

MODELAGEM DO SISTEMA DE HÉLICE DE PASSO CONTROLADO DAS FRAGATAS TIPO MK22

¹CAIO CÉSAR DA M. SOUZA, ^{1,2}JOSÉ ANDRÉS SANTISTEBAN

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PGMEC-UFF) e ²Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações (PPGEET-UFF), Universidade Federal Fluminense

Rua Passo da Pátria, 156 – São Domingos – Niterói, RJ

CEP: 24210-240

E-mails: ccesarmts@gmail.com; jasantisteban@vm.uff.br

Abstract — The control System of Controllable Pitch Propeller (CPP) of Frigates type MK-22 is achieved by means of electronic modules (analog cards), which have shown eventually defects. This have motivated the necessity of substitution of theses components to keep the stability of the propulsion system. As the spare parts necessary to the repair are limited, the main objective of this work was the modeling of the control system in order to improve it and make faster the repair routine. Thus, an experimental approach was done to identify all its module functions. To validate this modelling, simulations were compared with experimental tests.

Keywords — Controllable Pitch Propeller (CPP), Frigates, Modeling, Propulsion.

Resumo — O sistema de controle de Hélice de Passo Controlado (HPC) das Fragatas tipo MK-22 é realizado por módulos eletrônicos (analógicos), os quais têm apresentado eventualmente defeitos. Isto tem motivado a necessidade de substituição de componentes para manter a estabilidade do sistema de propulsão. Tendo em vista que os sobressalentes necessários ao reparo são escassos, este trabalho teve como propósito a modelagem do sistema de controle a fim de modernizar e acelerar o reparo destes navios. Para isto, foi realizada uma identificação experimental das funções dos seus módulos. Simulações, comparadas com resultados experimentais confirmam a validade desta modelagem.

Palavras-chave — Hélice de Passo Controlado, Fragatas, Modelagem, Propulsão.

1 Introdução

A nacionalização de equipamentos é de importância para qualquer país. Sendo assim, este trabalho tem como propósito o estudo inicial sobre os Hélices de Passo Controlados (HPC) das Fragatas MK-22 para posterior modernização do seu sistema de controle.

Estes hélices são projetados para possibilitar alta flexibilidade de manobra aos navios, pois com estes é possível a alteração de sentido de deslocamento através da alteração do ângulo das pás do navio ou ângulo de passo (θ).

Nas Fragatas MK-22, a alteração do passo é dada através de uma alavanca de comando, chamada de *POWER CONTROL LEVER* (PCL), a qual possui escala variando de -100% a 100%, cuja magnitude fornece um par de valores: Passo e Rotação do eixo, os quais variam a velocidade final do navio. Desta forma, o operador não se preocupa com a variação individual destas grandezas, pois o sistema de controle foi projetado de forma a maximizar a velocidade do navio, sem que haja solicitação de esforços que comprometam a estrutura do mesmo. Assim, o sistema de controle da propulsão pode ser desmembrado em controle do Passo e controle de Rotação. O sistema do HPC têm comumente apresentado defeitos durante a operação, em virtude do longo tempo de utilização destes meios (Fragata MK-22), gerando a necessidade de substituição frequente de componentes para manter a estabilidade do sistema de controle, implicando na diminuição da capacidade operativa destes navios. Desta forma, este trabalho mostra a

modelagem e simulação das partes constituintes do sistema de controle para futura implementação.

2 Modelagem do Sistema

O comando de PCL, ilustrado na Fig.1, é transformado por meio de módulos de circuitos analógicos e sensores em uma tensão contínua proporcional ao valor da escala da manete, chamada de sinal de Demanda de Controle, que é referência para a Demanda do Passo e a Demanda da Aceleração. Neste trabalho, estes sinais foram monitorados experimentalmente para auxiliar na modelagem do sistema.

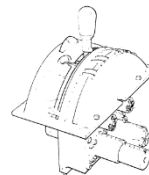


Figura 1 – Alavanca de Comando (PCL) (NTPA,1997)

2.1 Sistema Mecânico

2.1.1 Descrição

A alteração do passo (θ) é realizada através de um pistão de duplo efeito, chamado *SERVO PISTON* principal, localizado internamente ao Bosso do navio (Fig.2), o qual fica localizado abaixo da linha d'água. Óleo hidráulico é conduzido internamente à linha de eixo, através de tubos coaxiais concêntricos, o *INNER TUBE* (interior) e *OUTER TUBE* (exterior). A depender da demanda do operador, o óleo é enviado para uma das câmaras do pistão, movimentando-o

e, através de mecanismos internos ao Bosso, o movimento linear do pistão é transformado em movimento angular das pás do Hélice. Desta forma, o passo pode sofrer alteração para VANTE ou para RÉ.

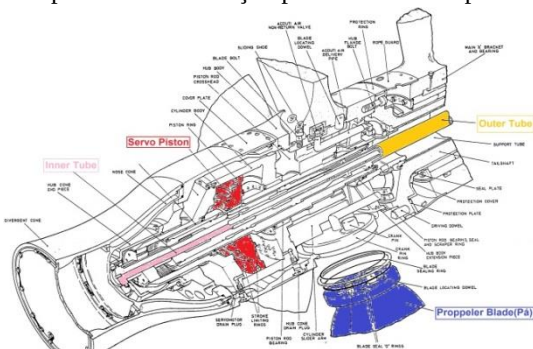


Figura 2 – Corte do Bosso das Fragatas tipo MK-22 (Stone,1995)

Uma bomba de deslocamento variável, do tipo *SWASHPLATE* (tipo Prato) (Fig.3), acionada por motor elétrico, provê a energia hidráulica necessária para a movimentação do *SERVO PISTON*. Existe ainda uma bomba idêntica, como redundância do sistema mecânico, movida por uma junta Cardan proveniente da engrenagem redutora do navio, sendo acionada apenas quando as turbinas do navio estão em funcionamento. Estas bombas são montadas em um circuito hidráulico fechado e funcionam como direcionais. Dependendo do ângulo de inclinação (α) do *SWASHPLATE* (Fig.3), também chamado de ângulo do Prato da bomba, há uma vazão correspondente com sentido dado pelo sinal deste ângulo. Desta forma, existe a linha de passo AVANTE e a linha de passo a RÉ, sendo aquelas que conduzem o óleo hidráulico para as câmaras de VANTE e de RÉ do *SERVO PISTON*.

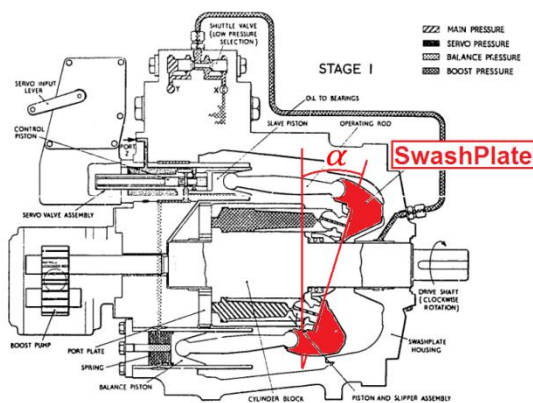


Figura 3 – Bomba Principal de Débito Variável ("SwashPlate type") (Downel,1998)

A mudança do ângulo " α " é realizada através de cilindros de controle, os quais são movimentados através do posicionamento de uma servo-válvula de acionamento mecânico, interna à bomba, conforme mostrado na Fig.4.

O acionamento do carretel de comando desta válvula é realizado através da movimentação de uma alavanca, chamada de *SERVO INPUT LEVER*, conforme mostrado na Fig.4.

O ângulo " β ", formado pelo eixo vertical e o eixo da haste do atuador, possui relação com o ângulo " α ". Um transdutor de posição angular, chamado *Pick-Off*, recebe o valor de " β ", e realiza a conversão de posição em um sinal de tensão variando de [-10V a 10V], que por sua vez corresponde a um ângulo α que varia de maneira linear entre [-30° a 30°].

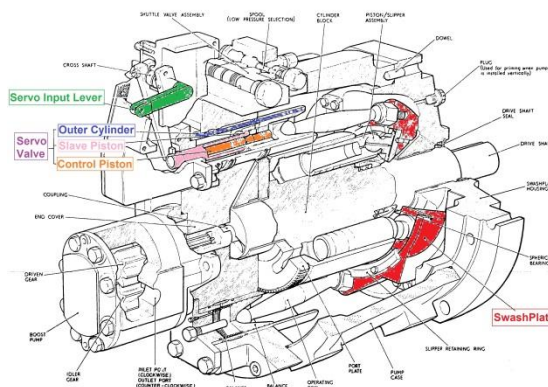


Figura 4 – Bomba Principal de deslocamento Variável ("SwashPlate type") (Downel, 1998)

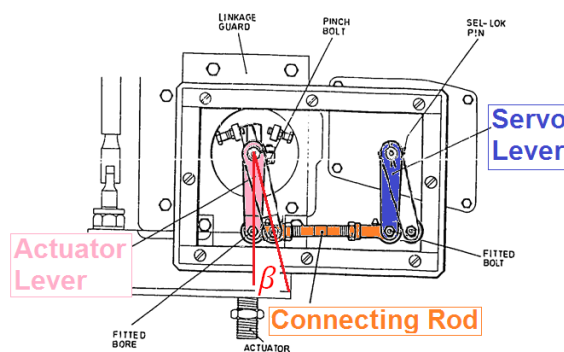


Figura 5 – Desenho Esquemático da comunicação da haste de comando da válvula de controle (SERVO LEVER) com a haste do atuador (ACTUATOR LEVER) através da haste ajustável (CONNECTING ROD). (Downel,1998)

A movimentação do carretel da válvula é feita pela haste do atuador, que pode ser movido remotamente, através de um motor de passo controlado, ou através de uma haste que o operador pode movimentar manualmente (comando manual). Enquanto o carretel está na posição neutra, o pistão de controle está na posição de inclinação em que $\alpha = 0^\circ$ (chamada de *ZERO MECÂNICO*), onde não há deslocamento da bomba para nenhuma das linhas principais, fazendo com que o ângulo do Passo do Hélice (θ) fique inalterado.

2.1.2 Modelagem

Todos os componentes acima descritos podem ser modelados através de funções lineares e não-lineares como mostrado em (Souza, 2016), mas verificou-se a complexidade dos procedimentos que seriam necessários para obter de forma acurada todos os parâmetros envolvidos nesta modelagem.

Desta forma, para efeitos de modelagem, optou-se por observar o sistema que tem como entrada do sistema mecânico " α ", e como saída " θ ", o que permitiu a obtenção de uma função de transferência $F(s)$. Para tal, levantaram-se através dos experimentos denominados de 1 e 2, dois gráficos, " $\theta[^\circ] \times t[s]$ " e " $\alpha[^\circ] \times t[s]$ ", mostrados nas Fig. 6 e Fig.7. As curvas mostradas na Fig.6 foram obtidas através da variação da alavanca de comando PCL com um intervalo de amostragem de 0,2 segundos. As curvas mostradas na Fig.7 foram obtidas através do comando manual de " α ".

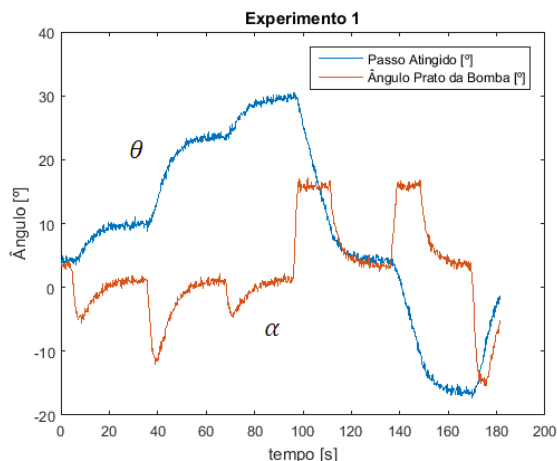


Figura 6 – Experimento 1 – Sistema Mecânico controlado pela alavanca de comando PCL

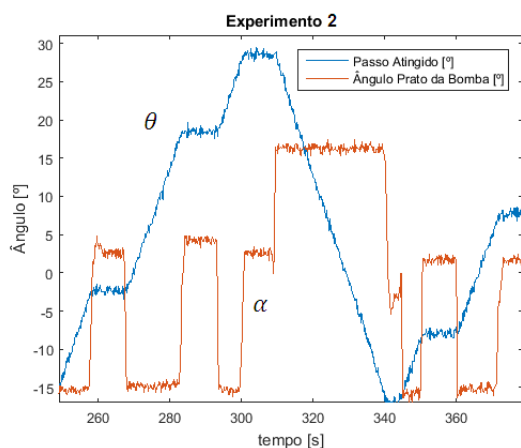


Figura 7 – Experimento 2 – Sistema Mecânico obtida através do comando manual

Observando-se a Fig. 7, é possível notar que a partir das entradas em forma de degrau, as respostas do sistema mecânico foram do tipo rampa, o que sugere um modelo de comportamento, como o ilustrado na Fig.8, onde A representa a amplitude do degrau e " m " o coeficiente angular da rampa.

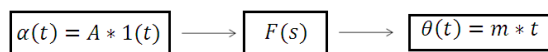


Figura 8 – Diagrama de Blocos Simplificado do Sistema Mecânico

Aplicando a transformada de Laplace nestas funções obtém-se a tabela 1.

Tabela 1 – Transformada de Laplace (Ogata,1998)

	$f(t)$	$L\{f(t)\}$
$\alpha(t)$	A	A/s
$\theta(t)$	$m * t$	m/s^2

Logo:

$$F(s) = \frac{\theta(s)}{\alpha(s)} = \frac{m}{s^2} * \frac{s}{A} = \frac{(m/A)}{s} \quad (1)$$

Da Fig.7, $\frac{m}{A} \cong -0.1$ e com isto $F(s) \cong -\frac{0.1}{s}$.

Contudo, para confirmar a aproximação deste modelo simples, utilizou-se a ferramenta System Identification do MATLAB (Ljung, 2000) considerando um período de aquisição de dados de 0.2s e 900 amostras, para obter a função de transferência que melhor se adeque aos dados do experimento 1. Os melhores resultados são mostrados na tabela 2.

Nota-se que o sistema de 2ª ordem, da forma $F(s) = \frac{a*s+b}{s^2+c*s+d}$, com 2 Pólos e 1 Zero, se adequa da melhor maneira aos dados experimentais. Entretanto, uma vez que $b,c,d \ll a$, então $F(s)$ se aproxima da expressão $F(s) \cong \frac{-0.098a}{s}$, o que corrobora a função aproximada mostrada em (1).

Tabela 2 – Funções de Transferência Modeladas

Pólos /Zeros	$F(s)$	Fit Estimation data [%]
2/0	$\frac{-0.06453}{s^2+1.157*10^{-11}}$	62.25%
2/1	$\frac{-0.09805s+0.0003621}{s^2+1.018*10^{-8}s+7.867*10^{-6}}$	93.17%
3/1	$\frac{-0.03721*s-0.006943}{s^3+4.505*s^2+0.07723*s+1.896*10^{-10}}$	46.24%

Na Fig.9 são comparadas as respostas de cada uma das funções de transferências mostradas na tabela 2, utilizando como entrada os mesmos dados obtidos no experimento 1, Fig. 6. Como se verifica, o modelo com 2 Pólos e 1 Zero gera valores muito próximos aos obtidos experimentalmente.

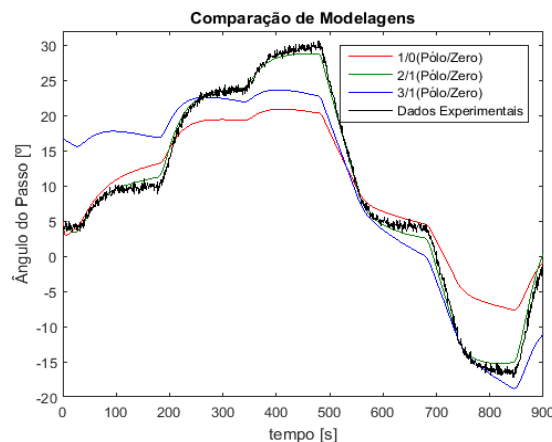


Figura 9 – Comparação do desempenho dos modelos mostrados na Tabela 2, utilizando como entrada os dados do experimento 1.

2.2 Sistema de Controle

2.2.1 Descrição

Conforme mencionado anteriormente, o sistema de Controle do ângulo do Passo " θ ", é responsável por alterar o ângulo " β " da alavanca *SERVO LEVER*, que por sua vez influenciará no ângulo " α ". O acionamento automático da alavanca é feito por um motor de passo.

Este motor possui 3 fases de alimentação em forma de ondas quadradas, defasadas de 120° entre si, com amplitude variando de 0 a 20V, com frequência (Δf) variável de 0 a 155Hz. Quanto maior o valor desta frequência de alimentação, mais rápido se movimentará o motor de passo, portanto " β ", e consequentemente mais rápida será a variação do ângulo " α " por unidade de tempo. O Módulo, denominado NF, é o acionamento do motor de passo e é responsável por gerar as tensões das fases A, B e C do motor, ilustradas na Fig.10.

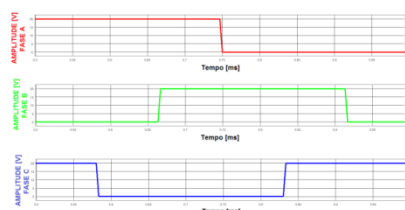


Figura 10 – Formato das tensões de alimentação das fases A, B e C do motor de passo.

Para gerar estas fases, o módulo NF recebe duas ondas em forma de pulso: uma onda de Erro e outra de Referência. A onda de Referência possui a forma mostrada na Fig.11 com frequência constante de $f_R = 3\text{kHz}$.

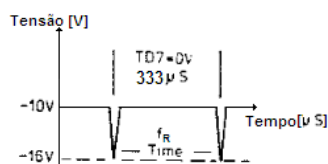


Figura 11 – Curva Teórica da Onda de Referência (NTPA,1997)

A onda de Erro, gerada por um módulo denominado NR, possui o mesmo formato, porém com frequência de Erro (f_E) variável como função de um valor de tensão contínua, chamado de Erro de Posição ($TD7$). Esta função foi obtida experimentalmente, utilizando o método dos mínimos quadrados, como mostrado na Fig.12, gerando (2).

$$f_E(TD7) = 0,08 * TD7 + 2,00 \quad (2)$$

A tensão contínua referente à posição de Erro ($TD7$) é gerada a partir da soma do sinal, negativo, proveniente do transdutor de posição do *SWASHPLATE* atingido ($TD3$), com o sinal de referência *SWASHPLATE* demandado ($TD4$), conforme (3).

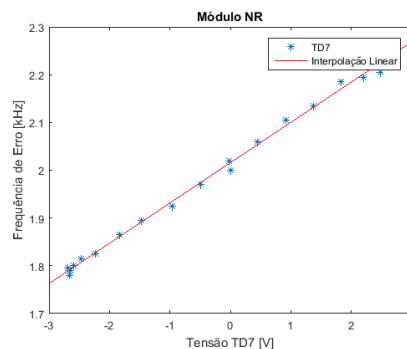


Figura 12 – Curva de " f_E " obtida experimentalmente

$$TD7 = -3,6 * (TD3 + TD4) \quad (3)$$

O módulo NR recebe a informação do Pick-off referente ao ângulo " α ", numa faixa de variação de -30° a $+30^\circ$, em forma de onda de amplitude variável e a transforma em sinal contínuo ($TD3$) que varia de -10V a 10V .

Desta forma, o módulo NR gera, através das ondas de Erro e de Referência, a frequência de oscilação do motor de passo " Δf ", em kHz, conforme (4). O motor de passo fica parado quando $f_E = 2\text{kHz}$.

$$\Delta f = \Delta f(f_E, f_R) = \frac{f_E}{2} - \frac{f_R}{3} \quad (4)$$

O valor de $TD4$ é gerado pela sequência de operações descritas a seguir, através do módulo denominado de AA. Quando o operador altera a posição da manete de comando *PCL*, um sinal contínuo de Demanda de Controle (DC) é gerado. O módulo AA transforma este sinal de Demanda de Controle em Demanda do Passo (DP), através de uma curva chamada "*Pitch Schedule*" ($DC \times DP$), conforme mostrado na (Fig.13). A curva "*Pitch Schedule*", dependente de resistores variáveis, é responsável pelos ajustes de: (i) limitação de passo máximo AVANTE (RV3); (ii) limitação de passo máximo A RÉ (RV5); (iii) inclinação da curva para VANTE (RV4); (iv) limitação da curva para RÉ (RV6); e (v) Ajuste do "Zero Thrust" (RV11).

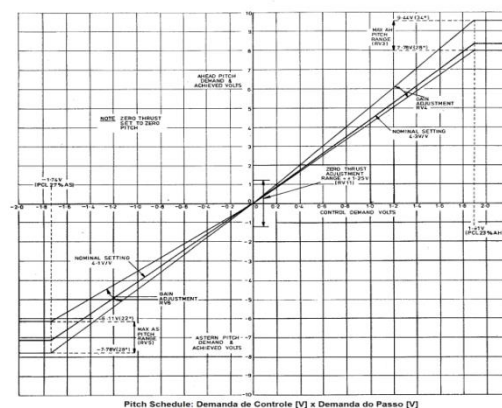


Figura 13 – Curva de Pitch Schedule (NTPA,1997)

O "Zero Thrust" é a condição do ângulo de passo " θ ", tal que, com os eixos girando, o navio não se

move nem para VANTE nem para RÉ. Este ângulo, em geral é de 1.5° AVANTE em cada linha de eixo, porém pode ser ajustado, caso necessário. Desta forma, o sistema de controle faz com que o ângulo do Passo na condição de 0% PCL seja determinada pelo resistor variável RV11, alterando a DP a um valor dentro da faixa estipulada pelo “Pitch Schedule”, entre $[-1,25$ e $+1,25]$ V.

Após converter a DC em DP , o módulo AA recebe o valor de DP e o sinal de Passo Atingido (PA), proveniente do transdutor localizado na *Oil Transfer Box* (OTBOX) e gera o sinal $TD4$, conforme (5).

$$TD4 = 4 * (DP - PA) \quad (5)$$

Toda a descrição até aqui mostrada, foi utilizada na modelagem do sistema, como será visto na seção seguinte.

2.2.2 Modelagem

O modelo do sistema em estudo foi simulado no ambiente SIMULINK do software MATLAB e o seu diagrama de blocos é mostrado na Fig14.

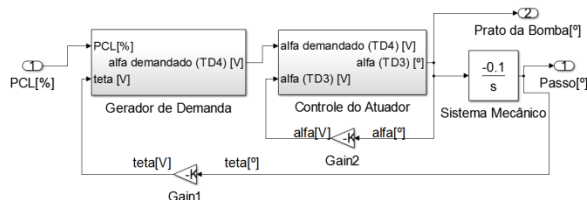


Figura 14 – Sistema do HPC simplificado

Este sistema pode ser desmembrado em duas partes para melhor compreensão:

- Geração de demanda: Responsável por converter o sinal de PCL em Demanda de Controle (DC), posteriormente em Demanda do Passo (DP) e finalmente em Demanda do Prato da Bomba ($TD4$). O seu diagrama de blocos é mostrado na Fig. 15.



Figura 15 – Gerador de Demanda (Sub-Sistema)

- Controle do Atuador: Responsável por gerar as frequências " f_E " e " f_R ", a partir de $TD4$ e posteriormente as tensões das fases A,B e C que alimentarão o motor de passo. O seu diagrama de blocos é mostrado na Fig. 16.

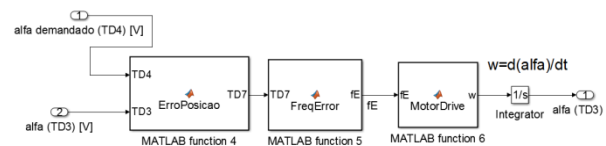


Figura 16 - Controle do Atuador (Sub-Sistema)

3 Validação Experimental

Para validar os modelos deduzidos, foram realizados mais dois experimentos, experimentos 3 e 4. No experimento 3, os sinais de PCL (%) e $SWASHPLATE$, " α "(°) foram monitorados ao longo do tempo, como são mostrados na Fig.17.

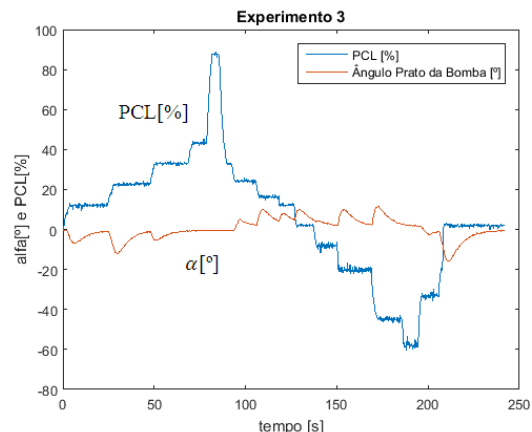


Figura 17 – Experimento 3 – Monitoramento de PCL [%] e α ° em função do tempo.

No experimento 4, os sinais de PCL (%) e Passo, " θ "(°) foram monitorados ao longo do tempo, como pode ser visto na Fig.18.

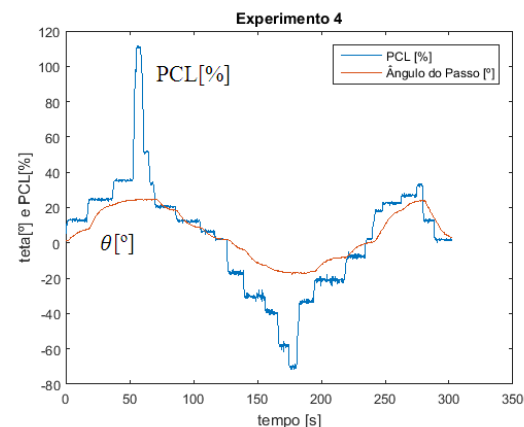


Figura 18 – Experimento 4 – Monitoramento de PCL [%] e θ ° em função do tempo.

Após observação do comportamento do sistema de controle real do HPC, foi possível ajustar os parâmetros do modelo do sistema de controle realizado no MATLAB e compará-lo com o modelo real. Estes ajustes foram realizados conforme observação experimental, por tentativa e erro. Para exemplificar o trabalho realizado, verificando-se que o passo máximo atingido (θ) para VANTE do navio é de 25°, mesmo aplicando-se 100% de PCL na manete de comando, ajustou-se o potenciômetro RV3 do modelo para o valor apropriado até verificar o mesmo comportamento simulado. Similarmente, isto foi realizado com os demais potenciômetros do modelo, bem como os ganhos internos definidos nas “MATLAB functions”, conforme visto nas Fig.15 e Fig.16.

A Fig.18 mostra o comportamento global do sistema de controle real, através do monitoramento de $PCL(\%)$ e $\theta(^{\circ})$. Note-se que por volta de 50s decorridos do início do experimento, o operador atingiu o valor máximo de PCL e o passo superou os 25° , mostrando que 40% de PCL seria o valor limite de aceleração do navio por meio do passo. Acima deste limite em PCL , ajustado por meio de potenciômetros e ganhos pelos módulos NR, AA e NF descritos anteriormente, o navio somente aumenta a sua velocidade por meio do aumento da rotação do eixo, ou seja, aumentando a demanda de combustível para as suas turbinas TYNE e/ou OLYMPUS.

Na Fig. 19, são comparados os resultados de " α " obtidos a partir da modelagem do sistema de controle com os obtidos no experimento 3.

Na Fig. 20, são comparados os resultados de " θ " obtidos a partir da modelagem do sistema de controle com os obtidos no experimento 4.

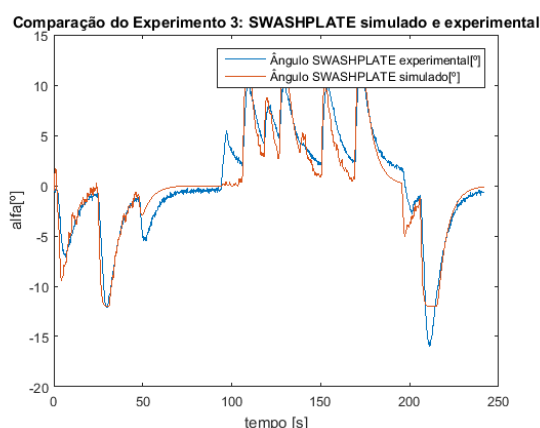


Figura 19 – Comparação dos resultado de " α " simulados e obtidos no experimento 3

Como se observa, os resultados mostram que, embora haja algumas imperfeições, o modelo do sistema reflete de forma satisfatória a dinâmica do sistema. O projeto de um novo sistema de controle poderá absorver as deficiências deste modelo com a escolha de um controlador apropriado.

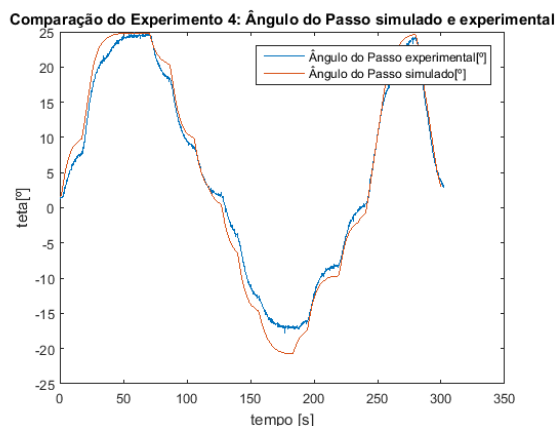


Figura 20 – Comparação dos resultado de " θ " simulados e obtidos no experimento 4

4 Conclusão

A comparação entre os resultados de simulação e experimentais mostram que o modelo proposto neste trabalho para o sistema do HPC das Fragatas tipo MK-22 é satisfatório. A influência dos parâmetros de ajuste internos do sistema real foram contemplados no modelo, de tal forma que é possível prever a alteração do comportamento global do sistema com a mudança de qualquer um destes.

Os resultados deste trabalho mostraram que a nacionalização de equipamentos é uma tarefa viável com a utilização de ferramentas e conhecimentos da engenharia do país.

Por fim, acredita-se que esta modelagem poderá servir de base para elaboração de projetos futuros em sistemas de controle de navios utilizando recursos contemporâneos, tais como microcontroladores, a fim de substituir os seus módulos atuais.

Agradecimentos

À gerência de Fragatas do Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro (AMRJ), aos integrantes da Fraga-ta Greenhalgh e membros do AMRJ-245 pelo apoio dado através da disponibilidade de recursos necessários ao desenvolvimento da pesquisa.

Ao 1ºTen(EN) Jonaylton, Engenheiro Mecatrô-nico, meu reconhecimento pela sua ajuda profissional no desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Downel 25CU IN/REV Variable Delivery Pumps, 1998. Manual BRF 6570(004), Ministry of De-fence – UK Information.
- Ljung,L. System Identification Toolbox (2000). Mathworks, Inc.
- Naval Technical Publications Authority (NTPA) 1997. Manual BRF 6502(401) Functionally Iden-tified Diagnostic Aid and Setting to Work HM Ships Broadsword Battleaxe Brilliant Brazen and Boxer B, Ministry of Defence – UK Information.
- Ogata, K. (1998). Engenharia de Controle Moderno. LTC. Rio de Janeiro, RJ.
- Stone Vickers Ltd.1995. Manual BRF 6566(700) Controllable Pitch Proppellers, Naval Support Command – UK Information.
- Souza, C.C. da M(2016). “Proposta de Substituição do Sistema de Controle Analógico de um Hélice de Passo Controlado por um Sistema Microcon-trolado”, PGMEC-UFF, Dissertação de Mestra-do. Niterói, RJ.