

UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

ESTUDO E PROJETO DE UM
CONTROLADOR USANDO LÓGICA
DIFUSA APLICADA AO CONTROLE
ATIVO DE UM COMBUSTOR DO
TIPO TUBO DE RIJKE

Guaratinguetá
1998



1110000396



***"Estudo e Projeto de um
Controlador Usando Lógica
Difusa Aplicada ao Controle
Ativo de um Combustor do
Tipo Tubo de Rijke"***

CESAR AUGUSTO BOTURA

94

Cesar Augusto Botura

Estudo e projeto de um controlador usando lógica difusa aplicada ao controle ativo de um combustor do tipo tubo de Rijke

Dissertação apresentada ao Departamento de Física da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Guaratinguetá, para a obtenção do título de Mestre em Física (Área de Concentração: Física Aplicada).

Orientador: Prof. Dr. Galdenoro Botura Jr.

Guaratinguetá
1998

396

000396



Ficha catalográfica preparada na Seção de Aquisição e Tratamento da
Informação da Biblioteca – FEG/UNESP

B751e

Botura, Cesar Augusto

Estudo e projeto de um controlador usando lógica difusa
aplicado ao controle ativo de um combustor do tipo tubo de
Rijke/Cesar Augusto Botura. Guaratinguetá, 1998
94p.: il.; 30cm

Bibliografia: f.74-78

Dissertação(mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 1998.

Orientador: Prof. Dr. Galdenoro Botura Jr.

1. Medição e controle I. Título

CDU 662.611.2

662.611.2 (043)

B751e



UNESP UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Campus de Guaratinguetá

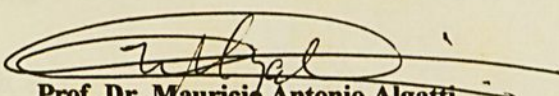
**“ESTUDO E PROJETO DE UM CONTROLADOR USANDO LÓGICA DIFUSA
APLICADA AO CONTROLE ATIVO DE UM COMBUSTOR
DO TIPO TUBO DE RIJKE”**

CESAR AUGUSTO BOTURA

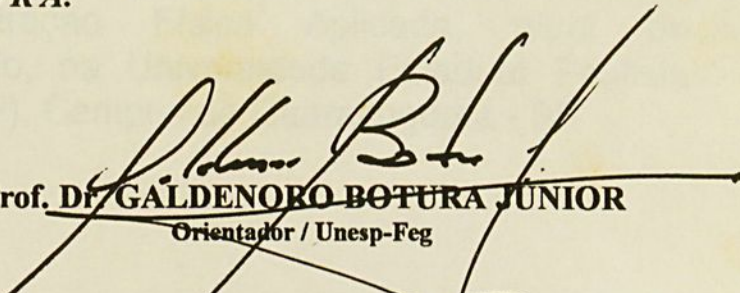
**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM CIÊNCIAS”**

**ESPECIALIDADE: FÍSICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FÍSICA APLICADA**

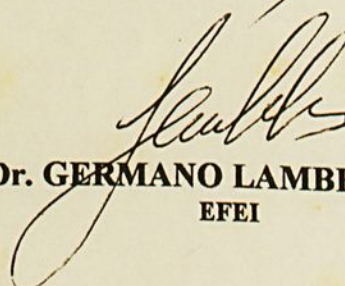
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Mauricio Antonio Algatti
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. GALDENORO BOTURA JÚNIOR
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JÚNIOR
Unesp-Feg


Prof. Dr. GERMANO LAMBERT TORRES
EFEI

Dezembro de 1998

DADOS CURRICULARES

CESAR AUGUSTO BOTURA

NASCIMENTO 9.3.1971

FILIAÇÃO Vanderlei Botura
Eunice Dias Botura

1990/1994 Curso de Graduação
Engenharia Elétrica
Universidade Estadual Paulista (UNESP)
Campus de Guaratinguetá

1997/1998 Curso de Pós-Graduação em Física, Área de
Concentração Física Aplicada, nível de
Mestrado, na Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Campus de Guaratinguetá - SP

*Das mãos pais, Vanderlei e Eunice, é minha, 1993 Vander
e minha nomeada Andréia, que me apresenta ao
campus, não de mais esta etapa da vida.*

*Aos meus pais, Vanderlei e Eunice, à minha irmã Vanice
e minha namorada Andréia, que me apoiaram no
cumprimento de mais esta etapa da vida.*

*Este trabalho contou com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do
Estado de São Paulo - FAPESP, através do processo nº 97/7303-5.*



Agradecimentos

Aqueles que sofreram conosco ...

Aqueles que sofreram conosco ...

Aqueles que sofreram conosco ...

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio de
várias pessoas. De maneira particular:

ao Prof. Dr. Galdenaro Deura Jr., meu orientador, pela amizade,
orientação e realização deste trabalho, sem a qual não seria possível.

ao Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Jr. e Dr. Marco Aurélio
Pereira pela amizade, incentivo e conversas técnicas sobre o computador tipo tubo
de vácuo.

aos professores Lúcio e Leonardo pelo incentivo e colaboração
na solução de problemas de controle.

ao amigo Geraldo Ribeiro pela intensa ajuda em problemas
computacionais e de programação.

aos amigos da sala Dr. Carlos Alberto Gurgel Viana, Pedro
Teodoro, Daniel Silva, Roberto Faria, Rui de Castro, e outros.

Este trabalho contou com o apoio da **Fundação de Amparo à Pesquisa do
Estado de São Paulo – FAPESP**, através do processo nº 97/7308-6.

ao amigo Ricardo Viana pelas fotografias da etapa experimental
e sua implementação.

às amigas Cida e Ivete pelas cópias de documentos e cartas
postais.

Agradecimentos

Àqueles que souberam orientar ...

Àqueles que souberam informar ...

Àqueles que souberam formar ...

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio da várias pessoas. De maneira particular:

ao Prof. Dr. Galdenoro Botura Jr., meu orientador, pela amizade, incentivo e idealização deste trabalho, sem a qual não seria possível.

ao Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Jr. e Dr. Marco Aurélio Ferreira pela amizade, incentivo e conversas técnicas sobre o combustor tipo tubo de Rijke.

aos professores Lotufo e Leonardo pelo incentivo e colaboração na solução de problemas de controle.

ao amigo Geraldo Ribeiro pela intensa ajuda em problemas computacionais e de programação.

aos amigos de sala Dr. Carlos Alberto Gurgel Veras, Pedro Teixeira Lacava, Daniel Silva Ferreira, Elaine Reis de Carvalho, Cristiane Aparecida Martins, pela amizade e companheirismo no decorrer do trabalho.

ao amigo Ricardo Vieira pelas fotografias da etapa experimental a ser implementada.

às amigas Cida e Ignês pelos serviços de biblioteca a mim prestados.

Sumário

Lista de Figuras	10
Lista de tabelas	13
Índice	14
Capítulo I - Fundamentos de Controle	15
1.1 - Introdução	15
1.2 - Considerações Iniciais - Uma Breve História do Controle	17
1.3 - O Controle de estabilidade de Controle - Tipos de Controle	19
1.4 - Métodos de controle de estabilidade de controle	23
1.4.1 - Introdução	23
1.4.2 - Controle de controle	23
Capítulo II - Considerações sobre a Lógica Difusa	24
II.1 - Introdução	24
II.2 - Comparação entre a lógica difusa e a clássica	25
II.3 - O Controlador Difuso	27
II.3.1 - Introdução	27
Capítulo III - Modelagem do Sistema de Controle para a Ferramenta Utilizada	34
III.1 - Introdução	34
III.2 - Ferramenta de Simulação	35
III.3 - Modelagem do Tipo de Rife	37
III.3.1 - Considerações Iniciais	37
III.3.2 - Modelo desenvolvido - Blocos Integrantes	37
III.4 - Modelo do sistema de controle	45
Capítulo IV - O Controlador Fuzzy	50
IV.1 - Introdução	50
IV.2 - Variáveis para o controlador	51
IV.3 - Funções de pertinência para o controlador	52
IV.4 - Processo de inferência	53
IV.5 - Processo de defuzzificação	54
Capítulo V - Resultados e Discussões	61
V.1 - Parametrização do modelo de controle	61
V.2 - Tabela de regras de controle para o controle	62
Capítulo VI - Conclusão	72
Referências Bibliográficas	74

*"Tente ser uma pessoa de sucesso,
mas prioritariamente,
tente ser uma pessoa de valor"*

Albert Einstein

Sumário

Lista de figuras	10
Lista de tabelas	13
Resumo	14
Capítulo I – Instabilidade de Combustão	15
I.1 – Introdução	15
I.2 – Considerações Iniciais - Um Breve Histórico da Combustão Pulsante	17
I.3 – O Controle da instabilidade da Combustão - Estudos Realizados	19
I.4 – Métodos de controle de instabilidade de combustão	20
I.4.1 Introdução	20
I.4.2 - Controle direto	21
Capítulo II – Considerações sobre a Lógica Difusa	24
II.1 – Introdução	24
II.2 – Comparação entre a lógica difusa e a clássica	25
II.3 – O Controlador Difuso	27
II.3.1 – Introdução	27
Capítulo III – Modelagem do Sistema de Controle para a Ferramenta Utilizada.	34
III.1 – Introdução	34
III.2 – Ferramenta de Simulação	35
III.3 – Modelagem do Tubo de Rijke	37
III.3.1 – Considerações iniciais	37
III.3.2 – Modelo desenvolvido – Blocos integrantes	37
III.4 – Modelo do sistema de controle.	45
Capítulo IV – O Controlador Fuzzy	50
IV.1 – Introdução	50
IV.2 – Variáveis para o controlador	50
IV.3 – Funções de pertinência para o controlador proposto.	53
IV.4 – Processo de inferência	57
IV.5 - Processo de defuzzificação	60
Capítulo V – Resultados e Discussões	62
V.1 – Funcionamento do modelo de controle	62
V.2 - Efeito do tempo de atraso para o controle.	68
Capítulo VI – Conclusões	72
Referências Bibliográficas	74

Anexo A – Código das funções init01.m e maxarra1.m	79
A.1 – Função init01.m	79
A.2 – Função maxarra1.m	81
Anexo B – Código das funções sinc.c e seno.m	84
B.1 – Função sinc.c	84
B.2 – Função seno.m	85
Anexo C – Bloco Separador de Frequência.	87
Anexo D – Código da função getfreq.m	92
Abstract	94

Lista de Figuras

Figura 1	– Combustor tipo tubo de Rijke	15
Figura 2	– Versão de tubo de Rijke para pesquisa básica	16
Figura 3	– Tubo de Rijke original com estrutura de onda do modo acústico fundamental.....	17
Figura 4	– Sistema de aquisição de dados e instrumentação de controle ativo a ser utilizado no Tubo de Rijke.....	20
Figura 5	– Pressão e velocidade acústicas em um tubo de Rijke.....	22
Figura 6	– Diagrama em blocos do controlador dinâmico e disposição dos alto-falantes no tubo de Rijke	23
Figura 7	– Controle tradicional.....	26
Figura 8	– Funções de pertinência para variável de entrada.....	26
Figura 9	– Função de pertinência para variável de saída.....	27
Figura 10	– Fases de implementação da lógica difusa	28
Figura 11	– Processo de fuzzificação	29
Figura 12	– Processo de defuzzificação	31
Figura 13	– Método de defuzzificação do Centróide	32
Figura 14	– Método de defuzzificação do Menor dos máximos	32
Figura 15	– Método de defuzzificação do Maior dos máximos	33
Figura 16	– Método de defuzzificação da Média dos máximos	33
Figura 17	– Tela de entrada do Fuzzy Logic Toolbox	36
Figura 18	– Modelo do tubo de Rijke utilizado no Simulink	38
Figura 19	– Sinal senoidal interno ao tubo	39
Figura 20	– Sinal recebido do controle.....	39
Figura 21	– Sinal final dentro do tubo	39

Figura 22	– Sinal final dentro do tubo.....	41
Figura 23	– Resultado do bloco “ <i>Valor eficaz</i> ”	41
Figura 24	– Saída do bloco “ <i>Gerador de pressão</i> ”	42
Figura 25	– Sistema de controle	45
Figura 26	– Verificação da ordem de grandeza do nível de pressão em um tubo.....	51
Figura 27	– Resposta em pressão	52
Figura 28	– Variável de entrada “ <i>erro</i> ”	56
Figura 29	– Variável de entrada “ <i>vareerro</i> ”	56
Figura 30	– Variável de saída “ <i>amplitude</i> ”	57
Figura 31	– Sistema de controle	62
Figura 32	– Saída do bloco “ <i>Valor de referência</i> ”	64
Figura 33	– Onda interna ao tubo	64
Figura 34	– Valor RMS da onda interna ao tubo.....	64
Figura 35	– Erro de pressão.....	64
Figura 36	– Resposta do controlador para um impulso em sua entrada.....	65
Figura 37	– Sinal senoidal de pressão na saída dos alto-falantes	65
Figura 38	– Variação do erro.....	66
Figura 39	– Onda interna ao tubo e sinal senoidal dos alto-falantes	67
Figura 40	– Erro de pressão em uma menor escala.....	68
Figura 41	– Sinal interno ao tubo e sinal de controle para um atraso de 3 ms.....	69
Figura 42	– Erro de pressão para atraso de 3ms	69
Figura 43	– Sinal interno ao tubo e sinal de controle para um atraso de 2 ms.....	70
Figura 44	– Erro de pressão para atraso de 2ms	70

Figura 45 – Erro de pressão para diferentes tempos de atraso	71
Figura C1 – Separador de frequência.....	88
Figura C2 – Sinal senoidal interno ao tubo.....	88
Figura C3 – Saída do bloco “ <i>Derivada1</i> ”	89
Figura C4 – Saída do bloco “ <i>Derivada2</i> ”	89
Figura C5 – Frequência extraída do sinal de entrada.....	90

Lista de tabelas

Tabela 1 – Funções de pertinência para variáveis de entrada “erro” e “varerro”	55
Tabela 2 – Funções de pertinência para variável de saída “amplitude”	57
Tabela 3 – Representação das regras de inferência	58

Resumo

O presente trabalho descreve o estudo e o desenvolvimento de um sistema de controle utilizando lógica difusa para um combustor do tipo tubo de Hilke.

Durante o desenvolvimento do mesmo, realizou-se um estudo dos tipos de controle existentes para a combustão pilcente e foi proposto um modelo de regulação para o tubo, a ser utilizado pelo pacote Matlab e Simulink. Desenvolveram-se ainda alguns algoritmos existentes na literatura do simulador, para uma melhor análise. Uma planta de controle foi proposta e utilizada para o desenvolvimento do sistema de controle.

Um controlador fuzzy foi desenvolvido e suas funções de pertinência e regras de inferência estabelecidas. Os resultados mostram que a proposta é válida com o controlador convergindo dentro de um tempo de 0,2 segundos, considerando um atraso de processamento de 2 ms e 0,8 segundos para um atraso de 4 ms a partir de um impulso em sua entrada.

Palavras-chaves: Lógica Difusa, combustão, tubo de Hilke.

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. 94 p. Dissertação (Mestrado em Física) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Resumo

O presente trabalho descreve o estudo e o desenvolvimento de um sistema de controle utilizando lógica difusa para um combustor do 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 para o tubo, a ser utilizado pelo pacote Matlab e Simulink. Desenvolveram-se ainda blocos não existentes na biblioteca do simulador, para uso neste estudo. Uma planta de controle foi proposta e utilizada para o desenvolvimento do sistema de controle.

Um controlador fuzzy foi desenvolvido e suas funções de pertinência e regras de inferência estabelecidas. Os resultados mostraram que a proposta é válida com o controlador convergindo dentro de um tempo de 0,2 segundo, considerando um atraso de processamento de 2 ms e 0,8 segundo para um atraso de 4 ms, a partir de um impulso em sua entrada.

Palavras chaves: Lógica Difusa, combustão, tubo de Rijke.

Capítulo I – Instabilidade de Combustão

I.1 – Introdução

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, tais 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]. Para estudar o efeito das oscilações acústicas de pressão no processo de combustão e quantificar esses benefícios, torna-se necessário um sistema para queima associado a uma instrumentação adequada visando a análise e o controle dessas oscilações. Um combustor que permite a queima e o estudo das oscilações é conhecido como tubo de Rijke (figura 1).

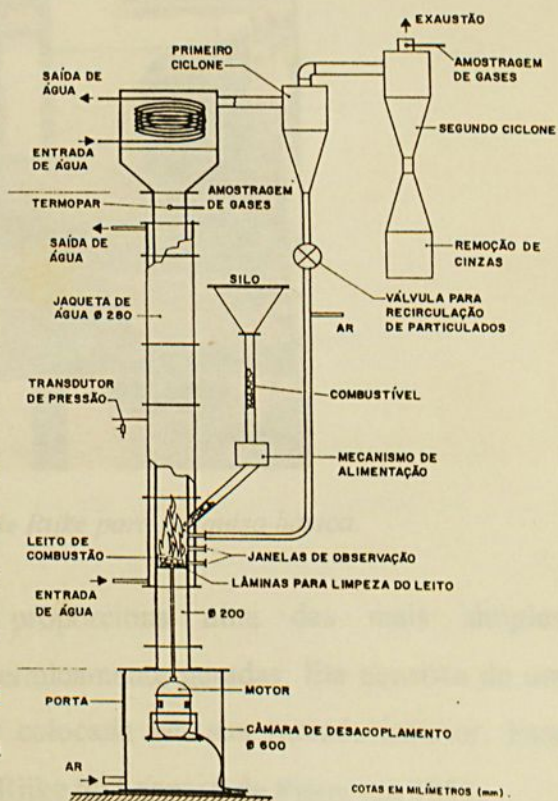


Figura 1 – Combustor tipo tubo de Rijke.

A figura 1 mostra um esquema desse combustor construído na unidade do INPE de Cachoeira Paulista e adaptado para queima de turfa peletizada. Essa versão, desenvolvida para pesquisa tecnológica, incorpora uma câmara para absorção de calor em seu topo e um sistema de retenção e reciclagem de particulados. Um outro combustor, também desenvolvido no INPE, para pesquisa básica, é apresentado na figura 2.

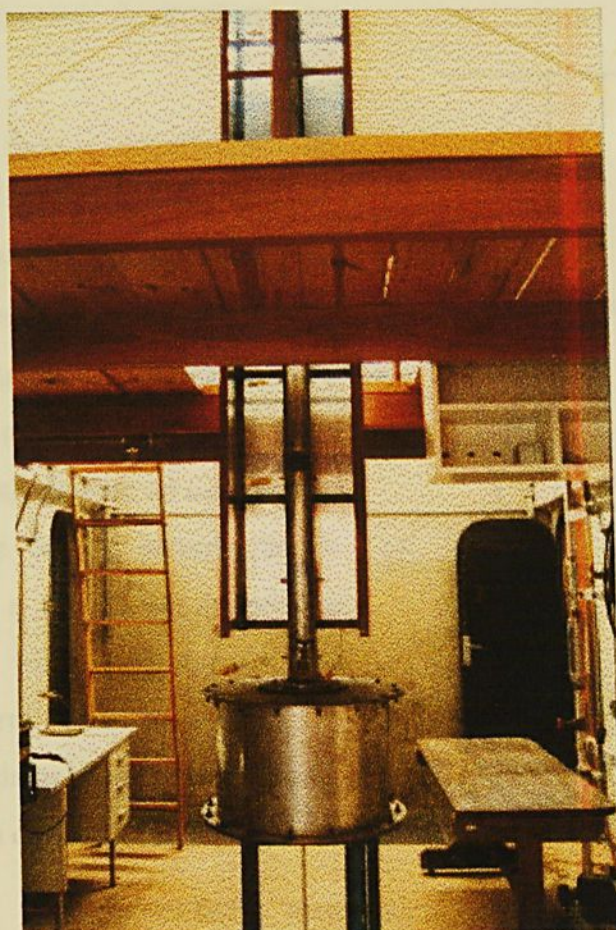


Figura 2 – Versão de tubo de Rijke para pesquisa básica.

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.

I.2 - Considerações Iniciais - Um Breve Histórico da Combustão Pulsante

Oscilações geradas termicamente em escoamentos foram descobertas por Higgins [2], com chamas sonoras de hidrogênio em tubos. Mais tarde, em 1859, Rijke [3] verificou que oscilações eram excitadas quando uma tela metálica aquecida era colocada na metade inferior de um tubo vertical aberto em ambas as extremidades. Um esquema do tubo de Rijke original com sua estrutura de onda fundamental é mostrado na Figura 3.

Uma condição para a amplificação de qualquer perturbação em um escoamento, com o conseqüente aparecimento de ondas características, é estabelecida pelo critério de Rayleigh [3]. Fisicamente, o critério afirma que, se a taxa de calor transferida periodicamente ao escoamento estiver em fase com a perturbação de pressão, então a amplitude de pressão aumentará. O valor limite para essa amplitude ocorre quando a taxa de energia absorvida pela onda característica se igualar à taxa de energia dissipada.

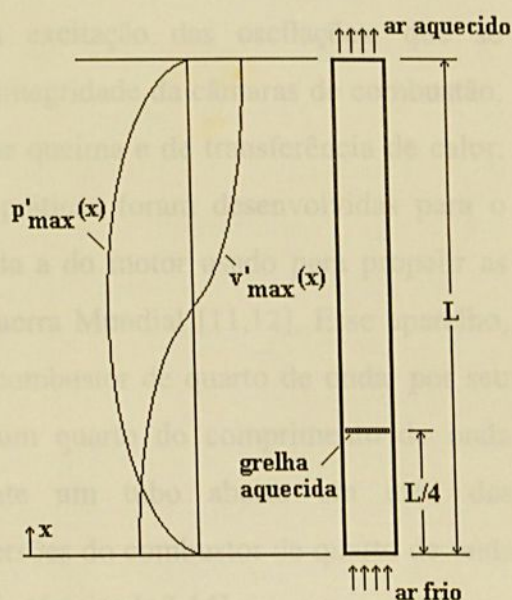


Figura 3 - Tubo de Rijke original com estrutura de onda do modo acústico fundamental

Uma formulação matemática para o critério Rayleigh foi proposta por Putnan e Dennis [4]. O critério, em sua formulação matemática, pode ser aplicado a uma fonte de calor distribuída [5], que sempre pode ser assumida como uma superposição de um número de aquecedores planos. O critério de Rayleigh foi usado por Carvalho et al [6] para determinar a localização da fonte de calor que maximizaria a amplitude de pressão acústica em um tubo de Rijke. A análise mostrou as posições do aquecedor que excitavam não somente o modo característico fundamental do tubo, mas também o segundo e o terceiro

harmônicos. Foi demonstrado, com comprovação experimental, que, para o modo característico fundamental, oscilações de pressão com máxima amplitude são excitadas quando o elemento aquecedor é colocado em $L/4$, sendo L o comprimento do tubo. Quando a fonte de calor para a geração de oscilações é uma chama ou um leito em combustão, tem-se o processo comumente chamado de instabilidade de combustão ou combustão pulsante. Várias pesquisas dedicaram-se a determinar as origens e as características da instabilidade de combustão em câmaras de motores foguete a propelentes sólidos [7-9] e líquidos [10]. O objetivo principal de tais estudos era prevenir a excitação das oscilações, que se constituem, em geral, em sérias ameaças à integridade da câmaras de combustão, por alterarem consideravelmente as taxas de queima e de transferência de calor. Por outro lado, muitas outras aplicações práticas foram desenvolvidas para o processo pulsante, sendo bastante conhecida a do motor usado para propelar as bombas alemãs V-1, durante a Segunda Guerra Mundial [11,12]. Esse aparelho, também chamado de tubo de Schmidt ou combustor de quarto de onda, por seu comprimento de câmara corresponder a um quarto do comprimento de onda fundamental característico, é basicamente um tubo aberto em uma das extremidades e fechado na outra. Outras versões do combustor de quarto de onda foram desenvolvidas para geração de energia térmica [13,14].

Outra aplicação da combustão pulsante foi introduzida por Severyanin [15] na então União Soviética e desenvolvida por Zinn e colaboradores [16-21] nos Estados Unidos a partir de 1979. O combustor recebeu a denominação de combustor tipo Rijke, por consistir de um tubo de Rijke cuja grelha metálica foi substituída por um leito em combustão. O combustor queimava carvão mineral e madeira, buscando incorporar a simplicidade do projeto às vantagens econômicas da combustão pulsante, como altas taxas de consumo de combustível [14,15] e de transferência de calor [22,23] e baixas taxas de geração de poluentes [24,25]. A partir de 1985, novas versões do combustor foram desenvolvidas no Brasil, nas quais foram testados o álcool etílico [26], carvão vegetal [27], turfa peletizada [28] e casca de dendê [29].

I.3 - O Controle da instabilidade da Combustão - Estudos Realizados

Uma importante vertente das pesquisas voltadas para o estudo da combustão se centra ao redor da 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 e usado, por Heckl [30] para ativamente controlar e eliminar a instabilidades dentro de um combustor de tubo de Rijke. Ela tem estudado a estabilidade de um sistema realimentado e os resultados de seus testes, num tubo de Rijke, mostram uma diminuição nas oscilações das chamas guiadas por mais de 40 dB. Poinso et al [31] têm, também, usado o conceito de interferência destrutiva e realimentação para suprimir instabilidades de combustão. Eles testaram sua teoria ativa de controle de instabilidade num combustor turbulento de 250 kW e acharam que o nível de pressão de som pode ser reduzido por mais de 20 dB. Em [32], os autores anotaram vários 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 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 de combustão, influenciado por um campo acústico 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 em instabilidades de combustão. A figura 4 apresenta



um esquema da instrumentação que pode ser empregada usando a aquisição e controle dos parâmetros associados à combustão pulsante.

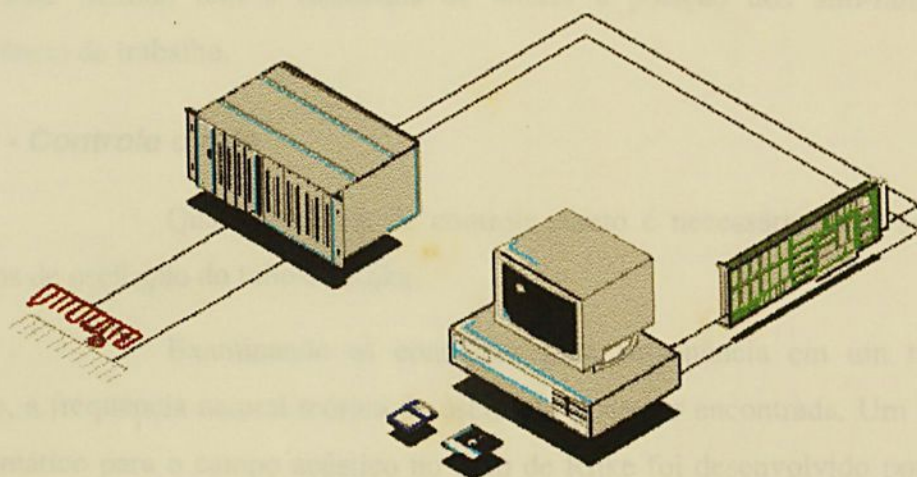


Figura 4 - Sistema de aquisição de dados e instrumentação de controle ativo a ser utilizado no Tubo de Rijke.

Desse modo pode-se definir uma pressão e colocar o tubo a oscilar nessa pressão pré estabelecida através desse 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 está estabelecida 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 da ocorrência da repetibilidade [33].

1.4 - Métodos de controle de instabilidade de combustão

1.4.1 Introdução

Fundamentalmente existem dois métodos de controle para modificar a onda acústica no interior do combustor de Rijke. O primeiro método é a modulação direta do campo de pressão acústica pelo meio de alto-falantes. Esse método é chamado como controle direto[34]. O segundo método usa modulação

de combustível para modular 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 tem a facilidade de alterar a posição dos alto-falantes e frequência de trabalho.

1.4.2 - Controle direto

Quando se fala de controle direto é necessário falar sobre os modos de oscilação do tubo de Rijke.

Examinando as condições para ressonância em um tubo de Rijke, a frequência natural teórica de oscilação pode ser encontrada. Um modelo matemático para o campo acústico no tubo de Rijke foi desenvolvido por [6,19] onde foi assumido que o tubo se comporta acusticamente como um tubo terminação aberta.

A equação 1 fornece as frequências naturais do tubo terminação aberta:

$$f_n = \frac{n}{2} \frac{c}{L_{\text{eff}}}, n = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

onde,

f – frequência em Hz,

n – número do modo,

c – velocidade da onda através do gás,

L_{eff} – comprimento efetivo do tubo ($L_{\text{eff}} = L + 0,6 a$),

L – comprimento do tubo,

a – diâmetro interno do tubo.

Esse comprimento efetivo parece ser insignificante quando se faz idéia que a velocidade da onda no gás, “c”, é dependente da temperatura do gás na qual varia com a posição, potência, combustível e estequiometria.

A figura 5 mostra uma visão simplificada dos modos de pressão acústica e velocidade em um tubo de Rijke, para o modo acústico longitudinal. Essa figura é uma simplificação de um complexo campo acústico o qual varia com a temperatura dentro do tubo, onde se pode visualizar as propriedades gerais de pressão e velocidade dentro do tubo de Rijke. Nessa figura, a linha central nos tubos representam o zero acústico de pressão e velocidade

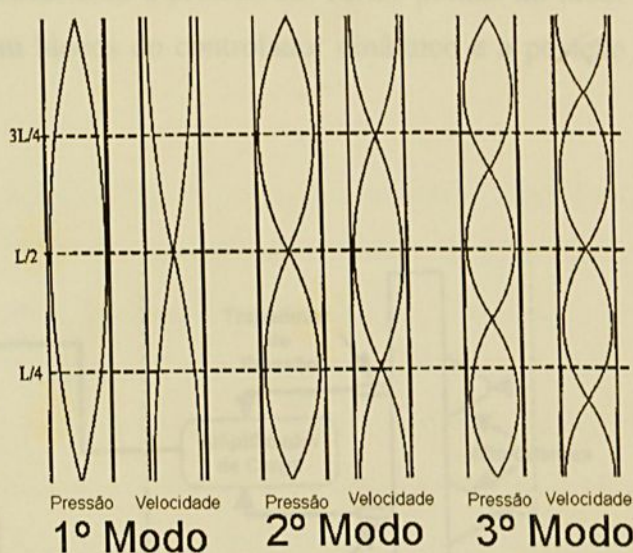


Figura 5 - Pressão e velocidade acústicas em um tubo de Rijke.

respectivamente. As máximas amplitudes são representadas nas paredes do reator permitindo visualizar a pressão acústica e velocidade como deslocamento de uma corda vibrando como mostrado. A amplitude de pressão para o primeiro e terceiro modos são maiores em $L/2$. Para o segundo modo a maior amplitude de pressão está em $3L/4$. Por causa da amplitude de pressão ser alta nessas posições é esperado que o controle mais efetivo (tanto para aumento como para atenuação) usando alto-falantes para esses modos seria nas respectivas posições. Posições do queimador tem mostrado ter um efeito direto na ocorrência natural dos modos no tubo.

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 onda de pressão existente no sistema. No controle direto do campo de som por alto-falantes a limitação de potência dos

atuadores ainda determina a controlabilidade. O limite de potência pode ser parcialmente resolvido por arranjo de atuadores em uma maneira onde múltiplos atuadores influenciem a mesma posição axial do tubo. Desse modo, alguns atuadores podem ser usados para influenciar a pressão em certos pontos no tubo. A figura 6 mostra um diagrama em blocos do controlador dinâmico e a posição dos alto-falantes no tubo de Rijke.

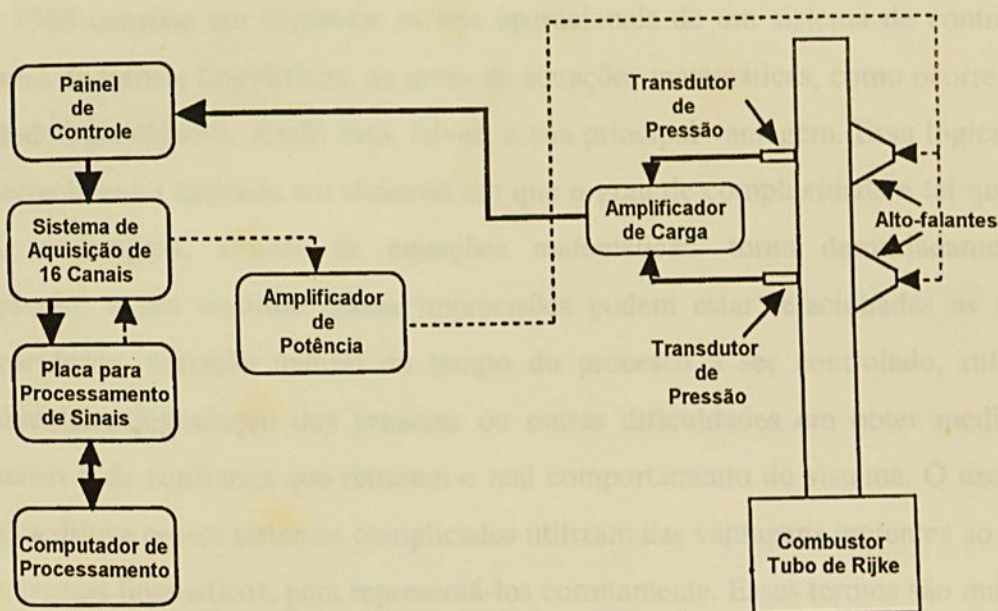


Figura 6 - Diagrama em blocos do controlador dinâmico e disposição dos alto-falantes no tubo de Rijke

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 de sua oscilação [35]. Outro fato relevante no controle direto é a necessidade de uma caixa para acomodar os alto-falantes de forma a direcionar a pressão do atuador para a região do tubo a ser controlada.

Um método de se fazer o controle direto da onda de pressão, e proposta nesse trabalho, é utilizando lógica difusa proposta por Zadeh [36].

Capítulo II – Considerações sobre a Lógica Difusa

II.1 – Introdução

A lógica difusa desenvolvida e proposta por Lotfi Zadeh [36] em 1965 consiste em expressar as leis operacionais de um sistema de controle através de termos lingüísticos, ao invés de equações matemáticas, como ocorre na metodologia clássica, sendo essa, talvez, a sua principal vantagem. Essa lógica é, principalmente, aplicada em sistemas em que o grau de complexidade é tal que a sua modelagem, através de equações matemáticas, torna demasiadamente impreciso o seu controle. Essas imprecisões podem estar relacionadas as não linearidades, variação natural do tempo do processo a ser controlado, ruídos ambientais, degradação dos sensores ou outras dificuldades em obter medidas precisas e de confiança que retratem o real comportamento do sistema. O uso da lógica difusa nesses sistemas complicados utilizam das vantagens inerentes ao uso dos termos lingüísticos, para representá-los corretamente. Esses termos são muitas vezes expressos na forma de implicações lógicas tal como regras contendo: “SE-ENTÃO”.

O termo “*lógica difusa*” (fuzzy logic) fornece a sensação de ser uma metodologia imprecisa onde a exatidão não é necessária ou importante, pois em um mundo grandemente manipulado por computadores, com seus conceitos absolutos de “1” e “0” e “on” e “off”, um termo como lógica difusa sugere inexatidão ou imprecisão. Porém, na prática, essa imprecisão não acontece [37]. A lógica difusa, ao contrário da lógica tradicional, utiliza conhecimentos recebidos a partir de especialistas, profundos conhecedores dos sistemas a serem controlados, para descreverem o funcionamento desses sistemas e orientarem o controle a ser implementado. Porém, o conhecimento a ser recebido dos especialistas também pode não ser transmitido de modo suficientemente claro. Assim, uma descrição

lingüística imprecisa da maneira de se controlar o sistema pode ser usualmente articulada pelo especialista com relativa tranquilidade. Uma descrição lingüística fácil de se usar, e que deve ser utilizada como norma pelos especialistas, consiste de um conjunto de regras do tipo:

SE A acontecer e B ocorrer, **ENTÃO** faça-se C

II.2 – Comparação entre a lógica difusa e a clássica

Para ilustrar a diferença existente entre a lógica difusa e a aproximação tradicional pode-se considerar um rápido exemplo retirado de [37]. Nesse exemplo, um ventilador deve ser controlado baseando-se nas seguintes condições:

- **SE** a temperatura do ar é ≥ 20 ° Celsius, **ENTÃO** ajuste a velocidade do ventilador para 1000 rpm
- **SE** a temperatura do ar é < 20 ° Celsius, **ENTÃO** ajuste a velocidade do ventilador para 100 rpm

Um controle tradicional confia em um ponto de decisão discreto. Nesse caso a entrada precisa alcançar um determinado valor (20 °C) antes de tomar uma decisão. A figura 7 mostra o diagrama do controlador tradicional exemplificado acima. Pequenas variações na entrada poderiam causar saídas drasticamente diferentes. É o que aconteceria caso a temperatura variasse em torno de 19,5 °C até 20,5 °C. Esses pontos de transição são críticos para sistemas tradicionais sendo onde a lógica difusa se supera.

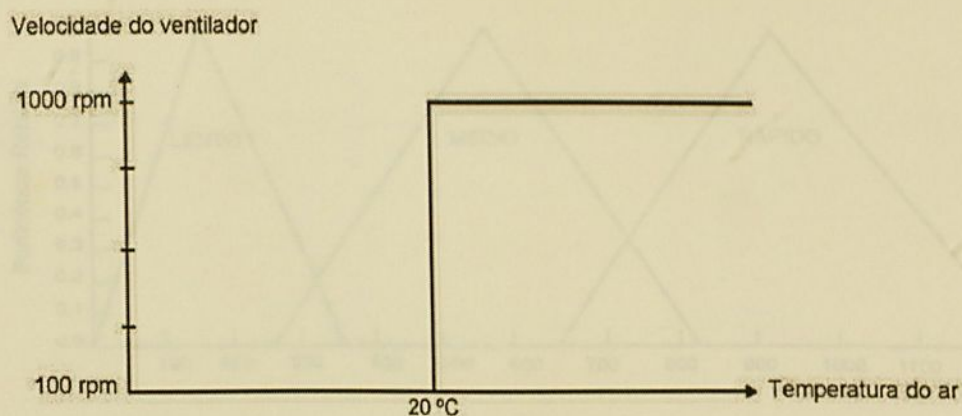


Figura 7 - Controle tradicional

Na lógica difusa os termos usados são os que se aproximam das condições diárias, como no caso do exemplo, para variáveis de entrada FRIO, MORNO e QUENTE ou para variáveis de saída LENTO, MÉDIO e RÁPIDO. Desse modo, os termos citados acima são parâmetros que definem faixas de valores conhecidos como funções de pertinência, normalmente variando entre 0 e 1. As figuras 8 e 9 mostram as funções de pertinência para variáveis de entrada e saída respectivamente.

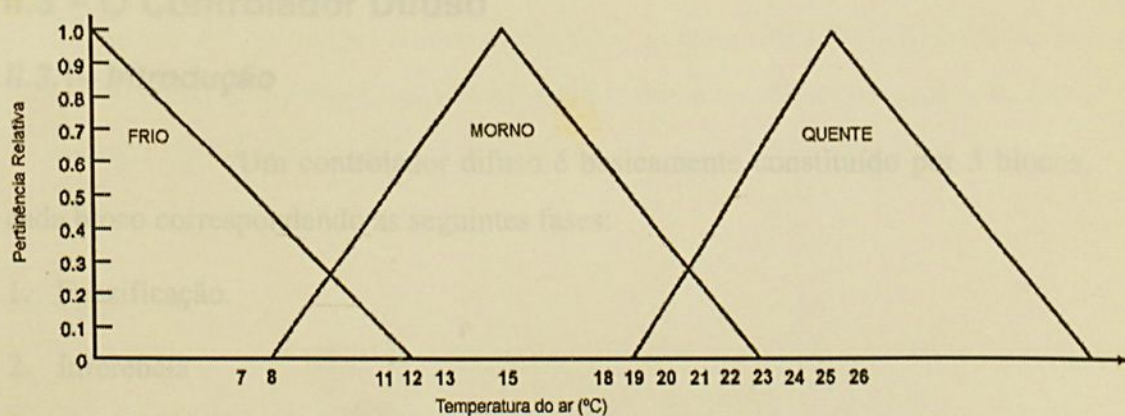


Figura 8 - Funções de pertinência para variável de entrada

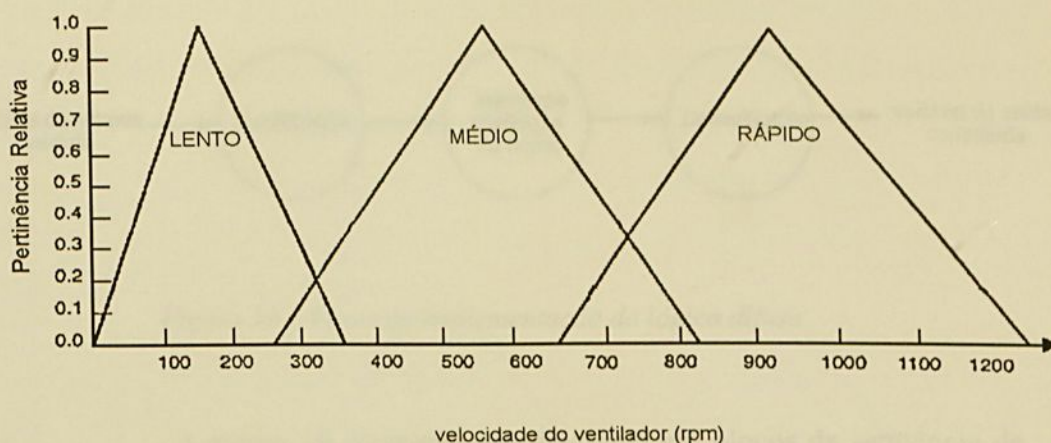


Figura 9 - Função de pertinência para variável de saída

Escolhendo uma faixa de valores ao invés de um simples valor discreto para definir a variável de entrada da temperatura do ar, é possível controlar a variável de saída da velocidade do ventilador mais precisamente.

Para descrição desse problema, são utilizadas regras do tipo:

- SE a temperatura do ar é MORNO, ENTÃO ajuste a velocidade do ventilador para MÉDIO

II.3 – O Controlador Difuso

II.3.1– Introdução

Um controlador difuso é basicamente constituído por 3 blocos, cada bloco correspondendo as seguintes fases:

1. Fuzzificação.
2. Inferência
3. Defuzzificação

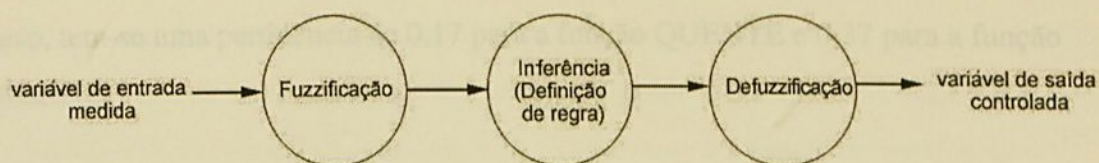


Figura 10 – Fases de implementação da lógica difusa

A figura 10 apresenta um diagrama em blocos da seqüência de implementação de um controlador baseado na lógica difusa (fuzzy). 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. Depois, essas medidas são convertidas em apropriados conjuntos difusos. Esse passo é chamado de fuzzificação. As medidas fuzzificadas serão então usadas pela fase de inferência para em conjunto com as regras de controle estabelecidas, definirem conjuntos difusos para a fase de defuzzificação. O resultado é um conjunto difuso (ou vários conjuntos difusos) definidos no universo de ações possíveis. 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 fuzzy em ciclos de controle individual. Aplicando-se os conceitos aqui colocados no exemplo apresentado em II.2 e analisando cada uma das fases tem-se:

Fuzzificação

Aplicando-se o exemplo do ventilador citado na página 25, tem-se que as funções de pertinência serão: FRIO, QUENTE e MORNO com suas faixas definidas na figura 11. Nessa fase são determinados os graus de pertinência, que variam entre 0 e 1, da variável de entrada da “temperatura do ar”, para cada função de pertinência (FRIO, MORNO ou QUENTE). Mais de uma função de pertinência pode estar ativa para uma determinada entrada. Para o exemplo, quando a variável de entrada da temperatura do ar estiver em 20 ° Celsius

implicará na ativação das funções de pertinência QUENTE e MORNO. Nesse caso, tem-se uma pertinência de 0,17 para a função QUENTE e 0,37 para a função MORNO.

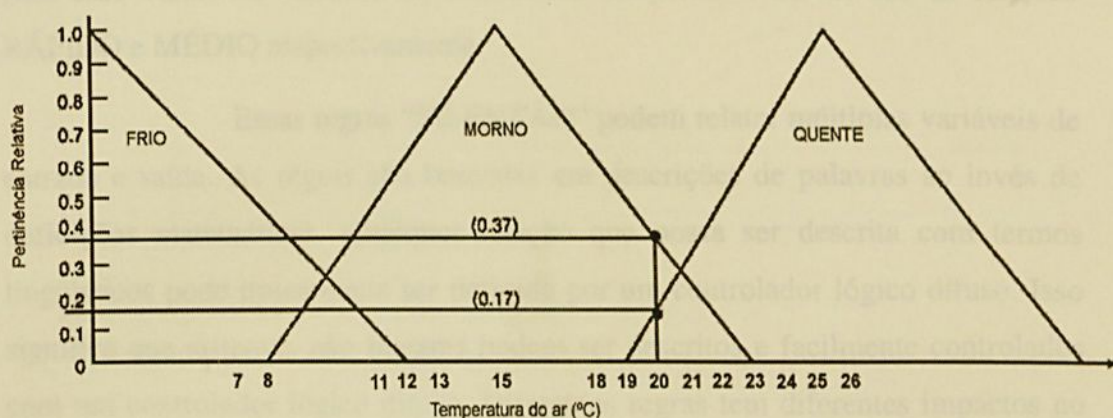


Figura 11 – Processo de fuzzificação

Inferência

Uma vez que funções de pertinência tendo sido definidas para variáveis de entrada e saída, uma base de regras de controle deve ser desenvolvida para relatar as ações da saída do controlador para as entradas observadas. Essa fase é conhecida como inferência ou definição das regras para a lógica difusa. Existem dois principais caminhos na qual as regras de inferência relevantes podem ser determinadas. Um modo é deduzir as regras através de operadores humanos experientes [38], e o outro é obter dados empíricos através de métodos de aprendizado adequado, geralmente com o uso de redes neurais [38]. Para o exemplo citado em II.2, algumas regras podem ser mostradas abaixo:

- **SE** a temperatura do ar é **FRIO**, **ENTÃO** ajuste a velocidade do ventilador para **LENTO**
- **SE** a temperatura do ar é **QUENTE**, **ENTÃO** ajuste a velocidade do ventilador para **RÁPIDO**
- **SE** a temperatura do ar é **MORNO**, **ENTÃO** ajuste a velocidade do ventilador para **MÉDIO**

Da fase de fuzzificação obtém-se as funções que foram ativadas devido ao valor da variável de entrada da temperatura do ar estar em 20 ° Celsius. Para esse valor de entrada foram ativadas as funções de pertinência QUENTE e MORNO. Das regras acima tem-se que as funções de pertinência de saída ativadas para esse valor, da variável de entrada da temperatura do ar, são as funções RÁPIDO e MÉDIO respectivamente.

Essas regras “SE-ENTÃO” podem relatar múltiplas variáveis de entrada e saída. As regras são baseadas em descrições de palavras ao invés de definições matemáticas. Qualquer relação que possa ser descrita com termos lingüísticos pode tipicamente ser definida por um controlador lógico difuso. Isso significa que sistemas não lineares podem ser descritos e facilmente controlados com um controlador lógico difuso. Diferentes regras tem diferentes impactos no controlador, de acordo com a medida da variável de entrada.

Defuzzificação

Após o controlador lógico difuso avaliar as entradas e aplicar as regras para essas entradas, é necessário gerar uma saída para o sistema que está sendo controlado. Isso pode significar ajustar uma tensão ou uma corrente para um valor particular, de forma a controlar a velocidade de um ventilador, ou a velocidade ótima de um braço robótico quando ele está próximo do alvo. O controlador lógico difuso necessita converter suas variáveis internas de saída em valores discretos que podem ser usados pelo sistema controlado. Como determinado na fase de inferência, para o valor da variável de entrada da temperatura do ar de 20 ° Celsius, as funções de pertinência de saída ativadas foram RÁPIDO e MÉDIO, com pertinências respectivas de 0,37 e 0,17. Dessa forma obtém-se os valores da variável de saída da velocidade do ventilador. Para a função de pertinência RÁPIDO os valores encontrados para a variável de saída foram 680 rpm e 1200 rpm. Para a função de pertinência MÉDIO os valores encontrados para a variável de saída da velocidade do ventilador foram 375rpm e 710 rpm. A figura 12 ilustra o que foi explicado acima.

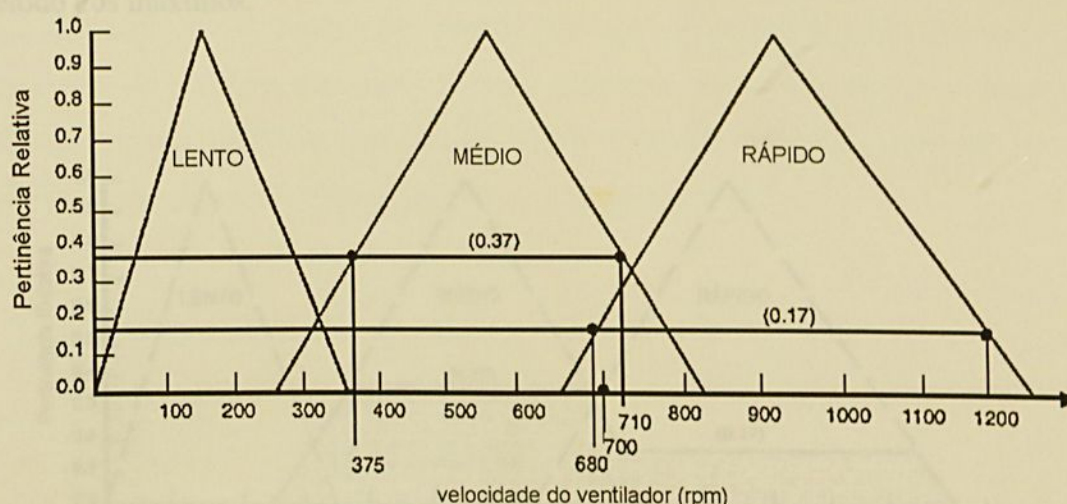


Figura 12 – Processo de defuzzificação

Da figura 12 percebe-se que se obteve diversos valores da variável de saída para a velocidade do ventilador. É necessário extrair um valor que seja útil para o sistema. A essa conversão dá-se o nome de defuzzificação. Existem vários métodos de defuzzificação apresentados na literatura [38]. Um dos métodos de defuzzificação utilizado é o método dos máximos. Nesse método, o máximo valor de pertinência relativa é usado para determinar o valor numérico para a saída do controlador. Dessa forma, no exemplo aqui utilizado, são encontrados dois valores para essa variável de saída: 375rpm e 710 rpm. Um dos inconvenientes do método de defuzzificação que utiliza os máximos são as soluções múltiplas.

Um outro método de defuzzificação utilizado é o método do centróide (ou método do centro de gravidade, ou método do centro de área), sendo esse o mais bem conhecido método de defuzzificação [39]. Esse método é computacionalmente mais complexo e por essa razão implica em ciclos de inferência mais lentos. Nele todos os valores de pertinência relativos a um valor da variável de entrada são utilizados, formando uma figura geométrica (figura 13). Dessa forma é calculado o valor do centróide dessa figura geométrica, sendo que, o valor encontrado para o exemplo citado é de 635 rpm. A vantagem do método

de defuzzificação do centróide é a eliminação de saídas múltiplas, como no método dos máximos.

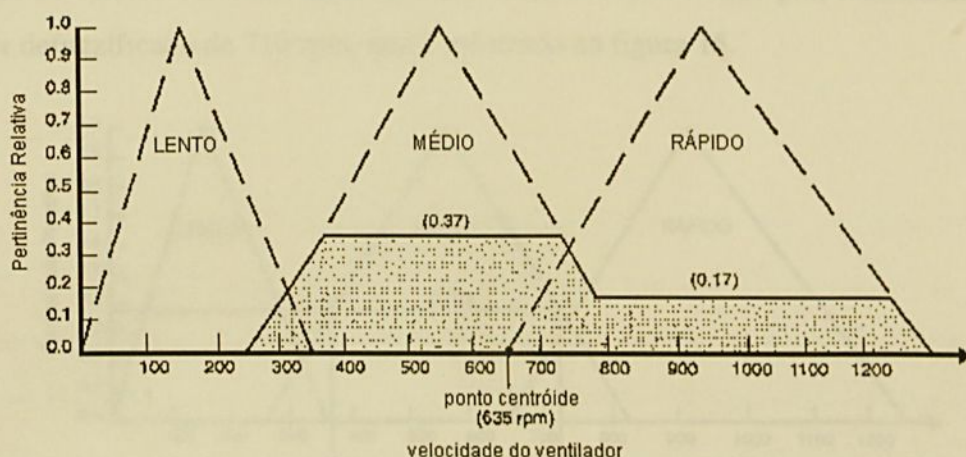


Figura 13 - Método de defuzzificação do Centróide

O método do menor dos máximos também é usado para se fazer a defuzzificação. Esse método toma o menor valor defuzzificado da máxima pertinência relativa do processo de defuzzificação. Para o caso do exemplo, a máxima pertinência relativa tem o valor de 0,37 e dessa forma os valores defuzzificados obtidos foram 375rpm e 710 rpm, resultando no valor defuzzificado de 375 rpm. Isso é mostrado na figura 14.

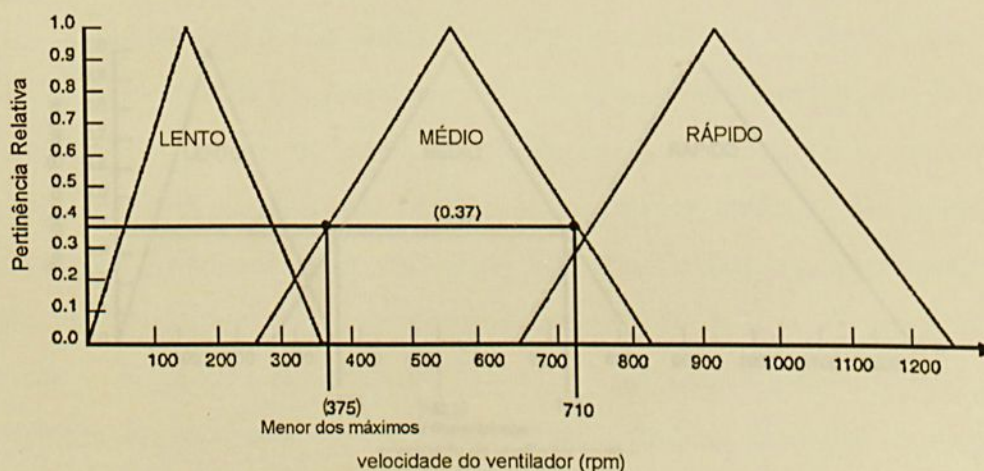


Figura 14 - Método de defuzzificação do Menor dos máximos

Por sua vez, o método do maior dos máximos toma o maior valor defuzzificado da máxima pertinência relativa do processo de defuzzificação. Para o caso do exemplo, a máxima pertinência relativa tem o valor de 0,37 e dessa forma os valores defuzzificados obtidos foram 375rpm e 710 rpm, resultando no valor defuzzificado de 710 rpm, que é mostrado na figura 15.

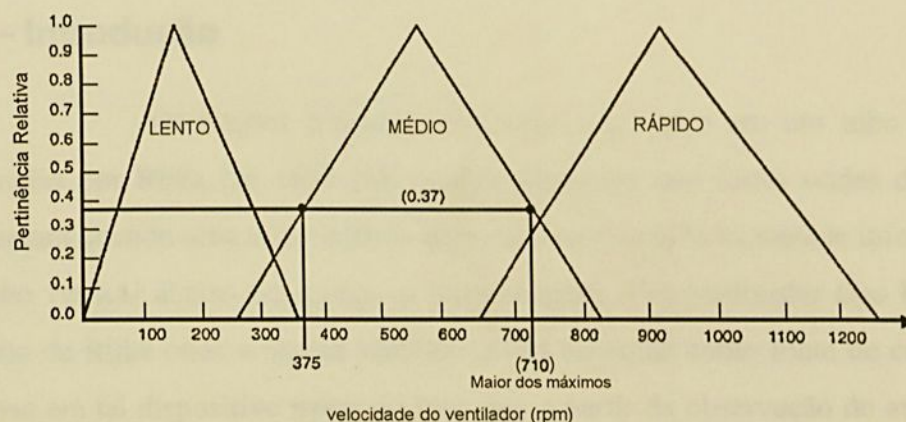


Figura 15 - Método de defuzzificação do Maior dos máximos

O método da média dos máximos, é muito similar ao método do menor e maior dos máximos. Ao invés de determinar o menor ou o maior valor defuzzificado da máxima pertinência relativa ao processo de defuzzificação, esse método toma média desses dois valores. Dessa forma, o valor defuzzificado obtido, para o exemplo citado, é 542,5 rpm, representado na figura 16.

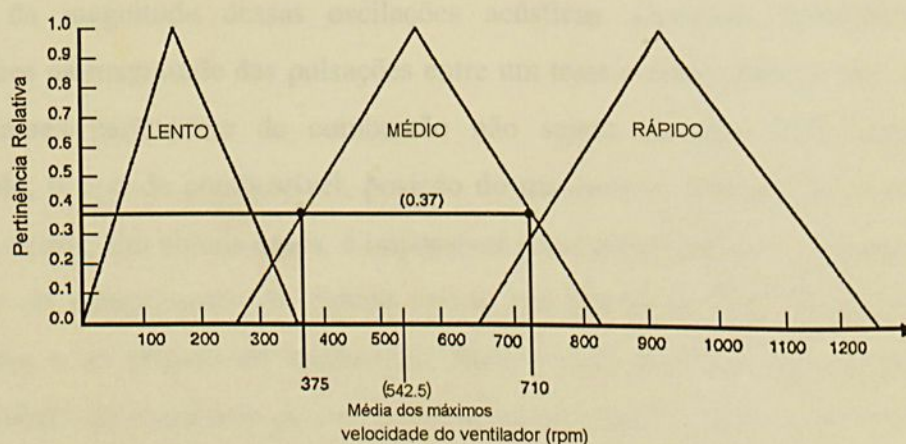


Figura 16 - Método de defuzzificação da Média dos máximos

Capítulo III – Modelagem do Sistema de Controle para a Ferramenta Utilizada.

III.1 – Introdução

Oscilações acústicas originadas por calor em um tubo foram observadas por Rijke em 1859 [3], quando observou que fortes ondas de som apareceram quando uma tela metálica aquecida era colocada na metade inferior de um tubo vertical aberto em ambas as extremidades. Um combustor tipo Rijke é um tubo de Rijke onde a chama substitui a tela aquecida como fonte de calor. O interesse em tal dispositivo nasce do fato que, a partir da observação do aumento das taxas de transporte de calor, massa e momento causado pelas oscilações acústicas, quando pulsações estão presentes, a combustão acontece de modo mais eficiente e com maior intensidade. Além das taxas de transferência de calor serem aumentadas significativamente, a formação de poluentes é diminuída consideravelmente.

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 dessas oscilações acústicas. Ocorrem, freqüentemente, variações na magnitude das pulsações entre um teste e outro, mesmo que os mais importantes parâmetros de combustão não sejam trocados [33], como por exemplo, o tipo de combustível, posição do queimador, potência do combustor, dentre outros. Em alguns casos, é impossível gerar pulsações sem a ajuda externa, devido ao comprimento da chama criada em função do tipo de combustível utilizado e ao projeto do queimador. Essa é uma das principais razões para necessidade da existência de um controle para o sistema. Esse tipo de controle para o tubo de Rijke é conhecido como controle ativo.

Para o desenvolvimento de um controle ativo, utilizando lógica

difusa, como é a proposta desse trabalho, foi necessário criar um modelo para o tubo de modo que esse modelo pudesse vir a ser utilizado em um simulador e, com isso, propiciasse que se encontrasse os parâmetros que virão a definir as principais características do sistema, quando da implementação desse controle. O simulador escolhido para o desenvolvimento do sistema de controle foi o Matlab juntamente com o Simulink agregado ao toolbox fuzzy [40].

III.2 – Ferramenta de Simulação

O Simulink é um pacote computacional integrante do software Matlab para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Ele suporta sistemas lineares e não lineares, modelados em tempo contínuo, tempo amostrado ou uma junção dos dois. Os sistemas podem ser também multi-amostra, isto é, ter diferentes partes que são amostradas ou atualizadas em diferentes taxas de amostragem.

Para modelagem, o Simulink fornece uma “*interface gráfica para o usuário*” ou GUI, do inglês “*graphical user interface*”, para construir modelos como diagramas em bloco. Através dessa interface pode-se construir modelos como o aqui proposto. Essa ferramenta fornece, além da biblioteca presente no software, a possibilidade de criar blocos próprios para funções específicas não presentes na biblioteca. Após definir o modelo, pode-se simulá-lo utilizando de comandos apresentados nos menus de trabalho ou através de comandos na área de trabalho do MATLAB. Os menus apresentados são convenientes para uso de trabalhos interativos, enquanto que linhas de comando na área de trabalho do MATLAB são úteis para se rodar uma série de simulações. Utilizando blocos de simulação que fornecem resultados apresentados em tela, pode-se acompanhar todo o processo enquanto a simulação está ocorrendo. Além disso, ele permite a troca de parâmetros e possibilita imediata visualização do ocorrido na simulação. Os resultados podem ser colocados na área de trabalho do MATLAB para pós processamento e visualização. Esses dois programas (MATLAB e SIMULINK) estão integrados, o que permite simular, analisar e



revisar modelos em ambos ambientes de trabalho.

Uma das características principais desse pacote é o trabalho em conjunto. Como resultado disso pode-se acessar diretamente uma larga faixa de ferramentas para geração, análise e otimização de sistemas implementados. Essas ferramentas incluem o MATLAB Application ToolBoxes (pacote de ferramentas), uma coleção de arquivos de funções, para trabalhar em determinadas classes particulares de problemas. Um pacote de ferramentas utilizado no processo de simulação foi o “*Fuzzy Logic Toolbox*.” A figura 17 apresenta a tela de entrada desse pacote.

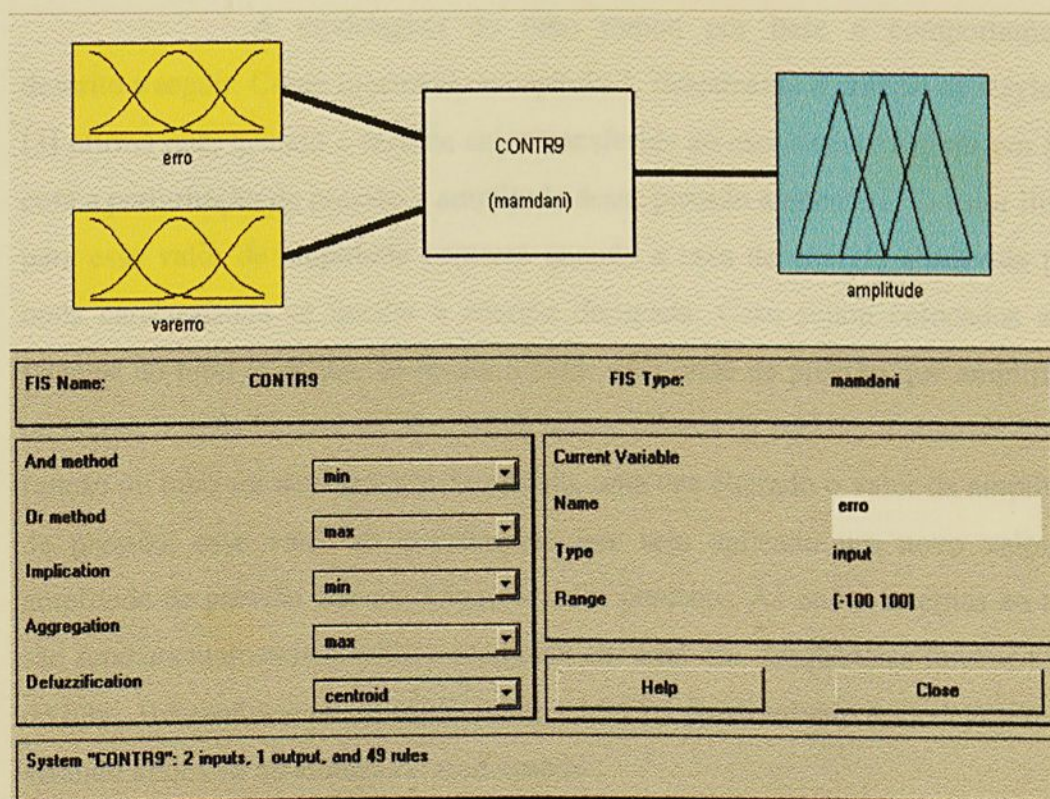


Figura 17 – Tela de entrada do Fuzzy Logic Toolbox

O pacote de ferramentas para a lógica difusa fornece um completo conjunto de funções baseadas em interface gráfica de modo a facilitar ao usuário projetar, simular e analisar sistemas de inferência difusa. Através do “*Fuzzy Logic Toolbox*” é possível criar e editar sistemas de inferência fuzzy. A

relação entre a entrada e a saída das funções ficam fáceis de ser mapeadas, através desse programa, principalmente aquelas com complexidade arbitrária, com regras e relações especificadas em linguagem natural. Para o usuário, o pacote fuzzy consiste de uma interface gráfica de entrada onde os valores recebidos serão submetidos às funções de pertinência especificada pelo mesmo. Pode-se definir funções de pertinência do tipo triangular, trapezoidal, sigmoidal, dentre outras.

III.3 – Modelagem do Tubo de Rijke

III.3.1 – Considerações iniciais

A modelagem do tubo tomou por base o comportamento descrito a seguir. Como mostrado no capítulo 1, fisicamente o critério de Rayleigh [3] afirma que, quando a taxa de calor transferida ao escoamento estiver em fase com a perturbação de pressão a amplitude dessa pressão aumentará. O valor limite para esse valor de amplitude ocorrerá quando a taxa de energia absorvida pela onda característica se igualar a energia dissipada. Caso sejam colocados alto-falantes no tubo de Rijke, de forma a gerar uma onda de pressão que amplifique ou atenuie a onda interna ao tubo, esses novos valores de pressão manter-se-ão em função do tubo ser auto sustentado ou seja, uma vez alterado o valor da amplitude de pressão, esse valor se mantém até que seja aplicado um novo valor de amplitude de pressão que modifique o valor presente. 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.

III.3.2 – 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 18.

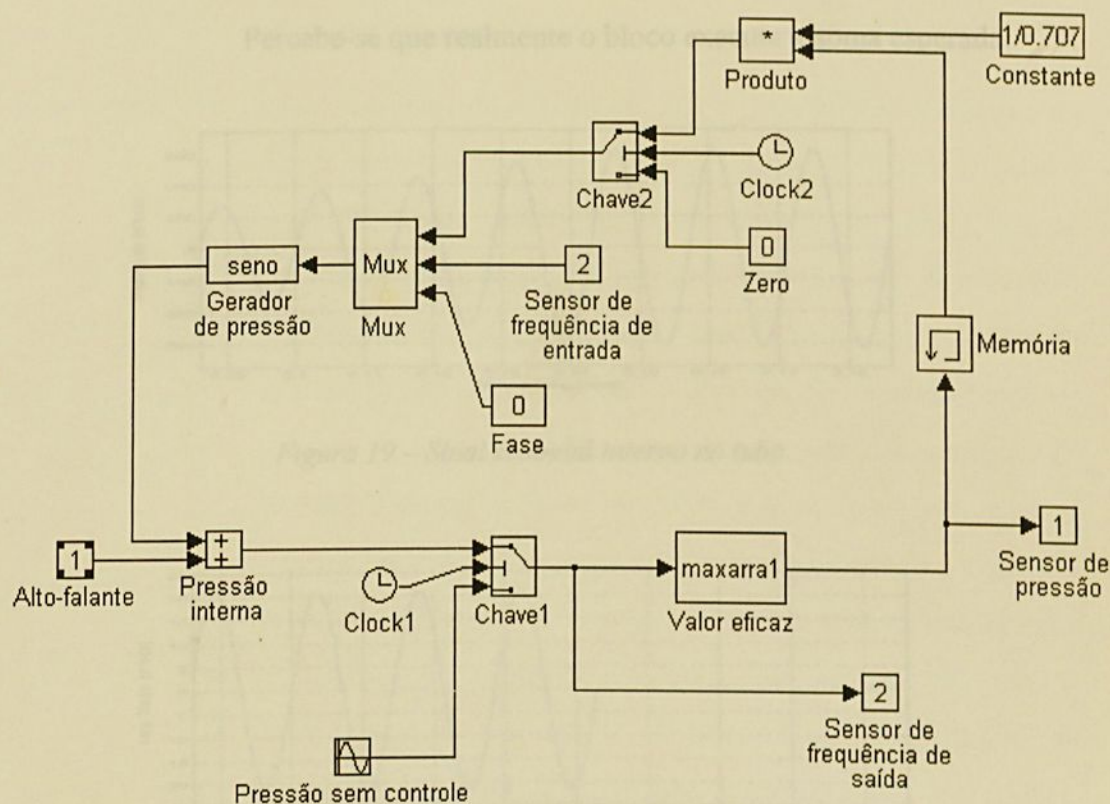


Figura 18 – Modelo do tubo de Rijke utilizado no Simulink

Nesse modelo, que corresponde ao tubo de Rijke, os blocos integrantes são:

Pressão interna – o bloco “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. O valor de amplitude na saída desse bloco corresponde ao valor que se obtém após o controle. As figuras 19, 20 e 21 representam o sinal senoidal, o sinal recebido do controle e o sinal final. Percebe-se que realmente o bloco executa a soma esperada.

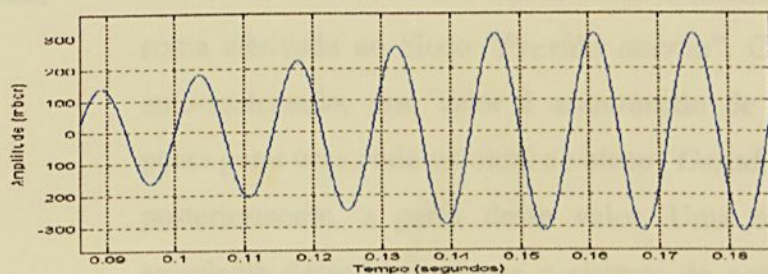


Figura 19 – Sinal senoidal interno ao tubo

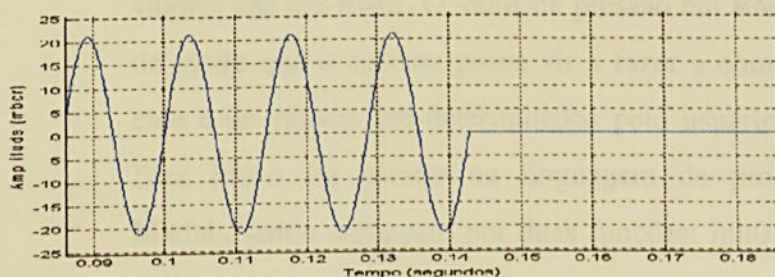


Figura 20 – Sinal recebido do controle

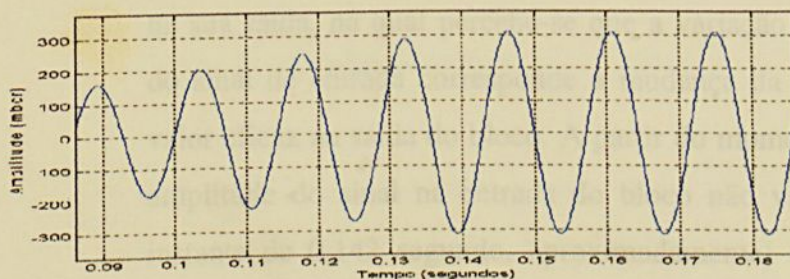


Figura 21 – Sinal final dentro do tubo

Pode-se ver na figura 21 que o sinal resultante da adição dos sinais das figuras 19 e 20 correspondem a soma ponto a ponto

dos mesmos. Quando o sinal de controle, mostrado na figura 20, é anulado, o sinal representado na figura 19 não mais modifica a sua amplitude, e a saída, representada na figura 21, mantém a sua amplitude, o que mostra que o modelo proposto representa de forma efetiva a auto-sustentação do tubo.

Valor eficaz –

esse bloco 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*”). Esse bloco foi gerado na linguagem de programação do Matlab, sendo composto por duas funções: *init01* e *maxarral*. A listagem dessas funções se encontram no anexo A. Na figura 22 é apresentado o sinal senoidal interno ao tubo colocado na entrada do bloco. A figura 23, por sua vez, mostra o resultado na sua saída, na qual percebe-se que a variação da amplitude do sinal de entrada corresponde a mudança da amplitude do valor eficaz na saída do bloco. A partir do momento em que a amplitude do sinal na entrada do bloco não varia mais (no instante de 0,142 segundo, aproximadamente) o valor RMS calculado na sua saída mantém-se constante. Através dessa figura (23) pode-se visualizar o efetivo funcionamento do bloco “*Valor eficaz*”. Esse bloco não consta da biblioteca original do pacote de simulação e maiores detalhes, em relação à sua geração, podem ser encontrados no anexo A.



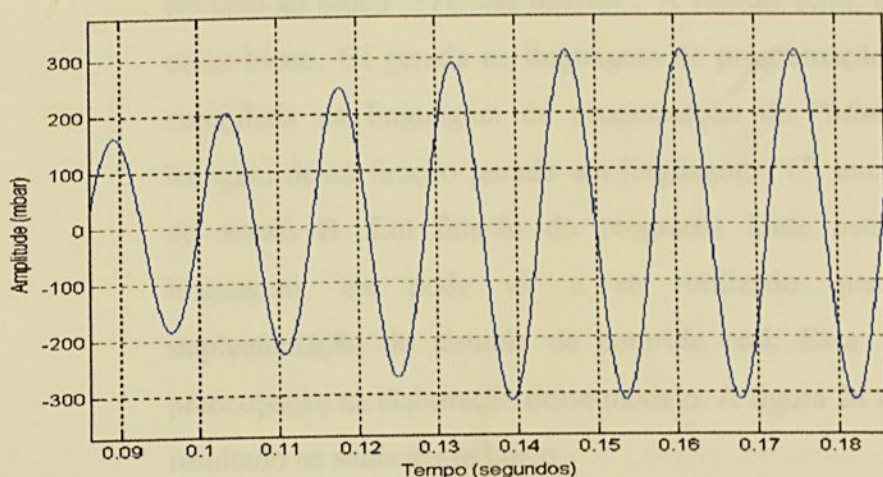


Figura 22 – Sinal final dentro do tubo

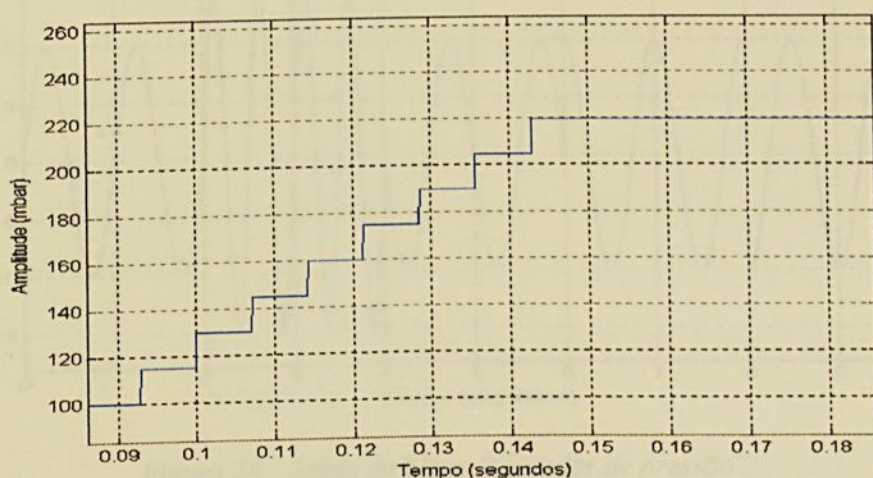


Figura 23 – Resultado do bloco "Valor eficaz"

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.

Gerador de pressão – bloco que gera uma onda senoidal a partir de sinais de amplitude recebido do bloco "memória", frequência recebida do "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”. A listagem dessa função gerada em linguagem “C” encontra-se no anexo B. Em função do programa fonte estar nessa linguagem, ele pode vir a ser utilizado quando da implementação do sistema de controle real. Essa foi uma preocupação na elaboração desse modelo. A figura 24 mostra o resultado na saída desse bloco.

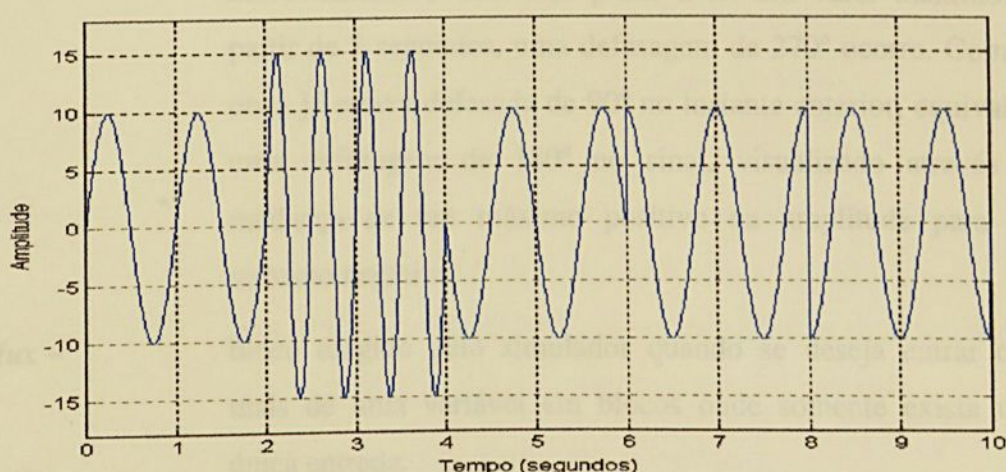


Figura 24 – Saída do bloco “Gerador de pressão”

Para se obter esse sinal, uma onda senoidal de amplitude 10 unidades de amplitude e frequência 1 Hz é apresentada entre os tempos 0 e 2 segundos, quando se colocou na entrada os seguintes parâmetros: amplitude 10 unidades de amplitude, frequência 1 Hz, fase 0° . Entre os tempos 2 segundos e 4 segundos, a amplitude da onda senoidal é elevada para o valor de 15 unidades de amplitude e a frequência da onda é dobrada (2 Hz), quando se colocou na entrada do bloco os parâmetros: amplitude 15 unidades de amplitude, frequência 2 Hz, fase 0° ,

o que pode ser visualizado através de 4 ciclos de ondas entre os instantes citados. No instante igual a 4 segundos, o valor da amplitude retorna ao valor 10 unidades de amplitude, pois colocou-se o parâmetro de entrada amplitude igual a 10. A frequência é retornada para o valor de 10 Hz. Colocou-se um sinal de fase, na entrada do bloco igual a 180° . Pode-se ver que ocorre a defasagem esperada no sinal de saída. Entre os instantes 6 segundos e 8 segundos de simulação, a fase foi deslocada de 90° , pois na entrada mudou-se o parâmetro fase. Pode-se visualizar na saída, que uma mudança na fase ocorre, pois essa onda senoidal estava com um valor nulo de amplitude nesse instante e com isso passa a ter um valor máximo. A partir de 8 segundos, uma defasagem de 270° ocorre. Como a onda já estava defasada de 90° no instante anterior, equivale a uma defasagem de 180° no sinal, visualizado através da mudança de um máximo positivo na amplitude para um máximo negativo.

- Mux* – bloco exigido pelo simulador quando se deseja entrar com mais de uma variável em blocos onde somente exista uma única entrada.
- Produto* – esse bloco transforma o valor RMS da onda senoidal armazenado no bloco “*Memória*” em valor de pico, através da multiplicação do valor obtido na saída do bloco “*Constante*”, para ser usado pelo bloco “*Gerador de pressão*”.
- Constante* – fornece o valor constante $1/0,707$.
- Fase* – fornece a fase do sinal a ser gerado pelo bloco “*Gerador de pressão*”.
- 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.
<i>Sensor de pressão –</i>	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.
<i>Sensor de frequência de entrada –</i>	terminal de entrada que recebe a frequência do sinal interno ao tubo, proveniente do bloco “ <i>Separador de frequência</i> ”.
<i>Sensor de frequência de saída –</i>	terminal de saída que fornece o sinal necessário ao bloco “ <i>Separador de frequência</i> ” visando obter o valor da frequência que será utilizado pelo bloco “ <i>Gerador de pressão</i> ”.
<i>Pressão sem controle –</i>	bloco que fornece uma onda senoidal, simulando uma onda interna ao tubo, sem que o controle esteja atuando.
<i>Chave1 –</i>	esse bloco representa uma chave, que libera o sinal interno ao tubo a partir do momento onde o controle é desejado.
<i>Clock1 –</i>	fornece a base de tempo para a simulação.
<i>Chave2 –</i>	da mesma forma que o bloco “ <i>Chave1</i> ”, o sinal obtido na saída do bloco é nulo até o sinal obtido do bloco “ <i>Clock2</i> ” atinja o valor pré-definido. A partir do momento em que o controle é desejado, o sinal é liberado.
<i>Clock2 –</i>	bloco que fornece o tempo de simulação.
<i>Zero –</i>	fornece o valor zero até o momento em que o controle desejado é acionado.

III.4 – Modelo do sistema de controle.

O sistema de controle foi projetado e testado utilizando o pacote de simulação apresentado no item III.2. O controle é baseado na lógica difusa, a qual fornece como saída um sinal de amplitude a ser gerado pelo alto-falante. A figura 25 apresenta a planta de controle desenvolvida nesse trabalho.

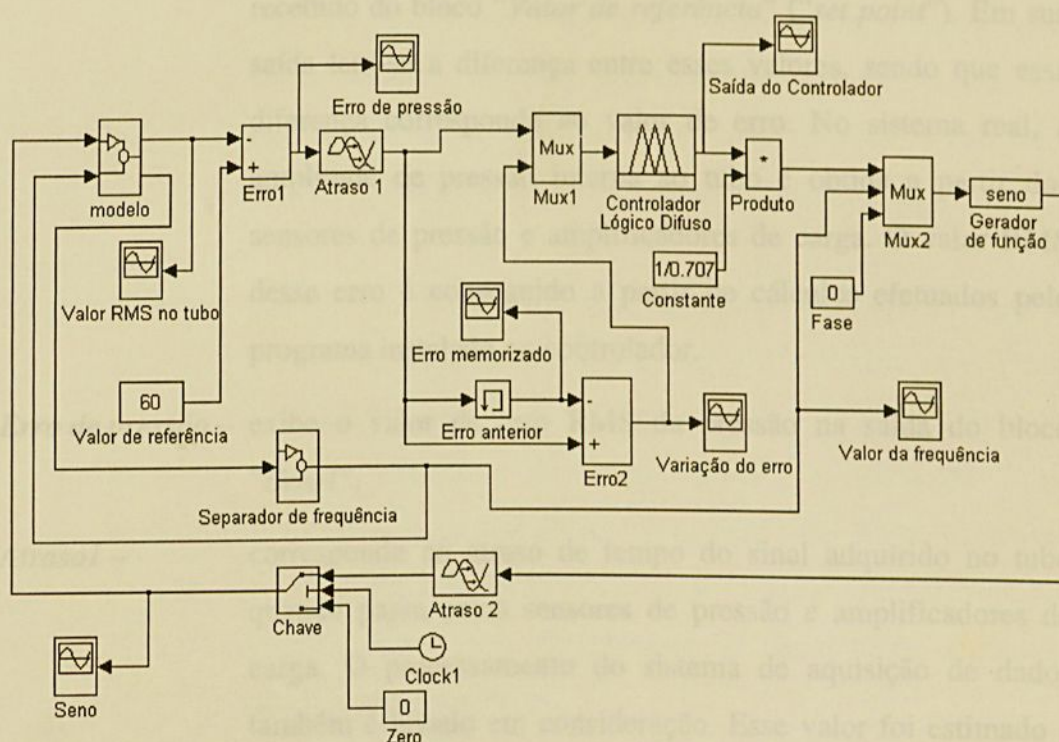


Figura 25 – Sistema de controle

Essa planta é constituída por uma série de blocos que representam os diversos equipamentos e processos atuantes no controle do tubo. Uma breve descrição de cada um deles 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*”, a ser utilizado pelos blocos “*Gerador de função*” e “*Gerador de pressão*” Um maior detalhamento desse bloco é encontrado no anexo C.

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.

Erro de pressão – exibe o valor de erro RMS da pressão na saída do bloco “*Erro1*”.

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 foi estimado e utilizado para simulação foi por volta de 1ms

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

Erro memorizado – exibe o valor do erro anterior em valor RMS, guardado no bloco “*Erro anterior*”.

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*”), colocada à disposição do bloco “*Controlador Lógico Difuso*”.
- Variação do erro* –
exibe o valor da variação do sinal do erro. Esse valor será utilizado como uma das variáveis de entrada para o controlador difuso.
- Mux1* –
bloco exigido pelo simulador quando se deseja entrar com mais de uma variável em blocos onde existe somente uma única entrada. Na planta proposta tem a função de fazer a ligação das variáveis “*erro*” e “*variação do erro*” (“*varerro*”) para a entrada do bloco “*Controlador Lógico Difuso*”.
- Controlador Lógico Difuso* –
bloco responsável pelo controle difuso do sistema. Recebe como variáveis de entrada “*erro*”, recebida do bloco “*Atrasol*”, depois de ter sido processada pelo bloco “*Erro1*” e “*varerro*” recebida do bloco “*Erro2*”. A saída do bloco “*Controlador Lógico Difuso*” fornecerá sinal RMS de pressão a ser gerada pelo bloco “*Gerador de função*”. As variáveis e a configuração básica da constituição desse bloco é melhor discutida no capítulo IV.
- Saída do Controlador* –
esse bloco exibe o sinal RMS de pressão na saída do bloco “*Controlador Lógico Difuso*”.
- Constante* –
fornece o valor constante 1/0,707.
- Produto* –
transforma o valor RMS de pressão da saída do bloco “*Controlador Lógico Difuso*” em valor de pico, através da multiplicação do valor obtido na saída do bloco “*Constante*”, que será utilizado pelo bloco “*Gerador de função*”.
- Fase* –
fornece a fase do sinal a ser gerado pelo bloco “*Gerador de função*”.



000396



- Mux2* – exigido pelo simulador quando se deseja entrar com mais de uma variável em blocos onde existe uma única entrada, sendo responsável pela junção dos sinais RMS de amplitude recebido do bloco “*Controlador Lógico Difuso*”, da frequência, proveniente do bloco “*Separador de frequência*”, e da fase.
- Valor da frequência* – exibe o valor da frequência recebida do bloco “*Separador de frequência*”.
- Gerador de função* – da mesma forma que o bloco “*Gerador de pressão*” do modelo proposto para o tubo, 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. Na sua saída tem-se o valor de pressão que será enviado ao bloco “*Pressão interna*” do modelo do tubo (figura 18), que representa no sistema real à pressão gerada pelos alto-falantes. Esse bloco foi gerado em linguagem “C”, servindo como base também para o bloco “*Gerador de pressão*”. A listagem desse programa encontra-se no anexo B. Em função desse programa fonte se encontrar em uma linguagem como a “C”, esse poderá vir a ser utilizado no futuro pelo programa de instrumentação virtual “*LabView*”. Esse programa será usado para implementar o “*software*” exigido para controlar o sistema. Desse modo espera-se o mesmo comportamento obtido na simulação, com o uso desse bloco para gerar o sinal senoidal que será aplicado ao tubo, seja obtido quando da implementação do sistema real.
- Atraso 2* – esse bloco simula o atraso de processamento computacional do sinal e bem como o atraso relativo ao amplificador de potência. Utilizou-se como parâmetro de simulação um atraso de 1ms.

- Chave* – define o momento em que o controle é desejado. Enquanto o valor no bloco “*Clock1*” não atingir o valor de disparo definido internamente, tem-se na saída o valor obtido do bloco “*Zero*”. Após atingir o valor de disparo tem-se na saída a onda de pressão gerada pelo bloco “*Gerador de pressão*”.
- Clock1* – fornece a base de tempo para simulação.
- Zero* – fornece zero na saída do controlador até o momento em que o controle é disparado.
- Seno* – exibe a onda de pressão senoidal na saída do controle, que no sistema real representa a onda de pressão na saída dos alto-falantes.
- Modelo* – esse bloco representa o modelo do tubo, já discutido anteriormente, onde são obtidos na sua saída os valores RMS de pressão interna ao tubo para ser usado no controle. O sinal senoidal 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 senoidal de pressão obtido do controle.
- Valor RMS no tubo* – exibe o valor RMS da onda de pressão interna ao tubo.

O funcionamento desse modelo de controle, bem como os resultados encontrados serão apresentados e discutidos no capítulo V.

Capítulo IV – O Controlador Fuzzy

IV.1 – Introdução

O controlador fuzzy, conforme visto no capítulo II, tem como uma de suas partes fundamentais, quando se quer aplicá-lo para controle de um sistema, o conjunto de regras simbólicas do tipo “SE-ENTÃO”, e funções de pertinência do tipo alto, médio, pequeno. Essas funções, em conjunto com os operadores “SE-ENTÃO”, são a base para a rapidez das implementações em tempo real, e também pela entrada desses tipos de controladores em ambientes dominados pelos controles convencionais que são essencialmente numéricos e que realizam o controle pretendido através de equações diferenciais, principalmente em sistemas não lineares. Com isso consegue-se obter um controle linear para um determinado sistema sem, necessariamente, conhecer as equações matemáticas que regem esse sistema. Essa é uma das maiores diferenças entre o controle clássico e o fuzzy, a substituição da utilização das técnicas baseadas em equações matemáticas por expressões lingüísticas.

Desse modo, o controlador fuzzy pode ser visto como um caminho para o estabelecimento de um sistema de controle não linear. Uma das vantagens do seu uso está associada à rapidez do desenvolvimento do projeto do sistema de controle pretendido. Esse fato resulta da existência de um conhecimento disponível sobre o processo ou estratégias de controle e os quais podem ser, naturalmente, expressos na forma de variáveis lingüísticas usadas nesses tipos de controladores.

IV.2 – Variáveis para o controlador

Como qualquer controlador, o fuzzy também necessita ter estabelecidas as variáveis que virão a ser parte integrante de seu projeto. Desse modo torna-se necessário especificar os seus valores, bem como as faixas de

grandeza de entrada e saída dessas variáveis, de modo a se poder ter, através da simulação, o quadro mais próximo possível do sistema real que virá a ser implementado. Assim, pode-se definir as seguintes variáveis de controle para o sistema proposto, bem como a suas faixas de valores:

Variável pressão

A faixa de pressão proporcionada pelo 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° . Esse valor foi estimado a partir de um sistema montado (figura 26) e que utiliza um gerador de funções, um amplificador de som, alto-falante, sensor de pressão e amplificador de carga. Com isso foi possível verificar a ordem de grandeza real do nível de pressão proporcionado pelo alto-falante.

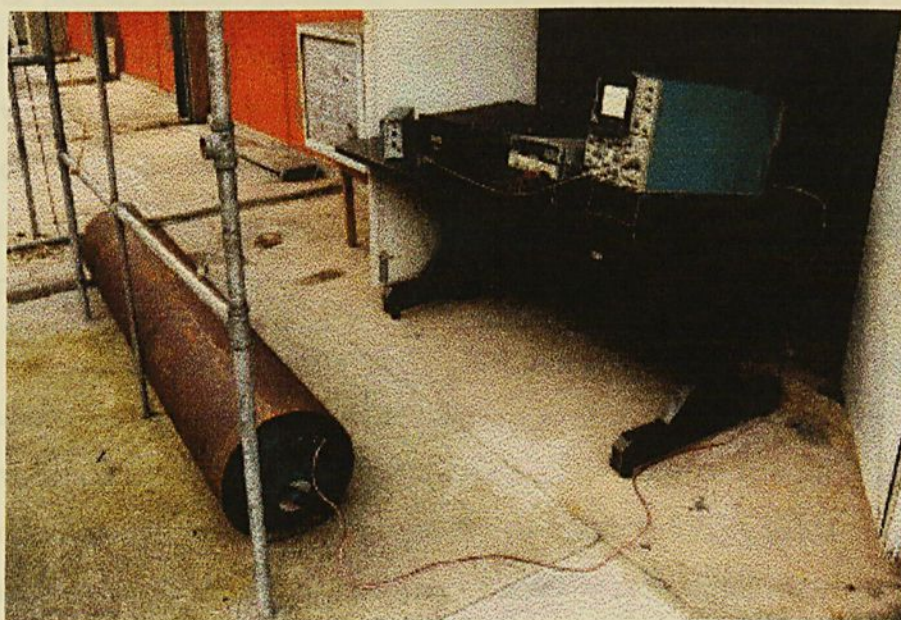


Figura 26 – Verificação da ordem de grandeza do nível de pressão em um tubo.

Nesta montagem experimental, uma onda senoidal de 1 Volt de pico, criada a partir de um gerador de funções, foi aplicada em um amplificador de potência e variou-se a tensão na entrada no alto-falante segundo valores apresentados na figura 27. O valor da frequência do sinal aplicado foi correspondente a frequência natural de oscilação do tubo (68 Hz)

Resposta em pressão

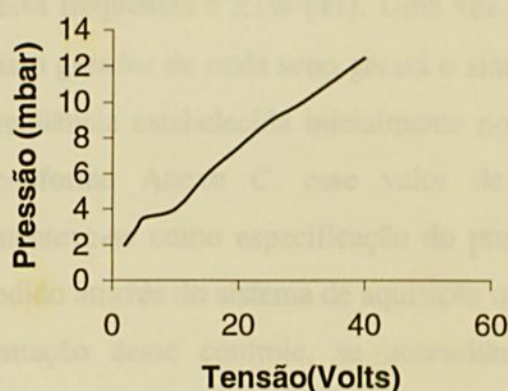


Figura 27 - Resposta em pressão

Para um valor de 30 Volts de pico na entrada do alto-falante, o sinal de pressão medido através do transdutor de pressão, colocado no centro do tubo e amplificado pelo respectivo amplificador de carga, foi de 10 mbar. Pôde-se observar que a aplicação de uma tensão de 40 V, implicará no recebimento da potência máxima que o alto-falante suporta, gerando uma pressão de 12,5 mbar. Porém, estipulou-se 10 mbar como valor de projeto por esse valor não sobrecarregar o sistema.

Para o controlador fuzzy proposto foi definida, a partir dos conhecimentos do funcionamento do tubo que se quer controlar a pressão [41] um sinal variando entre zero e 100 mbar. Essa 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. Como no modelo de simulação aqui proposto esses dois equipamentos não foram incluídos, deve-se ter, quando da realização da simulação do sistema, na saída do gerador de funções um sinal senoidal que corresponda a pressão de ± 10 mbar.

Variável frequência

A frequência em que o tubo oscilará fica em torno de 70 Hz e a variação em torno dessa frequência é $\pm 1\%$ [41]. Uma vez que a frequência está sendo controlada, pois o gerador de onda seno gerará o sinal que irá para o alto-falante a partir da frequência estabelecida inicialmente no bloco “*Pressão sem controle*”, obtida, conforme Anexo C, esse valor de frequência torna-se irrelevante. Porém, manteve-se como especificação do projeto pois, no sistema real seu valor será medido através do sistema de aquisição de dados. Desse modo, quando da implementação desse controle, se necessitará saber o valor da frequência de oscilação do tubo de modo a se desenvolver um eficiente método para a sua medida. É importante ressaltar que esse valor será utilizado no bloco, que virá a gerar a onda senoidal no sistema controlador. Desse modo, as especificações do sistema para o controle são:

Amplitude do sinal de entrada - zero e 100 mbar

Amplitude do sinal de saída - zero e 10 mbar

Frequência - 70 Hz

IV.3 – Funções de pertinência para o controlador proposto.

Funções de pertinência são curvas que definem como cada ponto de um espaço de entrada é mapeado para um determinado valor de pertinência, esses normalmente variando entre 0 e 1. As formas mais populares para as funções de pertinência são triangulares, trapezoidais e sigmoidais. Isso pode ser explicado pela facilidade com que os graus de pertinência de uma determinada variável podem ser obtidos, armazenados com o mínimo uso de memória e manipulados eficientemente, em termos de necessidade de tempo real pela fase de inferência [42]. Uma vez determinadas as formas das funções de pertinência, torna-se necessário fazer-se o mapeamento das variáveis lingüísticas no intervalo determinado. 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

Nesse trabalho adotou-se utilizar o erro e a variação do erro como variáveis de entrada para o sistema. A referência [43] mostra que utilizando esses tipos de variáveis e regras do tipo:

$$\begin{aligned}
 \text{SE } e(k) \text{ é } <\textit{simbologia apropriada}> \\
 \text{e } \Delta e(k) \text{ é } <\textit{simbologia apropriada}> \\
 \text{ENTÃO } u(k) \text{ é } <\textit{simbologia apropriada}>
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

o controlador fuzzy pode ser utilizado para fazer um controle do tipo PD como desejado. Onde se lê “*simbologia apropriada*”, na regra apresentada está a correspondência com o nome de uma variável lingüística.

Como o erro está associado a um tempo, para cada tempo de amostra k as regras do controle são avaliadas. Por motivo de simplicidade, omitiu-se a referência explícita para o tempo de amostragem k nas regras apresentadas, conforme mostrado em (3). Dessa forma, a representação simbólica para a regra acima é:

SE e é <simbologia apropriada>

e Δe é <simbologia apropriada>

ENTÃO u é <simbologia apropriada>

(3)

Desse modo, através desse modelo de regras pode-se obter um controle do tipo PD. No controlador proposto, as faixas de valores das funções de pertinência para as variáveis “erro” e “variação do erro” (“varerro”), estão apresentadas na tabela 1.

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]

A representação dessas variáveis é apresentada nas figuras 28 e 29 e para isso utilizaram-se as janelas do programa de simulação. A figura 28 mostra as funções para a variável “erro” e a figura 29, para a variável “variação do erro” (“varerro”)

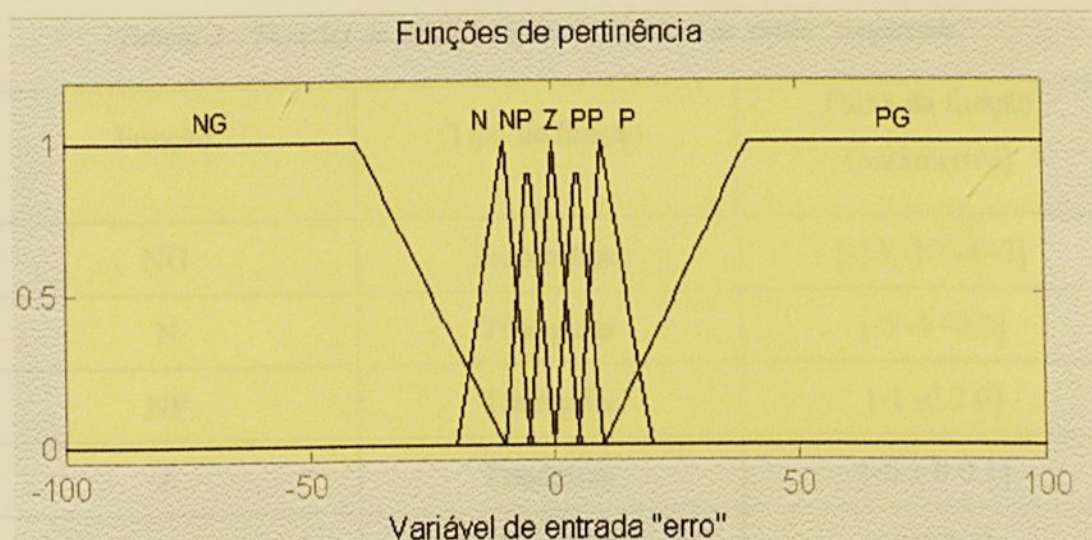


Figura 28 – Variável de entrada "erro"

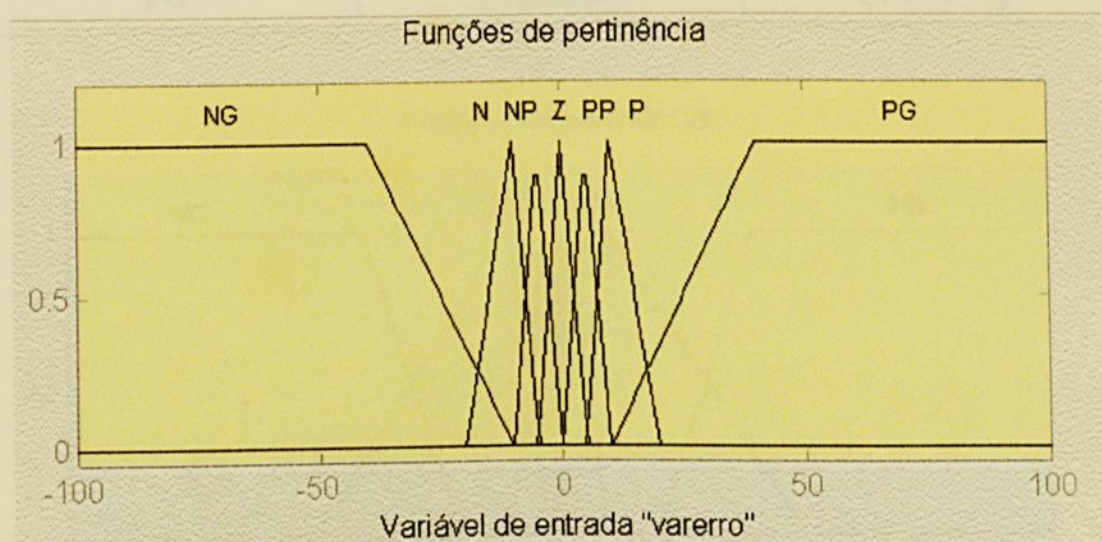


Figura 29 – Variável de entrada "varerro"

A variável de saída "*amplitude*", tem a sua faixa de valores e respectivas formas de funções de pertinência apresentadas na tabela 2. A representação gráfica dessas funções encontra-se na figura 30.

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

Função	Tipo de 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]

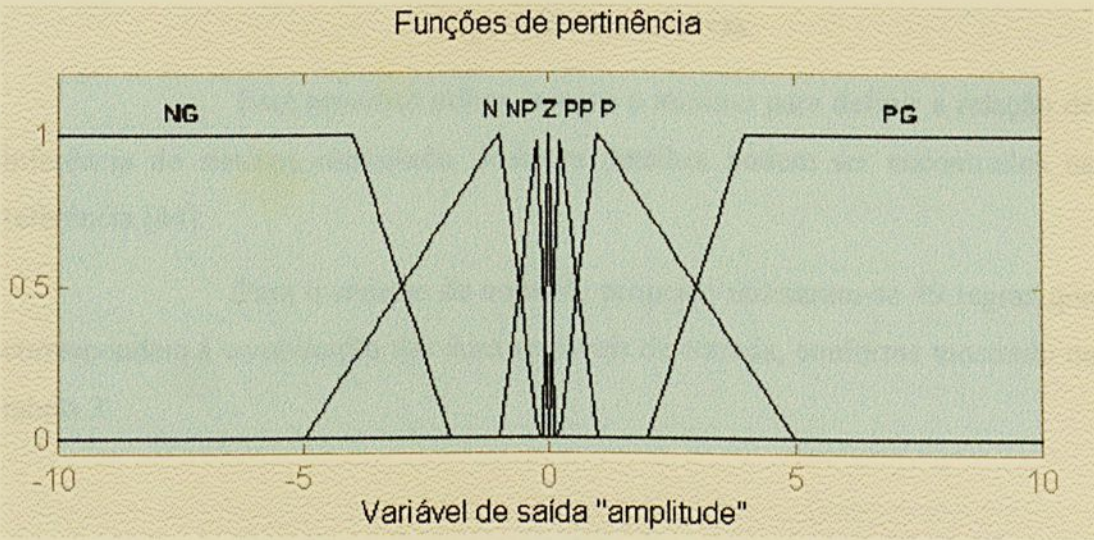


Figura 30 – Variável de saída “amplitude”

IV.4 – Processo de inferência

O processo de inferência utilizado na simulação é conhecido como Mandani, e foi proposto em 1975 por Ebrahim Mamdani [44]. Esse método foi o utilizado em um dos primeiros sistemas de controle construídos, baseados na teoria fuzzy e usando um conjunto de regras lingüísticas obtidas a partir de

experientes operadores humanos, em uma tentativa de controlar uma combinação de máquina a vapor e caldeira. A realização de Mandani foi baseada em um artigo de 1973, escrito por Lotfi Zadeh [45], que descreve algoritmos fuzzy para sistemas complexos e processos de decisão. O processo de inferência de Mandani é baseado na operação de intersecção, definido por:

$$\mu_R(x,y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (4)$$

onde:

$\mu_A(x)$ = grau de pertinência de uma variável x em relação a um conjunto difuso A

$\mu_B(x)$ = grau de pertinência de uma variável x em relação a um conjunto difuso B

$\mu_R(x,y)$ = mínimo do grau de pertinência entre duas pertinências relativas.

Esse processo utiliza sempre o mínimo para definir a relação de inferência do sistema controlado. Maiores detalhes podem ser encontrados na referência [44].

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

Tabela 3 – Representação 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

Desse modo esse sistema de controle, com 7 funções de pertinência para cada uma das duas variáveis de entrada e 7 funções para a variável de saída, tem-se 49 regras de controle, conforme mostradas abaixo:

1. **SE** (erro é NG) e (vareerro é NG) **ENTÃO** (amplitude é NG)
2. **SE** (erro é NG) e (vareerro é N) **ENTÃO** (amplitude é NG)
3. **SE** (erro é NG) e (vareerro é NP) **ENTÃO** (amplitude é NG)
4. **SE** (erro é NG) e (vareerro é Z) **ENTÃO** (amplitude é NG)
5. **SE** (erro é NG) e (vareerro é PP) **ENTÃO** (amplitude é NG)
6. **SE** (erro é NG) e (vareerro é P) **ENTÃO** (amplitude é NG)
7. **SE** (erro é NG) e (vareerro é PG) **ENTÃO** (amplitude é NG)
8. **SE** (erro é N) e (vareerro é NG) **ENTÃO** (amplitude é NG)
9. **SE** (erro é N) e (vareerro é N) **ENTÃO** (amplitude é N)
10. **SE** (erro é N) e (vareerro é NP) **ENTÃO** (amplitude é N)
11. **SE** (erro é N) e (vareerro é Z) **ENTÃO** (amplitude é N)
12. **SE** (erro é N) e (vareerro é PP) **ENTÃO** (amplitude é N)
13. **SE** (erro é N) e (vareerro é P) **ENTÃO** (amplitude é N)
14. **SE** (erro é N) e (vareerro é PG) **ENTÃO** (amplitude é NG)
15. **SE** (erro é NP) e (vareerro é NG) **ENTÃO** (amplitude é NG)
16. **SE** (erro é NP) e (vareerro é N) **ENTÃO** (amplitude é N)
17. **SE** (erro é NP) e (vareerro é NP) **ENTÃO** (amplitude é NP)
18. **SE** (erro é NP) e (vareerro é Z) **ENTÃO** (amplitude é NP)
19. **SE** (erro é NP) e (vareerro é PP) **ENTÃO** (amplitude é NP)
20. **SE** (erro é NP) e (vareerro é P) **ENTÃO** (amplitude é N)
21. **SE** (erro é NP) e (vareerro é PG) **ENTÃO** (amplitude é NG)
22. **SE** (erro é Z) e (vareerro é NG) **ENTÃO** (amplitude é NG)
23. **SE** (erro é Z) e (vareerro é N) **ENTÃO** (amplitude é N)
24. **SE** (erro é Z) e (vareerro é NP) **ENTÃO** (amplitude é NP)

25. SE	(erro é Z)	e	(vareerro é Z)	ENTÃO	(amplitude é Z)
26. SE	(erro é Z)	e	(vareerro é PP)	ENTÃO	(amplitude é PP)
27. SE	(erro é Z)	e	(vareerro é P)	ENTÃO	(amplitude é P)
28. SE	(erro é Z)	e	(vareerro é PG)	ENTÃO	(amplitude é PG)
29. SE	(erro é PP)	e	(vareerro é NG)	ENTÃO	(amplitude é PG)
30. SE	(erro é PP)	e	(vareerro é N)	ENTÃO	(amplitude é P)
31. SE	(erro é PP)	e	(vareerro é NP)	ENTÃO	(amplitude é PP)
32. SE	(erro é PP)	e	(vareerro é Z)	ENTÃO	(amplitude é PP)
33. SE	(erro é PP)	e	(vareerro é PP)	ENTÃO	(amplitude é PP)
34. SE	(erro é PP)	e	(vareerro é P)	ENTÃO	(amplitude é P)
35. SE	(erro é PP)	e	(vareerro é PG)	ENTÃO	(amplitude é PG)
36. SE	(erro é P)	e	(vareerro é NG)	ENTÃO	(amplitude é PG)
37. SE	(erro é P)	e	(vareerro é N)	ENTÃO	(amplitude é P)
38. SE	(erro é P)	e	(vareerro é NP)	ENTÃO	(amplitude é P)
39. SE	(erro é P)	e	(vareerro é Z)	ENTÃO	(amplitude é P)
40. SE	(erro é P)	e	(vareerro é PP)	ENTÃO	(amplitude é P)
41. SE	(erro é P)	e	(vareerro é P)	ENTÃO	(amplitude é P)
42. SE	(erro é P)	e	(vareerro é PG)	ENTÃO	(amplitude é PG)
43. SE	(erro é PG)	e	(vareerro é NG)	ENTÃO	(amplitude é PG)
44. SE	(erro é PG)	e	(vareerro é N)	ENTÃO	(amplitude é PG)
45. SE	(erro é PG)	e	(vareerro é NP)	ENTÃO	(amplitude é PG)
46. SE	(erro é PG)	e	(vareerro é Z)	ENTÃO	(amplitude é PG)
47. SE	(erro é PG)	e	(vareerro é PP)	ENTÃO	(amplitude é PG)
48. SE	(erro é PG)	e	(vareerro é P)	ENTÃO	(amplitude é PG)
49. SE	(erro é PG)	e	(vareerro é PG)	ENTÃO	(amplitude é PG)

IV.5 - Processo de defuzzificação

O propósito da fase de defuzzificação é converter cada conclusão obtida da fase de inferência, para um número real. O número resultante

define uma ação a ser executada pelo controlador fuzzy. Essa ação, como escrito no item III.3.1, pode ser o ajuste de uma tensão ou corrente para um valor particular, de forma a controlar, por exemplo, a posição de uma ferramenta em uma máquina de corte. No controlador fuzzy proposto nesse trabalho, a ação a ser executada pelo controlador é gerar um valor RMS de pressão, de forma a ajustar um valor definido externamente da mesma, interna ao tubo. O método de defuzzificação adotado foi o do centróide, o mais conhecido deles [39], e que também pode ser facilmente implementado quando da realização do controlador real, através de ferramentas do tipo “*Fuzzy Logic Toolkit for Windows*”, da National Instruments.

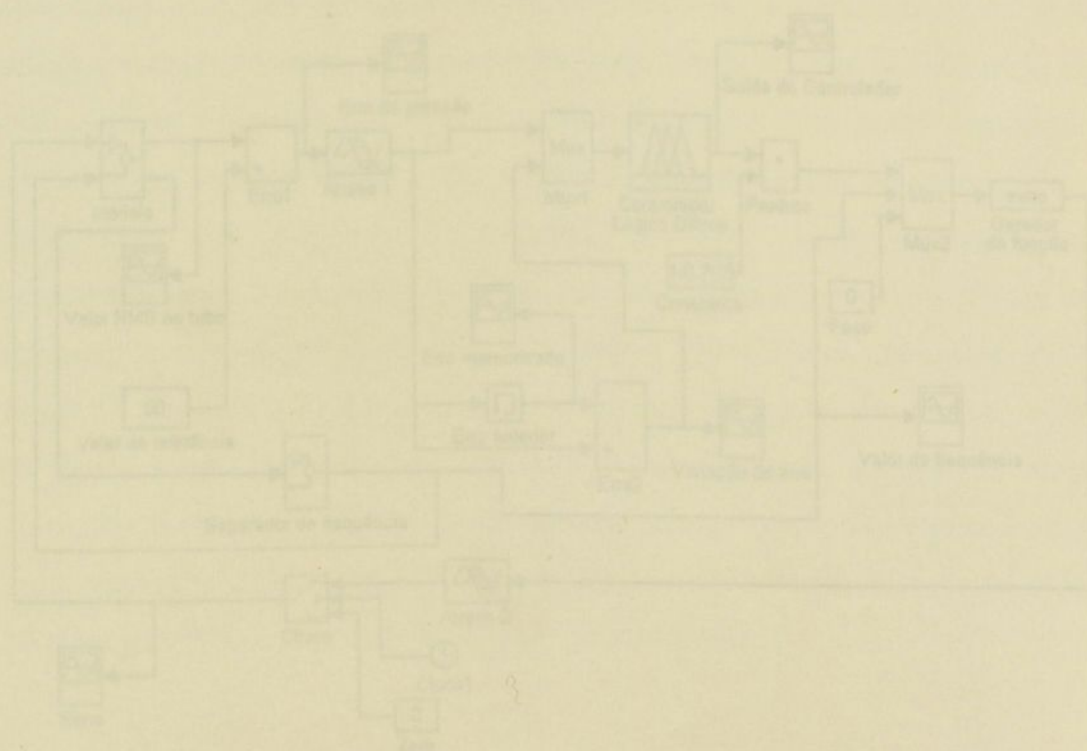


Figura 31 – Sistema de controle

A partir das condições iniciais pode-se perceber, através da figura 32, que o controle é acionado a partir de 0,1 segundo, estando até esse instante o tubo sob ação das variáveis estabelecidas previamente. No instante 0,1 segundo, o valor desejado da 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 selecionada no bloco “*Valor de referência*”. A figura 33 apresenta a onda senoidal resultante da ação do controle e da onda de pressão natural interna ao tubo sendo que a figura 34 apresenta o valor RMS referente a essa onda.

Pode-se visualizar 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 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 35 apresenta o sinal de erro na entrada do controlador onde, em aproximadamente 0,40 segundo, 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 segundo, 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 segundo, com um erro de 0,01 mbar de pico. A figura 36 apresenta a resposta do controlador aos valores estabelecidos externamente. A figura 37 apresenta o sinal senoidal 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 33: Ação de pressão

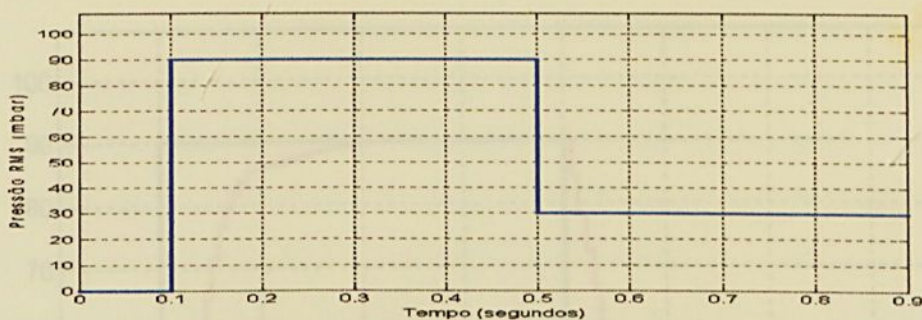


Figura 32 – Saída do bloco “Valor de referência”

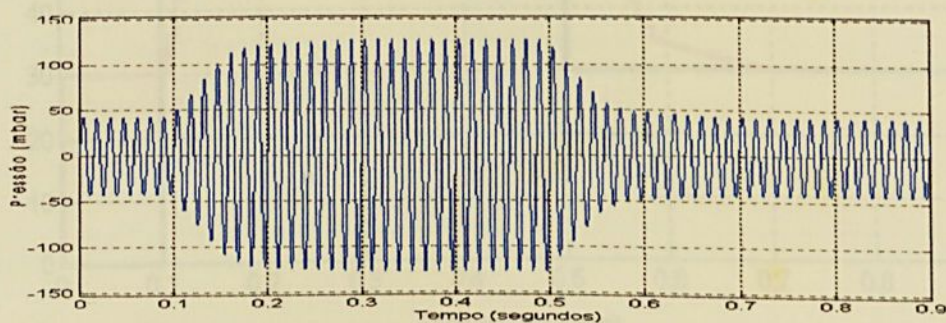


Figura 33 – Onda interna ao tubo

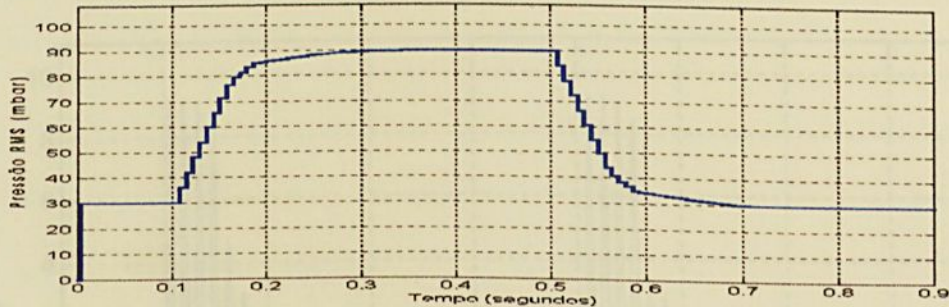


Figura 34 – Valor RMS da onda interna ao tubo

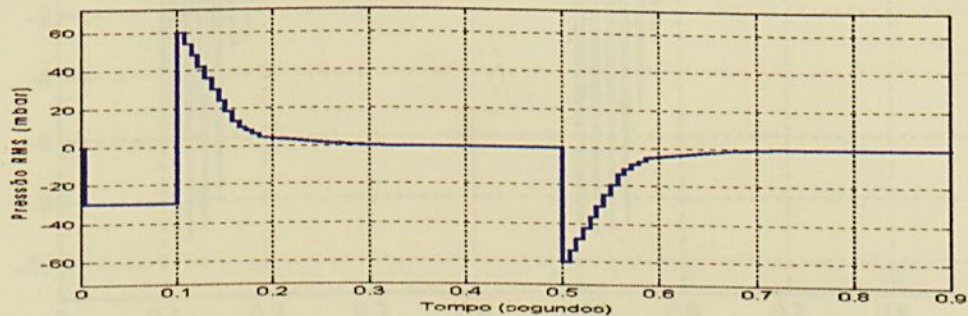


Figura 35 – Erro de pressão

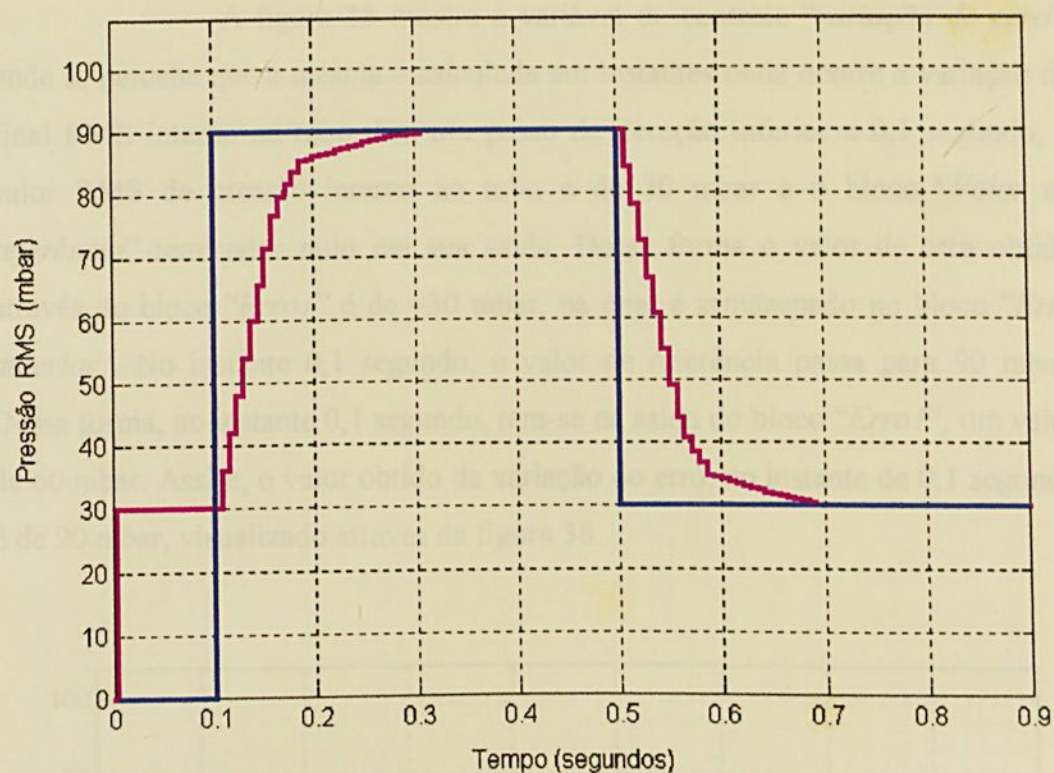


Figura 36 – Resposta do controlador para um impulso em sua entrada

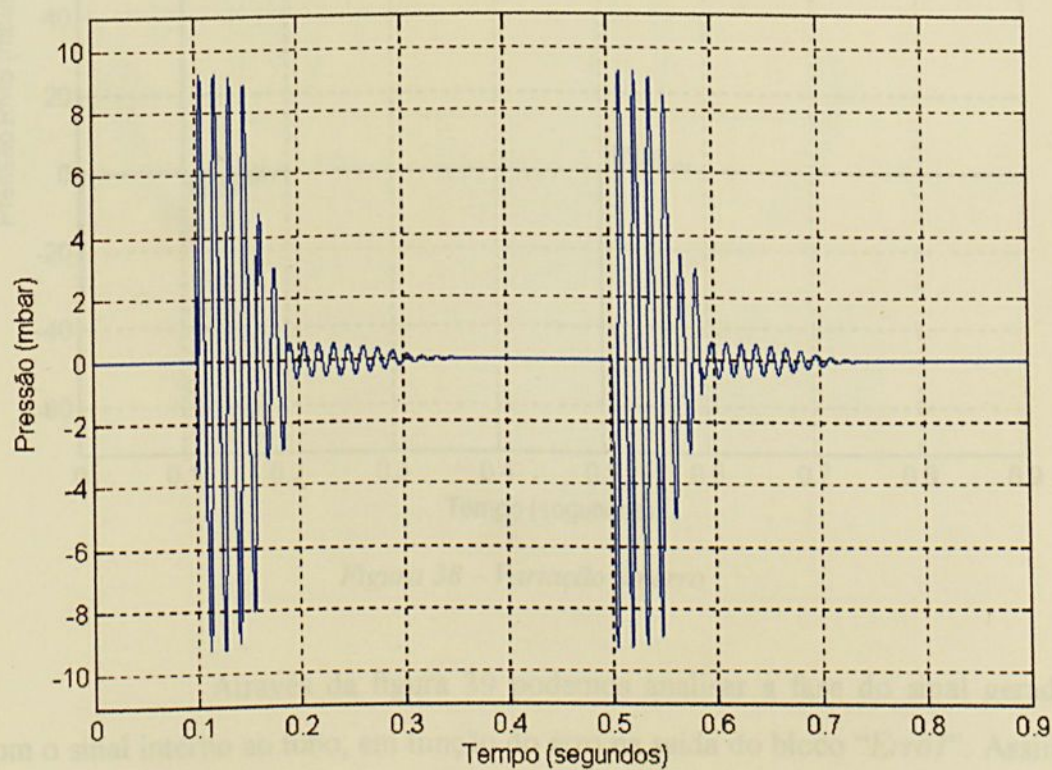


Figura 37 – Sinal senoidal de pressão na saída dos alto-falantes.

A figura 38 mostra a variável de controle “*variação do erro*”, onde se percebe que a mesma é calculada em instantes onde ocorre a variação do sinal RMS interno ao tubo. Em um passo de iteração inferior a 0,1 segundo, o valor RMS de pressão interno ao tubo é de 30 mbar e o bloco “*Valor de referência*” tem valor nulo em sua saída. Dessa forma o valor de erro obtido através do bloco “*ErroI*” é de -30 mbar, na qual é armazenado no bloco “*Erro anterior*”. No instante 0,1 segundo, o valor de referência passa para 90 mbar. Dessa forma, no instante 0,1 segundo, tem-se na saída do bloco “*ErroI*”, um valor de 60 mbar. Assim, o valor obtido da variação do erro, no instante de 0,1 segundo é de 90 mbar, visualizado através da figura 38.

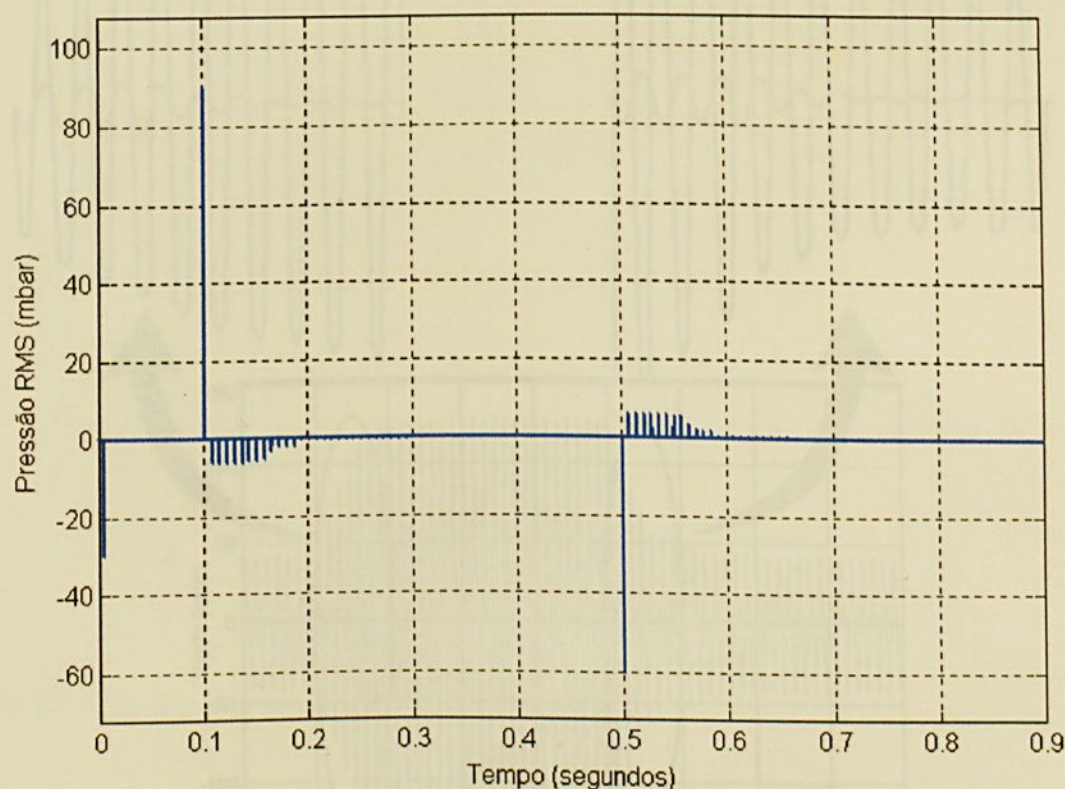


Figura 38 – Variação do erro

Através da figura 39 podemos analisar a fase do sinal gerado com o sinal interno ao tubo, em função do erro na saída do bloco “*ErroI*”. 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° da onda senoidal interno ao tubo, consegue-se obter a diminuição da pressão, observado no detalhe à direita da figura 39.

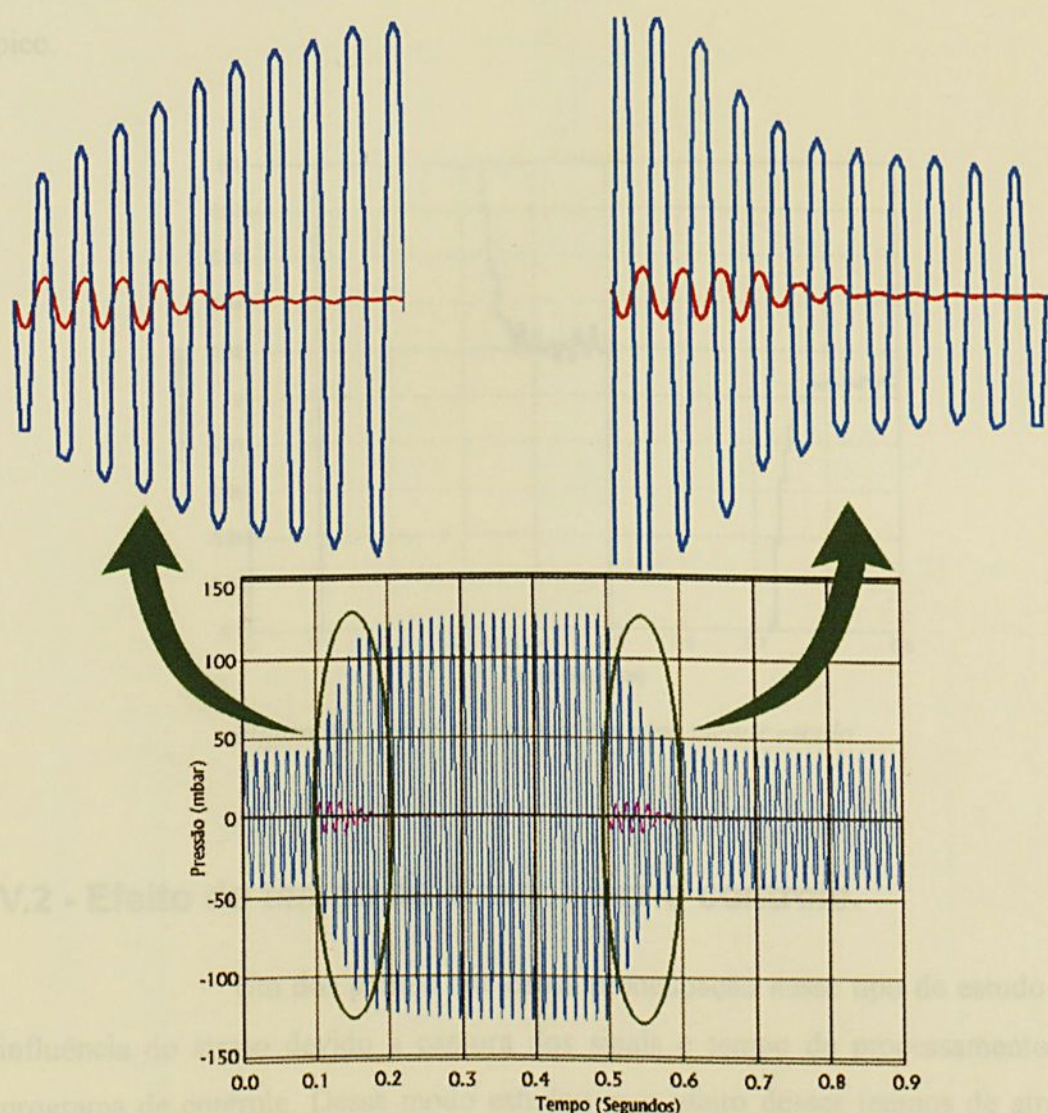


Figura 39 – Onda interna ao tubo e sinal senoidal dos alto-falantes

Essa figura mostra que o controlador gera sinais em fase de 0° e 180° 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.

Na figura 40 é mostrado o sinal de erro, em uma escala menor, de modo a poder se verificar que o erro obtido na saída do controlador não é absolutamente zero, visualizando-se um pequeno erro em torno de 0.03 mbar de pico.

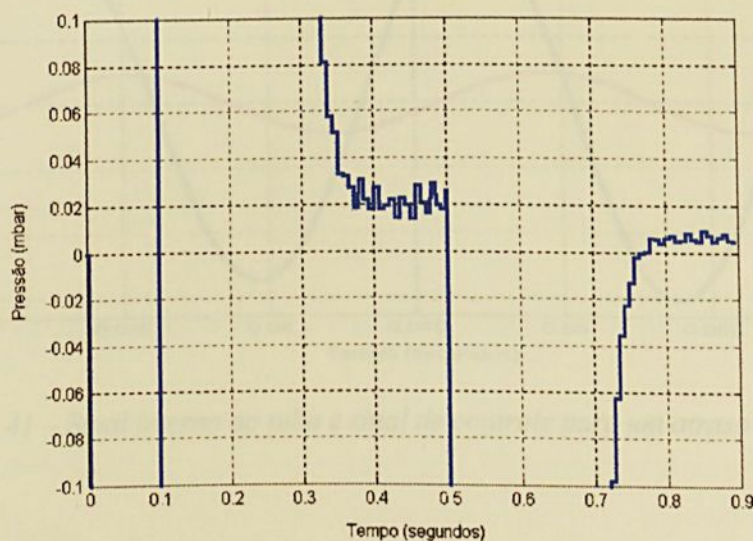


Figura 40 – Erro de pressão em uma menor escala

V.2 - Efeito do tempo de atraso para o controle.

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 tempos de atraso, utilizando-se do bloco “Atraso2”, que corresponde ao atraso de processamento computacional do sinal e o atraso relativo ao amplificador de potência. Em função do atraso devido ao sistema de aquisição de dados ser constante e não dependente

da fase do programa de controle que está sendo processado, não se variou o valor do tempo no bloco "Atraso I". A figura 41 mostra o sinal interno ao tubo (azul) e o sinal proveniente dos alto-falantes (vermelho), para um atraso de 3 ms. Pode-se perceber que os sinais estão defasados. Através da figura 42, pode-se visualizar através do sinal de erro, que o controlador necessitará de um tempo maior para fazer a convergência do sinal, esse ocorrendo, agora em torno de 0,8 segundo, contra 0,2 segundo para um atraso de 2 ms.

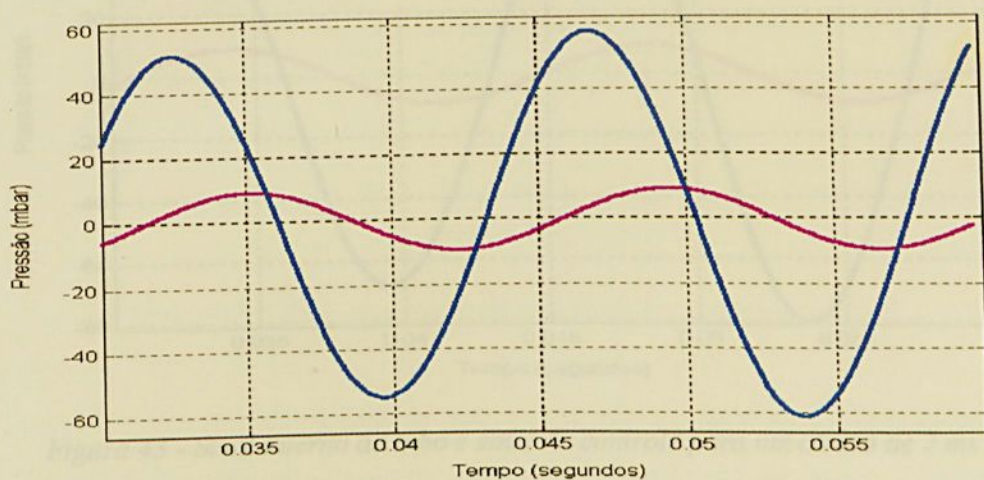


Figura 41 – Sinal interno ao tubo e sinal de controle para um atraso de 3 ms

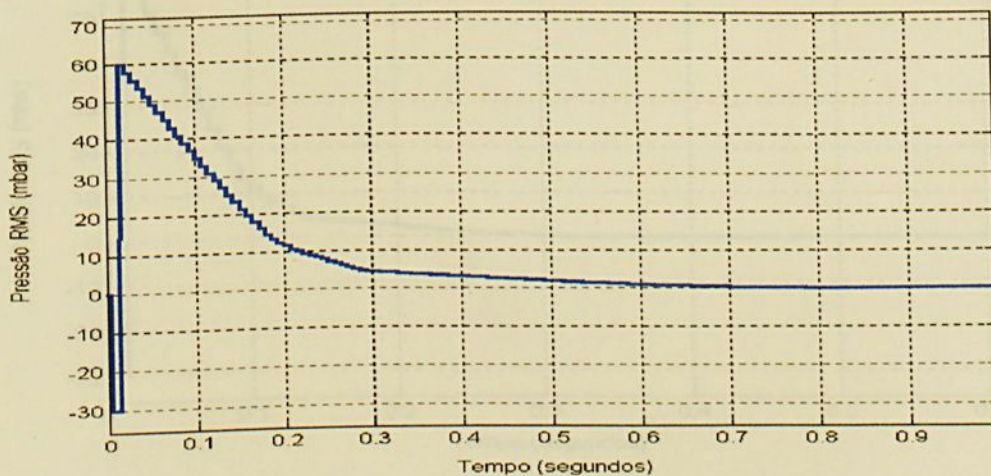


Figura 42 – Erro de pressão para atraso de 3ms

A figura 43 apresenta o efeito do atraso de 2 ms no controle do sinal interno ao tubo e a figura 44 o tempo de convergência necessário para o erro atingir o seu menor valor. Dessa forma, para esse atraso o tempo de convergência é de aproximadamente 0,4 segundo.

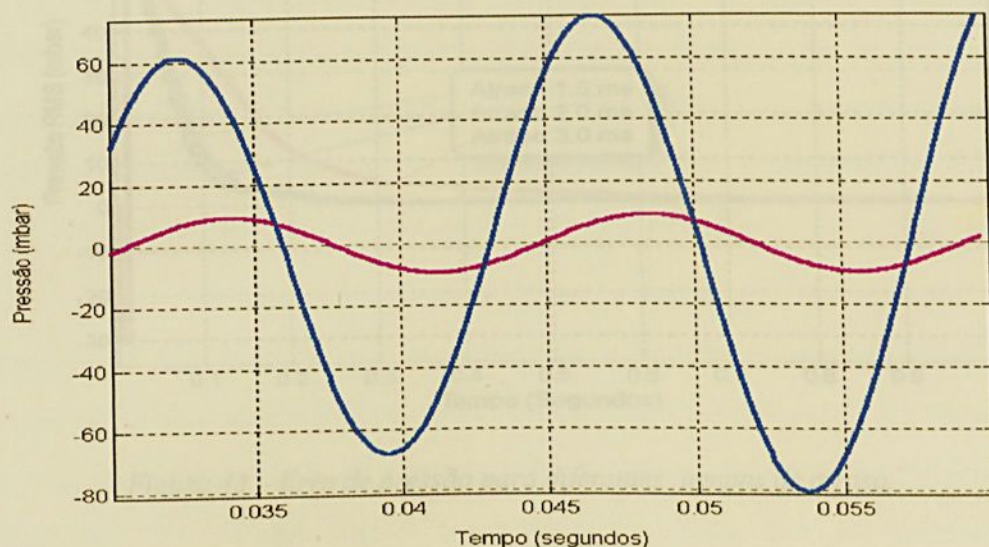


Figura 43 - Sinal interno ao tubo e sinal de controle para um atraso de 2 ms

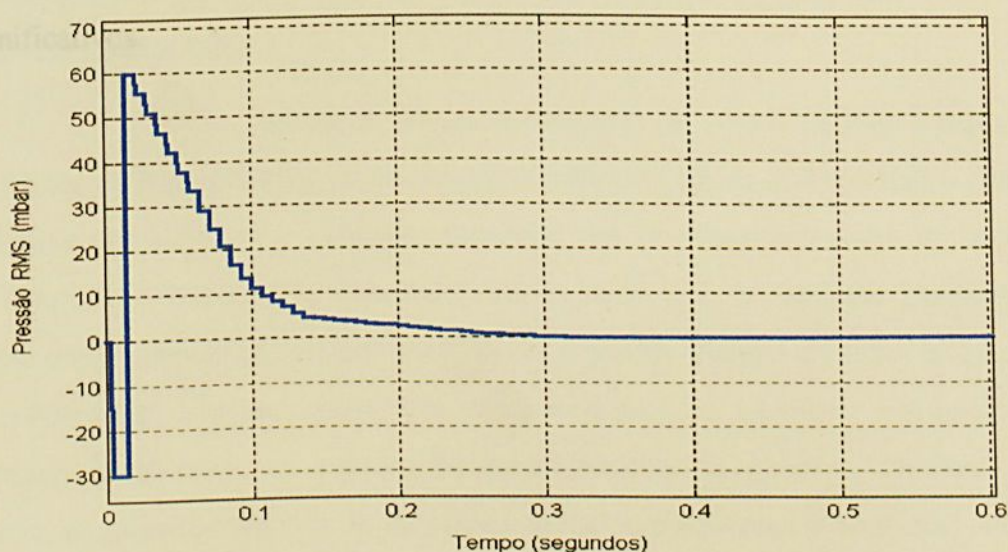


Figura 44 - Erro de pressão para atraso de 2ms

A figura 45 sintetiza a resposta da onda interna de pressão no tubo para diferentes tempos de atraso referente ao processamento computacional do sinal e amplificador de potência.

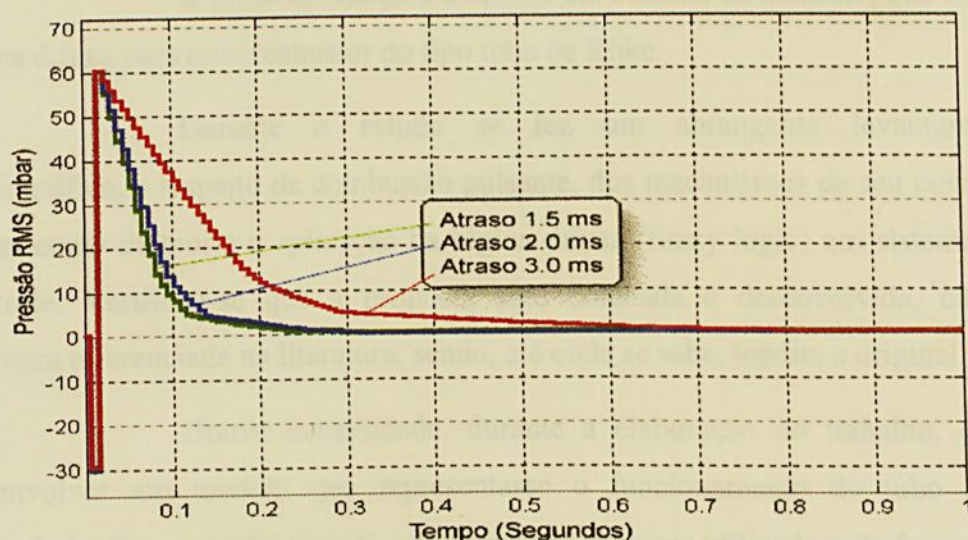


Figura 45 – Erro de pressão para diferentes tempos de atraso.

Pode-se perceber que o controle é efetuado mesmo levando-se em consideração diferentes tempos de atraso. Apesar de uma maior demora para o tubo alcançar o valor de pressão interno desejado, esses tempos não são significativos.

Capítulo VI – Conclusões

O presente trabalho analisou um sistema de controle, que utiliza lógica difusa para um combustor do tipo tubo de Rijke.

Durante o estudo se fez um abrangente levantamento bibliográfico, a respeito de combustão pulsante, dos mecanismos de seu controle, assim como da teoria e aplicação da lógica difusa (fuzzy logic) em sistemas de controle. Verificou-se que a proposta aqui colocada e desenvolvida, não se encontra referenciada na literatura, sendo, até onde se sabe, inédita e original.

Houve necessidade, durante a elaboração do trabalho, 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. Para isso foi necessário o desenvolvimento de blocos não existentes na biblioteca do programa escolhido.

O estabelecimento das variáveis necessárias para a realização do controle foi feito, bem como das funções de pertinência e regras necessárias para um controlador fuzzy.

A simulação realizada 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). O Atraso 1 refere-se aos sensores e amplificadores de carga e, também, pelo processamento do sistema de aquisição de dados e o Atraso 2 ao processamento computacional do sinal.

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° ao sinal.

A continuidade do trabalho se dar-se-á com a implementação do controlador em um sistema real.



Referências Bibliográficas

- 1 ZINN, T.B. Pulse combustion: recent applications and researchers issues. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMBUSTION, 24, 1992, Sydney, Australia. Proceedings... Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1993.
- 2 TYNDALL, J. On sounding and sensitive flames. Physical Sciences, The Royal Institution Library of Science, v.2, p.30-7, 1970.
- 3 RAYLEIGH, J.W.S. The theory of sound. New York: Dover, 1945. v.2, chap.16, p.170-235.
- 4 PUTNAM, A.A., DENNIS W.R. Organ-pipe oscillations in a burner with deep ports. The Journal of the Acoustical Society of America, v.28, p.260-9, 1956.
- 5 CHU, B.T. Stability of systems containing a heat source: the Rayleigh criterion. 1956. (NACA RM-56D27).
- 6 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.
- 7 CULICK, F.E.C. Stability of longitudinal oscillations with pressure and velocity coupling in a solid propellant rocket. Combustion Science and Technology, v.2, p.179-201, 1970.
- 8 CULICK, F.E.C. Combustion instability in solid rocket motors. v.2, 1981. (CPIA Publication n.290).
- 9 BECKSTEAD, M.W., RICHARDS, R.S., BREWSTER, B.S. Distributed combustion effects on particle damping. AIAA Journal, v.22, p.383-7, 1984.
- 10 HARRJE, D.T., REARDON, F.H. Liquid propellant rocket combustion instability. Washington, D.C.: NASA, 1972. (NASA SP-194).

- 11 REYNST, F.H. The Schmidt tube. In: REYNST, F.H., THRING, M.W. Pulsating combustion. New York: Pergamon Press, 1961. p.66-70, 155-66.
- 12 READER, G.T. The pulse jet, 1906-1966. Journal of Naval Sciences, v.3, p.226-32, 1977.
- 13 SOMMERS, H. Experiences with pulsating tube firing in an experimental installation. In: REYNST, F.H., THRING, M.W. Pulsating combustion. New York: Pergamon Press, 1961. p.262-74.
- 14 SEVERYANIN, V.S. The combustion of solid fuel in a pulsating flow. Thermal Engineering, v.16, p.6-8, 1969.
- 15 SEVERYANIN, V.S. Application of pulsating combustion in industrial installations. In: SYMPOSIUM ON PULSE COMBUSTION APPLICATIONS. Proceedings... 1982. p.7.1-7.23. (GRI-82/0009.2).
- 16 ZINN, B.T., DANIEL, B.R., SHESHADRI, T.S. Application of pulsating combustion in the burning of solid fuels. In: SYMPOSIUM ON PULSE COMBUSTION TECHNOLOGY FOR HEATING APPLICATIONS. Proceedings... Argonne, IL: Argonne National Laboratory, 1979. p.239-48.
- 17 ZINN, B.T., CARVALHO JR., J.A., MILLER, N., DANIEL, B.R. Development of a pulsating combustor for burning of wood. In: SYMPOSIUM ON PULSE COMBUSTION APPLICATIONS. Proceedings... 1982. p.11.1-11.11. (GRI-82/0009.2).
- 18 ZINN, B.T., MILLER, N., CARVALHO JR, J.A., DANIEL, B.R. Pulsating combustion of coal in a Rijke type combustor. In: SYMPOSIUM INTERNATIONAL ON COMBUSTION, 19, 1982, Haifa, Israel. Proceedings... Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1982. p.1197-203.
- 19 CARVALHO JR., J.A. Investigation of the characteristics of a coal burning Rijke type pulsating combustor. Atlanta, GA, 1983. 149p. Tese (Doutorado em Engenharia Aeroespacial) - Georgia Institute of Technology.

- 20 CARVALHO JR., J.A., WANG, M.R., MILLER, N., DANIEL, B.R., ZINN, B.T. Controlling mechanisms and performance of coal burning Rijke type pulsating combustors. In: SYMPOSIUM INTERNATIONAL ON COMBUSTION, 20, 1984. Proceedings... Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1984. p.2011-7.
- 21 WANG, M.R. Mechanisms and performance of a coal burning Rijke type pulsating combustor. Atlanta, GA, 1985. 129p. Tese (Doutorado em Engenharia Aeroespacial) - Georgia Institute of Technology.
- 22 HANBY, V. I. Convective heat transfer in a gas-fired pulsating combustor. 1968. (Paper ASME n.68-WA/FU-1).
- 23 FEDOROV, B.N. Experimental study of the effect of acoustic oscillations on heat transfer in a gas flow. Inzherno-Fisicheskii Zhurnal, v.32, p.61-7, 1977.
- 24 BELLES, F.E. R&D and other needs for exploitation of pulse combustion in space heating applications. In: SYMPOSIUM ON PULSE COMBUSTION TECHNOLOGY FOR HEATING APPLICATIONS. Proceedings... Argonne, IL: Argonne National Laboratory, 1979. p.167-80.
- 25 PUTNAM, A.A. A review of pulse-combustor technology. In: SYMPOSIUM ON PULSE COMBUSTION TECHNOLOGY FOR HEATING APPLICATIONS. Proceedings... Argonne, IL: Argonne National Laboratory, 1979. p.1-21.
- 26 COUTO, H.S. Queima de combustíveis líquidos em combustores pulsantes tipo tubo de Rijke. Rio de Janeiro, 1989. 132p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - COPPE/UFRJ.
- 27 FERREIRA, M.A., CARVALHO JR, J.A. Performance characteristics of an experimental Rijke type pulsating combustor. Fuel, v.69, p.684-9, 1990.
- 28 FERREIRA, M.A., BRESSAN, C., VICTÓRIO, J.R.S., CARVALHO JR., J.A., HEISKANEN, V.P. Burning of finish peat pellets in a brazilian experimental pulsating combustor. In: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, 3, 1990, Itapema, SC. Anais... Itapema: Universidade Federal de Santa Catarina, 1990. p.761-6.



- 29 TORRES, E.A., VICTÓRIO, J.R.S., FERREIRA, M.A., CARVALHO JR., J.A. Pulsating combustion of palm oil fruit bark. *Fuel*, v.71, p.257-61, 1992.
- 30 HECKL, M.A. Active control of the noise from Rijke tube. *Journal of Sound and Vibration*, v.124, p117-33, 1988.
- 31 POINSOT, T. Suppression of combustion instabilities by active control. *Journal of Propulsion and Power*, v.5, p.14-20, 1989.
- 32 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.
- 33 FERREIRA, M.A. Abordagem teórica e experimental de combustores do tipo Rijke. Guaratinguetá, 1997. 227p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, UNESP.
- 34 ERICKSON, P.A. Active control of a Rijke-tube reactor and its general effects on combustion. Provo, UT, 1997. 148p. Dissertação (Mestrado) - Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University.
- 35 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 (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Brigham Young University.
- 36 ZADEH, L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*, v.8, p.338-53, 1965.
- 37 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.
- 38 KLIR, G. J., YUAN, B. Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications. New York: Prentice Hall, 1995. p.333-4.
- 39 DRIANKOV, D., HELLENDORRN, H., REINFRANK, M. An Introduction to Fuzzy Control. 2.ed. New York: Springer Verlag, 1996. p.134.

- 40 THE MATH WORKS INC. Simulink: dynamic system simulation for MATLAB. Natick, MA, 1997.
- 41 MARTINS, C.A. Emissões de NOX em combustor pulsante tipo tubo de Rijke operando com combustível gasoso. São José dos Campos, 1998. 72p. Dissertação (Mestrado Ciência Espacial/Combustão) - INPE.
- 42 DRIANKOV, D., HELLENDORRN, H., REINFRANK, M. An introduction to fuzzy control. 2.ed. New York: Springer Verlag, 1996. p.115-6.
- 43 DRIANKOV, D., HELLENDORRN, H., REINFRANK, M. An introduction to fuzzy control. 2.ed. New York: Springer Verlag, 1996. p.108.
- 44 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.
- 45 LOTFI, L. A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v.3, p.28-44, 1973.



Anexo A – Código das funções init01.m e maxarra1.m

A.1 – Função init01.m

```
% Arquivo init01.m
% Cria a variavel Array, inicializada com zeros, com um
% numero ideal de elementos.
% Carrega configuracao para o fuzzy.

clear all

nbn = 0;          % numero de pontos necessarios para
% montar 1 periodo da onda
nea = 0;          % numero de elementos da variavel Array.
fre = 0;          % frequência da onda de simulação.
stp = 0;          % step de simulação.
clc
disp(' ')
disp(' Definindo valores iniciais para simulação ')
disp(' ')

% obtem dados do usuario por meio de prompt

fre = input('Frequência da onda de simulação [Hz]: ');
stp = input('Passo de iteração da simulação [s]: ');

% calculo do numero ideal de elementos pra a variavel
Array

nea = ceil(abs(1 / (fre * stp))/2);

if(nea < 50)
```



```
disp(' ')
disp('Cuidado: O n° de elementos da Array pode não
permitir uma boa representação da curva.')
disp(' ')
end
```

```
% Declaração e inicialização de variáveis.
```

```
global PassoSimulacao;
global rmsatual
global alfa
global Array
global ArrayFrq
global TempoDoMeioCiclo
global Variacao
global OldY
global OldDelta
```

```
Array          = zeros(1,nea);
alfa           = 0;
rmsatual       = 0;
PassoSimulacao = stp;
ArrayFrq       = zeros(1,50);
Variacao       = 10;
OldY           = 0;
OldDelta       = 0;
TempoDoMeioCiclo = .25 / fre;
```

```
clear npn fre stp nea
```

```
disp(' ')
disp(' ')
disp('Carregando conjunto fuzzy...')
```

```
s = 'CONTR11=fis;';
fisName = 'CONTR11';
```



```

fis = readfis(fisName);
eval(s);

disp('Fuzzy carregado.')
% Fim do arquivo init01.m

```

A.2 – Função maxarral1.m

```

% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
% Funcao: maxarral
%
% Retorna o valor eficaz
% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %

function [sys,x0] = maxarral(t,x,u,flag)
global Array
global rmsatual
global alfa
global TempoDoMeioCiclo

% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
if flag == 0
    x0 = [];
    sys = [0 0 1 1 0 0];
% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
elseif flag == 1
    x0 = [];
    sys = [];
% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
elseif flag == 2
    x0 = [];
    sys = [];
% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
elseif flag == 3

```



```
sz = size(Array);
if sz(2) < 2
    disp('A array precisa ter pelo menos 2 colunas.')
    sys = [];
    x0 = [];
    break;
else

if t < TempoDoMeioCiclo
    alfa = 0;
    end
    if (t < TempoDoMeioCiclo*1.1) & (t >
TempoDoMeioCiclo);
        alfa = 1000;
    end

    if u(1)>-alfa & u(1)<alfa
        rmsatual = max(Array)*0.707;

        if rmsatual~=0
            alfa = rmsatual / 30;
        else
            alfa = 1000;
        end
    end
end

% move todos os elementos uma posição à esquerda.
for j=2:sz(2)
    Array(j-1) = Array(j); % <- <- <-
end

% copia o primeiro argumento como último
elementos da Array.
Array(sz(2)) = abs(u(1));
end

sys = rmsatual;
```


[illegible]

Anexo B – Código das funções sinc.c e seno.m

B.1 – Função sinc.c

```
/* Inicio da funcao sinc.c */
#include <math.h>
#include "mex.h"
#define pi 3.14159265

/*****

#ifdef __STDC__
void mexFunction(
    int      nlhs,
    Matrix    *plhs[],
    int      nrhs,
    Matrix    *prhs[]
)
#else
mexFunction(nlhs, plhs, nrhs, prhs)
int nlhs, nrhs;
Matrix *plhs[], *prhs[];
#endif
{
    double *A, *f, *fi, *t, *y;

    /* Verificando numero de argumentos */

    if (nlhs > 1)
    {
        mexErrMsgTxt("SINC requer 1 variavel de
saida.");
    }
}
*****/
```



```

    }
    else if (nrhs != 4)
    {
        mexPrintf("SINC.DLL\n\nSintaxe:");
        mexPrintf("SINC(Amplitude, frequencia, fase,
tempo)\n\n");
        mexPrintf("Retorno: y = A sin(2 pi f t +
fi)\n\n");
        return;
    }

    A      = mxGetPr(prhs[0]);
    f      = mxGetPr(prhs[1]);
    fi     = mxGetPr(prhs[2]);
    t      = mxGetPr(prhs[3]);

    plhs[0] = mxCreateFull(1, 1, REAL);
    y       = mxGetPr(plhs[0]);

    y[0] = A[0] * sin((2*pi * f[0] * t[0]) + fi[0]);

    return;
}
/* Fim da funcao sinc.c */

```

B.2 – Função seno.m

```

% Inicio da funcao seno.m
function [sys, x0] = seno(t,x,u,flag)
%
% Calcula o a expressão:  A sin(2 pi f t + fi)
%
% verifica a quantidade de argumentos passados para a
function.

if nargin<4

```



```

if nargin==0
    flag = 0;
else
    error('Esta função precisa ser invocada com a
    seguinte sintaxe: seno(t,x,u,flag)');
end
end

if abs(flag) == 0
    % retorna a condição inicial dos dados, seus
    tamanhos e x0
    sys = [0;0;1;3;0;0];

elseif abs(flag) == 2
    % retorna estado discreto
    sys=[];

elseif abs(flag) == 3
    % retorna as saídas da function
    % sinc foi implementado com Dinamic Link Library
    (mex file).
    sys = sinc(u(1),u(2),u(3),t);

else
    % se o flag for qualquer outro, não é necessário
    qualquer
    % retorno pois a simulação esta sendo finalizada.
    sys = [];
end
% Fim da funcao seno.m

```


Anexo C – Bloco Separador de Frequência.

Para se obter a frequência do sinal que está oscilando dentro do bloco “*Modelo*”, utilizou-se o seguinte equacionamento:

$$f(x) = \text{sen}(f t) \quad (\text{C1})$$

onde: $f(x)$ = função de entrada do bloco “*Separador de frequência*”, definido pela senóide $\text{sen}(f t)$

f = frequência

t = tempo

O valor da frequência em sua saída é obtido derivando-se a função duas vezes, dividindo-se pela função original, multiplicando-se por -1 e extraindo a raiz quadrada. Isso pode ser visto abaixo:

$$f(x) = \text{sen}(f t) \quad (\text{C2})$$

$$f'(x) = f \cos(f t) \quad (\text{C3})$$

$$f'' = -f^2 \text{sen}(f t) \quad (\text{C4})$$

$$f''(x) = \frac{-f^2 \text{sen}(f t) (-1)}{\text{sen}(f t)} \quad (\text{C5})$$

$$\sqrt{f''(x)} = f \quad (\text{C6})$$

Desse modo, o valor final “ f ” corresponde ao valor desejado da frequência. A figura C1 mostra como se obteve o valor da frequência, conforme demonstrado acima.

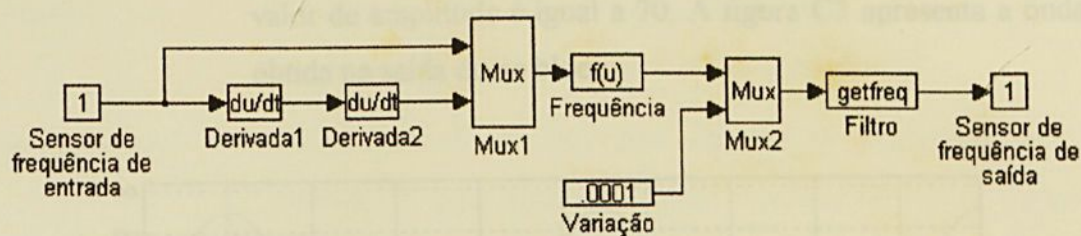


Figura C1 – Separador de frequência

O valor final obtido da frequência é utilizado nos blocos “Gerador de pressão” e “Gerador de função” para determinar a frequência de oscilação desses sinais. Uma discussão de cada bloco é apresentada a seguir:

Sensor de frequência de entrada –

terminal de entrada que recebe o sinal de pressão interno ao tubo do bloco “Modelo”. Para visualização do bloco “Separador de frequência”, foi colocado em sua entrada uma onda senoidal de amplitude unitária e frequência 70 Hz. A figura C2 mostra o sinal senoidal a ser extraído o valor da frequência.

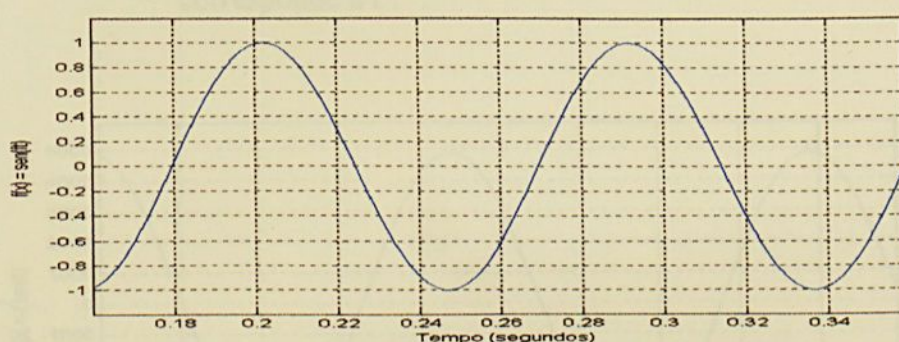


Figura C2 – Sinal senoidal interno ao tubo

Derivada1 –

executa a primeira derivada do sinal recebido do bloco “Sensor de frequência de entrada”. Devido ao resultado obtido na primeira derivada do sinal ($f'(x) = f \cos(ft)$), observa-se que a

onda está defasada de 90° em relação a onda de entrada e o seu valor de amplitude é igual a 70. A figura C3 apresenta a onda obtida na saída desse bloco.

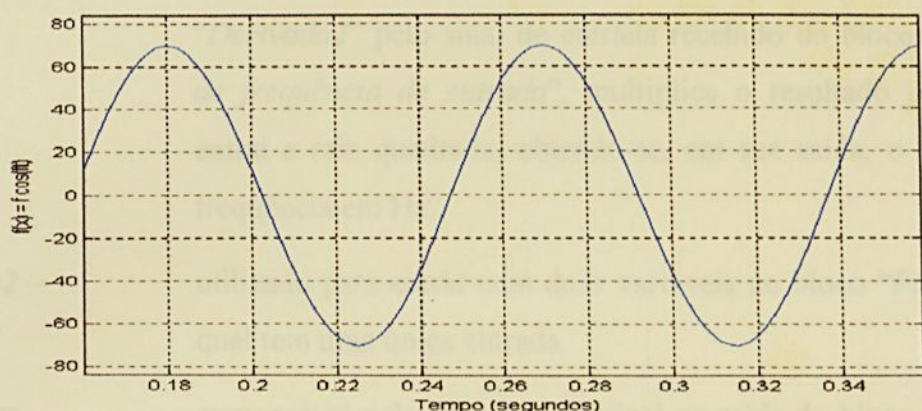


Figura C3 – Saída do bloco "Derivada1"

Derivada2 – executa a derivada do sinal recebido do bloco "Derivada1", obtendo em sua saída a segunda derivada ($f''(x) = -f^2 \sin(ft)$) do sinal recebido pelo bloco "Sensor de frequência de entrada". A figura C4 mostra a saída desse bloco. Pode-se visualizar que a onda está adiantada de 90° da onda na entrada do bloco "Derivada1" e a amplitude vale 4900, valor que corresponde a f^2 .

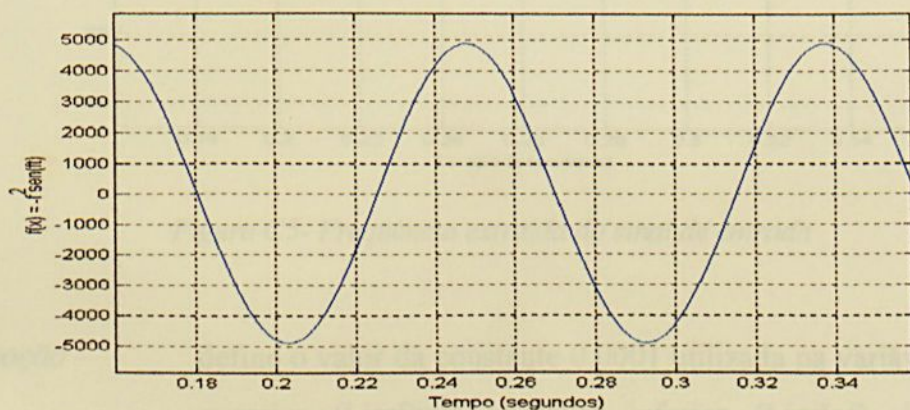


Figura C4 – Saída do bloco "Derivada2"

- Mux1* – necessário para entrar com duas variáveis no bloco “*Frequência*”, onde existe somente uma entrada.
- Frequência* – função que divide o valor obtido na saída do bloco “*Derivada2*” pelo sinal de entrada recebido do bloco “*Sensor de frequência de entrada*”, multiplica o resultado por -1 e extrai a raiz quadrada, obtendo-se, em sua saída, o valor da frequência em Hz.
- Mux2* – utilizado para entrar com duas variáveis no bloco “*Filtro*”, na qual tem uma única entrada.
- Filtro* – responsável pela filtragem do sinal na saída do bloco “*Mux2*”, obtendo-se o valor da frequência do sinal de pressão interno ao tubo, através da função “*getfreq*”, escrita na linguagem de programação do Matlab. A listagem dessa função encontra-se no anexo D. A figura C5 mostra o valor da frequência extraído do sinal de entrada.

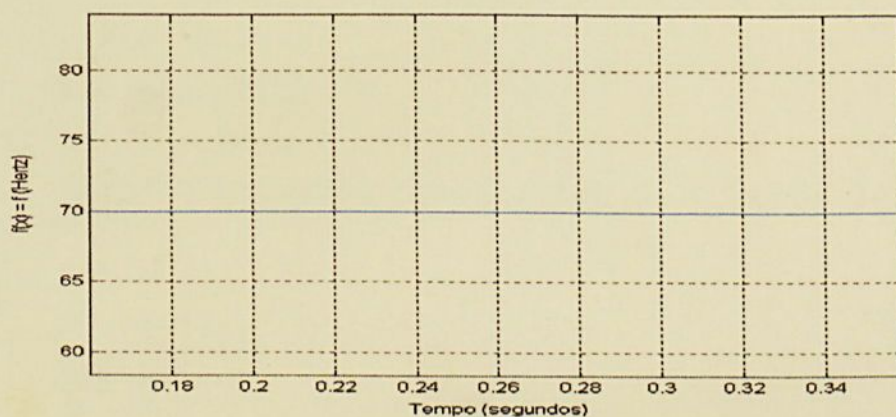


Figura C5- Frequência extraída do sinal de entrada

- Variação* – define o valor da constante 0.0001 utilizada na variáveis limite superior (LimSup) e limite inferior (LimInf) da função “*getfreq*” do bloco “*Filtro*”.


```

    if isnan(Atual)
        Atual = mean(ArrayFrq);
    end

    if Atual > LimSup
        Atual = LimSup;
    elseif Atual < LimInf
        Atual = LimInf;
    else
        Atual = Atual;
    end

    % move todos os elementos uma posição à esquerda.
    for j=2:sz(2)
        ArrayFrq(j-1) = ArrayFrq(j); % <- <- <-
    end

    % copia o primeiro argumento como último
    elementos da ArrayFrq.
    ArrayFrq(sz(2)) = Atual;
    sys = mean(ArrayFrq);
    x0 = [];
end
elseif flag == 4
    x0 = [];
    sys = [];
else
    x0 = [];
    sys = [];
end
% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
% Fim da funcao getfreq.m

```


BOTURA, C. A. Study and design of a controller that uses fuzzy logic applied to the active control of a Rijke tube type pulse. Guaratinguetá, 1998. 94 p. Dissertação (Mestrado em Física) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

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.

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 seconds, for a processing delay of 2 ms, and in 0,8 seconds for a processing delay of 4 ms, from the starting pulse

Key words: Fuzzy logic, combustion, Rijke tube.



