

CONSTRUÇÃO DE UMA PLATAFORMA DIDÁTICA PARA ESTUDO DA TÉCNICA DE CONTROLE GAIN SCHEDULLING UTILIZANDO UM ESCALONADOR MECÂNICO DE GANHOS

Erlon Cavazzana – erlon@ifes.edu.br

Avenida Filogônio Peixoto S/N

29901-291 – Linhares - ES

José Denti Filho – jdenti@ele.ufes.br

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Elétrica

Avenida Fernando Ferrari S/N

29060-900 – Vitória - ES

Ernandes Moisés Ribeiro de Souza – ernandesmrs@petrobras.com.br

PETROBRAS Petróleo Brasileiro S/A, UO-ES/ATP-NC-MI

Estação Fazenda Alegre

29950-000 – Jaguaré – ES

Resumo: Este trabalho apresenta a construção de um protótipo de aeroestabilizador, como plataforma didática para estudo da técnica de controle Gain Scheduling. O protótipo construído é não-linear e permite a estabilização aérea de um ângulo de referência em diferentes regiões de operação utilizando um controlador PID escalonado mecanicamente. Primeiramente, o protótipo do aeroestabilizador foi construído utilizando materiais de custo reduzido para facilitar sua reprodução em outras instituições. Em seguida, um modelo para o sistema foi obtido com a realização de ensaios em malha aberta. Logo após, sintonias de controladores PID foram encontradas para se obter o desempenho desejado em diferentes regiões de operação. A seguir, foi desenvolvido um sistema mecânico de ajuste automático de ganhos para que o sistema alcançasse o desempenho desejado em toda faixa de operação. Por fim, foram feitos ensaios em malha fechada com o controlador desenvolvido e o desempenho final é apresentado.

Palavras-chave: Educação em controle, Controle não-linear, Escalonamento de ganhos, Aeroestabilizador.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas tecnologias no campo do controle automático tem possibilitado existir veículos aéreos cada vez mais autônomos, com diferentes níveis de controle implementados (ARAÚJO, 2007; SCHNEIATER, 2005). Dentre os possíveis níveis de controle utilizados, alguns apresentam uma malha de controle só para lidar com o problema da estabilidade, ou seja, o problema da rejeição a distúrbios e até mesmo a intempéries. Essa malha de controle constitui, assim, uma das camadas de controle mais básicas desses veículos. É possível citar, dentre as classes de veículos aéreos existentes, a classe de veículos impulsionados por hélices horizontais, como helicópteros de duas hélices, aerobarcos (hovercraft), aeronaves que pousam e decolam na vertical (Aeronaves VTOL:

Vertical Takeoff and Landing), e suas respectivas versões para o modelismo. Esses veículos podem ser equipados com malha de controle de estabilidade, o que motiva estudos nesta área.

Com intuito de realizar os primeiros estudos sobre o desafio de controle da estabilidade de veículos impulsionados por hélices horizontais, foi construído este protótipo educacional para ensino da técnica de controle Gain Scheduling, como possível ferramenta a ser aplicada nesses sistemas não-lineares. Vale ressaltar que, controladores lineares de ganhos fixos só possibilitam manter o desempenho desejado nas vizinhanças do ponto para o qual foram sintonizados.

2 DESCRIÇÃO DA PLANTA

O protótipo construído é formado por uma base de madeira, a qual é fixado um suporte vertical que sustenta uma haste horizontal giratória. Nas extremidades da haste horizontal está fixado um conjunto motor-hélice e um contrapeso na outra extremidade. A rotação do motor provoca deflexões na haste, alterando o ângulo de posicionamento com a horizontal (Figura1).

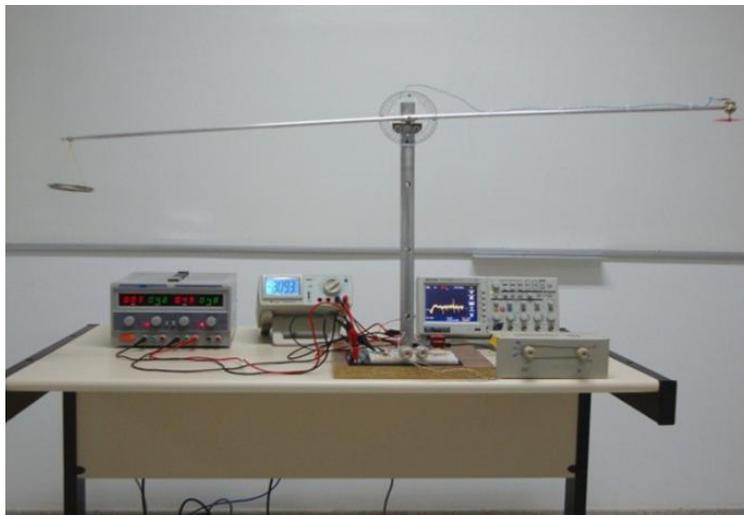


Figura 1: Protótipo construído.

Quando for estabelecida uma referência de ângulo, o controlador deverá controlar automaticamente a rotação do motor-hélice a fim de posicionar a haste na referência indicada. O motor utilizado é do tipo Corrente Contínua ou DC (Direct Current), sendo o seu controle de rotação realizado pela variação da tensão nos terminais de alimentação. Todo o protótipo foi construído utilizando materiais obtidos em sucata, visando redução de custo e fácil reprodução em outras instituições.

3 ESTRATÉGIA DE CONTROLE

O Controlador Proporcional Integral Derivativo, mais conhecido como controlador PID, constitui uma estratégia de controle amplamente utilizada na indústria ao longo de muitos anos. Esse controlador apresenta garantias de estabilidade e de desempenho em aplicações lineares, onde é possível muitas vezes fazer uso de tabelas de sintonia como a desenvolvida por ZIEGLER & NICHOLS (1942). As suas principais vantagens são a robustez e a simplicidade, além do conhecimento difundido e das diversas ferramentas de análise e de síntese desenvolvidas ao longo do tempo (OGATA, 1993).

Por outro lado, a técnica de controle *Gain Scheduling* tem se mostrado de grande utilidade em aplicações não-lineares (RUGH & SHAMMA, 2000), onde é possível citar o controle de vôo (STEIN et al., 1977) onde as dinâmicas variam fortemente com a velocidade e

com a altitude do avião, o controle de processo industrial (DOYLE et al., 1998) onde as dinâmicas do processo podem variar de acordo com sua característica ou com a taxa de produção e o controle da suspensão ativa de veículos (TRAN & HROVAT, 1993), onde a dinâmica da suspensão varia de acordo com o perfil da estrada.

Esta técnica consiste em projetar controladores lineares de diferentes ganhos para controlar sistemas não-lineares e depois associá-los em um único controlador. Assim, são utilizados diversos controladores lineares onde cada um opera em uma determinada faixa de operação do sistema ou, de forma equivalente, é utilizado apenas um controlador de ganho variável para compensar mudanças de dinâmica do sistema e realizar a tarefa global de controle de um sistema não-linear.

As principais vantagens do controle por escalonamento de ganhos são o fato de poder ser um método de controle mais intuitivo do que outros métodos para controle de sistemas não-lineares e o seu potencial em incorporar ferramentas e metodologias poderosas de controle linear (DORF & BISHOP, 1998) em problemas não-lineares (KHALIL, 1996).

Na forma clássica de projeto Gain Scheduling utiliza-se a Linearização Jacobiana (Slotine & Li, 1991) da planta não-linear sobre uma família de pontos de equilíbrio ou pontos de operação, sendo algumas vezes chamado de método de escalonamento por linearização. Dessa forma, passa a existir modelos lineares válidos nas vizinhanças desses pontos de operação, a qual são sintonizados os controladores lineares. Outra forma de realização do projeto Gain Scheduling consiste nos métodos baseado em formas LPV de escalonamento, no qual as dinâmicas da planta são reescritas para que as não-linearidades sejam parâmetros variantes no tempo possíveis de serem usados como variáveis de escalonamento (LEITH & LEITHEAD, 2000).

No presente trabalho foram projetados controladores PID de ganho escalonado para aliar as características do controlador PID tradicional à técnica *Gain Scheduling* visando compensar as não-linearidades da planta. A técnica *Gain Scheduling* utilizada foi baseada em métodos clássicos.

Primeiramente o protótipo de aeroestabilizador foi construído, depois foram realizados ensaios em malha aberta para se obter modelos válidos em determinadas faixas de operação. Em seguida, projetou-se controladores PID para alcançar o desempenho desejado em cada uma dessas regiões. Finalmente, obteve-se o controlador PID escalonado global onde os seus ganhos são ajustados dinamicamente e os resultados encontrados são apresentados.

4 MODELAGEM DO SISTEMA

A modelagem de sistemas reais pode ser caracterizada como (SJOBERG et al., 1995): (i) modelagem caixa-branca, quando o modelo é obtido baseado em equações físicas, onde um conhecimento mais profundo do sistema é comumente requerido; (ii) modelagem caixa-cinza, quando algum conhecimento prévio sobre o sistema é utilizado na identificação do processo; e (iii) modelagem caixa-preta, quando o sistema é identificado baseado apenas em séries temporais experimentais adquiridas no processo, sem o uso de conhecimento prévio.

No presente trabalho é desenvolvida a modelagem caixa preta, na qual o modelo foi obtido e validado por meio de dados reais de ensaios em malha aberta. Esse tipo de modelagem leva em consideração apenas os dados medidos na entrada e na saída do processo, uma vez que esses dados possuem as informações sobre a dinâmica da planta (AGUIRRE, 2004). Essa abordagem foi escolhida dada a dificuldade de se elaborar um modelo a partir da física do processo (modelagem caixa branca) e da determinação de seus parâmetros, o que demandaria um grande esforço e provavelmente não traria um resultado muito mais relevante do que o resultado obtido a partir da modelagem caixa preta.

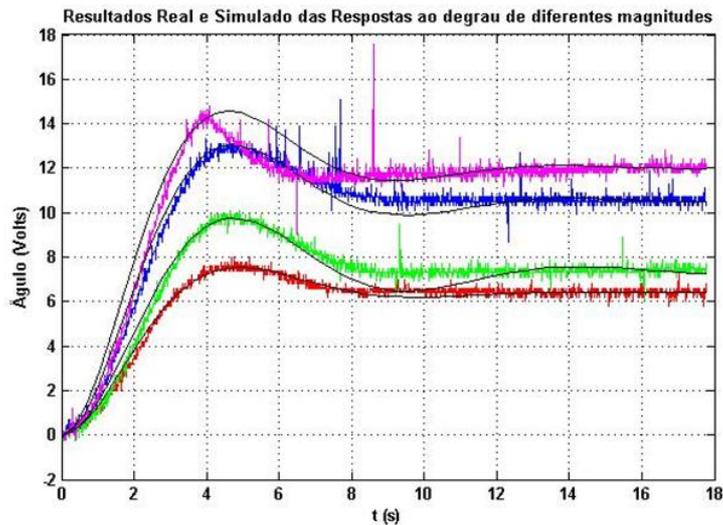


Figura 2: Ensaio em malha aberta. Resultados Reais e Simulados para referências em degrau de diferentes amplitudes.

Tendo em vista que o sistema estudado é não-linear, devido a força que impulsiona a hélice ser proporcional ao cosseno do ângulo da haste em relação à vertical, devido a força de propulsão nas pás da hélice não ser diretamente proporcional a sua rotação, devido ao atrito viscoso no eixo do potenciômetro e, também, devido a influências externas, como por exemplo, vento e temperatura ambiente, a planta apresenta dinâmicas diferentes para diferentes faixas de operação. Devido a estes fatos foi utilizado as respostas da planta à diferentes degraus de referência, em toda a faixa de operação da planta, para se obter modelos lineares válidos nessas regiões. Analisando o comportamento do sistema verificou-se que o sistema apresentava respostas características à respostas de sistemas de segunda ordem subamortecido, assim foi utilizado a Equação 1 para representar a dinâmica local do sistema. A partir daí, determinou-se os parâmetros de cada modelo, válidos em torno de cada referência testada e, estes foram simulados e validados com dados reais, conforme mostrado na Figura 2.

$$G(s) = k \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}, \quad \text{onde } \zeta < 1 \quad (1)$$

ω_n é a frequência natural do sistema, k é o ganho de malha aberta e ζ o amortecimento do sistema.

Os seguintes modelos, válidos em torno de quatro regiões de operação definidas, foram encontrados:

$$\begin{aligned} G_1(s) &= \frac{3,08}{s^2 + 0,7s + 0,53} \\ G_2(s) &= \frac{2,98}{s^2 + 0,46s + 0,49} \\ G_3(s) &= \frac{4,28}{s^2 + 0,6s + 0,53} \\ G_4(s) &= \frac{4,97}{s^2 + 0,67s + 0,58} \end{aligned} \quad (2)$$

5 PROJETO DO CONTROLADOR

O controlador sintetizado consiste em um controlador PID (Equação 3) analógico com ganhos ajustáveis para implementação da técnica Gain Scheduling definida em seção anterior. A eletrônica envolvida consiste na implementação de módulos independentes, compostos por Amplificadores Operacionais, Resistores, Capacitores e Potenciômetros para permitir facilmente a mudança dos ganhos do controlador, até mesmo de forma dinâmica.

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (3)$$

Assim, o circuito implementado (Figura 3) possui um módulo subtrator, que realiza o cálculo do erro entre a referência e a saída real do sistema, módulos Integral, Proporcional e Derivativo que realizam as operações do controlador PID propriamente dito, um módulo somador, que realiza a soma dos sinais gerados pelos módulos anteriores, um inversor de sinal para adequar o sinal de controle gerado e, por fim, um circuito de acionamento do motor. O circuito de acionamento do motor ou circuito de potência, montado conforme mostrado na Figura 3 é responsável por fornecer a potência necessária ao acionamento do motor de corrente contínua, uma vez que o circuito do controlador não pode prover toda corrente de acionamento necessária. Ainda como se observa nessa Figura, a saída do controlador polariza proporcionalmente a base dos transistores NPN e PNP conforme o sinal da ação de controle, portanto observa-se, nesse circuito, que dependendo do erro em relação à referência o motor poderá acelerar, desacelerar ou até mesmo inverter o seu sentido de rotação utilizando contratorque (por contra-corrente). A corrente, então, passa da fonte para o motor pelos transistores de potência e não diretamente do controlador para o motor. Os diodos do circuito são diodos de roda-livre para evitar sobretensões no circuito e V_u é o sinal de controle.

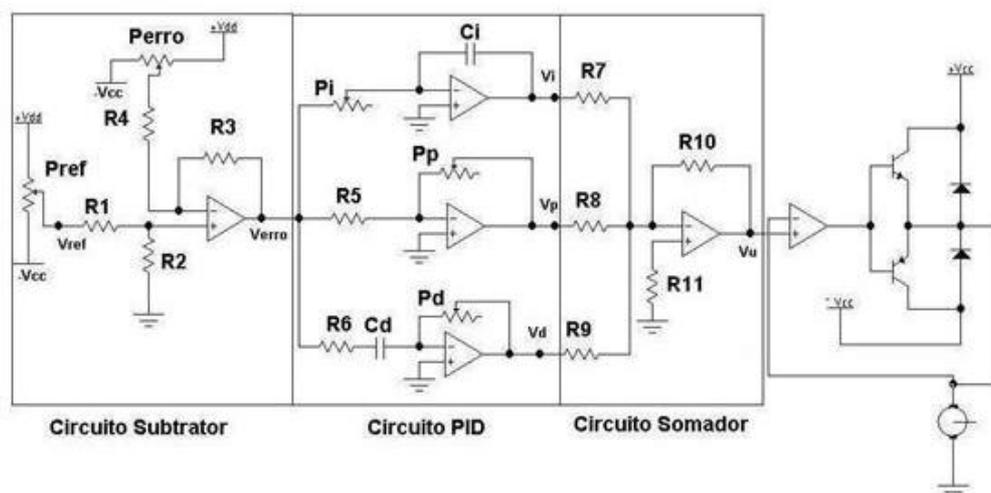


Figura 3: Controlador PID analógico e circuito de acionamento do motor.

6 SINTONIA DO CONTROLADOR

A sintonia do controlador foi realizada de forma que os seguintes requisitos de desempenho fossem alcançados:

1. O controlador deverá estabilizar o sistema na referência desejada.
2. O transitório do sistema deverá demorar no máximo 10 segundos.
3. O controlador deverá apresentar poucas oscilações em torno da referência.

O procedimento consistiu em utilizar a ferramenta de simulação Sisotool, componente do software Matlab™, para encontrar a sintonia do controlador PID “local” que atendesse aos requisitos listados. Essa ferramenta permite realizar a mudança de localização dos pólos de malha fechada e variar os ganhos em tempo real, mostrando o diagrama de Bode, a margem de fase, a margem de ganho (Figura 4), a resposta do sistema ao degrau de referência, além de outros recursos.

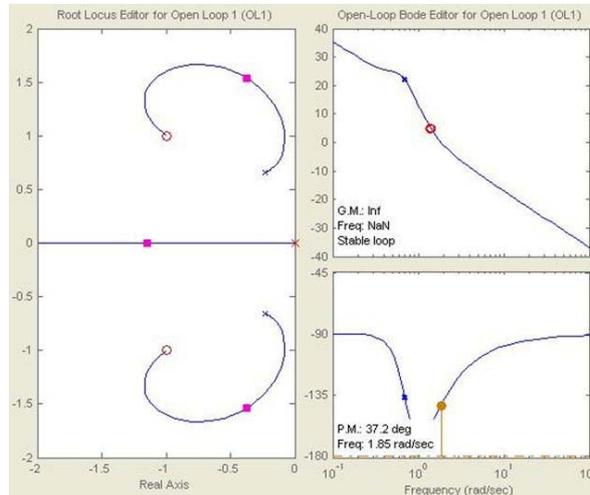


Figura 4: Diagrama de Bode do sistema em Malha Fechada. Determinação da sintonia do controlador.

6.1 Escalonador mecânico de ganhos

Para implementar a técnica Gain Scheduling foi desenvolvido um sistema de escalonamento mecânico dos ganhos, conforme mostrado na Figura 5. Esse sistema consiste em unir os potenciômetros que definem o ganho de interesse em razão da referência do controlador, por um sistema mecânico composto de uma base, correia e polias. A variação desse ganho ocorre linearmente, conforme razão entre os raios das polias.



Figura 5: Escalonador mecânico de ganhos.

Detalhes sobre a escolha do ganho de interesse e da utilização desse sistema serão melhor apresentados na próxima seção.

7 DESEMPENHO ALCANÇADO

O primeiro passo para implementação do sistema de controle para este sistema consistiu em tentar realizar uma sintonia de controlador única, ou seja, uma sintonia para o controlador PID que atendesse aos requisitos desejados em toda a faixa de operação da planta. Assim, foi aplicado o primeiro método de Ziegler e Nichols (ZIEGLER & NICHOLS, 1942) para uma região de operação intermediária. Esse método falhou, pois foram obtidos valores de

sintonia inviáveis de se implementar na prática, portanto não foi satisfatório para o controle automático do aeroestabilizador. Essa falha se deve ao fato de que a planta é não-linear, apresentando dinâmicas de ordem superior. Esse fato é contrário à premissa do método Ziegler-Nichols.

Para tentar obter uma sintonia de controlador que apresentasse o desempenho desejado em torno dessa referência, recorreu-se à sintonia por tentativas e erros, já que a sintonia do primeiro método não obteve resposta satisfatória. Esse tipo de sintonia requer grande conhecimento das funções de cada ação do controlador PID e pode se tornar difícil de obter, pois há várias combinações possíveis para K_d , K_i e K_d . Utilizando esse método encontrou-se uma configuração que atendeu os requisitos desejados nessa região. Esses ganhos foram: $K_p=3$, $K_i=2,5$ e $K_d=1,5$.

Na Figura 6 é possível verificar a reação da planta para três referências diferentes utilizando a sintonia supracitada. Nota-se que o desempenho do controlador só é satisfatório para referências em torno de 0° , pois esta foi a referência utilizada para determinar a sintonia do controlador. Vale ressaltar que, em estado de repouso, a planta fica situada em torno de -30° .

Para solucionar esse problema a região de operação do sistema foi subdividida e determinaram-se modelos lineares para cada subregião, conforme descrito em seção anterior e cujos resultados são apresentados na Equação 2. De posse desses modelos cada sintonia de controlador foi obtida por simulação e notou-se que o desempenho do sistema era mais sensível à variação do ganho k_d , a medida que a referência variava.

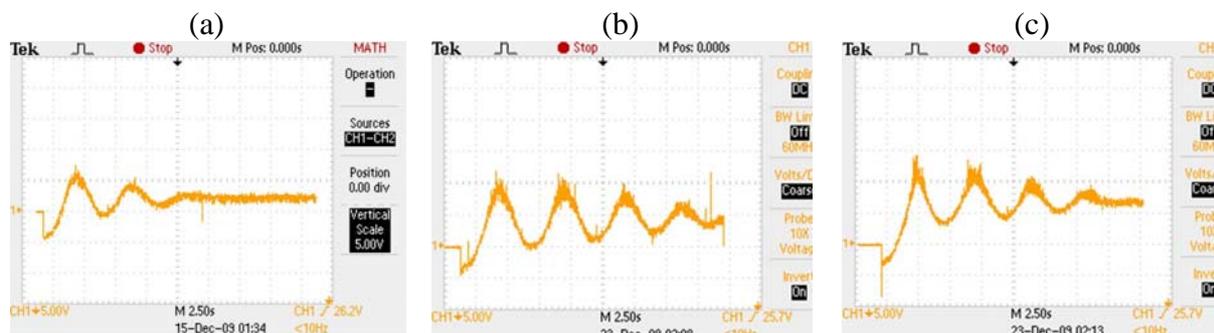


Figura 6: Resultado de testes de controle com ganhos fixos. (a) Resposta da planta para referência de 0° ; (b) Resposta da planta para referência de 10° ; (c) Resposta da planta para referência de 20° .

Posteriormente, as sintonias encontradas para cada faixa de operação foram testadas na planta e foram feitos ajustes finos pelo método de tentativas e erros. Assim, observou-se que o ganho k_d deveria ser maior a medida que a referência de ângulo aumentava e os ganhos k_p e k_i não mudavam significativamente.

Diante desses resultados foi desenvolvido um sistema de ajuste automático de ganhos (Figura 5), de forma que a razão dos raios das polias possibilitasse que o sistema tivesse ganhos $k_d=1,5$ para a menor referência possível e ganho $k_d=2,5$ para a maior referência possível, variando linearmente entre eles. Os demais ganhos, k_p e k_i permaneceram constantes, iguais a 3 e 2, respectivamente.

A Figura 7 apresenta os resultados alcançados pela técnica Gain Scheduling utilizada, onde observa-se que os requisitos de desempenho de controle foram respeitados em toda a faixa de operação.

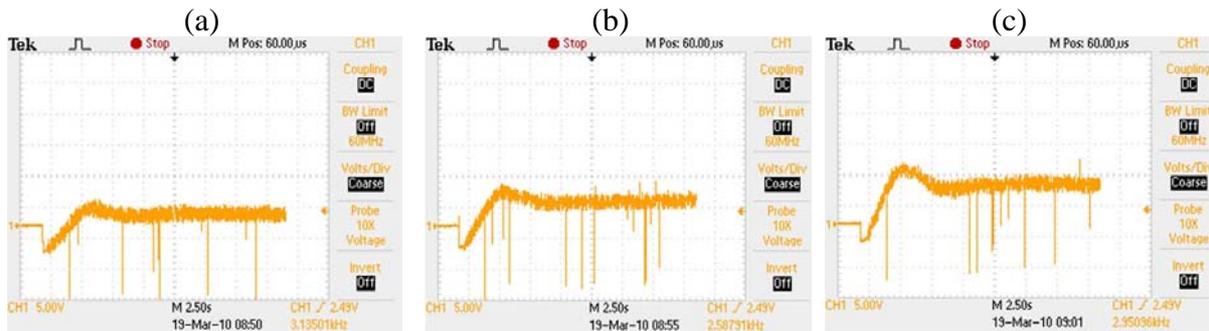


Figura 7: Resultados alcançados com o controlador *Gain Scheduling* desenvolvido. (a) Resposta da planta para referência de 0° ; (b) Resposta da planta para referência de 10° ; (c) Resposta da planta para referência de 20° .

8 CONCLUSÕES

Diante dos resultados experimentais obtidos é possível afirmar que os objetivos iniciais propostos nesse projeto foram alcançados, pois um aeroestabilizador como plataforma didática para estudo da técnica de controle *Gain Scheduling* foi construído e testado. Além disso, o sistema de controle desenvolvido para este sistema foi capaz de estabilizar o sistema em diferentes ângulos de referência, com diferentes cargas de contrapeso e o desempenho final de controle atingiu os requisitos desejados:

1. Estabilizar o sistema na referência desejada.
2. Tempo transitório máximo de 10 segundos.
3. Manifestação de poucas oscilações em torno da referência.

A técnica *Gain Scheduling* utilizada mostrou-se adequada para este projeto e a sua escolha se deve ao fato de que da planta ser não-linear e o controlador PID na sua forma convencional somente poderia satisfazer os requisitos de estabilidade e de desempenho desejados em torno de uma pequena faixa de operação para o qual ele foi sintonizado. O controlador PID convencional só garante esses requisitos em toda faixa de operação quando utilizado em plantas lineares.

As não-linearidades ocorreram, principalmente, por quatro motivos: devido a força que impulsiona a hélice ser proporcional ao cosseno do ângulo da haste em relação à vertical, devido a força de propulsão nas pás da hélice não ser diretamente proporcional a sua rotação, devido ao atrito viscoso no eixo do potenciômetro e, também, devido a influências externas, como por exemplo o vento e a temperatura ambiente.

Vale ressaltar que, os resultados encontrados podem ser úteis para iniciar novos estudos sobre o desafio da estabilização automática de veículos impulsionados por hélices horizontais.

Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, Luis Antonio. **Introdução à identificação de sistemas - Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. Editora UFMG, 2004.

ARAÚJO, Márcio Rodrigo Vieira de. UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, Departamento de Engenharia Mecânica. **Projeto, simulação e controle de veículo aéreo não tripulado *tail-sitter***, 2007; Dissertação (Mestrado).

DORF, Richard. C.; BISHOP, Robert. H. **Sistema de controle modernos**. Livros Técnicos Científicos Editora S.A, 1998.

DOYLE, Francis. J. I.; KWATRA, Harpreet S.; SCHWABER, James S. Dynamic gain scheduled process control. **Chemical Engineering Science**, v.53, p. 2675-2690, 1998.

KHALIL, Hassan K. **Nonlinear systems**. Prentice-Hall, 1996.

LEITH, D.; LEITHEAD, W. Survey of gain scheduling analysis e design. **International Journal of Control** , v.73(11), p. 1001-1025, 2000.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 2. ed. São Paulo: Prentice Hall do Brasil, 1993.

RUGH, Wilson. J.; SHAMMA, Jeff S. Research on gain scheduling. **Automatica**, v.36, p. 2675-2690, 2000.

SCHNEIATER, Rodrigo. **Controle difuso de um aeroestabilizador**. National Instruments, 2005.

SJOBERG, J.; ZHANG, Q.; LJUNG, L.; BENEVISTE, A.; DELYON, B.; GLORENNEC, P.; HJALMARSSON, H.; JUDITSKY, A. Non-linear blackbox modeling in system identification: A unified overview, **Automática** pp. 31-1961, 1995.

SLOTINE, Jean. J. E.; LI, Weiping. **Applied Nonlinear Control**, Prentice-Hall; United States Edition, 1991.

STEIN, G.; HARTMANN, G. L.; HENDRICK, R. C. Adaptive control laws for F-8 fight test. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 22, p. 758-767, 1977.

TRAN, M. N.; HROVAT, D. Application of gain-scheduling to design of active suspensions. **Proceedings of the 32nd IEEE Conf. on Decision and Con.**, San Antonio, TX, USA, p. 1030-1035, 1993.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum settings for automatic controllers. **Transactions of the ASME**, v.94, p. 759-769, 1942.

CONSTRUCTION OF A DIDATIC PLATFORM FOR TEACH GAIN SCHEDULLING CONTROL TECHNIQUE USING A MECHANICAL SCHEDULER GAINS

Abstract: *This paper presents the construction of an air stabilizer prototype as learning platform for Gain Scheduling control technique studies. The prototype built is nonlinear and allows stabilizing an air reference angle in different operation regions using a PID controller mechanically scheduled. First, the air stabilizer prototype was built using low cost materials to facilitate their reproduction in other institutions. Then a system model was obtained by tests in open loop. Soon after, tuning PID controllers were found to achieve the desired performance in different regions of operation. Next, we developed a mechanical system of automatic adjustment gains to achieve desired performance in all operating range. Finally, tests were performing in closed loop with the developed controller and its final performance is presented.*

Key-words: Control education, Nonlinear control, Gain Scheduling, Air stabilizer.