

# AJUSTE DE CONTROLADORES DE LASTRO DE UMA PLATAFORMA SEMI-SUBMERSÍVEL DE PEQUENAS DIMENSÕES

ALCEO CARTA NETO\* CARLOS ALEXANDRE CASTANHARO\* CARLOS EDUARDO MOTA MORAES\*  
RENATO DE CARVALHO LOPES\* JOSÉ PAULO VILELA SOARES DA CUNHA†

\*Petrobras

†Departamento de Eletrônica e Telecomunicações — Faculdade de Engenharia  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro — Rua São Francisco Xavier 524, sala 5036A — 20559-900

Email: carta, castanharo, cadumoraes, renatoclopes[@petrobras.com.br], jpaulo@ieee.org

**Abstract**— This paper describes the tuning of ballast controllers for a small semi-submersible platform. Initially, the dynamic model of the platform is revised. A proportional, integral and derivative (PID) multivariable controller is designed to keep the horizontal alignment and the load line of the platform through the pumping of water in ballast tanks. Two methods are applied to the adjustment of the controller gains: the first one applies a version of the closed-loop relay method and, the second one is based on an optimization algorithm. Simulation results allow the evaluation of the controllers performance.

**Keywords**— Semi-submersible platform, Ballast control, PID, Optimization, Relay method.

**Resumo**— Descreve-se o ajuste de controladores do lastro de uma pequena plataforma semi-submersível. Inicialmente é revisado o modelo da dinâmica da plataforma. Um controlador multivariável com ações proporcional, integral e derivativa (PID) é projetado para manter o alinhamento horizontal e o calado da plataforma através do bombeamento da água nos tanques de lastro. São aplicados dois métodos para o ajuste dos ganhos do controlador: o primeiro utiliza uma variação do método do relé em malha fechada e o segundo é baseado em um algoritmo de otimização. Resultados de simulações possibilitam a avaliação do desempenho dos controladores.

**Palavras-chave**— Plataforma semi-submersível, Controle de lastro, PID, Otimização, Método do relé.

## 1 Introdução

Plataformas semi-submersíveis são largamente utilizadas na exploração de petróleo em águas profundas, perfuração de poços, sistemas de soldagem flutuante, içamento marítimo, etc.

O controle heurístico da transferência de água nos tanques de lastro de plataformas de produção de petróleo tendo em vista a eficiência foi abordado em (Fagerholt and Heimdal, 1998). Destaca-se que o controle de lastro deve satisfazer critérios de segurança, estabilidade e relativos à resistência da plataforma, além de ser capaz de atuar rapidamente em situações de emergência. O controle dos tanques de lastro é crucial na plataforma marítima de lançamento de foguetes descrita por (Fossen, 2002, Seção 1.1.5), na qual as bombas do lastro são acionadas para manter o alinhamento horizontal da plataforma e compensar a mudança do centro de gravidade causada pelo deslocamento do foguete entre o armazém e a base de lançamento. O sistema de controle desenvolvido por (Fortes, 2005, Seção 5.3) para uma pequena plataforma utiliza a realimentação do estado estimado por observadores e ação integral para eliminar erros de regulação (Neto et al., 2007, Cap. 3). O controle  $H_\infty$  aplicado por (Damen et al., 1994) em uma pequena plataforma é especialmente adequado a sistemas incertos. Em (Fossen, 2002, pp. 87–88) sugere-se que um controlador com ações proporcional, integral e derivativa (PID) seja aplicado a cada grau de liberdade da plataforma, o que foi desenvolvido em (Neto

et al., 2007, Cap. 4) e é apresentado adiante na Seção 4. O PID apresenta diversas vantagens de ordem prática em relação a outros controladores, destacando-se que são muito utilizados na indústria e são bastante familiares aos engenheiros de controle. O foco deste trabalho é o ajuste dos controladores de lastro PID através de duas abordagens: na Seção 5 é aplicado o método do relé (Åström and Hägglund, 1984) e na Seção 6 utiliza-se a otimização de um índice de desempenho. A avaliação dos controladores é realizada na Seção 7.

## 2 Descrição da Plataforma

A plataforma considerada neste trabalho (Fig. 1) foi inspirada nas plataformas semi-submersíveis para exploração de petróleo (Teixeira et al., 2000). Seu sistema de controle deve ser capaz de mantê-la

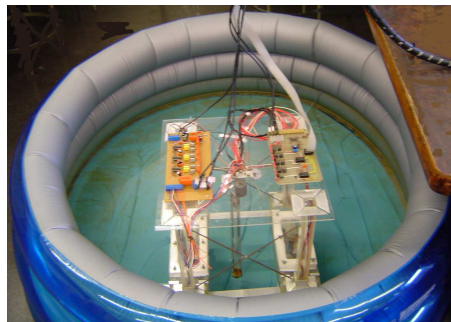


Figura 1: Plataforma semi-submersível.

equilibrada a despeito de perturbações externas,

respeitando-se os limites disponíveis para o controle. Modificações na distribuição de pesos na plataforma serão compensadas através de quatro tanques de lastro localizados nos vértices inferiores da plataforma (Fig. 2). Cada tanque é acoplado a duas bombas, sendo uma de injeção de água e a outra de retirada de água, que captam e expõem água na parte inferior dos flutuadores.

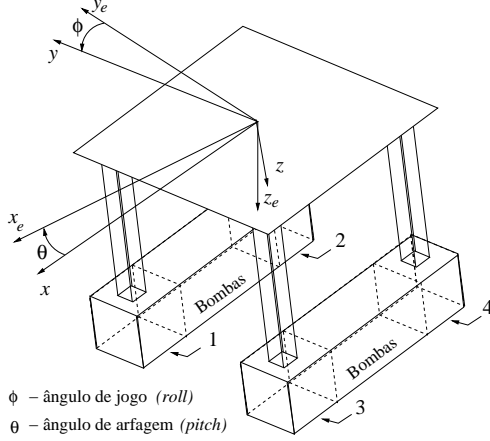


Figura 2: Sistemas de coordenadas usados na modelagem da dinâmica da plataforma. Os tanques de lastro estão numerados ( $j=1, \dots, 4$ ).

Os sistemas de coordenadas na Fig. 2, notações e nomenclaturas aqui utilizados seguem os usuais na área naval. Os graus de liberdade da plataforma que podem ser controlados independentemente pelos atuadores são: arfagem (*pitch*, ângulo  $\theta$ ), jogo (*roll*, ângulo  $\phi$ ) e o movimento vertical (*heave*) (Fossen, 2002, p. 17). Os eixos de coordenadas inerciais  $x_e$ ,  $y_e$  e  $z_e$  estão posicionados arbitrariamente no centro do plano superior da plataforma. Os eixos  $x$  e  $y$  são fixos ao plano superior da plataforma. A posição vertical é o *calado* da plataforma ( $h$ ), que é a distância entre o fundo dos flutuadores e a linha de água, projetada no eixo vertical ( $z_e$ ). Quando todos os tanques de lastro possuem os mesmos níveis de água e a plataforma está na horizontal, o centro de gravidade e o centro de flutuação estão alinhados paralelamente ao eixo  $z$ . Para simplificar a modelagem, assume-se que a plataforma não translada no plano horizontal nem gira em torno do eixo vertical.

Na parte superior da plataforma são fixados um transdutor para medir o calado e dois pêndulos para medir os ângulos de arfagem e de jogo (Fortes, 2005). Assim, este é um sistema multivariável com quatro entradas (controles para as bombas) e três saídas ( $h$ ,  $\phi$ ,  $\theta$ ) a serem controladas. O nível de água em cada tanque de lastro também é medido para possibilitar o seu controle.

### 3 Modelagem da Dinâmica

A modelagem da dinâmica da plataforma tem em vista o projeto e a simulação do sistema de con-

trole (Fortes and Cunha, 2006).

#### 3.1 Modelo das bombas e tanques de lastro

As bombas, uma para encher e outra para esvaziar cada tanque, são modeladas como um ganho aplicado ao sinal de controle  $U_j(t)$ . O sinal de controle  $-1$  corresponde à máxima vazão de saída de água,  $+1$  corresponde à máxima vazão de entrada e  $0$  implica o desligamento de ambas as bombas. Devido a diferenças de conexão e posição das bombas, as suas vazões são um pouco diferentes, resultando no modelo linear por partes:

$$V_j(t) = \begin{cases} K_{in_j}, & \text{se } U_j(t) \geq 1, \\ K_{in_j}U_j(t), & \text{se } 0 \leq U_j(t) < 1, \\ K_{out_j}U_j(t), & \text{se } -1 < U_j(t) < 0, \\ -K_{out_j}, & \text{se } U_j(t) \leq -1, \end{cases} \quad (1)$$

onde  $V_j$  é a vazão de água ( $m^3/s$ ),  $K_{in_j}$  é a vazão máxima da bomba de entrada ( $m^3/s$ ),  $K_{out_j}$  é a vazão máxima da bomba de saída ( $m^3/s$ ) e  $j$  é o número do tanque de lastro, c.f. Fig. 2.

Os tanques são modelados como integradores da vazão de água:

$$\frac{dl_j(t)}{dt} = \frac{1}{S_{bl}}V_j(t), \quad m_j(t) = \rho S_{bl}l_j(t), \quad (2)$$

onde  $l_j$  é o nível da água no  $j$ -ésimo tanque ( $m$ ),  $S_{bl}$  é a área da base do tanque de lastro ( $0,01 m^2$ ),  $V_j$  é a vazão dada pela eq. (1),  $\rho$  é a massa específica da água ( $1000 kg/m^3$ ) e  $m_j$  é a massa da água no  $j$ -ésimo tanque ( $kg$ ). O integrador possui saturações que representam os níveis máximo e mínimo da água no tanque.

Para identificar os parâmetros das bombas, foram aplicados degraus nos comandos  $U_j(t)$  e foram registrados os níveis  $l_j(t)$ , o que permitiu computar os ganhos  $K_{in_j} = 22 \times 10^{-6} m^3/s$  e  $K_{out_j} = 21 \times 10^{-6} m^3/s$  na eq. (1).

Neste modelo foram feitas as seguintes simplificações coerentes com experimentos: **(i)** os tanques são mantidos horizontalmente ( $\theta \approx 0^\circ$  e  $\phi \approx 0^\circ$ ), o que é razoável em operações usuais da plataforma; **(ii)** desprezou-se um pequeno fluxo de água que passa pelas bombas quando estão desligadas; **(iii)** a dinâmica das bombas de água é muito rápida.

#### 3.2 Modelo do grau de liberdade vertical

O grau de liberdade vertical é modelado pela equação dinâmica com arraste quadrático:

$$[m(t) + A_{33}]\ddot{h}(t) + C_{dh}|\dot{h}(t)|\dot{h}(t) + 2\rho S_{bf}g h(t) = g m(t), \quad (3)$$

$$m(t) = m_P + m_1(t) + m_2(t) + m_3(t) + m_4(t), \quad (4)$$

onde  $h$  é o calado da plataforma ( $m$ ),  $m$  é a massa total ( $kg$ ),  $m_P$  é a massa da plataforma

seca (5,2 kg),  $C_{dh}$  é o coeficiente de arraste vertical dos flutuadores na água (kg/m),  $S_{bf}$  é a área da base de cada um dos dois flutuadores (0,04 m<sup>2</sup>) e  $g$  é a aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>). Os termos da eq. (3) são as forças: inercial, arraste, empuxo e peso. A massa adicional  $A_{33}$  representa a componente vertical das forças inerciais induzidas pela pressão resultante do movimento harmônico da plataforma na água (Fossen, 2002, p. 65). O coeficiente de arraste ( $C_{dh} = 130$  kg/m) e a massa adicional ( $A_{33} = 2,4$  kg) foram ajustados para que o comportamento simulado se assemelhe ao experimental. Neste modelo admitiram-se as seguintes simplificações: **(i)** as inclinações da plataforma são mantidas pequenas ( $\phi \approx 0^\circ$  e  $\theta \approx 0^\circ$ ); **(ii)**  $\frac{dm\dot{h}}{dt} = \dot{m}\dot{h} + m\ddot{h} \approx m\ddot{h}$ , uma vez que a variação da massa do lastro é lenta.

### 3.3 Modelo da arfagem e do jogo

A arfagem e o jogo podem ser modelados de forma semelhante ao movimento vertical, substituindo-se as massas por momentos de inércia e as forças pelos torques correspondentes. O sinal de excitação é o torque gerado pelo desbalanceamento dos pesos da água nos tanques de lastro. Além dessas diferenças, os experimentos indicaram que o modelo mais adequado para o arraste é linear. Assim, o grau de liberdade da arfagem é modelado pela equação dinâmica linear:

$$J_y \ddot{\theta}(t) + C_{d\theta} \dot{\theta}(t) + K_\theta \theta(t) = d_x g \Delta m_\theta(t), \quad (5)$$

$$\Delta m_\theta(t) = m_2(t) + m_4(t) - m_1(t) - m_3(t), \quad (6)$$

onde  $J_y$  é o momento de inércia da plataforma para o eixo  $y$  (kg m<sup>2</sup>) que incorpora a massa adicional deste grau de liberdade,  $\theta$  é o ângulo de arfagem (rad),  $C_{d\theta}$  é o coeficiente de arraste (kg m<sup>2</sup>/s),  $K_\theta$  é o coeficiente do torque restaurador da arfagem (kg m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>),  $d_x$  é a projeção da linha que liga o centro do tanque ao centro da plataforma sobre o eixo  $x$  (0,15 m). O modelo do grau de liberdade do jogo é análogo a este. Os valores dos coeficientes na Tabela 1 foram obtidos experimentalmente (Fortes and Cunha, 2006). As

Tabela 1: Parâmetros do jogo e da arfagem.

Grau de Liberdade	Constante	Valor	Unidade
Arfagem	$J_y$	0,22	kg m <sup>2</sup>
	$K_\theta$	0,88	kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
	$C_{d\theta}$	0,3	kg m <sup>2</sup> /s
Jogo	$J_x$	0,38	kg m <sup>2</sup>
	$K_\phi$	8,4	kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
	$C_{d\phi}$	0,6	kg m <sup>2</sup> /s

principais simplificações assumidas neste modelo são: **(i)** os movimentos dos graus de liberdade são

pequenos e desacoplados; **(ii)** as variações dos momentos de inércia  $J_x$  e  $J_y$  causadas pelas massas da água nos tanques foram desprezadas; **(iii)** os parâmetros independem do calado ( $h$ ).

## 4 Sistema de Controle

O objetivo do controle é regular as variáveis de saída  $h$ ,  $\phi$  e  $\theta$  através da atuação em quatro conjuntos de bombas de lastro. A dinâmica de cada tanque de lastro (2) é representada por um integrador. Pode-se mostrar, que um dos quatro autovaleiros na origem correspondentes a esta dinâmica não é observável a partir dos sinais  $h$ ,  $\phi$  e  $\theta$ , o que poderia instabilizar o sistema de controle que fosse baseado apenas na realimentação dos sinais de saída. Este problema foi contornado através da estabilização da dinâmica dos tanques de lastro realizada por controladores proporcionais para os níveis (Fortes and Cunha, 2006):

$$U_j(t) = K_{pl} [\bar{U}_j(t) - l_j(t)], \quad j = 1, \dots, 4, \quad (7)$$

onde  $\bar{U}_j$  é o sinal de referência para o controlador do  $j$ -ésimo tanque. O valor do ganho proporcional ( $K_{pl} = 500$ ) foi ajustado experimentalmente para se obter uma resposta rápida e livre de oscilações causadas por atrasos não modelados.

O sinal de controle do calado ( $u_h$ ) deve atuar igualmente em todos os tanques, mas os sinais de controle de arfagem e de jogo ( $u_\theta$  e  $u_\phi$ ) precisam sofrer inversões de sinal pois, para inclinar a plataforma sem alterar o calado é necessário que dois tanques encham enquanto os outros esvaziam. A conjugação desses controles é realizada pela transformação (Fortes and Cunha, 2006)

$$\bar{u}(t) = W_m u(t), \quad W_m = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

do vetor de controle dos graus de liberdade ( $u = [u_h, u_\phi, u_\theta]^T$ ) no vetor de referências para os controladores de lastro ( $\bar{u} = [\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3, \bar{U}_4]^T$ ).

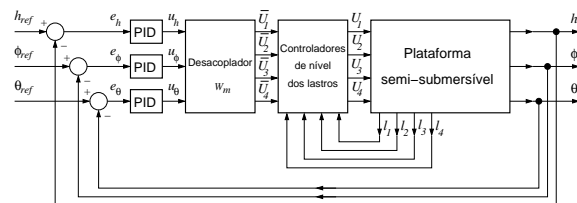


Figura 3: Diagrama do sistema de controle.

Cada grau de liberdade de interesse é controlado por um PID conforme a Fig. 3 (Neto et al., 2007, Cap. 4), onde o sufixo *ref* indica os sinais de referência. Esses controladores PID possuem funções de transferência

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{T_{lag} s + 1} \right), \quad (9)$$

onde  $K_p$  é o ganho proporcional,  $T_i$  é o tempo integral e  $T_d$  é o tempo derivativo. O objetivo do filtro na ação derivativa é reduzir a sensibilidade a ruídos de medição de alta frequência. Quanto maior o valor da constante de tempo  $T_{lag}$ , menor será a sensibilidade do sistema a ruídos, entretanto a banda-passante da ação derivativa será menor. Nesta plataforma o calado apresenta oscilações em malha aberta que podem ser amortecidas pela utilização da ação derivativa, o que não é possível se o valor de  $T_{lag}$  for muito alto. As simulações realizadas ao longo do ajuste dos controladores PID indicaram que um valor apropriado é  $T_{lag} = 3\text{ ms}$ .

As saturações das vazões das bombas de água (vide eq. (1)) e dos níveis dos tanques podem impedir que o desacoplamento proporcionado pela transformação (8) seja perfeito, o que resulta na interação entre as malhas de controle de calado, arfagem e jogo verificada em simulações (Neto et al., 2007, p. 35). Por isto, são utilizadas abordagens multivariáveis para o ajuste dos parâmetros  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  nas Seções 5 e 6.

## 5 Ajuste pelo Método do Relé

O método do relé em malha fechada foi proposto por (Åström and Hägglund, 1984) para sintonizar controladores PID. Para o caso monovariável, o controlador é substituído por um relé, o qual gera uma perturbação de amplitude controlada ( $H$ ) no processo, conforme a Fig. 4. Assim são provocadas

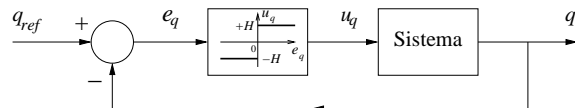


Figura 4: Implementação do método do relé, onde  $q = h, \phi, \theta$ , conforme o grau de liberdade.

oscilações limitadas e controladas no processo, a partir das quais estima-se o ganho último ( $K_u$ ) e o período último ( $P_u$ ) das oscilações:

$$K_u \approx 4H/(\pi a), \quad P_u \approx P, \quad (10)$$

onde  $P$  é o período e  $a$  é a amplitude pico-a-pico da oscilação do sinal  $y$ . Esses valores são usados para ajustar os parâmetros do PID segundo o método de Ziegler-Nichols (Campos and Teixeira, 2006):

$$K_p = 0,6K_u, \quad T_i = P_u/2, \quad T_d = P_u/8. \quad (11)$$

Para aplicar o método do relé a sistemas multivariáveis, é interessante conhecer de antemão quais são as malhas mais rápidas do sistema. O seguinte procedimento foi aplicado ao ajuste dos controladores (Campos and Teixeira, 2006):

1. O ajuste é iniciado pelas malhas mais rápidas, mantendo-se as demais em modo manual.
2. Executa-se o método do relé na primeira malha para ajustar os parâmetros do seu PID.

3. Passa-se o PID já ajustado para o modo automático e executa-se o método do relé na próxima malha a ser ajustada.
4. Continua-se o método, deixando os PIDs já ajustados em automático, até completar o ajuste de todos os PIDs.
5. Retorna-se ao ajuste da primeira malha, mas desta vez executa-se o método do relé com as outras malhas em automático.
6. Passa-se para o reajuste da próxima malha e assim por diante.
7. Os passos 5 e 6 devem ser repetidos até a convergência dos parâmetros dos PIDs, que é verificada pela comparação dos valores dos parâmetros entre iterações subsequentes.

As amplitudes dos relés ( $H = 2,5\text{ mm}$  para o jogo,  $H = 1\text{ mm}$  para o calado e para a arfagem) foram escolhidas para se obter oscilações de amplitudes apropriadas para serem medidas corretamente pelos sensores da plataforma real.

Como exemplo, a Fig. 5 apresenta a oscilação do calado obtida na primeira iteração do método do relé. Na simulação, as oscilações foram inicia-

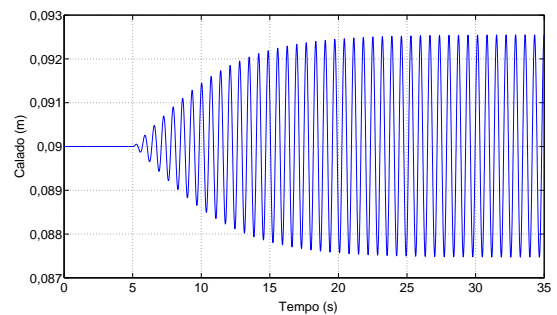


Figura 5: Oscilação do calado gerada pelo relé.

das em  $t=5\text{ s}$  pela mudança do sinal de referência do calado de  $90,0\text{ mm}$  para  $90,1\text{ mm}$ . Essa perturbação seria desnecessária na plataforma real, pois é exposta a perturbações. Os parâmetros dos controladores após três iterações do método do relé são apresentados na Tabela 2. Esses parâmetros foram calculados pelas equações de Ziegler-Nichols (11), com exceção do tempo derivativo do calado ( $2,63\text{ s}$ ), que seria  $0,086\text{ s}$  mas teve que ser ajustado com o auxílio de simulações para aumentar o amortecimento das oscilações do calado.

Tabela 2: Parâmetros dos PIDs ajustados pelo método do relé.

Grau de Liberdade	$K_u$	$P_u$ (s)	$K_p$	$T_i$ (s)	$T_d$ (s)
Calado	0,193	0,69	0,12	0,35	2,63
Arfagem	0,0152	2,65	0,0091	1,33	0,33
Jogo	0,140	1,35	0,084	0,68	0,17

## 6 Otimização dos Controladores

Para melhorar o desempenho do transitório dos controladores PIDs, escolheu-se minimizar o índice *ITAE* (integral do tempo multiplicado pelo valor absoluto do erro) que aqui é definido como:

$$ITAE := \int_0^{t_f} t [p_h |e_h(t)| + p_\phi |e_\phi(t)| + p_\theta |e_\theta(t)|] dt,$$

onde  $p_h, p_\phi, p_\theta \geq 0$  são os pesos dos erros nas variáveis controladas ( $e_h, e_\phi, e_\theta$ ) e  $t_f > 0$  é o horizonte de tempo considerado. Escolheu-se  $p_h = 100$  e  $p_\theta = 0, 1$  para que as contribuições dos erros de calado e de arfagem para o *ITAE* sejam da mesma ordem de grandeza do erro de jogo ( $p_\phi = 1$ ).

A minimização do *ITAE* é realizada pela função `fminsearch` do pacote de otimização do Matlab, que é baseada no algoritmo Simplex de Nelder-Mead, um dos mais utilizados para otimização não-linear sem restrições (Lagarias et al., 1998). O algoritmo de Nelder-Mead não requer derivadas, o que é importante pois não se dispõe das derivadas do *ITAE*. Para cada iteração em um problema com  $n$  variáveis, são gerados  $n+1$  vértices que representam uma entidade geométrica denominada simplex. Em um espaço bidimensional, o simplex tem a forma de um triângulo e em um espaço tridimensional, de um tetraedro. Neste caso,  $n = 9$  (3 parâmetros  $\times$  3 PIDs). A cada iteração, o vértice que apresentar o maior valor para o *ITAE* é rebatido para um outro ponto, de acordo com um determinado conjunto de regras. Esse rebatimento gera um novo simplex. As iterações prosseguem até que o diâmetro do simplex se torne menor que um valor previamente definido.

Para ajustar os parâmetros do PID, o *ITAE* é computado por simulações realizadas pelo Simulink no horizonte  $t_f = 200$  s. Nessas simulações a referência  $h_{ref}$  é alterada de 90 mm para 100 mm em  $t = 10$  s, enquanto que as referências de arfagem e de jogo são mantidas em  $0^\circ$ . A mudança na referência do calado pode ser necessária numa plataforma real devido a motivos operacionais. Além disso, é acrescentada uma massa de 75 g em um dos quadrantes da plataforma para  $t \geq 100$  s, o que perturba todos os graus de liberdade. Dessa forma otimizou-se o controlador de calado tanto para mudanças de referência como para perturbações, enquanto que os controladores de arfagem e de jogo foram otimizados para responder bem a perturbações. Assim, foram obtidos os parâmetros na Tabela 3. Deve-se escolher o simplex inicial do processo de otimização adequadamente para manter a estabilidade do sistema. O algoritmo pode convergir para diversos mínimos locais, dependendo do simplex inicial escolhido, resultando em valores diferentes para os parâmetros dos PIDs. Isso não foi um problema pois o desempenho do sistema não muda significativamente.

Tabela 3: Parâmetros dos PIDs ajustados pela otimização do *ITAE*.

Grau de Liberdade	$K_p$	$T_i$ (s)	$T_d$ (s)
Calado	0,039	0,095	9,73
Arfagem	0,033	1,19	0,75
Jogo	0,12	0,79	0,52

## 7 Avaliação dos Controladores

Para avaliar o desempenho dos controladores, foram realizadas simulações em que as referências são mantidas em  $h_{ref} \equiv 90$  mm e  $\phi_{ref} \equiv \theta_{ref} \equiv 0^\circ$ . Uma massa de 150 g é acrescentada sobre o tanque de lastro 2 para  $t \geq 10$  s. A Fig. 7 apresenta os resultados obtidos com os PIDs ajustados pelo método do relé e a Fig. 8 apresenta os resultados obtidos com os PIDs que minimizam o *ITAE*. Na Fig. 7 observa-se que o PID ajustado pelo método do relé amortece as oscilações do calado mais lentamente do que o PID otimizado, conforme se observa na Fig. 8. Essas oscilações são naturais em embarcações e são difíceis de serem reduzidas. Comparando-se a Fig. 7 com a Fig. 8, nota-se que a otimização reduz o pico da arfagem em cerca de  $3^\circ$ , o que pode ser significativo numa situação real em que perturbações maiores que esta poderiam inclinar excessivamente a plataforma que, conseqüentemente, alagaria ou adernaria. Deve-se destacar que é usualmente recomendado que a operação de plataformas de petróleo seja suspensa quando a inclinação ultrapassar  $15^\circ$ , o que se verifica temporariamente na Fig. 7. Nota-se ainda que o jogo é pouco afetado pela perturbação, o que se deve à disposição dos flutuadores. Para ilustrar os sinais de controle, a Fig. 6 os apresenta no caso do sistema otimizado. Os níveis dos tanques de lastro não conseguem acompanhar os sinais de referência durante os transitórios devido as vazões máximas das bombas de água.

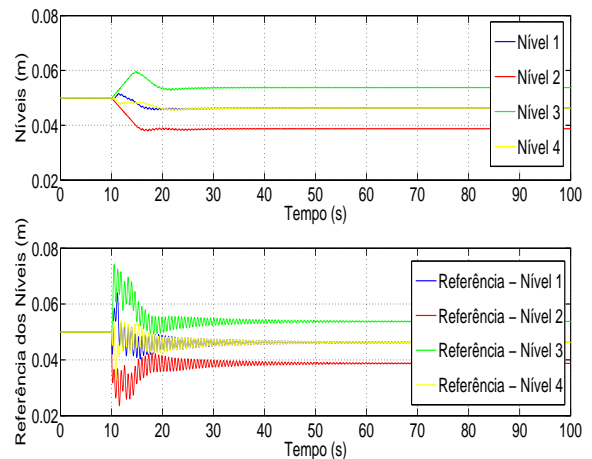


Figura 6: Níveis ( $l_j$ ) e sinais de referência ( $\bar{U}_j$ ) na simulação do sistema de controle otimizado.

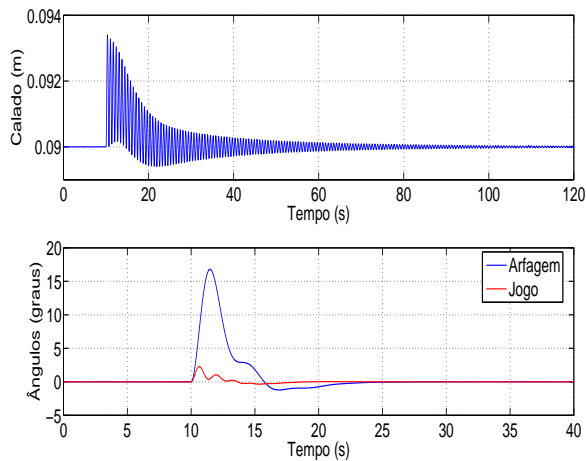


Figura 7: Simulação do sistema de controle ajustado pelo método do relé.

## 8 Conclusões

Descreveu-se um sistema de controle PID para o lastro de uma pequena plataforma semi-submersível. Observou-se que os controladores ajustados pelo algoritmo de otimização responderam melhor do que os controladores ajustados pelo método do relé, quando os valores dos parâmetros da plataforma são os nominais. No entanto, foi verificado que ambos os métodos de ajuste podem resultar em desempenhos semelhantes se os valores dos parâmetros da plataforma forem muito perturbados (Neto et al., 2007, Cap. 5), por exemplo, pela alteração da massa (carga) da plataforma ou pela perda de eficiência das bombas de água.

Assim como o controle no espaço de estado (Fortes, 2005), o algoritmo de otimização também é bastante dependente do modelo da dinâmica da plataforma e dos valores de seus parâmetros, uma vez que o índice de desempenho é computado por simulação. Por outro lado, o método do relé pode ser vantajoso, pois é quase independente do conhecimento prévio do modelo do processo, pode ser aplicado diretamente no sistema real e dispensa a modelagem e a simulação.

Estas abordagens não podem ser aplicadas diretamente ao controle de grandes plataformas semi-submersíveis, pois as vazões de suas bombas de lastro são relativamente pequenas, o número de tanques de lastro é grande e deve-se considerar os esforços estruturais, a estabilidade e a segurança da embarcação (Ludovico et al., 2007).

## Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Universidade Petrobras, Faperj e CNPq.

## Referências

Åström, K. J. and Hägglund, T. (1984). Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and

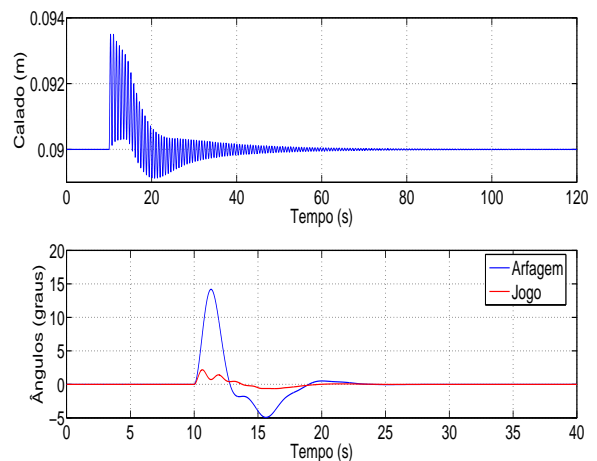


Figura 8: Simulação do sistema de controle otimizado.

amplitude margins, *Automatica* **20**(5): 645–651.

- Campos, M. C. M. M. and Teixeira, H. C. G. (2006). *Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais*, Edgard Blücher, São Paulo.
- Damen, A. A. H., Falkus, H. M. and Bouwels, J. P. H. M. (1994). Modeling and control of a floating platform, *IEEE Trans. Aut. Contr.* **39**(5): 1075–1078.
- Fagerholt, K. and Heimdal, S. I. (1998). Algorithms for effective transfer of ballast for an oil installation, *J. Operational Research Soc.* **49**(1): 16–22.
- Fortes, R. M. (2005). Instrumentação, modelagem e controle de uma plataforma semi-submersível em escala reduzida, Projeto de Graduação em Engenharia Eletrônica — UERJ, Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.lee.eng.uerj.br/~jpaulo/PG/2005/PG-Plataforma-Semi-Submersivel-2005.pdf>.
- Fortes, R. M. and Cunha, J. P. V. S. (2006). Modelagem da dinâmica e experimentos com uma plataforma semi-submersível em escala reduzida, *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Automática*, Salvador – BA, pp. 1632–1637.
- Fossen, T. I. (2002). *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs, and Underwater Vehicles*, Marine Cybernetics, Trondheim, Norway.
- Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H. and Wright, P. E. (1998). Convergence properties of the nelder-mead simplex method in low dimensions, *SIAM J. Optim.* **9**(1): 112–147.
- Ludovico, C. S., Albuquerque, G. S. and Silva, G. L. L. (2007). Controle de lastro em sistemas marítimos de produção de óleo e gás, Monografia do Curso de Especialização em Automação Industrial — UERJ, Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.lee.eng.uerj.br/~jpaulo/PG/2007/MG-Controle-Lastro-Sist-Maritimos-2007.pdf>.
- Neto, A. C., Castanharo, C. A., Moraes, C. E. M. and Lopes, R. C. (2007). Ajuste e simulação de controladores de lastro de uma plataforma semi-submersível de pequenas dimensões, Monografia do Curso de Especialização em Automação Industrial — UERJ, Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.lee.eng.uerj.br/~jpaulo/PG/2007/MG-Ajuste-Controle-Semi-Submersivel-2007.pdf>.
- Teixeira, J. L. P., Reis, L. G. and Feitosa, P. H. F. (2000). Sistema de controle de estabilização de uma plataforma flutuante por computador, Projeto de Graduação em Engenharia Eletrônica — UERJ, Rio de Janeiro.