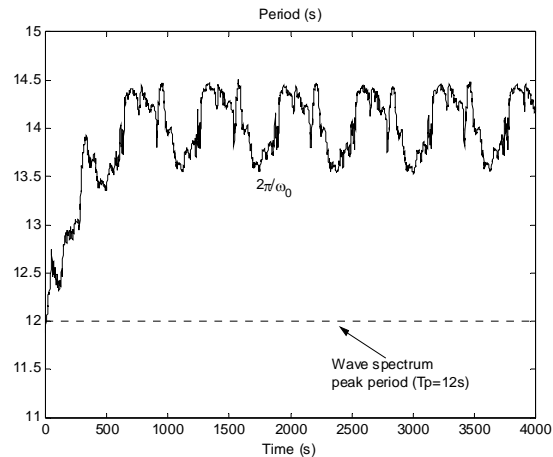


Figura 6: Estimação da frequência

5. Conclusões

O algoritmo de controle implementado foi capaz de estabilizar e controlar a posição do navio, apresentando oscilações de pequena amplitude na posição, bem como um transitório pequeno. As oscilações nos esforços solicitados ao sistema de propulsão tiveram poucas oscilações em alta frequência.

Este algoritmo está em fase de implementação no laboratório acadêmico de SPDs, descrito em Glenan et al. (2005).

Apêndice A

Este apêndice contém as principais fórmulas detalhando os modelos matemáticos neste estudo.

Corrente

As forças e momentos devidos à corrente são dados pelas seguintes equações (Leite et al., 1998):

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

$$p = 1 \text{ for } i = 1, 2, p = 2 \text{ for } i = 3$$

Onde os coeficientes hidrodinâmicos são dados por:

$$C_{1c}(\beta) = \left[\frac{0.09375}{(\log(\text{Re}) - 2)^2} \frac{S}{TL} \right] \cos(\beta) + \frac{1}{8} \frac{\pi T}{L} (\cos(3\beta) - \cos(\beta))$$

$$C_{2c}(\beta) = \left[C_Y - \frac{\pi T}{2L} \right] \sin(\beta) |\sin(\beta)| + \frac{\pi T}{2L} \sin^3(\beta) + \frac{\pi T}{L} \left[1 + 0.4 \frac{C_B B}{T} \right] \sin(\beta) |\cos(\beta)|$$

$$C_{6c}(\beta) = \frac{-l_g}{L} \left[C_Y - \frac{\pi T}{2L} \right] \sin(\beta) |\sin(\beta)| - \frac{\pi T}{L} \sin(\beta) \cos(\beta) - \left[\frac{1 + |\cos(\beta)|}{2} \right]^2 \frac{\pi T}{L} \left[\frac{1}{2} - 2.4 \frac{T}{L} \right] \sin(\beta) |\cos(\beta)|$$

onde B e T são boca e calado do navio, respectivamente; C_B é o coeficiente de bloco; C_Y o coeficiente de força lateral para corrente transversal; Re é o número de Reynolds (baseado no comprimento L); l_g mede a distância longitudinal entre o centro de massa do casco e a seção à meia-nau; β é o ângulo de ataque definido como $\beta = a \tan 2(v - v_c, u - u_c)$.

O amortecimento devido ao ângulo de yaw também é calculado baseado na teoria de asa curta, e é dado por:

$$X_D = -\frac{1}{4} \rho \cdot \pi \cdot T^2 \cdot L \cdot v_r \cdot r - \frac{1}{16} \rho \cdot \pi \cdot T^2 \cdot L^2 \cdot \frac{u_r}{|u_r|} \cdot r^2$$

$$Y_D = \frac{1}{2} \rho \cdot T \cdot L^2 \cdot C_{D,2} \cdot u_r \cdot r - 0,035 \cdot \rho \cdot T \cdot L^2 \cdot v_r \cdot r - 0,007 \cdot \rho \cdot T \cdot L^3 \cdot |r| \cdot r$$

$$N_D = -\frac{1}{2} \rho \cdot T \cdot L^3 \cdot C_{D,6} \cdot |u_r| \cdot r - \frac{3}{20} \cdot \rho \cdot T \cdot L^3 \cdot C_\gamma \cdot |v_r| \cdot r - \frac{1}{32} \cdot \rho \cdot T \cdot L^4 \cdot C_\gamma \cdot |r| \cdot r$$

onde:

$$u_r = u - u_c; \quad v_r = v - v_c; \quad C_{D,2} = \frac{\pi \cdot T}{2 \cdot L} \cdot \left(1 - 4,4 \cdot \frac{B}{L} + 0,16 \cdot \frac{B}{T} \right)$$

$$C_{D,6} = \frac{\pi \cdot T}{4 \cdot L} \cdot \left(1 + 0,16 \cdot \frac{B}{T} - 2,2 \cdot \frac{B}{L} \right).$$

Vento

As forças de vento são determinadas pelas seguintes equações:

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot C_{iw}(\psi_{rw}) \cdot \rho_w \cdot V_w^2 \cdot A \cdot L_{BP}^p$$

$$p = 0 \text{ for } i = 1, 2, \quad p = 1 \text{ for } i = 3$$

$$\psi_{rw} = \psi_w - \psi$$

onde os coeficientes C_{iw} são determinados experimentalmente; V_w é a velocidade do vento; A é a área projetada da embarcação e ψ_w é a direção do vento. Neste trabalho, os coeficientes de vento utilizados foram tirados de OCIMF (1994).

Ondas

As forças de onda de segunda ordem são resultantes da soma das forças de deriva média e lenta. Considerando as correções onda-corrente, as forças de deriva média podem ser calculadas a partir das seguintes equações. (Aranha, 1994)

$$F_{m_{di}}(\psi_s) = 2 \int_0^{\infty} S(\omega) d_i(\psi_{rs}, \omega) d\omega \quad i=1,2,3$$

$$\psi_{rs} = \psi_s - \psi$$

onde $S(\omega)$ é o espectro de ondas do mar, ω é a frequência, ψ_s a direção de onda e d_i é a força de deriva média em ondas incidentes considerando a interação onda-corrente.

Estes termos são definidos usando notação matricial. Seja D o vetor de componentes d_i , ie, $D = [d_1 \ d_2 \ d_3]^T$. O vetor D é calculado por:

$$D = D^0 + B \cdot [u_c \ -u \ v_c \ -v \ r]^T$$

$$\text{com } B = \begin{bmatrix} B_{3 \times 2}^1 & B_{3 \times 1}^2 \end{bmatrix}; B^1 = \begin{bmatrix} b_{w1} & b_{r1} \\ b_{w2} & b_{r2} \\ b_{w3} & b_{r3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\psi_{rs}) & \sin(\psi_{rs}) \\ \sin(\psi_{rs}) & \cos(\psi_{rs}) \end{bmatrix}; B^2 = [b_{3,2} \ \sin(\psi_{rs}) \ b_{3,2} \ b_{2,2}]$$

Na equação acima, $D^0 = [d_1^0 \ d_2^0 \ d_3^0]$ é a força de onda incidente regular média, $b_{wi} = 4d_i(\omega, \psi_{rs}) + \omega \frac{\partial d_i(\omega, \psi_{rs})}{\partial \omega}$ e $b_{ri} = -2 \frac{\partial d_i(\omega, \psi_{rs})}{\partial \omega}$. As forças de deriva lenta são determinadas como séries temporais a partir do seu espectro. Aranha & Fernandes (1995) mostraram que estes espectros correspondem a ruído branco para baixas frequências, podendo ser obtidos por:

$$S_{sd_i}(\psi_{rs}, \mu) = 8 \int_0^{\infty} S^2(\omega) d_i^0(\omega, \psi_{rs}) d\omega \quad i=1,2,3$$

onde μ é a diferença entre duas frequências de onda.

Movimentos de alta frequência são calculados por meio de funções de transferência relacionando altura de onda chamadas Operadores de Resposta em Amplitude (RAOs). Estas funções são obtidas por métodos numéricos considerando o fluxo potencial em torno do casco. Esta abordagem baseia-se na resposta linear de movimentos de alta frequência e no desacoplamento entre movimentos de alta e baixa frequência.

Ondas em mar real são descritas por um espectro de potência $S(\omega)$ de altura de superfície, e o espectro de potência do movimento de navio i (P_{ii}) são então calculados por:

$$P_{ii}(\omega) = RAO_i(\psi_{rs}, \beta)^2 \cdot S(\omega)$$

Sendo β o ângulo de incidência com relação à embarcação. Os movimentos de alta frequência da embarcação são então obtidos a partir da realização temporal do espectro de potência da função P_{ii} .

Apêndice B

Este apêndice contém os principais parâmetros que definem o navio empregado no estudo.

Tabela 1. Principais propriedades do petroleiro

Parâmetros	Navio completamente carregado
Comprimento (m)	260
Través (m)	44.5
Calado (m)	16.1
Coefficiente de bloco	0.83
Superfície molhada (m ²)	17646
Massa (ton)	156,310
Momento de Inércia (ton.m ²)	6.6 x 10 ⁸
Área transversal (m ²)	1038
Área lateral (m ²)	2858

Os coeficientes d_i foram calculados por meio de análise de software de fluxo potencial e foram fornecidos pela Petrobras (Wamit, 2000).

Controle principal e parâmetro de filtro são dados por:

$$\mathbf{R} = \text{diag}(1 \quad 1 \quad 3 \times 10^{-4});$$

$$\mathbf{Q}_{EKF-RPEM} = \text{diag}(\mathbf{Q}_1);$$

$$\mathbf{Q}_{EKF-1} = \text{diag}(\mathbf{Q}_1 \quad 1.5 \times 10^{-4});$$

com

$$\mathbf{Q}_1 = \begin{pmatrix} 4 \times 10^{10} & 4 \times 10^{10} & 4 \times 10^{14} & 0.34 & 0.34 & 0.002 \\ 2 \times 10^8 & 8 \times 10^9 & 1.2 \times 10^{12} & & & \end{pmatrix}$$

Para o termo Proporcional-Derivativo:

$$\text{Ganhos proporcionais} = [6.51 \times 10^4 \quad 8.95 \times 10^4 \quad 3.64 \times 10^8]$$

$$\text{Ganhos derivativos} = [5.06 \times 10^6 \quad 6.96 \times 10^6 \quad 2.83 \times 10^{10}]$$

Referências

Aranha, J.A.P., *A Formula for Wave Damping in the Drift of a Floating Body*, Journal of Fluid Mechanics, vol. 272, pp.147-155, 1994.

Aranha, J. A. P. and Fernandes, A. C., *On the Second Order Low Frequency Force Spectrum*, Applied Ocean Research, Vol.17, pp.311-313, 1995..

Balchen, J.G., Jenssen, N.A. and Saelid, S., *Dynamic Positioning using Kalman Filtering and Optimal Control Theory*, Proceedings of IFAC/IFIP Symposium on Automation in Offshore Oil Field Operation, Bergen, 1976.

Glenan, A.L. *Desenvolvimento de Laboratório Experimental de Sistemas de Posicionamento Dinâmico*, XIX Congresso Pan-Americano de Engenharia Naval, Transporte Marítimo e Engenharia Portuária XIX COPINAVAL, Guayaquil, Equador, 2005.

Leite, AJP, Aranha, JAP, Umeda, C, e de Conti, MB, *Current Forces in Tankers and Birfurcation of Equilibrium of Turret System: Hydrodynamic Model and Experiments*, Applied Ocean Research, Vol. 20(3), pp.145-156, 1998.

OCIMF, *Predictions of wind and current loads on VLCCs*, Oil Companies International Marine Forum, 1994

Saelid, S., Jenssen, N.A. e Balchen, J.G., *Design and Analysis of a Dynamic Positioning System Based on Kalman Filtering and Optimal Control*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.AC-28, No.3, pp. 331-339, 1983.

WAMIT, *Wave Analysis Program : Reference Manual*, WAMIT, Inc., 2000.

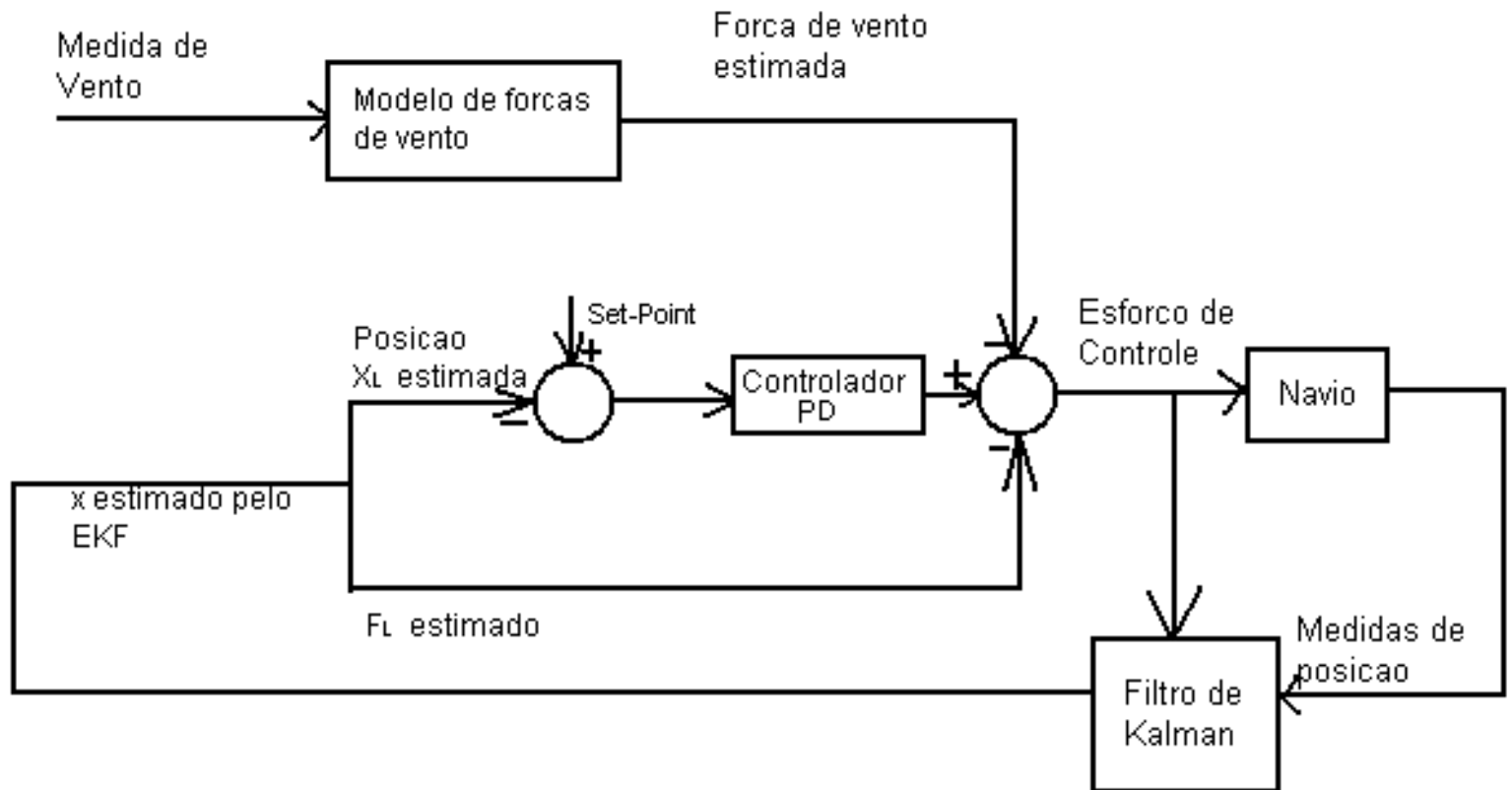
Escola Politécnica da USP



Simulação e Análise de Sistema de Posicionamento Dinâmico

Vinícius Leite de Moraes Veras
Glenan Assis do Lago
Eduardo Aoun Tannuri
Hélio Mitio Morishita

Sistema de Controle SPD



Vantagens do Filtro de Kalman em SPDs

- ◆ Estimador Ótimo de mínima variância
- ◆ Usa modelo interno da planta com erros embutidos
- ◆ Separação de Freqüências
- ◆ Redução de esforços de controle desnecessários
- ◆ Menos erro das medidas
- ◆ Possibilita redundância de sensores
 - Previsão pelo modelo interno é vista como um dado redundante.
- ◆ Largamente utilizado comercialmente

Filtro de Kalman

- ◆ Duas etapas principais
 - Propagação / Previsão
 - Atualização / Correção

Propagação/Previsão

$$\bar{x}(k+1) = \Phi \cdot \hat{x}(k)$$

$$\bar{X}(k+1) = \Phi \hat{X}(k) \Phi^T + \Gamma Q \Gamma^T$$

Atualização/Correção

$$\hat{X}(k+1) = [I - K(k+1) \cdot H] \bar{X}(k+1)$$

$$\hat{x}(k+1) = \bar{x}(k+1) + K(k+1)[z(k+1) - H \cdot \bar{x}(k+1)]$$

$$K(k+1) = \bar{X}(k+1) \cdot H^T [H \bar{X}(k+1) H^T + R]^{-1}$$

Sistema Discreto

$$x(k+1) = \Phi \cdot x(k) + \Delta \cdot u(k) + \Gamma \cdot w(k)$$

$$y(k) = H \cdot x(k) + v(k)$$

Matrizes de Covariância

$$Q = E\{w(t) \cdot w^T(t)\}$$

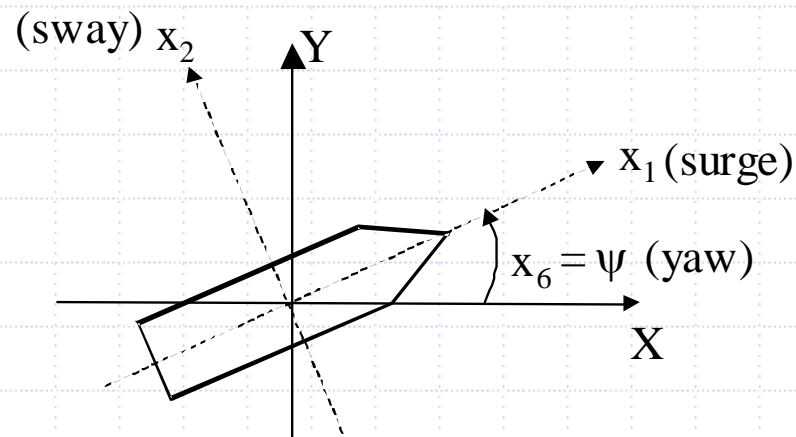
$$R = E\{v(t) \cdot v^T(t)\}$$

Modelo Interno do Filtro de Kalman

- ◆ Equações de Movimento Linearizadas
 - Modelo LF
 - Modelo HF
 - Modelo de Perturbações
- ◆ Agentes ambientais
 - Ondas
 - Ventos
 - Correteza
- ◆ Sistema de Propulsão
 - Dinâmica rápida

Modelo Completo para o Plano

- ◆ Bem conhecido em Eng. Naval
- ◆ Sistema de coordenadas fixo em um ponto G centro de gravidade
- ◆ Navio pode girar em relação ao sistema de coordenadas
 - Ângulo de Yaw
- ◆ Navio simétrico



$$\begin{aligned}
 (M + M_{11})\ddot{x}_{1L} - (M + M_{22})\dot{x}_{2L}\dot{x}_{6L} - (Mx_G + M_{26})\dot{x}_{6L}^2 + B_{11}\dot{x}_{1L} &= F_{1EL} + F_{1T} + \omega_{1L}; \\
 (M + M_{22})\ddot{x}_{2L} + (Mx_G + M_{26})\ddot{x}_{6L} + (M + M_{11})\dot{x}_{1L}\dot{x}_{6L} + B_{22}\dot{x}_{2L} + B_{26}\dot{x}_{6L} &= F_{2EL} + F_{2T} + \omega_{2L}; \\
 (I_Z + M_{66})\ddot{x}_{6L} + (Mx_G + M_{26})\ddot{x}_{2L} + (Mx_G + M_{26})\dot{x}_{1L}\dot{x}_{6L} + B_{66}\dot{x}_{6L} + B_{26}\dot{x}_{2L} &= F_{6EL} + F_{6T} + \omega_{6L}.
 \end{aligned}$$

Modelo LF Linearizado

- ◆ Modelo de 2a ordem
 - Semelhante aos encontrados em Servomecanismos
- ◆ M = Matriz de Inercias
- ◆ D = Matriz de Atritos
- ◆ F_{EL} = Esforços ambientais
- ◆ F_T = Esforços de controle (sem alocação)
- ◆ w_L = Perturbações não modeladas e erros de modelagem
- ◆ A ser modificado para modelo de 1a ordem

$$\dot{\mathbf{X}}_L = \mathbf{T}(\psi_L) \cdot \dot{\mathbf{x}}_L$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_L + \mathbf{D}\dot{\mathbf{x}}_L = \mathbf{F}_{EL} + \mathbf{F}_T + \mathbf{w}_L$$

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M + M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & M + M_{22} & M \cdot x_G + M_{26} \\ 0 & M \cdot x_G + M_{26} & I_Z + M_{66} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{T}(\psi_L) = \begin{pmatrix} \cos(\psi_L) & -\text{sen}(\psi_L) & 0 \\ \text{sen}(\psi_L) & \cos(\psi_L) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} B_{11} & 0 & 0 \\ 0 & B_{22} & B_{26} \\ 0 & B_{26} & B_{66} \end{pmatrix} \quad \mathbf{X}_L = (X_L \quad Y_L \quad \psi_L)^T$$

$$\mathbf{x}_L = (x_{1L} \quad x_{2L} \quad x_{6L})^T$$

Modelo LF de 1a ordem

◆ Vetor de estados modificado

- Novo x vale: $\mathbf{x}_L = (X_L \ Y_L \ \psi_L \ \dot{x}_{1L} \ \dot{x}_{2L} \ \dot{x}_{6L})^T$

◆ Aproximação \mathbf{A}_L para pequenos ângulos de yaw

$$\dot{\mathbf{x}}_L = \mathbf{A}_L \mathbf{x}_L + \mathbf{B}_L \mathbf{F}_T + \mathbf{A}_{EL} \mathbf{F}_{EL} + \mathbf{E}_L \cdot \boldsymbol{\omega}_L$$

$$\mathbf{A}_L(\psi) = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{T}(\psi) \\ \mathbf{0} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{A}_{EL} = \mathbf{B}_L = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{E}_L = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1} \end{pmatrix}$$

Aproximação para pequenos ângulos de Yaw

$$\mathbf{A}_L = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} \end{pmatrix}$$

Modelo HF

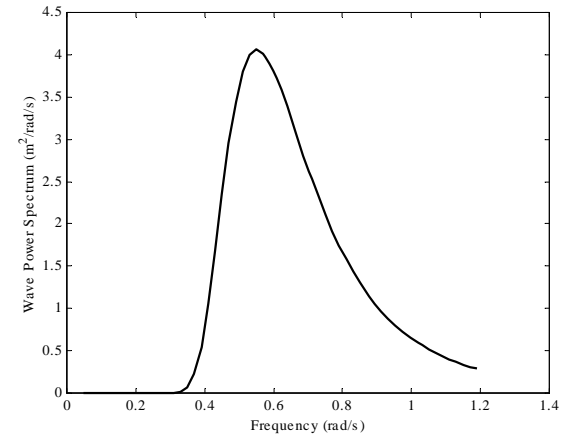
- ◆ Projetar um *Shaping Filter* que descreva de forma linear um espectro próximo ao encontrado em ondas marítimas
- ◆ Considerar movimento do navio com espectro igual ao das ondas marítimas
 - Aproximação pela segurança

Shaping Filter

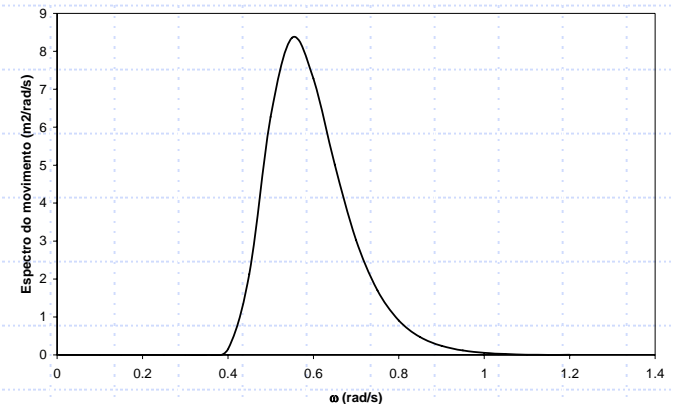
$$x_{iH}(s) = h(s) \cdot \omega_H(s)$$

$$P_{ii}(\omega) = |h(j\omega)|^2 \cdot P_{\omega_H \omega_H}(\omega) = |h(j\omega)|^2$$

Ondas



Navio



Modelo HF – Saelid (1983)

- ◆ Realização em espaço de estados
- ◆ Termo $2\zeta\omega_0\sigma_\omega$ embutido no ruído
 - Variação da freqüência de pico, amplitude e dispersão
 - Deve haver um ajuste de freqüência ω_0

$$\dot{\xi}_{x_i} = x_{iH}$$

$$\dot{x}_{iH} = -2\zeta\omega_0 x_{iH} - \omega_0^2 \xi_{x_i} + \omega_{iH}$$

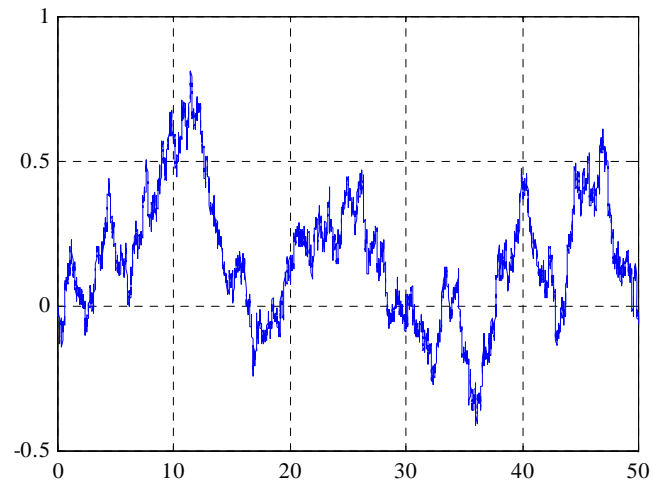
- ◆ Modelo completo para 3 graus de liberdade: $\dot{\mathbf{x}}_H = \mathbf{A}_H \mathbf{x}_H + \mathbf{E}_H \boldsymbol{\omega}_H$

$$\mathbf{A}_H = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ -\omega_0^2 \mathbf{I}_{3 \times 3} & -2\zeta\omega_0 \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{pmatrix} \quad \mathbf{E}_H = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{x}_H = \left(\xi_{x_1} \quad \xi_{x_2} \quad \xi_{x_3} \quad x_{1H} \quad x_{2H} \quad x_{6H} \right)^T$$

Modelo de Perturbações

- ◆ Todas as dinâmicas não modeladas
 - Integral do ruído branco
 - Variação lenta
 - ◆ Ajuste da matriz de covariância de $w(t)$
- ◆ Descrito pela equação $\dot{\mathbf{F}}_{EL} = \boldsymbol{\omega}_{EL}$



Modelo Completo para o FK

◆ O modelo completo possui dimensão 15 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{F}_T + \mathbf{E}\boldsymbol{\omega}$

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_L \\ \mathbf{x}_H \\ \mathbf{F}_{EL} \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{\omega} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\omega}_L \\ \boldsymbol{\omega}_H \\ \boldsymbol{\omega}_{FEL} \end{pmatrix} \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_L^{6 \times 6} & \mathbf{0}^{6 \times 6} & \mathbf{A}_{EL}^{6 \times 3} \\ \mathbf{0}^{6 \times 6} & \mathbf{A}_H^{6 \times 6} & \mathbf{0}^{6 \times 3} \\ \mathbf{0}^{3 \times 6} & \mathbf{0}^{3 \times 6} & \mathbf{0}^{3 \times 3} \end{pmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_L^{6 \times 3} \\ \mathbf{0}^{6 \times 3} \\ \mathbf{0}^{3 \times 3} \end{pmatrix} \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \mathbf{E}_L^{6 \times 3} & \mathbf{0}^{6 \times 3} & \mathbf{0}^{6 \times 3} \\ \mathbf{0}^{6 \times 3} & \mathbf{E}_H^{6 \times 3} & \mathbf{0}^{6 \times 3} \\ \mathbf{0}^{3 \times 3} & \mathbf{0}^{3 \times 3} & \mathbf{I}^{3 \times 3} \end{pmatrix}$$

Modelo do Navio para Baixa Frequência

$$\begin{aligned}
 (M + M_{11})\ddot{x}_{1L} - (M + M_{22})\dot{x}_{2L}\dot{x}_{6L} - (Mx_G + M_{26})\dot{x}_{6L}^2 + B_{11}\dot{x}_{1L} &= F_{1EL} + F_{1T} + \omega_{1L}; \\
 (M + M_{22})\ddot{x}_{2L} + (Mx_G + M_{26})\ddot{x}_{6L} + (M + M_{11})\dot{x}_{1L}\dot{x}_{6L} + B_{22}\dot{x}_{2L} + B_{26}\dot{x}_{6L} &= F_{2EL} + F_{2T} + \omega_{2L}; \\
 (I_Z + M_{66})\ddot{x}_{6L} + (Mx_G + M_{26})\ddot{x}_{2L} + (Mx_G + M_{26})\dot{x}_{1L}\dot{x}_{6L} + B_{66}\dot{x}_{6L} + B_{26}\dot{x}_{2L} &= F_{6EL} + F_{6T} + \omega_{6L}.
 \end{aligned}$$

Modelo em Espaço de Estados

$$\dot{X} = \cos(\psi_L)\dot{x}_1 - \text{sen}(\psi_L)\dot{x}_2$$

$$\dot{Y} = \text{sen}(\psi_L)\dot{x}_1 + \cos(\psi_L)\dot{x}_2$$

$$\dot{\psi}_L = \dot{x}_6$$

$$\ddot{x}_1 = \frac{N\dot{x}_2\dot{x}_6 + G\dot{x}_2^2 - B_{11}\dot{x}_1 + F_1}{P}$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{(G^2 - ZP)\dot{x}_1\dot{x}_6 + (GB_{26} - ZB_{22})\dot{x}_2 + (GB_{66} - ZB_{26})\dot{x}_6 + ZF_2 - GF_6}{ZN - G^2}$$

$$\ddot{x}_6 = \frac{G(P - N)\dot{x}_1\dot{x}_6 + (GB_{22} - NB_{26})\dot{x}_2 + (GB_{26} - NB_{66})\dot{x}_6 + GF_2 + NF_6}{ZN - G^2}$$

$$G = (Mx_G + M_{26})$$

$$N = (M + M_{22})$$

$$P = (M + M_{11})$$

$$Z = (I_Z + M_{66})$$

Ajuste de Frequência

- ◆ Estima a frequência modal de onda
- ◆ Objetivo
 - Melhora no desempenho do controle
 - Melhora das estimativas do vetor de estados
 - Frequência entra no modelo interno do Filtro de Kalman
- ◆ Estratégia
 - Uso de EKF-1 (Filtro de Kalman Estendido)
 - ◆ Uma única frequência é estimada
 - Mais robusto que o EKF-3
 - ◆ Três frequências são estimadas

Ajuste de frequência – EKF-1

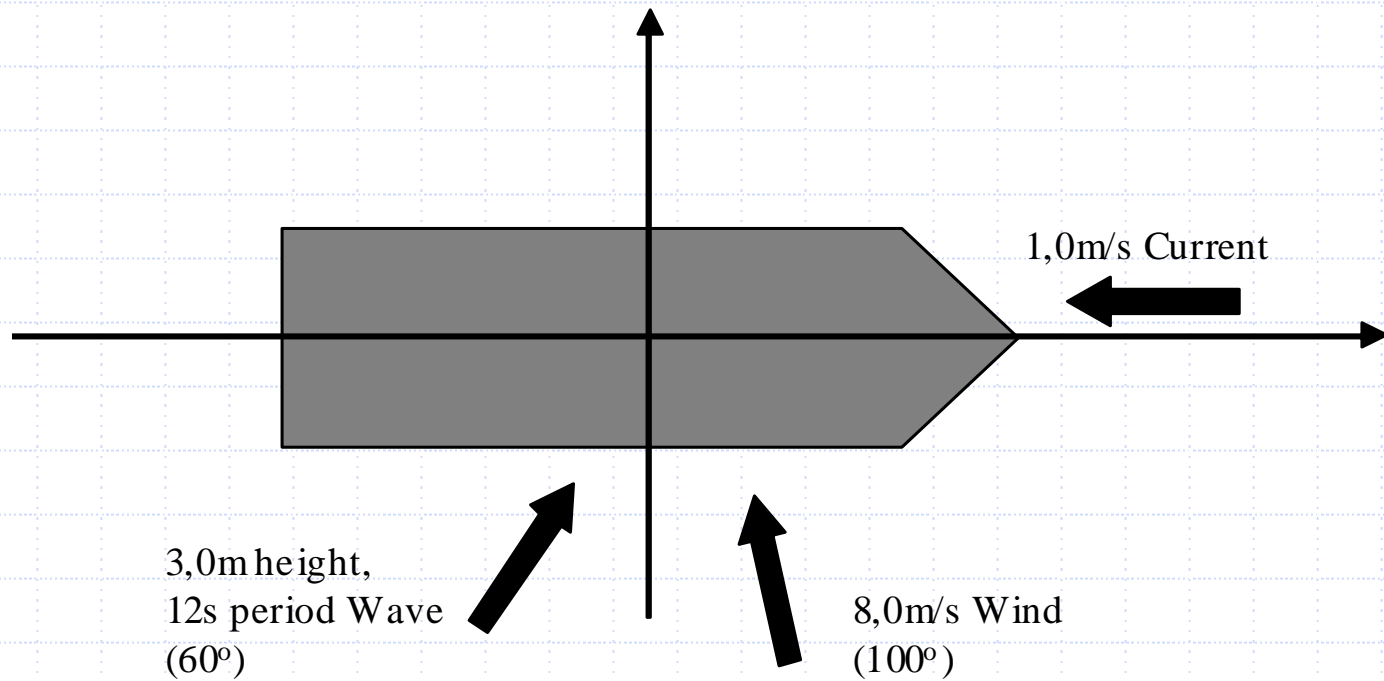
- ◆ Filtro de Kalman estendido
- ◆ Vetor de estados com estados referentes aos parâmetros a serem estimados (frequências)
- ◆ Frequência modal é admitida com variação lenta

$$\dot{w} = \omega_w$$

$$\mathbf{x}_{EKF} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_L \\ \mathbf{x}_H \\ \mathbf{F}_{EL} \\ w \end{pmatrix}$$

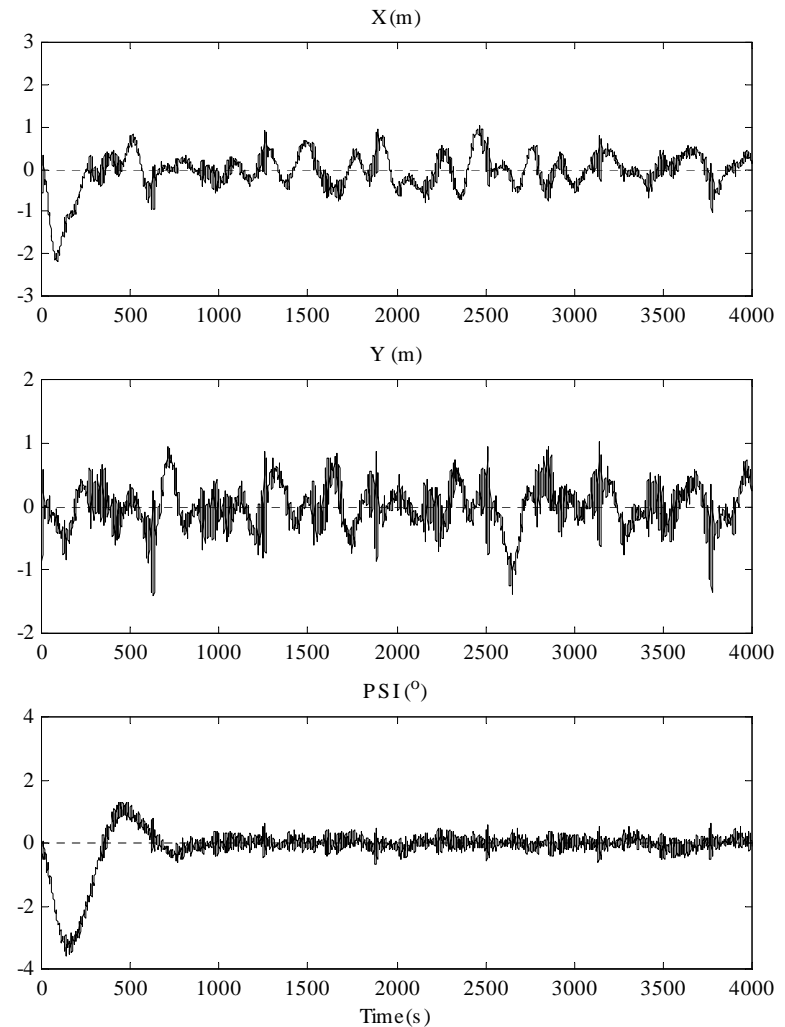
Simulação

- ◆ Condições presentes na Bacia de Campos



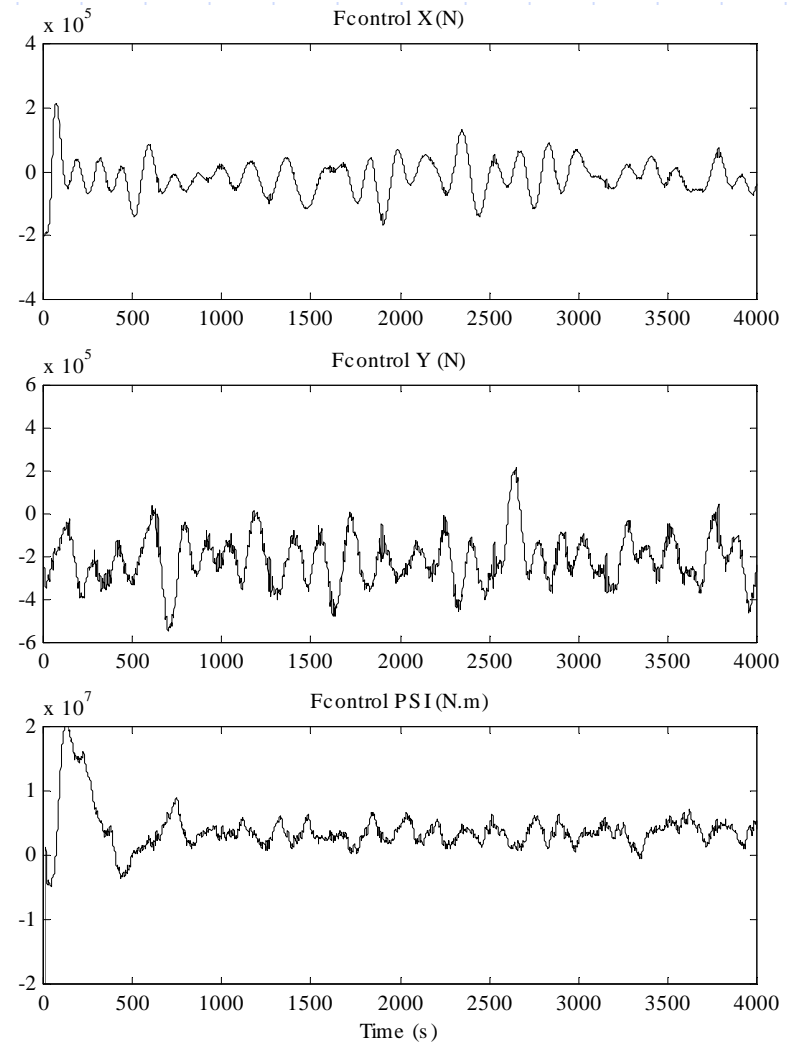
Simulação - Posição

- ◆ Movimentos da embarcação
- ◆ Erro estacionário nulo
- ◆ Amplitude de 2m
 - Pequena
- ◆ Transitório de 900s



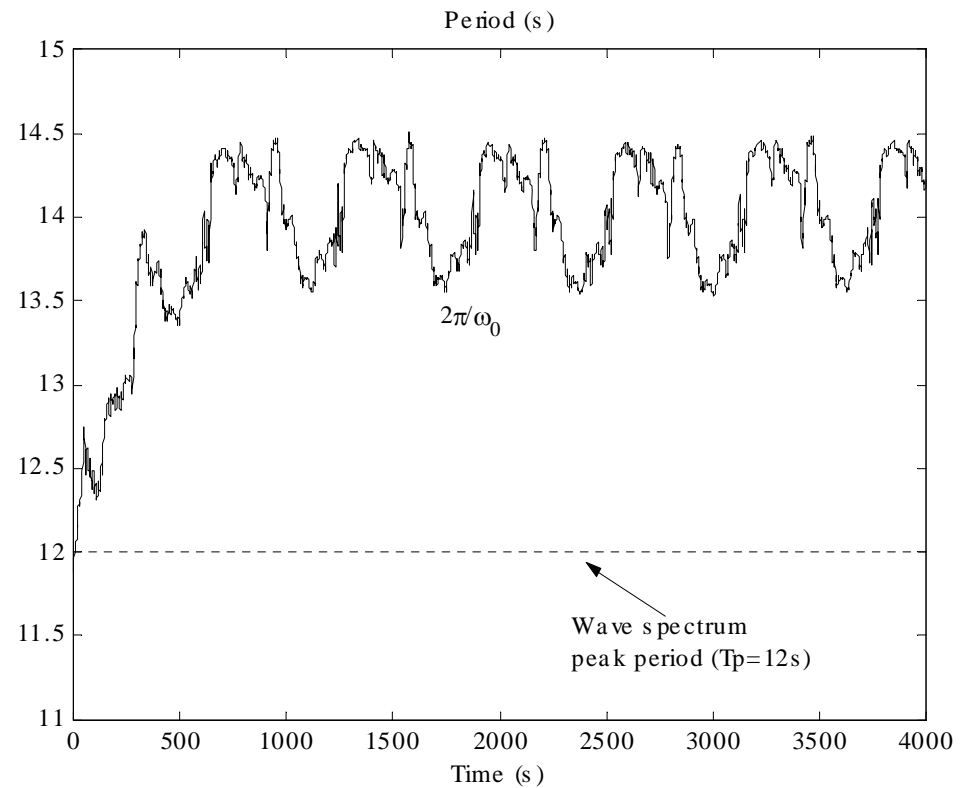
Simulação – Esforço de Controle

- ◆ Variações em baixa frequência



Simulação – Estimação de Frequência

- ◆ Oscilações
 - Entre 13,5s e 14,5s
- ◆ Período real
 - 12s



Conclusões

- ◆ Simulações numéricas
 - Mostraram ser possível
 - ◆ Uso de controle baseado em Filtro de Kalman
 - ◆ Adaptação de frequências
 - ◆ Maior robustez
 - ◆ Diversas situações ambientais contornáveis