COPPE/UFRJ

APLICAÇÃO DO CONTROLE EM MODOS DESLIZANTES PARA O CONTROLE DA MANOBRA DE SUBMARINOS

Rafael Castelo Branco Goulart

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Antonio Carlos Fernandes

Rio de Janeiro

Janeiro de 2010

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

Goulart, Rafael Castelo Branco

Aplicação do Controle em Modos Deslizantes para o Controle da Manobra de Submarinos/Rafael Castelo Branco Goulart. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XXII, 90 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Antonio Carlos Fernandes

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2010.

Referencias Bibliográficas: p. 86-88.

1. Manobrabilidade. 2. Controle em Modos Deslizantes. 3. Hidrodinâmica. I. Fernandes, Antonio Carlos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

Dedicatória

Dedico este trabalho a vocês, meus Pais, que lutaram por um Brasil melhor, e ainda não viram essa realidade acontecer, as injustiças, a educação e a pesquisa merecerem o lugar que um dia ainda vão ter.

Vocês dois, contribuíram para esta Nação, com suas trajetórias ricas de experiência, corretas e ilibadas. Com muito trabalho construíram muito, e principalmente deram um exemplo maravilhoso para este que aqui que vos escreve. O caminho de vocês foi, é, e será sempre um Norte a ser seguido, não só por mim, mas com certeza por aqueles que tiveram a oportunidade da boa convivência com vocês.

Obrigado por terem me dado a vida, o colo, a cultura, os valores que sigo, sem preconceitos obtusos e limitadores mas também sem os relativismos convenientes, mutáveis, que dia após dia, vêm poluindo a nossa sociedade.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Ele, Deus, por ter sido generoso, sincero e justo comigo. E também à Santa Edwiges, que certamente escutou minhas preces.

Em segundo lugar à minha família, pela paciência, nobreza, dureza e correção com que me mantiveram no caminho. Especialmente Nélia, Almir e Hiram, pelos valores que me foram passados na minha infância. E que continuam a manter coesos, meu núcleo familiar, minha vida afetiva e profissional, minhas especulações, idéias e principalmente, minha coerência. Também sem eles, Eu certamente poderia ter perdido o caminho e o foco.

Ao Professor Antônio Carlos Fernandes, pessoa muito franca e de grande capacidade mental e profissional, por ter me dado a oportunidade de beber dessa experiência profissional e conhecimento acumulado durante todos esses anos na Área de Engenharia Naval.

Ao Comandante Alexandre Alves Santiago, pessoa de extrema altivez, franqueza e solidariedade e praticamente uma unanimidade em sua área de pesquisa, por também ter me oferecido o privilégio de uma excelente convivência e também uma inesgotável fonte de Matemática e de Teoria de Controle. Além, claro, de sua experiência, no mesmo meio que trabalho, seus relatos, seus conselhos, serão certamente, de grande valia para minha carreira daqui para a frente.

Ao Engenheiro Ivan, Gerente das atividades do Professor Antônio Carlos Fernandes, pessoa inteligente, pragmática, correta e que participou do desenvolvimento do meu trabalho com presteza e pragmatismo impressionantes diante dos infortúnios que apareciam. Seus conselhos pessoais, suas palavras de incentivo, sua franca amizade, também foram imprescindíveis para a conclusão do presente trabalho.

Ao amigo Comandante Sdepan Bogosian Neto, gênio ainda a ser reconhecido, na sua área aqui no Brasil, por sua solidariedade, franqueza e companheirismo, durante todos esses anos.

À Srª Glace Farias da Costa, uma ‘mamãezona’ comigo, sempre me orientando e sempre, sempre, me incentivando. O sucesso desse trabalho, sem dúvida, deve-se em grande parte à sua grande empatia e carinho com o autor.

E, por fim, ao meu país, Brasil, que através de duas Instituições Públicas, Marinha do Brasil e Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, me presenteou com os meios, o tempo e as pessoas mais do que certas, para o desenvolvimento do meu trabalho, o meu desenvolvimento pessoal, a oportunidade de conhecer pessoas, amigos, de outras culturas, que aqui na UFRJ, compartilharam suas experiências e conhecimento comigo. Conhecer e fazer novas amizades, também faz parte do privilégio de desenvolver um trabalho dessa natureza.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

APLICAÇÃO DO CONTROLE EM MODOS DESLIZANTES PARA O CONTROLE DA MANOBRA DE SUBMARINOS

Rafael Castelo Branco Goulart

Janeiro/2010

Orientador: Antonio Carlos Fernandes

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho refere-se a aplicação de controle avançado no controle de manobras de submarinos. O teoria de manobras de submarinos é relativamente bem desenvolvida mas carece de sistematização provavelmente devido aos aspectos relativos à segurança. O presente trabalho pretende contribuir para esta este conhecimento realizando uma revisão sistemática dos assuntos relativos à manobra. Assim, inclui-se um capítulo relativo à modelagem matemática, outro relativo à estabilidade principalmente no caso de manobras no plano vertical que são as mais críticas. Prepara-se assim uma estrutura aplicação da teoria de controle não-linear com método de controle por modos deslizantes (‘SMC, sliding mode control)..

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

APPLICATION OF SLIDING MODE CONTROL TO THE CONTROL OF THE MANEUVERING OF SUBMARINES

Rafael Castelo Branco Goulart

January/2010

Advisor: Antonio Carlos Fernandes

Department: Ocean Engineering

This work refers to the application of advanced control to the maneuvering of submarines. The maneuvering theory is relatively well developed but it lacks of systematization likely due to aspects related to safety. The present work intents to contribute to this knowledge by performing a review of the maneuvering subjects. Hence, a chapter is included that presents the mathematical, another related to the stability mainly in the vertical plane that are the most critical. Consequently a structure is prepared for the application of nonlinear control like ‘SMC’, sliding-mode control..

Conteúdo

1-Introdução e Motivação 1

1.1-Breve Histórico do Submarino 2

1.1.1-Holland 2

1.1.2-Protector 3

1.1.3-Motor Diesel 4

1.1.4-U-Boats 4

1.1.5-Snorkel 5

1.1.6-Type XXI 5

1.1.7-Albacore 6

1.1.8-Barbel 7

1.1.9-Skipjack 8

1.1.10-Além do Skipjack 8

1.2-Organização e Revisão bibliográfica da dissertação 9

2-Equações do Movimento 11

2.1-Introdução 11

2.2-Sistemas de Coordenadas 12

2.3-Notação Padrão 14

2.4-Relações Cinemáticas 16

2.5-Variação da Quantidade de Movimento Linear 18

2.6-Quantidade de Movimento Angular 20

2.7.Forças Externas 22

2.7.1-Forças de Natureza Gravitacional 22

2.7.2-Forças Hidrostáticas 23

2.7.3-Forças de Origem Hidrodinâmica 24

2.8-Momentos Externos 26
2.8.1-Momento de Natureza Gravitacional 26
2.8.2-Momento Hidrostático 27
2.8.3-Momento de Origem Hidrodinâmica 27
2.9-Sumario das Equações para descrever o movimento 28
3-Estabilidade do Movimento 31
3.1.Introdução 31
3.2-DARPA SUBOFF 33
3.3-Critério de Routh-Hurwitz 36
3.4-Análise da Dinâmica Vertical 38
4-Controle em Modos Deslizantes(‘Sliding Mode Controller’) 40
4.1-Introdução 40
4.2-Princípios 41
4.3-Exposição da Teoria 42
4.3.1-Função de Lyapunov 43
4.3.2-Lei de Controle 44
4.3.3-Superfície de Controle 46
4.4-Procedimento para Obtenção da Lei de Controle 46
5-Simulações e Resultados Obtidos 49
5.1-Introdução 49
5.2-Simulações 50
5.2.1-Introdução às Simulações 51
5.2.1-Sumário das Simulações 55
5.3-Discussão dos Resultados 82
6-Conclusões e Recomendações 84
Bibliografia 86
Apêndice A 89

LISTA DE SÍMBOLOS

Capítulo 2

$OXYZ$, sistema de referência inercial, fixo de navegação;

I, J, K**,** vetores unitários, versores do sistema de referência inercial;

$r_{O'}$**,** vetor posição do veículo no sistema de referência inercial;

X_O, Y_O, Z_O**,** coordenadas no eixo de referência inercial do veículo

$O'xyz$,sistema de referência solidário ao corpo;

O'**,** origem do sistema solidário ao corpo;

CG, centro de massa do corpo;

xz, plano xz do do sistema solidário ao corpo formado pelos eixos x e z**;**

CB, centro de empuxo do corpo;

ρ_G**,** vetor posição do centro de gravidade do corpo no sistema solidário ao corpo;

ρ_B**,** vetor posição do centro de empuxo do corpo no sistema solidário ao corpo;

x_G, y_G, z_G**,** coordenadas do centro de gravidade do corpo no sistema de referência solidário ao corpo;

x_B, y_B, z_B, coordenadas do centro de empuxo do corpo no sistema de referência solidário ao corpo;

X, Y, Z, forças aplicadas no veículo segundo a nomenclatura da **SNAME** []no sistema de referência solidário ao corpo;

K, M, N, forças aplicadas no veículo segundo a nomenclatura da **SNAME** []no sistema de referência solidário ao corpo;

u, v, w, velocidades de translação do corpo, denominadas, avanço (surge), deriva (sway) e arfagem (heave), respectivamente;

p, q, r**,** velocidades de rotação do corpo, denominadas, balanço (roll), caturro (pitch) e guinada (yaw), respectivamente;

x, y, z**.,** coordenadas de posição linear no eixo solidário ao corpo;

ϕ, θ, ψ**,** posição angular no eixo solidário ao corpo;

δ_S**,** ângulo do hidroplano horizontal da popa (stern), positivamente no sentido para baixo;

δ_R **,** ângulo do leme vertical (rudder), positivamente no sentido de bombordo (esquerda para o observador, que está olhando para a proa, boreste é o sentido inverso);

$T_1(\psi), T_2(\theta), T_3(\phi)$, matrizes de transformação rotacionais formadas por rotações angulares na sequência dos ângulos ψ, θ, ϕ;

$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix}$, vetor variação posicional no sistema de referência inercial, fixo;

$\vec{U}$, vetor velocidade translacional no sistema de referência solidário ao corpo;

$\vec{\Omega}$, vetor velocidade rotacional no sistema de referência solidário ao corpo;

$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix}$, vetor variação temporal da posição no sistema fixo, inercial de referência;

$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \\ u \\ v \\ w \end{bmatrix}$, vetor velocidade do corpo no sistema de referência solidário ao corpo;

$\sum \vec{F}$, somatório ou resultante das forças externas aplicadas ao corpo;

$\vec{G}$, quantidade de movimento linear;

$\frac{d}{dt}$**,** derivada no tempo, ou variação no tempo;

$\vec{U_g}$, velocidade translacional do centro de gravidade do submarino com relação ao sistema de referência inercial;

m**,** massa do submarino**;**

$\vec{U}$, velocidade da origem do sistema solidário ao corpo com relação ao sistema de referência inercial;

$\frac{d\vec{i}}{dt}, \frac{d\vec{j}}{dt}$ e $\frac{d\vec{k}}{dt}$**,** variação no tempo dos versores do sistema de referência solidário ao corpo;

$\sum \vec{M}$, somatório dos momentos provocados pelas forças externas;

$\vec{H_g}$, momento cinético em relação ao centro de gravidade;

$\bar{I}_x, \bar{I}_y$ e $\bar{I}_z$, momentos de inércia do submarino com relação aos eixos principais de inércia que passam pelo centro de gravidade;

I_x, I_y e I_z, momentos de inércia do submarino com relação ao sistema de referência solidário ao corpo;

W, força peso, força gravitacional;

B, força de empuxo;

m, massa do corpo;

g, aceleração da gravidade;

$\sum \vec{F}_{gravitacionais}$, somatório das forças gravitacionais aplicadas ao corpo;

$\sum \vec{F}_{hidrostática}$, somatório de forças hidrostáticas aplicadas ao corpo;

$\sum \vec{F}_{hidrodinâmica}$, ,somatório de forças hidrodinâmicas aplicadas ao corpo;

$f(\ldots)\vec{i} + g(\ldots)\vec{j} + h(\ldots)\vec{k}$, vetor em que cada componente é função de diversas variáveis ou parâmetros;

X_0, força, nesse caso no eixo x aplicada por ocasião do ponto de operação onde ocorrerá a linearização utilizando-se expansão em série de Taylor;

Δu, incremento de uma variável, nesse caso a velocidade translacional u;

$\frac{\partial}{\partial u}$, derivada parcial, ou variação de um parâmetro em função de **u;**

$\frac{\partial X_0}{\partial variável} = X_{variável}$, notação utilizada pela **SNAME []para** expressar as derivadas parciais.

$\frac{\partial^2 X_0}{\partial variável1.\partial variável2} = X_{variável1.variável2}$, notação utilizada pela **SNAME[]** para expressar as derivadas parciais mistas;

$\frac{\partial^2 X_0}{\partial u.\partial u} = X_{uu}$, notação da **SNAME[],** aplicada à hidrodinâmica, nesse caso uma força X, causada por duas variações, derivadas parciais, da velocidade translacional u, comumente chamada de **derivada hidrodinâmica;**

$\vec{M}_{gravitacional}$. Momento causado pelo somatório das forças de origem gravitacional

$\times$, produto vetorial;

$\sum \vec{M}_{hidrodinâmico}$, somatório dos momentos externos causados pelas forças de origem hidrodinâmica;

$\vec{M}_{hidrostático}$, momento causado pelo somatório das forças de origem hidrostática;

Capítulo 3

Y'_v, derivada hidrodinâmica adimensionalizada, nesse caso uma força Y, na direção y causada pela velocidade translacional lateral v;

ρ, densidade da água;

L, comprimento do veículo submerso;

U, velocidade de avanço do veículo submerso;

LCB, distância longitudinal do centro de empuxo à origem do sistema de referência solidário ao corpo;

VCB, distância vertical do centro de empuxo à origem do sistema de referência solidário ao corpo;

WS, superfície molhada do corpo submerso;

m', massa adimensionalizada;

$\Delta(\lambda)$, equação característica de um sistema linear em função de um parâmetro, ou variável λ;

a_r, coeficiente de índice r, linear constante, que multiplica as variáveis λ na equação característica;

T_r,matriz construída com coeficientes da equação característica do sistema que será função-este pelos critérios de Routh-Hurwitz;

$\Delta\overline{BG}$, Deslocamento multiplicado pela distância vertical entre o centro de empuxo e o centro de massa;

M, matriz de inércia do submarino;

M^{-1}, inversa da matriz de inércia do submarino;

$Ax + Bu$, forma padrão do espaço de estados;

$A \in \mathbb{R}^{n\times n}$, matriz de estado;

$B \in \mathbb{R}^{n\times m}$, matriz de entrada ou de distribuição de controle;

n, número de estados;

m, número de entradas;

$eig(M^{-1}A)$, **auto-valores do sistema;**

$x = [w;\ q;\ \theta;\ z]$, vetor posição do submarino;

Capítulo 4

$\boldsymbol{u}$, lei do sinal de controle;

$\hat{\boldsymbol{u}}$, lei de retroalimentação (feedback) linear baseada no modelo nominal linearizado;

$\bar{\boldsymbol{u}}$, lei de retroalimentação não-linear com seu sinal de chaveamento (swicthing) entre mais e menos;

$\boldsymbol{\sigma(x)}$, superfície de deslizamento;

$\boldsymbol{S^T}$, matriz ou vetor, que multiplicada pelo vetor de estados x, determinará a hiper-superfície de deslizamento;

$\boldsymbol{V(x)}$, função candidata para a estabilidade de Lyapounov;

$\boldsymbol{\dot{V}(x)}$, função negativa definida;

$\boldsymbol{K_n}$, ganho não-linear;

$\boldsymbol{k}$, matriz de ganho;

$\boldsymbol{A_c}$, matriz da dinâmica em malha fechada sem a parte não-linear;

$\boldsymbol{\eta}$, ganho não-linear da função de descontinuidade $\boldsymbol{sign}$**;**

$\boldsymbol{dp}$, lei final de controle em modo deslizante;

$[\boldsymbol{w} \quad \boldsymbol{q} \quad \boldsymbol{\theta} \quad \boldsymbol{z - z_d}]$**,** vetor a ser controlado, com a variável z que iremos controlar pela estratégia de modos deslizantes;

$\boldsymbol{x(t)}$, estado na situação de condição inicial;

$\boldsymbol{x_d(t)}$, estado comandado**;**

$\boldsymbol{u(t)}$**,** sinal matemático enviado pelo controlador;

$\boldsymbol{u_{eq}}$**,** sinal equivalente do atuador, que na prática levando em consideração a dinâmica do mesmo, seu atraso chega ao sistema;

$\boldsymbol{x_1}$**,** primeira variável no plano de fase;

$\boldsymbol{x_2}$**,** segunda variável no plano de fase, ou seja, a derivada de $\boldsymbol{x_1}$;

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

Com as novas descobertas do pré-sal e riquezas energéticas da nossa Plataforma Continental, o Brasil optou por reativar seu Programa de Submarinos. Surge assim a necessidade de capacitar pessoal tecnicamente capaz de não só operá-los, mas também tomar decisões de alto nível na escolha e dimensionamento de equipamentos. Tal capacitação não só atende à tomada de decisões de escolha de meios operativos e seus equipamentos, como também nacionaliza um conhecimento dominado por pouquíssimos países.

Essa Dissertação faz parte desse esforço de preparar as gerações futuras para a defesa de suas riquezas energéticas no mar e para o crescente papel que o nosso país vem desenvolvendo no cenário internacional, inclusive com um pleito de assento permanente no Conselho de Segurança das Nações Unidas.

A manobrabilidade dos submarinos é um assunto constantemente estudado nas universidades européias e americanas e ainda, mais recentemente nas chinesas. Mesmo com o ruído proveniente das instalações a vapor das plantas nucleares, sua autonomia e velocidade compensam tal deficiência. Países como Holanda, Canadá e Noruega continuam estudando e aperfeiçoando os submarinos diesel-elétricos. Todos os avanços na área de controle foram absorvidos pela indústria de fabricação de submarinos.

Faz-se extremamente necessário que nós brasileiros, agora ávidos pela posse de um submarino nuclear, dominemos tecnicamente a manobrabilidade e o comportamento dinâmico dos mesmos. Para o leitor que não está familiarizado com os princípios e a história dessa estratégica embarcação as seguintes referências são importantes: [1, 2, 3, 4,5 e 6]. A seguir, mostraremos um breve histórico da evolução do submarino [1,2].

1.1 Breve Histórico do Submarino

Submarinos existem desde 1776 com Brushnell e seu "Tartaruga", mostrado na **Figura 1.1**, seguido por Fulton e seu "Nautilus" em 1800. Estes navios americanos, projetados para ultrapassar o bloqueio britânico nas Guerras Revolucionárias Americanas, sofreram de falta de planta de potência, que viria tardiamente com as invenções tanto do motor a combustão interna como também da bateria [1].

Figura 1.1. O Turtle de Brushnell **[1]**

1.1.1 Holland

Uma sofisticação a mais veio com um americano de origem irlandesa, John Holland, com seu projeto "Holland", que incorporava muitas das características dos submarinos atuais, principalmente o carenamento, como podemos observar na **Figura**

1.2. Deslocava 63 t, tinha um comprimento de 53 ft, possuía velocidade submergido de 5 nós. Sua autonomia era de 1500 MN. O propulsor era a ré. Seu perfil era carenado. Curiosamente o mesmo incorporava muitos dos avanços do futuro "Albacore". Havia um inconveniente, a necessidade de ir à superfície e abrir a escotilha para carregar as baterias.

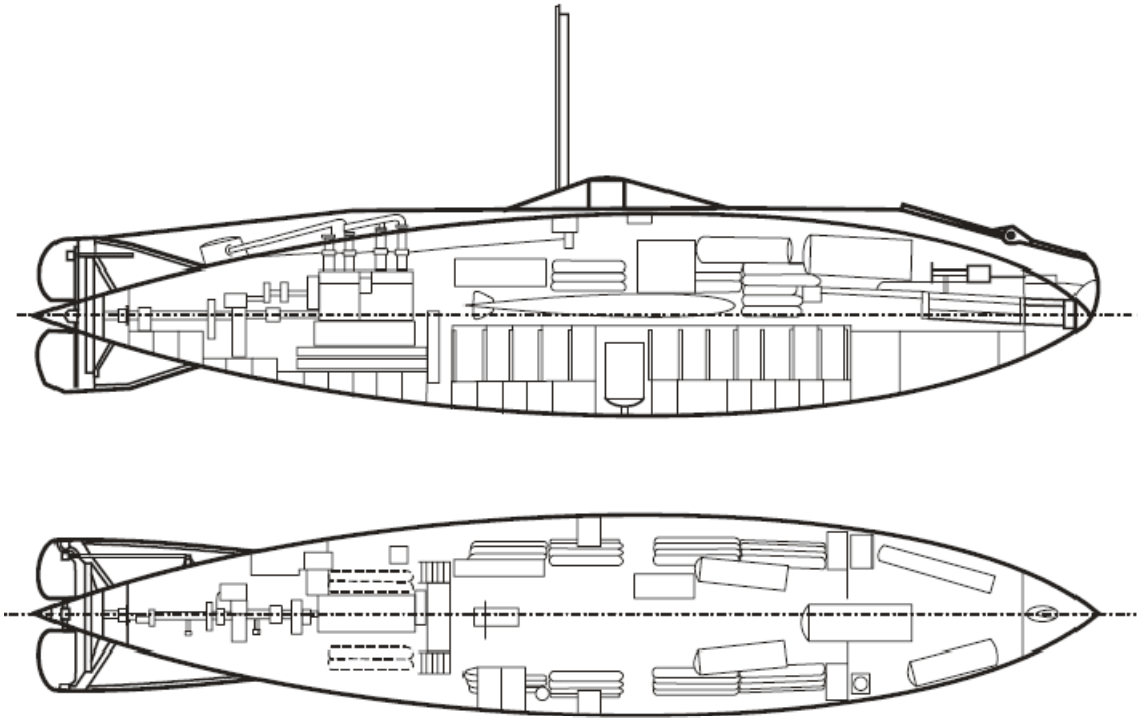


Figura 1.2. Perfil lateral e longitudinal do Holland **[1]**

1.1.2.Protector

Um segundo inventor americano, Simon Lake, conseguiu combinar o motor a petróleo com a bateria. Seu navio, Protector, foi lançado em 1902. Sua maior contribuição foi anular o problema da visão do submarino porque os submarinos quando submersos eram praticamente cegos. Com a ajuda de um professor de ótica da Universidade John Hopkins, eles construíram o precursor do periscópio. Os submarinos de Lake foram vendidos à Rússia e à Áustria. Mais tarde foram comprados pela Marinha Americana, assim como os construídos por John Holland.

1.1.3.Motor Diesel

Mesmo com o submarino agora podendo observar os alvos quando submerso e podendo viajar consideráveis distâncias, ainda restava um perigoso problema. Os gases do petróleo estavam presentes no interior do casco e com a descarga elétrica de ignição criavam um ambiente propício para uma explosão catastrófica. O problema foi resolvido com a invenção do motor à ignição por compressão por um engenheiro alemão, Rudolf Diesel, por volta de 1890. Agora, já sem a necessidade de faísca elétrica, com um combustível mais barato e com os gases bem menos tóxicos e voláteis, o motor Diesel, era mais eficiente e mais econômico, além de proporcionar uma autonomia muito maior. Ele tornou-se então a principal fonte de potência até o advento da energia nuclear.

1.1.4.U-Boats

A Primeira Guerra Mundial acelerou o progresso dos projetos dos submarinos. A Marinha Alemã desenvolveu seus submarinos longos, pesados, de longa autonomia, com propulsão a diesel, seus Unterseebootes, mais conhecidos como U-boats, nas 2 grandes guerras. Eram essencialmente navios de superfície, inclusive com canhões no convés principal, dois eixos e vários apêndices, como podemos observar na **Figura 1.2.** Podiam submergir rapidamente apesar de não haver nenhuma preocupação com o desempenho hidrodinâmico abaixo d´água.

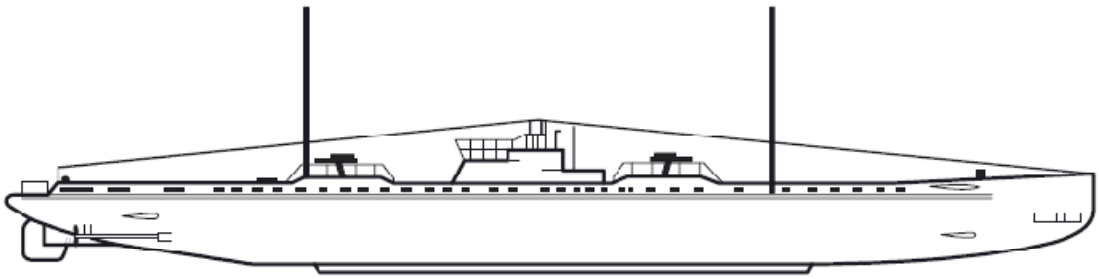


Figura 1.2 Submarino U-35, típico da 1ª Guerra Mundial **[1,2,3]**

A Alemanha adentrou a Segunda Guerra Mundial com uma versão mais refinada do seu U-boat anterior, o Type VIIC, conforme mostrado na **Figura 1.3,** porém a ênfase ainda era a performance na superfície e não submerso.

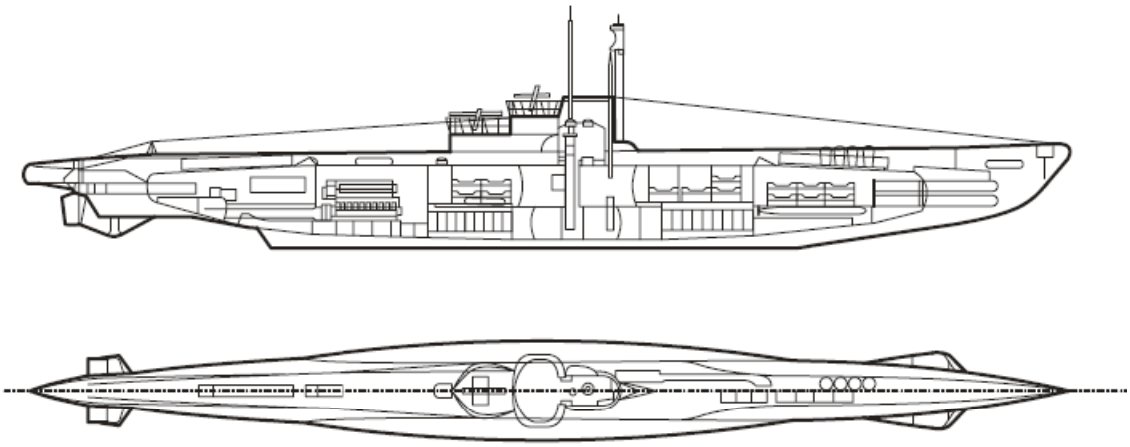


Figura 1.3 Submarino Type VIIC, típico da 2ª Guerra Mundial **[1,2,3]**

1.1.5.Snorkel

Há uma rivalidade sobre a invenção do Snorkel entre os holandeses e os alemães. Ele surgiu por volta de 1944, ainda com alguns problemas. A manutenção do trim era crucial, pois se o snorkel entrasse abaixo do nível do mar, uma válvula de retenção fechava a saída de gases afetando diretamente o desempenho da tripulação. Outro grande problema era a detecção quando o submarino estivesse esnorqueando.

1.1.6.Type XXI

Ao fim da 2ª Grande Guerra, os alemães tentaram desesperadamente produzir um submarino com longa capacidade de imersão e desempenho hidrodinâmico apurado, com propulsão AIP (Air Independent Propulsion). Tentaram peróxido de hidrogênio, mas não passaram do estágio experimental. Então a planta adotada foi a consagrada diesel-elétrica. O casco foi dramaticamente carenado, como podemos observar na **Figura 1.4**, propiciando um aumento de velocidade de 10 nós, podendo chegar a velocidades de 18 nós. A autonomia e a profundidade máxima operacional aumentaram dramaticamente. Foram concluídos para o serviço, mas muito tardiamente para a grande guerra.

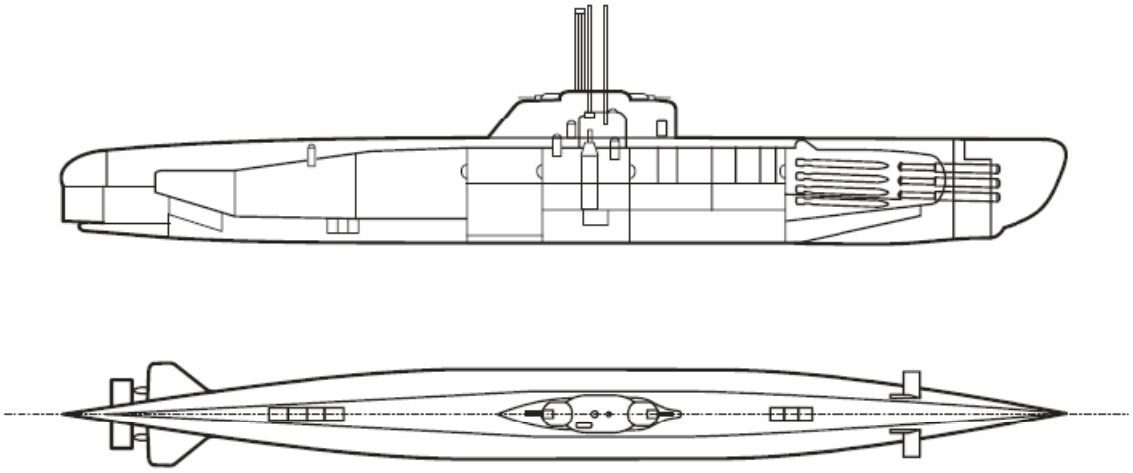


Figura 1.4 Submarino TypeXXI **[1,2,3]**

1.1.7.Albacore

Ao vencerem os alemães, os americanos ficaram abismados com os avanços do Type XXI e decidiram desenvolver um submarino com carenamento perfeito,eliminado todos os apêndices e com o menor arrasto possível, maior potência a ser armazenada nas baterias e um propulsor de diâmetro razoavelmente maior e a uma menor rotação, propiciando uma maior eficiência propulsiva, aproximadamente 0.9 [1], o resultado foi o "Albacore". O projeto foi desenvolvido de tal maneira a dar ao formato do Albacore a menor resistência possível abaixo d´água, como podemos observar no seu avançado carenamento na **Figura 1.5**, baseado na mais avançada pesquisa, como mostrado na **Figura 1.6**, em hidrodinâmica da época. A velocidade submerso aumentou de um valor médio de 8.75 para 18.2 nós. Ele podia alcançar velocidade máxima de 25 nós na superfície e 33 nós submerso.

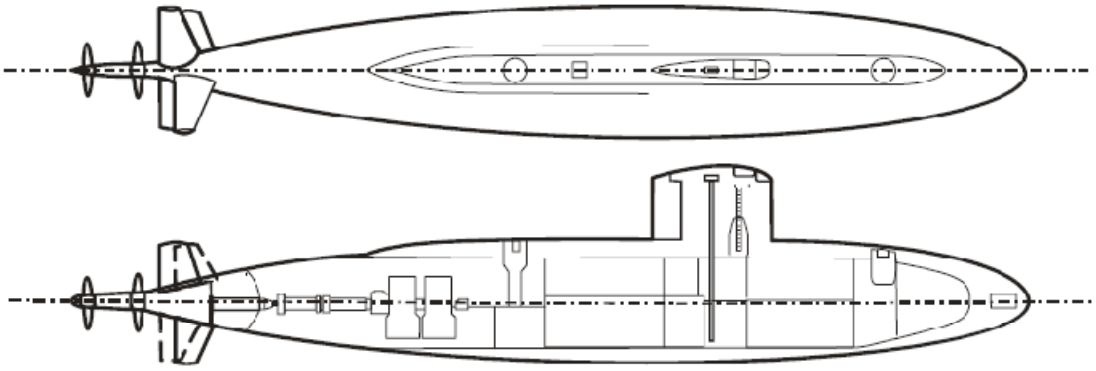


Figura 1.5 Albacore **[1,2]**

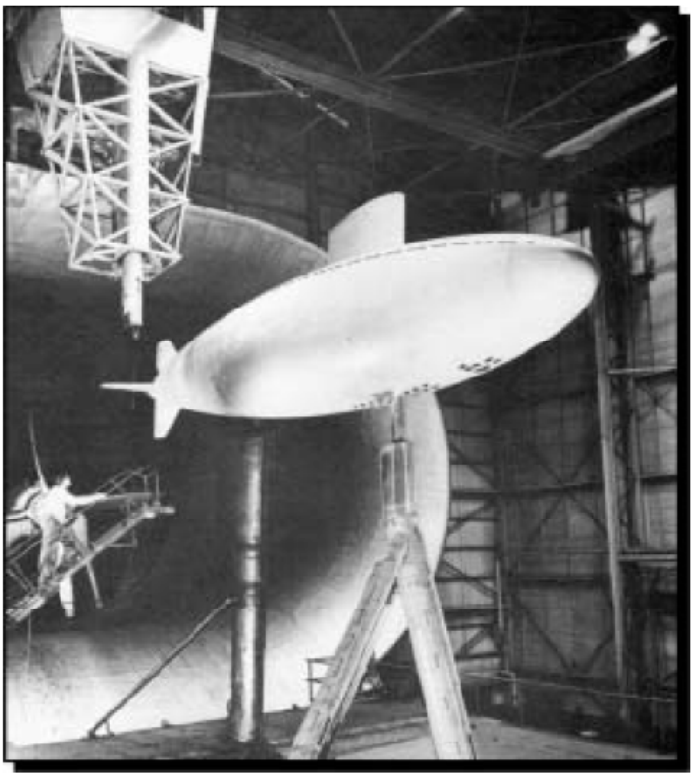
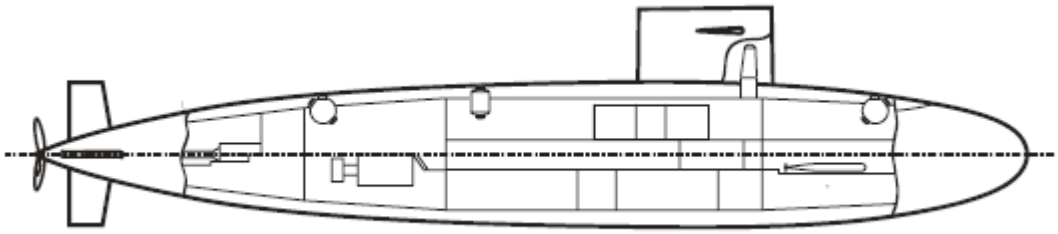


***Figura 1.6 Teste em túnel de vento durante o desenvolvimento do Albacore*[1]**

1.1.8.Barbel

A Marinha Americana aplicou os resultados de sua pesquisa com o Albacore num navio agora realmente operacional chamado Barbel, no final dos anos 50, apresentado aqui no presente trabalho, na **Figura 1.6**. Apesar de não possuir ainda a propulsão nuclear, este submarino possuía o que havia então de mais avançado no conhecimento da hidrodinâmica e na tecnologia de construção naval na época. O Barbel



deslocava 2145 t e podia alcançar 21 nós submerso.

***Figura 1.6 Perfil do Barbel*[1]**

1.1.9.Skipjack

Tais avanços levaram ao "Skipjack", o primeiro submarino nuclear a incorporar os avanços do Albacore, ambos mostrados na **Figura 1.7**,que haviam sido comprovados no Barbel. Mas o primeiro submarino nuclear, o Nautilus, mostrado na **Figura 1.7**, foi construído com a missão principal de provar a autonomia ilimitada sem a necessidade de ir à superfície para renovar o oxigênio e não houve preocupações no seu projeto de desempenho hidrodinâmico, sendo seu perfil bem parecido com o dos submarinos mais antigos. O Skipjack combinava a propulsão nuclear com a forma carenada em gota do Albacore. Tinha o deslocamento substancialmente menor que o do Nautilus, com a mesma potência instalada, possuindo assim velocidade ainda maior submerso e maior manobrabilidade.

1.1.10.Além do Skipjack

Projetos mais modernos, com a finalidade de acomodar um nº maior de mísseis balísticos intercontinentais, cresceram em comprimento e deslocamento e não mantiveram mais a relação entre a forma e a secção mestra para alcançar mínima resistência.

A evolução dos perfis do desenvolvimento dos submarinos americanos é mostrada na **Figura 1.7**. Os enormes submarinos da classe Lafayette, mostrado na **Figura 1.7**, foram ultrapassados em tamanho e deslocamento pelos projetos russos, que tiveram que abandonar a secção mestra circular. A partir do sucesso dos projetos independentes do Holland e do Protector, progressos se seguiram a partir do seu avanço tecnológico, que mudaram radicalmente até a produção dos U-Boats, seguidos pelo Type 21. Os americanos fizeram a partir do Type 21 um progresso ainda maior com o Albacore e o Skipjack.

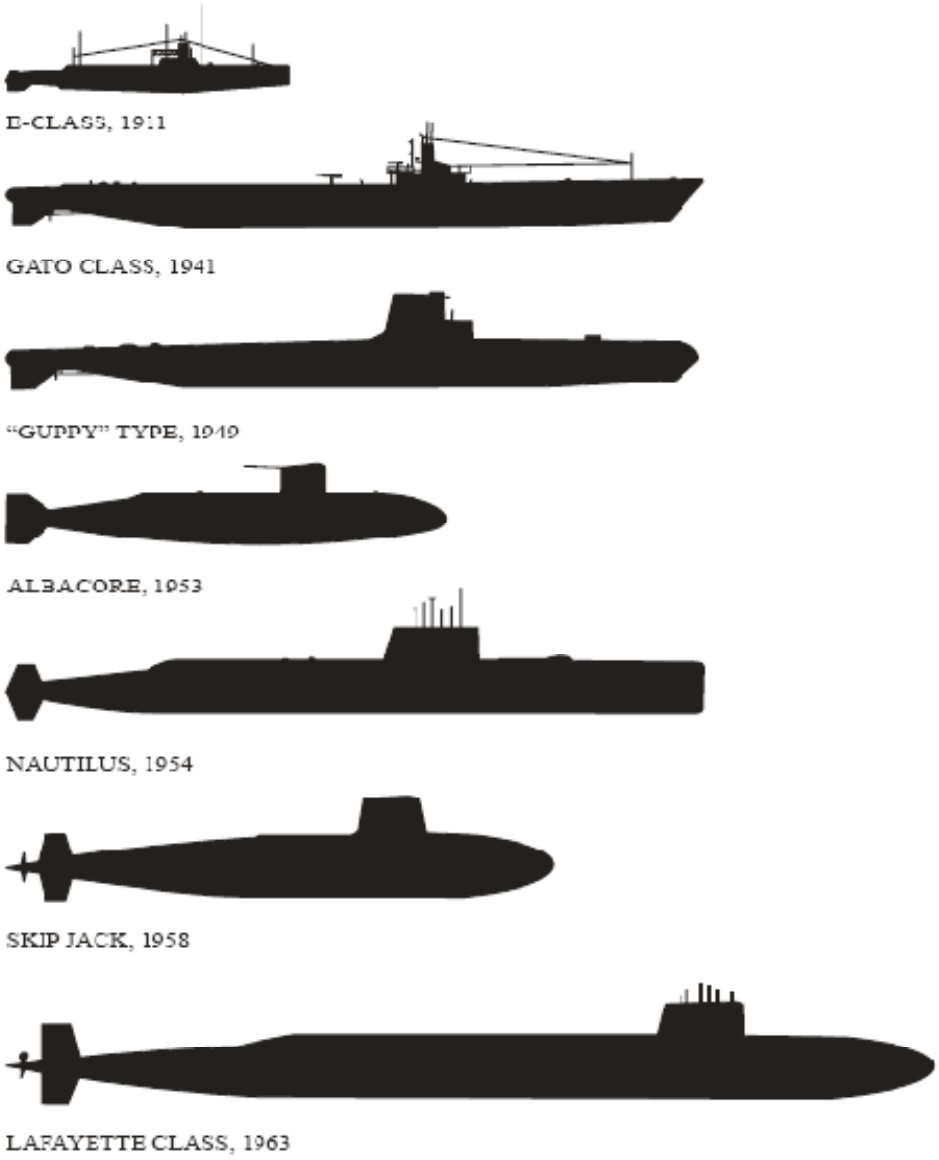


***Figura 1.7 Evolução do projeto dos submarinos*[1]**

1.2 Organização e revisão bibliográfica da dissertação

No Capítulo 2, faz-se um breve apanhado do procedimento para se chegar às seis equações de movimento de um submarino. Mesmo assim, por se tratar de um assunto com vários desenvolvimentos matemáticos, procurou-se reduzir ao máximo a exaustiva dedução das mesmas, pois tal assunto é discutido em vasta literatura do assunto. Também faz-se a introdução do conceito de derivada hidrodinâmica, [4, 5, 6,7,8,9,10,29 e 30] ;

No Capítulo 3, faz-se a introdução do conceito de adimensionalização e de desacoplamento dos modos vertical e horizontal. São mostradas maneiras ou critérios

para se avaliar a estabilidade de um submarino. Mostramos também o nosso objeto de estudo, o modelo DARPA DUBOFF, da Marinha Americana [35]. O caso do plano vertical é tratado com mais afinco por ser de maior interesse na área que estamos abordando, envolvendo as situações mais críticas para a operação de um submarino [8, 9, 10,11, 12 e 13].;

No Capítulo 4, mostraremos o procedimento básico para se obter a lei de controle em modo deslizante (‘SMC’, sliding mode control), com a obtenção do vetor que forma a superfície deslizante. O método é descrito em [11, 12, 15, 16 e 17]. Entretanto, as deduções e os algoritmos são tratados mais detalhadamente em [13, e14];

No Capítulo 5, fizemos algumas simulações com o DARPA SUBOFF [11, 12, 22, 27e 28], utilizando uma lei de controle em modo deslizante obtida e explicitada no Capítulo 4, comentando os resultados [13, 14 e 35];

No Capítulo 6, faz-se diversas sugestões para trabalhos futuros[22, 23, 24, 25, 26, 32 e 33];

No Apêndice A, mostramos o modelo construído no ambiente SIMULINK/MATLAB para efetuarmos nossas simulações e posterior apresentação dos resultados [22, 26, 27 e 28]. A programação, mesmo não sendo a atividade fim de um engenheiro naval, capacita-o a por em prática os conceitos e teorias. Uma razoável base em programação é essencial para o trabalho acadêmico, e profissional. No presente trabalho, utilizamos o ambiente MATLAB/SIMULINK, que talvez seja o mais utilizado atualmente e possua mais códigos disponíveis na Internet. Utilizaram-se como referências aqui [27] para o MATLAB e [28] para o SIMULINK.

.

CAPÍTULO 2

EQUAÇÕES DO MOVIMENTO

2.1 Introdução

Para iniciarmos a solução do nosso trabalho e, com base na literatura de manobrabilidade e controle de veículos marítimos [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12], adotaremos as seguintes hipóteses:

1. o veículo comporta-se como um corpo rígido de massa invariante;
2. a rotação da Terra pode ser desprezada no cálculo das componentes das acelerações do centro de massa do veículo;
3. as principais forças que atuam no veículo têm origem inercial, gravitacional, hidrostática, propulsiva, e hidrodinâmicas.

Primeiramente discutiremos as definições de sistemas de eixos de referência global e solidário ao corpo; a seguir a convenção de rotações angulares num espaço tridimensional e os respectivos detalhes da transformação de coordenadas; as relações cinemáticas entre as velocidades e as posições do veículo; e finalmente as seis equações do movimento do veículo em seis graus de liberdade.

2.2 Sistemas de Coordenadas

O eixo $OXYZ$, é definido como o eixo inercial, global de navegação com origem O, e os seus eixos alinhados com as direções Norte, Leste e para baixo, um caso consistente da regra da mão direita com os vetores unitários $\boldsymbol{I}, \boldsymbol{J}, \boldsymbol{K}$. O vetor posição do veículo, $\boldsymbol{r_{O'}}$, nesse sistema de coordenadas terá as seguintes componentes.

$$\boldsymbol{r_{O'}} = [X_O \boldsymbol{I} + Y_O \boldsymbol{J} + Z_O \boldsymbol{K}] \quad \text{Eq.2.1}$$

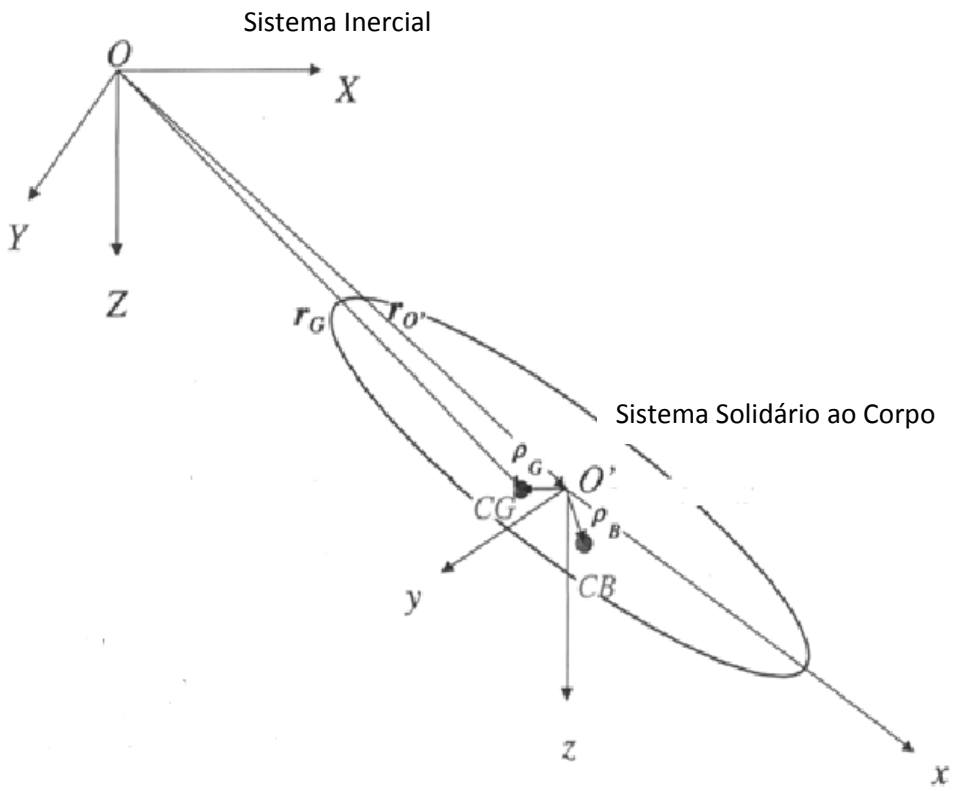


Figura 2.1 Sistemas Solidário e Inercial do Corpo Submerso

A **Figura 2.1** mostra um corpo submerso com uma determinada atitude em relação ao eixo de coordenadas original. Definimos então um sistema solidário ao corpo $O'xyz$, com origem O' localizada na linha de centro do corpo, movendo-se e tendo variações na sua atitude angular. O veículo possui centro de massa, CG, que pode estar numa posição que não necessariamente será a origem do sistema de coordenadas. Tal origem será o ponto na qual as forças aplicadas ao corpo serão computadas.

A separação do centro de gravidade da origem do eixo de coordenadas solidário ao corpo é um ponto-chave, pois teríamos graves dificuldades em computar as forças hidrodinâmicas em outro sistema escolhido que não levasse em consideração simetrias do corpo submerso, pois o centro de massa pode mudar com uma simples alteração de lastro ou carregamento do veículo. No nosso caso o plano xz, do sistema solidário ao corpo, coincide com o plano de simetria boreste/bombordo. Em veículos submersos, assim como na aviação, o centro de gravidade do veículo, CG, e o centro de flutuação, CB, ou de empuxo geralmente não estão localizados na origem do eixo solidário ao veículo,O', também não estão normalmente no mesmo ponto. Eles são localizados respectivamente por, ρ_G e ρ_B, que correspondem às componentes vetoriais a seguir:

$$[x_G\boldsymbol{i} \quad y_G\boldsymbol{j} \quad z_G\boldsymbol{k}] \quad \text{Eq.2.2;}$$

$$[x_B\boldsymbol{i} \quad y_B\boldsymbol{j} \quad z_B\boldsymbol{k}] \quad \text{Eq.2.3}$$

A localização do centro de gravidade, ρ_G , é de suma importância, pois as leis de Newton do movimento igualam as forças que atuam no corpo à taxa de variação da quantidade de movimento linear do centro de massa e os momentos que atuam no centro de massa à sua taxa de variação da quantidade de movimento angular conforme descrito em [4, 6, 10,.29 e 30]. Tendo definido os sistemas de coordenadas, precisamos agora definir a orientação angular do submarino. Quando a “atitude” do Submarino muda a uma taxa de variação qualquer, as velocidades angulares envolvidas induzem mudanças nas velocidades do centro de massa que devem ser levadas em consideração. A seguir vamos introduzir a notação de posição angular, de velocidades de translação e angulares.

2.3 Notação padrão

Existem maneiras diferentes de se descrever a atitude de um veículo nos sistemas de coordenadas. A mais comumente utilizada usa o conceito dos três ângulos de Euler, que definem a orientação angular (eixo solidário ***i***, ***j***, ***k)*** relativa ao eixo global (***I***, ***J***, ***K***), inercial. O principal problema com essa abordagem é que existe uma singularidade quando qualquer dos ângulos alcança 90º (como exemplo podemos citar o caso de uma aeronave em vôo puramente vertical, a mesma não poderia nesse caso distinguir o seu ângulo de azimute do seu ângulo de banda). Entretanto, em face dos objetivos do presente trabalho, não há necessidade do uso deste expediente, pois os ângulos de atitude raramente passarão da faixa de 20º.

Seguiremos no presente trabalho a notação padrão comumente utilizada, criada em 1950 pela SNAME ("The Society of Naval Architects and Marine Engineers"),[7]. Os três movimentos angulares são: **roll** (balanço, rotação própria), rotação em $x(\phi)$; **pitch**(caturro), rotação em $y(\theta)$; e **yaw** (cabeceio, guinada ou precessão), rotação em $z(\psi)$. As velocidades angulares são; $\boldsymbol{p}, \boldsymbol{q}$ *e* $\boldsymbol{r}$, respectivamente. Apesar de designarem os mesmos escalares, os termos a seguir, não são empregados no mesmo sentido, sendo assim: **rumo** (*course*) refere-se a um valor grande e **cabeceio, guinada ou precessão**, a pequenos desvios do valor de ângulo de **yaw,** $\boldsymbol{\psi}$. Os movimentos retilíneos, translações, são: **surge** (avanço), translação em x; **sway** (deriva ou afastamento) , translação em y; e, **heave** (arfagem) , translação em z. As translações são; $\boldsymbol{u}, \boldsymbol{v}$ *e* $\boldsymbol{w}$, respectivamente.

Especialmente sob determinadas condições dinâmicas, o pitch e o roll podem causar problemas de mal-estar na tripulação dos veículos tripulados e o yaw é importante para a navegação.A **Figura 2.2** e a **Tabela 2.1** ilustram a convenção adotada. Para submarinos comumente considera-se a manobra em dois planos independentes, horizontal e vertical desacoplados (na verdade são fracamente acoplados), após a linearização das equações.

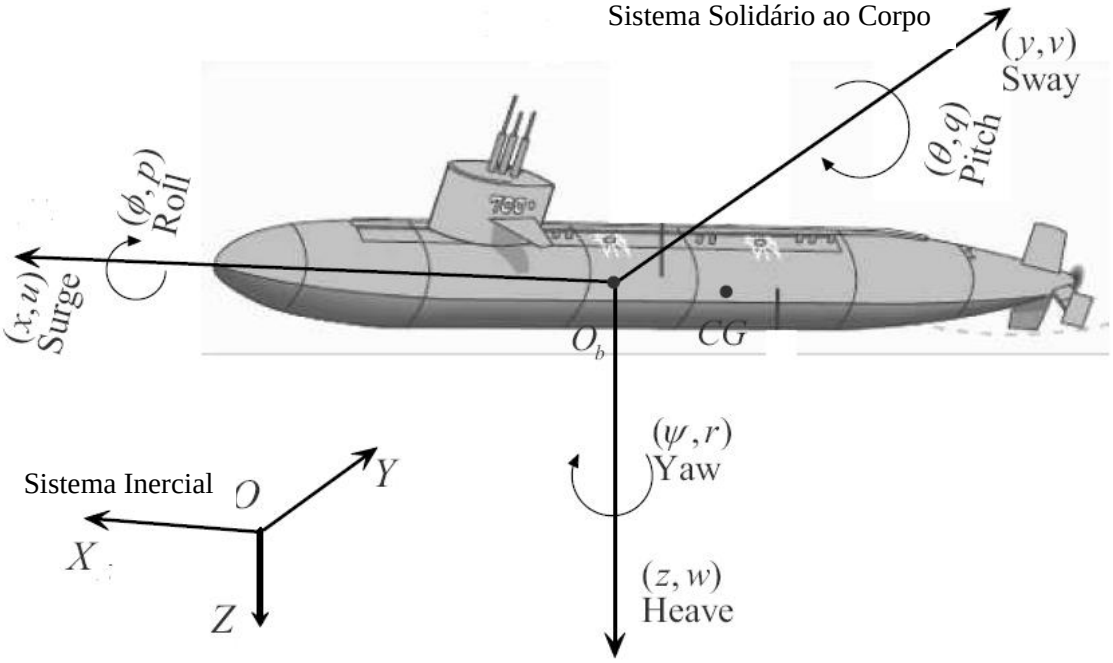


Fig 2.2. O Submarino e seus respectivos eixos de movimento.

Tab. 2.1 Nomenclatura dos movimentos

	Descrição	**Forças e Momentos**	**Velocidades**	**Posição ou Atitude**
Avanço("Surge")	Translação eixo x	***X***	***u***	***x***
Deriva("Sway")	Translação eixo y	***Y***	***v***	***y***
Arfagem("Heave")	Translação eixo z	***Z***	***w***	***z***
Balanço("Roll")	Rotação eixo x	***K ou L***	***p***	***ϕ***
Caturro("Pitch")	Rotação eixo y	***M***	***q***	***θ***
Guinada("Yaw")	Rotação eixo z	***N***	***r***	***ψ***

Para os ângulos dos hidroplanos de ré (no presente estudo não discutiremos a atuação dos hidroplanos de vante), e do leme utiliza-se também segundo[6, 7, 8, 9 e 10]:

$\boldsymbol{\delta_S}$ = ângulo do hidroplano horizontal da popa (stern), positivamente no sentido para baixo;

$\boldsymbol{\delta_R}$ = ângulo do leme vertical (rudder), positivamente no sentido de bombordo (esquerda para o observador, que está olhando para a proa, boreste é o sentido inverso).

2.4 Relações Cinemáticas

As relações cinemáticas a seguir que ao serem integradas nos fornecem a atitude e a posição do veículo são obtidas através de transformações lineares em nº de 3, tanto no caso linear como no caso angular (atitude). A matriz final é obtida através do produto das matrizes de rotação, uma operação não-comutativa. A ordem escolhida para o produto das mesmas é $\psi, \theta\ e\ \phi,$ que é a mesma adotada em [4, 5, 6 e 10] No caso dos deslocamentos lineares; $X, Y\ e\ Z,$ faz-se então o seguinte expediente:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ W_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ V_2 \\ W_2 \end{bmatrix} \quad \text{Eq.2.4}$$

$$\begin{bmatrix} U_2 \\ V_2 \\ W_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_3 \\ V_3 \\ W_3 \end{bmatrix} \quad \text{Eq.2.5}$$

$$\begin{bmatrix} U_3 \\ V_3 \\ W_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_4 \\ V_4 \\ W_4 \end{bmatrix} \quad \text{Eq.2.6}$$

resultando:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = T_1\,(\psi) T_2\,(\theta) T_3\,(\phi)\ \vec{U} \quad \text{Eq.2.7}$$

, que nos fornece então:

$$\begin{bmatrix}\dot{X}\\ \dot{Y}\\ \dot{Z}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}cos\,\psi\,cos\,\theta & cos\,\psi\,sin\,\theta\,sin\,\phi-sin\,\psi\,cos\,\phi & cos\,\psi\,sin\,\theta\,cos\,\phi-sin\,\psi\,sin\,\phi\\ sin\,\psi\,cos\,\theta & sin\,\psi\,sin\,\theta\,sin\,\phi-cos\,\psi\,cos\,\phi & sin\,\psi\,sin\,\theta\,cos\,\phi-cos\,\psi\,sin\,\phi\\ -sin\,\theta & cos\,\theta\,sin\,\phi & cos\,\theta\,cos\,\varphi\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u\\ v\\ w\end{bmatrix} \quad \text{Eq.2.8}$$

No caso dos deslocamentos angulares;$\phi, \theta\ e\ \psi$ seguiremos o expediente mostrado em [6]:

$$\vec{\Omega}=[p \quad q \quad r]_{sistema\ fixo\ ao\ corpo} \quad \text{Eq.2.9}$$

$$p=-\sin\theta.\dot{\psi}+\dot{\phi} \quad \text{Eq.2.10}$$

$$q=\cos\theta\sin\phi.\dot{\psi}+\cos\phi\,.\dot{\theta} \quad \text{Eq.2.11}$$

$$r=\cos\theta\cos\phi.\dot{\psi}-\sin\phi\,.\dot{\theta} \quad \text{Eq.2.12}$$

Colocando-se matricialmente e invertendo teremos finalmente:

$$\begin{bmatrix}\dot{\phi}\\ \dot{\theta}\\ \dot{\psi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & sin\,\phi\,tan\,\theta & cos\,\phi\,tan\,\theta\\ 0 & cos\,\phi & -sin\,\phi\\ 0 & sin\,\phi\,sec\,\theta & cos\,\phi\,sec\,\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p\\ q\\ r\end{bmatrix} \quad \text{Eq.2.13}$$

E para facilitar a integração computacional podemos escrever na seguinte forma:

$$\begin{bmatrix}\dot{\phi}\\ \dot{\theta}\\ \dot{\psi}\\ \dot{X}\\ \dot{Y}\\ \dot{Z}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta\\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi\\ 0 & \sin\phi\sec\theta & \cos\phi\sec\theta\\ \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\sin\phi-\sin\psi\cos\phi & \cos\psi\sin\theta\cos\phi-\sin\psi\sin\phi\\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\phi-\cos\psi\cos\phi & \sin\psi\sin\theta\cos\phi-\cos\psi\sin\phi\\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p\\ q\\ r\\ u\\ v\\ w\end{bmatrix} \quad \text{Eq.2.14}$$

2.5 Variação da quantidade de movimento linear

Da Mecânica Clássica, segundo a 2ª Lei de Newton conforme [4, 5, 6, 29 e 30] temos a definição da quantidade de movimento linear para um corpo rígido:

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt}\vec{G} \quad \text{Eq.2.15}$$

onde:

$\sum \vec{F} =$ somatório ou resultante das forças externas;

$\vec{G} =$ quantidade de movimento linear,

Como o nosso submarino é assumido como um corpo rígido , temos então a seguinte definição para quantidade de movimento linear:

$$\vec{G} = m\overrightarrow{U_g} \quad \text{Eq.2.16}$$

onde:

$\overrightarrow{U_g}$= velocidade translacional do centro de gravidade do submarino com relação ao sistema de referência inercial;

m = massa do submarino.

Definição da expressão da velocidade relativa ao centro de gravidade CG:

$$\overrightarrow{U_g} = \overrightarrow{U} + \frac{d}{dt}\overrightarrow{\rho_g} \quad \text{Eq.2.17}$$

onde:

$\overrightarrow{U} =$ velocidade da origem do sistema solidário ao corpo com relação ao sistema de referência inercial;

$\overrightarrow{\rho_g} =$ posição do centro de gravidade do submarino com relação ao sistema de referência solidário ao corpo $= x_g\vec{\imath} + y_g\vec{\jmath} + z_g\vec{k}$;

$\frac{d}{dt}\overrightarrow{\rho_g}$ =velocidade do centro de gravidade com relação ao sistema de referência solidário ao corpo

A velocidade $\overrightarrow{U}$, do submarino em relação ao sistema de referência solidário ao corpo, é uma rotação:

$$\frac{\overrightarrow{d}}{dt}\overrightarrow{\rho_g} = \overrightarrow{\Omega} \times \overrightarrow{\rho_g} \quad \text{Eq.2.18}$$

onde:

$\overrightarrow{\Omega} = p\vec{\imath} + q\vec{\jmath} + r\vec{k} =$ velocidade angular do submarino

Tal fato decorre do sistema solidário ao corpo ter como origem um ponto fixo ao corpo que não o centro de gravidade.

Como dito anteriormente, adotamos a massa do submarino como invariante ao longo do tempo $\left(\frac{d}{dt}m = 0\right)$, teremos então:

$$\frac{d}{dt}\overrightarrow{\rho_g} = \frac{d}{dt}\left(m\overrightarrow{U_g}\right) = \frac{d}{dt}\left[m\left(\overrightarrow{U} + \frac{d}{dt}\overrightarrow{\rho_g}\right)\right] = \frac{d}{dt}\left\{m\left[\overrightarrow{U}\right] + \left(\overrightarrow{\Omega} \times \overrightarrow{\rho_g}\right)\right\} =$$

$$= m\frac{d}{dt}\left[\left(u\vec{\imath} + v\vec{\jmath} + w\vec{k}\right) + \left(p\vec{\imath} + q\vec{\jmath} + r\vec{k}\right) + \left(x_g\vec{\imath} + y_g\vec{\jmath} + z_g\vec{k}\right)\right] \quad \text{Eq.2.19}$$

Considerando as expressões a seguir para os vetores unitários conforme [5 e 6]:

$$\frac{d\vec{\imath}}{dt} = r\vec{\jmath} - q\vec{k} \quad \text{Eq.2.20}$$

$$\frac{d\vec{\jmath}}{dt} = p\vec{k} - r\vec{\imath} \quad \text{Eq.2.21}$$

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = q\vec{\imath} - p\vec{\jmath} \quad \text{Eq.2.22}$$

Teremos, após desenvolver a expressão de $\frac{d}{dt}\overrightarrow{\rho_g}$, variação da posição do centro de gravidade, utilizando as mesmas, a expressão correspondente à variação no tempo da quantidade de movimento linear:

$$\frac{d}{dt}\vec{G} = \{m[\dot{u} + qw - rv - x_g(q^2 + r^2) - y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})\}\vec{\imath} +$$

$$\{m[\dot{v} + ru - pw - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})]\}\vec{\jmath} +$$

$$\{m[\dot{w} + pv - qu - z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p})]\}\dot{k} \quad \text{Eq.2.23}$$

2.6 Quantidade de movimento angular

Da Mecânica Clássica, temos o somatório de momentos externos ao submarino pela definição da 2ª Lei de Newton, igual à quantidade de movimento angular para um corpo rígido:

$$\sum \vec{M} = \frac{d}{dt}\overrightarrow{H_g} + \overrightarrow{\rho_g} \times \frac{d}{dt}\vec{G} \quad \text{Eq.2.24}$$

onde:

$\sum \vec{M}$= somatório dos momentos provocados pelas forças externas;

$\overrightarrow{H_g}$ = momento cinético em relação ao centro de gravidade;

$\overrightarrow{\rho_g}$ =posição do centro de gravidade do submarino com relação ao sistema de referência solidário ao corpo = $x_g\vec{\imath} + y_g\vec{\jmath} + z_g\vec{k}$.

A seguir temos a equação que define o momento cinético de um corpo rígido com relação aos eixos principais de inércia que passam pelo centro de gravidade:

$$\overrightarrow{H_g} = \overline{I_x}p\vec{\imath} + \overline{I_y}q\vec{\jmath} + \overline{I_z}r\vec{k} \quad \text{Eq.2.25}$$

onde:

$\overline{I_x}, \overline{I_y}\ e\ \overline{I_z} =$ momentos de inércia do submarino com relação aos eixos principais de inércia que passam pelo centro de gravidade.

Utilizando o teorema dos eixos paralelos [29 e 30], podemos obter as seguintes expressões para os momentos de inércia que passam pelo centro de gravidade:

$$\overline{I_x} = I_x - m\left(y_g^2 + z_g^2\right) \quad \text{Eq.2.26}$$

$$\overline{I_y} = I_y - m\left(z_g^2 + x_g^2\right) \quad \text{Eq.2.27}$$

$$\overline{I_z} = I_y - m\left(x_g^2 + y_g^2\right) \quad \text{Eq.2.28}$$

onde:

$I_x, I_y\ e\ I_z =$ momentos de inércia do submarino com relação ao sistema de referência solidário ao corpo.

Teremos então finalmente:

$$= \frac{d}{dt}\left(\left[I_x - m\left(y_g^2 + z_g^2\right)\right]p\vec{\imath} + \left[I_y - m\left(z_g^2 + x_g^2\right)\right]q\vec{\jmath} + \left[I_z - m\left(x_g^2 + y_g^2\right)\right]r\vec{k}\right) + \overrightarrow{\rho_g} \times \frac{d}{dt}\vec{G} =$$

$$= \frac{d}{dt}\left\{\left[I_x - m\left(y_g^2 + z_g^2\right)\right]p\vec{\imath} + \left[I_y - m\left(z_g^2 + x_g^2\right)\right]q\vec{\jmath} + \left[I_z - m\left(x_g^2 + y_g^2\right)\right]r\vec{k}\right\} + \left\{\left[x_g\vec{\imath} + y_g\vec{\jmath} + z_g\vec{k}\right] \times m\frac{d}{dt}\left[\left(u\vec{\imath} + v\vec{\jmath} + w\vec{k}\right) + \left(p\vec{\imath} + q\vec{\jmath} + r\vec{k}\right) \times \left(x_g\vec{\imath} + y_g\vec{\jmath} + z_g\vec{k}\right)\right]\right\} \quad \text{Eq.2.29}$$

E, supondo que a massa de nosso submarino não altera sua distribuição durante o deslocamento, teremos então:

$$\frac{d}{dt}I_x = \frac{d}{dt}I_y = \frac{d}{dt}I_z = 0$$

obtemos então:

$$\begin{aligned}
&\frac{d}{dt}\overrightarrow{H_g} + \overrightarrow{\rho_g} \times \frac{d}{dt}\vec{G} \\
&= \{I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr \\
&+ m[y_g(\dot{w} + pv - qu) - z_g(\dot{v} + ru - pw) + x_g y_g(pr - \dot{q}) \\
&- x_g z_g(pq + \dot{r}) + y_g z_g(r^2 - q^2)]\}\vec{\imath} \\
&+ \{I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp \\
&+ m[z_g(\dot{u} + qw - rv) - x_g(\dot{w} + pv - qu) + y_g z_g(qp - \dot{r}) \\
&- y_g x_g(qr + \dot{p}) + z_g x_g(p^2 - r^2)]\}\vec{\jmath} \\
&+ \{I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq \\
&+ m[x_g(\dot{v} + ru - pw) - y_g(\dot{u} + qw - rv) \\
&+ z_g x_g(rq - \dot{p}) - z_g y_g(rp + \dot{q}) + y_g x_g(q^2 - p^2)]\}\vec{k} \quad \text{Eq.2.30}
\end{aligned}$$

que é a expressão correspondente à variação da quantidade de movimento angular.

2.7 Forças Externas

2.7.1 Forças de Natureza Gravitacional

Faremos no presente trabalho o mesmo expediente utilizado em [6]. Seguiremos a mesma sequência para o produto das matrizes rotacionais a seguir como em [4, 5 e 6]:

$$T_\theta = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad \text{Eq.2.31}$$

é a matriz de transformação do sistema de referência solidário ao corpo para um novo sistema , oriundo da rotação θ em torno do eixo Z, no plano XZ, com eixos do sistema de referência inercial.

$$T_{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad \text{Eq.2.32}$$

é a matriz de transformação do sistema de referência inercial XYZ, obtido pela rotação θ, para outro sistema de referência formado pela rotação ϕ em torno do eixo Z, no plano YZ.

Assumindo que o nosso submarino possa ter uma atitude formada através de uma rotação θ, seguida de uma rotação ϕ, com relação ao sistema de referência inercial e sabendo também que a força gravitaconal peso $W = mg$ atua no eixo Z do sistema inercial, com sentido para baixo, teremos finalmente:

$$T_{\phi}\, T_{\theta} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -mg\sin\theta \\ mg\sin\phi\cos\theta \\ mg\cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad \text{Eq.2.33}$$

,logo:

$$\sum \vec{F}_{gravitacionais} = -mg\sin\theta\vec{\imath} + mg\sin\phi\cos\theta\,\vec{\jmath} + mg\cos\phi\cos\theta\,\vec{k} \quad \text{Eq.2.34}$$

2.7.2 Forças Hidrostáticas

A força de empuxo B, analogamente à força peso W, atua no eixo Z do sistema de referência inercial, mas ao contrário desta, tem sentido para cima, logo:

$$\sum \vec{F}_{hidrostática} = B\sin\theta\vec{\imath} - B\sin\phi\cos\theta\,\vec{\jmath} - B\cos\phi\sin\theta\,\vec{k} \quad \text{Eq.2.35}$$

2.7.3 Forças de origem Hidrodinâmica

Seguiremos em nosso trabalho o expediente de [6] para a inclusão de tais forças no equacionamento dinâmico do submarino**.** Primeiramente lista-se as variáveis que geram esforços hidrodinâmicos no submarino. Listemos, então as variáveis; velocidades e acelerações, lineares e angulares e deflecções do leme e dos hidroplanos:

$$u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}\ \ \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r},\ \delta_R, \delta_S$$

Assim, conclui-se que:

$$\begin{aligned}&\sum \vec{F}_{hidrodinâmica}\\ &= f(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}\ \ \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r},\ \delta_R, \delta_S)\vec{\imath}\\ &+ g(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}\ \ \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r},\ \delta_R, \delta_S)\vec{\jmath}\\ &+ h(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}\ \ \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r},\ \delta_R, \delta_S)\vec{k} \quad \text{Eq.2.36}\end{aligned}$$

as diversas variáveis listadas anteriormente produzem esforços de origem hidrodinâmica nas três componentes do sistema de referência solidário ao corpo.

Representaremos tais esforços pelas componentes $X, Y\ e\ Z$ das forças resultantes em função das variáveis mencionadas, segundo a notação adotada pela SNAME[7], teremos então:

$$\sum \vec{F} = X\vec{\imath} + Y\vec{\jmath} + Z\vec{k} \quad \text{Eq.2.37}$$

onde:

$$X = f(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}\ \ \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r},\ \delta_R, \delta_S) \quad \text{Eq.2.38}$$

$$Y = f(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}\ \ \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r},\ \delta_R, \delta_S) \quad \text{Eq.2.39}$$

$$Z = f(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}\ \ \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r},\ \delta_R, \delta_S) \quad \text{Eq.2.40}$$

A seguir, escreveremos as forças acima em série de Taylor, ao redor de um ponto de operação:

Primeiramente a componente$X$:

$$X = f(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}\ \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r},\ \delta_R, \delta_B, \delta_S) =$$

$$= X_0 + \left(\Delta u \frac{\partial}{\partial u} + \Delta v \frac{\partial}{\partial v} + \Delta w \frac{\partial}{\partial w} + \ \dots + \ \Delta\delta_S \frac{\partial}{\partial \delta_S}\right) X_0$$

$$+ \frac{1}{2!}\left(\Delta u \frac{\partial}{\partial u} + \Delta v \frac{\partial}{\partial v} + \Delta w \frac{\partial}{\partial w} + \ \dots + \ \Delta\delta_S \frac{\partial}{\partial \delta_S}\right)^2 X_0$$

$$+ \frac{1}{3!}\left(\Delta u \frac{\partial}{\partial u} + \Delta v \frac{\partial}{\partial v} + \Delta w \frac{\partial}{\partial w} + \ \dots + \ \Delta\delta_S \frac{\partial}{\partial \delta_S}\right)^3 X_0 \quad \text{Eq.2.41}$$

onde:

$$X_0 = f(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}\ \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r},\ \delta_R, \delta_S)_{ponto\ de\ operação} \quad \text{Eq.2.42}$$

$$\Delta variável = variável - valor\ da\ variável\ no\ ponto\ de\ operação$$

Segundo [6] adotaremos a notação comumente utilizada pela SNAME[7] para expressar as derivadas parciais:

$$\frac{\partial X_0}{\partial variável} = X_{variável} \quad \text{Eq.2.42}$$

$$\frac{\partial^2 X_0}{\partial variável1.\partial variável2} = X_{variável1.variável2} \quad \text{Eq.2.43}$$

$$\frac{\partial^2 X_0}{\partial variável1.\partial variável1} = X_{variável1.variável1} \quad \text{Eq.2.44}$$

logo:

$$\frac{\partial^2 X_0}{\partial u.\partial u} = X_{uu} \quad \text{Eq.2.45}$$

$$\frac{\partial^3 X_0}{\partial u.\partial u.\partial v} = X_{uuv} \quad \text{Eq.2.46}$$

Ao utilizar-se o expediente descrito como notação a ser seguida podemos escrever a expressão da força hidrodinâmica na direção do eixo x:

$$X = X_0 + \left(\Delta u X_u + \Delta v X_v + \Delta w X_w + \ldots + \Delta\delta_S X_{\delta_S}\right)$$
$$+ \frac{1}{2!}\left(\Delta u \Delta u X_{uu} + \Delta u \Delta v X_{uv} + \cdots + \Delta v \Delta v X_{vv} + \ldots + \Delta v \Delta\delta_S X_{v\delta_S}\right.$$
$$\left. + \ldots\right)$$
$$+ \frac{1}{3!}\left(\Delta u \Delta u \Delta u X_{uuu} + \Delta u \Delta u \Delta v X_{uuv} + \ldots + \Delta u \Delta u \Delta\delta_S X_{uu\delta_S} + \ldots\right)$$
$$+ \frac{\ldots}{4!} + \cdots \quad \text{Eq.2.47}$$

Analogamente teremos então:

$$Y = Y_0 + \left(\Delta Y u Y_u + \Delta v Y_v + \Delta w Y_w + \ldots + \Delta\delta_S Y_{\delta_S}\right) + \ldots \quad \text{Eq.2.48}$$

$$Z = Z_0 + \left(\Delta u Z_u + \Delta v Z_v + \Delta w Z_w + \ldots + \Delta\delta_S Z_{\delta_S}\right) + \ldots \quad \text{Eq.2.49}$$

Para a correta utilização das expressões das forças, faz-se necessário a determinação das derivadas em torno do ponto de operação. Tais derivadas são denominadas derivadas hidrodinâmicas na literatura da área [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12]. Os métodos para determinação das derivadas hidrodinâmicas não serão objeto de discussão do presente trabalho.

2.8 Momentos Externos

2.8.1 Momento de natureza gravitacional

Determina-se a expressão do momento gravitacional com relação ao sistema solidário ao corpo, pois agora dispomos da expressão da força de natureza gravitacional $\sum \vec{F}_{gravitacional}$, e também da expressão da posição do centro de gravidade com relação ao sistema solidário ao corpo $\overrightarrow{\rho_g}$, logo:

$$\vec{M}_{gravitacional} = \overrightarrow{\rho_g} \times \sum \vec{F}_{gravitacional} =$$

$$= \left(x_g\vec{\imath} + y_g\vec{\jmath} + z_g\vec{k}\right) \times \left(-mg\sin\theta\vec{\imath} + mg\sin\phi\cos\theta\,\vec{\jmath} + mg\cos\phi\cos\theta\,\vec{k}\right) =$$

$$= \begin{bmatrix} \vec{\imath} & \vec{\jmath} & \vec{k} \\ x_g & y_g & z_g \\ -mg\sin\theta & mg\sin\phi\cos\theta & mg\cos\phi\cos\theta \end{bmatrix}$$

$$= \left(y_g mg\cos\phi\cos\theta - z_g mg\sin\phi\cos\theta\right)\vec{\imath}$$

$$- \left(x_g mg\cos\phi\cos\theta + z_g\, mg\sin\theta\right)\vec{\jmath}$$

$$+ \left(x_g mg\sin\phi\cos\theta + y_g mg\sin\theta\right)\vec{k} \quad \text{Eq.2.50}$$

2.8.2 Momento hidrostático

Determina-se a expressão do momento hidrostático com relação ao sistema solidário ao corpo, analogamente ao momento de natureza gravitacional, com a expressão da força hidrostática $\sum \vec{F}_{hidrostática}$, e com a expressão da posição do centro de empuxo $\overrightarrow{\rho_B}$ com relação ao sistema solidário ao corpo, teremos então:

$$\vec{M}_{hidrostático} = \overrightarrow{\rho_B} \times \sum \vec{F}_{hidrostático} =$$

$$= (-y_B B\cos\phi\cos\theta + z_B B\sin\phi\cos\theta)\vec{\imath}$$

$$+ (x_B B\cos\phi\cos\theta + z_B\, B\sin\theta)\vec{\jmath}$$

$$- (x_B B\sin\phi\cos\theta + y_B B\sin\theta)\vec{k} \quad \text{Eq.2.50}$$

2.8.3 Momentos de origem Hidrodinâmica

Analogamente à determinação das forças de origem hidrodinâmica, a determinação de tais momentos segue o expediente de se escolher variáveis que afetam os mesmos, e a expansão em série de Taylor das componentes $K, M\ e\ N$ com relação ao sistema solidário ao corpo. Para a utilização das expressões a seguir devemos possuir os valores das derivadas hidrodinâmicas no ponto de operação correspondente [6]. Temos então:

$$\sum \vec{M}_{hidrodinâmico} = K\vec{\imath} + M\vec{\jmath} + N\vec{k} \quad \text{Eq.2.51}$$

onde:

$$K = K_0 + \left(\Delta u K_u + \Delta v K_v + \Delta w K_w + \ldots + \Delta\delta_S K_{\delta_S}\right)$$
$$+ \frac{1}{2!}\left(\Delta u \Delta u K_{uu} + \Delta u \Delta v K_{uv} + \cdots + \Delta v \Delta v K_{vv} + \ldots + \Delta v \Delta\delta_S K_{v\delta_S}\right.$$
$$\left. + \ldots\right)$$
$$+ \frac{1}{3!}\left(\Delta u \Delta u \Delta u K_{uuu} + \Delta u \Delta u \Delta v K_{uuv} + \ldots + \Delta u \Delta u \Delta\delta_S K_{uu\delta_S} + \ldots\right)$$
$$+ \frac{\ldots}{4!} + \cdots \quad \text{Eq.2.52}$$

e, finalmente:

$$M = M_0 + \left(\Delta u M_u + \Delta v M_v + \Delta w M_w + \ldots + \Delta\delta_S M_{\delta_S}\right) + \ldots \quad \text{Eq.2.53}$$

$$N = N_0 + \left(\Delta u N_u + \Delta v N_v + \Delta w N_w + \ldots + \Delta\delta_S N_{\delta_S}\right) + \ldots \quad \text{Eq.2.54}$$

2.9 Sumário das equações obtidas para descrever o movimento

Reunindo as diversas componentes discutidas previamente, podemos então sumarizar as equações do movimento em seis graus de liberdade do submarino:

Força *X*:

$$X = m\left[\dot{u} + qw - rv - x_g\,(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})\right]$$
$$= \left[X_0 + \left(\Delta u X_u + \Delta v X_v + \Delta w X_w + \ldots + \Delta\delta_S X_{\delta_S}\right)\right.$$
$$+ \frac{1}{2!}\left(\Delta u \Delta u X_{uu} + \Delta u \Delta v X_{uv} + \cdots + \Delta v \Delta v X_{vv} + \ldots + \Delta v \Delta\delta_S X_{v\delta_S}\right)$$
$$\left. + (\ldots)\right] + B\sin\theta - mg\sin\theta \quad \text{Eq.2.55}$$

Força *Y*:

$$Y = m\left[\dot{v} + ru - pw - y_g\,(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})\right]$$
$$= \Big[\, Y_0 + \left(\Delta Y u Y_u + \Delta v Y_v + \Delta w Y_w + \ldots + \Delta\delta_S Y_{\delta_S}\right)$$
$$+ \frac{1}{2!}\left(\Delta u \Delta u Y_{uu} + \Delta u \Delta v Y_{uv} + \cdots + \Delta v \Delta v Y_{vv} + \ldots + \Delta v \Delta\delta_S Y_{v\delta_S}\right)$$
$$+ (\ldots)\Big] - B\sin\phi\cos\theta + mg\sin\phi\cos\theta \qquad \text{Eq.2.56}$$

Força *Z*:

$$Z = m\left[\dot{w} + pv - qu - z_g\,(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p})\right]$$
$$= \Big[Z = Z_0 + \left(\Delta u Z_u + \Delta v Z_v + \Delta w Z_w + \ldots + \Delta\delta_S Z_{\delta_S}\right)$$
$$+ \frac{1}{2!}\left(\Delta u \Delta u Z_{uu} + \Delta u \Delta v Z_{uv} + \cdots + \Delta v \Delta v Z_{vv} + \ldots + \Delta v \Delta\delta_S Z_{v\delta_S}\right)$$
$$+ (\ldots)\Big] - B\cos\phi\cos\theta + mg\cos\phi\cos\theta \qquad \text{Eq.2.57}$$

Momento *K*:

$$K = I_x \dot{p} + \left(I_z - I_y\right)qr$$
$$+ m\left[y_g(\dot{w} + pv - qu) - z_g(\dot{v} + ru - pw) + x_g y_g(pr - \dot{q})\right.$$
$$\left. - x_g z_g(pq + \dot{r}) + y_g z_g(r^2 - q^2)\right]$$
$$= \Big[K_0 + \left(\Delta u K_u + \Delta v K_v + \Delta w K_w + \ldots + \Delta\delta_S K_{\delta_S}\right)$$
$$+ \frac{1}{2!}\left(\Delta u \Delta u K_{uu} + \Delta u \Delta v K_{uv} + \cdots + \Delta v \Delta v K_{vv} + \ldots + \Delta v \Delta\delta_S K_{v\delta_S}\right.$$
$$\left. + \ldots\right) + \ldots\Big] - y_B B\cos\phi\cos\theta$$
$$+ y_g mg\cos\phi\cos\theta + z_B B\sin\phi\cos\theta - z_g mg\sin\phi\cos\theta \qquad \text{Eq.2.58}$$

Momento M:

$$M = I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp$$
$$+ m\left[z_g(\dot{u} + qw - rv) - x_g(\dot{w} + pv - qu) + y_g z_g(qp - \dot{r})\right.$$
$$\left. - y_g x_g(qr + \dot{p}) + z_g x_g(p^2 - r^2)\right]$$
$$= \left[M_0 + \left(\Delta u M_u + \Delta v M_v + \Delta w M_w + \ldots + \Delta\delta_S M_{\delta_S}\right)\right.$$
$$+ \frac{1}{2!}\left(\Delta u \Delta u M_{uu} + \Delta u \Delta v M_{uv} + \cdots + \Delta v \Delta v M_{vv} + \ldots + \Delta v \Delta\delta_S M_{v\delta_S}\right.$$
$$\left.\left. + \ldots\right) + \ldots\right] + x_B B \cos\phi \cos\theta$$
$$- x_g mg \cos\phi \cos\theta + z_B B \sin\theta - z_g mg \sin\theta \quad \text{Eq.2.59}$$

Momento N:

$$N = I_z \dot{r} + \left(I_y - I_x\right)pq$$
$$+ m\left[x_g(\dot{v} + ru - pw) - y_g(\dot{u} + qw - rv)\right.$$
$$\left. + z_g x_g(rq - \dot{p}) - z_g y_g (rp + \dot{q}) + y_g x_g(q^2 - p^2)\right]$$
$$= \left[N_0 + \left(\Delta u N_u + \Delta v N_v + \Delta w N_w + \ldots + \Delta\delta_S N_{\delta_S}\right)\right.$$
$$+ \frac{1}{2!}\left(\Delta u \Delta u N_{uu} + \Delta u \Delta v N_{uv} + \cdots + \Delta v \Delta v N_{vv} + \ldots + \Delta v \Delta\delta_S N_{v\delta_S}\right.$$
$$\left.\left. + \ldots\right) + \ldots\right] - x_B B \sin\phi \cos\theta + x_g mg \sin\phi \cos\theta - y_B B \sin\theta$$
$$+ y_g mg \sin\theta \quad \text{Eq.2.60}$$

CAPÍTULO 3

ESTABILIDADE DO MOVIMENTO

3.1 Introdução

A alta velocidade dos modernos submarinos submersos faz com que seja necessário estudar sua estabilidade dinâmica e controle. O assunto é importante, pois o tempo de reação para tomar ações corretivas pela tripulação em caso de avarias é muito curto.

Nosso caso de interesse será o estudo do plano vertical pelos riscos advindos nas altas velocidades envolvidas, podendo o submarino ir além da cota (profundidade) permitida, um risco muito maior do que emergir à superfície inadvertidamente As pesquisas na década de 40 e 50 do século XX . na dinâmica e controle dos submarinos começaram com as similaridades entre o comportamento dinâmico dos dirigíveis, com vasta pesquisa acumulada das décadas de 20 e 30[2 e 3]. A pesquisa desenvolvida proveu os projetistas de um cabedal de importantes informações para um conhecimento básico na área de estabilidade dinâmica, ainda que a mesma não fosse o determinante principal para decisões sobre o tamanho e o formato do submarino no estágio conceitual [2].

Procura-se limitar o ângulo máximo de pitch na qual a mudança de profundidade é em aproximadamente 20º [1,2 e3], tanto pela dificuldade causada à tripulação para manter os sistemas do submarino operacionais como também tais magnitudes de pitch poderem causar mau funcionamento dos equipamentos a bordo.

Uma velocidade bem alta pode rapidamente levar um submarino que está logo abaixo da superfície, na cota periscópica por exemplo, a sua máxima profundidade operacional em questão de minutos, o que deixa pouca margem de tempo para ações de reação no caso de uma falha do sistema de controle do submarino.

Para o projetista, o submarino possui uma peculiaridade, que é a mudança da natureza das forças que governam o movimento à medida que sua velocidade aumenta. Para submarinos convencionais, abaixo de aproximadamente 10 nós [2], as forças hidrostáticas

predominam. Nesse caso, o desempenho do submarino no plano vertical pode ser aferido pelo seu empuxo e sua distribuição de massas. Acima de 10 nós, entretanto, as forças e momentos hidrodinâmicos no casco e nos hidroplanos predominam. Em [8] há todo um trabalho que demonstra que à medida que a velocidade de um submarino vai aumentando a influência metacêntrica vai diminuindo e a parte imaginária das raízes vai diminuindo também, conseqüentemente as oscilações naturais também diminuem.

Para realizarmos o expediente de discutir a estabilidade dinâmica de um submarino, faz-se necessário descrever as forças e momentos hidrodinâmicos em termos convenientes, e a abordagem comumente utilizada foi introduzida pela área da aerodinâmica[7], conforme discutido anteriormente no capítulo 2. A primeira condição para adotá-las é que os movimentos do corpo submerso, o submarino, sejam de pequenos desvios, ou perturbações do movimento original, sendo assim, podemos tomá-las como diretamente proporcionais a tais perturbações. Essa relação é representada pelas derivadas hidrodinâmicas, que já foram discutidas no Capítulo 2. Desse modo, por exemplo, se tivermos uma pequena perturbação da velocidade de sway v, a força hidrodinâmica Y produzida por tal movimento é expressa como $Y = Y_v v,$ onde Y_v é a derivada linear hidrodinâmica da força com relação à velocidade de sway v.

Na maior parte da literatura correlata, as derivadas hidrodinâmicas são expressas na forma adimensional. Mostramos a seguir como exemplo:

$$Y_v' = \frac{Y_V}{\frac{1\rho L^2 U}{2}} \quad \text{Eq.3.1}$$

onde L é normalmente tomado como o comprimento do navio. Assumimos que a forma adimensional da derivada hidrodinâmica é uma característica constante da geometria do corpo submerso. Tal assunção deixa de ser válida para grandes ângulos de ataque de um submarino. Isso facilita o trabalho do Engenheiro ou Pesquisador pois pode-se aplicar tais derivadas a diversas dimensões de corpos submersos com as mesmas formas.

Alguns aspectos que influem na estabilidade direcional de um submarino podem ser enunciadas:

a - um submarino é estável no plano vertical se o centro de empuxo B localiza-se acima do centro de massa, G. Assim se o mesmo sofre uma pequena perturbação no trim quando em descanso, retornará à sua condição original de trim;

b – há uma limitação na profundidade, ou cota, disponível para manobras no plano vertical;
c - o submarino é instável nas translações no eixo z, pois o casco do mesmo é mais compressível que a água que o circunda;
d - é praticamente impossível manter um equilíbrio preciso entre o peso e o empuxo pois combustível e víveres são continuamente consumidos.

Das características expostas, podemos concluir pela importância da introdução dos hidroplanos para exercer forças verticais para a superfície ou para o fundo no submarino. Inclui-se aí a trimagem do mesmo na cota periscópica, para a observação e ataque aos alvos. Os hidroplanos são assim necessários para manter o submarino com uma perfeita trimagem próximo à superfície, já sob a influência das ondas.

Ressaltamos aqui que a importância dos hidroplanos de vante e suas implicações não serão discutidas no presente trabalho, pois o nosso caso de interesse não é o de posicionamento na cota periscópica. No caso dos nossos submarinos classe Tupi-IKL, os hidroplanos de vante são recolhidos por ocasião do mergulho mais profundo, além da cota periscópica. Possuem praticamente a importância de estabilizar a trimagem quando o mesmo encontra-se na cota periscópica por ocasião do esnorqueamento (quando o submarino para não ser detectado sobe quase à superfície, para de uso do snorkel, carregar suas baterias, que são a fonte de energia no caso dos submarinos convencionais), ou por ocasião da observação para ataque aos seus alvos (navios ou plataformas do inimigo).

Em seguida apresentaremos primeiramente o nosso modelo de submarino utilizado: o DARPA SUBOFF. Para a análise da Estabilidade no Plano Vertical utilizaremos o modelo adotado por Healey[16] e Fossen[11e12], desacoplando-o do plano horizontal. Na sequência apresentaremos o Critério de Routh-Hurwitz, apenas como contribuição, na medida em que a determinação da estabilidade do sistema, nosso submarino, será anlisada pelo cálculo dos auto-valores.

3.2.DARPA SUBOFF

O modelo de submarino DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency) SUBOFF [35] é um projeto do DTRC (David Taylor Research Center) para ser desenvolvido em várias universidades concomitantemente. Estuda-se a possibilidade de novos projetos de formas para submarinos avançados possibilitando assim um avanço tanto na área de CFD (Computational Fluid Dynamics), como na área de estabilidade do movimento e manobrabilidade. O SUBOFF especialmente foi desenvolvido para avaliar previsões de fluxo num casco axisimétrico, tanto com, como sem os seus apêndices. A intenção naturalmente é comparar as predições computacionais com os dados experimentais porventura obtidos. Se voltarmos ao tópico sobre a evolução do submarino no Capítulo 1, podemos observar que após o Albacore, tal formato de casco é praticamente um padrão seguido por todos as classes de submarino posteriores, a não ser os que possuam mais de um casco resistente, como é o caso de vários submarinos da Marinha Russa. O DARPA SUBOFF, mostrado na **Figura 3.1**, representa assim um esforço competitivo para avançar nessa área da hidrodinâmica, que sem dúvida é de interesse de muitos países inclusive do Brasil. As características do DARPA SUBOFF são mostradas nas **Tabelas 3.1** e **3.2**.

Tabela 3.1. Parâmetros Verticais do DARPA SUBOFF

Parâmetro	c/todos os apêndices
VOL(ft^3)	**24.9899**
LCB(ft)	**6.6139**
VCB(ft)	**-0.006669**
WS(ft^2)	**67.651**
Empuxo(lb)	**1556,2363**
m'	**0.018296**
$x'_g m' 10^4$	**-0.127467**
I'_z	**0.001084**
I'_Y	**0.001084**

Tabela 3.2. Derivadas Adimensionais , Plano Vertical do DARPA SUBOFF

Derivada	c/todos os apêndices
Z'_w	-0.013910
M'_w	-0.010324
Z'_q	-0.007545
M'_q	-0.003702
$Z'_{\dot{w}}$	-0.014529
$M'_{\dot{w}}$	-0.000561
$Z'_{\dot{q}}$	-0.000633
$M'_{\dot{q}}$	-0.000860
G	-1.162874
$Z'_{\delta s}$	-0.005603
$M'_{\delta s}$	-0.002409

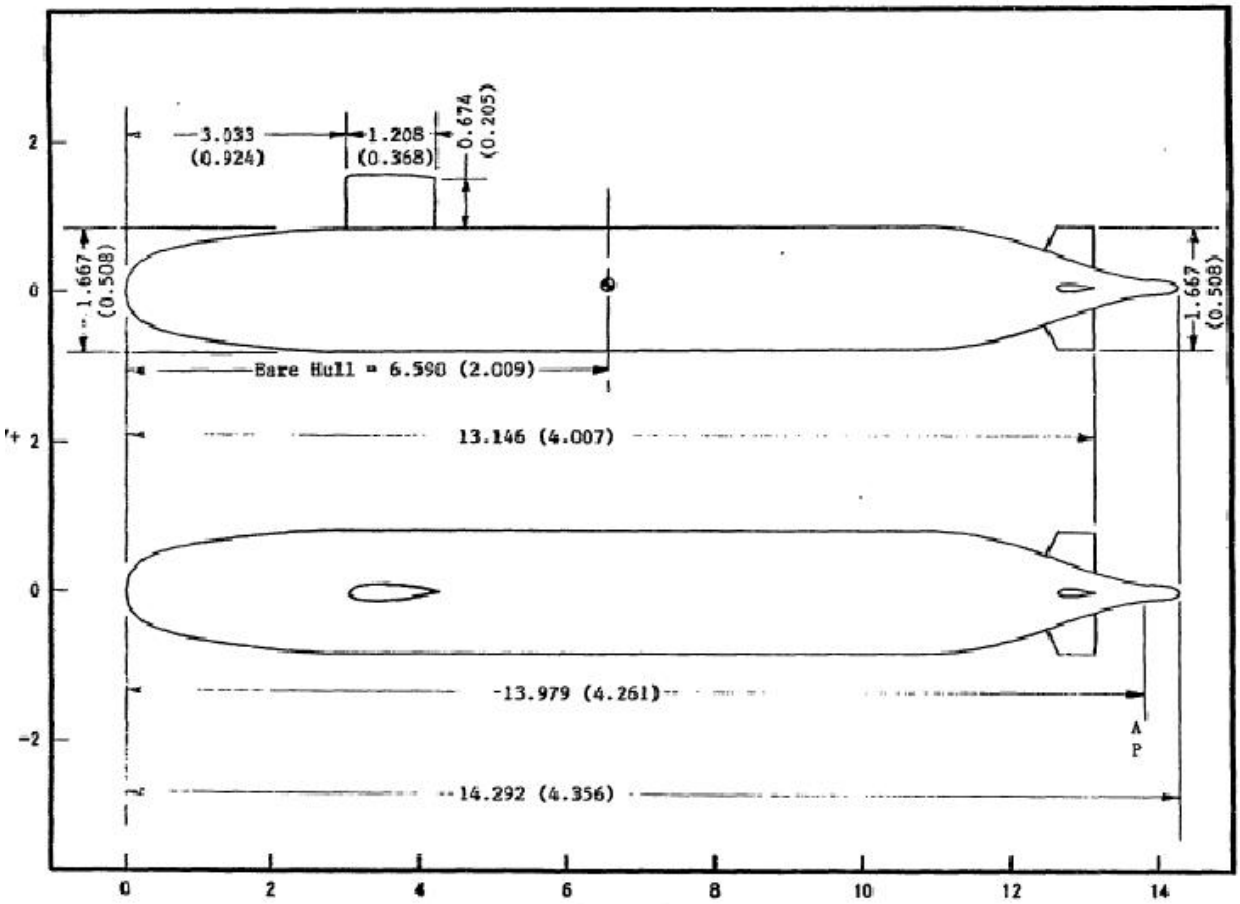


Figura 3.1. DARPA SUBOFF, dimensões em pés, entre parêntese,s em metros

3.3.Critério de Routh-Hurwitz

Estuda-se aqui o critério de estabilidade através dos determinantes de Routh-Hurwitz [4, 6, 10, 11, 13 e 22].

O expediente possui o nome de Routh-Hurwitz pois foi desenvolvido separadamente por dois matemáticos[4]. A discussão apresentada a seguir se aterá à aplicação e não na sua dedução [4, 5, 6, 10, 11 e 13].

O critério consiste basicamente de se analisar uma série de funções-teste para verificar se seus respectivos elementos são positivos ou não. Em caso dos mesmos serem positivos, tem-se então uma condição necessária e suficiente para a estabilidade do polinômio característico, não importando o grau do mesmo. As funções-teste são construídas a partir de uma equação característica, com coeficientes constantes:

$$\Delta(\lambda) = a_0\lambda^m + a_1\lambda^{m-1} + a_2\lambda^{m-2} + \cdots + a_m = 0$$

$$T_1 = a_1$$

$$T_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix}$$

$$T_r = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & a_{-1} & \cdots & a_{1-(r-1)} \\ a_3 & a_2 & a_1 & \cdots & a_{3-(r-1)} \\ a_5 & a_4 & a_3 & \cdots & a_{5-(r-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{2r-1} & a_{2r-2} & a_{2r-3} & \dots & a_r \end{vmatrix}$$

, assumindo que um zero aparecerá em cada termo a_k no qual tenhamos $k < 0$ ou $k > m$. Exemplificando:

$$T_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & a_{-1} \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ a_5 & a_4 & a_3 \end{vmatrix}$$

se m=3:

$$T_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ 0 & 0 & a_3 \end{vmatrix}$$

entretanto, se m=5:

$$T_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ a_5 & a_4 & a_3 \end{vmatrix}$$

Conclui-se então que para m raízes na equação característica, haverá m funções-teste. A construção das matrizes das funções-teste e posterior análise da estabilidade torna-se cada vez mais onerosa à medida que o grau m da equação característica vai aumentando. Entretanto, a maioria dos problemas a serem resolvidos concernentes à estabilidade dinâmica de navios de superfície e submarinos comumente vão apenas até uma equação característica de grau quatro, como a equação C_x(condições a, b, c e d)

$$\Delta(\lambda) = a_0\lambda^4 + a_1\lambda^3 + a_2\,\lambda^2 + a_3\lambda^1 + a_4 = 0, (a_0 > 0) \quad \text{Eq.Cx}$$

Como mostrado, as funções-teste e as conseqüentes condições necessárias e suficientes para a estabilidade da equação característica são as fornecidas pelas equações a seguir:

$$T_1 = a_1 > 0 \quad (a)$$

$$T_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} = a_1a_2 - a_0a_3 > 0 \quad (b)$$

$$T_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ 0 & a_4 & a_3 \end{vmatrix} = a_1a_2a_3 - a_1^2a_4 - a_3^2a_0 > 0 \quad (c)$$

$$T_4 = a_4 > 0 \quad (d)$$

Entretanto, como $T_3 = a_3T_2 - a_1^2a_4$, as condições necessárias e suficientes para a estabilidade resumem-se na secção (e):

$$a_0 > 0; \quad a_1 > 0; \quad a_2 > \frac{a_0a_3}{a_1}; \quad a_3 > \frac{a_1^2a_4}{T_2}; \quad a_4 > 0 \quad (e)$$

Aplicando os critérios de Routh-Hurwitz ao problema da dinâmica no plano vertical, temos então as seguintes condições para estabilidade[4]:

$$a_0 = (m - Z_{\dot{w}})\left(I_y - M_{\dot{q}}\right) - (-M_{\dot{w}})\left(-Z_{\dot{q}}\right)$$

$$a_1 = (m - Z_{\dot{w}})\left(-M_q\right) + \left(I_y - M_{\dot{q}}\right)(-Z_w) - \left(-Z_{\dot{q}}\right)(-M_w) - (-M_{\dot{w}})\left(-m\overline{U} - Z_q\right)$$

$$a_2 = (m - Z_{\dot{w}})(\Delta\overline{\mathrm{BG}}) + (-Z_w)\left(-M_q\right) - (M_w)\left(-m\overline{U} - Z_q\right)$$

$$a_3 = (-Z_{\dot{w}})(\Delta\overline{\mathrm{BG}})$$

Eis as condições para a estabilidade no plano vertical:

$$a_0 > 0; \quad a_1 > 0; \quad a_2 > \frac{a_0 a_3}{a_1}; a_3 > 0$$

As condições $a_0 > 0$ e $a_3 > 0$ sempre serão cumpridas, ($a_3 > 0$ é verdadeira somente se $\overline{GM} > 0$).

Para altas velocidades o termo de restauração hidrostática vai perdendo influência[6, e 9], e conseqüentemente tem-se uma dinâmica bem parecida com a do plano horizontal, pois predominarão as forças hidrodinâmicas [4, 8 e 9] e não temos mais uma equação característica de terceira ordem, mas de segunda. Teremos então um critério para altas velocidades:

$$a_0 = (m - Z_{\dot{w}})\left(I_y - M_{\dot{q}}\right) - (-M_{\dot{w}})\left(-Z_{\dot{q}}\right)$$

$$a_1 = (m - Z_{\dot{w}})\left(-M_q\right) + \left(I_y - M_{\dot{q}}\right)(-Z_w) - \left(-Z_{\dot{q}}\right)(-M_w) - (-M_{\dot{w}})\left(-m\overline{U} - Z_q\right)$$

$$a_2 = (-Z_w)\left(-M_q\right) - (M_w)\left(-m\overline{U} - Z_q\right)$$

que gera então o índice de estabilidade para altas velocidades, **Equação 3.2**, onde não há mais influência da restauração hidrostática:

$$a_2 = (-Z_w)\left(-M_q\right) - (M_w)\left(-m\overline{U} - Z_q\right) \quad > 0 \quad \text{Eq.3.2}$$

Cabe ressaltar que os critérios de Routh-Hurwitz foram aqui mostrados, mas nossa análise foi feita com base nos auto-valores do sistema.

3.4.Análise da Dinâmica Vertical

Assumindo que o veículo está em movimento longitudinal constante com velocidade constante, e nenhuma velocidade vertical, lateral ou angular, podemos então desprezar produtos de pequenos movimentos, movimentos planos horizontais acoplados às equações do plano vertical, e considerar relevantes a inércia do submarino, os termos hidrostáticos e de peso, e as componentes das forças hidrodinâmicas de sustentação(lift) e

de massa adicional, para finalmente chegarmos a um sistema desacoplado do modo horizontal. Utilizaremos o modelo proposto por Healey [16] e Fossen [11 e 12].

Com valores numéricos para veículos diferentes, inclusive o nosso submarino, tal conjunto simplificado de equações de movimento será suficiente para modelar a dinâmica vertical nas respostas aos comandos dos hidroplanos de ré, que são as superfícies de controle dos submarinos. Assume-se aqui pequenos ângulos de ataque e o stall, descolamento da camada limite e das linhas de corrente próximas, com conseqüente formação de vórtices, não é modelado.

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} (m - Z_{\dot{w}}) & -Z_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ -M_{\dot{w}} & (I_Y - M_{\dot{q}}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} Z_w & mU_0 + Z_q & 0 & 0 \\ M_w & M_q & z_B B - z_g W & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & U_0 & 0 \end{bmatrix}$$

Especificamente, com os valores de nosso modelo:

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} 89.4285 & 23.9419 & 0 & 0 \\ 21.3197 & 1.0163e + 03 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -0.0379 & -1.9406 & 0 & 0 \\ 0.0284 & -0.0977 & -1.8415 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 15 & 0 \end{bmatrix}$$

Para analisarmos a estabilidade inerente ao sistema, o submarino, temos que efetuar o seguinte expediente, que nada mais é do que encontrar os auto-valores da matriz característica :

$$\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}; \;\; \boldsymbol{x} = [w;\; q;\; \theta; z] \qquad \text{Eq.3.3}$$

$$\dot{\boldsymbol{x}} = (\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}; \;\; \boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^{4\times 1} \qquad \text{Eq.3.4}$$

$$\lambda_i = eig(\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{A}) \qquad \text{Eq.3.5}$$

Logo, temos então**:**

Tabela. 3.3 Auto-Valores de nosso Sistema/Submarino

Auto-Valor	**Amortecimento**	**Frequência(rad/s)**
0.00e+000	-1.00e+000	0.00e+000
-5.31e-002 + 1.38e+000i	3.86e-002	1.38e+000
-5.31e-002 - 1.38e+000i	3.86e-002	1.38e+000
-2.94e-002	1.00e+000	2.94e-002

o que nos permite concluir, observando a **Tabela 3.3** que temos um sistema instável, pois temos um pólo na origem.

CAPÍTULO 4

CONTROLE EM MODOS DESLIZANTES (‘SLIDING-MODE CONTROLLER’)

4.1 Introdução

A linha comum entre os diversos tipos de controladores empregados é o grau de perturbação a que o mesmo estará sujeito. Quanto maior a precisão no controle, haverá um custo maior de atividade dos atuadores (hidroplanos, lemes, thrusters, etc,). Se o controlador é invariante a certas mudanças nos parâmetros, não há a necessidade tão premente de realizar a identificação de parâmetros ou detecção de falhas. A identificação de parâmetros é uma atividade onerosa e trabalhosa. Empregar então um controlador que não requer esta identificação, torna-se então uma grande vantagem. Não apenas isso, mas a estrutura variável do controle em modos deslizantes, (sliding-mode controller, SMC), [13 E 14], permite que o mesmo adapte-se às perturbações nos parâmetros quase que instantaneamente. Um controlador em modo deslizante ideal, sem dinâmicas parasitas ou limites nos atuadores, facilmente lidaria com ruídos, mudanças nos parâmetros, e não-linearidades que porventura não tenham sido modeladas. Entretanto, sabemos que nos sistemas reais sempre haverá dinâmicas parasitas e limites nos atuadores. As técnicas para o projeto de controladores automáticos normalmente utilizam resposta em freqüência ou técnicas no espaço de estados, na maioria dos casos empregando controladores PID. A grande vantagem para veículos submarinos do controle em modo deslizante é sua grande robustez a parâmetros hidrodinâmicos desconhecidos ou negligenciados na modelagem do veículo [15,16 e 17]. Falando genericamente, uma ação de controle de chaveamento é usada para trocar entre diferentes estruturas e os estados do sistema são forçados a mover-se ao longo de uma superfície de deslizamento no plano de fase previamente escolhida, que determinará o comportamento do sistema em malha fechada.

4.2 Princípios

Os controladores em modo deslizante são um subconjunto de uma classe de controladores conhecidos como controladores de estrutura variável (VSC) Tais controladores são caracterizados por uma estrutura de controle que muda de acordo com uma regra pré-definida que nada mais é que uma função dos estados do sistema.

A estrutura típica de um controlador em modo deslizante, ou seja a regra ou lei, é composta de uma parte nominal e termos adicionais para lidarem com a incerteza na modelagem. O modo como o controle em modo deslizante lida com a incerteza [13 e 14] é dirigir o erro no estado da planta para uma trajetória deslizante, e manter a trajetória do erro nessa superfície no tempo subseqüente até o final do trabalho ou simulação.

Podemos então definir o controle em modo deslizante em duas fases bem claras como ilustrado na **Figura 4.1**, que representa um plano de fase, com o parâmetro, ou variável em questão num eixo e sua derivada representada em outro eixo. Grosso modo, este tipo de controlador visa o projeto de uma hiper-superfície de uma ordem imediatamente inferior a ordem de um sistema representado em espaço de estados, de modo que a variável que desejamos controlar se dirija a partir de uma condição qualquer e permaneça "deslizando" sobre essa superfície, ou seja fique numa determinada condição de estado representada pela superfície que é definida previamente. Tal atividade de controle possui duas fases bem definidas, mostradas no plano de fase da **Figura 4.1**:

1. *Fase de atratividade ou direcionamento:*

Tal fase tem início com o ponto de operação do sistema em questão começar a partir de sua condição inicial, instável e dirigir-se para a superfície deslizante Em tal fase o ponto segue a trajetória do sistema correspondente à entrada que o sistema recebeu.

2. *Fase de deslizamento:*

Esta é a fase em que o ponto de operação move-se apenas na superfície deslizante. Aqui o ponto não necessariamente seguirá qualquer trajetória que estava presente no sistema original. Tal fato decorre que na superfície deslizante a entrada do sistema mudará constantemente, e a descrição do sistema de controle é descontínua.

Assim sendo a hiper-superfície deslizante não necessariamente será um plano sempre, ou uma linha como na **Figura 4.1**, que representa um sistema de segunda ordem, mas na realidade pode ser de qualquer forma.

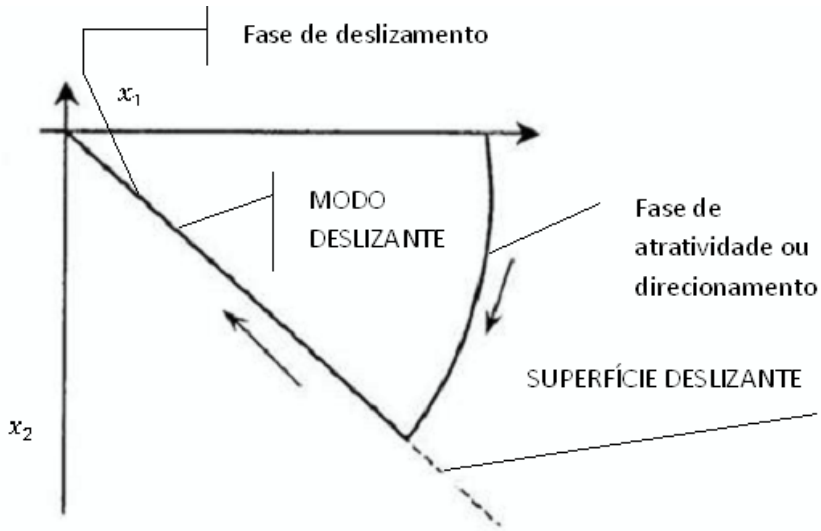


Figura. 4.1 Plano de Fase esquemático; para estabilidade o sistema deve convergir para a origem; a estratégia de controle direciona o estado para a superfície deslizante [14].

4.3 Exposição da Teoria

O processo de projeto do controlador começa com as equações linearizadas do movimento, escritas na forma padrão de espaço de estados:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad \text{Eq.4.1}$$

onde:

$x \in \mathbb{R}^n$, vetor estado

$u \in \mathbb{R}^m$, vetor de entrada de controle

$A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, matriz de estado

$B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, matriz de entrada ou de distribuição de controle

n, número de estados

m, número de entradas

As leis para o controlador em modo deslizante, para um sistema da forma mostrada anteriormente no espaço de estados são da seguinte forma:

$$u = \hat{u} + \bar{u} \quad \text{Eq.4.2}$$

Como pode ser visto na **Equação 4.2,** as leis são compostas de duas partes. A primeira, $\hat{u}$ é a lei de retroalimentação (feedback) linear baseada no modelo nominal linearizado da **Equação 4.1.** A segunda,$\bar{u}$ é a retroalimentação não-linear com seu sinal de chaveamento (swicthing) entre mais e menos de acordo com a localização do sistema em questão em relação à superfície deslizante:

$$\sigma(x) = S^T x = 0 \quad \text{Eq.4.3}$$

onde:

$$S \in \mathbb{R}^{n \times m}$$

$$\sigma \in \mathbb{R}^m$$

A determinação de S determinará única e exclusivamente a superfície de deslizamento.

A lei de controle da **Equação 4.2** deve ser capaz de direcionar o sistema para a supefície de deslizamento da **Equação 4.3**, a partir de um ponto de operação arbitrário, não pertencente à mesma. Será mostrado que a dimensão m da superfície de deslizamento deve ser de um grau inferior ao da dimensão do espaço de estados, partindo da premissa de que $\bar{u}$ tem de mudar de sinal quando o sistema cruzar $\sigma(x) = 0$. Mostraremos a seguir o desenvolvimento de $\hat{u}$ e $\bar{u}$.

4.3.1 Função de Lyapunov

A partir da definição da função de Lyapunov [13 e 14]:

$$V(x) = \frac{1}{2}[\sigma(x)^2] = \frac{1}{2}(\sigma_1^2 + \sigma_1^2 + \cdots + \sigma_m^2) \quad \text{Eq.4.4}$$

que é assimtoticamente estável, desde que $\dot{V}$ é uma função definida negativa, ou seja:

$$\dot{V(x)} = \sigma_1\dot{\sigma}_1 + \sigma_2\dot{\sigma}_2 + \cdots + \sigma_m\dot{\sigma}_m < 0 \quad \text{Eq.4.5}$$

Tal fato só será verdade, se e somente se:

$$\sigma_1\dot{\sigma}_1 < 0$$

$$\sigma_2\dot{\sigma}_2 < 0 \quad \text{Eq.4.6}$$

$$\vdots$$

$$\sigma_m\dot{\sigma}_m < 0$$

que pode também ser escrito da seguinte forma:

$$\dot{\sigma}_1 = -\eta_1^2 sign(\sigma_1)$$

$$\dot{\sigma}_2 = -\eta_2^2 sign(\sigma_2) \quad \text{Eq.4.7}$$

$$\vdots$$

$$\dot{\sigma}_m = -\eta_m^2 sign(\sigma_m)$$

4.3.2 Lei de Controle

Utilizando a **Equação 4.2** e a **Equação 4. 3** na **Equação 4.7,** teremos então:

$$S^T(Ax + Bu) = -K_n \quad \text{Eq.4.8}$$

onde:

$$K_n = \begin{Bmatrix} -\eta_1^2 sign(\sigma_1) \\ -\eta_2^2 sign(\sigma_2) \\ \vdots \\ -\eta_m^2 sign(\sigma_m) \end{Bmatrix} \quad \text{Eq.4.9}$$

Resolvendo para u:

$$u = -(S^T B)S^T Ax - (S^T B)^{-1}K_n \quad \text{Eq.4.10}$$

que tem a mesma forma da **Equação 4.2**, como podemos observar:

$$\hat{u} = -(S^T B)S^T Ax \quad \text{Eq.4.11}$$

$$\bar{u} = (S^T B)^{-1} K_n \quad \text{Eq.4.12}$$

Quando a superfície de deslizamento $\sigma(x) = 0$, a lei de controle torna-se então $u = \hat{u}$.

Substituindo a **Equação 4.11** no sistema de espaço de estados, **Equação 4.1,** gera então:

$$\dot{x} = [A - B(S^T B)^{-1} S^T A]x \quad \text{Eq.4.13}$$

que pode ser escrita simplesmente como:

$$\dot{x} = (A - Bk)x \quad \text{Eq.4.14}$$

onde:

$$k = (S^T B)^{-1} S^T A \quad \text{Eq.4.15}$$

A matriz de ganho k pode ser encontrada através do método de alocação de pólos [22 e 23]. Eis a matriz da dinâmica em malha fechada do nosso sistema:

$$A_c = A - Bk \quad \text{Eq.4.16}$$

A matriz A_c terá então auto-valores especificados para a resposta que desejamos. Além disso, m polos de A_c devem ser nulos o que é coerente com a decomposição da **Equação 4.10.**

A retroalimentação (feedback) linear $\hat{u}$ fornece a dinâmica desejada apenas na superfície deslizante. Portanto, $\hat{u}$ não tem nenhum efeito para as m excursões fora da superfície deslizante $\sigma(x) = 0$..

Ao passo que a retroalimentação não-linear $\bar{u}$ apenas direciona o sistema em questão à superfície deslizante e não controla o mesmo durante o deslizamento nesta superfície. A única condição requerida para esta ação é que o ganho η_i^2 tenha magnitude suficiente de modo que $\bar{u}$ possa prover a robustez necessária às perturbações momentâneas e às dinâmicas que porventura não tenham sido modeladas sem comprometer a estabilidade do sistema.

4.3.3 Superfície de Controle

Com A_c e k especificados, S pode ser determinado a seguir, rearranjando a **Equação 4.14** para k e a utilizando na **Equação 4.16** para A_c , gerando então:

$$S^T A_c = 0 \quad \text{Eq.4.17}$$

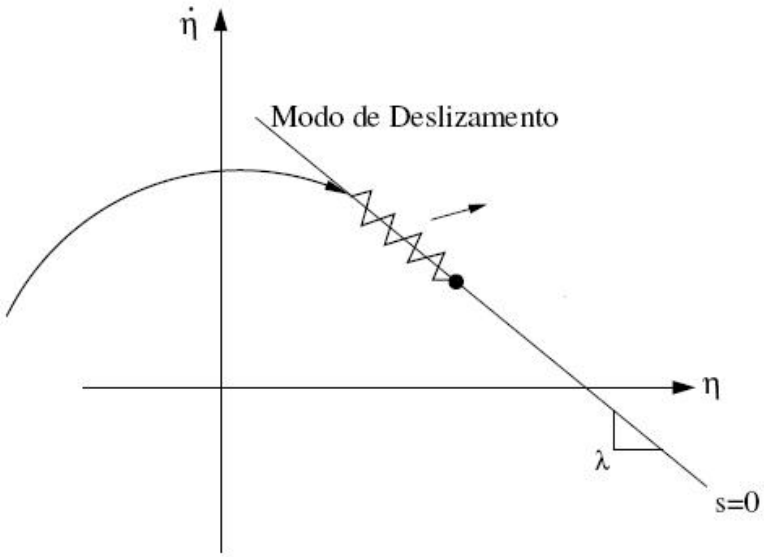
4.3 Procedimento para Obtenção da Lei de Controle

Recordando: a lei de controle u consiste de duas partes [14,15,16 e 17]. A primeira parte û é uma lei de controle de feedback baseada no modelo nominal $, \dot{X} = AX + Bu + f(x),$

com um vetor de ganho :

$$K^T = (S^T B)^{-1} S^T A \quad \text{Eq.4.18}$$

Tal vetor é produzido por alocação de pólos. A segunda parte é um controle não linear com o termo $-\eta^2 sgn(\sigma),$ trocando ('switching') seu sinal entre mais e menos, dependendo em que lado do plano deslizante o sinal de erro esteja. A última parte é para direcionar e manter o sistema na superfície deslizante $\sigma(\tilde{X}) = 0$. Se η é escolhido grande o suficiente, $\overline{u}$ pode prover robustez mais do que necessária aos efeitos de perturbações momentâneas e erros de modelagem. Entretanto, a função descontínua $sgn,$ na lei de controle pode levar ao batimento (chattering), mostrado na Figura 4.2.



ou
g”

Figura. 4.2 A principal deficiência do controle em modo deslizante, o batimento, ('chattering') [14].

Como Slotine e Li [14] apontaram, o batimento envolve alta atividade de controle, e além disso podem existir dinâmicas não previstas de alta frequência que não foram previstas na modelagem, que porventura sejam excitadas. Portanto, é desejável suavizar a atividade de controle próxima à superfície deslizante. Na prática, podemos modificar a lei de controle de modo deslizante substituindo a função *sgn* pela função contínua *tanh* :

$$u = \hat{u} + \overline{u}$$
$$= -K^T X + (S^T B)^{-1}\left[S^T \dot{X}_d - S^T \hat{f}(x) - -\eta^2 tanh(\sigma)\right] \quad Eq. 4.19$$

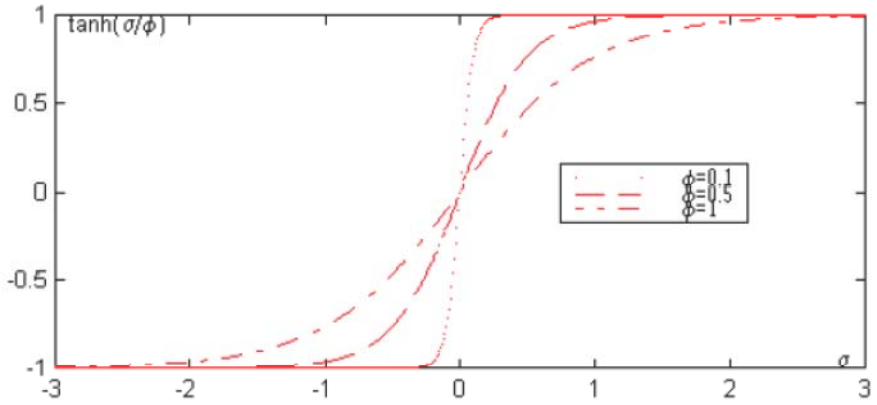


Figura. 4.3 Função tangente hiperbólica que suaviza a descontinuidade do chaveamento [14] ,

Portanto S^Té um aniquilador à esquerda de A_c, ou S é um auto-vetor à direita de A_c^T correspondente a um auto-valor nulo. Com a escolha correta de S, podemos completamente determinar a superfície deslizante e a lei de controle em modo deslizante ('sliding-mode control law') em:

$$u = \hat{u} + \overline{u}$$
$$= -K^T X + (S^T B)^{-1}\left[S^T \dot{X}_d - S^T \hat{f}(x) - \eta^2 tanh(\sigma)\right]$$

Em suma, o procedimento de projeto de um controlador em modo deslizante (SMC) consiste de dois passos: primeiramente, determinar a lei de retroalimentação (feedback) $\hat{u}$

com base no modelo linear nominal em espaço de estados; e segundo, projetar uma lei de controle $\bar{u}$ para compensar os desvios dos desempenhos ideais e das incertezas.

Repetindo o procedimento descrito acima para o nosso caso, o DARPA SUBOFF, com determinada equação de estados $\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{Ax} + \boldsymbol{Bu}$ onde $\boldsymbol{A} = \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{A}$ e. $\boldsymbol{B} = \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{B}$. A técnica de alocação de pólos é utilizada para obter o vetor de ganhos de $\boldsymbol{k}$**,** com pelo menos um pólo em zero para garantir a inclinação correta da hiper-superfície deslizante, ou seja, que a mesma sempre cruze a origem. A matriz da dinâmica em malha fechada $\boldsymbol{A_c} = \boldsymbol{A} - \boldsymbol{BK^T}$ pode então ser encontrada do auto-vetor nulo, calculada e a superfície deslizante polinomial é então definida por meio de $\boldsymbol{A_c^T} = \boldsymbol{0}$. Ou seja, a hiper-superfície é definida pela última coluna da matriz formada com os auto-vetores da transposta de A_c**.** Tal procedimento descrito acima define um algoritmo para encontrarmos a hiper-superfície de qualquer dinâmica descrita no espaço de estados.

O controlador obtido para o DARPA SUBOFF foi obtido através de várias simulações no ambiente MATLAB e, mesmo assim como veremos adiante, tal procedimento não eliminou completamente o batimento (chattering), porém, proveu a robustez e presteza necessárias aos comandos de profundidade. A seguir os parâmetros da lei de controle obtidos:

$$\boldsymbol{K} = [-123.7321 \quad -500.2020 \quad -965.6528 \quad 0]$$

$$\boldsymbol{K_s} = -541.1140$$

$$\boldsymbol{S} = [-0.0200 \quad -0.3308 \quad 0.9178 \quad -0.2185]^T$$

$$\boldsymbol{\eta} = 340$$

$$\boldsymbol{\Phi} = 0.0021$$

Podemos então agora formular nossa lei de controle**:**

$$\boldsymbol{dp} = -uK - K_s\eta \tanh\left(\frac{S[w \quad q \quad \theta \quad z - z_d]}{\Phi}\right) \quad \text{Eq.4.20}$$

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Introdução

Serão apresentadas simulações para verificar a presteza do controlador em fazer com que o DARPA SUBOFF cumpra suas tarefas.

O Controle em Modos Deslizantes (SMC-Sliding Mode Control) deve possuir robustez às incertezas ambientais, externas como também deve possuir robustez às incertezas na modelagem. Aqui introduziremos o conceito de envoltória (envelope, para o pessoal submarinista da Marinha do Brasil) de Segurança, que nada mais é que um diagrama onde o comandante do submarino tem a seu dispor as limitações de manobra de seu navio [2 e 3].

Os principais incidentes que podem ocorrer num submarino tornaram-se uma preocupação maior com o aumento da velocidade dos mesmos. Diferentemente do alagamento, onde já ocorreram diversos incidentes, o emperramento dos hidroplanos é uma avaria mais rara que leva à perda de controle a grandes profundidades. Outro incidente que é uma preocupação de projeto é o travamento dos hidroplanos a ré. Os hidroplanos de vante mesmo no seu limite, não conseguiriam conter o momento produzido pelos hidroplanos de ré. A solução torna-se então todo um procedimento para recuperação de emergência; reduzir velocidade, colocar os hidroplanos de vante no seu limite de saturação para emersão, esvaziar os tanques de lastro, etc.

A principal conclusão é que a velocidade deve ser reduzida à medida que vai se atingindo uma profundidade maior. Assim, os operadores do navio devem ter a seu dispor um roteiro a ser seguido prontamente de regras de como a velocidade do navio deve ser reduzida a determinadas velocidades à medida que o submarino vai atingindo maiores profundidades e os limites dos hidroplanos associados a cada profundidade e a cada velocidade. A envoltória de segurança condensa tais informações para o operador a bordo graficamente, como ilustrado na **Figura 5.1** extraída de [2].

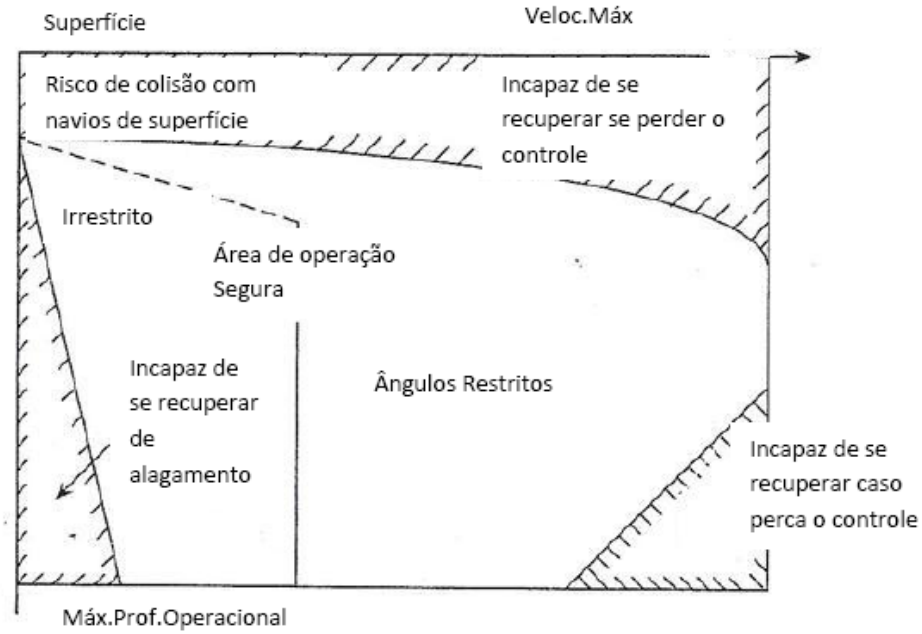


Fig.5.1. Envoltória de segurança de um submarino, extraído de [2].

5.2 Simulações

Nosso modelo não possui envoltória de segurança e, além disso, não há limitações de velocidade e ângulos dos hidroplanos de acordo com a profundidade. Ele seria um submarino operando em condições ideais, inclusive o controlador. Faremos simulações com diversas condições iniciais, e com ou sem perturbações, mas lembramos que nosso caso difere e muito da realidade. Apesar disso, como veremos adiante, o controlador desenvolvido nesse trabalho consegue fazer com que o DARPA SUBOFF, descrito com seus dados no Capítulo 3, atenda aos comandos de Profundidade e mantenha a estabilidade do movimento, após o comando ordenado ter sido atingido. O objetivo é avaliar o desempenho do controlador em situações limites, como por exemplo, altos ângulos de proa a altas profundidades e com perturbações de nível bastante danoso ao movimento, para verificar a robustez do controlador às incertezas e a presteza do mesmo em corrigir os desvios de trajetória. Como veremos a seguir, o controlador em modos deslizantes, mesmo nas piores situações, cumpre muito bem a tarefa proposta de manter a estabilidade direcional do submarino.

5.2.1 Introdução às Simulações

A robustez aos erros de modelagem e às incertezas do ambiente será comprovada no presente trabalho através da simulação com várias perturbações distintas, entretanto, o problema do “chattering” ou batimento, não foi eliminado completamente, como desejado Conseguimos o melhor resultado regulando os parâmetros da lei de controle, após várias simulações com o DARPA SUBOFF. Para eliminar, ou quase eliminar completamente o “chattering” do controlador seriam necessárias mais corridas e mais ajustes no controlador.

Mas cabe ressaltar que segundo Utkin [34], uma frequencia do sinal próximo ao infinito para a manutenção do estado na superfície deslizante é menos nocivo às partes mecânicas, atuadores ou controladores do que uma frequência bem menor e com pulsos bem definidos. Pois a frequência próximo ao infinito na verdade produz um sinal de controle médio, permanecendo praticamente na mesma posição de atuação. Ao passo que frequências menores são mais danosos ao sistema e aos atuadores pois mesmo com atraso, os mesmos são capazes de cumprir os comandos gerando tanto movimentos oscilatórios no atuador , como no estado. As conclusões de Utkin [34], serão mostradas nas **Figuras 5.2, 5.3 e 5.4**. As discussões que acompanham as mesmas, serão sobremaneira úteis para uma melhor observação e conclusão das simulações a serem mostradas na próxima etapa do presente trabalho.

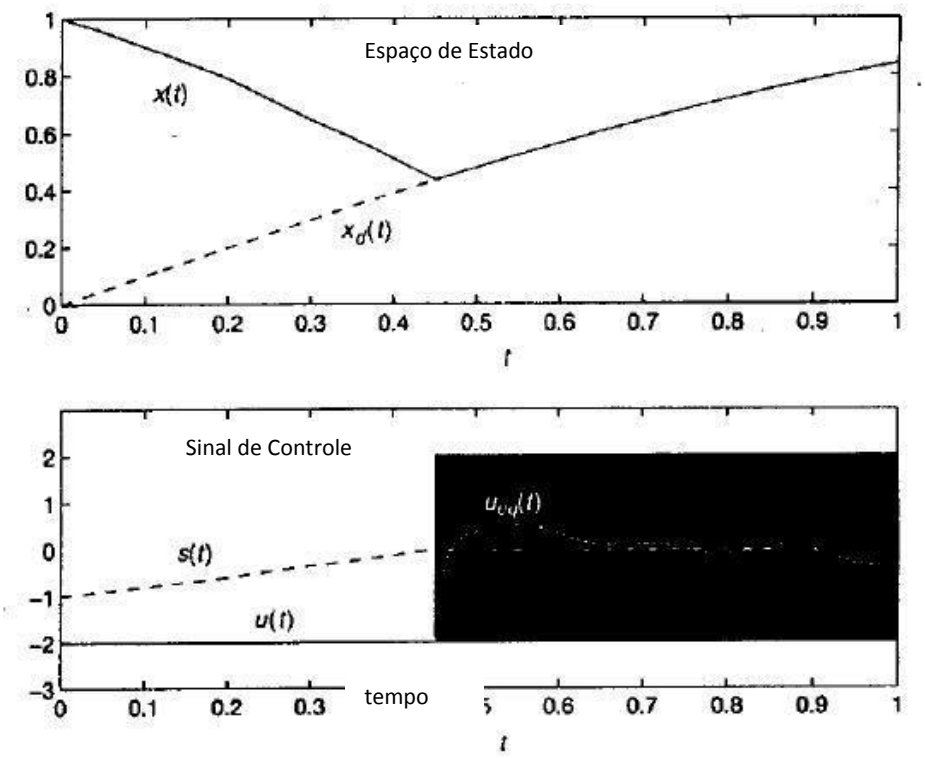


Figura 5.2. Espaço de Estado(acima) e a Evolução da Ação de Controle [34], a linha tracejada que adentra a faixa escura corresponde ao comando equivalente u_{eq}

O controlador em modo deslizante 'ideal', conforme mostrado na **Figura 5.2**, converge o estado $x(t)$ para o estado $x_d(t)$ num tempo finito, de aproximadamente 0.45s. A partir daí, o sinal de controle $u(t)$ alterna ('switches') com freqüência infinita e mostra a área escura. O sinal de controle equivalente, de fato é u_{eq}(t) e é mostrado em linhas tracejadas. Esse sinal, u_{eq}, é o que de fato irá para o atuador efetuar o controle, pois por possuir uma freqüência próxima ao infinito, não há tempo suficiente para o atuador, mesmo com atraso na sua dinâmica, acompanhar tal excitação próxima ao infinito. No caso de um submarino há todo um sistema hidráulico ou pneumático para movimentar hidroplanos ou lemes, além da massa adicional por ocasião do seu movimento. Uma conclusão importante também analisando a **Figura 5.2**, é que a alta atividade do sinal de comando só se inicia quando o estado $x(t)$ alcança o estado comandado $x_d(t)$, para mantê-lo exatamente na superfície deslizante, nesse caso praticamente sem desvio da mesma, como mostrado no gráfico da parte de cima da **Figura 5.2**. Iremos observar em várias das simulações (especialmente nos casos 1; 2; 3; 6; 7 e 9) um comportamento semelhante ao mostrado. Concluímos que a excitação do

sinal de controle de freqüência praticamente infinita ocorre justamente nos casos em que ele se atém perfeitamente à hiper-superfície deslizante e não é indesejável.

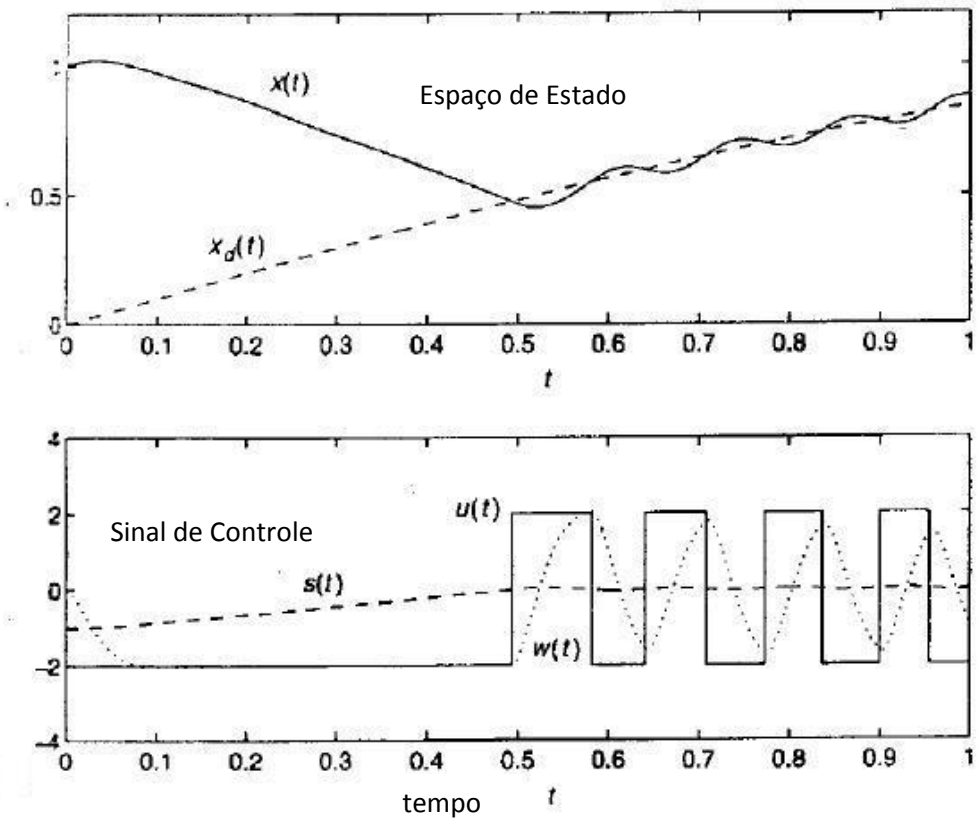


Figura 5.3 Espaço de Estado(acima) e a Evolução da Ação de Controle(abaixo), caso de sinal do atuador e resposta, ambos oscilatórios.

O batimento (‘chattering’) no sistema sob a atuação de um controle que na prática se encontra descontínuo, por causa da baixa freqüência do sinal é mostrado na **Figura 5.3**. Depois de alternar o sinal de controle $u(t)$, a saída do atuador $w(t)$ sofre um atraso em relação ao mesmo, ocasionando trajetórias oscilatórias no sistema. Isso é o que ocorre em outro grupo de simulações (casos 11 e 13), após alcançarem a superfície deslizante, porém a excitação produzirá ruído, fadiga, desgaste excessivo ou até mesmo parada dos atuadores. A resposta do estado desejado permanece numa trajetória oscilatória em torno da superfície deslizante, diferentemente do estado na **Figura 5.2.**

E em outro grupo de simulações(casos 4; 5; 8 e 10) podemos observar que o sinal de controle se manteve constante com uma conseqüente deflecção do atuador constante, muito provavelmente pelo tempo para se alcançar o comando não fazer parte do tempo total em que foram feitas as simulações, mas certamente com mais tempo de simulação o estado alcançaria a superfície deslizante.

Observando a **Figura 5.4** temos bem ilustrado o que foi discutido nos parágrafos da presente secção, sendo bem claro a trajetória no plano de fase do estado até alcançar a superfície deslizante e a alta atividade de ordem ao atuador para manter o estado na mesma.

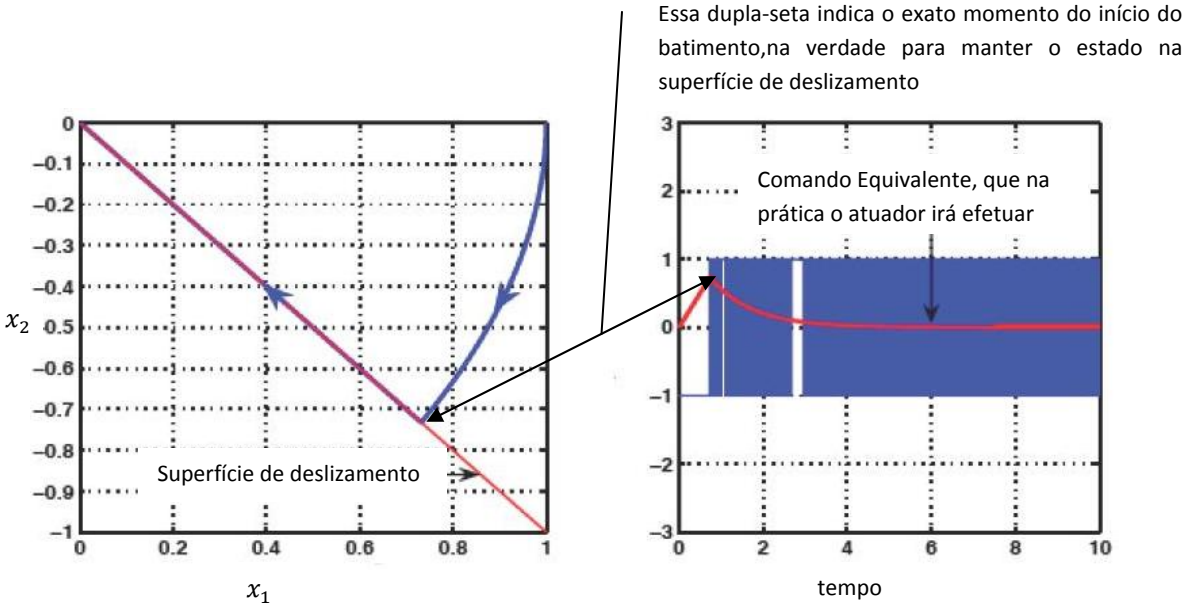


Figura 5.3 Associação entre o Espaço de Estado (esquerda) e a Evolução da Ação de Controle (abaixo), mostrando claramente o início do sinal para o atuado, com freqüência próxima a infinito, para manter o estado na superfície de deslizamento e convergir para a origem, estabilizando o sistema..

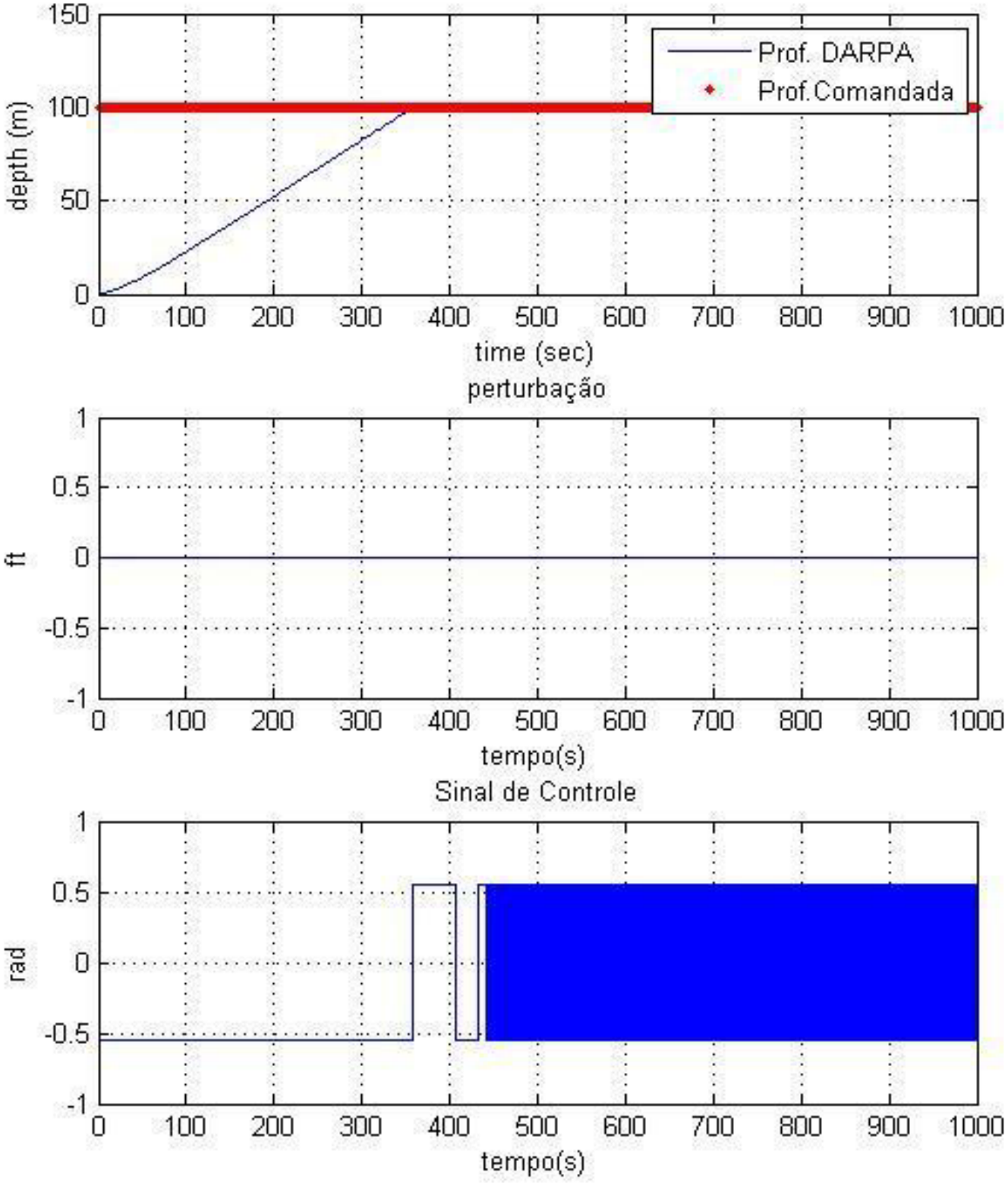
5.2.2 Breve sumário das simulações

A seguir apresentaremos uma sucessão de simulações com o objetivo de comprovar a eficácia e robustez do SMC para o caso do DARPA SUBOFF. As simulações serão divididas que estão sintetizados na **Tabela 5.1.**

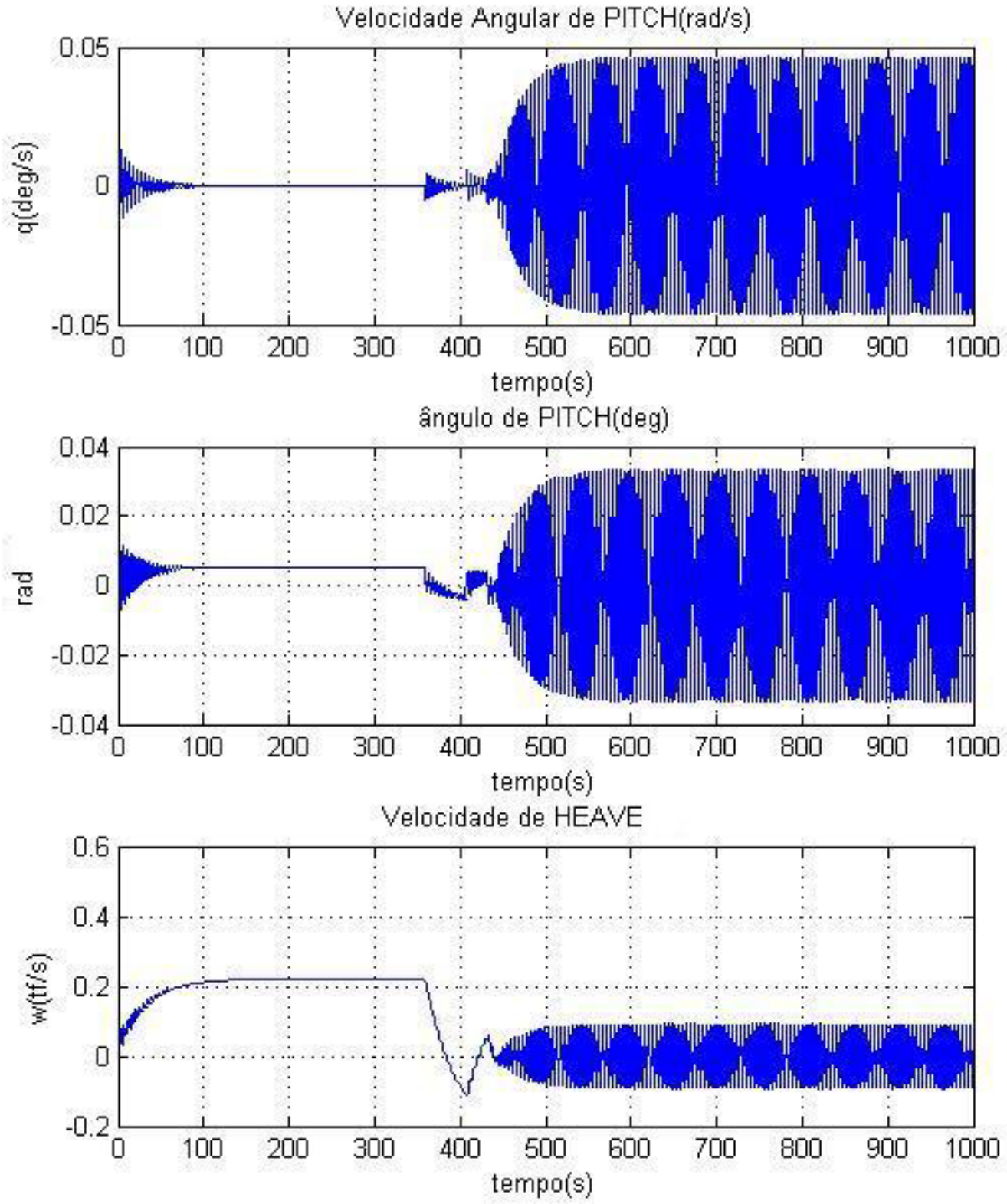
Tabela 5.1. Sumário das simulações (casos) e suas condições

Caso 1	Proa (ângulo de pitch) neutra inicial, comando de 100ft, sem perturbação
Caso 2	Proa (ângulo de pitch) neutra inicial, comando de 100ft**,** com perturbação
Caso 3	Proa neutra, a uma determinada profundidade, emergindo, com perturbação de um pulso
Caso 4	Proa para baixo (30º aprox.), emergindo (subindo) com perturbação de valor o dobro do caso anterior
Caso 5	Proa para baixo, alta profundidade, sem perturbação
Caso 6	Proa para cima, alta profundidade, emersão sem perturbação
Caso 7	Alta profundidade, proa para cima, perturbação em duplo pulso
Caso 8	Proa para baixo (30º), alta prof. perturbação pulso de longa duração
Caso 9	Proa para cima (30º), alta prof. perturbação pulso de longa duração
Caso 10	Proa para baixo, emersão, perturbação ruído branco
Caso 11	Proa para cima, emersão, perturbação ruído branco
Caso 12	Proa para baixo(30º), emersão, ruído aleatório
Caso 13	Proa para cima, emersão, ruído aleatório

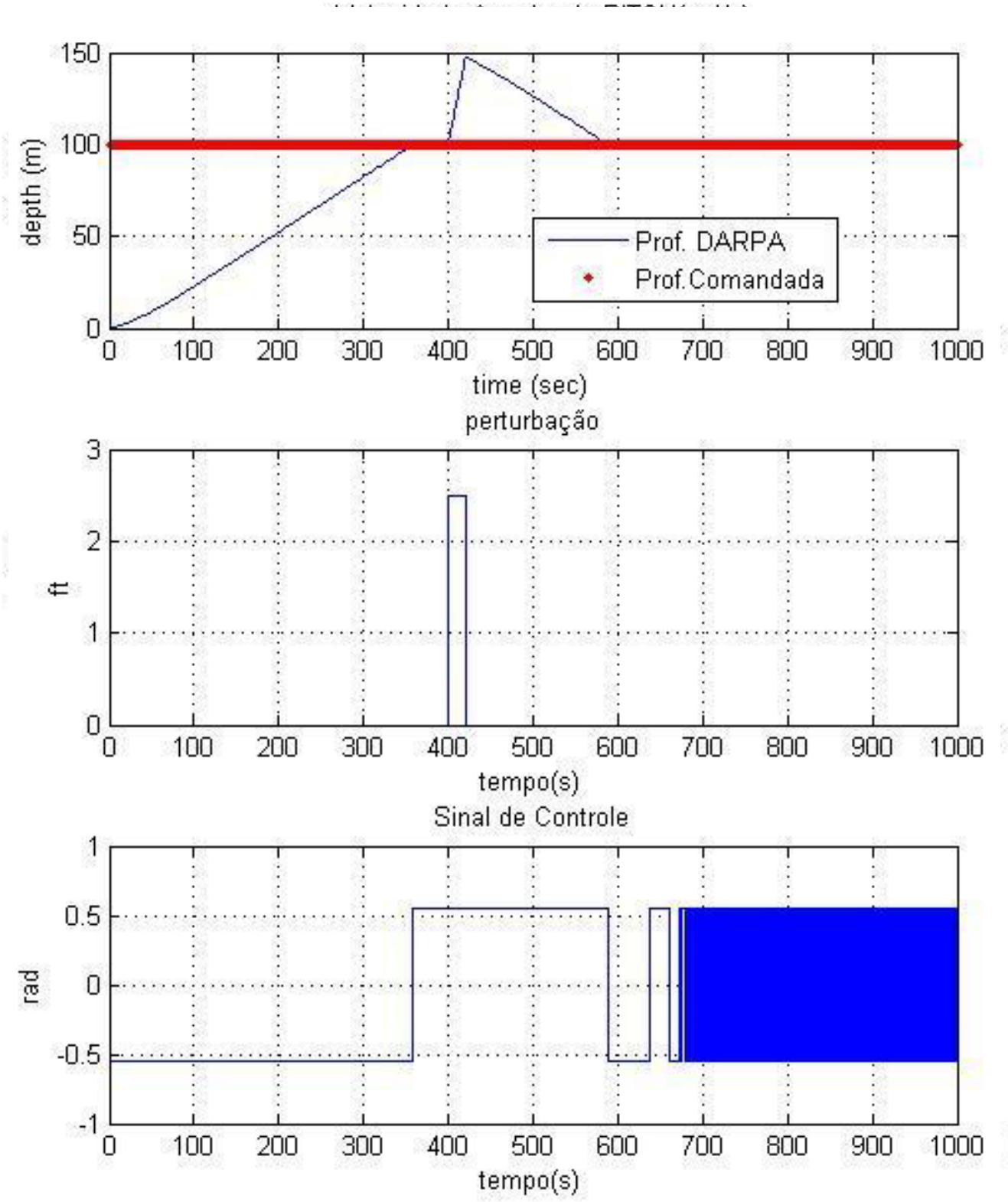
Caso 1: Proa (ângulo de pitch) neutra inicial, comando de 100ft, sem perturbação



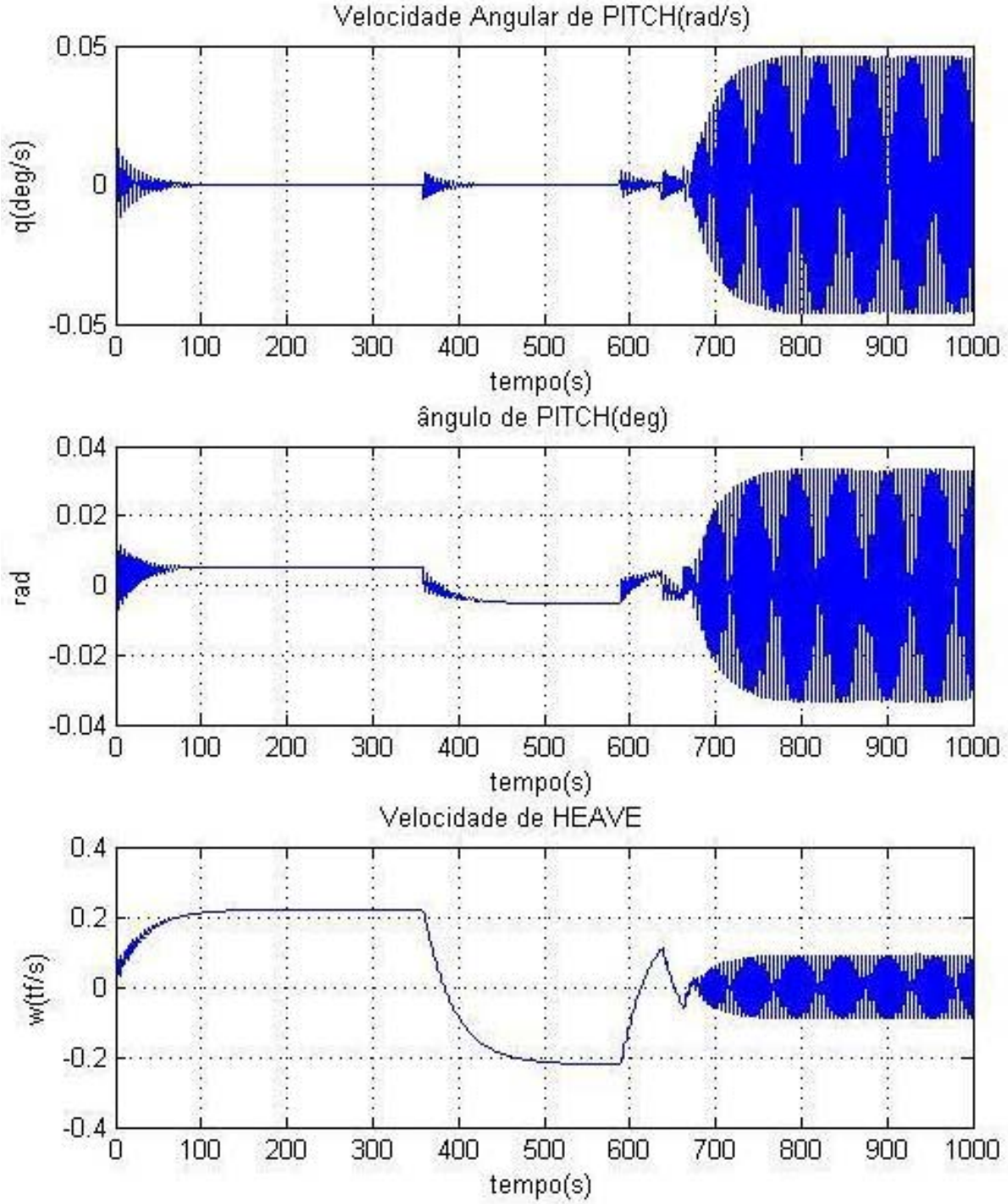
Caso 1(cont):


Velocidade Angular de PITCH(rad/s)
q(deg/s)
0.05
0
-0.05
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
tempo(s)
ângulo de PITCH(deg)
rad
0.04
0.02
0
-0.02
-0.04
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
tempo(s)
Velocidade de HEAVE
w(tf/s)
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
tempo(s)

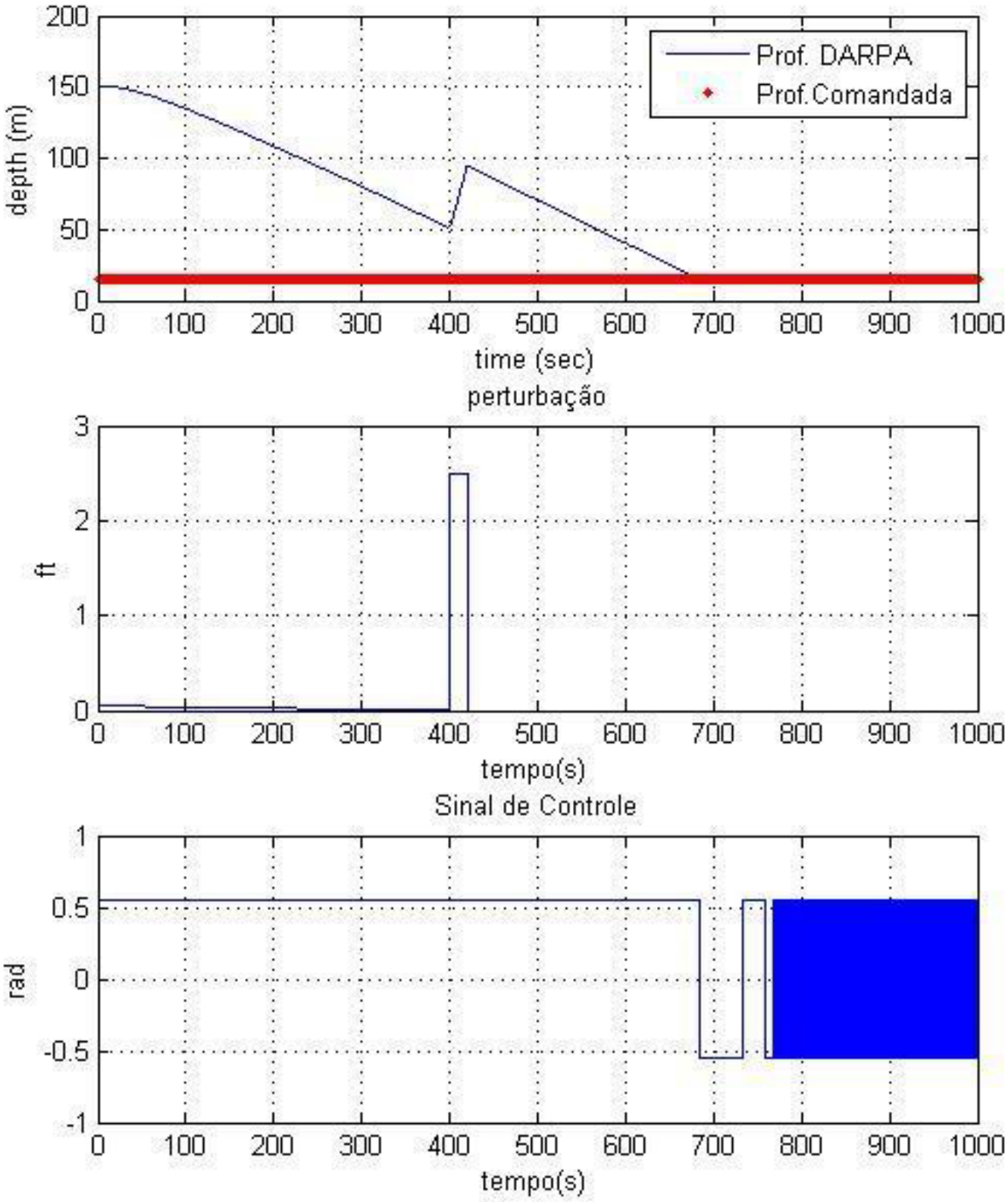
Caso 2: Proa (ângulo de pitch) neutra inicial, comando de 100ft, com perturbação



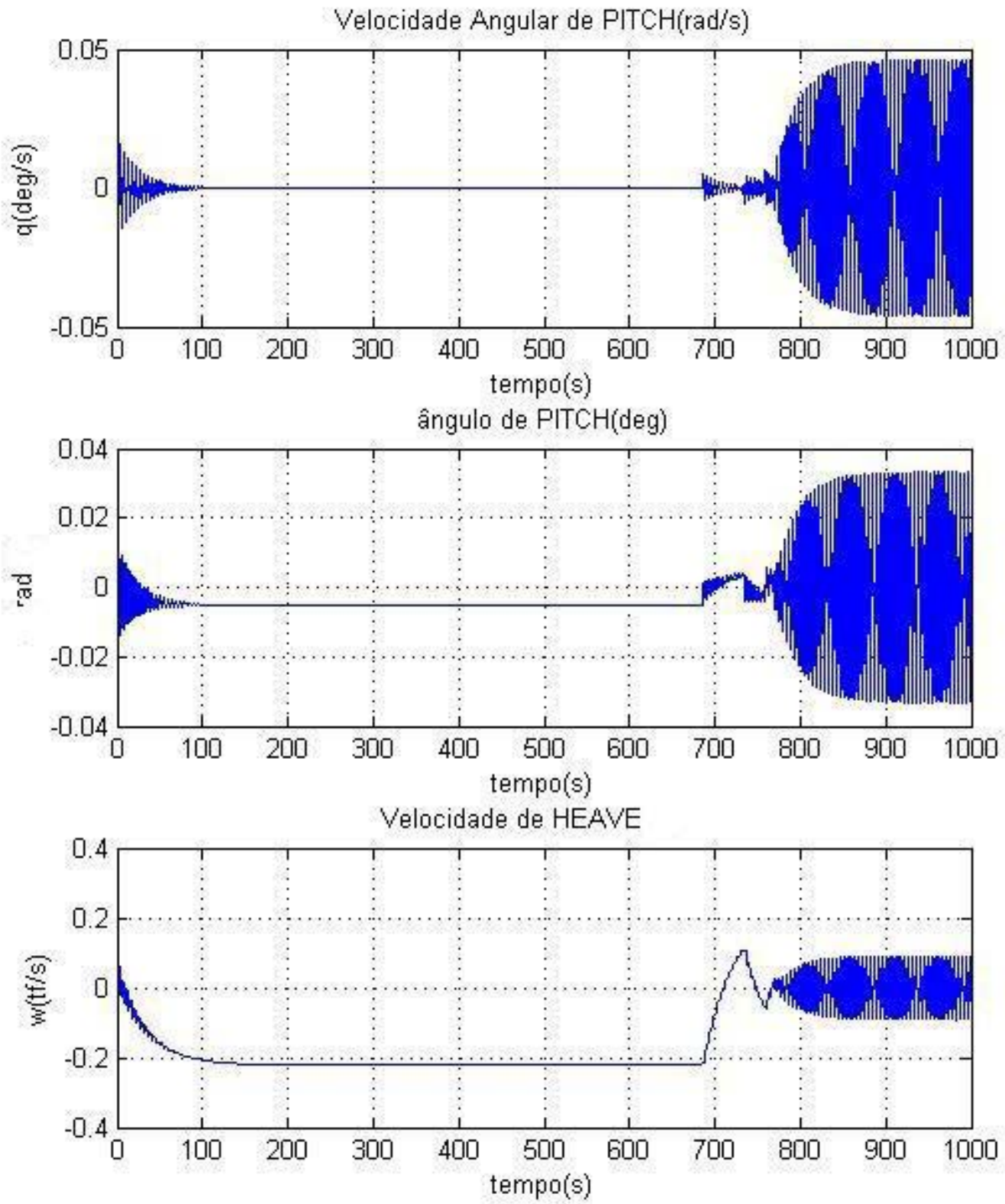
Caso 2(cont.):


Velocidade Angular de PITCH(rad/s)
q(deg/s)
0.05
0
-0.05
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
tempo(s)
ângulo de PITCH(deg)
rad
0.04
0.02
0
-0.02
-0.04
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
tempo(s)
Velocidade de HEAVE
w(tf/s)
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
tempo(s)

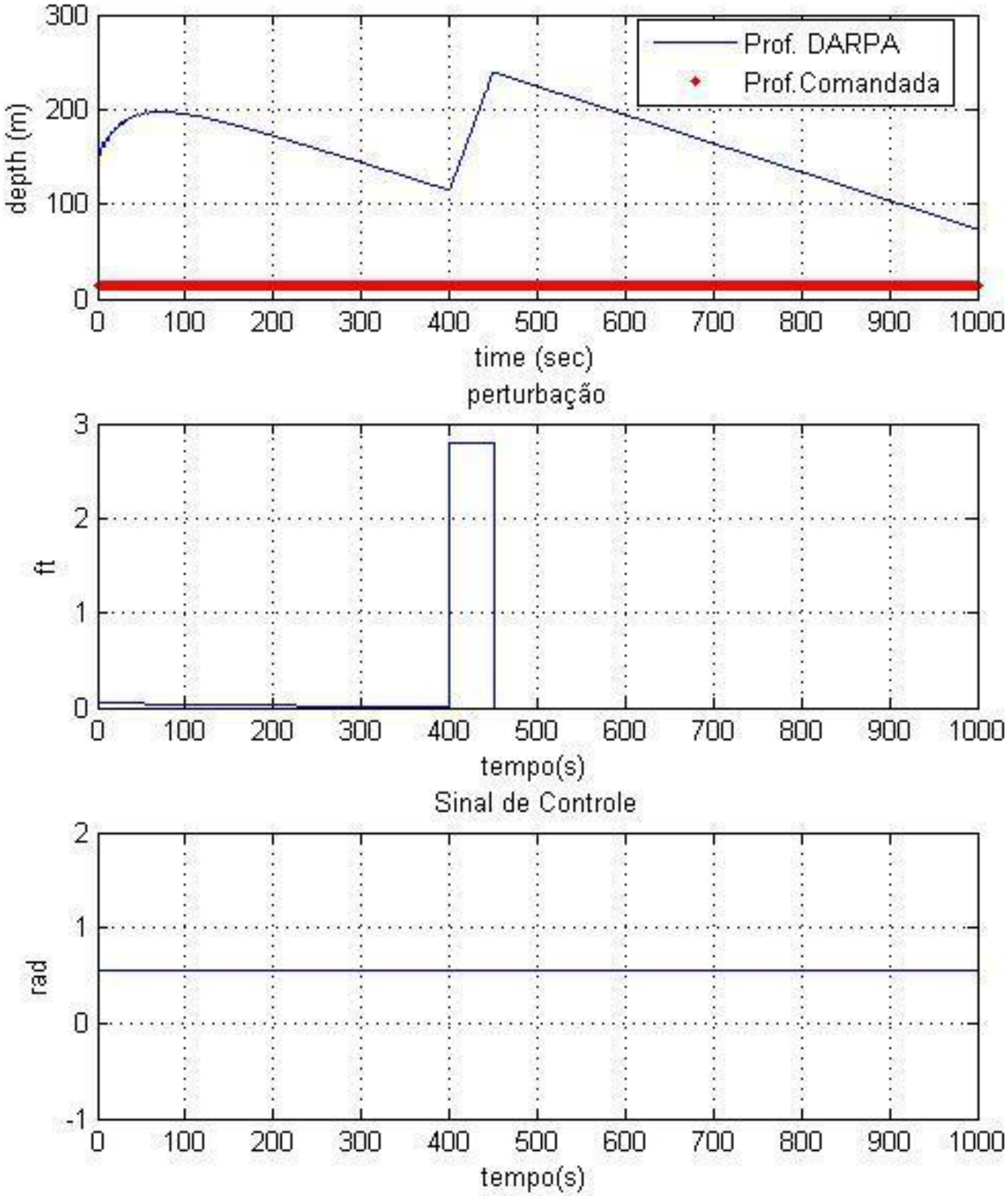
Caso 3: Proa neutra, a uma determinada profundidade, emergindo, com perturbação de um pulso



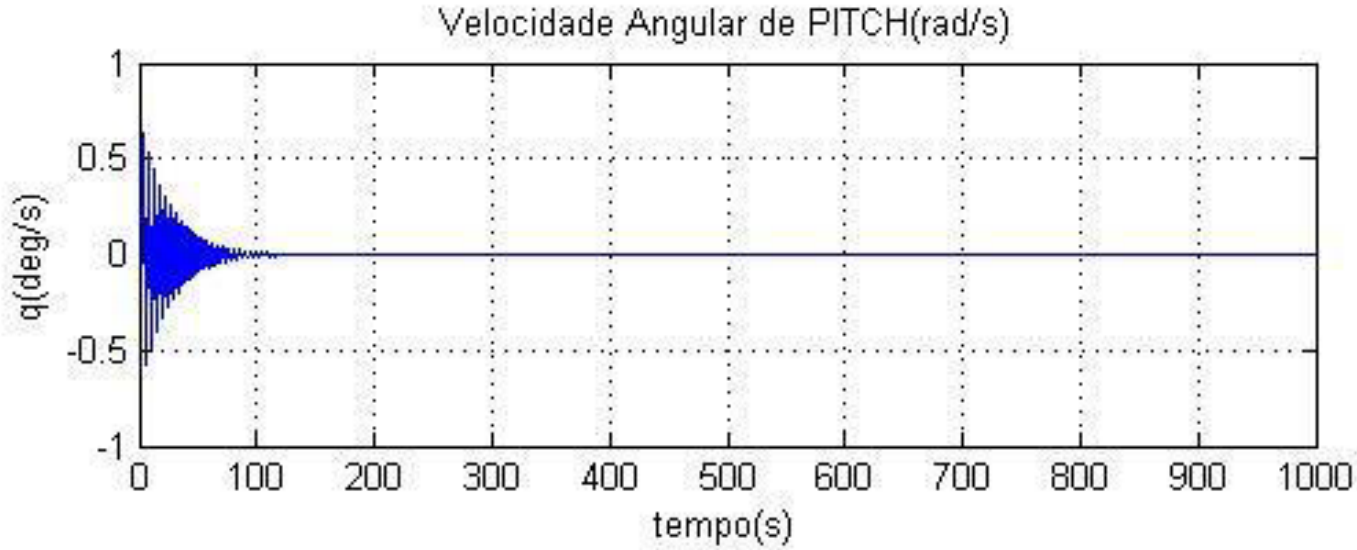
Caso 3(cont):

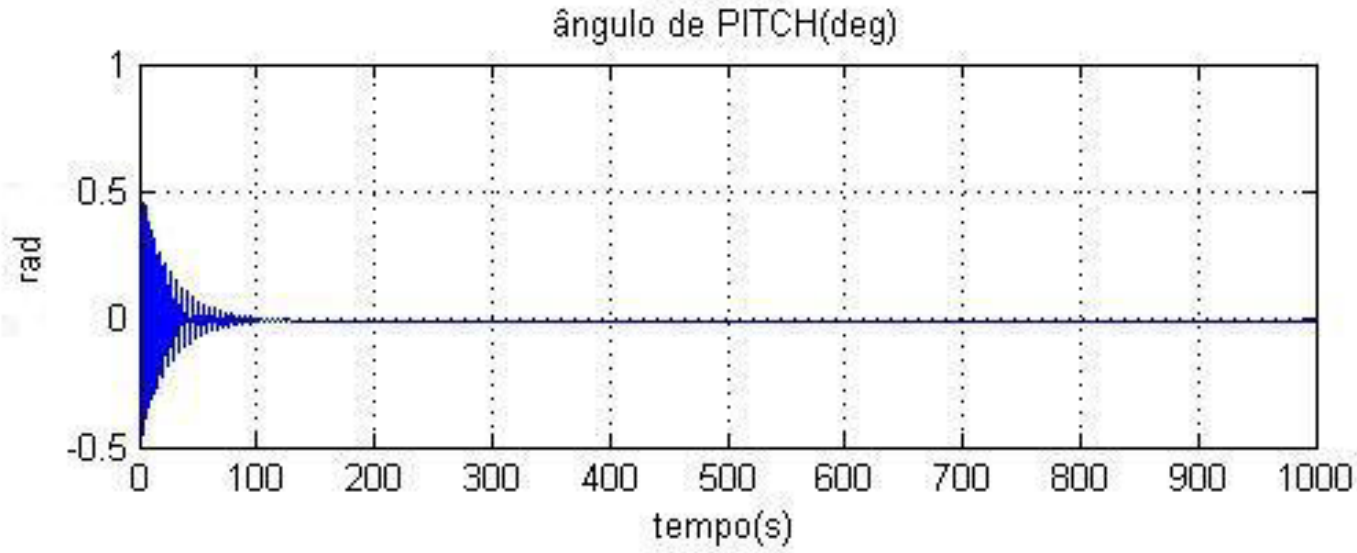

Velocidade Angular de PITCH(rad/s)
q(deg/s)
0.05
0
-0.05
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
tempo(s)
ângulo de PITCH(deg)
rad
0.04
0.02
0
-0.02
-0.04
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
tempo(s)
Velocidade de HEAVE
w(ft/s)
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
tempo(s)

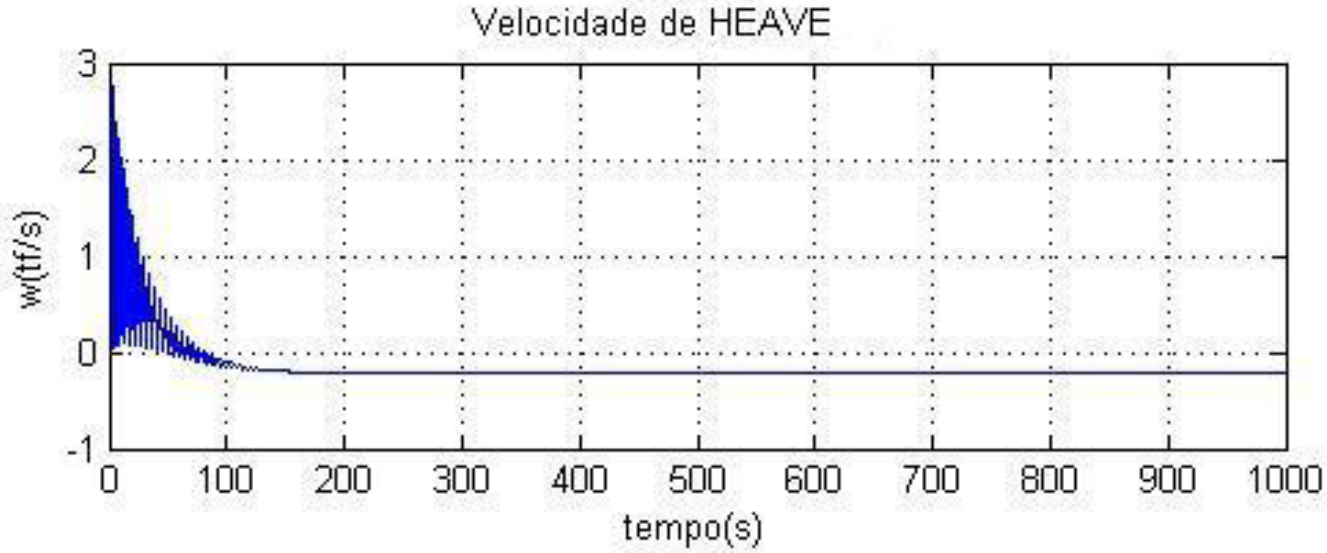
Caso 4: Proa para baixo (30º aprox.), emergindo (subindo) com perturbação de valor o dobro do caso anterior



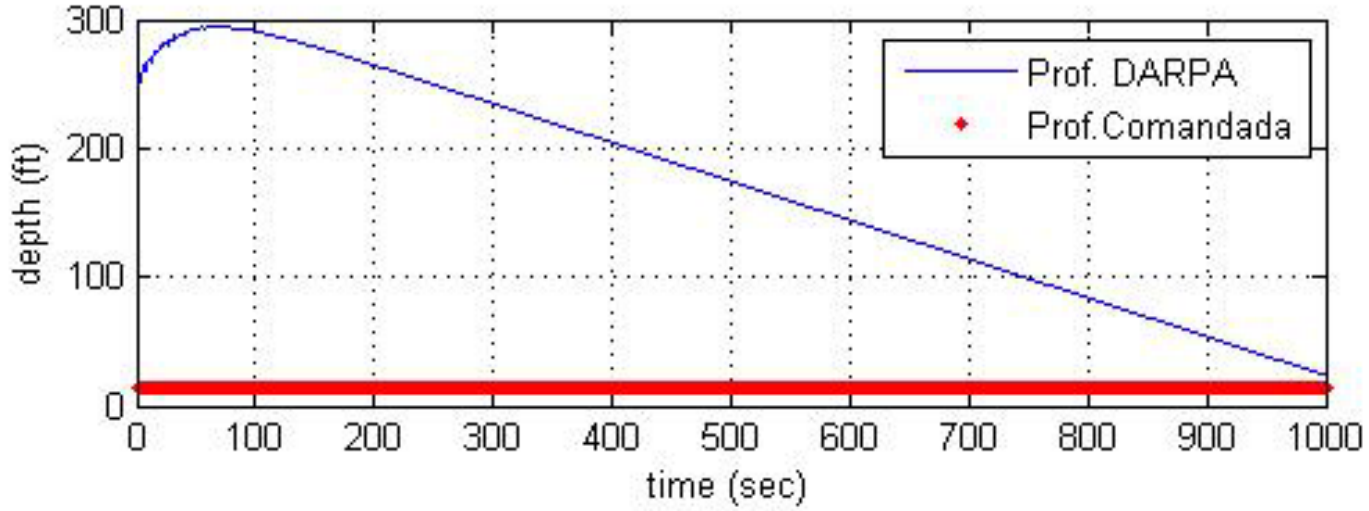
Caso 4(cont):

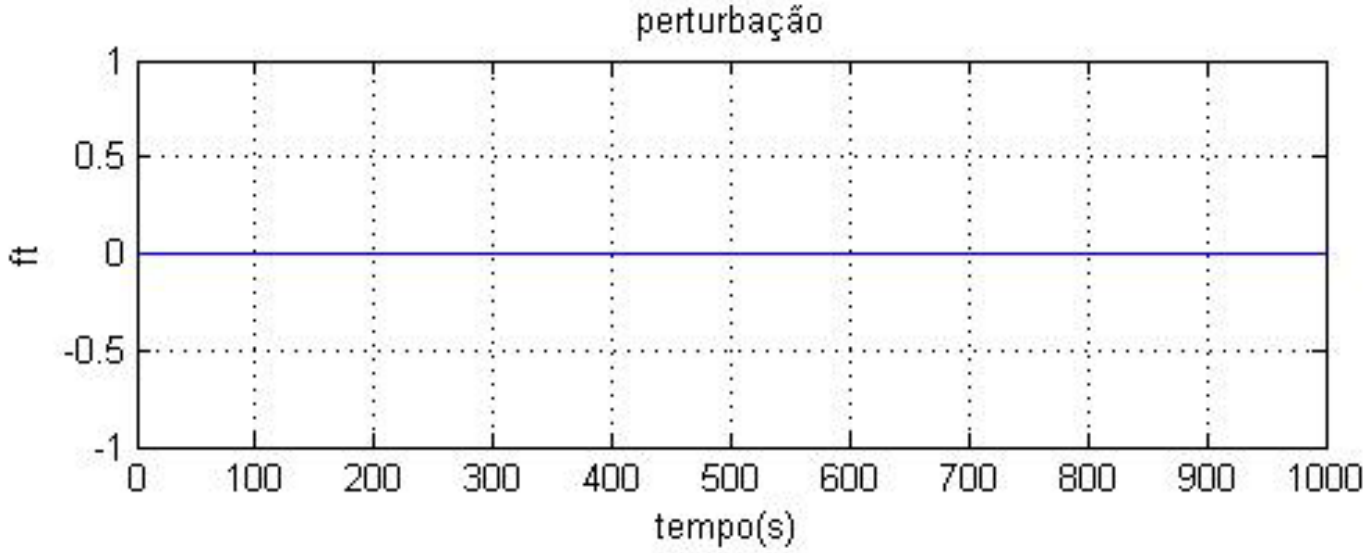

Velocidade Angular de PITCH(rad/s)
q(deg/s)
1
0.5
0
-0.5
-1
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
tempo(s)

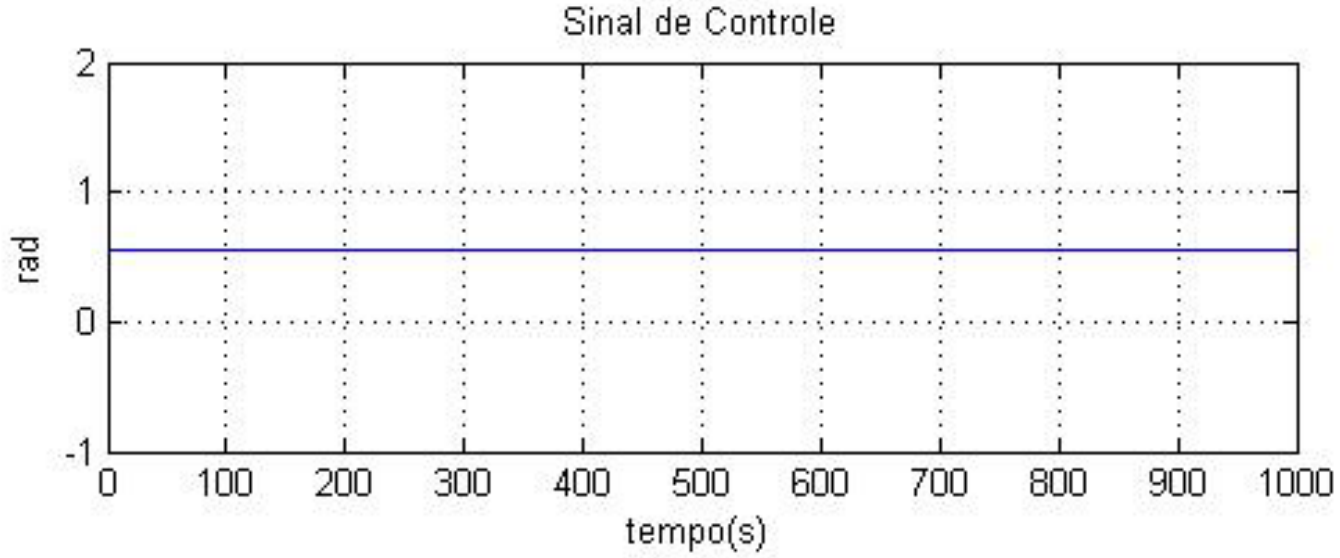

ângulo de PITCH(deg)
rad
1
0.5
0
-0.5
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
tempo(s)


Velocidade de HEAVE
w(ft/s)
3
2
1
0
-1
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
tempo(s)

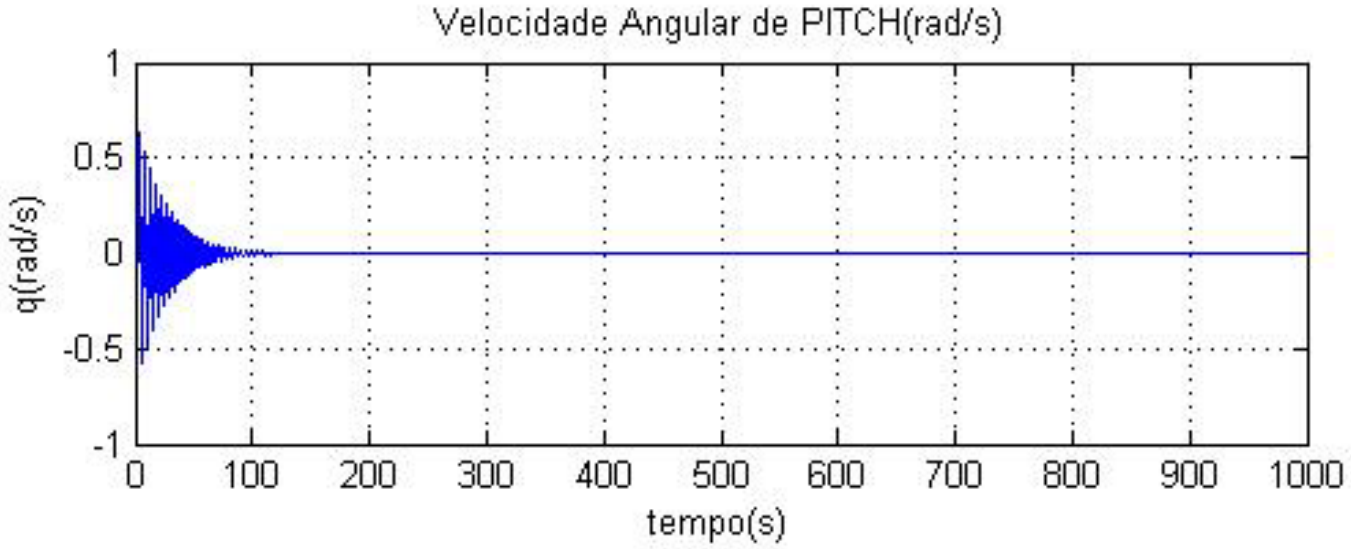
Caso 5:Proa para baixo, alta profundidade, sem perturbação

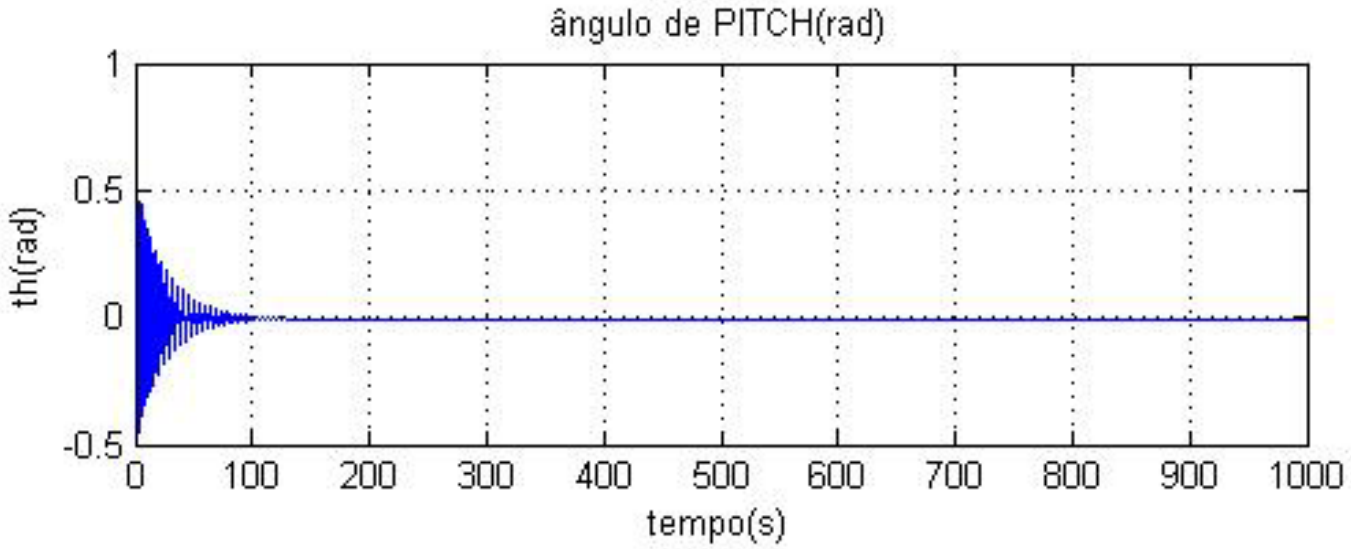


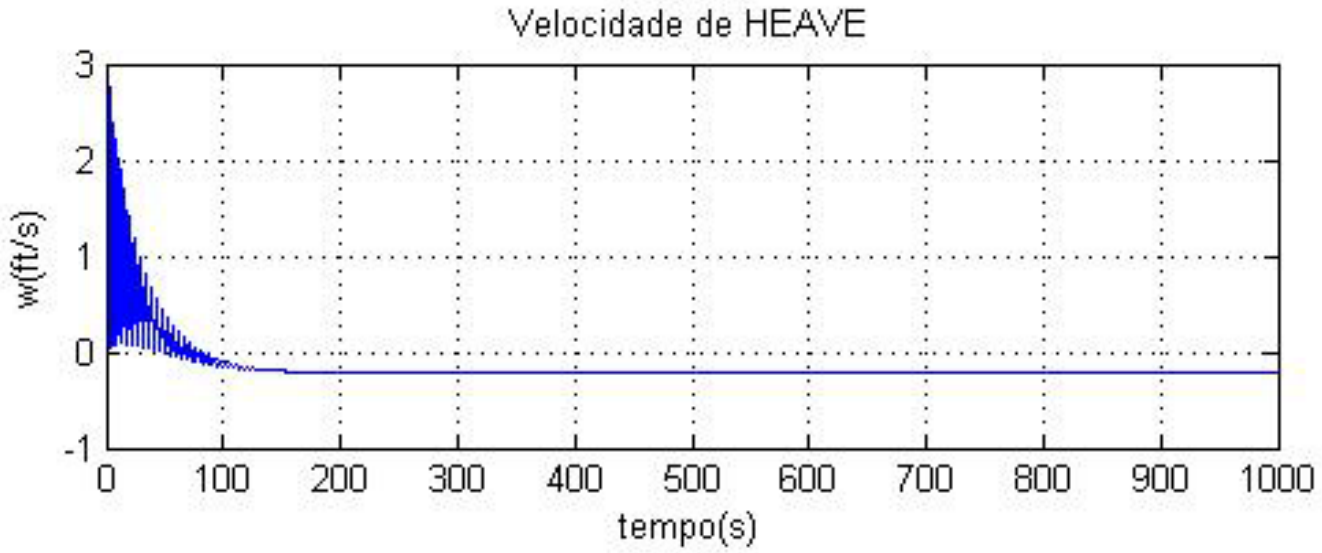




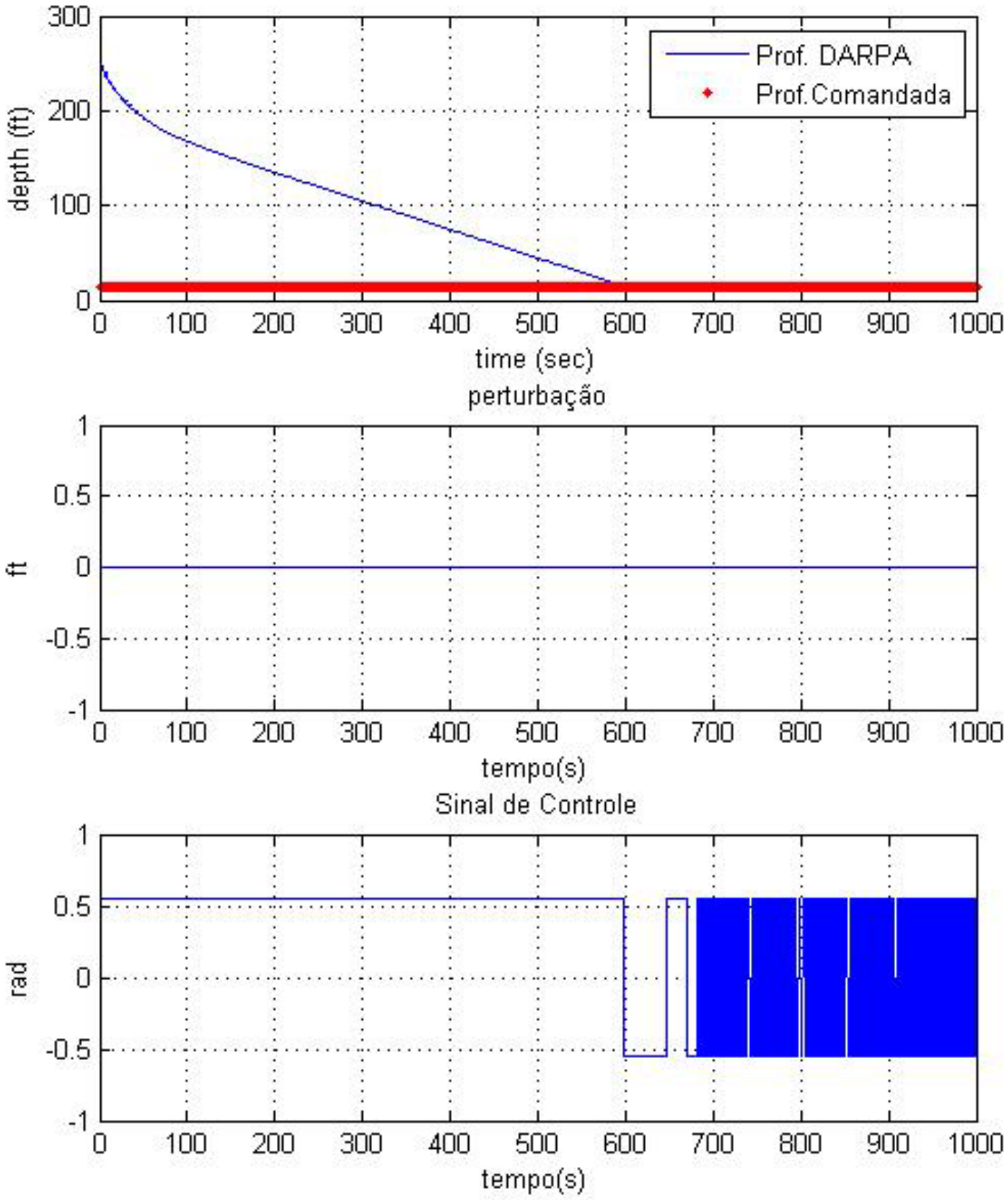
Caso 5(cont.):


Velocidade Angular de PITCH(rad/s)
q(rad/s)
1
0.5
0
-0.5
-1
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
tempo(s)

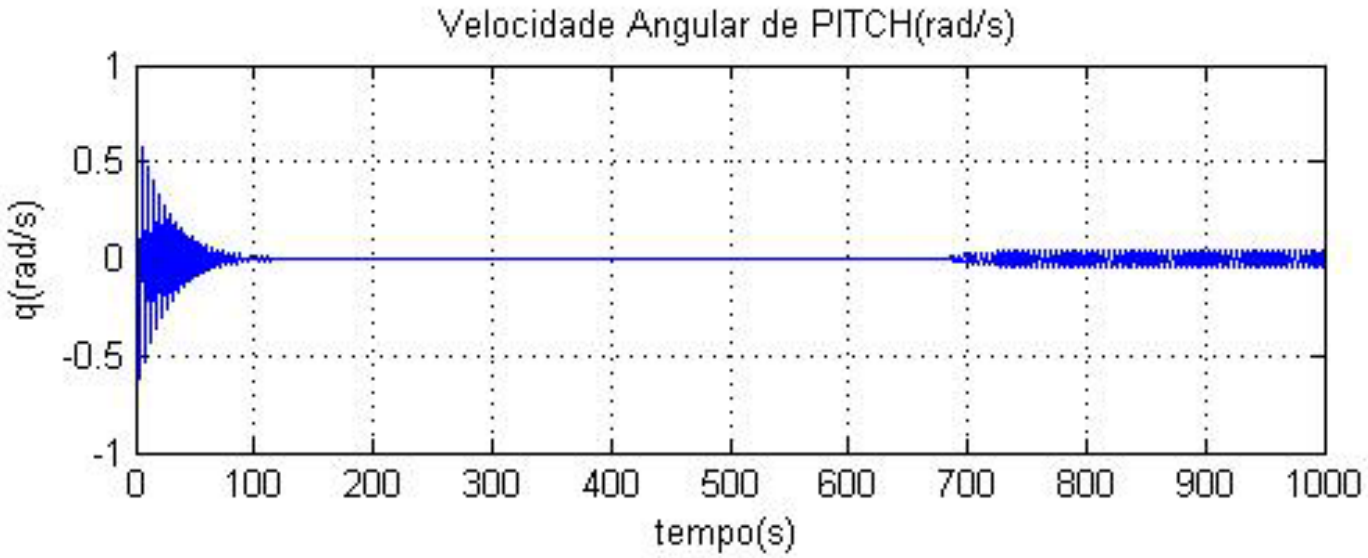

ângulo de PITCH(rad)
th(rad)
1
0.5
0
-0.5
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
tempo(s)

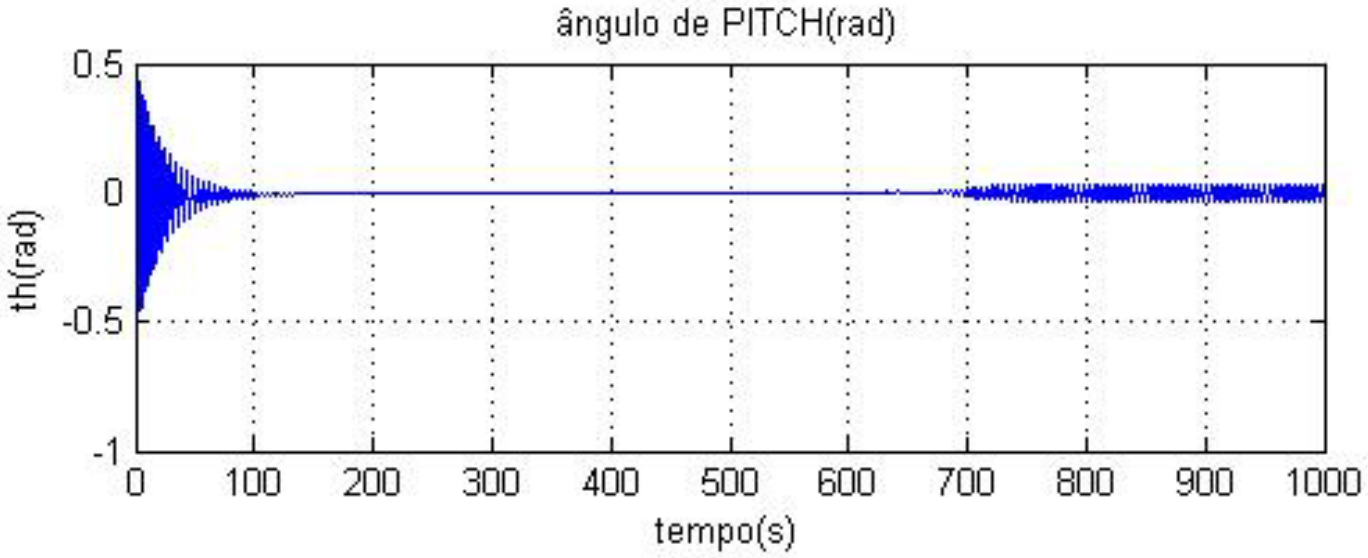

Velocidade de HEAVE
w(ft/s)
3
2
1
0
-1
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
tempo(s)

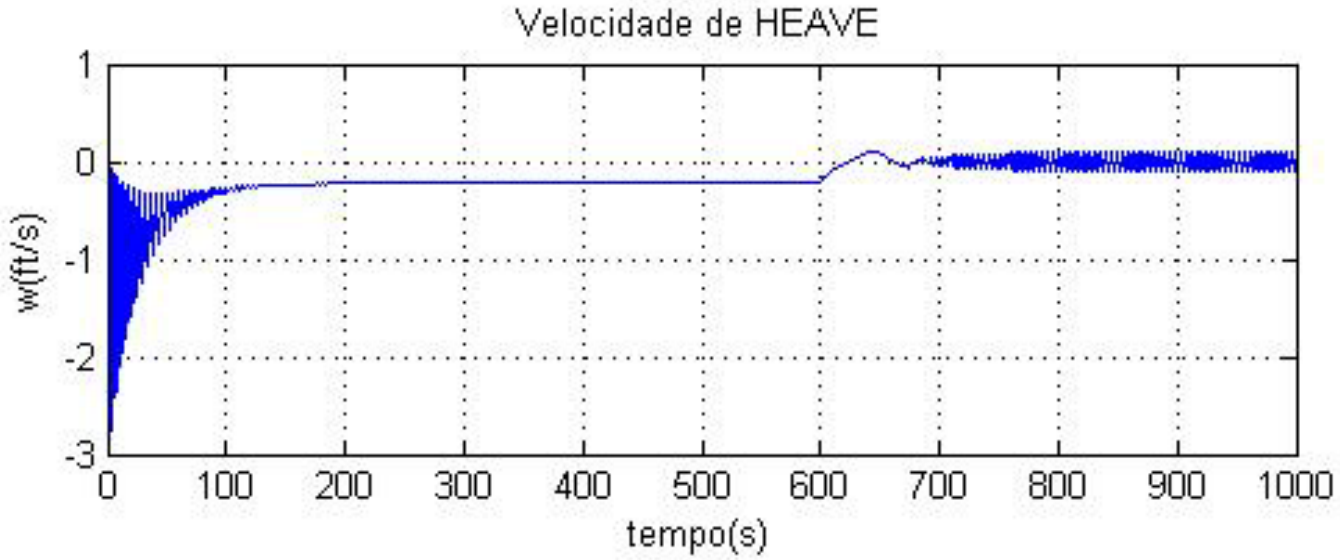
Caso 6: Proa para cima, alta profundidade, emersão sem perturbação



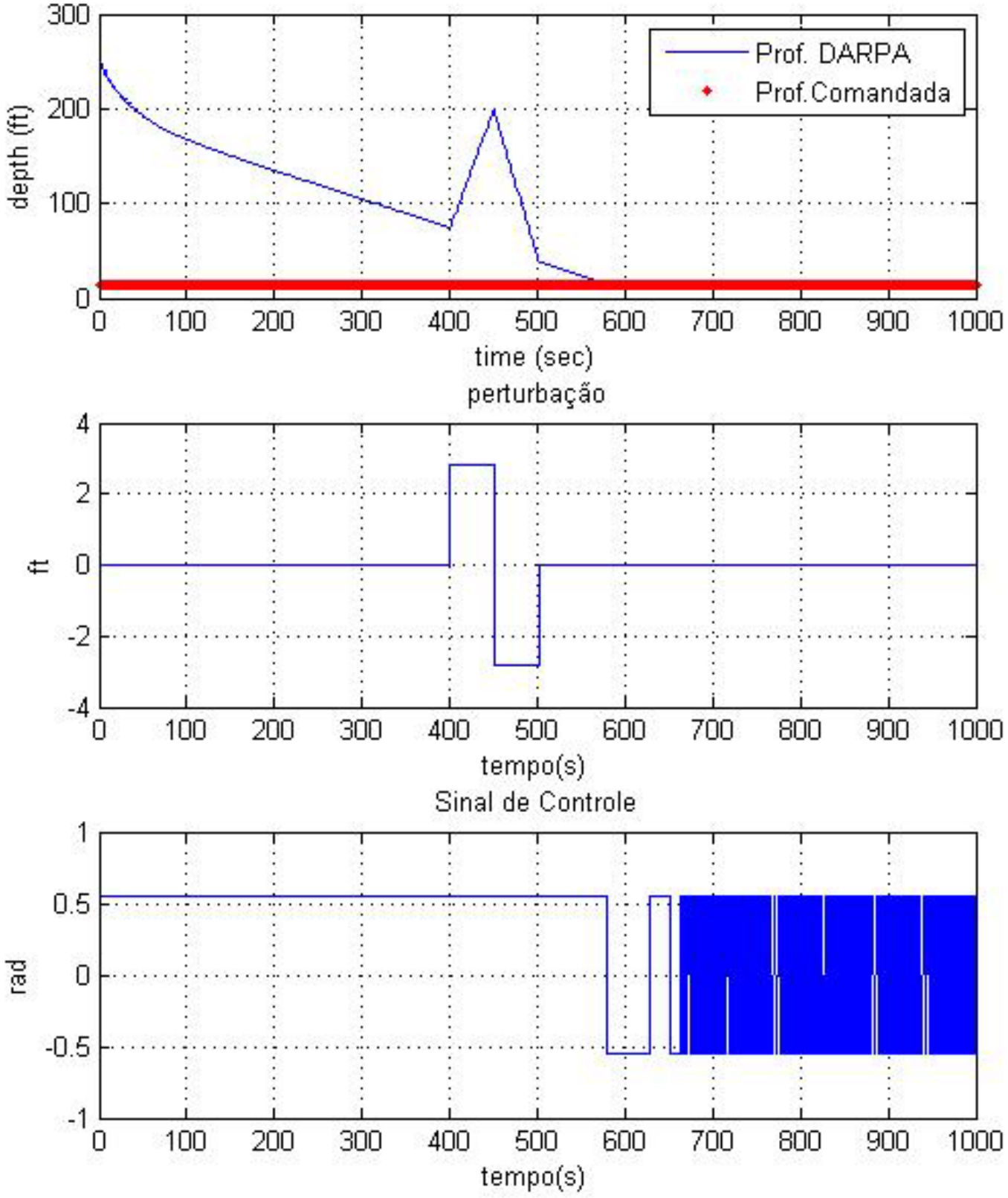
Caso 6(cont):


Velocidade Angular de PITCH(rad/s)
q(rad/s)
1
0.5
0
-0.5
-1
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
tempo(s)

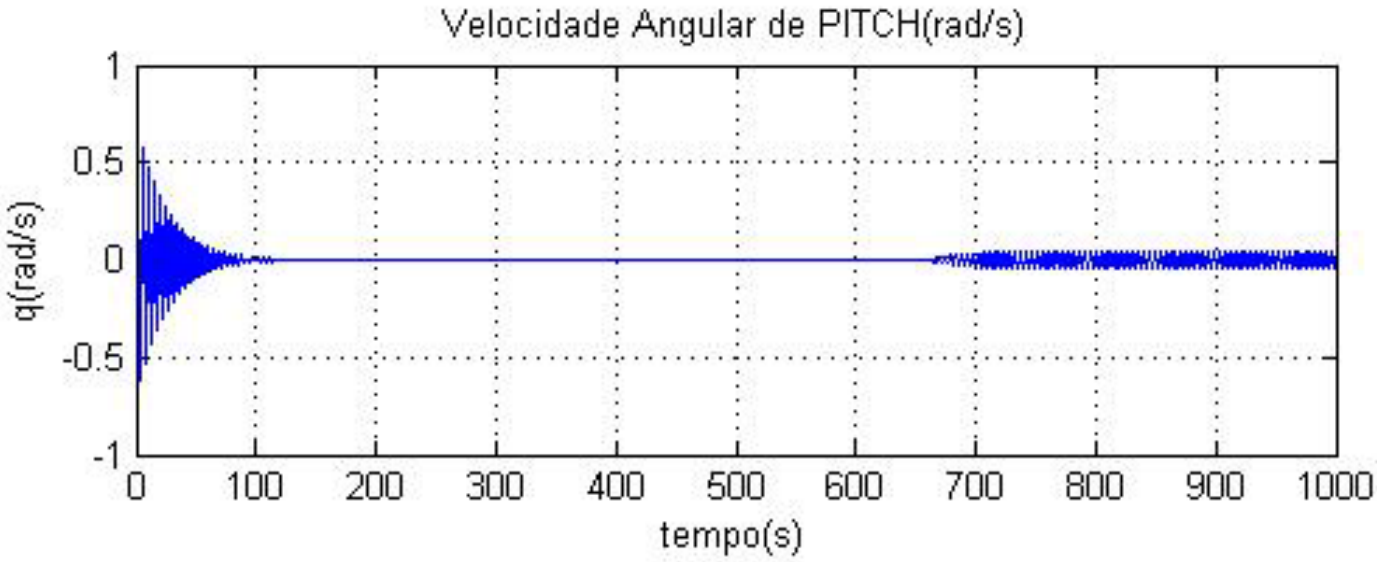

ângulo de PITCH(rad)
th(rad)
0.5
0
-0.5
-1
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
tempo(s)

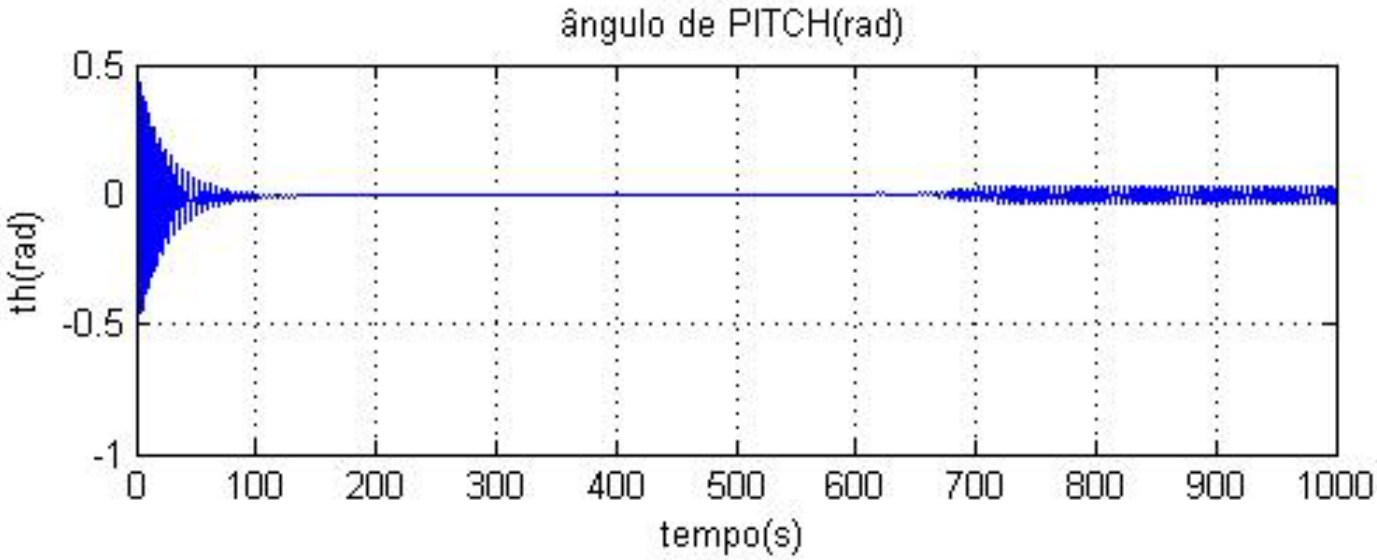

Velocidade de HEAVE
w(ft/s)
1
0
-1
-2
-3
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
tempo(s)

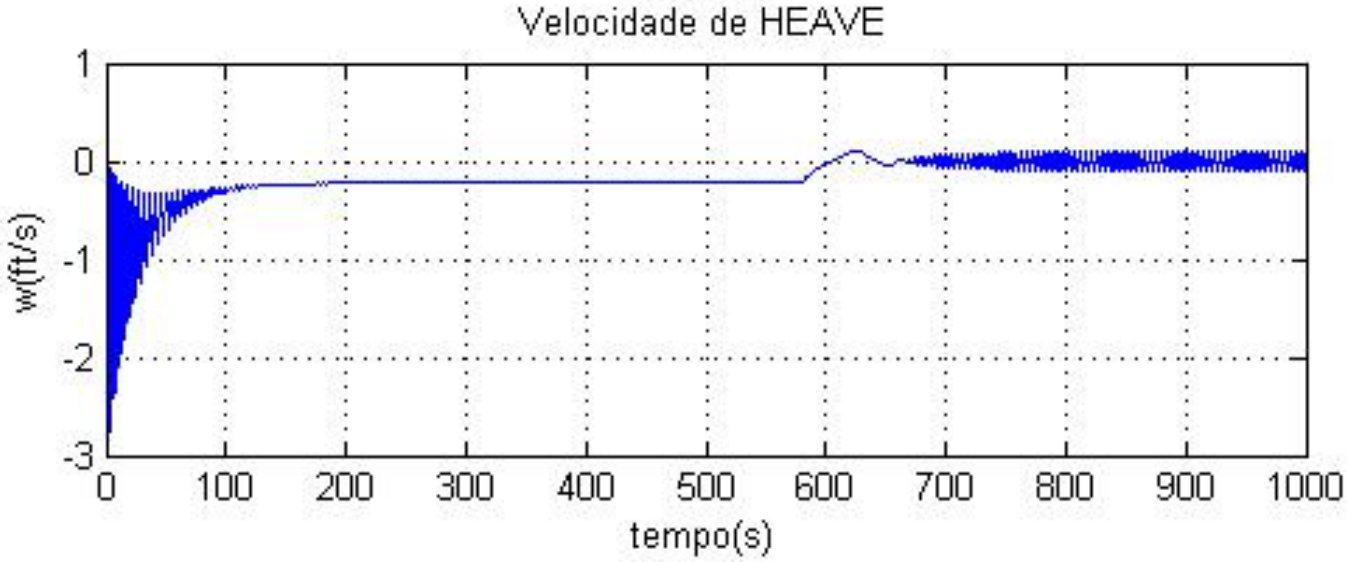
Caso 7: Alta profundidade, proa para cima, perturbação em duplo pulso



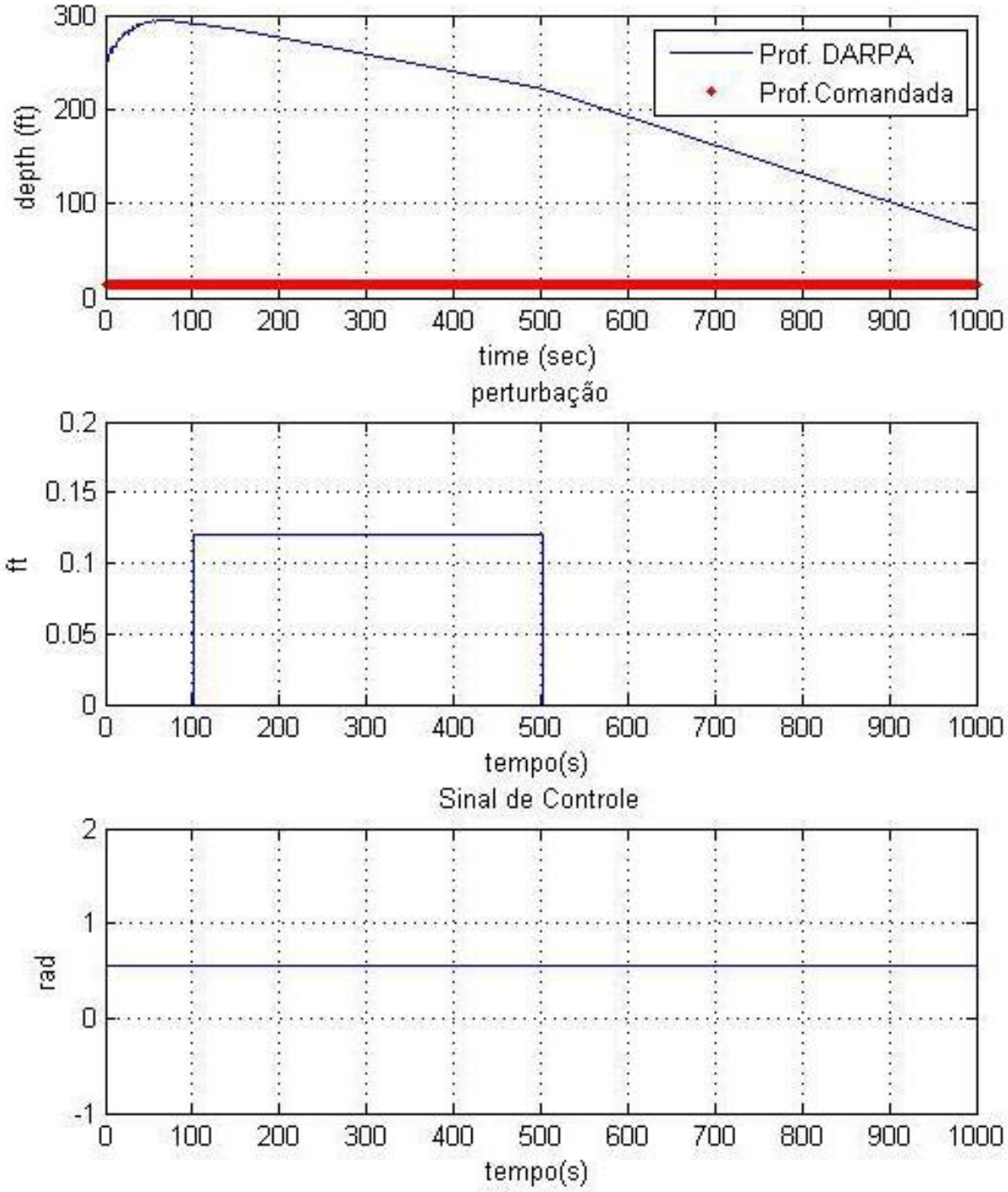
Caso 7(cont.)


Velocidade Angular de PITCH(rad/s)
q(rad/s)
1
0.5
0
-0.5
-1
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
tempo(s)

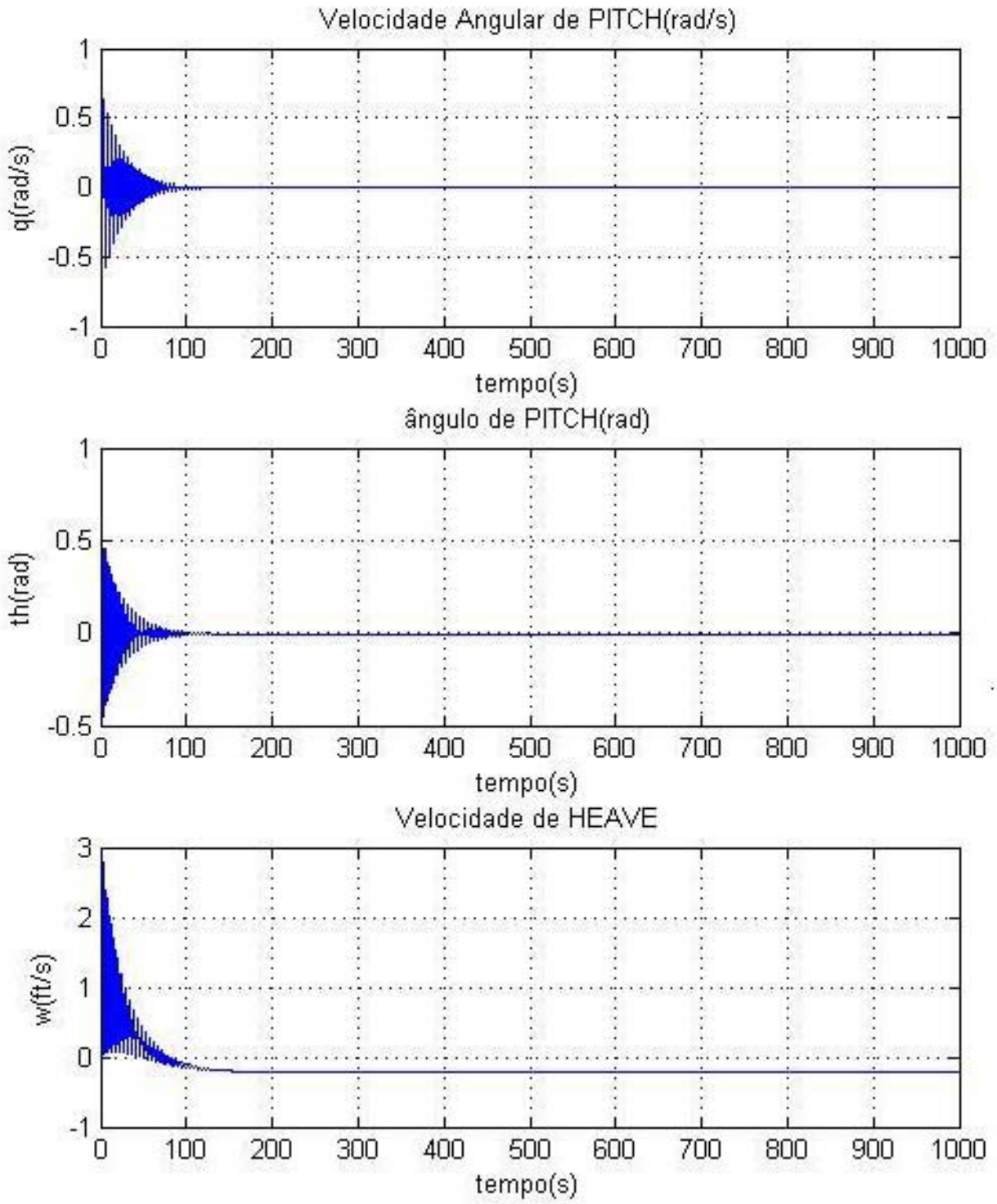

ângulo de PITCH(rad)
th(rad)
0.5
0
-0.5
-1
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
tempo(s)


Velocidade de HEAVE
w(ft/s)
1
0
-1
-2
-3
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
tempo(s)

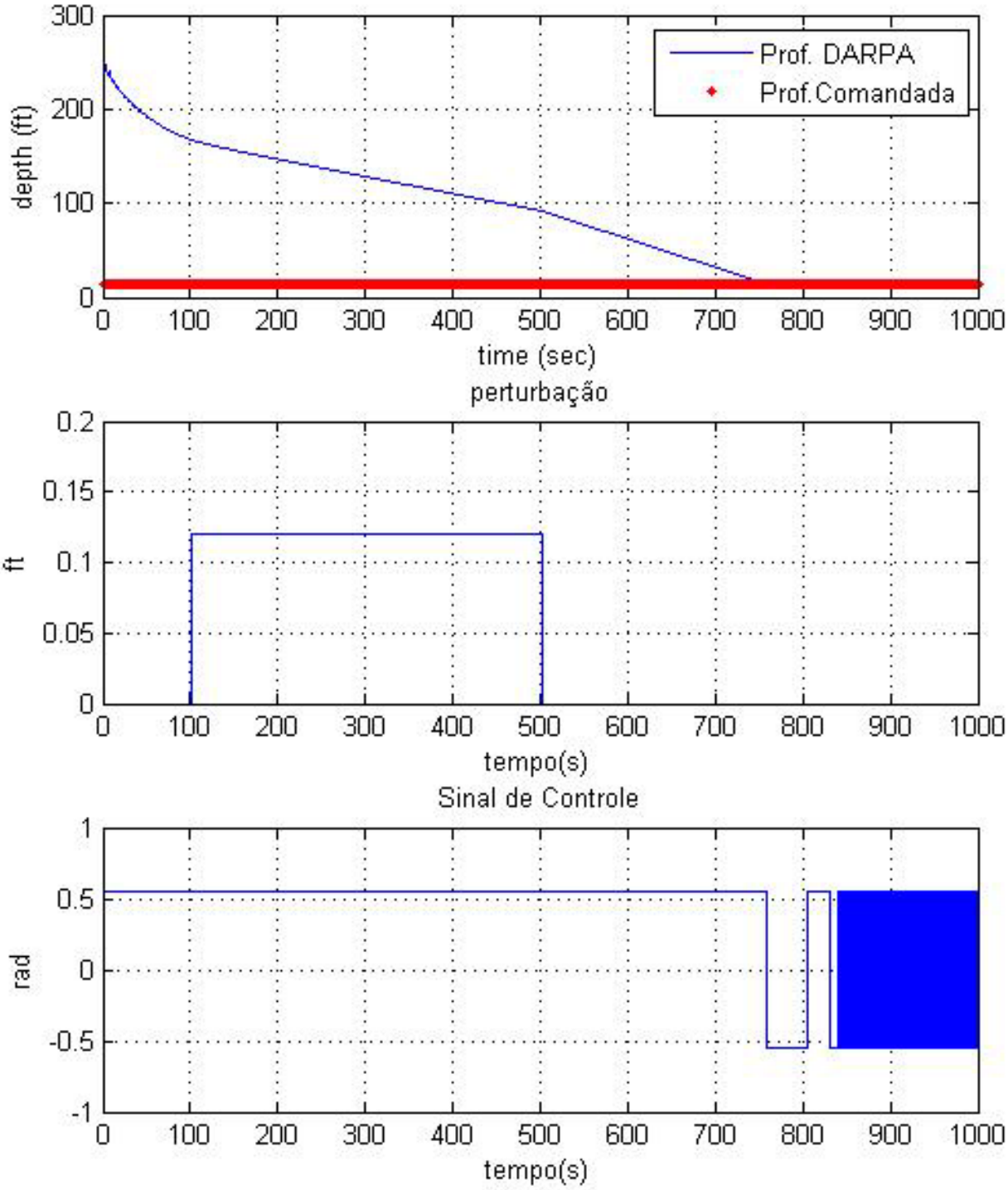
Caso 8: Proa para baixo (30º), alta prof. , perturbação pulso de longa duração



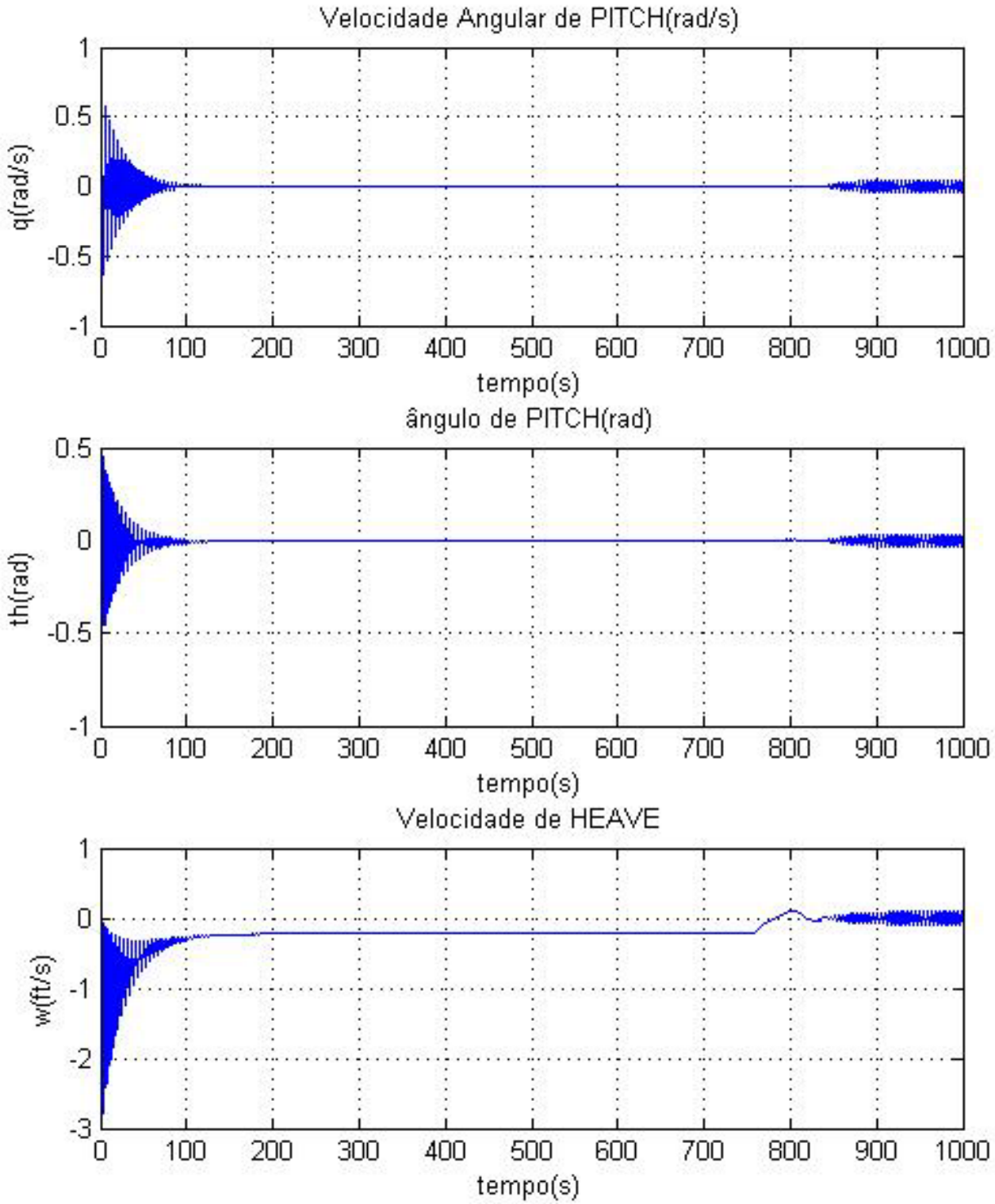
Caso 8(cont).


Velocidade Angular de PITCH(rad/s)
q(rad/s)
tempo(s)
ângulo de PITCH(rad)
th(rad)
tempo(s)
Velocidade de HEAVE
w(ft/s)
tempo(s)

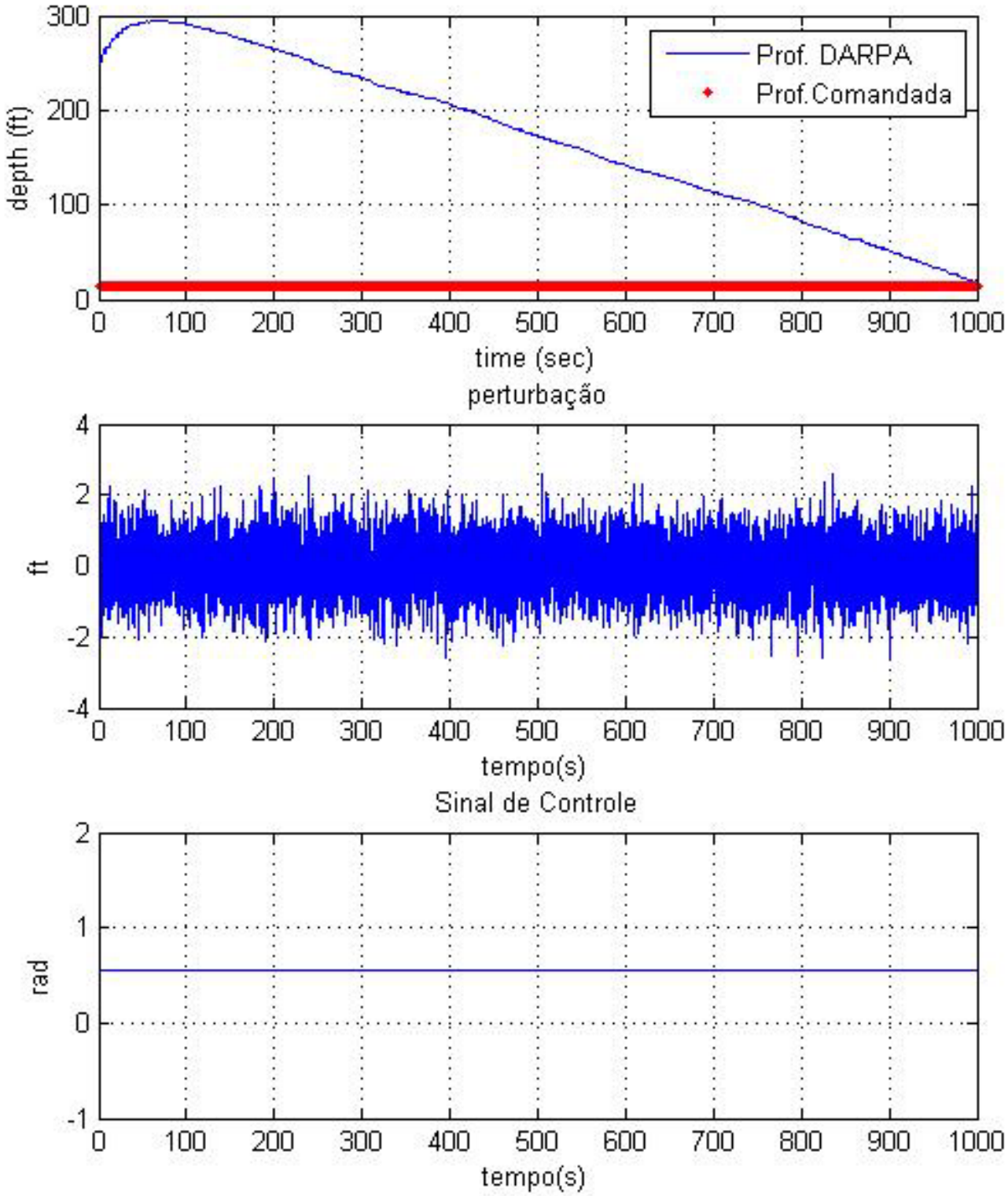
Caso 9: Proa para cima(30º), alta prof., perturbação pulso de longa duração



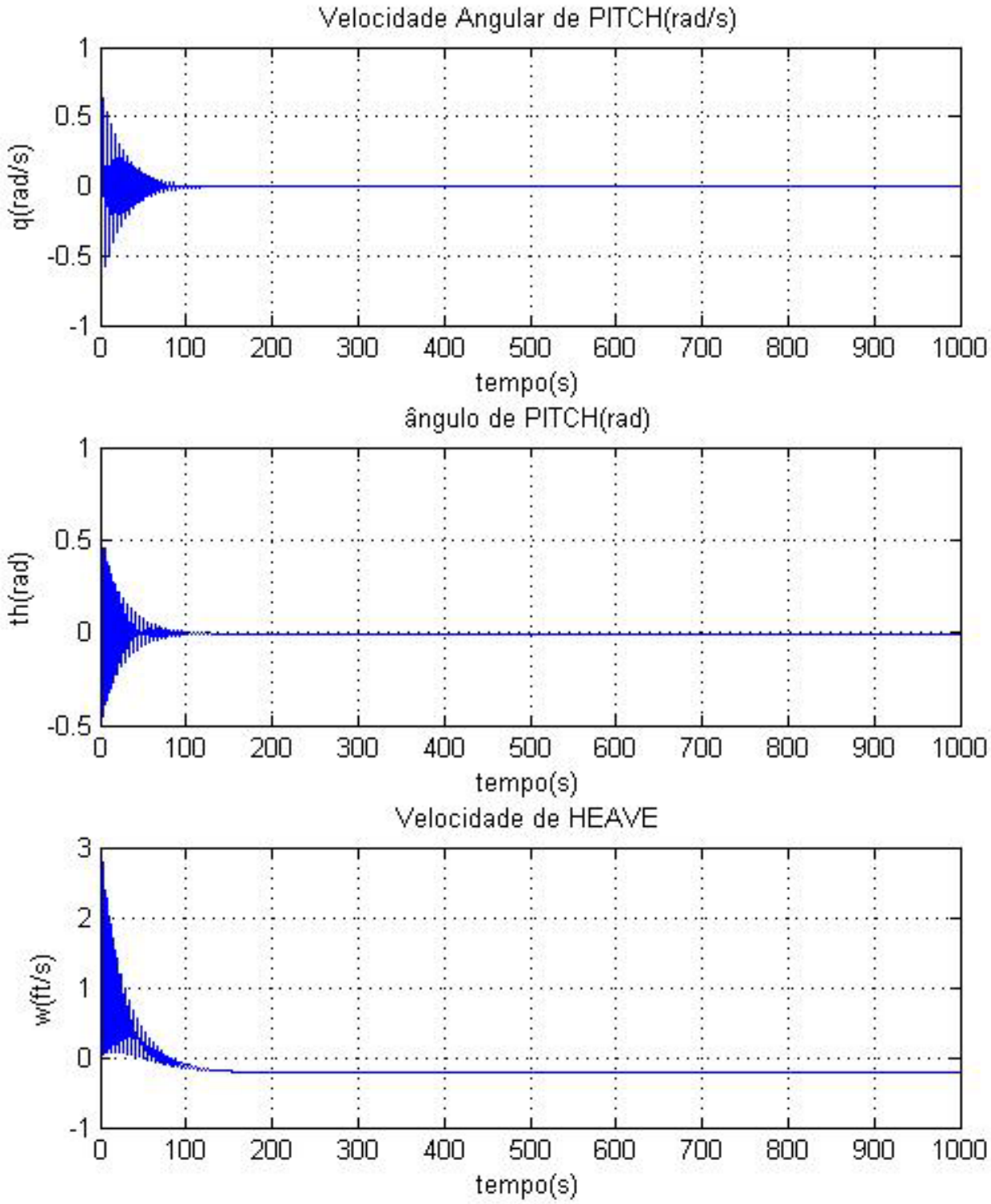
Caso 9(cont.):


Velocidade Angular de PITCH(rad/s)
q(rad/s)
tempo(s)
ângulo de PITCH(rad)
th(rad)
tempo(s)
Velocidade de HEAVE
w(ft/s)
tempo(s)

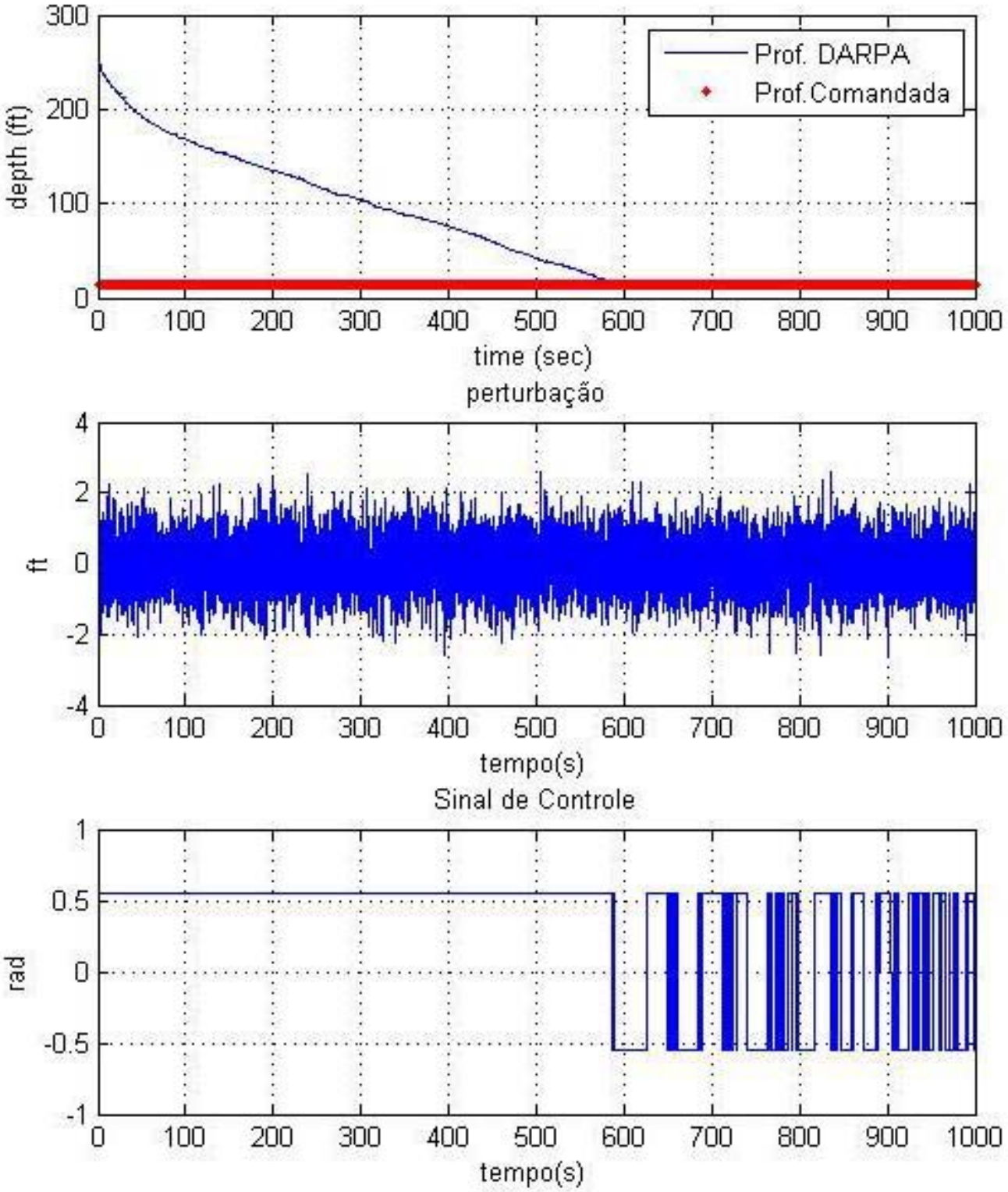
Caso 10:Proa para baixo, emersão, perturbação ruído branco



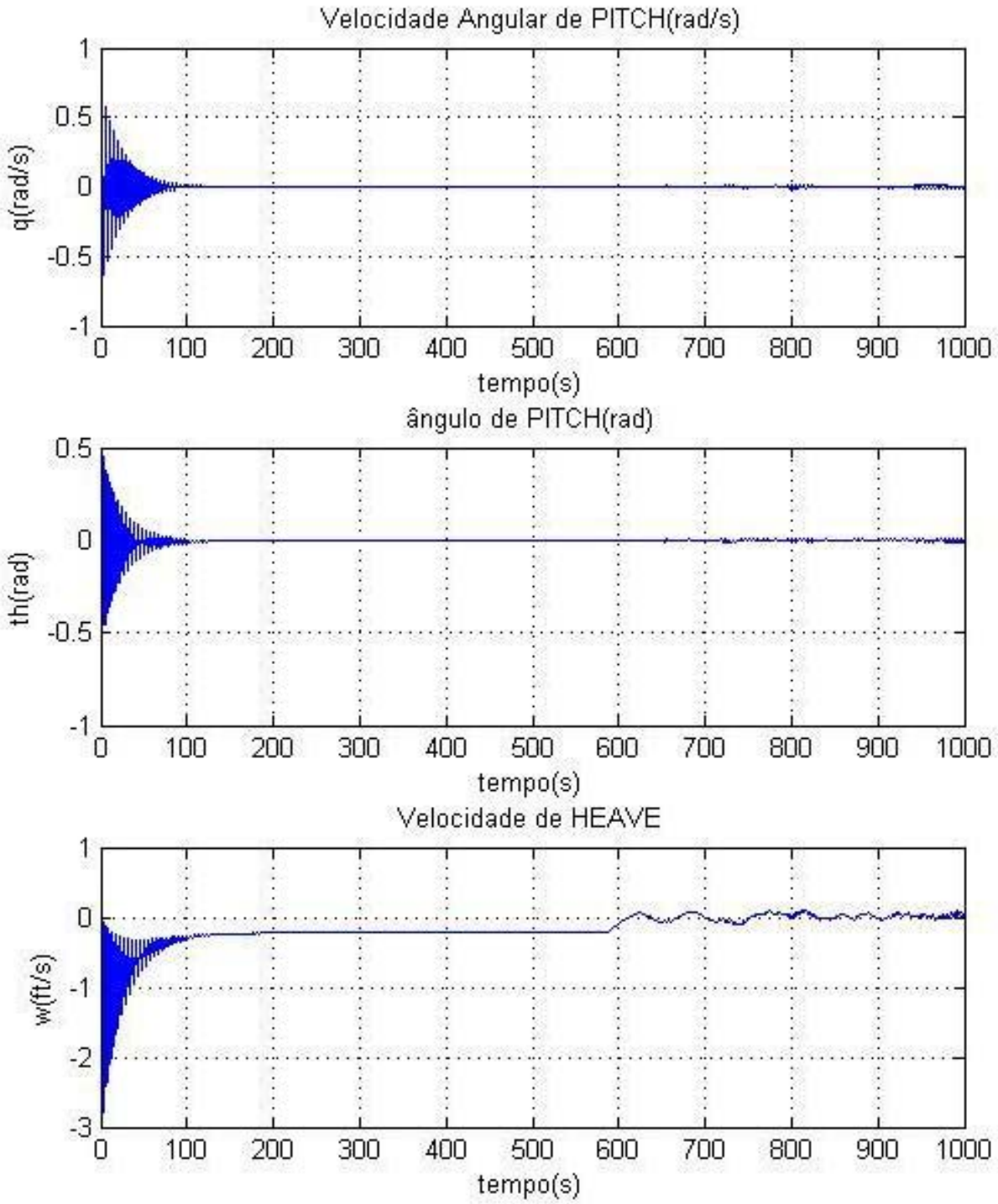
Caso 10(cont.)


Velocidade Angular de PITCH(rad/s)
q(rad/s)
tempo(s)
ângulo de PITCH(rad)
th(rad)
tempo(s)
Velocidade de HEAVE
w(ft/s)
tempo(s)

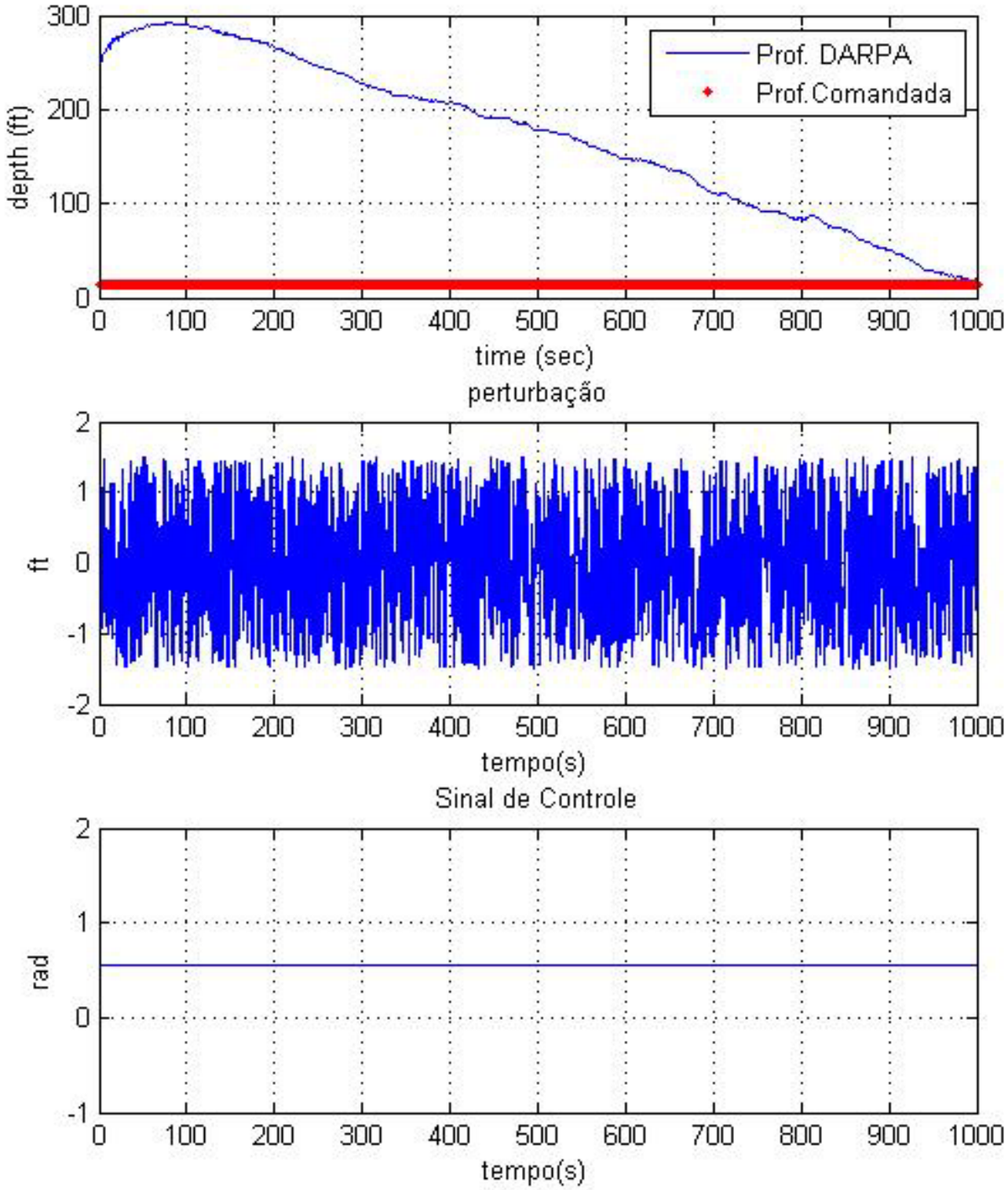
Caso 11:Proa para cima, emersão, perturbação ruído branco



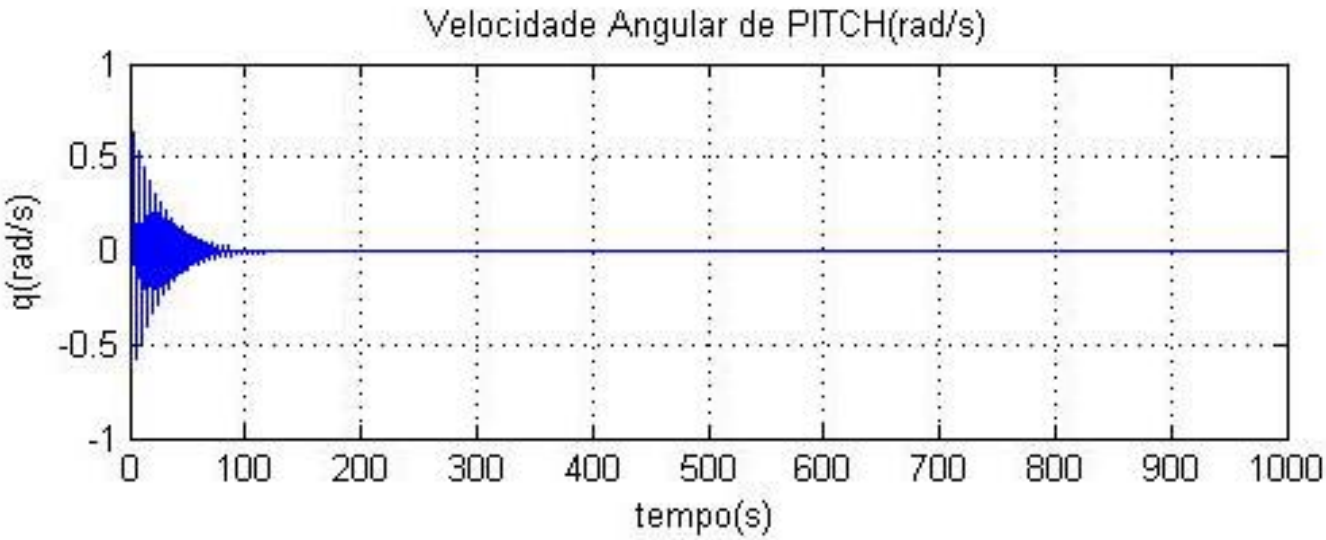
Caso 11(cont.)

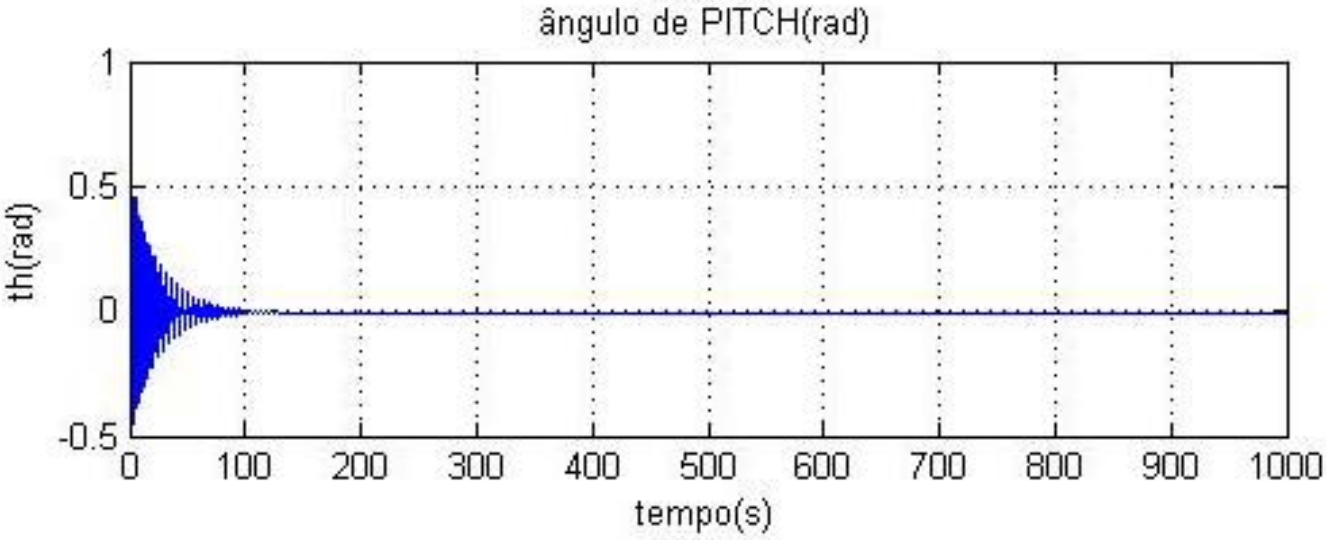

Velocidade Angular de PITCH(rad/s)
q(rad/s)
tempo(s)
ângulo de PITCH(rad)
th(rad)
tempo(s)
Velocidade de HEAVE
w(ft/s)
tempo(s)

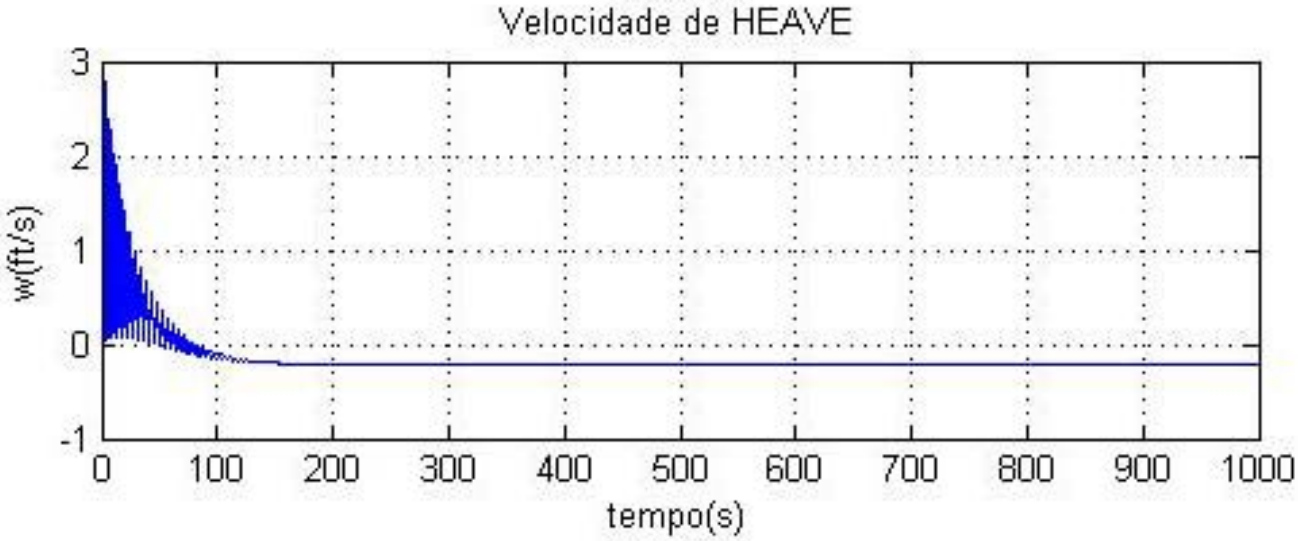
Caso 12: Proa para baixo(30º), emersão, ruído aleatório



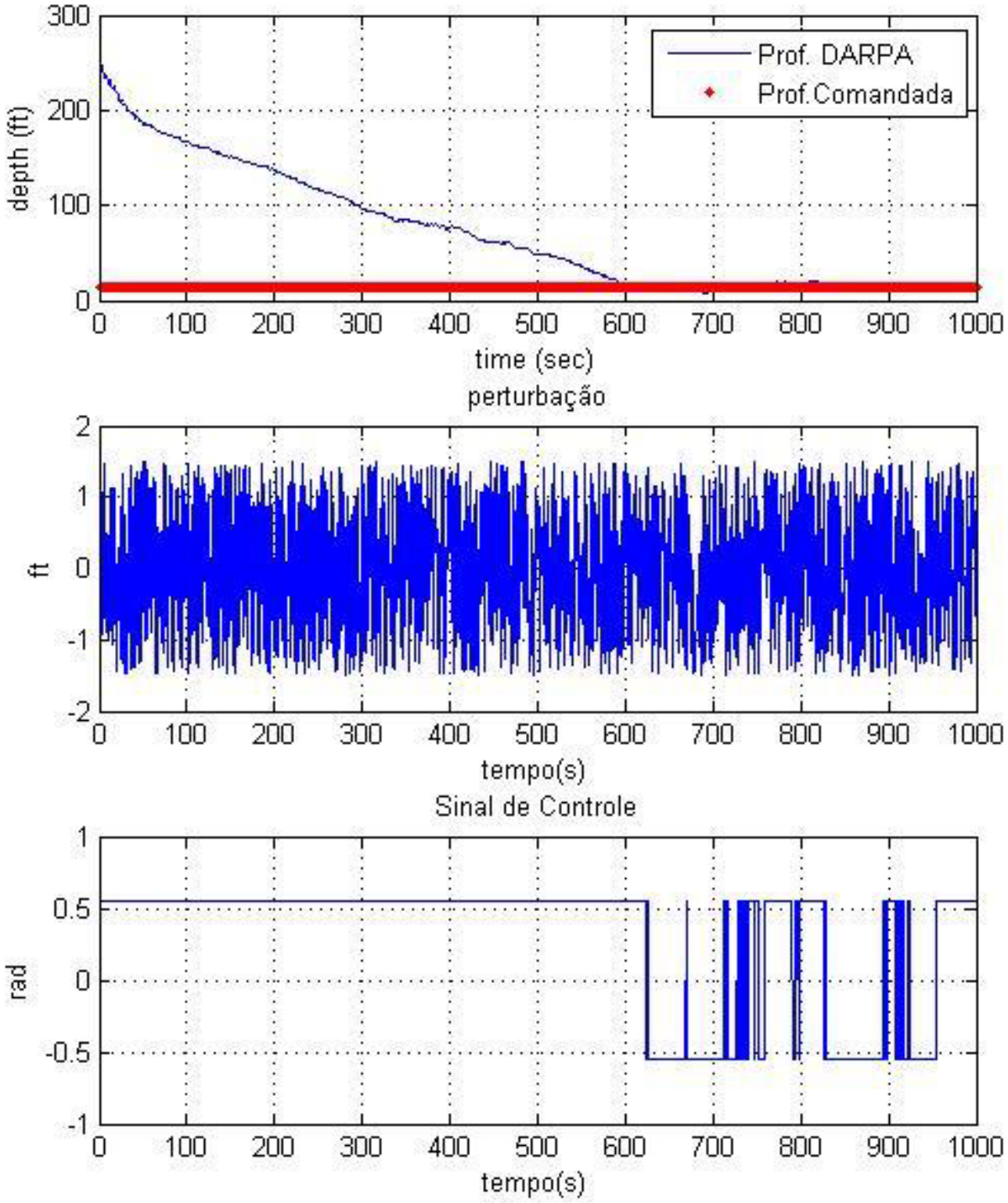
Caso12(cont.):


Velocidade Angular de PITCH(rad/s)
q(rad/s)
1
0.5
0
-0.5
-1
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
tempo(s)

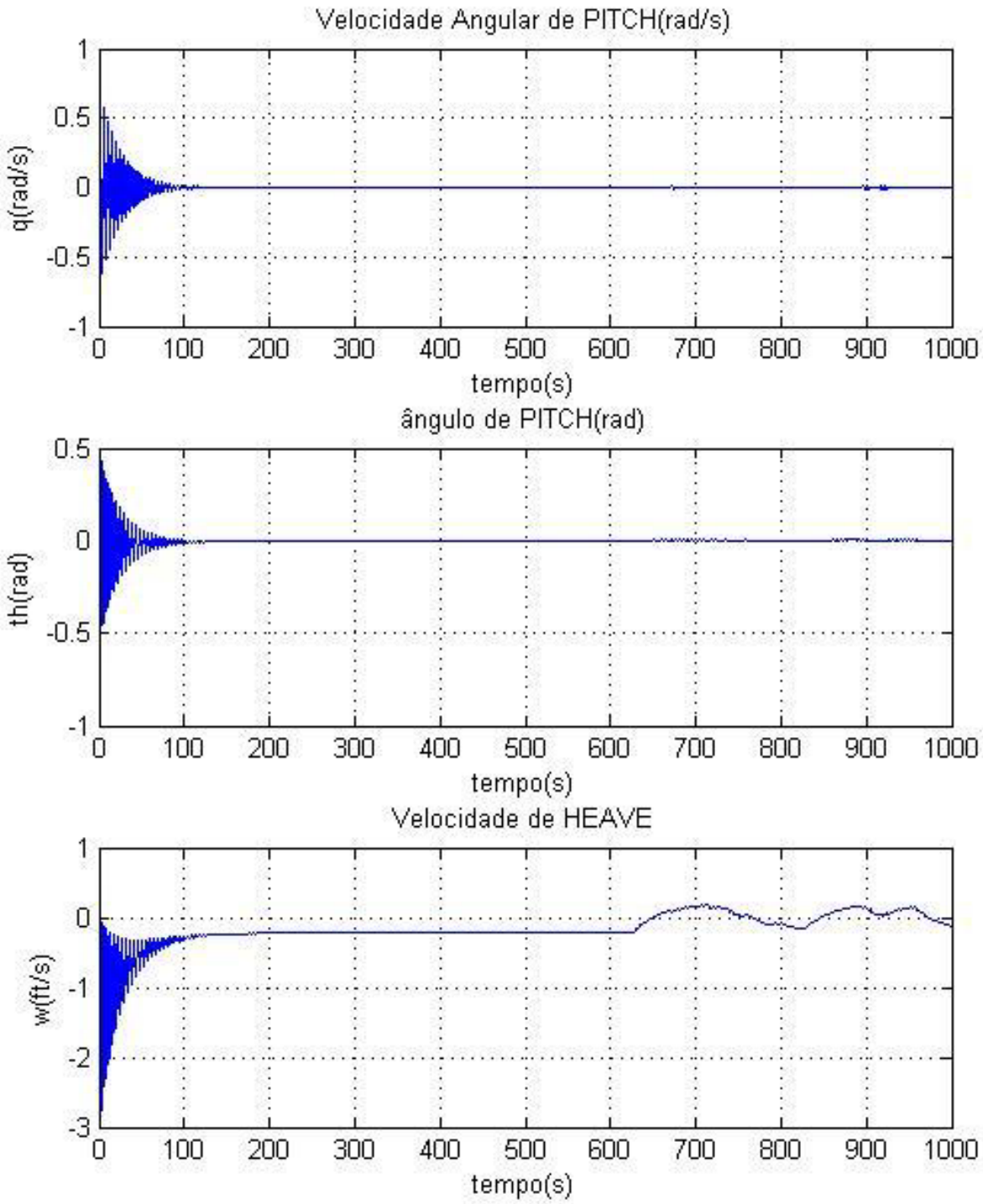

ângulo de PITCH(rad)
th(rad)
1
0.5
0
-0.5
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
tempo(s)


Velocidade de HEAVE
w(ft/s)
3
2
1
0
-1
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
tempo(s)

Caso 13:Proa para cima, emersão, ruído aleatório



Caso 13(cont):


Velocidade Angular de PITCH(rad/s)
q(rad/s)
tempo(s)
ângulo de PITCH(rad)
th(rad)
tempo(s)
Velocidade de HEAVE
w(ft/s)
tempo(s)

5.3 Discussão dos Resultados

Como podemos observar em todos os casos, o DARPA SUBOFF consegue atingir a profundidade comandada. No caso 1, expomos o DARPA à situação mais simples com uma proa neutra a partir da superfície, e como foi mostrado anteriorente, para manter o mesmo na profundidade comandada o sinal de comando do atuador assume uma frequência quase que infinita. No caso 2, ordenamos que o DARPA fosse à uma profundidade e o mesmo após atingi-la, sofre uma perturbação de grande intensidade porém de pequena duração, o controlador então assume uma deflecção constante para fazê-lo atingir a profundidade ordenada e novamente assume frequência próxima ao infinito. O pulso pode ser interpretado como a explosão de uma mina ou torpedo a uma longa distância. No caso 3, parte-se com o DARPA já a uma determinada profundidade, proa neutra e no meio de sua trajetória à superfície, também sofre uma perturbação em forma de pulso de grande amplitude, porém de curta duração. Mais uma vez o sinal para o atuador é deflecção constante até se atingir o comando desejado, e depois se assume uma frequência próxima ao infinito. No caso 4, o submarino parte com a proa apontada para baixo e sofre uma perturbação em forma de pulso, mas com maior duração. Como não houve tempo hábil para se alcançar a profundidade comandada, o sinal para o atuador permaneceu constante. Mas se observarmos a tendência da trajetória podemos perceber que com mais tempo o mesmo alcançaria a profundidade comandada.No caso 5, analogamente ao anterior, não há deflecção, nem o mesmo alcança a profundidade comandada, e também não sofre nenhuma perturbação.No caso 6, a proa está voltada para cima então com o mesmo o comando desejado é alcançado mais rapidamente e o sinal de comando para o atuador assume frequência infinita assim que alcança a profundidade comandada. No caso 7, o submarino sofre um doublet como perturbação, que poderia ser interpretado como a passagem por uma corrente em forma de vórtice, e, novamente o sinal de comando do atuador assume frequência infinita assim que o submarino alcança a profundidade comandada. No caso 8, partindo de uma grande profundidade, com a proa apontando para o fundo e sofrendo uma perturbação de pulso de longa duração, o sinal de comando para o controlador permanece constante e o submarino não consegue atingir no tempo da simulação, a profundidade comandada. Mas a tendência de sua trajetória é de alcançar tal comando, para tal seria necessário mais tempo de simulação.

No caso 9, partindo de grande profundidade e com proa apontada para cima, o mesmo sofre uma perturbação em forma de pulso de longa duração, consegue atingir a profundidade comandada, e então somente o sinal de comando para o atuador assume frequência infinita. No caso 10, o submarino com proa apontada para baixo, sofre a perturbação de um ruído branco, o atuador também até que se atinja a profundidade comandada permanece com deflecção constante. No caso 11, o submarino se encontra com a proa para cima, sofre perturbação de ruído branco e chega mais rapidamente à profundidade comandada, porém para mantê-lo no estado comandado, a frequência do sinal para o atuador possui uma frequência menor que a infinita, que como vimos é mais prejudicial para o equipamento de controle, o atuador. No caso 12, com a proa apontada para baixo e sofrendo perturbação de ruído aleatório, o submarino até atingir a profundidade comandada mantém a deflecção constante e segue uma trajetória de encontro à profundidade comandada, precisaria apenas de mais tempo e simulação.No caso 13, com a proa apontada para cima, o DARPA consegue alcançar a profundidade comandada e mais uma vez por se tratar de um ruído aleatório o mesmo não envia comandos ao atuador de frequência quase infinita, mas com uma frequência menor e aleatória. .Não se discute aqui a questão do pitch e do heave, porque praticamente para todos os casos, exceto os casos em que a proa está apontada para baixo em que o submarino sofre uma pequena vibração inicial para iniciar o movimento constante de emersão, os valores de variação são de uma ordem muito pequena para causar desconforto à suposta tripulação, tão pequenos, que a própria massa adicional do submarino absorveria tal perturbação que combinada com o amortecimento do casco e sua inércia tornariam ainda mais improváveis a sensação pelo pessoal de bordo de desconforto.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trabalho mostrou a efetividade da aplicação do controlador em modos deslizantes, SMC, na estabilidade direcional do submarino. A busca de melhores sintonias com o controle em modos deslizantes, SMC, deve ser a principal atividade para o futuro. Tal tarefa demanda tempo e variação dos parâmetros de camada limite de alocação de pólos e várias simulações, uma tarefa onerosa e iterativa. Mas mesmo com batimento (‘chattering’) nos atuadores, o controlador cumpriu suas tarefas de obedecer aos comandos de profundidade nas mais diversas situações. Enquanto que outras técnicas de controle possuem propriedades bem definidas de robustez, a técnica aqui apresentada pode compensar o comportamento desconhecido não-modelado e ainda com as mesmas, e até mais robustas características às incertezas e dinâmicas não-consideradas. Sugerimos os seguintes trabalhos futuros:

1. Definirmos de fato um envoltória de segurança, análogo ao da. aviação. Para isso, faz-se necessário a técnica de “gain scheduling”, ou interpolação de ganhos, vide Pereira [33] e Stevens e Lewis [25], ainda que sejam casos da aviação e com utilização da técnica LQG/LTR, pois para cada profundidade e atitude, teríamos limites de velocidade para o Submarino e de saturação para os atuadores;

2. Aplicação de controle em modos deslizantes para controle de uma derrota (caminho) de um Submarino para atingir pontos-chaves (‘way-points’) em determinados tempos pré-definidos [11,12 e 16];

3. Aplicação de controle em modos deslizantes para receber sino de salvamento;

4. Aplicação de controle em modos deslizantes para emersão de emergência, pois a modelagem do roll em tal circunstância é extremamente não-linear;

5. Aplicação de controle em modos deslizantes para o controle dos tanques de lastro com suas bombas, para controlar melhor assim a atitude do Submarino.

6. Aplicação das técnicas de lógica nebulosa e redes neurais para o controle de submarinos, pois esses são campos em constante crescimento na aplicação da área de engenharia naval.

BIBLIOGRAFIA

[1] FRIEDMAN., *Submarine Design and Development* ,Naval Institute Press, 1984.

[2] BURCHER, R. & RYDILL, L., *Concepts on Submarine Design*, Cambridge University, 1995.

[3] GLABER, U., *Submarine Design*, Verlag, 2002.

[4] NEVES, M., *Dinâmica do Navio*, COPPE, 1997.

[5] CLAYTON E BISHOP., *Mechanics of Marine Vehicles*, Gulf Publications, 1982

[6] ABKOWITZ, M., *Stability and Motion Control of Ocean Vehicles*,MIT Press,1969

[7]ANÔNIMO (1950) *Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid*. Technical Report Bulletin 1-5, SNAME, 1950**.**

[8] ARENTZEN, *Naval Architectural Aspects of Submarines*, SNAME, 1969.

[9] SPENCER, *Stability of Submarines*, RINA,1973

[10]LEWANDOWSKI, E., *The Dynamics of Marine Craft: Maneuvering and Seakeeping*, World Scientific Publishing Company, 2003.

[11] FOSSEN, T., *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley and Sons, 1994.

[12] FOSSEN, T., *Marine Control Systems*, Marine Cybernetics, 2002.

[13] ZAK, S., *Systems and Control*, Oxford University Press, 2003.

[14] SLOTINE, J e W, Li., *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall (1991) .

[15] CRISTI, R., PAPOULIAS, F.A.,, and HEALEY ,A.J.,*"Adaptive Sliding Mode Control of Autonomous Underwater Vehicles in the Dive Plane"*,IEEE, 1990.

[16] HEALEY, A. J., LIENARD, D., *Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles*. IEEE, 1993.

[17] MARCO, D.B.; HEALEY, A.J., *Command, control, and navigation experimental results with the NPS ARIES AUV*. IEEE, 2001

[18] JOUBERT, P.*Some aspects of Submarine Design. PartI – Hydrodynamics,* DSTO, 2004

[19] LAMB, H., *Hydrodynamics*, Kessinger Publishing , 2008

[20] MILNE-THOMSON, *THEORETICAL Hydrodynamics,* Dover, 1996.

[21]FOX, R. AND MCDONALD, A., *Introduction to Fluid Mechanics,* Wiley and Sons, 2004

[22] TEWARI, A., *Modern Control Design With MATLAB and SIMULINK,* John Wiley and Sons, 2002.

[23] MACIEJOWSKI, J., *Multivariable Feedback Design,* Addison-Wesley Pub, 1989.

[24] BRYSON, A, E., *Control of Spacecraft and Aircraft*, Princeton University Press, 1994.

[25] STEVENS E LEWIS, *Aircraft Control and Simulation,* Wiley and Sons, 2003.

[26] SANTIAGO, A. A., *Controle LQG/LTR Aplicado ao Posicionamento Dinâmico de Plataforma Semi-Submersível*, Technical Report, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Naval e Oceânica, 2005.

[27] GILAT, A., *MATLAB: an Introduction with Applications,* Wiley; 2008.

[28] DABNEY, J, B. e HARMAN, T, L.. Mastering SIMULINK, Prentice-Hall, 2004.

[29] MERIAM, J, L., *Engineering Mechanics: Dynamics*, Wiley and Sons, 2006.

[30] BEER- JOHNSTON, *Vector Mechanics for Engineers:Dynamics,* McGraw-Hill, 2004

[31]YOERGER, D.R. and SLOTINE, J.J.E., *"Robust Trajectory Control of Underwater Vehicles"*, IEEE, 1985.

[32]BOGOSIAN, S., *Projeto de um Navio Patrulha de Formas Não-Convencionais com Características Submersíveis: Viabilidade e Manobrabilidade,* Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio deJaneiro, COPPE, Programa de Engenharia Naval e Oceânica, Aprovada em 2005.

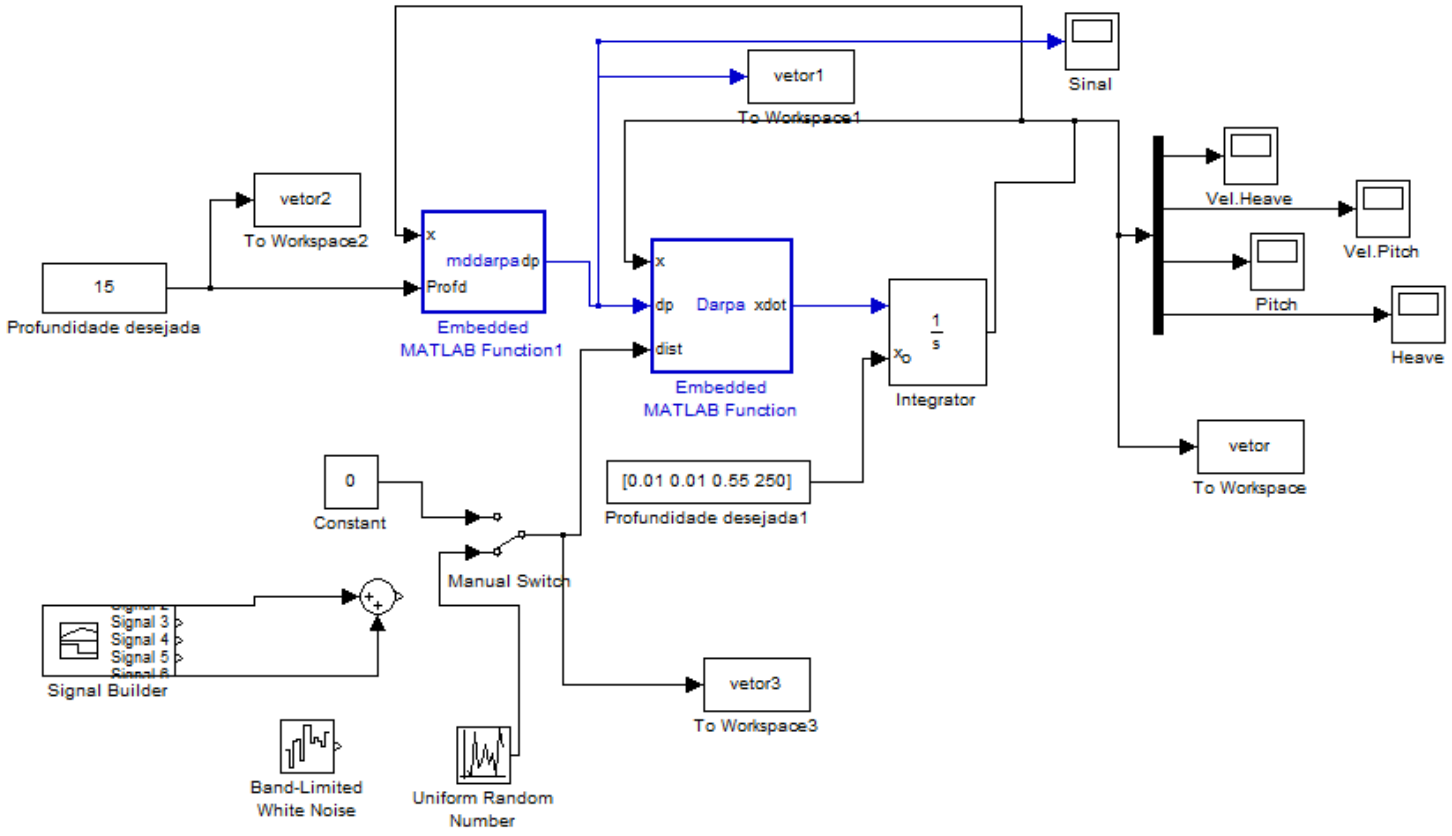
[33]PEREIRA, R, P.. *Controladores Robustos com Interpolação de Ganhos via Lógica Difusa – Aplicação em Veículos Autônomos Não-Tripulados,* Tese de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Aprovada em 2001.

[34]UTKIM, V; GULDNER, J and SHI, J. *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems,* Taylor & Francis, 1999.

[35]RODDY, R, F. *Investigation of Stability and Control of Several Configurations of the DARPA SUBOFF MODEL from captive-model experiments,* David Taylor Research Center, United States Navy, 1990.

APÊNDICE A

IMPLEMENTAÇÃO NO AMBIENTE MATLAB/SIMULINK dos MODELOS do DARPA SUBOFF e do CONTROLADOR EM MODOS DESLIZANTES



A.1. Comentários

O ambiente SIMULINK/MATLAB na Figura A.1 faz a integração da dinâmica do DARPA SUBOFF no plano vertical com o modelo apresentado no Capítulo3 e seus respectivos dados [11, 12 e 35]. Tal dinâmica encontra-se num script na linguagem MATLAB, embarcado no bloco 'DARPA – Embedded MATLAB Function'. Ele possui como entradas a ordem do controlador, a perturbação que também é opcional para a simulação e o retorno da integração de seu estado.

O controlador em modo deslizante com sua respectiva lei de controle e seu respectivo script encontram-se no bloco 'mddarpa- Embedded Function 1' e possui como entrada os estados oriundos do loop de integração e a ordem de profundidade desejada.

Os blocos 'to workspace' enviam vetores dos sinais para o ambiente MATLAB, de posse dos mesmos é possível editar gráficos como os do Capítulo 5[27 e 28].

Os blocos de visão, 'scope', correspondentes às variáveis do plano vertical; $w, q, \theta \; e \; z,$ respectivamente, e um visor também do sinal de controle permitem a observação imediata dos resultados da simulação.

Os blocos restantes nada mais são que as perturbações que porventura desejemos excitar o sistema, incluindo o bloco 'Signal Builder', que permite a edição de sinais pelo utilizador do simulador.

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo