

Controle fuzzy aplicado a sistemas mecânicos

Fuzzy control applied to mechanical systems

RESUMO

Alexandre Mitsuo Mada
mitsuomada82@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Cornélio Procopio,
Paraná, Brasil

Edson Hideki Koroishi
edsonh@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Cornélio Procopio,
Paraná, Brasil

O trabalho realizado tem como principal objetivo a análise do controle ativo de vibração em uma estrutura massa-mola-amortecedor com 2 graus de liberdade através de atuadores eletromagnéticos. O projeto consiste na comparação e na validação dos resultados teóricos através dos resultados experimentais. Os controladores foram projetados e em conjunto com os atuadores eletromagnéticos, o controle ativo de vibrações foi aplicado na bancada de 2 graus de liberdade. Os controles projetados para tais objetivos, foram o controle de Acker e o controle Fuzzy, utilizados para fins de validação e comparação. Entre os controladores, foram analisados as porcentagens das atenuações em diferentes níveis de ganho para o controlador e as correntes necessárias para tal controle. Os resultados foram analisados através de simulações numéricas e validados experimentalmente, demonstrando a eficácia dos controladores.

PALAVRAS-CHAVE: Controle de vibrações, Acker, Fuzzy.

ABSTRACT

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



The work carried out has as main objective the analysis of the active vibration control in a mass-spring-damper structure with 2 freedom handles through electromagnetic actuators. The project consists in the comparison and validation of theoretical results through experimental results. The controllers were designed, and together with the electromagnetic actuators, the active vibration control was applied to the 2 degree of freedom bench. The controls designed for such purposes were the Acker control and the Fuzzy control, used for purposes of validation and comparison. Among the controllers, the percentages of attenuations at different levels of gain for the controller and the currents necessary for such control were analyzed. The results were analyzed using numerical simulations and validated experimentally, demonstrating the effectiveness of the controllers.

KEYWORDS: Vibration control, Acker, Fuzzy.



INTRODUÇÃO

O conhecimento e o estudo da vibração em sistema mecânicos se mostram cada vez mais importantes nos tempos modernos à medida que as empresas buscam melhorar a eficiência e a durabilidade de seus equipamentos. Diante disso, segundo Borges (2016), o controle de vibrações se torna essencial para diversas áreas, pois as vibrações indesejadas causam uma série de problemas que vão desde um simples desconforto ou até mesmo em uma falha que pode afetar a segurança do usuário.

Ao longo dos anos, foram desenvolvidos vários métodos distintos com a finalidade de controlar diferentes níveis de vibrações em diversas máquinas e estruturas mecânicas. Dentre elas podemos destacar o Controle Ativo de Vibrações (AVC- do inglês *Active Vibration Control*), que normalmente é constituído por sensores, atuadores e por uma unidade de controle (Queiroz, 2007).

Dentre os métodos de controle ativo está o controle modal. Essa técnica utiliza-se de um modelo numérico reduzido, ou seja, utiliza-se de um número limitado de modos para representar comportamento dinâmico da estrutura (Koroishi, 2013).

No presente trabalho, foram empregadas técnicas de modelagem e simulação numérica com aplicação do Controle Ativo de Vibrações, utilizando a Lógica Fuzzy afim de reduzir o nível de vibração de uma mesa de 2 graus de liberdade.

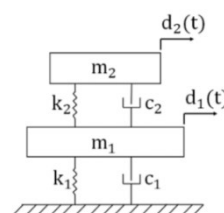
MATERIAIS E MÉTODOS

SISTEMA DE 2 GRUS DE LIBERDADE

De acordo com Rao (2008), graus de liberdade são as coordenadas independentes necessárias para determinar as posições de um sistema em qualquer instante de tempo.

O sistema de 2 graus de liberdades estudado é composto por duas massas de valores m_1 e m_2 , duas molas com constantes de rigidez k_1 e k_2 e dois amortecedores com constantes de amortecimento c_1 e c_2 , assim como ilustrado na figura abaixo.

Figura 1- Modelo esquemático do sistema



Fonte: Repinaldo (2018).

Tabela 1- Parâmetros da Estrutura.

Parâmetros	Valor
Massa (m_1)	4,38262 Kg
Massa (m_2)	1,93959 Kg
Rigidez (k_1)	$2,1506 \times 10^{+04}$ N/m
Rigidez (k_2)	$1,4740 \times 10^{+04}$ N/m
Amortecimento (c_1)	14,4314 N.s/m
Amortecimento (c_2)	$3,1817 \times 10^{-08}$ N.s/m

Fonte: Repinaldo (2018).

Para a representação da mesa de 2 GDL, faz-se a representação do modelo físico para o modelo matemático conforme a equação (1):

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{d}_1 \\ \ddot{d}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Resumindo a fórmula matricial:

$$[M] \{\ddot{\delta}\} + [C_o] \{\dot{\delta}\} + [K] \{\delta\} = \{F\} \quad (2)$$

TRANSFORMAÇÃO MODAL

Ao aplicar a transformação modal, a equação diferencial acoplada se torna n equações diferenciais desacopladas, o que facilita a análise da dinâmica do sistema.

$$\{\delta\} = [\phi] \{\rho\} \quad (3)$$

$$[M] [\phi] [\phi]^T \{\ddot{\rho}\} + [\phi]^T [C_o] [\phi] \{\dot{\rho}\} + [\phi]^T [K] \{\rho\} = [\phi]^T \{F\} \quad (4)$$

$$[M'] \{\ddot{\rho}\} + [C_o'] \{\dot{\rho}\} + [K'] \{\rho\} = \{F'\} \quad (5)$$

REPRESENTAÇÃO EM ESPAÇO DE ESTADOS

Os sistemas complexos podem possuir múltiplas entradas e saídas, podendo ou não ser variantes no tempo. Portanto, para o projeto de controladores a modelagem por espaço de estados é essencial, já que os ganhos do controlador são calculados a partir de matrizes (Ogata, 2010).

$$\begin{Bmatrix} \dot{\chi}_1 \\ \dot{\chi}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C_oJ] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} [0] \\ [M]^{-1} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Simplificando,

$$\{\dot{\chi}\} = [A]\{\chi\} + [B]\{F\} + [B_c]\{F_c\} \quad (7)$$

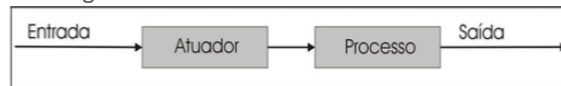
$$\{y\} = [C]\{\chi\} \quad (8)$$

Onde $[A]$ é a matriz de estados, $[B]$ é a matriz de entrada da força de excitação, $[B_c]$ é a matriz de entrada da força de controle caso possuir um e $[C]$ é a matriz de saída.

SISTEMA DE CONTROLE

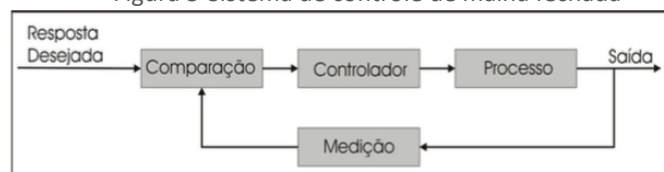
Os sistemas de controle estão separados em dois tipos: os sistemas de controle de malha aberta e os sistemas de controle de malha fechada conforme apresentados pelas figuras (2) e (3).

Figura 2- Sistema de controle de malha aberta.



Fonte: Koroishi (2013).

Figura 3-Sistema de controle de malha fechada



Fonte: Koroishi (2013).

Diversos controladores em sistemas de malha fechada são empregados nas indústrias, uma delas é o controlador Fuzzy.

ALOCAÇÃO DE POLOS

Para o projeto de um controlador por Alocação de Polos em Espaço de Estados, é desejável que o sistema seja totalmente controlável. Segundo Ogata (2010), os polos de malha fechada do sistema poderão ser alocados em qualquer localização desejada, através da realimentação de estados e da utilização de uma matriz de ganho $[G]$ correspondente.

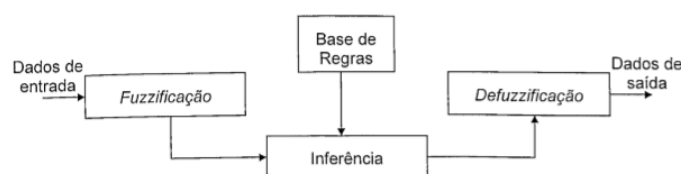
Uma das formas conhecidas para a determinação da matriz de ganho $[G]$ de realimentação de estado, é através da formula de Ackerman.

No MATLAB, o problema é resolvido utilizando o comando *acker.m*.

LÓGICA FUZZY

Um sistema de controle *Fuzzy* consiste na realimentação da central do sistema afim de obter a resposta desejada, para isso ela é composta pelas seguintes etapas: fuzzificação, base de regras, sistema de inferência e defuzzificação.

Figura 4-Controlador Fuzzy com seus componentes básicos



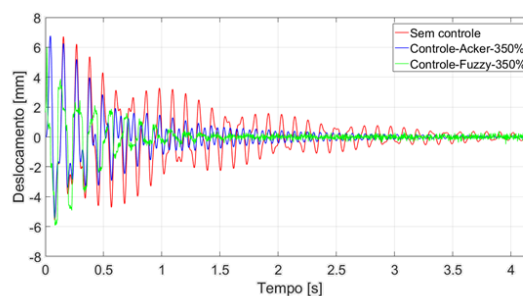
Fonte: Nuñez (2001).

Na fuzzificação, um conjunto de valores reais é processado em um sistema usando a lógica fuzzy. A base de regras contém as informações a respeito das funções de pertinência de todas as variáveis envolvidas no sistema. O mecanismo de inferência consiste em analisar os dados e assim tomar uma decisão. Os dois mecanismos de inferências Fuzzy mais conhecidos são: Mandami e o Takagi-Sugeno. Na defuzzificação, o valor da variável linguística de saída do conjunto Fuzzy é transformado em uma saída numérica.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de analisar a eficiência do controle Fuzzy na mesa de 2 GDL, foram realizadas simulações com diferentes valores de amortecimento no sistema estudado. Para isso, por meio do auxílio do *software* MATLAB®, foi elaborado um programa para a simulação numérica computacional da mesa de 2 GDL e o modelo de controle.

Figura 5- Deslocamento numérico controlador Acker x Fuzzy.



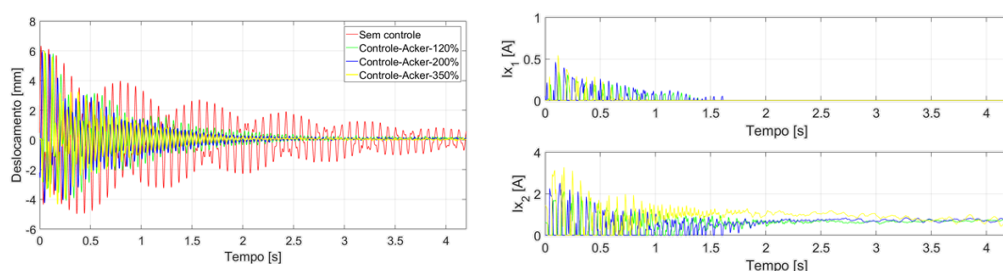
Fonte: Autoria própria (2019).

Após modelados os controladores, foram realizados os testes referentes ao controle tipo Acker e para o controle *Fuzzy*. Em seguida os dados obtidos foram analisados e coletados, com vários valores de amortecimento para analisar os controles. Assim para fins de visualização e comparação são apresentadas três análises com diferentes valores de amortecimento que representam os resultados obtidos.

CONTROLE ACKER

Os resultados utilizando o Controle Acker são apresentados pelas Figuras 6

Figura 6- Dados experimental controlador -Acker

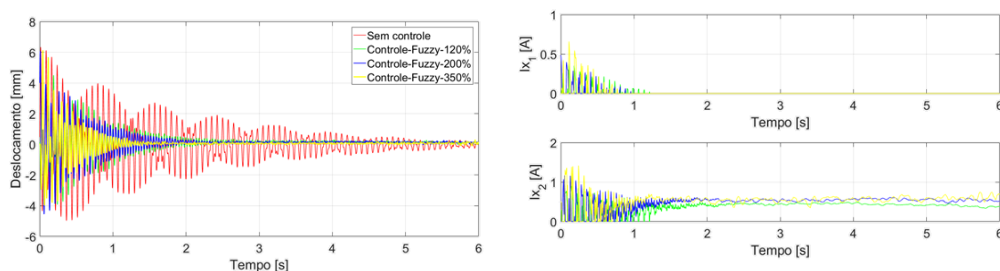


Fonte: Autoria própria (2019).

CONTROLE FUZZY

Os resultados utilizando o Controle *Fuzzy* são apresentados pelas Figura 7.

Figura 7- Dados experimental – Controle *Fuzzy*.



Fonte: Autoria própria (2019).

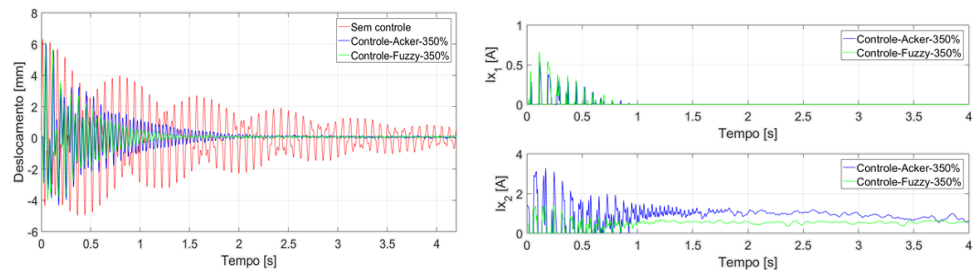
Tabela 2- Resultados experimentais

Controlador	Desloc. Máximo [mm]	Tempo pra estabilizar [s]	Corente máxima [A]
Acker 120%	5,94	3,02	2,145
Acker 200%	5,96	2,79	2,515
Acker 350%	5,98	2,19	3,243
Fuzzy 120%	5,03	2,80	0,849
Fuzzy 200%	5,95	2,52	1,160
Fuzzy 350%	5,89	1,65	1,386

Fonte: Autoria própria (2019).

Para fins de comparação, os dados referentes ao amortecimento de 350% dos controles Acker e *Fuzzy* se encontram nas Figura 8.

Figura 8- Dados experimental - Acker x *Fuzzy*.



Fonte: Autoria própria (2019).

Pelos dados apresentados na Tabela 2, é possível notar nitidamente a maior eficiência do controle *Fuzzy* para estabilizar o sistema, enquanto o controle Acker leva em torno de 2,2s, o controle *Fuzzy* leva menos de 1,7s. Em termos de corrente elétrica, observa-se que no controle *Fuzzy* são menores, o que demonstra que este controle é mais eficiente em relação a corrente que o controle Acker.

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar a eficiência do controle *Fuzzy* para atenuações de vibrações aplicado em uma mesa de 2 GDL. Nele foi possível ver a importância de um sistema de controle para atenuações de vibrações em um sistema mecânico.

Assim com o auxílio da bancada experimental foi possível analisar o comportamento do sistema de 2 GDL em relação aos controladores e também validar os resultados simulados, assim conclui-se que a simulação é válida e o controle *Fuzzy* se demonstra ser eficiente para um sistema mecânico.

De modo geral, pode-se concluir que a metodologia proposta e as ferramentas utilizadas, apresentaram resultados satisfatórios, tornando possível sua utilização para melhorar o desempenho de controle ativo de vibrações em estruturas mecânicas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio e suporte fornecido para o desenvolvimento do presente trabalho. O primeiro autor agradece também ao seu orientador Prof. Dr. Edson Hideki Koroishi, por sua sabedoria e paciência para passar todos os ensinamentos durante a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BORGES, A. S. **Controle modal de rotores com mancais magnéticos-projeto robusto**. 2016. Tese (Doutorado)- Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016, 173f.

KOROISHI, E. H. **Controle de vibrações em máquinas rotativas utilizando atuadores eletromagnéticos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013, 221 f.

NUÑEZ, I. J. C. **O uso de controladores fuzzy adaptativos, implementados em microcontroladores, no controle de vibrações de sistemas mecânicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia-UFU, Uberlândia, 2001, 90f.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

QUEIROZ, E. M. **Controle ativo de vibrações em máquinas-ferramentas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007, 179f.

RAO, S. S. **Vibrações mecânicas**. —São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

REPINALDO, J. P. **Controle modal aplicado a uma estrutura de 2 graus de liberdade utilizando atuadores eletromagnéticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, 2018, 128 f.