



## **SIMULAÇÃO DO CONTROLE ATIVO ATRAVÉS DE LÓGICA DIFUSA EM UM COMBUSTOR PULSANTE**

**Cesar Augusto Botura**

**Galdenoro Botura Jr.**

**João Andrade de Carvalho Jr.**

**Leonardo Mesquita**

UNESP – Campus de Guaratinguetá

Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá, SP, CEP 12500-000

**Marco Aurélio Ferreira**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Rod. Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista, SP, CEP 12630-000

**Resumo.** *O presente trabalho analisa um sistema de controle de lógica difusa para um combustor pulsante tipo tubo de Rijke. Durante o desenvolvimento do mesmo, realizou-se um estudo dos tipos de controle existentes para a combustão pulsante e foi proposto um modelo de simulação a ser utilizado pelo pacote Matlab e Simulink. Uma planta de controle foi utilizada para o desenvolvimento do sistema. Um controlador difuso foi desenvolvido e suas funções de pertinência e regras de inferência foram estabelecidas. A simulação realizada mostrou que a lógica difusa no controle de instabilidades de combustão é viável. Através dos resultados pôde-se inferir que o controle respondeu aos impulsos colocados de maneira eficiente e conforme o desejado. Verificou-se que o controle precisou de aproximadamente 0,2 s para elevar a pressão interna do tubo de 30 mbar para 90 mbar, considerando-se um atraso total de 2 ms. Estudaram-se os efeitos da variação do atraso e verificou-se que, mesmo levando-se um maior tempo para se conseguir a convergência, esta ocorre, não influenciando no desempenho geral. O controlador envia um sinal de pressão em fase com o sinal de pressão interno ao tubo, através dos alto-falantes, quando se deseja aumentar a pressão de oscilação. Quando se deseja diminuir a onda de pressão interna ao tubo, o controlador envia um sinal de controle defasado 180° ao sinal.*

**Palavras-chave:** *Lógica Difusa, Combustão Pulsante, Tubos de Rijke*

### **1. INTRODUÇÃO**

A presença de oscilações acústicas geradas por processos de combustão é muito comum, tanto em câmaras de foguetes, como em fornalhas industriais, podendo causar resultados desastrosos. Esse tipo de processo é conhecido como combustão pulsante. Há, no entanto, em vários casos, benefícios da combustão pulsante, como melhora da mistura de combustível e oxidante, maior taxa de transferência de calor, reações em mais altas temperaturas, e

combustão mais eficiente. Um combustor que permite o estudo das oscilações é o tubo de Rijke, que consiste de um tubo vertical com uma fonte de calor colocada em sua metade inferior. O fenômeno foi descoberto por Rijke em 1859 (Lord Rayleigh, 1945). O tubo de Rijke, associado a uma instrumentação adequada, permite o estudo e o controle destas oscilações.

Uma importante vertente das pesquisas voltadas para o estudo da combustão se centra ao redor das instabilidades 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 dentro do tubo. Para implementar esse tipo de controle é necessário conhecer a onda de pressão existente e usar aquela pressão como uma entrada para o controlador na malha de realimentação. Um algoritmo baseado numa malha de realimentação foi desenvolvido por Heckl (1988) para controlar e eliminar as instabilidades dentro de um combustor de tubo de Rijke. Os resultados de seus testes mostraram uma diminuição nas amplitudes das oscilações por mais de 40 dB. Poinot et al. (1989) também usaram o conceito de interferência destrutiva e realimentação para suprimir instabilidades. Eles testaram sua teoria num combustor de 250 kW, verificando que a pressão sonora pode ser reduzida por mais de 20 dB. McManus et al. (1993) anotaram vários estudos que usam sistemas de malhas aberta e fechada e mecanismos de controle adaptativos para instabilidades por atenuação da onda. Nesses estudos a estabilização das instabilidades foi o objetivo, mas pouco é encontrado na literatura quando se deseja que o controle ativo seja usado para estudar sistemas práticos, influenciados por um campo de amplitude e frequência controladas. Esses estudos, contudo, mostraram a viabilidade de se implementar um controlador ativo em um tubo de Rijke através de uma instrumentação relativamente simples. A velocidade do computador em conjunto com a exatidão dos controladores digitais, bem como sensores e atuadores sofisticados, abriram caminho para a aplicação de controle ativo de instabilidades.

Deste modo, pode-se definir uma pressão e colocar o tubo a oscilar nessa pressão pré estabelecida através do controlador. Com isso consegue-se eliminar um grande inconveniente desse tipo de combustor, ou seja, definir a sua pressão interna, uma vez que sem esse controle, o valor dessa pressão fica sob critérios estabelecidos unicamente por condições não totalmente conhecidas. Uma vez que uma dada pressão ocorre no interior do tubo, não se conseguiria mais mudá-la sem o controle ativo, tornando-se extremamente difícil conseguir a realização de testes e estudos onde existe a necessidade de repetibilidade (Ferreira, 1997).

Um dos métodos de se modificar a onda de pressão em tubo de Rijke é através da modulação do campo de pressão acústica com alto-falantes. Este método é conhecido como controle direto. O segundo método usa modulação de combustível para modular o campo acústico indiretamente através do processo de liberação de calor na qual é afetado o campo de fluxo no reator e, em consequência, o campo de pressão. A Figura 1 mostra um diagrama em blocos do controlador dinâmico e a posição dos alto-falantes no tubo de Rijke.

A posição do alto-falante no tubo é também de vital importância pois modos de pressão não podem ser controlados por um alto-falante operando no nó de pressão (Dubey, 1998).

Um método de se fazer o controle direto da onda de pressão, e proposta nesse trabalho, é utilizando lógica difusa proposta por Zadeh (1965).

## **2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A LÓGICA DIFUSA**

A lógica difusa expressa as leis operacionais de um sistema de controle por termos lingüísticos, ao invés de equações matemáticas, como ocorre na metodologia clássica, sendo essa a sua principal vantagem. Essa lógica é aplicada em sistemas com grau de complexidade

tal que sua modelagem, através de equações matemáticas, torna demasiado impreciso o seu controle. O uso da lógica difusa nesses sistemas complicados utiliza as vantagens dos termos lingüísticos para representá-los corretamente. Esses termos são muitas vezes expressos na forma de implicações lógicas tal como regras “SE-ENTÃO”. Um controlador difuso é basicamente constituído por três blocos, cada bloco correspondendo às seguintes fases: 1. fuzzificação, 2. inferência, 3. defuzzificação.

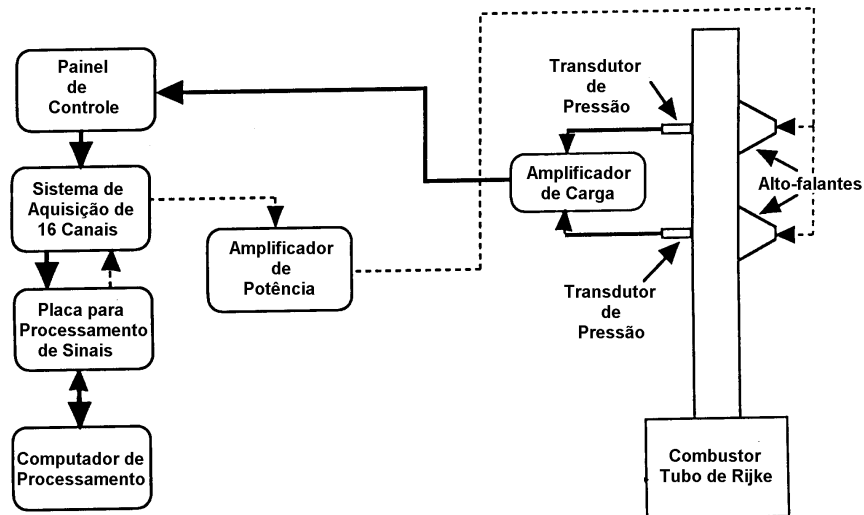


Figura 1 - Diagrama do controlador dinâmico e disposição dos alto-falantes no tubo de Rijke.

Um controlador difuso opera repetindo um ciclo das três fases anteriores. Primeiro as medidas são feitas de todas as variáveis que representam condições relevantes do processo a ser controlado. As variáveis utilizadas neste trabalho são: 1. variáveis de entrada: erro e variação do erro, 2. variável de saída: amplitude. Depois, essas medidas são convertidas em apropriados conjuntos difusos ou funções de pertinência. Esse passo é chamado de fuzzificação. As funções de pertinência utilizadas no controle foram: NG: Negativo Grande, N: Negativo, NP: Negativo Pequeno, Z: Zero, PP: Positivo Pequeno, P: Positivo, PG: Positivo Grande.

As medidas fuzzificadas serão então usadas pela fase de inferência para em conjunto com as regras de controle estabelecidas, definirem funções de pertinência para a fase de defuzzificação. O resultado é uma função de pertinência (ou várias funções de pertinência) definidas no universo de ações possíveis. Neste sistema de controle foram utilizadas 49 regras, representados através da Tabela 1.

Tabela 1 – 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

O conjunto difuso é então convertido no passo final do ciclo, na fase de defuzzificação, em um simples valor ou vetor de valores. Esses valores defuzzificados representam ações a serem tomadas pelo controlador difuso em ciclos de controle individual. A ação a ser desenvolvida neste sistema de controle é gerar um valor RMS de pressão, através de uma onda senoidal a ser introduzida no tubo. O sistema de defuzzificação adotado foi o do centróide, um dos mais bem conhecidos (Driankov et al, 1996).

### 3. MODELAGEM DO TUBO DE RIJKE

O tubo de Rijke é regido pelo critério de Rayleigh (Lord Rayleigh, 1945), o qual afirma que, quando a taxa de calor transferida ao escoamento estiver em fase com a perturbação de pressão, a amplitude aumentará. O valor limite para esse valor de amplitude ocorrerá quando a taxa de energia absorvida pela onda característica se igualar a energia dissipada. As ondas internas ao tubo são fundamentalmente senóides oscilando em uma das frequências fundamentais do tubo. Baseando-se nas considerações acima foi desenvolvido o modelo a seguir visando aplicá-lo no simulador apresentado.

#### 3.1 Modelo desenvolvido - Blocos integrantes

O modelo desenvolvido consta de uma série de funções representadas esquematicamente por blocos de modo a facilitar o manuseio por parte dos usuários do simulador. Essas funções, na sua grande maioria, já estão presentes na biblioteca do pacote de programa utilizado e, quando se exigiu uma função que ali não existia, essa foi gerada especificamente. Desse modo, o modelo criado, na forma esquemática, está representado na Figura 2.

Neste modelo, que corresponde ao tubo de Rijke, uma descrição dos principais blocos integrantes é apresentado:

1. *Pressão interna*: tem a função de somar a onda de pressão proveniente do sistema de controle com a onda de pressão gerada pelo bloco “*Gerador de pressão*”. O resultado é a pressão interna ao tubo e que vai ser coletada e transferida para o sistema de controle. São introduzidos nesse bloco os sinais gerados a partir do controlador fuzzy, que no sistema real corresponderia a onda gerada pelos alto-falantes, e a onda senoidal interna ao tubo no instante anterior. Na sua saída tem-se o resultado da composição dos sinais de sua entrada.
2. *Valor eficaz*: calcula o valor eficaz da onda interna resultante da soma efetivada no bloco “*Pressão interna*”. Como o tubo é auto-sustentado, esse valor é armazenado de forma que se possa gerar uma onda senoidal no bloco “*Gerador de pressão*”, posteriormente, a partir desse valor. Uma outra razão da existência desse bloco é que o sistema de controle mede os valores de pressão interno ao tubo a partir dos sensores de pressão e amplificadores de carga conectados a ele, e esses valores são em RMS. O valor de pressão em RMS é colocado de modo que o sistema possa vir a fazer a comparação entre esse e os valores pré-determinados pelo usuário (“*set point*”).
3. *Memória*: responsável por armazenar o valor eficaz da onda interna ao tubo para alimentar o bloco “*Gerador de pressão*”, de modo a alterar a amplitude interna de oscilação do tubo.
4. *Gerador de pressão*: bloco que gera uma onda senoidal a partir de sinais de amplitude recebido do bloco “*Memória*”, frequência recebida do bloco “*Separador de frequência*” e da fase estabelecida em sua entrada. A sua saída apresenta o valor de pressão que será enviado ao bloco “*Pressão interna*”. A função seno, utilizada nesse bloco, foi gerada na linguagem de programação “C”, e compilada na linguagem de programação do “*Matlab*”. Em função do programa fonte estar nessa linguagem, ele pode vir a ser utilizado quando da implementação do sistema de controle real.

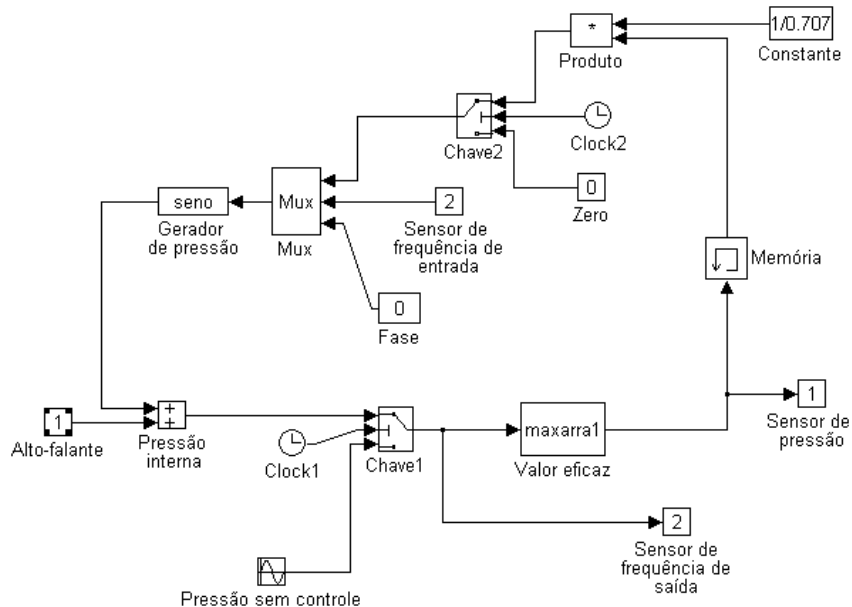


Figura 2 - Modelo do tubo de Rijke utilizado no Simulink.

5. *Fase*: fornece a fase do sinal a ser gerado pelo bloco “*Gerador de pressão*”.
6. *Alto-falante*: terminal de entrada para que o sinal recebido do sistema de controle seja introduzido no tubo. Esse sinal do controlador difuso passa pelo amplificador de potência antes de chegar no alto-falante.
7. *Sensor de pressão*: terminal de saída do modelo, onde o sinal de amplitude RMS, da onda interna ao tubo, é retirado para ser enviado ao sistema de controle.
8. *Sensor de frequência de entrada*: terminal de entrada que recebe a frequência do sinal interno ao tubo, proveniente do bloco “*Separador de frequência*”.
9. *Sensor de frequência de saída*: terminal de saída que fornece o sinal necessário ao bloco “*Separador de frequência*” visando obter o valor da frequência que será utilizado pelo bloco “*Gerador de pressão*”.
10. *Pressão sem controle*: bloco que fornece uma onda senoidal, simulando uma onda interna ao tubo, sem que o controle esteja atuando.
11. *Clock1 e Clock2*: fornecem a base de tempo para a simulação.
12. *Chave2*: da mesma forma que o bloco “*Chave1*”, o sinal obtido na saída do bloco é nulo até o sinal obtido do bloco “*Clock2*” atinja o valor pré-definido. A partir do momento em que o controle é desejado, o sinal é liberado.
13. *Zero*: fornece o valor zero até o momento em que o controle desejado é acionado.

### 3.2 Modelo do sistema de controle

O controle fornece como saída um sinal de amplitude a ser gerado pelo alto-falante. A Figura 3 apresenta a planta de controle desenvolvida nesse trabalho.

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:

1. *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*”.
2. *Separador de frequência*: extrai a frequência do sinal interno ao tubo recebido do bloco “*Modelo*”, a ser utilizado pelos blocos “*Gerador de função*” e “*Gerador de pressão*”.
3. *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*” (“*set point*”). Em sua saída tem-se a diferença entre esses valores, sendo que essa diferença corresponde ao valor de erro. No sistema real, a amplitude de pressão interna ao tubo é obtida a partir dos sensores de pressão e amplificadores de carga. O valor RMS desse erro é conseguido a partir de cálculos efetuados pelo programa instalado no controlador.

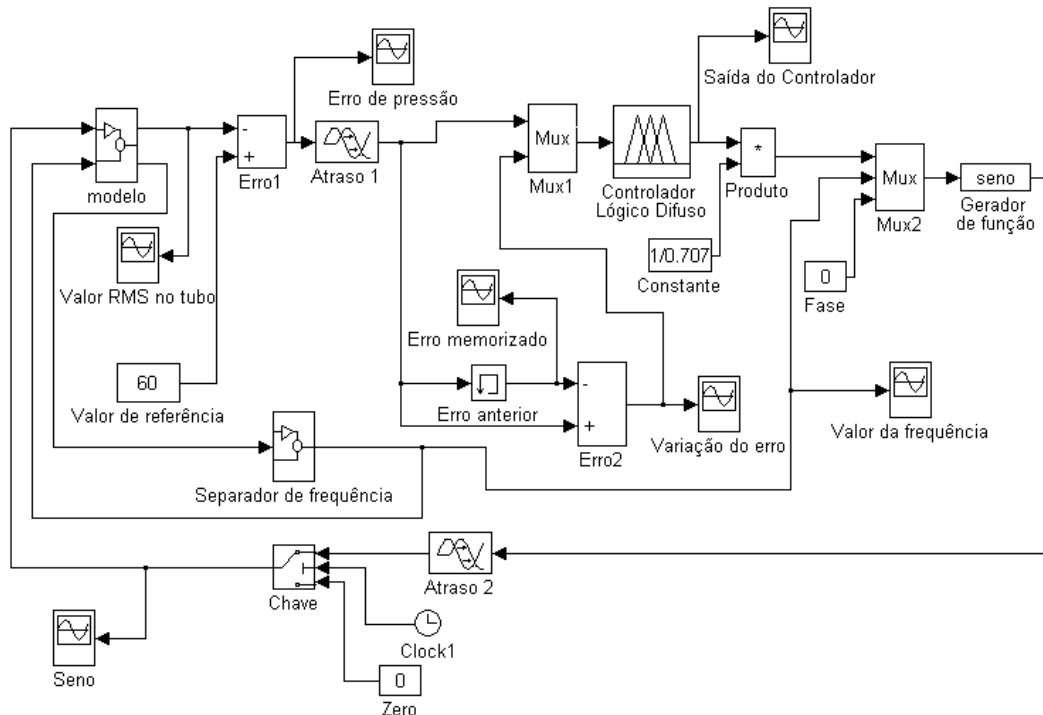


Figura 3 – Sistema de controle.

4. *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. Esse valor estimado e utilizado para simulação foi por volta de 1ms.
5. *Erro anterior*: memoriza o erro em valor RMS da saída do bloco “*Erro2*”.
6. *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*”. Com isso consegue-se obter a variação do erro entre dois instantes de controle consecutivos. O valor obtido em sua saída representa a variável de controle “*variação do erro*” (“*varerro*”).
7. *Controlador Lógico Difuso*: bloco responsável pelo controle difuso do sistema. Recebe como variáveis de entrada “*erro*”, do bloco “*Atraso1*”, depois de ter sido processada pelo bloco “*Erro1*”, e “*varerro*” do bloco “*Erro2*”. A saída do bloco “*Controlador Lógico Difuso*” fornecerá sinal RMS de pressão a ser gerada pelo bloco “*Gerador de função*”.
8. *Fase*: fornece a fase do sinal a ser gerado pelo bloco “*Gerador de função*”.
9. *Gerador de função*: gera uma onda senoidal a partir de sinais de amplitude recebido do bloco “*Produto*”, da frequência recebido do bloco “*Separador de frequência*” e da fase estabelecida em sua entrada. Na sua saída tem-se o valor de pressão que será enviado ao bloco “*Pressão interna*” do modelo do tubo (Figura 2), que representa no sistema real à pressão gerada pelos alto-falantes.
10. *Atraso 2*: simula o atraso de processamento computacional e o atraso relativo ao amplificador de potência. Utilizou-se como parâmetro de simulação um atraso de 1ms.
11. *Modelo*: esse bloco representa o modelo do tubo (Botura, 1998), onde são obtidos na sua

saída os valores RMS de pressão interna ao tubo para ser usado no controle. O sinal de pressão para obter-se o valor da frequência no bloco “*Separador de frequência*” é também retirado desse bloco. Na sua entrada tem-se o valor da frequência obtida do bloco “*Separador de frequência*” e sinal de pressão obtido do controle.

12. *Valor RMS no tubo* – exibe o valor RMS da onda de pressão interna ao tubo.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para se executar a simulação e obter os resultados para posterior análise, foi considerado que o tubo está oscilando com uma pressão interna RMS de 30 mbar, valor esse definido através do bloco “*Pressão sem controle*” interno ao bloco “*Modelo*”. O valor desejado de pressão ao longo do tempo, colocado no bloco “*Valor de referência*”, está apresentado na Figura 4 e os tempos de atraso estabelecidos nos blocos “*Atraso 1*” e “*Atraso 2*” são de 1 ms.

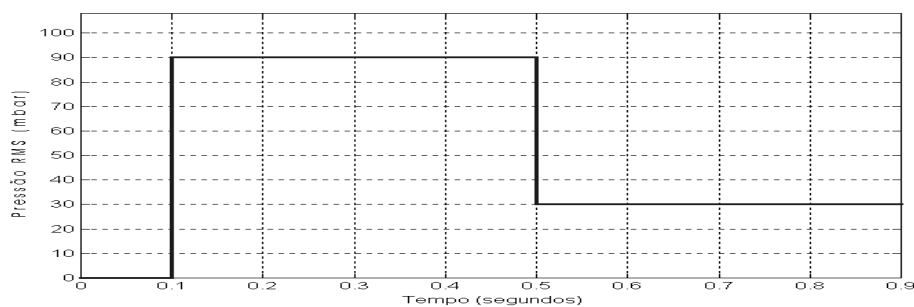


Figura 4 – Valores desejados para a pressão interna do tubo.

Das condições iniciais vê-se que o controle é acionado a partir de 0,1 s, estando até esse instante o tubo sob ação das variáveis estabelecidas previamente. No instante 0,1 s, o valor desejado da pressão RMS interna ao tubo é de 90 mbar, mantendo-se nesse valor até o instante de 0,5 s, onde uma pressão de 30 mbar é selecionada no bloco “*Valor de referência*”. A Figura 5 apresenta a onda senoidal resultante da ação do controle e da onda de pressão natural interna ao tubo e a Figura 6 apresenta o valor RMS referente a essa onda.

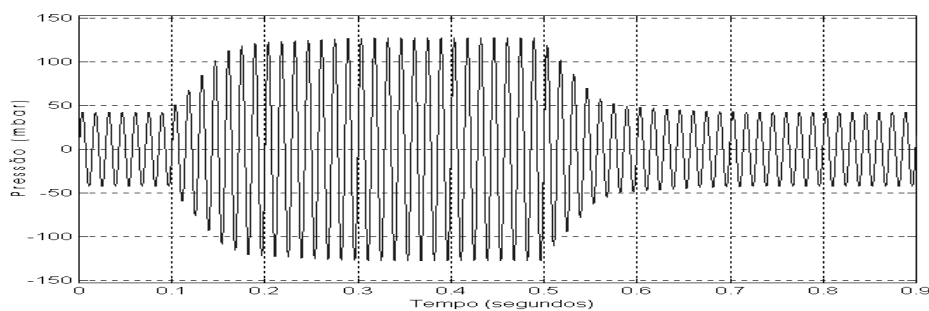


Figura 5 - Onda interna ao tubo.

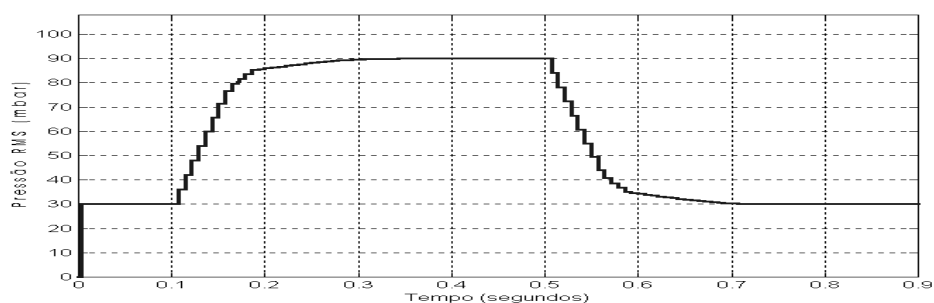


Figura 6 – Valor RMS da onda interna ao tubo.

Pode-se visualizar que a onda senoidal natural de oscilação do tubo se mantém com amplitude constante até o instante de 0,1 s. Nesse momento, quando o sistema é acionado, o valor de referência colocado para a pressão é de 90 mbar. A partir desse instante, a onda de pressão tem a sua amplitude elevada com o decorrer do tempo, devido à ação do sinal de pressão introduzido pelo alto-falante. A Figura 7 apresenta o sinal de erro na entrada do controlador onde, em aproximadamente 0,4 s, a onda interna ao tubo atinge o valor previamente definido no “*set-point*”, com um erro de 0,03 mbar de pico. A partir do instante 0,5 s, o valor desejado no “*set point*” é colocado em 30 mbar. Pode-se verificar que a onda de pressão interna ao tubo inicia o decréscimo em amplitude, alcançando o novo valor desejado em aproximadamente 0,8 s, com um erro de 0,01 mbar de pico. A Figura 8 apresenta o sinal de pressão fornecido pelos alto-falantes, onde se visualiza um decréscimo da amplitude do sinal gerado, a partir do bloco “*Gerador de funções*”, 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.

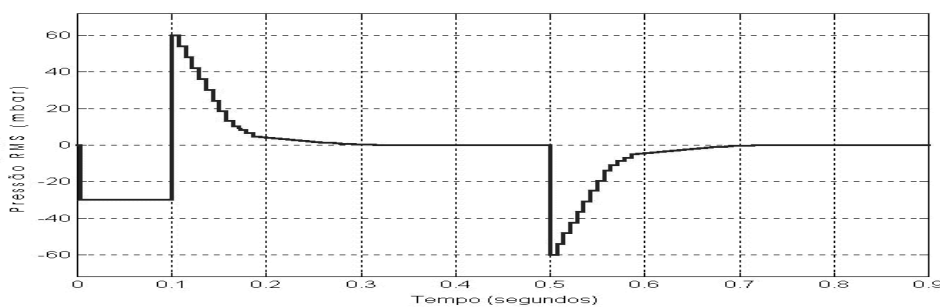


Figura 7 – Erro de pressão.

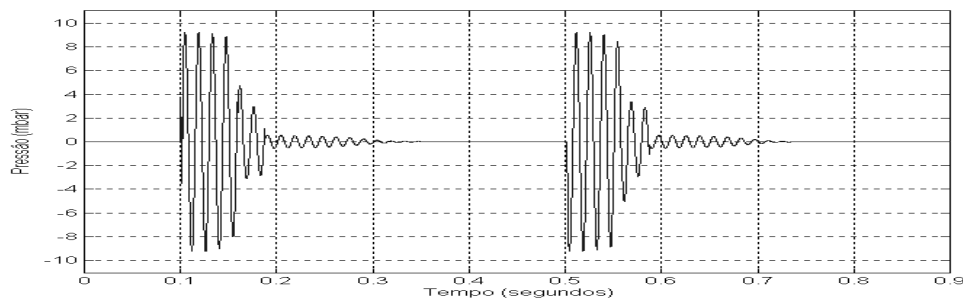


Figura 8 – Sinal senoidal de pressão na saída dos alto-falantes.

Através da Figura 9 pode-se analisar a fase do sinal gerado com o sinal interno ao tubo, em função do erro na saída do bloco “*Erro1*”. Assim, se o sinal de erro é positivo, significa que se deseja aumentar o valor da pressão interna ao tubo. Com isso pode-se visualizar através do detalhe à esquerda da figura que, se o sinal na saída do bloco “*Gerador de função*” está em fase com o sinal senoidal de pressão interno ao tubo, o sinal senoidal interno ao tubo é amplificado até atingir o valor desejado. Caso contrário, se o erro é negativo, torna-se necessário diminuir o valor de pressão interno ao tubo. Gerando na saída do bloco “*Gerador de função*”, um sinal senoidal defasado de  $180^\circ$  da onda interna ao tubo, consegue-se obter a diminuição da pressão, observado no detalhe à direita da Figura 9. Essa figura mostra que o controlador gera sinais em fase de  $0^\circ$  e  $180^\circ$  em relação ao sinal interno ao tubo e que esse sinal é capaz de exercer a função pretendida. Pode-se perceber a variação da amplitude do sinal gerado em relação a diminuição do valor do erro, mostrando que essa amplitude diminui conforme a pressão interna ao tubo aproxima-se do valor definido externamente.

A Figura 10 sintetiza a resposta da onda interna de pressão no tubo, para diferentes tempos de atraso do processamento computacional e amplificador de potência.



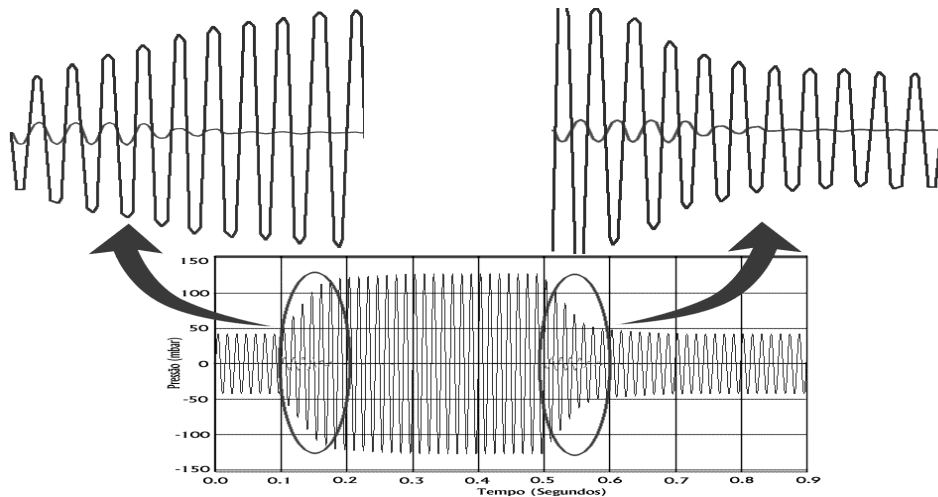


Figura 9 – Onda interna ao tubo e sinal senoidal dos alto-falantes.

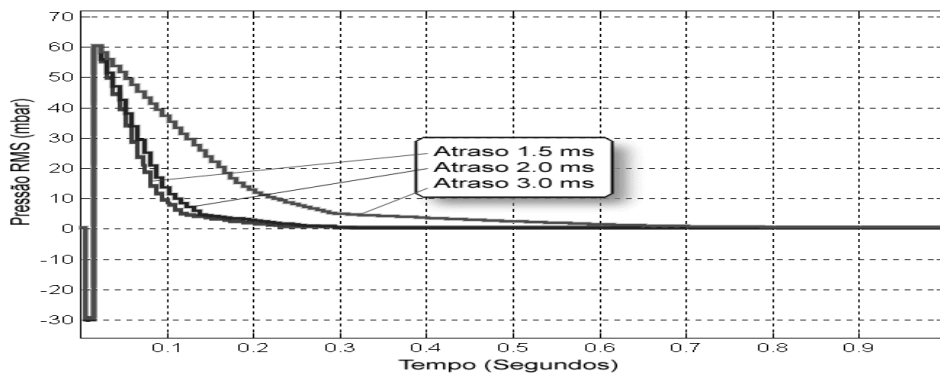


Figura 10 – Erro de pressão para diferentes tempos de atraso.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou um sistema de controle de lógica difusa para um combustor do tipo tubo de Rijke. Houve necessidade de se desenvolver um modelo que representasse o funcionamento do tubo a ser controlado. Desse modo, propôs-se um modelo para ser utilizado pela ferramenta de simulação apresentada no trabalho. Necessitou-se, também, estabelecer uma planta de controle que viesse a ser simulada. O estabelecimento das variáveis necessárias para o controle foi realizado, bem como das funções de pertinência e regras necessárias para um controlador fuzzy.

A simulação mostrou que o uso da lógica difusa no controle de instabilidades de combustão é viável. Através dos resultados obtidos pode-se perceber que o controle respondeu aos impulsos colocados de maneira 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 (Atraso 1 e Atraso 2). Estudaram-se os efeitos da variação do atraso e verificou-se que, mesmo levando-se um maior tempo para se conseguir a convergência, essa ocorre, não influenciando no desempenho geral.

Verificou-se que o controlador envia um sinal de pressão em fase com o sinal de pressão interno ao tubo, através dos alto-falantes, quando se deseja aumentar a pressão de oscilação. Quando se deseja diminuir a onda de pressão interna ao tubo, o controlador envia um sinal de controle defasado  $180^\circ$  ao sinal.

## *Agradecimentos*

Os autores agradecem o apoio deste trabalho pela FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, através do processo nº 1997/7308-6

## **REFERÊNCIAS**

- ADCOCK, T.A. What's fuzzy logic? An overview of the latest control methodology. In: TEXAS INSTRUMENTS. Implementation of fuzzy logic. Dallas, TX, 1993. p.2-6.
- BOTURA, C.A. Estudo e projeto de um controlador usando lógica difusa aplicado ao controle ativo de um combustor do tipo tubo de Rijke. Guaratinguetá, 1998. 94p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, UNESP.
- DRIANKOV, D., HELLENDORN, H., REINFRANK, M. An Introduction to Fuzzy Control. 2.ed. New York: Springer Verlag, 1996. p.134.
- DUBEY, R.K. A parametric study on the effect of an acoustic field on a spray fired, Rijke-tube, pulse combustor. Provo, UT, 1998. 186p. Tese de Doutorado, Brigham Young University.
- FERREIRA, M.A. Abordagem teórica e experimental de combustores do tipo Rijke. Guaratinguetá, 1997. 227p. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia, UNESP.
- HECKL, M.A. Active control of the noise from Rijke tube. Journal of Sound and Vibration, v.124, p117-33, 1988.
- MCMANUS, K.R., POINSOT, T., CANDEL, S.M. A review of active control of combustion instabilities. Progress in Energy and Combustion Science, v.19, p.1-29, 1993.
- POINSOT, T., BOURIENNE F., CANDEL S., ESPOSITO E., LANG W. Suppression of combustion instabilities by active control. J. Propulsion Power, v.5, p.14-20, 1989.
- RAYLEIGH, J.W.S. The theory of sound. New York: Dover, 1945. v.2, chap.16, p.170-235.
- ZADEH, L.A. Fuzzy sets. Information and Control, v.8, p.338-53, 1965.

## **Simulation of the active control through fuzzy logic in a pulse combustor**

### **Abstract**

The present work analyzes a control system using fuzzy logic for a Rijke type pulse combustor. During such development, a study of the existing control types for pulse combustion was carried out and a simulation model was proposed to be used with the package Matlab and Simulink. Blocks not available in the simulator library were developed. A control plant was used for the development of the system. A fuzzy controller was developed and its pertinence functions and inference rules were established. The obtained simulation showed that fuzzy logic is viable in the control of combustion instabilities. Through the obtained results it could be inferred that the control responded to pulses in an efficient way and as desired. It was verified that the control needed approximately 0.2 s to increase the tube internal pressure from 30 mbar to 90 mbar, with an assumed total delay of 2 ms. The effects of the variation of the delay were studied and it was verified that, even if a larger time is required to achieve convergence, this happens, and general performance is not affected. The controller sends a pressure signal in phase with the tube internal pressure signal, through the speakers, when an increase the oscillation pressure amplitude is desired. On the other hand, when a decrease of the tube internal pressure amplitude is desired, the controller sends a signal 180° out of phase.

Key words: Fuzzy Logic, Pulse Combustion, Rijke Tubes.