

APLICAÇÃO DE CONTROLE EM NAVIOS E PLATAFORMAS OCEÂNICAS

Hernani Luiz Brinati

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Naval
Caixa Postal 61548 - São Paulo - Brasil

Resumo

São apresentados em linhas gerais alguns exemplos de aplicação de modernas técnicas de controle a veículos oceânicos. São examinados os problemas de identificação da manobrabilidade do navio, posicionamento dinâmico de plataformas semi-submersíveis, piloto automático de submarino e controle da instalação propulsora de embarcações militares. Em cada caso apresenta-se uma definição do problema, os modelos matemáticos adotados, uma síntese dos métodos utilizados e os aspectos principais da solução do problema, incluindo uma análise dos resultados. No problema de identificação utiliza-se um filtro adaptativo com base no filtro estendido de Kalman e um estimador de ruído adaptativo. No problema de posicionamento emprega-se controle ótimo determinístico com reconstrutor de estado, enquanto para o piloto do submarino utiliza-se controle ótimo estocástico. Para a instalação propulsora é empregado um controlador adaptativo auto-ajustável.

Automatic Control Systems in Ship and Offshore Platforms

Abstract

This paper presents a set of examples where modern control techniques are applied to ocean vehicles. The following problems are examined: identification of ship maneuverability, dynamic positioning system of semisubmersible platform, submarine autopilot design and control of naval ship propulsion plant. In each case it is presented the problem definition, the mathematical models involved, a synthesis of the control methods utilized and the main aspects of the problem solution. An adaptive filter, based on the extended Kalman filter with an adaptive process noise estimator, is used in the ship maneuverability identification problem. Optimal deterministic control theory is used in the dynamic positioning system study while the submarine autopilot design is based on optimal stochastic control technique. The propulsion plant controller is designed using the self tuning control method.

1. INTRODUÇÃO

Uma análise histórica do desenvolvimento da construção e operação de navios mostra uma tendência conservadora quanto ao emprego de novas tecnologias. Em particular, no que se refere ao emprego de sistemas de controle, houve um grande descompasso entre o setor naval e outros campos da engenharia.

Uma modificação dessa tendência se observa nos últimos 20 anos com a construção de navios mais sofisticados, quer mercantes, quer militares, e sobretudo com o desenvolvimento de plataformas "offshore"

Como uma tentativa de acompanhar este progresso e dar uma resposta a eventuais demandas na área, o Departamento de Engenharia Naval da EPUSP implantou uma linha de pesquisa referente ao estudo e aplicação de técnicas

de controle em navios e plataformas oceânicas.

Os trabalhos desenvolvidos envolveram o emprego de técnicas de controle ótimo, determinístico e estocástico, controle adaptativo auto-ajustável e identificação de sistemas.

Foram abordados os problemas de controle de manobras e propulsão de navios e submarinos, posicionamento dinâmico de plataformas semi-submersíveis e identificação de coeficientes hidrodinâmicos de navios.

Nas seções seguintes deste trabalho apresenta-se de forma sintética uma descrição dos principais problemas tratados.

2. IDENTIFICAÇÃO DE COEFICIENTES DE MANOBRABILIDADE DE NAVIOS

2.1 Definição do Problema

Para determinação das características de manobrabilidade de um navio e projeto do sistema de controle — piloto automático, é necessário se dispor do modelo matemático do movimento da embarcação.

Existem métodos analíticos e experimentais para determinação dos coeficientes do modelo, a partir de uma estrutura previamente estabelecida. Nos métodos analíticos o casco do navio é aproximado por elipsóides, enquanto que os métodos experimentais clássicos se baseiam em ensaios com modelos cativos.

Como ambos os métodos apresentam falhas na determinação dos coeficientes, surgiu a idéia de empregar a técnica de identificação de sistemas para obtenção do modelo. Neste caso, realizando-se ensaios com modelo (em escala reduzida) livre e medindo a trajetória e a velocidade do veículo, efetua-se a identificação dos coeficientes a partir de uma estrutura matemática já selecionada (Brinati, 1976, 77, 78).

A fig. 2.1 mostra os sistemas de coordenadas utilizados para representar o movimento do veículo no plano horizontal e as variáveis de interesse. O sistema SXY é fixo na terra, enquanto o sistema Gxy é solidário ao veículo; G é o centro de gravidade da embarcação; u e v são as componentes da velocidade de translação do navio, respectivamente, nas direções dos eixos Gx e Gy; r é a velocidade angular (de guinada); ψ o ângulo de aproamento e δ o ângulo de deflexão do leme. Como condição nominal, o navio se desloca com velocidade de translação u_0 na direção do eixo Gx e com velocidade de rotação nula. Nestas condições: $u = u_0, v = r = \psi = \delta = 0$.

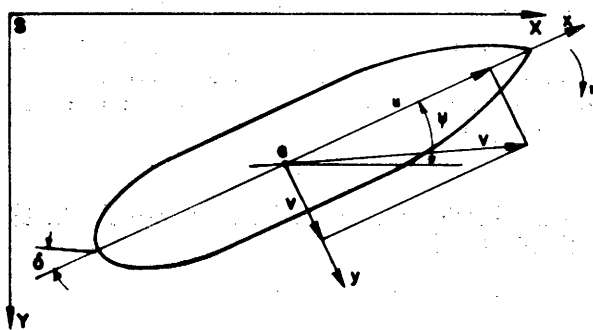


Fig. 2.1 Movimento do Navio

2.2 Modelo Matemático

Admite-se a seguinte estrutura para representação do movimento do navio:

$$\dot{\Delta}u = C_1 \Delta u + C_2 \Delta u^2 + C_3 \Delta u^3 + C_4 v^2 + C_5 r^2 + C_6 \delta^2 + C_7 rv + C_8 \quad (2.1)$$

$$\dot{v} = C_9 v + C_{10} r + C_{11} \delta + C_{12} \delta^3 + C_{13} rv^2 + C_{14} \delta v^2 + C_{15} \quad (2.2)$$

$$\dot{r} = C_{16} v + C_{17} r + C_{18} \delta + C_{19} \delta^3 + C_{20} rv^2 + C_{21} \delta v^2 + C_{22} \quad (2.3)$$

onde $\Delta u = u - u_0$ e C_j são os coeficientes do modelo.

Utiliza-se também as equações da cinemática:

$$\dot{X}_G = u \cos \psi - v \sin \psi \quad (2.4)$$

$$\dot{Y}_G = u \sin \psi + v \cos \psi \quad (2.5)$$

$$\dot{\psi} = r \quad (2.6)$$

Para observação do movimento do veículo admite-se que se realizem medidas das variáveis X_G, Y_G, ψ, u, v e r ; efetua-se também medidas do ângulo do leme δ .

Deseja-se determinar os coeficientes C_j a partir das observações do movimento do veículo.

O modelo acima descrito é o chamado "modelo de trabalho" utilizado na tarefa de identificação. Para efetuar a simulação do movimento emprega-se uma outra versão, chamado de "modelo de avaliação" baseado no conceito tradicional de derivadas hidrodinâmicas.

2.3 Técnicas Utilizadas

O problema de identificação é transformado num problema de estimação, tratando-se os parâmetros como variáveis de um estado "aumentado" e empregando-se um filtro adaptativo.

Este filtro consiste no filtro estendido de Kalman acoplado a um estimador adaptativo do ruído dinâmico.

Para ilustrar a aplicação da técnica, considere-se o modelo descrito pelas seguintes equações:

$$\dot{X}(t) = A X(t) + B U(t) + w(t) \quad t > t_0 \quad (2.7)$$

$$X(t_0) = X_0$$

$$Y(t_k) = h(X(t_k)) + v_k \quad (2.8)$$

onde X é o vetor de estado de ordem n , U é o vetor de controle de ordem m , Y é o vetor de observações de ordem r ; $X(t_0)$, $w(t)$ e v_k são variáveis aleatórias não correlacionadas com distribuição Gaussiana. A e B são matrizes dos coeficientes do modelo.

Define-se o estado aumentado X^a pela adição ao estado original dos parâmetros A_{ij} , B_{ij} .

Tem-se, então, um modelo não linear:

$$\dot{X}^a(t) = f(X^a, U, t) + w^a(t) \quad (2.9)$$

$$Y(t_k) = h(X^a(t_k)) + v_k \quad (2.10)$$

A estimação do estado X^a é obtida através da aplicação do filtro estendido de Kalman; nas equações que se seguem, utiliza-se X com o significado de X^a .

O estimador do estado \hat{X} e a matriz de

covariância do erro de estimação P satisfazem as equações:

$$\hat{X}(t_{k+1}/t_k) = \hat{X}(t_k/t_k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} f(\hat{X}(t/t_k), U, t) \quad (2.11)$$

$$P(t_{k+1}/t_k) = \phi(t_{k+1}, t_k) P(t_k/t_k) \phi^T(t_{k+1}, t_k) + Q(t_{k+1}) \quad (2.12)$$

$$\hat{X}(t_{k+1}/t_{k+1}) = \hat{X}(t_{k+1}/t_k) + K(t_{k+1}) [Y_{k+1} - h(\hat{X}(t_{k+1}/t_k), t_{k+1})] \quad (2.13)$$

$$P(t_{k+1}/t_{k+1}) = [I - K(t_{k+1})H(t_{k+1})] * P(t_{k+1}/t_k) \quad (2.14)$$

$$K(t_{k+1}) = P(t_{k+1}/t_k) H^T(t_{k+1}) * [H(t_{k+1})P(t_{k+1}/t_k)H^T(t_{k+1}) + R(k+1)]^{-1} \quad (2.15)$$

As matrizes ϕ e H usadas nas equações acima são as matrizes de transição e de observação, respectivamente, para o sistema linearizado. A matriz K representa o ganho do filtro.

A matriz de ruído Q da equação (2.12) é obtida através de um algoritmo adaptativo proposto por Jazwinski (1970), onde se impõe que os resíduos previstos sejam consistentes com a sua estatística.

O resíduo previsto é definido por:

$$rs(k+1/k) = Y(t_{k+1}) - E\{Y(t_{k+1}/Y_k)\} \quad (2.16)$$

em que E é o operador expectativa e

$$Y_k = Y(t_j), \quad j=1, 2, \dots, k$$

O valor de Q que produz o mais provável resíduo satisfaz a condição

$$rs^2(k+1/k) = E\{rs^2(k+1/k)\}; k=1, 2, \dots, n \quad (2.17)$$

O emprego do estimador adaptativo de ruído dinâmico tem por objetivo evitar o problema de divergência do filtro, que ocorre quando a matriz de covariância do erro de estimação torna-se muito pequena.

2.4 Aplicação da Técnica ao Problema de Manobrabilidade

A aplicação do procedimento de identificação exige uma análise preliminar da observabilidade do modelo. Mesmo que todas as variáveis do modelo original possam ser medidas, o aumento do estado, dependendo do número de parâmetros a serem identificados, pode conduzir a um modelo não observável. Isto é, mesmo que as observações sejam da melhor qualidade — baixo ruído de medida — e que o nível de ruído dinâmico seja pequeno, não se consegue estimar o estado.

Tendo em vista estas considerações, a i

dentificação dos coeficientes é efetuada em etapas, iniciando-se com um modelo linear do movimento do navio. De fato, se forem aplicados dos pequenos ângulos de deflexão ao leme, o movimento do veículo pode ser descrito sem a inclusão dos termos não lineares. Em seguida, com os coeficientes lineares já determinados, são realizadas manobras com maiores deflexões do leme para identificação dos parâmetros não lineares.

A pesquisa foi realizada através da simulação de manobras em computador digital. Nesta simulação foi empregado um modelo de avaliação que representa o melhor conhecimento do sistema. A implementação da técnica através de ensaios com modelos em escala reduzida não foi possível pela deficiência de recursos experimentais.

A primeira etapa, que consistiu na identificação de um modelo linear, é ilustrada a seguir.

Em vista das particularidades do modelo (equação 2.1 a 2.3), ao se adotar a versão linear ocorre um desacoplamento entre a 1ª equação e as duas outras. Trabalha-se, portanto, com o seguinte modelo linear:

$$\dot{v} = C_9 v + C_{10} r + C_{11} \delta + C_{15} \quad (2.18)$$

$$\dot{r} = C_{16} v + C_{17} r + C_{18} \delta + C_{22} \quad (2.19)$$

Para a identificação dos coeficientes deste modelo efetuou-se manobras tipo zigue-zague, as que mais contribuem para excitar a dinâmica do veículo, com ângulo de deflexão do leme limitado a 4 graus. Considerou-se apenas as observações de v e r , verificando-se uma boa observabilidade do modelo. Para níveis médios de ruídos dinâmicos e de medida e para estimativas iniciais razoáveis, os coeficientes são identificados com uma aproximação muito boa — desvios da ordem de 5%.

Na pesquisa realizada com os coeficientes não lineares, mesmo com um fracionamento realizado no modelo, não se obteve a mesma qualidade dos resultados.

3. POSICIONAMENTO DINÂMICO DE PLATAFORMA SEMISUBMERSÍVEL

3.1 Definição do Problema

Um veículo marítimo qualquer, flutuando no mar, está sujeito à ação dos elementos ambientais (ventos, ondas e correntes) que induzem movimentos e consequente alteração de sua posição. Em algumas atividades, como na prospecção de petróleo, este movimento do veículo é indesejável e deve ser minimizado.

O sistema convencional de amarras, utilizado para este fim, perde sua eficiência para profundidades acima de 300m. Nestas condições uma alternativa é o emprego de sistemas de posicionamento dinâmico, em que a ação dos elementos ambientais é contrabalanceada pela atuação de propulsores convenientemente distribuídos no veículo. O sistema de posicionamento dinâmico de um veículo inclui, além dos

propulsores, sensores, que levantam informações sobre a posição do veículo e as condições ambientais, e um controlador que, com base nas observações dos sensores e numa estratégia de controle, define a atuação dos propulsores.

O problema de posicionamento dinâmico foi examinado para uma plataforma semisubmersível que está ilustrada na fig. 3.1 com os sistemas de referência utilizados para descrever o movimento (Donha, 1983-84).

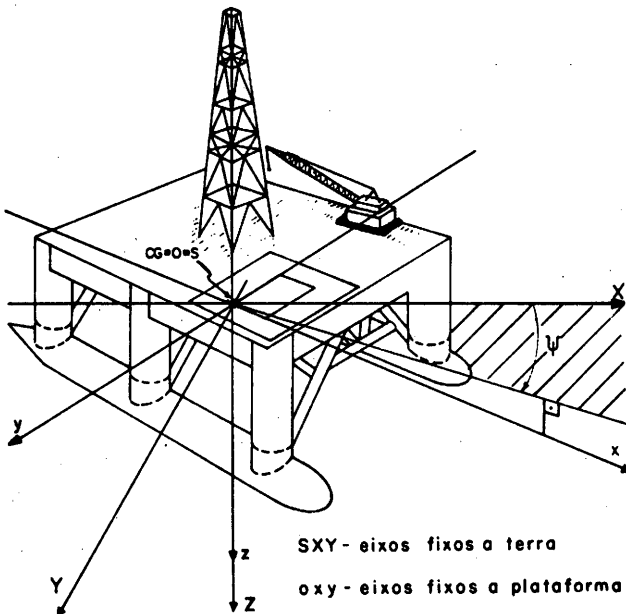


Fig. 3.1 Movimento da Plataforma

3.2 Modelo Matemático

Admite-se o seguinte modelo para representação do movimento do veículo no plano horizontal:

$$(m - X_u) \dot{u} = X_u u + F_{ex} + X_c \quad (3.1)$$

$$(m - Y_v) \dot{v} = Y_v v + F_{ey} + Y_c \quad (3.2)$$

$$(I_z - N_r) \dot{r} = N_r r + M_{ez} + N_c \quad (3.3)$$

onde m é a massa do veículo, I_z o momento de inércia em torno do eixo Oz ; X_u , Y_v e N_r são os coeficientes de massa adicionada; X_u , Y_v e N_r são os coeficientes de amortecimento; F_{ex} , F_{ey} e M_{ez} representam os esforços externos que atuam sobre o veículo; X_c , Y_c e N_c representam os esforços de controle obtidos através da ação dos propulsores.

Os esforços externos englobam a ação de ventos, correntes e ondas sobre o veículo. Os esforços de ventos e correntes são considerados constantes para o intervalo de tempo em que o ângulo de incidência e a velocidade dos fluidos permaneçam invariáveis. Os esforços de ondas, de natureza oscilatória, são introduzidos no modelo através de um sinal-amostra. A potência deste sinal é função da altura

significativa de onda e do ângulo de incidência. Portanto, os esforços de ondas são considerados conhecidos para o intervalo em que a altura significativa e o ângulo de incidência permaneçam invariáveis.

Ao conjunto das equações (3.1) e (3.3) são acrescentadas as equações (2.4) a (2.6) para definir a posição e aprofundamento do veículo. Para observação do movimento do veículo admite-se que se realizem medidas das variáveis X_G , Y_G e ψ .

O modelo acima descrito é aquele utilizado para projeto do sistema de controle. Para simulação do movimento da plataforma emprega-se um modelo completo que envolve termos não lineares.

3.3 Técnicas Utilizadas

A solução do problema de controle da plataforma foi desenvolvida utilizando-se métodos de controle ótimo determinístico, como descrito a seguir.

Considere-se o sistema descrito pelas seguintes equações:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + F(t) \quad (3.4)$$

$$Y(t) = DX(t) \quad (3.5)$$

onde $F(t)$ é o vetor de esforços externos e $D(t)$ é a matriz de observação.

Deseja-se determinar o vetor de controle $U(t)$ que, através de uma realimentação do estado, minimize um índice de desempenho quadrático:

$$ID = \int_0^t [X^T(t)R_1X(t) + U^T(t)R_2U(t)] dt \quad (3.6)$$

onde R_1 é uma matriz simétrica semidefinida positiva e R_2 é uma matriz simétrica definida positiva.

A solução ótima $U^0(t)$ é dada por (Bryson, 1969):

$$U^0(t) = R_2^{-1} B^T R(t) X(t) - R_2^{-1} B^T K(t) \quad (3.7)$$

onde R e K satisfazem as equações:

$$\dot{R} = -RA - A^T R + RBR_2^{-1} B^T R - R_1 \quad (3.8)$$

$$\dot{K} = (RBR_2^{-1} B^T - A^T) K - RF \quad (3.9)$$

A solução acima é aplicável quando todas as variáveis de estado são acessíveis. Quando nem todas as variáveis são medidas, utiliza-se um observador dinâmico para reconstruir o estado. Neste caso recorre-se ao "Princípio da Separação" que estabelece que a lei de controle ótima é obtida pelo mesmo controlador linear definido pela equação (3.7), operando, porém, sobre o estado reconstruído $\hat{X}(t)$ (Kwarkernaak, 1972); isto é:

$$U^0(t) = -R_2^{-1} B^T (R\hat{X}(t) + K(t)) \quad (3.10)$$

Para reconstrução do estado é utilizada a formulação do observador de mesma ordem

(Luenberger, 1970), obtendo-se a seguinte expressão para o cálculo do vetor de estado estimado:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{X}}(t) = & A \hat{X}(t) + BU(t) + \\ & + K_1(Y(t) - D \hat{X}(t)) + F(t) \end{aligned} \quad (3.11)$$

onde K_1 é a matriz de ganhos do observador, que permite controlar os erros de estimativa do observador. Foi utilizada na pesquisa (Do nha, 1983) a técnica de alocação de polos para determinação da matriz K_1 .

3.4 Aplicação das Técnicas ao Problema de Posicionamento Dinâmico

Para definição dos ganhos do controlador considerou-se mais importante a plataforma manter a posição desejada do que o consumo de energia (controle) empregado nesta tarefa. Por isto penalizou-se mais fortemente os desvios em posição e velocidade, atribuindo-se maiores valores para a matriz R_1 do que para R_2 .

Na modelagem do problema admitiu-se que os esforços externos eram independentes do estado. Como eles dependem, na realidade, do ângulo de incidência, a solução é tanto mais correta quanto mais próxima da realidade estiver aquela hipótese. Para garantir esta condição, aplicou-se uma penalização maior às variáveis: ângulo de aproamento, ψ , e velocidade de de guinada, r .

Um estudo do sistema controlado, obtido a partir da matriz de ganhos, mostrou que ele é estável — todos os autovalores têm parte real negativa — e tem um amortecimento satisfatório.

A solução do controlador contém uma parcela de pré-alimentação que depende das condições externas. Esta parcela é determinada, a priori, a partir da leitura das condições ambientais.

Para projeto do reconstrutor de estado, verificou-se inicialmente a observabilidade do sistema com as medidas da posição e do aproamento. Em seguida, impõe-se que a dinâmica do observador não influia no desempenho do regulador. Assim, exigiu-se que a constante de tempo dos polos dominantes fosse cerca de 5 vezes menor que a menor constante de tempo do sistema controlado.

O problema de controle foi resolvido admitindo ausência de restrição para o vetor de controle. Na prática, porém, existe um limite para os empuxos e respectivo momento disponíveis para posicionamento da plataforma. Para respeitar esta condição, quando o valor do controle demandado supera ao limite, utiliza-se o valor máximo fornecido pelos propulsores. Nos testes realizados constatou-se que apenas durante um curto período, quando os desvios iniciais são pronunciados, é que os esforços demandados de controle ultrapassam os limites.

A avaliação do controlador foi realizada através de uma série de testes, empregando-se um modelo matemático não linear para simular o movimento da plataforma. O desempenho do

sistema de controle foi considerado satisfatório nestes testes.

4. PILOTO AUTOMÁTICO DE SUBMARINOS

4.1 Definição do Problema

Além dos problemas de controle de movimento relacionados com manobras no plano horizontal, semelhantes aos de um navio de superfície, o projeto do sistema de controle de um submarino deve levar em consideração o movimento do veículo no plano vertical e seus requisitos de missão.

Um submarino militar convencional deve ser projetado para atender dois distintos requisitos, envolvendo manobras no plano vertical. O primeiro, chamado de manutenção de cota periscópica, corresponde ao movimento do veículo próximo a superfície livre. Nesta situação, o submarino pode içar as tubulações de admissão e descarga permitindo a utilização dos motores Diesel, enquanto as baterias elétricas são recarregadas. Operando nesta condição, o veículo, sujeito a esforços de natureza estocástica provenientes das ondas do mar, deve manter-se na profundidade desejada com pequeno ângulo de caturro ("pitch"), para não provocar desconforto na tripulação.

A segunda missão consiste na realização de manobras relativamente rápidas de mudança de profundidade. O submarino, sujeito a ação de correntes, deve realizar essas manobras seguindo trajetórias adequadas, de modo a evitar ângulos de caturro e erros de profundidade ("overshoot") excessivos.

Para contrabalançar os esforços ambientais (ondas e correntes) e realizar as missões acima mencionadas, os submarinos dispõem de superfícies de controle (lemes horizontais), cuja deflexão gera força e momentos sobre o veículo.

O Piloto Automático de um submarino é um sistema de controle que, com base nas informações provenientes de sensores, determina a ação dos lemes, de modo que o veículo possa cumprir uma missão pré-especificada.

Os requisitos acima definidos estabelecem que o piloto automático deve incorporar duas funções de controle: (i) a de regulador ótimo para a missão de manutenção de profundidade; (ii) a de traqueamento para a missão de mudança de cota quando se especifica uma trajetória de referência para o veículo.

A fig. 4.1 mostra os sistemas de referência utilizados para descrever o movimento do submarino no plano vertical e as variáveis de interesse; u é a velocidade de avanço, w é a velocidade de arfagem, θ é o ângulo de caturro e α a velocidade angular de caturro; δ_v e δ_r são os ângulos de deflexão dos lemes de ré e de vante, respectivamente; u_c representa a velocidade de corrente.

4.2 Modelo Matemático

Adotou-se a seguinte estrutura para o mo

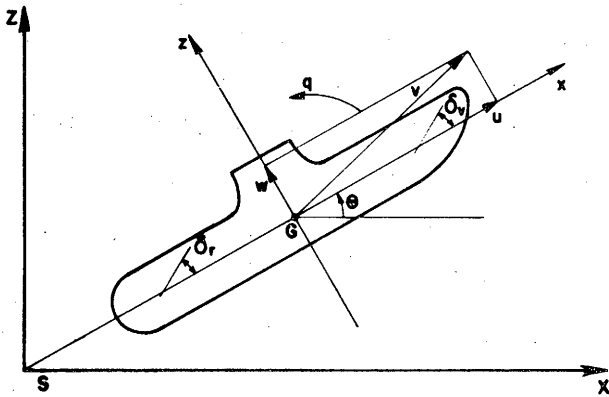


Fig. 4.1 Movimento do Submarino e Sistemas de Referência

delo matemático utilizado para representa o movimento do submarino no plano vertical (Gueler, 1987):

$$m(\dot{u}-qw) = X_c + X_p + X_\ell + X_{ext} \quad (4.1)$$

$$m(\dot{w}+qu) = Z_c + Z_\ell + Z_{ext} \quad (4.2)$$

$$I_{yy} \dot{q} = M_c + M_\ell + M_{ext} \quad (4.3)$$

$$I_{pp} \dot{\Omega} = Q_m - Q_p \quad (4.4)$$

$$\dot{X}_G = u \cos \theta - w \sin \theta \quad (4.5)$$

$$\dot{Y}_G = u \sin \theta + w \cos \theta \quad (4.6)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (4.7)$$

onde I_{yy} é o momento de inércia do veículo em relação ao eixo Cy , I_{pp} é o momento de inércia virtual do sistema propulsor, Ω é a velocidade angular do eixo propulsor e Q é o torque que atua no eixo; os índices c , p , ℓ e m referem-se, respectivamente, a casco, propulsor, leme e motor; o índice ext se refere a esforços externos, que incluem a ação de ondas e de correntes.

O modelo completo do movimento é não linear e inclui um grande número de termos, sendo utilizado como um modelo de avaliação para manobras genéricas. Para manobra de manutenção de profundidade (Gueler, 1987), porém, considerou-se aceitável o emprego do seguinte modelo linear:

$$(m+Z_w)\dot{w} = Z_w w + Z_q q + Z_{\delta v} \delta v + Z_{\delta r} \delta r + Z_o(t) \quad (4.8)$$

$$(I_{yy} + M_o)\dot{q} = M_w w + M_q q + M_{\delta v} \delta v + M_{\delta r} \delta r + M_o(t) \quad (4.9)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (4.10)$$

$$\dot{h} = -w - u_o \theta \quad (4.11)$$

onde h é o erro em profundidade, u_o é a velocidade de avanço, suposta constante; Z_w e M_o são coeficientes de massa adicionada, Z_w , Z_q , M_w e M_q são coeficientes de amortecimento; $Z_{\delta v}$, $Z_{\delta r}$, $M_{\delta v}$ e $M_{\delta r}$ são os coeficientes de esforço

dos lemes de vante e de ré; Z_o e M_o representam os esforços devido às ondas.

Os esforços devido às ondas são obtidos a partir da integração das forças atuantes sobre elementos cilíndricos distribuídos ao longo do casco. As forças em cada elemento são calculadas pela teoria de Froude Krilov para uma dada frequência de onda, obtendo-se assim as funções de transferência esforços-amplitude de onda. A seguir, para um dado espectro de mar, aplicam-se as funções de transferência para determinação da densidade de espectro da força de arfagem e do momento de caturro.

Para o cálculo do efeito de corrente, admite-se que ela não varie com o tempo e com a profundidade. O efeito da corrente é introduzido através da correção das componentes u e w do submarino que entram no cálculo dos esforços hidrodinâmicos.

O modelo de trabalho empregado no projeto do piloto automático para a manobra de mudança de profundidade é uma versão linearizada do modelo definido pelas equações (4.1) a (4.7).

4.3 Técnicas Utilizadas

O projeto do piloto automático foi desenvolvido usando as técnicas de controle ótimo estocástico. Na realidade, o piloto automático se baseia na solução de dois problemas, o do regulador ótimo e o de traqueamento.

a) Regulador ótimo

Considere-se o sistema estocástico:

$$\dot{X}(t) = f(X(t), U(t), t) + G(t)w(t), \quad t > t_0 \quad (4.12)$$

$$X(t_0) = X_0$$

$$Y(t) = h(X(t), t) + v(t), \quad t > t_0 \quad (4.13)$$

onde f é um vetor de funções não lineares, G é uma matriz de funções contínuas; $X(t_0)$, $w(t)$ e v_k são variáveis aleatórias não correlacionadas com distribuição gaussiana.

Deseja-se determinar o funcional

$$U(t) = f(Y(t), [t_0 \leq \tau \leq t], t_0 \leq t \leq t_f) \quad (4.14)$$

que minimiza o índice de desempenho probabilístico

$$ID_1 = E \left\{ \int_{t_0}^{t_f} [X^T(t) R_1(t) X(t) + U^T(t) R_2 U(t)] dt \right\} \quad (4.15)$$

onde E indica o operador expectativa.

A solução é determinada utilizando-se o princípio de separação (Gelb, 1974) que estabelece que a solução do problema de controle ótimo estocástico é obtida pela aplicação do controle ótimo determinístico sobre a estimativa do estado $\hat{X}(t)$.

O controlador ótimo determinístico é obtido conforme mostrado na seção 3.3, considerando apenas a parcela de realimentação aplicada

ao sistema linearizado.

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t) \quad (4.16)$$

onde:

$$A(t) = \left. \frac{\partial F(X(\tau), U(\tau), \tau)}{\partial X} \right|_{\tau=t} \quad (4.17)$$

$$B(t) = \left. \frac{\partial F(X(\tau), U(\tau), \tau)}{\partial U} \right|_{\tau=t} \quad (4.18)$$

Tem-se, portanto:

$$U(t) = -L(t) X(t) \quad (4.19)$$

$$L(t) = R_2^{-1} B^T(t) R(t) \quad (4.20)$$

onde $R(t)$ satisfaz a equação (3.8).

A estimativa do estado é realizada, empregando-se o filtro estendido de Kalman, conforme apresentado na seção 2.3. Foi utilizada conjuntamente a técnica de compensação do modelo dinâmico, já aplicada em trabalho anterior de pilotagem automática (Cruz, 1981).

O principal objetivo desta técnica é minimizar o efeito de modelagem deficiente do sistema evitando uma divergência do filtro. Sua aplicação consiste na inclusão de uma parcela às equações de estado. Tem-se, assim:

$$\dot{X}(t) = a_m(t) + a_{nm}(t) \quad (4.21)$$

onde a_m é o vetor de acelerações modeladas e a_{nm} o vetor de acelerações não modeladas.

As acelerações não modeladas são aproximadas localmente por um processo de primeira ordem de Gauss-Markov;

$$\dot{a}_{nm} = -C_{nm} a_{nm} + \bar{w}(t) \quad (4.22)$$

onde C_{nm} é uma matriz diagonal de coeficientes arbitrados a priori, e $\bar{w}(t)$ uma variável aleatória com distribuição gaussiana.

As componentes do vetor de acelerações não modeladas são acrescentadas ao estado original X , definindo um estado aumentado X^a . Desta forma, emprega-se o filtro estendido de Kalman para estimar simultaneamente as acelerações não modeladas e o estado do sistema.

Como método alternativo propõe-se (Gueler, 1987) a aplicação de um filtro simplificado. Este filtro é utilizado quando se pode observar todas as variáveis de estado do sistema, pois cada variável é estimada independentemente.

A aplicação deste procedimento exige que se realize um grande número N de medidas, Y_j^i , de cada variável X_i numa vizinhança $(t_k - \epsilon, t_k + \epsilon)$, com $2\epsilon \ll t_k - t_{k-1}$, em torno de um instante de controle t_k . Nestas condições tem-se:

$$\hat{x}_i(t_k) = \left(\sum_{l=1}^N Y_l^i \right) N$$

b) Traqueamento

Considere-se o sistema representado pelas equações (4.12) e (4.13). Admita-se também a existência de uma trajetória de referência, cuja dinâmica é regida por:

$$\dot{X}_r = F(x_r(t), U_r(t), t), \quad t > t_0 \quad (4.23)$$

onde U_r é o vetor de controle de referência.

Deseja-se obter o funcional

$$U(t) = f(Y(\tau), X_r(\tau), t_0 \leq \tau \leq t, t_0 \leq t \leq t_f) \quad (4.24)$$

que minimiza o índice de desempenho

$$ID_2 = E \left\{ \int_{t_0}^{t_f} \left[[X(t) - X_r(t)]^T R_1'(t) [X(t) - X_r(t)] + U^T(t) R_2'(t) U(t) \right] dt \right\} \quad (4.25)$$

Analogamente ao problema de regulação estocástica, aplica-se o princípio da separação. Para solução do problema de controle, lineariza-se a equação do sistema para obter a trajetória de referência.

$$\dot{X}_r = A_r(t) X_r(t) + B_r(t) U_r(t) \quad (4.26)$$

onde A_r e B_r são obtidas de maneira análoga a A e B .

Considere-se os desvios entre a trajetória real e a de referência

$$\delta X(t) = X(t) - X_r(t) \quad (4.27)$$

Admitindo-se que $A_r(t) = A(t)$ e $B_r(t) = B(t)$, e utilizando as equações (4.16) e (4.26) chega-se a:

$$\delta \dot{X}(t) = A(t) \delta X(t) + B(t) U(t) \quad (4.28)$$

em que $\delta U(t) = U(t) - U_r(t)$.

Assim, considerando as equações (4.28) e (4.25), o problema de traqueamento foi transformado num problema de regulador ótimo para determinação do controle de desvio δU . O controle total é dado por:

$$U = U_r + \delta U \quad (4.29)$$

4.4 Aplicação das Técnicas ao Projeto do Piloto Automático

Conforme mencionado nas seções anteriores, o piloto automático engloba duas funções de controle distintas, para as missões de manutenção de cota periscópica e para mudança de profundidade. Aplicou-se formalmente o mesmo tratamento para desenvolvimento das duas funções, através da obtenção de um controle de referência e de um controlador linear (de desvios). No caso de manutenção de cota o controle de referência é nulo. O modelo de trabalho utilizado para projeto do piloto automático considera apenas os movimentos de arfagem e caturro, resultando em um estado com quatro componentes, duas para deslocamento e duas para velocidade.

Na determinação da função para manutenção de cota empregou-se o filtro estendido de Kalman, em conjunto com a técnica de compensação do modelo dinâmico, para estimar o estado do sistema. Considerou-se neste caso apenas as medidas do erro em profundidade e do ângulo de caturro, tendo-se verificado, preliminarmente, a observabilidade do modelo determi-

nístico com estas medidas. O ajuste do ritmo de estimação é efetuado através de um ajuste da matriz de covariância do ruído de processo Q , e dos coeficientes de correlação das acelerações não modeladas. O desempenho do estimador é avaliado por meio de comparação entre as acelerações não modeladas estimadas e reais e entre o erro de profundidade estimado e o real.

Para a função de mudança de profundidade o piloto automático utiliza o filtro simplificado exigindo, portanto, a leitura das quatro variáveis de estado que definem o modelo de trabalho.

Para o projeto do controlador linear das duas funções do piloto automático, efetuou-se um ajuste das matrizes peso R_1 e R_2 de forma análoga ao que foi feito na seção 3.4. O ajuste, neste caso, é feito por uma comparação dos valores RMS ("root square mean value") das variáveis de estado observadas. Procede-se em seguida a um exame dos autovalores do sistema controlado resultante; verifica-se, em ambos os casos, que o sistema é estável com valores aceitáveis de amortecimento. As matrizes de ganho do controlador obtidas são diferentes para as funções de manutenção de cota e de acompanhamento da trajetória de referência.

O piloto automático incorpora um procedimento para geração da trajetória de referência na manobra de mudança de profundidade. Este procedimento foi definido a partir da identificação de três fases distintas na manobra: mergulho, quando o submarino assume um ângulo de caturro crescente, descida, quando o ângulo fica constante e retomada, quando o veículo recupera novamente o ângulo de caturro nulo. A estas fases da trajetória estão associadas leis de deflexão dos lemes. Estas leis são obtidas a partir de simulações de manobra do veículo, determinando-se, assim, a priori o controle de referência.

Foram realizados diversos testes com o piloto automático para as duas missões específicas e para diferentes condições de esforços ambientais — ondas e correntes. O desempenho do piloto automático foi considerado satisfatório.

Como complemento da pesquisa analítico-computacional, foi desenvolvido e testado um protótipo elementar do piloto automático (Gueler, 1987).

5. CONTROLE ADAPTATIVO DE INSTALAÇÕES PROPULSORAS

5.1 Definição do Problema

O projeto do sistema de controle para instalações propulsoras de embarcações militares deve ser conduzido de modo a satisfazer dois requisitos básicos: (i) em regime permanente manter constante a velocidade do navio; (ii) em regime transitório garantir a aceleração do navio em tempo mínimo ou permitir a sua parada em mínima distância.

Os sistemas de controle convencionais, empregados para esta finalidade, são projetados para condições determinísticas, com base em uma condição nominal de operação do navio.

Como um navio raramente opera nesta condição nominal, estando adicionalmente sujeito a perturbações estocásticas, o controlador convencional, mesmo com uma determinada robustez, não manterá uma boa qualidade de resultados durante todo seu período de operação.

Nestas condições é recomendável o emprego de um controlador adaptativo, isto é, com ganhos que se ajustem às alterações que ocorrem no sistema ou nas condições ambientais.

A pesquisa desenvolvida por Morishita (1986) examinou a aplicação de controlador adaptativo auto-ajustável a uma instalação propulsora Diesel com hélice de passo variável. O controle da instalação se faz por meio da atuação sobre o passo demandado do hélice e a rotação demandada do motor — que está relacionada com a injeção de combustível. A fig. 5.1 mostra um esquema da instalação considerada.

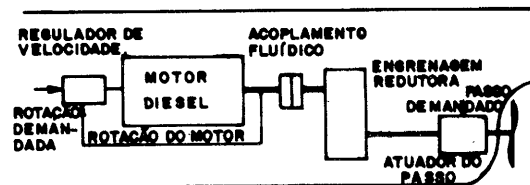


Fig. 5.1 Esquema do Sistema Propulsor

5.2 Modelo Matemático

As equações do movimento que regem a operação da instalação propulsora são as seguintes:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{T(N_h, V, p)(1 - t_h) - R(V)}{M} \quad (5.1)$$

$$\frac{dN_h}{dt} = \frac{Q_a(N_m, N_h) - RRD - Q_h(N_h, V, p)}{2\pi J_h} \quad (5.2)$$

$$\frac{dN_m}{dt} = \frac{Q_m(F_1, N_m) - Q_a(N_m, N_h)}{2\pi J_m} \quad (5.3)$$

$$\frac{dp}{dt} = g(p, p_u) \quad (5.4)$$

$$\frac{dF_1}{dt} = \frac{F(N_m, N_u) - F_1}{T_m} \quad (5.5)$$

onde V é a velocidade do navio, N_h a rotação do hélice, N_m a rotação do motor, N_u a rotação demandada, p é o passo do hélice e p_u o passo demandado, F_1 é a posição da cremalheira do motor e F a posição determinada pelo regulador de velocidade; T e Q_h são, respectivamente, o empuxo e o torque do propulsor; Q_a é o torque do acoplamento fluídico e Q_m o do motor; R é a resistência ao avanço do navio; M é a massa do navio, J_h é o momento de inércia

do conjunto acoplado ao eixo do hlice e J_m do conjunto acoplado ao eixo do motor; t_h é o coeficiente de redução do empuxo, RRD a razão e T_m a constante de tempo do regulador de velocidade do motor.

O conjunto das equações (5.1) a (5.5) ex-prime um modelo determinístico para a dinâmica da instalação propulsora. Devem ser incorporadas ao modelo parcelas estocásticas que representam as perturbações a que está sujeito o sistema. Estas perturbações são provocadas pela ação das ondas e pelo próprio movimento do navio (caturro, ou balanço) e atuam sobre a dinâmica da velocidade do navio e da rotação do hlice.

Para definição do modelo de trabalho, a ser empregado no projeto do controlador, são efetuadas as seguintes simplificações: (i) despreza-se a variação do escorregamento entre os eixos do motor e do hlice; (ii) despreza-se o atraso do movimento da cremalheira, uma vez que sua constante de tempo é muito pequena em relação às outras do sistema. Com estas simplificações, resultam três equações de estado que, depois da linearização, fornecem o modelo de estado. Este modelo, em seguida, é discretizado e colocado na forma canônica de entrada e saída.

5.3 Técnicas Utilizadas

Considere-se o sistema descrito por:

$$A(z^{-1})Y(k) = B(z^{-1})U(k-d) + C(z^{-1})r(k) + D \quad (5.6)$$

onde Y é o vetor de saída de ordem m , U é o vetor de (entrada) controle de ordem m ; r é um vetor, de ordem m , de ruído branco de covariância Q_r ; A , B e C são matrizes $m \times m$ de polinômios com coeficientes desconhecidos; D é um vetor de ordem m de constantes, d é um atraso do sistema; z^{-1} é o operador de atraso unitário.

Deseja-se determinar o vetor de controle que minimiza o índice de desempenho

$$ID = E\{ ||p(z^{-1})Y(k+d) - R(z^{-1})W(k)||^2 + ||Q'(z^{-1})U(k)||^2 \} \quad (5.7)$$

onde W é o vetor de referência, de ordem m ; Q' e R são matrizes $m \times m$ de polinômios e p é um polinômio; $||X^2|| = X^T X$.

A utilização do índice de desempenho dado por (5.7) envolve a previsão do vetor de saída, d passos adiante. O previsor ótimo $Y(k+d/k)$ pode ser obtido através da minimização da expectância de:

$$E\{ ||Y(k+d) - \hat{Y}(k+d/k)||^2 \} \quad (5.8)$$

e resulta em:

$$\hat{Y}(k+d/k) = \tilde{C}^{-1}(z^{-1}) [\tilde{F}'(z^{-1})Y(k) + \tilde{E}'(z^{-1})B(z^{-1})U(k) + \tilde{E}'(z^{-1})D] \quad (5.9)$$

onde:

$$C(z^{-1}) = A(z^{-1})E'(z^{-1}) + z^{-d}F'(z^{-1})$$

$$\tilde{E}'(z^{-1})F'(z^{-1}) = \tilde{F}'(z^{-1})E'(z^{-1});$$

$$\det \tilde{E}'(z^{-1}) = \det E'(z^{-1}) \text{ e } \tilde{E}'(0) = I$$

$$\tilde{C}(z^{-1}) = \tilde{E}'(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-d}F'(z^{-1})$$

A minimização do índice de desempenho em relação ao vetor de controle conduz à seguinte equação (Koivo, 1980):

$$\tilde{F}(z^{-1})Y(k) + \tilde{G}(z^{-1})U(k) + \tilde{H}(z^{-1})W(k) + \tilde{D} = 0 \quad (5.10)$$

onde:

$$\tilde{F}(z^{-1}) = \sum_{j=0}^{d-1} p_j \tilde{F}'_{d-j}$$

$$\tilde{G}(z^{-1}) = \sum_{j=0}^{d-1} p_j z^{-j} \tilde{E}'_j(z^{-1})B(z^{-1}) + \tilde{C}(z^{-1})Q(z^{-1})$$

$$\tilde{H}(z^{-1}) = \tilde{C}(z^{-1})R(z^{-1})$$

$$\tilde{D} = \sum_{j=0}^{d-1} p_j \tilde{E}'_{j-d}(1)D$$

A solução dada por (5.10) aplica-se quando são conhecidos os parâmetros do sistema. Como as matrizes A , B , C e D são desconhecidas recorre-se à técnica de identificação de parâmetros.

Foi utilizado o procedimento implícito de identificação que permite a estimativa direta dos parâmetros do controlador. É empregado o método dos mínimos quadrados recursivo para estimação dos parâmetros, definido através das seguintes equações:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) - \Omega(k)\epsilon^T(k) \quad (5.11)$$

$$\epsilon(k) = \Phi(k) - \hat{\theta}^T(k-d)\Psi(k-d) \quad (5.12)$$

$$\Omega(k) = \Gamma(k-1)\Psi(k-d) [1 + \Psi^T(k-d)\Gamma(k-1)\Psi(k-d)]^{-1} \quad (5.13)$$

$$\Gamma(k) = [I - \Omega(k)\Psi^T(k-d)]\Gamma(k-1) \quad (5.14)$$

onde:

$$\Psi(k) = [Y^T(k), Y^T(k-1), \dots, U^T(k), U^T(k-1), \dots, W^T(k), W^T(k-1) \dots 1]^T \quad (5.15)$$

$$\theta(k) = [\hat{F}_0, \hat{F}_1, \dots, \hat{G}_0, \hat{G}_1, \dots, \hat{H}_0, \hat{H}_1, \dots, \hat{D}]^T \quad (5.16)$$

Uma vez estimados os coeficientes do controlador obtêm-se a lei de controle:

$$\hat{G}_0 U(k) = - \left[\sum_{i \geq 0} \hat{F}_i Y(k-i) + \sum_{i=1} \hat{G}_i U(k-i) + \sum_{i \geq 0} \hat{H}_i W(k-1) + \hat{D} \right] \quad (5.17)$$

5.4 Aplicação do Controlador a Instalação Propulsora

O controlador auto-ajustável desenvolvido na seção anterior requer sistemas com número igual de variáveis de entrada e saída. Como há duas variáveis de controle — passo de mandado do hélice e rotação demandada do motor, foram selecionadas, entre as cinco variáveis do sistema, duas que são observáveis para serem controladas: rotação e passo do hélice.

O modelo utilizado para projeto do controlador é de ordem 3, embora o sistema original fosse de ordem 5. Com isto, consegue-se uma redução significativa do tempo de estimação de coeficientes e, de acordo com os testes realizados, garante um bom desempenho do controlador.

Embora o atraso do modelo seja igual a 1, foi utilizado $d=2$ como forma de representar o tempo de processamento do controlador.

Na definição do índice de desempenho, adotou-se $p=1$, $R=I$, tomando-se Q' como uma matriz diagonal com polinômios do primeiro grau em z^{-1} . A escolha desta forma para a matriz Q' garante a ausência de desvios em regime permanente para as variáveis controladas.

O controlador auto-ajustável foi submetido a vários testes para avaliar seu desempenho nas suas duas funções: regulação — manter constante a velocidade do navio em regime permanente, e traqueamento — acelerar o navio no menor tempo possível ou efetuar a parada em mínima distância. Procurou-se comparar o desempenho deste controlador com o de um controlador convencional especificamente projetado para o navio em questão.

Constatou-se que, mesmo admitindo desconhecimento dos parâmetros do sistema, o controlador adaptativo apresenta resposta de mesma qualidade que o convencional, para condição nominal de operação.

Em condições diferentes da nominal e, especialmente, quando o nível de perturbações estocásticas é elevado, o controlador auto-ajustável apresenta um desempenho melhor que o do controlador convencional.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brinati, H.L., (1976). Investigação sobre Aplicação do Filtro Estendido de Kalman para Identificação da Manobrabilidade do Navio. Tese de Doutorado, EPUSP.
- Brinati, H.L. & Rios Neto, A., (1977). "Emprego de Filtro Adaptativo para Identificação dos Coeficientes do Movimento do Navio". IV COBEM, Vol. D : 1399-1411.
- Brinati, H.L., (1978). "Aplicação de Filtro Adaptativo para Identificação da Manobrabilidade do Navio". I Congresso Iberoamericano de Engenharia Naval, Espanha.
- Bryson, A.E. & Ho, Y.C., (1969). Applied Optimal Control. Waltham, Ginn and Company, capítulo 5.

- Cruz, J.J., (1981). Pilotagem Automática de Embarcações com Emprego de Controle Estocástico. Dissertação de Mestrado, EPUSP.
- Donha, D.C., (1983). Estudo de Posicionamento Dinâmico para Plataforma Semi-Submersível. Dissertação de Mestrado, EPUSP.
- Donha, D.C. & Brinati, H.L. "Sistema de Posicionamento Dinâmico para Plataformas Semi-Submersíveis". 10º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval, Rio de Janeiro.
- Gelb, A. et alii, (1974). Applied Optimal Estimation. Cambridge, the MIT Press, capítulo 9.
- Gueler, G.F., (1987). Modelo, Projeto e Análise de um Piloto Automático para Submarinos. Tese de Doutorado, EPUSP.
- Jazwinski, A.H., (1970). Stochastic Processes and Filtering. New York, Academic Press, capítulo 6.
- Koivo, H.N., (1980). "A Multivariable Self-Tuning Controller". Automática, Vol. 16: 351-366.
- Kwarkernaak, H. & Sivan, R. Linear Optimal Control Systems. New York, Wiley Interscience.
- Luenberger, D.G. & Bryson, A.E., (1970). "The Synthesis of Regulator Logic Using State Variable Concepts". Proceedings of the IEEE, Vol. 58, nº 11.
- Morishita, H.M., (1986). Estudo do Controlador Adaptativo para uma Instalação Propulsora Marítima. Tese de Doutorado, EPUSP.