

UM CONTROLADOR NEBULOSO TSK APLICADO EM UM SISTEMA PARA ISOLAMENTO DE VIBRAÇÕES

FÁBIO M. U. ARAÚJO, TAKASHI YONEYAMA E CAIRO L. NASCIMENTO JR.

*Departamento de Sistemas e Controle, Instituto Tecnológico de Aeronáutica
CEP 12228-901 – São José dos Campos, SP, BRAZIL
meneghet@ele.ita.br, takashi@ele.ita.br, cairo@ele.ita.br*

Resumo— Neste trabalho é proposto um controlador nebuloso, tipo Takagi-Sugeno-Kang (TSK), a ser implementado em um sistema eletro-mecânico cujo objetivo é propiciar a redução da transmissibilidade de vibrações mecânicas entre sistemas sensíveis aos efeitos destas e uma base onde tais vibrações estejam presentes. Tal sistema eletromecânico, ao ser colocado entre a base e o sistema o qual se deseja isolar, poderá propiciar não tão somente o isolamento deste sistema, o que corresponde à tarefa de rejeição de distúrbios, como ainda um possível ajuste de seu posicionamento vertical, através do acompanhamento de um sinal de referência. Um projeto de controle que garanta, ao mesmo tempo, boa rejeição de distúrbios e um bom acompanhamento de referência não é um problema com solução trivial, por normalmente apresentar requisitos de projeto contraditórios. O controlador nebuloso proposto demonstra assim, a aplicação de uma técnica de inteligência artificial na solução de um problema onde técnicas de controle linear não propiciam uma solução adequada. Todo conhecimento disponível sobre o sistema e seu comportamento foi utilizado na definição das propriedades operacionais do controlador nebuloso, bem como dos termos nebulosos de cada variável. As funções de pertinência foram então, ajustadas para que se obtivesse um controlador que apresente uma boa relação entre acompanhamento de referência e rejeição de distúrbios dentro de especificações de desempenho previamente estipuladas. Por fim, através de simulação digital, analisou-se o desempenho do sistema com o controlador nebuloso e comprovou-se a eficácia de tal controlador no cumprimento das especificações tanto com respeito à rejeição de distúrbios, quanto no acompanhamento de sinais de referência.

Abstract— In this paper a Takagi-Sugeno-Kang (TSK) fuzzy controller is proposed, which is implemented in an electromechanical system with the objective of improve the reduction of the transmission of mechanical vibrations between a system sensible to the vibrations effects and a baseplate where subjects to these vibrations. This electromechanical system, when placed in the middle of the baseplate and the system which one want to isolate, it can improve so the isolation of the system, it corresponds to disturbances rejection, as it is possible to provide an adjustment of your vertical position, through the tracking of a reference signal. A control design that guarantees, at the same time, good rejection of disturbances and a good tracking is not a problem with trivial solution, because it usually presents contradictory project requirements. For that, the proposed fuzzy controller demonstrates the application of a technique of artificial intelligence in the solution of a problem where techniques of lineal control don't give an appropriate solution. All available knowledge about the system and your behavior were used in the definition of the fuzzy controller's operational properties and the fuzzy terms of each variable. Then, the membership functions were adjusted in way to obtain a controller that presents a good relationship between tracking and disturbances rejection, satisfying performance specifications predetermined. Finally, by digital simulations, the system's performance, with the fuzzy controller, was analyzed and the controller's efficiency, as with respect to tracking as with respect to disturbances rejection was shown.

Keywords— Fuzzy Controller, Disturbance Rejection, Tracking, Isolating of Vibration.

1 Introdução

Quando lidamos com informações, como no caso de modelos matemáticos, ou de qualquer outra natureza, para representação de fenômenos ou sistemas físicos, a incerteza e a imprecisão são aspectos que requerem uma grande atenção, pois estão ligados entre si ao mesmo tempo são opostos. Se buscarmos um modelo mais refinado, diminuindo assim a imprecisão, acabamos por aumentar a incerteza associada ao modelo. Por outro lado, apenas em modelos razoavelmente simples, e conseqüentemente imprecisos, podemos ter níveis reduzidos de incerteza. A teoria dos conjuntos nebulosos foi desenvolvida a partir de 1965 por Lotfi Zadeh, para tratar do aspecto vago da informação (Zadeh, 1965). Por ser menos restritiva esta teoria adequa-se muito bem ao tratamento de informações fornecidas por seres humanos, podendo ser usada na formulação de sistemas baseados em conhecimento.

A teoria dos conjuntos nebulosos quando utilizada em um contexto lógico, como é o caso de sistemas

baseados em conhecimento, é conhecida como lógica nebulosa, lógica difusa ou lógica “fuzzy” (Sandri and Correa, 1999). Devido a sua capacidade de lidar com incertezas e imprecisões a lógica nebulosa tem se caracterizado como uma das tecnologias atuais bem sucedidas para o desenvolvimento de sistemas para controlar processos sofisticados (Driankov *et alii*, 1993; Lee, 1990; Castro, 1995; Dutta, 1993). Controladores que fazem uso desta tecnologia são chamados de controladores nebulosos e possibilitam a utilização de controladores simples para satisfação de requerimentos de projeto complexos, mesmo quando o modelo do sistema a ser controlado apresenta incertezas (Gerra *et alii*, 1997; Chiu and Chand, 1994; Karr and Gentry, 1993). Uma situação onde os requisitos de projeto podem ser considerados de complexidade elevada é quando se exige que um dado sistema apresente boas características tanto no acompanhamento de sinais de referência quanto na rejeição de distúrbios. Em casos assim, quando se usam controladores lineares, é comum que se relaxe determinadas especificações para que se possa cumpri-las. Outro caminho é a utilização de controladores não lineares como é o caso dos controladores nebulosos.

Neste trabalho projetou-se um controlador nebuloso para atuar em um sistema eletromecânico cujo principal objetivo é a redução da transmissibilidade de vibrações entre uma base sujeita a tais vibrações e uma dada carga útil sensível aos seus efeitos. Tal classe de sistemas tem uma vasta faixa de aplicação e tem sido largamente estudado (Oshiro *et alii*, 1997; Jones *et alii*, 1996; Gildin *et alii*, 1997; Slade *et alii*, 1997). No entanto, a grande maioria dos sistemas propostos visam unicamente a eliminação de distúrbios vibratórios, o que poderia ser considerado, do ponto de vista de controle, como fixar uma referência em zero e rejeitar os distúrbios que perturbam o sistema em torno desta referência, no entanto tais projetos por não terem sido feitos considerando-se a possibilidade do acompanhamento de uma referência (diferente de zero), ou apresentam restrições físicas para realização de tal tarefa ou, é bem provável que ainda que haja esta possibilidade, o controlador não apresente bom desempenho em sua realização. Esta é uma das principais vantagens do sistema eletromecânico utilizado, ele possibilita tanto a rejeição de distúrbio quanto o acompanhamento de sinais de referência. A tarefa de rejeitar distúrbios consiste na redução da transmissibilidade das vibrações de base para a carga útil que pode ser um sistema qualquer cujo bom funcionamento, a vida útil e outras características sejam negativamente influenciadas por distúrbios vibratórios. Ao mesmo tempo que busca-se a rejeição destes distúrbios pode ser necessário que a posição da carga útil com relação a um referencial fixo não se mantenha constante (em zero), mas seja variada obedecendo uma certa trajetória. Tal tarefa constitui o acompanhamento de referência. O sistema utilizado, e que será brevemente descrito na próxima seção, tem suas características físicas bem como seu modelo matemático apresentados de forma mais detalhada por Araújo e Yoneyama (2001).

Conforme mencionado anteriormente o sistema utilizado possibilita tanto a rejeição de distúrbios quanto o acompanhamento de sinais de referência, contudo o bom desempenho em ambas as tarefas depende do controlador a ser usado neste sistema. O que se busca neste trabalho é um controlador que consiga propiciar ao sistema um bom desempenho nestas tarefas considerando-se ainda que o sinal de controle gerado deve obedecer às restrições impostas pela saturação do atuador. Como o projeto de controladores lineares com tais requisitos constitui uma tarefa bastante difícil tendendo a acarretar em controladores complexos e ainda assim com desempenho global insatisfatório, foi proposta a utilização de lógica nebulosa para projetar-se um controlador que satisfaça a estes múltiplos requisitos. A grande contribuição deste trabalho é justamente o projeto deste controlador nebuloso, desde a formalização do conhecimento adquirido até então sobre o sistema e sua dinâmica até os últimos ajustes das funções de pertinência do controlador, como está apresentado na seção 3.

As simulações feitas, das quais os resultados mais representativos são apresentados na seção 4, mostram que o controlador projetado satisfaz as especificações de desempenho previamente determinadas para as tarefas estabelecidas. Os resultados são comparados com um controlador clássico apresentado por Araújo e Yoneyama (2001) e ainda um controlador robusto tipo LQG/LTR, demonstrando as vantagens obtidas com o controlador nebuloso.

2 O Sistema Eletromecânico

O sistema eletromecânico a ser controlado, mostrado na Figura 1, consiste de uma alavanca bi-apoiada em sistema dotados de rigidez e amortecimento. O apoio central conta ainda com um servoposicionador que atua sobre o sistema provendo deslocamentos verticais que são usados para cancelar as vibrações provenientes da base, isolando a carga útil que está apoiada na extremidade livre da alavanca.

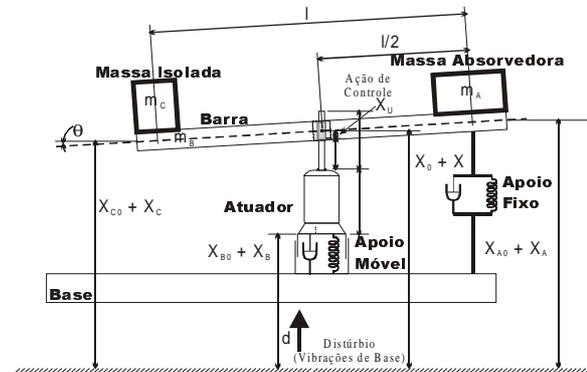


Figura 1. O Sistema Eletromecânico.

2.3 Modelo Linear

O modelo dinâmico linear para este sistema pode ser dividido em dois sub-modelos SISO (“Single-Input/Single-Output”). O primeiro, apresentado na equação (1), representa a relação entre a referência e a posição da carga útil.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_R &= \mathbf{A}_R \mathbf{x}_R + \mathbf{B}_R \mathbf{u}_R \\ Y_R &= \mathbf{C}_R \mathbf{x}_R \end{aligned} \quad (1)$$

O segundo sub-modelo, mostrado na equação (2), representa a relação entre os distúrbios, que são as vibrações provenientes da base, e a posição da carga útil, que é a saída do sistema.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_D &= \mathbf{A}_D \mathbf{x}_D + \mathbf{B}_D \mathbf{u}_D \\ Y_D &= \mathbf{C}_D \mathbf{x}_D \end{aligned} \quad (2)$$

As matrizes das equações (1) e (2) são descritas, e os valores de seus elementos são apresentados, em Araújo e Yoneyama (2001).

3 Projeto do Controlador Nebuloso

3.1 Especificações de Desempenho

Como foi apresentado por Araújo e Yoneyama (2001), este sistema em malha fechada, sem compensador, apresenta uma resposta claramente caracterizada por dois modos principais. O primeiro, cuja influência é mais forte é mais lento, e o segundo, apesar de mais rápido, exerce uma menor influência sobre a dinâmica do sistema. Com isso, o sistema apresenta uma resposta lenta, com um tempo de acomodação, para uma faixa de $\pm 5,0\%$ da referência, de 12,6 segundos. O tempo de subida de 0 a 100% é de 22,9 segundos. Ainda que não apresente sobre sinal esta resposta não pode ser considerada satisfatória para a grande maioria das aplicações práticas a que este tipo de sistema se propõe.

Com o controlador nebuloso objetiva-se atingir um resultado superior àquele apresentado por Araújo e Yoneyama (2001) com respeito a acompanhamento de sinais de referência. E ainda, boas rejeição de distúrbios e robustez, tudo isso respeitando os limites de saturação do servo atuador. De forma numérica, podemos expressar estas especificações como:

- Um sinal de referência tipo degrau com amplitude de até 10cm (0,1m), deve ser acompanhado sem erro de regime, com tempo de acomodação (para $\pm 5,0\%$) inferior a 1,0s e com um máximo sobre sinal percentual inferior a 5,0%.
- Um distúrbio, também tipo degrau, com amplitude de até 1cm (0,01m), deve ser rejeitado sem erro de regime, considerando-se um nível de referência fixo em zero, e reduzido a um nível inferior a 5,0% da amplitude do distúrbio em menos de 0,5s. O máximo deslocamento medido na saída do sistema não deve ser maior que 20,0% da amplitude do distúrbio.
- O sistema deve ser capaz de lidar simultaneamente com as tarefas de acompanhamento de sinal e rejeição de distúrbios. Para tanto, deve ser capaz de satisfazer as primeiras especificações mesmo na presença de qualquer tipo de distúrbio.
- O sistema deve ainda apresentar robustez com relação a estabilidade e desempenho para variações de até 50% na massa da carga útil.
- Por fim, O sinal de controle gerado pelo controlador nebuloso não deve ultrapassar os limites de saturação do servoatuador que são de $\pm 12,0v$.

3.2 O Controlador

Segundo Sandri (1999)(ver também Guerra, 1998) podemos descrever, de forma sucinta, as etapas de projeto de um controlador nebuloso como:

1. Definição das propriedades operacionais do controlador nebuloso (Modelo, Operadores, etc.) a partir de todo o conhecimento disponível;
2. Definição dos termos nebulosos de cada variável;

3. Definição do comportamento do controle, que envolve a descrição das regras que atrelam as variáveis de entrada às saídas do controlador.

3.2.1 Definição das propriedades operacionais

Todo o conhecimento disponível sobre o sistema que se deseja controlar é de fundamental importância para esta etapa inicial do projeto. Conhecer as características geométricas, a dinâmica e qualquer particularidade do sistema pode reduzir sensivelmente o esforço de projeto.

A partir dos conhecimentos adquiridos em etapas anteriores desta pesquisa, durante a modelagem do sistema bem como durante o projeto de alguns controladores lineares, optou-se pela seguinte estrutura para o controlador nebuloso:

- Duas entradas, que são: o erro (diferença entre a referência e a saída do sistema) e sua derivada;
- Uma saída, que é a tensão que alimenta o servoatuador;
- As variáveis lingüísticas, bem como suas funções de pertinência foram definidas, como vemos com mais detalhes na seção 0, a partir da observação e da análise do comportamento do sistema sob ação de controladores lineares.
- Os operadores, t-norma e t-conorma, escolhidos foram do tipo probabilístico. Este método apresenta resultados intermediários, entre o método de Zadeh e o método de Lukasiewicz, ao realizar as operações de união e intersecção;
- A base de regras, detalhada na seção 0, foi definida a partir do conhecimento adquirido pela observação da relação entre o erro, sua derivada e o sinal de controle gerado por alguns controladores lineares anteriormente projetados, com e sem saturação. Acrescentou-se ao resultado destas observações algumas outras noções, provenientes da experiência do projetista, de como deveria ser o sinal de controle para que o sistema respondesse de acordo com as especificações;
- Para o procedimento de inferência optou-se pela utilização de um modelo de interpolação do tipo Takagi-Sugeno-Kang. Modelos do tipo Mandani também foram testados, no entanto os modelos TSK apresentaram uma maior facilidade para o ajuste das funções de pertinência da variável de saída com base no conhecimento acumulado sobre o sistema;
- Por fim, para “defuzificação”, que corresponde a obter uma única ação de controle precisa, a partir do conjunto nebulosos obtido durante a inferência, como se sabe controladores nebulosos do tipo interpolação, como é o caso do TSK, não necessitam de “defuzificação”, pois já se obtém diretamente as ações precisas de controle através da soma ou da ponderação das funções de pertinência de saída.

3.2.2 Variáveis Linguísticas e Funções de Pertinência

Uma vez determinadas as variáveis de entrada e de saída do controlador, o próximo passo foi a determinação de termos nebulosos para cada uma delas e a escolha de funções de pertinência, seguida do ajuste de seus parâmetros, para cada termo.

Diversas simulações, com vários controladores, foram feitas no intuito de analisarmos o comportamento do erro ($e(t)$), de sua derivada ($de(t)/dt$) e do sinal de controle gerado. Na Figura 2 podemos ver o resultado de uma destas simulações, onde foi usado um controlador PD para acompanhar uma referência tipo degrau. Na Figura 3 foi analisado o comportamento destas variáveis ao utilizar-se um controlador robusto para rejeitar um distúrbio tipo senoidal.

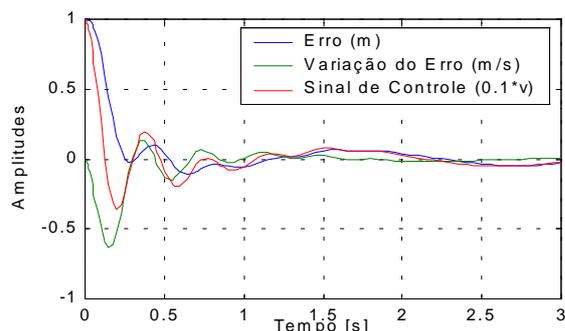


Figura 2 – Análise da relação entre o erro, sua derivada e o sinal de controle gerado por um controlador tipo PD.

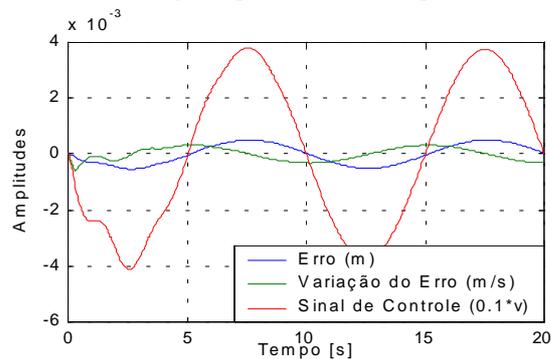


Figura 3 – Análise da relação entre o erro, sua derivada e o sinal de controle gerado por um controlador robusto tipo LQG/LTR.

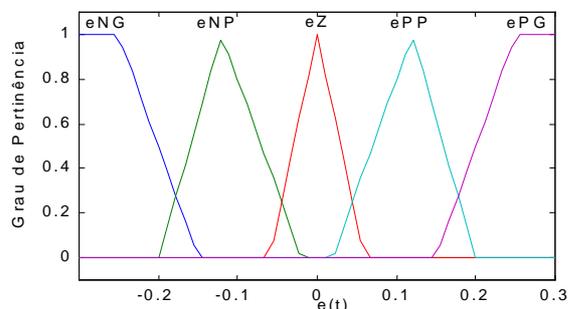


Figura 4 – Funções de Pertinência da entrada 'erro'.

Baseados nestas diversas simulações definiu-se a faixa de discurso das duas variáveis de entrada e cinco termos nebulosos para cada uma (negativo grande, negativo pequeno, zero, positivo pequeno e positivo grande) com funções de pertinência triangu-

lares distribuídas sobre a faixa de discurso (Figura 4 para o erro e Figura 5 para sua derivada), lembrando que vários autores aconselham que haja uma superposição parcial entre os conjuntos nebulosos, representados pelas funções de pertinência, para garantir-se suavidade e estabilidade.

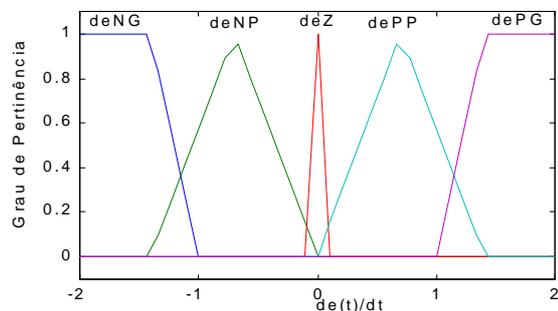


Figura 5 – Funções de pertinência da variável 'derivada do erro'.

Tabela 1 – Funções de saída.

Nome da Função	Parâmetros
SatP	12
SatN	-12
Linear	[100 10 0]
A_Fino	[100 100 0]

Para saída do controlador utilizou-se quatro funções de pertinência do tipo TSK, duas constantes e duas de primeira ordem conforme apresentado na Tabela 1.

3.2.3 A base de regras

É interessante notar que um controlador TSK implementado desta forma, pode ter seu funcionamento comparado à ação de interpolar-se a saída de vários controladores PD. Um controlador PD, como o que gerou os resultados da Figura 2, apresenta uma superfície de controle na forma de um plano inclinado. Impondo-se saturação, esta superfície deforma-se para for da Figura 6.

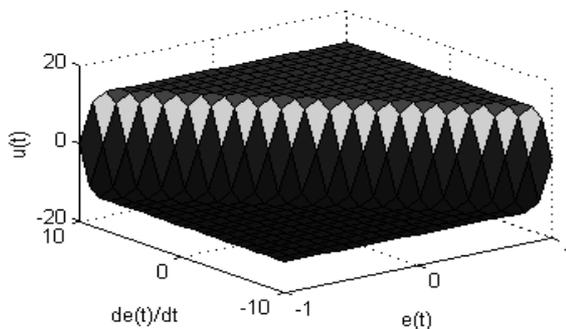


Figura 6 – Superfície de controle gerada por um controlador PD com saturação do controle em $\pm 12,0$ volts.

Somando-se a esta breve análise do comportamento de controladores PD, todo o conhecimento até então obtido sobre o sistema, formulou-se as seguintes regras.

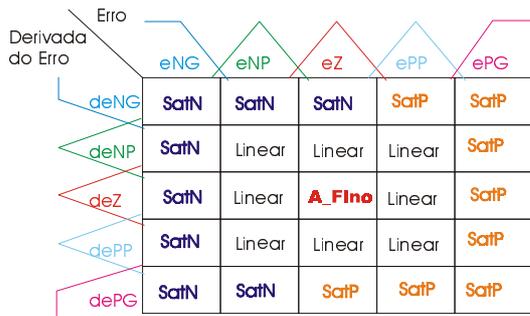


Figura 7 – Regras para inferência no controlador nebuloso.

4 Resultados das Simulações

O sistema eletromecânico com o controlador nebuloso conseguiu satisfazer as especificações apresentadas na seção 3.1. Com relação ao acompanhamento de sinais de referência, para um degrau com amplitude de 10cm (0,1m) obteve-se uma resposta praticamente superamortecida e com erro de regime desprezível. Tal resultado foi obtido com um sinal de controle suave e dentro da faixa de saturação do atuador mesmo na presença de distúrbios, como se pode ver na Figura 8, que mostra a resposta do sistema no acompanhamento de uma referência do tipo degrau na presença de um distúrbio aleatório.

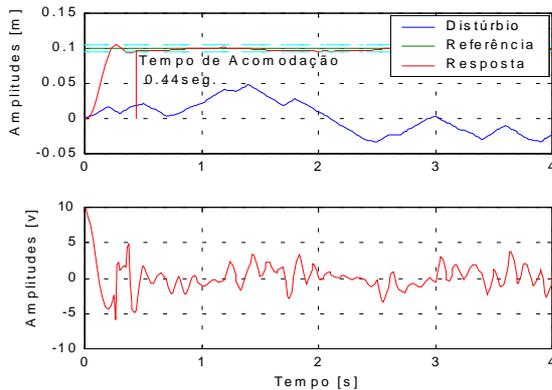


Figura 8 – Acomp. de um degrau na presença de distúrbio.

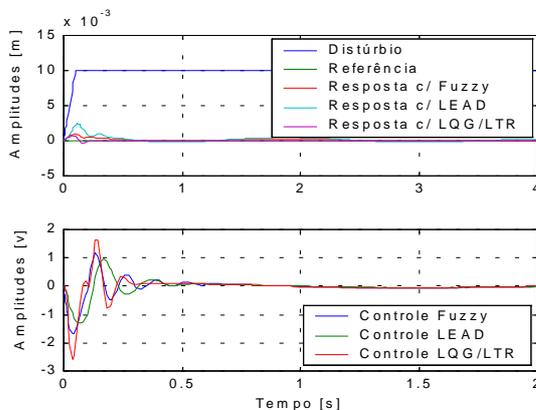


Figura 9 – Comparação de desempenho na rejeição de distúrbios.

A Figura 9 mostra respostas do sistema submetido a um distúrbio do tipo degrau, sob atuação de três controladores, o controlador nebuloso aqui projetado, o controlador de avanço de fase apresentado por

Araújo e Yoneyama (2001) e um controlador robusto do tipo LQG/LTR. Os dois últimos foram projetados com o objetivo principal da rejeição de distúrbios, de forma que se pode notar um certo equilíbrio entre o desempenho do sistema com os três controladores. O controlador nebuloso apresenta um desempenho intermediário comparando-se com os outros dois, podendo-se dizer que o LQG/LTR apresenta uma rejeição maior do distúrbio.

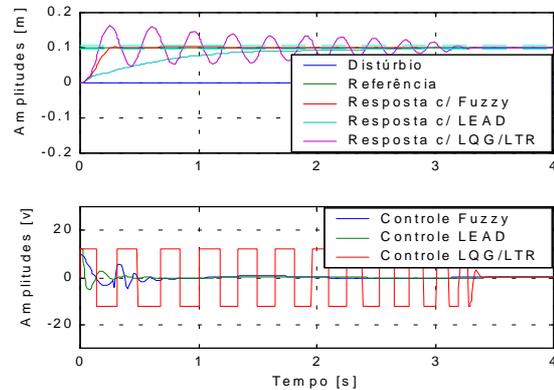


Figura 10 – Comparação de desempenho em acomp. de referência.

A dificuldade que os controladores lineares têm em desempenhar múltiplas tarefas fica evidente quando se analisa a Figura 10. Submetendo o sistema a uma saturação de $\pm 12,0$ volts no sinal de controle, correspondente a saturação do servomotor, nota-se claramente a superioridade do controlador nebuloso no acompanhamento de referência. Para que tivesse um bom desempenho na rejeição de distúrbios os controladores lineares foram projetados de forma que para acompanhar referência eles geram um sinal de controle muito maior que o limite de saturação do atuador. Tal característica é mais acentuada no LQG/LTR do que no controlador por avanço de fase, mas ambos apresentam uma resposta muito ruim no acompanhamento de referência.

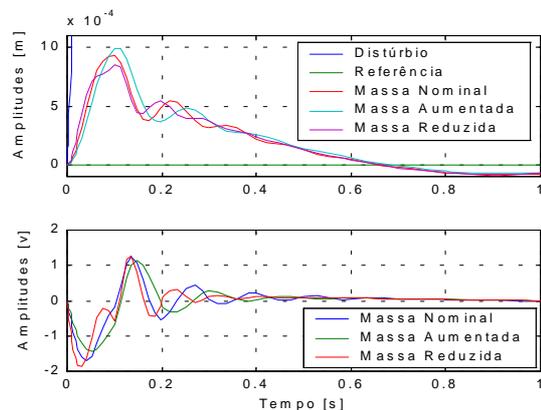


Figura 11 – Robustez do controlador nebuloso.

Por fim, na Figura 11, pode-se atestar a robustez do sistema com o controlador nebuloso, a variações de até 50% na massa da carga útil que é outra das especificações.

5 Conclusões

Um modelo linear do sistema eletromecânico para isolamento de vibrações mecânicas através da redução da transmissibilidade destas vibrações entre uma base e uma carga útil, apresentado por Araújo e Yoneyama (2001), foi utilizado como planta para o projeto de um controlador nebuloso. O sistema em questão apresenta a possibilidade executar simultaneamente as tarefas de rejeição de distúrbios e acompanhamento de sinais de referência. Para tanto foi necessário projetar-se um controlador capaz de satisfazer múltiplos requisitos, característica que aumenta consideravelmente o esforço de projeto e a complexidade do controlador resultante no caso de controladores lineares. A técnica de inteligência artificial conhecida por lógica nebulosa foi empregada com sucesso no projeto de um controlador nebuloso, que apesar de ser não linear tem uma arquitetura simples e de fácil implementação prática.

O controlador projetado conseguiu satisfazer os múltiplos requisitos de projeto, apresentando boas rejeição de distúrbios e acompanhamento de sinais de referência com sinais de controle suaves e dentro da faixa de saturação do atuador. O sistema com o controlador nebuloso mostrou ainda, ser robusto a significativas variações na massa da carga útil.

Quando comparado com um controlador de avanço de fase e outro robusto, tipo LQG/LTR, o controlador nebuloso apresentar um desempenho satisfatório nas diversas situações simuladas. Nas situações mais favoráveis aos outros controladores o controlador nebuloso conseguiu propiciar ao sistema um desempenho próximo do melhor desempenho dos outros controladores e nas demais situações ele mostrou-se muito superior.

Desta forma consideram-se alcançados os objetivos estipulados para este trabalho, vislumbrando-se como continuidade desta pesquisa a capacitação do controlador a receber treinamento para adaptação “on line” de seu comportamento, possibilitando-se com isso a utilização de uma sistema supervisor que gerencie o funcionamento do controlador.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP pelo suporte financeiro prestado através do processo 99/02409-4.

Referências Bibliográficas

- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Fuzzy Sets, Information and control*, 8, pp. 338–353.
- Driankov, D.; Hellendoorn, H. and Reinfrank, M. (1993). *An Introduction to Fuzzy Control*. Springer-Verlag.
- Lee, C.C. (1990). Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller (part i). *IEEE Trans. on*

Systems, Man and Cybernetics. 20(2). pp.404-418.

- Castro, J.L. (1995). Fuzzy logic controllers are universal approximators. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*. 25(4). Pp.629-635.
- Dutta, S. (1993). Fuzzy logic applications: Technological and strategic issues. *IEEE Trans. on Engineering Management*. 40(3). pp.237-254.
- Guerra, R.; Sandri, S.A. and M.L.O.S (1997), Controle de atitude autônomo de satélites usando lógica nebulosa. *Anais do SBAI'97*. pp.337-342.
- Chiu, S. and Chand, S. (1994). *Adaptive traffic signal control using fuzzy logic*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York.
- Karr, C.L. and Gentry, E.J. (1993). Fuzzy control of Ph using genetic algorithms. *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*. 1(1). pp.46-53.
- Oshiro, O. T., Trindade Júnior, O., e Porto, A. J. V. (1997) Controlador de Máquinas – Ferramentas de Ultraprecisão. *Anais em CD-ROM do XIV COBEM*. Bauru, São Paulo.
- Jones, D. I., Owens, A. R. and Owen, R. G. (1996). A Control System for a Microgravity Isolation Mount. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 4, nº 4, pp.313-325.
- Gildin, E., Moscato, L. A., e Gonzalez-Lima, R. (1997). Desenvolvimento de um Controlador Adaptativo Para Manipuladores Flexíveis com Incertezas de Cargas. *Anais em CD-ROM do XIV COBEM*. Bauru, São Paulo.
- Slade, A. P., Hewit, J. R., Cuschieri, A. and Frank, T. (1997). An Integrated Control Structure For Surgical Assist Robotics For Laparoscopy. *Anais em CD-ROM do XIV COBEM*. Bauru, São Paulo.
- Araújo, F.M.U e Yoneyma, T. (2001). Modelamento e Controle de um Dispositivo Eletromecânico Para Controle Ativo de Vibrações. *Anais do II SNCA*. Salvador. Bahia.
- Sandri, S.A. (1999). Lógica Nebulosa. *V Escola de Rede Neurais*. pp.c073-c090. São José dos Campos. São Paulo.
- Guerra, R. (1998). *Projeto e simulação do controle de atitude autônomo de satélites usando lógica nebulosa*. Master's Thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos. São Paulo.