

Lógica Difusa Aplicada ao Controle Ativo de um Combustor do Tipo Tubo de Rijke

Cesar Augusto Botura¹, Galdenoro Botura Jr.², João Andrade de Carvalho Jr.²,
Leonardo Mesquita², Marco A. Ferreira¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Rodovia Presidente Dutra, km 40
Cachoeira Paulista – SP
CEP 12630-000

² UNESP-Campus de Guaratinguetá
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333
Guaratinguetá – SP
CEP 12500-000

E-mails: cesar@yabae.cptec.inpe.br, botura@feg.unesp.br, joao@feg.unesp.br,
mesquita@feg.unesp.br, marco@tupi.lcp.inpe.br

Abstract

The present work describes the study and the development of a control system using fuzzy logic for active control of a Rijke tube type pulse combustor installed at National Institute of Space Research, in Cachoeira Paulista, SP, Brazil.

A study on the existing control types for pulse combustion was conducted. A simulation model for the Rijke tube, based on the Matlab and Simulink programs, was proposed. Specific program blocks were developed for this study. A control diagram was developed for the control system.

The membership functions and the inference rules of the fuzzy controller were developed. The results have shown that the controller converges in 0.2 s, for a processing delay time of 2 ms, and in 0.8 s for a processing delay time of 4 ms, from the starting pulse.

1. Introdução

1.1. Instabilidade de combustão

Em muitos processos práticos de combustão são observadas ondas acústica de pressão estacionárias. Essas oscilações de pressão, que estão geralmente acopladas com a liberação de calor, são conhecidas como instabilidades de combustão. Dependendo da aplicação, instabilidades de combustão podem produzir tanto resultados benéficos, como uma maior transferência de calor para propósitos residenciais, ou catastróficos, como falhas do combustor em jatos ou motores de foguete. Esse tipo de combustão, onde

ocorre essa instabilidade, é também conhecida como *combustão pulsante*. Alguns benefícios da combustão pulsante incluem melhora da mistura de combustível e oxidante, maior transferência de calor aos arredores, reações em mais altas temperaturas, e combustão mais eficiente, levando, na maioria dos casos, a baixar as emissões e a significativa economia de combustível [1]. Um combustor que permite a queima e o estudo das oscilações é conhecido como tubo de Rijke (figura 1).

O tubo de Rijke proporciona uma das mais simples manifestações de oscilações acústicas termicamente geradas. Ele consiste de um tubo vertical com uma fonte de calor colocada em sua metade inferior. Esse fenômeno foi descoberto e descrito por Rijke de Leonard de Pieter em 1859.

Uma importante vertente das pesquisas voltadas para o estudo da combustão se centra ao redor da instabilidade da combustão, suas influências e os mecanismos para sua atenuação. Para atenuar essas instabilidades vários esquemas de controle foram desenvolvidos. Os mais práticos e bem sucedidos foram aqueles baseados no princípio de uma realimentação para produzir o sinal de controle. O controle é realizado gerando uma onda de pressão defasada exatamente 180 graus da onda de pressão interna ao tubo. Para implementar esse tipo de controle é necessário conhecer o valor da onda de pressão existente e o usar como uma entrada para o controlador na malha de realimentação.

Um algoritmo baseado em malha de realimentação foi desenvolvido e usado, por Heckl [2]. Em seu estudo, encontrou resultados que mostram uma diminuição nas oscilações das chamas guiadas por mais de 40 dB. Poinot et al [3], por sua vez, têm usado o conceito de interferência destrutiva e realimentação para suprimir as

instabilidades verificadas. Em um combustor turbulento de 250 kW verificaram uma redução no nível de pressão do som de mais de 20 dB. Em [4], os autores apresentam diversos estudos que usam sistemas de malha aberta, malha fechada e mecanismos de controle adaptativos para controlar instabilidades de combustão por atenuação da onda acústica. Nesses estudos a obtenção da estabilização do sinal de pressão foi o objetivo, mas pouco é encontrado na literatura quando se deseja que o controle ativo seja usado para estudar sistemas práticos de combustão, influenciados por um campo acústico de amplitude e frequência controladas.

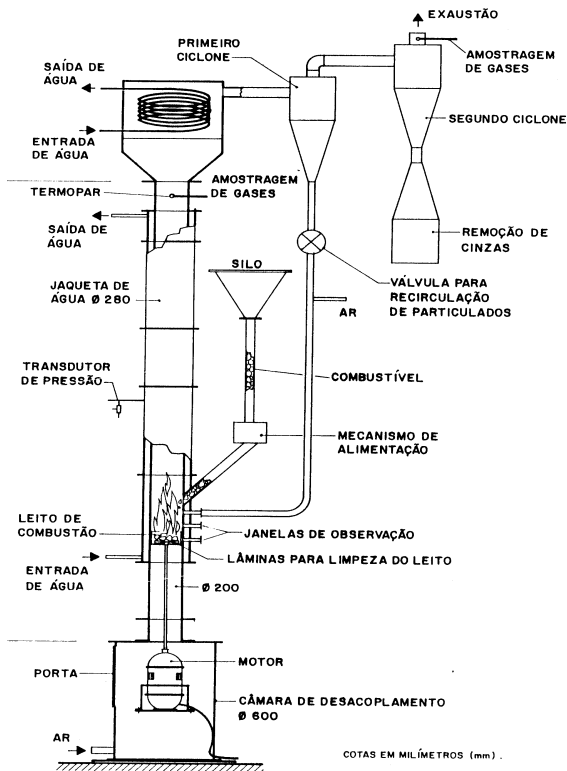


Figura 1: Combustor tipo tubo de Rijke. Versão adaptada para queima de turfa peletizada.

Um sistema prático para o estudo do controle da combustão pode ser montado fazendo uso de um computador e de um sistema de aquisição e processamento de dados. Através deste sistema consegue-se definir uma pressão interna ao tubo e fazer com que o tubo oscile, nesse valor pré estabelecido. A vantagem é que se consegue eliminar a indefinição do valor de sua pressão inicial, problema este inerente a este tipo de combustor, onde, uma vez que uma dada pressão esteja estabelecida no interior do tubo, não se consegue mais mudá-la sem o uso de um controle ativo. Deste modo, este tipo de controle é fundamental para se conseguir a realização de testes e estudos onde existe a necessidade da ocorrência da repetibilidade [5]. Neste trabalho está proposto o uso da lógica difusa como mecanismo de controle da onda de pressão interna a um tubo de Rijke.

1.2. Métodos de controle de instabilidade de combustão

Fundamentalmente existem dois métodos de controle para modificar a onda acústica no interior de um combustor do tipo tubo de Rijke [6]. O primeiro método é a modulação direta do campo de pressão acústica pelo meio de alto-falantes. Esse método é chamado de controle direto. O segundo método usa modulação de combustível para modificar o campo acústico indiretamente através do processo de liberação de calor na qual afeta o campo de fluxo no reator e em consequência afeta o campo de pressão. No presente trabalho será utilizado o controle direto, pois esse método propicia a fácil alteração da posição dos alto-falantes e da frequência de trabalho.

Uma das características que influenciam este tipo de controle são os modos de oscilação do tubo de Rijke. A sua frequência natural de oscilação pode ser encontrada a partir do modelo matemático para o campo acústico proposto por Carvalho et al [7] e Carvalho [8].

Os modos de pressão associados com a frequência de oscilação podem ser ativamente controlados induzindo uma onda de pressão via alto-falantes para atenuar ou aumentar a pressão existente internamente no sistema. Assim, no controle direto do campo de pressão, por alto-falantes, a limitação da potência dos atuadores determina a sua controlabilidade. A figura 2 mostra um diagrama em blocos de um controlador com esta finalidade.

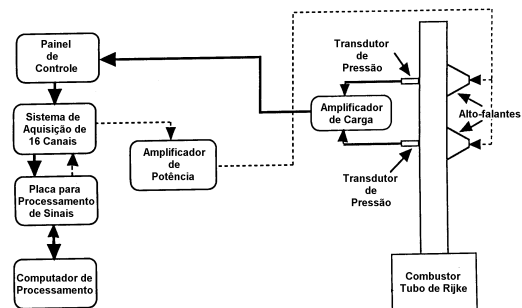


Figura 2 - Diagrama em blocos do controlador dinâmico

Um método de se fazer o controle direto da onda de pressão, e proposta nesse trabalho, é utilizando lógica difusa proposta por Zadeh [9].

2. Modelagem do Sistema de Controle

Um sério problema com a combustão pulsante em um tubo de Rijke é que o operador do sistema não tem controle no início das pulsações, bem como da magnitude das oscilações. Ocorrem, freqüentemente, variações na amplitude das pulsações entre um teste e outro, mesmo que os mais importantes parâmetros de combustão não sejam trocados, como, o tipo de combustível, a posição do queimador, a potência do combustor, dentre outros [5]. Em alguns casos, é

impossível gerar pulsações sem a ajuda externa, devido tanto ao comprimento da chama como ao projeto do queimador.

Para o desenvolvimento de um controle ativo, utilizando lógica difusa, foi necessário criar um modelo do tubo de Rijke de modo que se pudesse vir a simulá-lo e, com isso, conseguir encontrar os parâmetros que definirão as principais características do sistema de controle. O simulador escolhido para o sistema de controle foi o Matlab juntamente com o Simulink agregado ao toolbox fuzzy [10].

2.1. Modelo do sistema de controle

O controle a ser realizado é baseado na lógica difusa, a qual fornece como saída um sinal de amplitude a ser gerado pelo alto-falante. A figura 3 apresenta a planta de controle desenvolvida.

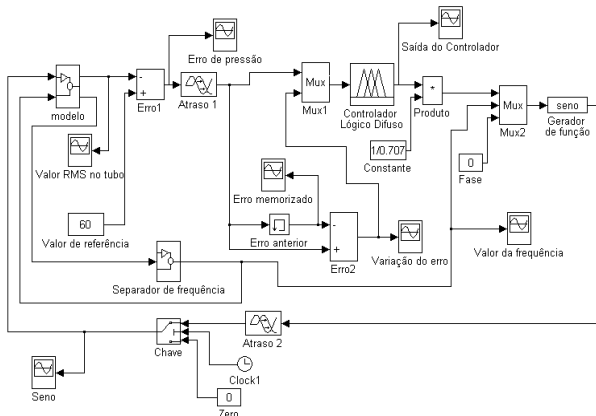


Figura 3 – Sistema de controle

Essa planta é constituída por uma série de blocos que representam os diversos equipamentos e processos atuantes no controle do tubo. Uma breve descrição dos principais blocos é apresentada a seguir:

Valor de referência – nesse bloco é ajustado o valor da amplitude de pressão, em valor eficaz, na qual o tubo deve oscilar. Esse valor é também conhecido como “set-point”

Separador de frequência – extrai a frequência do sinal senoidal, interno ao tubo, recebido do bloco “Modelo”.

Erro1 – o bloco executa a comparação entre o valor da amplitude de pressão RMS recebido do bloco “Modelo”, e o valor RMS recebido do bloco “Valor de referência”

Atraso1 – corresponde ao atraso de tempo do sinal adquirido no tubo quando passa pelos sensores de pressão e amplificadores de carga. O processamento do sistema de aquisição de dados também é levado em consideração.

Erro anterior – memoriza o erro em valor RMS da saída do bloco “Erro2”.

Erro2 – executa a diferença, em valor RMS, entre o valor de erro obtido na saída do bloco “Erro1” e a saída do bloco “Erro anterior”.

Controlador Lógico Difuso – bloco responsável pelo controle difuso do sistema.

Fase – fornece a fase do sinal a ser gerado pelo bloco “Gerador de função”.

Gerador de função – Esse bloco gera uma onda senoidal a partir de sinais de amplitude recebido do bloco “Produto”, da frequência recebida do bloco “Separador de frequência” e da fase estabelecida em sua entrada.

Atraso 2 – esse bloco simula o atraso de processamento computacional do sinal e bem como o atraso relativo ao amplificador de potência.

Modelo – esse bloco representa o modelo do tubo [11], onde são obtidos na sua saída os valores RMS de pressão interna ao tubo para ser usado no controle.

3. Controlador Difuso

3.1. Variáveis para o controlador

O controlador difuso teve as suas variáveis estabelecidas através de contato com especialistas no combustor que será controlado e conjuntamente definiu-se as condições de controle para o sistema, bem como a suas faixas de valores. Deste modo tem-se:

Variável pressão A faixa de pressão do sistema alto-falante e amplificador de potência varia entre 0 e +10 mbar na saída do alto-falante, com atraso de fase, em relação à pressão interna, de até 180°. Para o controlador difuso foi definido, a partir do conhecimento do funcionamento do tubo que se quer controlar a pressão [12], um sinal de saída variando entre zero e 100 mbar. Esta é a faixa que poderá ser estabelecida pelo operador do sistema no “set-point” do controlador. A saída máxima de pressão do controlador será de 10 mbar, após passar pelo amplificador de potência e alto-falantes.

Variável frequência A frequência em que o tubo oscilará fica em torno de 70 Hz e a variação em torno dessa frequência é $\pm 1\%$ [12].

3.2. Funções de pertinência para o controlador

A forma escolhida das funções de pertinência para o controle estudado foram a triangular e a trapezoidal. As funções de pertinência de entrada e saída definidas para o controle, são apresentadas a seguir, onde:

NG	- Negativo Grande
N	- Negativo
NP	- Negativo Pequeno
Z	- Zero
PP	- Positivo Pequeno
P	- Positivo
PG	- Positivo Grande

Neste trabalho adotou-se utilizar o erro e a variação do erro, do sinal de pressão, como variáveis de entrada para o sistema. No controlador desenvolvido, as faixas de valores das funções de pertinência para as variáveis de entrada “erro” e “variação do erro” (“varerro”),

estão apresentadas na tabela 1, e para a variável de saída “amplitude”, na tabela 2.

A representação gráfica das variáveis “erro”, “variação do erro” (“varerro”) e “amplitude” são apresentada nas figuras 4, 5 e 6, respectivamente.

Tabela 1 – Funções de pertinência para variáveis de entrada “erro” e “varerro”.

Função	Forma da função	Faixa da função (Parâmetros)
NG	Trapezoidal	[-130 -103.3 -40 -10]
N	Triangular	[-20 -10 -5]
NP	Triangular	[-10 -5 0]
Z	Triangular	[-5 0 5]
PP	Triangular	[0 5 10]
P	Triangular	[5 10 20]
PG	Trapezoidal	[10 40 103.3 130]

Tabela 2 – Funções de pertinência para variável de saída “amplitude”

Função	Forma da função	Faixa da função (Parâmetros)
NG	Trapezoidal	[-13 -10 -4 -2]
N	Triangular	[-5 -1 -0.2]
NP	Triangular	[-1 -0.2 0]
Z	Triangular	[-0.1 0 0.1]
PP	Triangular	[0 0.2 1]
P	Triangular	[0.2 1 5]
PG	Trapezoidal	[2 4 10 13]

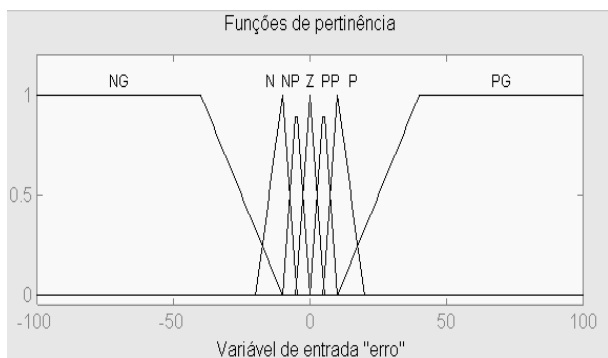


Figura 4 – Funções de pertinência para a variável de entrada “erro”

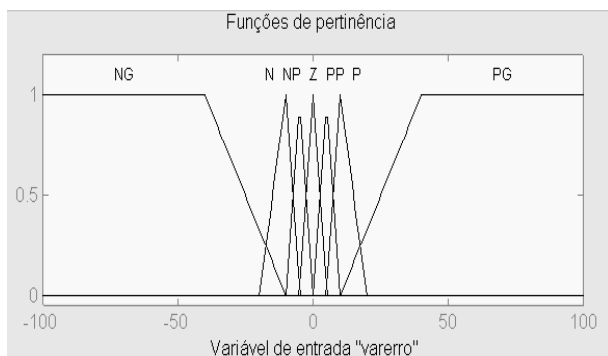


Figura 5 – Funções de pertinência para a variável de entrada “varerro”

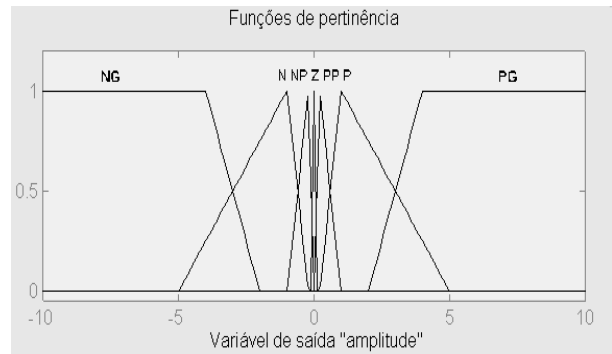


Figura 6 – Funções de pertinência para a variável de saída “amplitude”

3.3. Processo de inferência

O processo de inferência utilizado na simulação é conhecido como Mandani, e foi proposto em 1975 por Ebrahim Mamdani [13].

Para o sistema de controle desenvolvido utilizaram-se 49 regras que correspondem à combinação das duas variáveis de entrada, conforme mostrado na tabela 3.

Tabela 3 – Apresentação das regras de inferência

		Erro						
		NG	N	NP	Z	PP	P	PG
Variação do Erro	NG	NG	NG	NG	NG	PG	PG	PG
	N	NG	N	N	N	P	P	PG
	NP	NG	N	NP	NP	PP	P	PG
	Z	NG	N	NP	Z	PP	P	PG
	PP	NG	N	NP	PP	PP	P	PG
	P	NG	N	N	P	P	P	PG
	PG	NG	NG	NG	PG	PG	PG	PG

3.4. Processo de defuzzificação

No controlador difuso desenvolvido a ação a ser executada é gerar um valor RMS de pressão, através de uma onda senoidal a ser introduzida no tubo. O método de defuzzificação adotado foi o do centróide, um dos mais conhecidos [14].

4. Resultados e Discussões

Para se executar a simulação considerou-se que o modelo do tubo estará oscilando com uma pressão interna RMS de 30 mbar. O valor desejado de pressão ao longo do tempo está apresentado na figura 7 e os tempos de atraso, estabelecidos nos blocos “Atraso 1” e “Atraso 2”, são de 1 ms.

A partir das condições iniciais verificou-se que o controle entra em operação a partir de 0,1 segundo, estando até esse instante o tubo sob ação das variáveis previamente estabelecidas (figura 7). No instante 0,1 segundo, o valor desejado para a pressão RMS interna ao tubo é de 90 mbar, mantendo-se nesse valor até o instante de 0,5 segundo, onde uma pressão de 30 mbar é colocada no “set-point”. A figura 8 apresenta a onda

senoidal resultante da ação do controle e da onda de pressão natural interna ao tubo, estando o valor RMS referente a essa onda apresentado na figura 9.

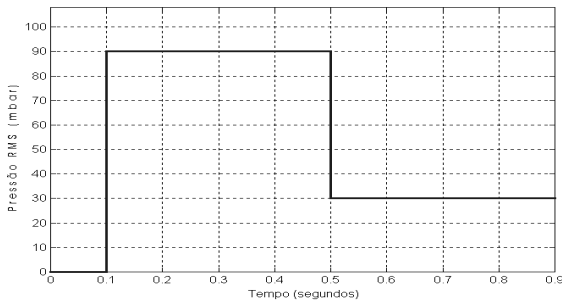


Figura 7 – Valores desejados para a pressão interna do tubo

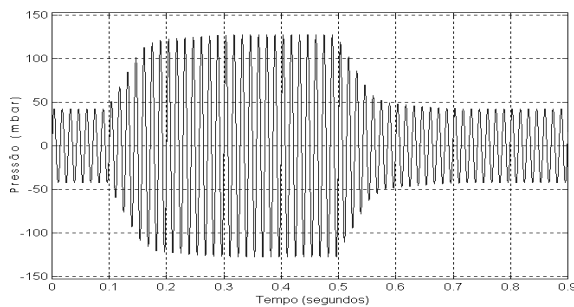


Figura 8 – Onda de pressão interna ao tubo

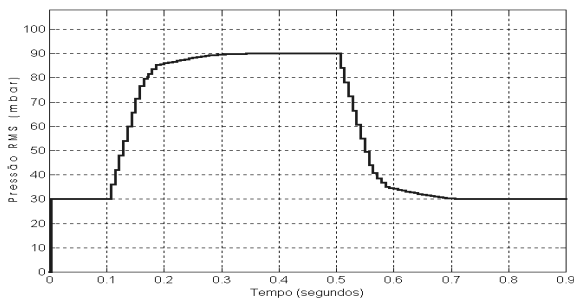


Figura 9 – Valor RMS da pressão interna ao tubo

Pode-se verificar que a onda senoidal, natural de oscilação do tubo, se mantém com amplitude constante até o instante de 0,1 segundo. Nesse momento, quando o sistema é acionado, o valor de referência colocado para a pressão é de 90 mbar. A partir daí a onda de pressão tem a sua amplitude aumentada com o decorrer do tempo, devido à ação do sinal de pressão introduzido pelo alto-falante.

A figura 10 apresenta o sinal de erro na entrada do controlador onde, em aproximadamente 0,4 segundo, a onda interna ao tubo atinge o valor definido no “set-point”, com um erro de 0,03 mbar de valor de pico. A partir do instante 0,5 segundo, é estabelecido no “set-point” um valor de 30 mbar. A onda de pressão interna ao tubo inicia o decréscimo em amplitude, alcançando o novo valor em aproximadamente 0,8 segundo, com um erro de 0,01 mbar de pico. A figura 11 apresenta a resposta do controlador aos valores estabelecidos externamente. A figura 12 apresenta o sinal senoidal de

pressão fornecido pelos alto-falantes, onde se visualiza um decréscimo da amplitude do sinal gerado em função da convergência do sinal de erro para o valor nulo, tanto para o caso em que o valor de pressão RMS interno ao tubo passa de 30 mbar para 90 mbar, quanto de 90 mbar para 30 mbar.

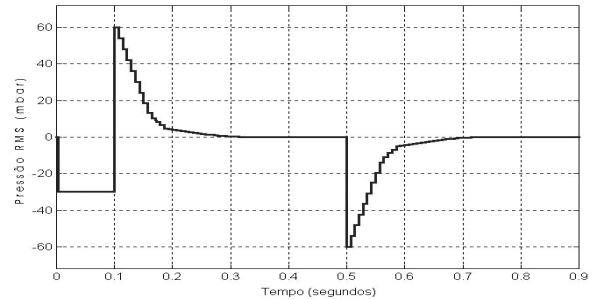


Figura 10 – Erro da pressão interna ao tubo

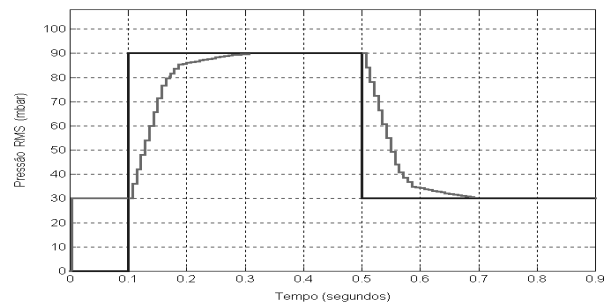


Figura 11 – Resposta do controlador para um impulso em sua entrada

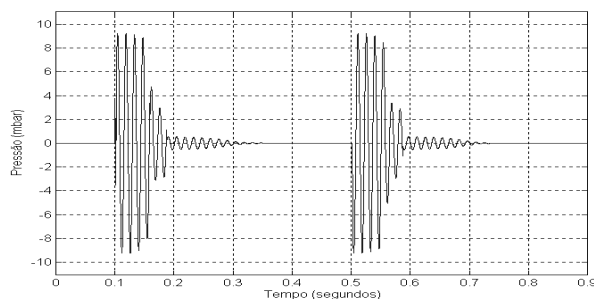


Figura 12 – Sinal de pressão na saída dos alto-falantes

A figura 13 apresenta a fase do sinal gerado pelo controlador em relação ao sinal interno ao tubo. Se o sinal de erro é positivo, aumenta o valor da pressão interna ao tubo. Através do detalhe colocado à esquerda da figura verifica-se que, caso o sinal gerado pelo controlador esteja em fase com o sinal de pressão, este sinal é amplificado até atingir o valor especificado. Caso contrário, se o erro é negativo, o controlador gera um sinal defasado de 180° da onda senoidal, obtendo-se a diminuição da pressão.

Um dos pontos que causa preocupação nesse tipo de estudo é a influência do atraso devido a captura dos sinais e tempo de processamento do programa de controle. Desse modo estudou-se o efeito desses atrasos e a figura 14 sintetiza a resposta da onda interna de pressão no tubo considerando diferentes tempos de

atraso para o processamento computacional do sinal e amplificador de potência.

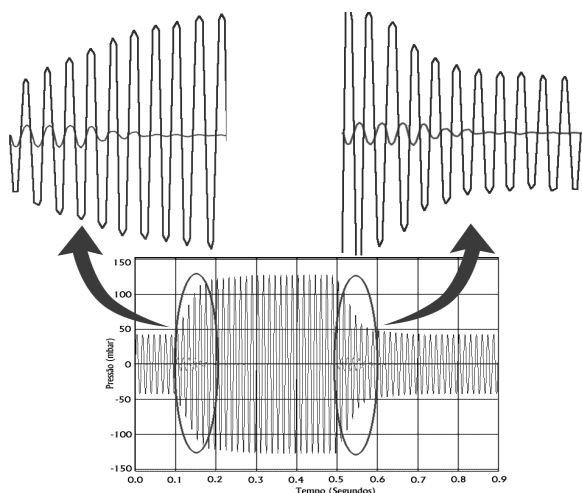


Figura 13 – Comportamento da onda de pressão sob ação do controle.

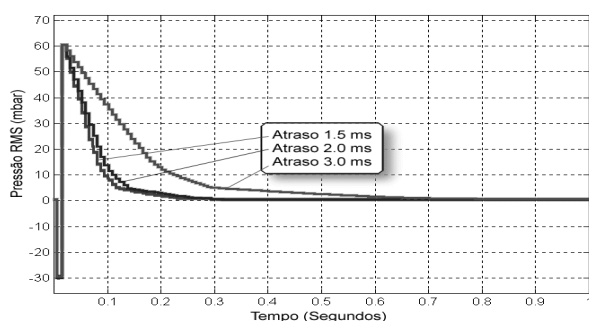


Figura 14 – Erro de pressão para diferentes tempos de atraso de processamento.

5. Conclusões

O presente trabalho apresentou os resultados obtidos em simulação numérica para um sistema de controle, utilizando lógica difusa para um combustor do tipo tubo de Rijke instalado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) na cidade de Cachoeira Paulista. Houve necessidade, durante a elaboração do trabalho de se desenvolver um modelo que viabiliza-se a simulação pretendida. Uma planta de controle que viesse a ser simulada foi idealizada para tal propósito. A definição das variáveis necessárias para a realização do controle foi feita, bem como das funções de pertinência e das regras necessárias para um controlador difuso.

A simulação realizada mostrou que o uso da lógica difusa no controle de instabilidades de combustão é plenamente viável. Através dos resultados obtidos pode-se perceber que o controle respondeu aos impulsos de entrada de modo eficiente, e conforme o desejado. Verificou-se que o controle precisou de aproximadamente 0,2 segundo para elevar a pressão interna do tubo de 30 mbar para 90 mbar, considerando-se um atraso total de 2 ms, sendo estes atrasos referentes aos introduzidos pelos sensores, amplificadores de

carga, pelo processamento do sistema de aquisição de dados e ao processamento computacional. Verificou-se que os efeitos da variação destes atrasos correspondem a uma variação no tempo para se obter o valor estabelecido no “set point” do sistema, porém, não influencia no desempenho geral.

Pode-se constatar que o controlador envia um sinal que gera uma onda de pressão em fase com a pressão interna ao tubo, através dos alto-falantes, quando se deseja aumentar a magnitude da onda acústica. Quando se deseja diminuir a onda de pressão interna ao tubo, o controlador envia um sinal de controle defasado 180° em relação ao sinal interno ao tubo.

Finalmente pode-se concluir que a implementação de um controlador ativo, usando lógica difusa, com aplicação em um tubo de Rijke é plenamente viável de ser realizado.

6. Referências

- [1] ZINN, B.T. Pulse combustion: recent applications and research issues. PROC. INT. SYMPOSIUM ON COMBUSTION, Sydney, Australia, 24, 1992.
- [2] HECKL, M.A. Active control of the noise from Rijke tube. J. Sound and Vibration, v.124, p117-33, 1988.
- [3] POINSOT, T. Suppression of combustion instabilities by active control. J. Propulsion Power, v.5, p.14-20, 1989.
- [4] MCMANUS, K.R., POINSOT, T., CANDEL, S.M. A review of active control of combustion instabilities. Prog. Energy and Combustion Science, v.19, p.1-29, 1993.
- [5] FERREIRA, M.A. Abordagem teórica e experimental de combustores do tipo Rijke. Tese de Doutorado. UNESP, Campus de Guaratinguetá, 1997.
- [6] ERICKSON, P.A. Active control of a Rijke-tube reactor and its general effects on combustion. Dissertação de Mestrado, Brigham Young University, 1997.
- [7] CARVALHO JR., J.A., FERREIRA, M.A., BRESSAN, C., FERREIRA, J.L.G. Definition of heater location to drive maximum amplitude acoustic oscillations in a Rijke tube. Combustion and Flame, v.76, p.17-27, 1989.
- [8] CARVALHO JR., J.A. Investigation of the characteristics of a coal burning Rijke type pulsating combustor. Tese de Doutorado, Georgia Institute of Technology, 1983.
- [9] ZADEH, L.A. Fuzzy sets. Information and Control, v.8, p.338-53, 1965.
- [10] THE MATH WORKS INC. Simulink: dynamic system simulation for MATLAB. Natick, MA, 1997.
- [11] BOTURA, C.A. Estudo e Projeto de um Controlador Usando Lógica Difusa Aplicado ao Controle Ativo de um Combustor do Tipo Tubo de Rijke. Dissertação de Mestrado, UNESP, Campus de Guaratinguetá, 1998.
- [12] MARTINS, C.A. Emissões de NOX em combustor pulsante tipo tubo de Rijke operando com combustível gasoso. Dissertação de Mestrado, INPE, 1998.
- [13] MANDANI, E.H., ASSILIAN S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International Journal of Man Machine Studies, v.8, p.669-78, 1976.
- [14] DRIANKOV, D., HELLENDORN, H., REINFRANK, M. An Introduction to Fuzzy Control. 2.ed. New York: Springer Verlag, 1996. p.134.