

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO  
PAULO - IFSP

Fábio Garcia Neira

AJUSTE DE CURVAS E MODELAGEM *FUZZY* APLICADOS NO  
DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE CALIBRAÇÃO DE  
HIDRÔMETROS

São Paulo

2013

Fábio Garcia Neira

AJUSTE DE CURVAS E MODELAGEM FUZZY APLICADOS NO  
DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE CALIBRAÇÃO DE  
HIDRÔMETROS

Dissertação de Mestrado apresentada  
ao Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia de São Paulo –  
IFSP como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Mestre em  
Automação e Controle de Processos.

Orientador: Professor Doutor Paulo Roberto Barbosa  
Co-orientador: Professor Doutor Alexandre Brincalepe Campo

São Paulo

2013

N334 NEIRA, Fábio Garcia.  
Ajuste de curvas e modelagem fuzzy aplicados no desenvolvimento de um sistema de calibração de hidrômetros – 2013.  
124 f.: il.; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Barbosa  
Co-orientador: Prof. Dr. Alexandre Brincalepe Campo

Dissertação (Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2013.

1. Hidrômetro      2. Lógica fuzzy      3. Banco de provas  
I. NEIRA, Fábio Garcia II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo III Título

CDU 681.0



### ATA DE EXAME DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Nome do Programa: **Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos**

Nome do(a) Aluno(a) : Fábio Garcia Neira

Nome do Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Barbosa

Nome do Co-orientador: Prof. Dr. Alexandre Brincalepe Campo

Título do Trabalho: "AJUSTE DE CURVAS E MODELAGEM FUZZY APLICADOS NO DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE CALIBRAÇÃO DE HIDRÔMETROS"

Abaixo o resultado de cada participante da Banca Examinadora

Nome completo dos Participantes Titulares da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Paulo Roberto Barbosa – Orientador	IFSP – SPO	Aprovado
Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi	FATEC- SP	APROVADO
Prof. Dr. Carlos Frajuca	IFSP – SPO	Aprovado
Nome completo do Participante Suplente da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Profª. Drª. Andrea Ribari Yoshizawa	FEI	
Prof. Dr. Paulo Marcos de Aguiar	IFSP – SPO	

Considerando-o:  APROVADO  
 NÃO APROVADO

Assinaturas

São Paulo, 25 de Abril de 2013

Presidente da Banca

  
Membro Interno  
Membro Externo

Observações:

## AGRADECIMENTOS

A meus pais, Gonzalo Neira Sobral (*in memoriam*), e Maria Luz Garcia Lopez Neira, por terem dedicado a maior parte de suas vidas à criação e educação de seus três filhos.

À minha esposa, Maria Raquel Manhani, pelo exemplo de dedicação, por toda ajuda e paciência.

Aos professores Paulo Roberto Barbosa e Alexandre Brincalepe Campo pela orientação.

A meus irmãos, Marcos e Luz, pelo apoio e exemplo.

A todos os trabalhadores da LAO Indústria.

Ao amigo e colega Tarcísio Leão.

## RESUMO

A premissa deste projeto foi desenvolver um sistema automatizado eletrônico para calibração de hidrômetros, a ser acoplado aos bancos de prova ou bancadas de pré-aferição das indústrias produtoras de medidores ou oficinas de recuperação, para reduzir o tempo de calibração e eliminar a possibilidade de erro humano por cansaço. Em sua implementação, empregou-se um sensor adaptado à relojoaria do hidrômetro em teste, que envia sinais a um microcontrolador e os compara com os sinais gerados por um padrão já existente no banco de provas, determinando, desta forma, o grau de erro a ser corrigido para, depois, ao final do processo, acionar um motor de passo, que atua diretamente no regulador do medidor, calibrando-o. Na fase do desenvolvimento do controle do sistema, especificamente para o cálculo da ação sobre o regulador, foi proposto um estudo comparativo entre o ajuste de curva por meio de uma função polinomial de terceiro grau e um algoritmo de lógica *fuzzy*. Ambos os métodos foram capazes de calibrar os hidrômetros. Contudo, a técnica de ajuste de curva proporcionou melhores resultados práticos de calibração.

Palavras-chave: Ajuste de curva, Hidrômetro, Banco de provas, automação de processo industrial, lógica *fuzzy*.

## **ABSTRACT**

*This work concerns the development of an automated electronic system dedicated to calibrate velocimetric water meters. Such system works coupled to test and pre-calibration benches in order to reduce the calibration time and to eliminate the possibility of human error due to fatigue, and, by these means, increasing the productivity for this complex operation, both in manufacturer's plants or cities' workshops of sanitation. Its implementation is carried out through an electronic device which senses the water meter totalizer, sending signals to a microcontroller, which compares this reading to a standard already existing in the bench, and, through this comparison, determines the level of error to be corrected, then, at the end of the process, sending signals to a stepper motor which acts directly on the regulator device of the meter. At the control development phase, or, when calculating the action over the water meter regulator, a study was proposed comparing a curve adjust and an algorithm of fuzzy logic. Both propositions were able to calibrate the meters. However, the use of the curve adjust rendered better practical calibration results.*

*Keywords: Curve adjust, water meter, Water meter test bench, automation of industrial process, fuzzy logic.*

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Desenho esquemático do sistema.....	17
FIGURA 2 – Aspecto interno de um medidor multijato..	24
FIGURA 3 – Câmara de um medidor multijato.....	25
FIGURA 4 – Desenho esquemático do mecanismo de regulagem.....	25
FIGURA 5 – Transmissão magnética.....	27
FIGURA 6 – Transmissões magnéticas e mecânicas.....	27
FIGURA 7 – Câmara e turbina do medidor multijato LAO.....	28
FIGURA 8 – Desenho esquemático de um banco volumétrico.....	33
FIGURA 9 – Banco volumétrico fabricado pela empresa Ford	33
FIGURA 10 - Desenho esquemático de um banco provas gravimétrico.....	34
FIGURA 11 – Vista das rampas de aferição de hidrômetros do banco Itron BPA – 5/2 .....	35
FIGURA 12 – Banco eletrônico fabricado pela Turbimax, com medidor padrão e cabeças leitoras dotadas de foto-célula.....	36
FIGURA 13 – Banco de provas eletrônico Maddalena.....	36
FIGURA 14 – Cabeças de leitura optoeletrônicas do banco Maddalena.....	37
FIGURA 15 – Funcionamento das cabeças de leitura optoeletrônicas.....	38
FIGURA 16 – Disposição do seguidor e disco indicador na relojoaria.....	38
FIGURA 17 - Desenho esquemático da regulagem automatizada.....	40
FIGURA 18 – Ação do regulador.....	41
FIGURA 19 – Detalhe da fenda do regulador.....	41
FIGURA 20 – Detalhe da obstrução do by-pass.....	41
FIGURA 21 – Ação do regulador.....	45
FIGURA 22 – Fotografia do medidor com entrada cortada.....	45

FIGURA 23 – Detalhe do regulador e <i>by-pass</i> .....	46
FIGURA 24 - Referência do regulador para determinação da curva Erro x Ângulo...	46
FIGURA 25 - Fotografia do disco graduado acoplado ao regulador.....	47
FIGURA 26 – Gráfico do erro em função do ângulo do regulador.....	48
FIGURA 27 – Provável posicionamento do regulador.....	49
FIGURA 28 – Gráfico de erros variando segundo ângulo.....	51
FIGURA 29 – Inversão dos Eixos.....	52
FIGURA 30 – Curva de tendência.....	53
FIGURA 31 – Funções de pertinência.....	59
FIGURA 32 – Superfície gerada no MATLAB.....	61
FIGURA 33 - Comparação da defuzificação do MATLAB.....	61
FIGURA 34 – Solução apresentada pelo MATLAB.....	62
FIGURA 35 – Banco AE1052.....	66
FIGURA 36 – Fluxograma do programa.....	69
FIGURA 37 – Esquema elétrico do protótipo com visor LCD.....	70
FIGURA 38 – Motor de passo unipolar empregado.....	72
FIGURA 39 – Circuito de acionamento do motor de passo unipolar.....	72
FIGURA 40 – Aspecto externo do sensor de efeito hall.....	75
FIGURA 41 – Protótipo de um sensor Hall montado na relojoaria.....	75
FIGURA 42 – Componentes mecânicos do sistema de calibração.....	76
FIGURA 43 – Medidor em teste no sistema autom. de calibração.....	78
FIGURA 44-a – Função de pertinência triangular.....	92
FIGURA 44-b – Função de pertinência trapezoidal.....	93
FIGURA 44-c – Função de pertinência Gaussiana.....	93
FIGURA 45 – Possível representação gráfica de conjuntos <i>fuzzy</i> retratando a faixa de velocidades de 0 a 40Km/h.....	93

FIGURA 46 – Representação gráfica dos conjuntos <i>fuzzy</i> .....	97
FIGURA 47 – Ilustração gráfica das operações com conjuntos <i>fuzzy</i> .....	98
FIGURA 48 – Método do centro das áreas.....	100
FIGURA 49 – Métodos Mamdani e Sugeno.....	102
FIGURA 50 - Blocos básicos de um controlador <i>fuzzy</i> .....	103
FIGURA 51 – Disposição dos pinos do microcontrolador 16F877A no encapsulamento PDIP.....	107
FIGURA 52 – Conexão entre a CPU e os periféricos de um microcontrolador em um desenho simplificado.....	108
FIGURA 53 – Diagrama de blocos do microcontrolador 16F877A.....	110
FIGURA 54 – Conversão de linguagem C em linguagem de máquina.....	113
FIGURA 55 – A IDE MikroC.....	114

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Os diversos tipos de medidores de vazão.....	23
Tabela 2 – Principais características dos medidores classe C e B.....	28
Tabela 3 – Classe metrológicas.....	32
Tabela 4 – Exemplo das variáveis linguísticas para ação de regulagem de um medidor.....	43
Tabela 5 – Erros segundo ângulo do regulador em 23 amostras escolhidas.....	50
Tabela 6 – Determinação da regulagem.....	55
Tabela 7 – Resultados após a regulagem nas três vazões de teste.....	56
Tabela 8 - Determinação da regulagem.....	63
Tabela 9 - Resultados após a regulagem nas três vazões de teste.....	64
Tabela 10 - Acionamento tipo Passo completo 2.....	73
Tabela 11 – Amostra de erros em medidores calibrados manualmente, para vazão nominal, no banco de provas da produção.....	79
Tabela 12 – Determinação de erros a calibrar. Os valores abaixo foram obtidos no visor LCD do sistema automático de calibração.....	80
Tabela 13 – Resultados nas três vazões de teste usando a calibração com a função de ajuste de curva.....	81
Tabela 14 – Resultados nas três vazões de teste usando a calibração com a inferência Sugeno.....	82
Tabela 15 – Exemplos de regras.....	96

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ADC – Conversor analógico-digital

ALU – Unidade lógica aritmética

ASM – Linguagem *Assembly*

AWWA – *American Water Works Association*

CD – *Compact disc*

CMOS – *complementary metal-oxide-semiconductor* ou, em português, semicondutor metal-óxido complementar.

CPU - Unidade central de processamento

DN – Diâmetro nominal

### **E - Erros**

EEPROM – *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory* ou, em português, memória programável somente para leitura, eletricamente apagável .

FLC - *Fuzzy logic controller*, ou em português: Controlador com lógica *fuzzy*

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

IPEM – Instituto de Pesos e Medidas

L<sub>f</sub> – Leitura final do instrumento ensaiado

L<sub>i</sub> – Leitura inicial do instrumento ensaiado

N – Designação do medidor

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

PN – Pressão nominal

POM – Resina acetal copolímero

q – Vazão

$q_p$  – Vazão permanente

$q_n$  – Vazão nominal

$q_s$  – Vazão de sobrecarga

$q_{\min}$  – Vazão mínima

$q_t$  – Vazão de transição

RAM – *Random Access Memory*, ou, em português, memória de acesso aleatório

**RISC** – *Reduced Instructional Set Computer*, ou, em português, computador com conjunto reduzido de instruções.

ROM – *Read Only Memory*, ou, em português, memória somente para leitura

$V_e$  – volume escoado durante o ensaio

$V_c$  – Volume de referência

$V_i$  – Volume indicado pelo medidor

## APRESENTAÇÃO

A abertura dos mercados e o notável ritmo de desenvolvimento da indústria eletroeletrônica no começo deste século têm sido ótimos professores para o setor da produção de bens de consumo. Todos os países que almejam ocupar uma posição relevante no cenário mundial nas próximas décadas devem ouvir estes dois mestres e produzir cada vez mais rápido, com melhor qualidade e a um custo mais baixo, ou, pode-se dizer, automatizar. Este trabalho diz respeito à automatização de uma operação complexa, de grande importância na fabricação e recuperação de hidrômetros residenciais. Para a determinação da ação de controle de calibração foram propostos dois sistemas e uma comparação entre eles, o primeiro que calcula o ângulo por meio de uma função polinomial de terceira ordem, e o outro, realizado por meio do desenvolvimento de um algoritmo de lógica *fuzzy*, também capaz de resolver as particularidades da regulação destes instrumentos. Sua implantação foi realizada por meios eletrônicos e mecânicos durante a etapa denominada calibração, que já é praticada na fabricação destes instrumentos, ainda que manualmente. Mais do que a calibração propriamente dita, o novo dispositivo possibilitará a fabricação de produtos mais exatos e capazes de prestar um serviço justo, tanto para o usuário da água como para a companhia de distribuição, além de proporcionar um novo ponto de vista para o estudo do comportamento dos medidores e demais processos envolvidos em sua fabricação.

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2 MÉTODOS</b> .....	17
<b>3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO</b> .....	19
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
<b>4.1 HIDROMETRIA</b> .....	20
<b>4.1.1 Pequeno histórico sobre hidrômetros</b> .....	20
<b>4.1.2 A importância da exatidão do instrumento</b> .....	21
<b>4.1.3 Funcionamento dos medidores velocimétricos</b> .....	22
<b>4.1.4 Hidrômetro multijato</b> .....	23
4.1.4.1 Mecanismo de regulagem.....	25
4.1.4.2 Acoplamento entre turbina e mecanismo totalizador.....	26
<b>4.1.5 Princípio e prática dos testes dos hidrômetros</b> .....	28
<b>4.1.6 Definições normativas relativas aos hidrômetros</b> .....	29
<b>4.2 BANCOS DE PROVA</b> .....	32
<b>4.2.1 O mecanismo de leitura da relojoaria</b> .....	36
<b>4.2.2 Definições normativas relativas aos bancos de prova</b> .....	38
<b>5 PROPOSTAS DE CALIBRAÇÃO</b> .....	40
<b>5.1 A ação de calibração</b> .....	40
<b>5.2 Ensaio inicial e busca de uma estratégia de calibração</b> .....	42
<b>5.2.1 A primeira tentativa: Emprego da lógica <i>fuzzy</i></b> .....	43
<b>5.2.2 Redução da solução por meio de ajuste de curva</b> .....	44
<b>5.2.3 Determinação do erro em função do ângulo</b> .....	46
5.2.3.1 Testando o ajuste de curva na calibração de um hidrômetro....	53
5.2.3.2 Testes práticos empregando-se o ajuste de curva para calibração de um hidrômetro.....	54
<b>5.2.4 Proposta de regulagem com um modelo de inferência <i>Fuzzy</i> do tipo Sugeno</b> .....	57
5.2.4.1 Testes práticos empregando o sistema de inferência tipo Sugeno.....	62
<b>5.2.5 Validade dos testes práticos deste estudo</b> .....	65
<b>6 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO</b> .....	67
<b>6.1 ETAPAS DE CALIBRAÇÃO</b> .....	67

6.2 CIRCUITO ELETRÔNICO SIMPLIFICADO DO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO.....	70
6.3 O MOTOR DE PASSO.....	71
6.4 SENSORES DE DETECÇÃO DO MOVIMENTO DAS CÂMARAS DE MEDIDA.....	74
6.5 PARTES MECÂNICAS E ADAPTAÇÃO AO BANCO DE PROVAS.....	76
7 RESULTADOS OBTIDOS COM PROTÓTIPO AUTOMATIZADO.....	76
7.1 DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMAS PROTÓTIPO ANTERIORES A GRAVAÇÃO DO MICROCONTROLADOR.....	76
7.2 TESTES COM PROTÓTIPOS AUTOMATIZADOS.....	78
7.3 RESULTADOS E ANÁLISES.....	80
7.3.1 Análise de dados .....	83
8 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
APÊNDICE A – LÓGICA <i>FUZZY</i> .....	90
A.1 Conjuntos <i>fuzzy</i> .....	90
A.2 Conceitos básicos sobre conjuntos <i>fuzzy</i> .....	91
A.3 Representações dos conjuntos <i>fuzzy</i> .....	91
A.4 A determinação das funções de pertinência.....	94
A.5 As variáveis lingüísticas.....	94
A.6 Expressão <i>fuzzy</i> do conhecimento.....	95
A.7 Operações lógicas com conjuntos <i>fuzzy</i> .....	96
A.8 A forma e a quantidade das funções de pertinência.....	99
A.9 Métodos de “fuzificação” e “defuzificação”.....	99
A.10 Métodos de inferência <i>fuzzy</i> .....	100
A.11 Projeto de um controlador <i>fuzzy</i> .....	103
APÊNDICE B – MICROCONTROLADORES E A LINGUAGEM C.....	105
B.1 O MICROCONTROLADOR PIC 16F877A DO MICROCHIP.....	105
B.1.1 Principais características do 16F877A.....	106
B.1.2 Blocos de um microcontrolador.....	108

<b>B.2 A LINGUAGEM C.....</b>	<b>111</b>
<b>B.2.1 A escrita do código fonte em linguagem C.....</b>	<b>111</b>
<b>B.2.2 A IDE MikroC.....</b>	<b>113</b>

## **APÊNDICE C – PROGRAMAS**

<b>C.1 Programa protótipo do ajuste de curva para PC.....</b>	<b>115</b>
<b>C.2 Programa protótipo Sugeno para PC.....</b>	<b>116</b>
<b>C.3 Programa do ajuste de curva para MCU.....</b>	<b>118</b>
<b>C.4 Programa Sugeno para MCU.....</b>	<b>122</b>

# 1 INTRODUÇÃO

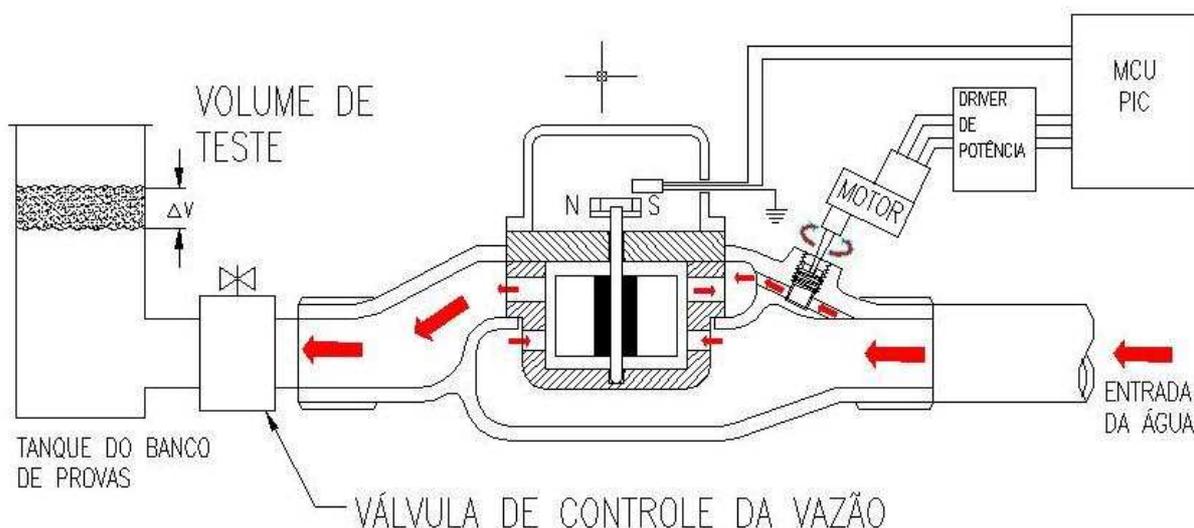
Segundo Troskolanski (1960), o hidrômetro é um instrumento usado para a medição automática do volume ou massa da água que flui através dele. Hidrômetros são utilizados em residências, edifícios comerciais e nos sistemas públicos de suprimento de água potável. Tipicamente, estes possuem um mecanismo totalizador, no qual se registra a quantidade de fluido utilizado pelo consumidor, um conjunto de câmara hidráulica, onde a energia mecânica do fluido é transformada em rotação e, dependendo do tipo de hidrômetro, um sistema de regulagem por parafuso obturador, que compensa as eventuais diferenças entre o volume real que atravessa o medidor e a leitura totalizada. Há vários tipos de princípios de funcionamento, tais como: velocimétrico, volumétrico, ultrassônico e eletromagnético, porém, neste trabalho tratar-se-á somente da calibração dos medidores de princípio velocimétrico.

Em linhas gerais, a necessidade de calibração de hidrômetros referenciada por um padrão aferido pela autoridade metrológica se faz necessária porque as peças que compõem estes instrumentos nunca são exatamente iguais, variando dentro de tolerâncias de fabricação, não somente dimensionais, mas também daquelas resultantes de seu processamento e, levando em conta também, as incertezas das medições. Desta forma, os hidrômetros, principalmente os velocimétricos, são projetados contendo dispositivos mecânicos que compensam estas variações e permitem sua calibração dentro de uma faixa de erros estipulada pela legislação vigente.

A calibração é uma das etapas na fabricação da maioria dos tipos de hidrômetros velocimétricos. Por tratar-se de uma operação complexa, altamente dependente de atenção humana, realizada com auxílio de um equipamento de alto custo, que requer mão de obra especializada e capacitada, resulta ser uma etapa cujo valor é relevante e determinante para as quantidades finais produzidas na linha de produção. A partir da observação de todas estas questões surgiu o ensejo de automatizar esta operação. O objetivo deste estudo foi, portanto, propor, desenvolver e analisar um sistema de calibração automática de hidrômetros do tipo velocimétrico.

## 2 MÉTODOS

Como alternativa ao processamento das diversas variáveis envolvidas na calibração, o emprego de microcomputadores ou microcontroladores adaptados a um sistema mecânico de banco de provas foram respostas imediatamente lembradas. A alternativa do uso de um microcontrolador foi a que se buscou concretizar. Propôs-se que os dados de entrada coletados por sensores seriam processados para resultar em uma resposta complexa, a qual é a ação de calibração do hidrômetro. Mais do que isso, o microcontrolador teve seu código fonte desenvolvido de duas maneiras diferentes, numa proposta comparativa, de compensar a dificuldade de uma modelagem matemática onde atritos mínimos são de fato significantes, além do fato de que o comportamento dos hidrômetros é muito influenciável por variáveis de processo. Os dados para determinação da função do erro versus o ângulo do regulador, bem como os conjuntos *fuzzy* contidos nas propostas de modelagem foram levantados em testes de laboratório anteriores à construção do protótipo. Um desenho esquemático do sistema como um todo está na Figura 1.



**Figura 1:** Desenho esquemático do sistema

A operação do equipamento ocorre da seguinte forma: O medidor encontra-se montado em um banco de provas, alimentado por uma vazão e pressão constantes de água durante determinado intervalo de tempo. Verifica-se o erro relativo de medição comparando a leitura da relojoaria do medidor ao volume que realmente o

atravessou e que pode ser contabilizado por qualquer outro padrão. As leituras de erro relativo serão devidamente tratadas pelo circuito microcontrolado, e, ao final do teste, dispara-se uma ação de calibração executada pelo motor de passo conectado ao regulador do medidor. Depois de executado um ciclo completo de calibração, o sistema poderá, ou não, repassar a medição para verificar se há necessidade de ajuste da calibração.

### 3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O capítulo quatro é uma revisão bibliográfica sobre as questões centrais deste estudo, tais como, a hidrometria, os bancos de prova e seu funcionamento.

O capítulo cinco discorre sobre as propostas de calibração automática, ou de como o problema pode ser tratado matematicamente para que se traduza na ação física que se almeja. São sugeridos dois diferentes meios e faz-se uma comparação de resultados ainda que, nesta etapa, a ação de calibração tenha sido manual e não de forma automatizada.

O capítulo seis trata do desenvolvimento do protótipo automatizado, avançando nos tópicos do acionamento eletro-mecânico, da captação de sinais para execução das leituras e da parte mecânica de redução para a movimentação do regulador.

O capítulo sete é sobre os resultados obtidos com o protótipo automatizado e no capítulo oito chega-se finalmente a conclusão, os ganhos e considerações sobre o automatismo proposto.

Na parte final, após as referências disponibilizam-se apêndices sobre a questão da lógica *fuzzy*, sobre o microcontrolador e a linguagem C como forma de embasamento para os conteúdos tratados no corpo do texto. Ainda em um último apêndice aparecem as listagens dos programas utilizados.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 HIDROMETRIA

#### 4.1.1 Pequeno histórico sobre hidrômetros

A necessidade de se medir vazão surgiu quando, depois de canalizar a água para o consumo doméstico, a administração pública descobriu uma fonte de arrecadação e estabeleceu taxas para o consumo do líquido. Segundo consta, as primeiras medições de água teriam sido executadas por egípcios e romanos, povos cujas obras de adução de água fazem parte, ainda hoje, das ruínas históricas de vários países da Europa e do norte da África. Um texto do governador e engenheiro romano Julius Frontinus (30-103 D.C.) traz referências precisas a respeito (DELMÉE, 2003).

O assunto voltou a ser estudado no século XV, com Leonardo da Vinci (1452-1519), no trabalho intitulado “Sobre o movimento da água e das águas pluviais”, e mais tarde por Galileu Galilei (1564-1642) e por seu discípulo, Evangelista Torricelli (1608-1647), que estabeleceu a equação sobre o escoamento livre da água por meio de orifícios (DELMÉE, 2003). Com os físicos Daniel Bernoulli (1700-1782) e Leonardo Euler (1707-1783), as bases da mecânica dos fluidos foram assentadas. Bernoulli formulou em 1738 a principal lei sobre o movimento dos líquidos, comumente chamada de “equação de Bernoulli”, e Euler estabeleceu as equações diferenciais gerais relativas ao movimento dos líquidos perfeitos. No século XVIII, Henri Pitot (1695-1771) apresentou seu instrumento conhecido como “tubo de Pitot” capaz de medir a velocidade da água. Em 1797, Giovanni Venturi (1746-1822) publicou o resultado de seu estudo sobre o que ficou conhecido como “tubo Venturi” (DELMÉE, 2003). Mais especificamente no caso dos hidrômetros, o número de referências a seu respeito é consideravelmente pequeno (ARREGUI *et al.*, 2006).

A ausência de literatura específica é impressionante tanto do ponto de vista técnico quanto do ponto de vista da administração da distribuição. Os medidores domiciliares, que de certa maneira se assemelham aos atuais, surgiram, segundo pesquisas realizadas, na Inglaterra, por volta de 1850. A empresa Siemens y Halske

começou a produzi-los em escala industrial em 1856. Esta empresa pertencia aos senhores Siemens e Adams, que obtiveram permissão de uma empresa alemã para fabricá-los (COELHO, 1997).

O medidor de água, ou hidrômetro, é um meio de custeio justo do consumo, ademais de prover dados fundamentais à administração técnica da distribuição por permitir a caracterização da demanda, a identificação de falhas e de comportamentos anômalos na rede de distribuição (ARREGUI, 2006).

#### 4.1.2 A importância da exatidão do instrumento

Em todo o mundo, nas últimas décadas, o preço da água tem aumentado e tem havido um esforço constante de refletir na tarifação os custos reais de captação, tratamento e distribuição de água potável (ARREGUI *et al.*, 2006). Quanto maior o custo da água, maior é o prejuízo conseqüente de volumes não contabilizados, de consumo ilegal e de outros tipos de perdas. Grande também é o impacto do retorno negativo de medidores inexatos instalados em uma rede de distribuição.

Obviamente é grande a necessidade que a exatidão destes instrumentos, que seus limites de erro relativo admissível sejam bem estabelecidos pela devida normalização. Não tardou a que os órgãos governamentais percebessem esta necessidade, instituindo assim a melhoria e observação da exatidão dos medidores.

A norma brasileira que determina os limites de erro aceitáveis para os medidores, que, no caso deste estudo é o modelo multijato velocimétrico de vazão nominal 1,5 m<sup>3</sup>/h, classe B, é a Norma NBR NM 212 (nov. 1999) - Medidores velocimétricos de água potável fria até 15 m<sup>3</sup>/h. Este documento estabelece os erros relativos máximos admissíveis em função da classe do medidor e das vazões como sendo:

- a) para zona inferior de vazão, ou seja,  $q_{\min} \leq q < q_t$  : erro máximo admissível + / - 5%;
- b) para zona superior,  $q_t \leq q \leq q_s$  : erro relativo máximo admissível + / - 2%;

Onde:

**Vazão: (q)** : Quociente entre o volume de água que atravessa o medidor e o tempo de passagem deste volume, expresso em metros cúbicos por hora.

**Vazão de sobrecarga ( $q_s$ ):** Vazão até a qual o medidor pode funcionar de forma satisfatória por um curto período sem danificar-se e cujo valor para o medidor empregado neste estudo igual a 3 m<sup>3</sup>/h.

**Vazão mínima ( $q_{\min}$ ):** A menor vazão em que o medidor deve registrar sem que os erros sejam maiores que o máximo admissível. Para o medidor empregado neste estudo este valor é de 0,03 m<sup>3</sup>/h.

**Vazão de transição ( $q_t$ ):** Valor da vazão situada entre as vazões de sobrecarga e a mínima, no qual o campo de medição divide-se em duas zonas, superior e inferior, cada uma caracterizada pelo valor do erro máximo admissível. Para o medidor empregado neste estudo este valor é de 0,12 m<sup>3</sup>/h.

#### 4.1.3 Funcionamento dos medidores velocimétricos

**Observação:** Com intuito de evitar-se a repetição constante do termo, esclarece-se que, a partir deste ponto, onde se declara “erro” deve ser entendido sempre como “erro relativo”.

A norma NBR 10396 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. 1988) classifica os medidores de vazão em dois tipos básicos:

- (1) os volumétricos ou mássicos, nos quais o volume é determinado pelo enchimento e esvaziamento alternado de câmaras de capacidade determinada;
- (2) os de vazão instantânea, nos quais a indicação da vazão é em tempo real, sem a necessidade de enchimento de câmaras.

Na tabela 1 estão listados os diversos tipos de medidores de vazão.

Este estudo considerou somente a calibração automatizada de medidores tipo velocimétrico, por tratar-se do tipo de medidor produzido no processo que se pretende automatizar.

O princípio de funcionamento dos medidores velocimétricos baseia-se na incidência tangencial de um jato em uma turbina com pás radiais disposta no interior do corpo do medidor. A velocidade de rotação é proporcional à velocidade de impacto da água, ou, em outras palavras, à vazão circulante. Qualquer modificação

na relação existente entre a vazão e a rotação da turbina, ou rotor, alterará a curva de erros e, conseqüentemente, o erro do medidor (ARREGUI *et al.*, 2006).

**Tabela 1:** Os diversos tipos de medidores de vazão

<i>Tipos de medidores de vazão</i>
Rotor semi-submerso
Pistão recíproco
Pistão rotativo
Palheta
Diafragma
Multi rotor
Lóbulo
Engrenagem
Disco de natação
Vazão instantânea
Vórtice
Eletromagnético
Térmico
Força
Canal aberto
Pressão diferencial
Resistência linear
Tubo de Pitot
Placa de orifício
Tubo de Venturi
Bocal
Tubo multi furos
Área variável
Velocimétrico
Turbina
Hélice
Anemômetros
Ultrassônico
Coriolis

Fonte: Delmée (2003).

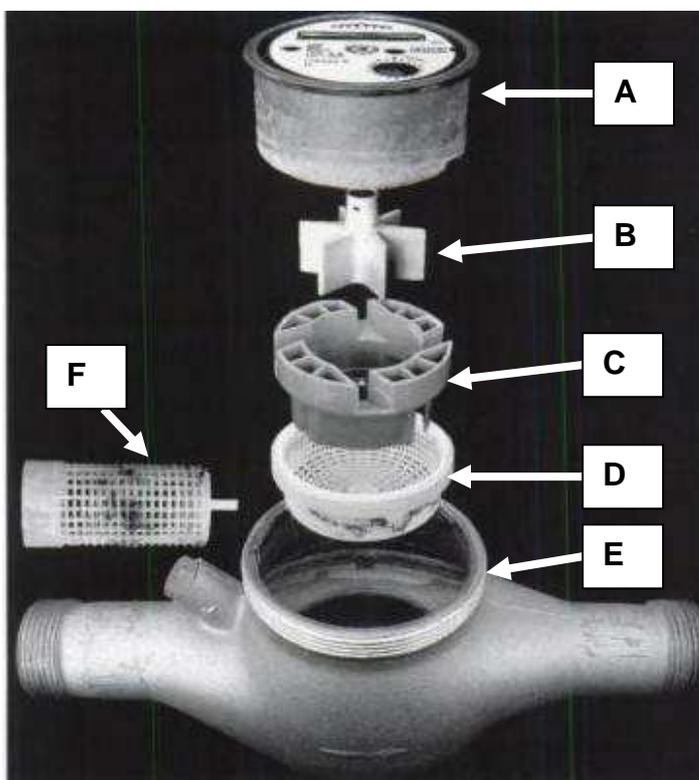
#### 4.1.4 Hidrômetro multijato

Os medidores do tipo multijato podem também ser incluídos no grupo dos medidores velocimétricos, sua característica principal é que a água impacta em seu rotor em múltiplos pontos ao redor do seu perímetro. Este método resulta em um funcionamento mais equilibrado sob o ponto de vista de forças atuantes no rotor, e, em teoria, numa maior durabilidade do medidor. Adicionalmente, espera-se que

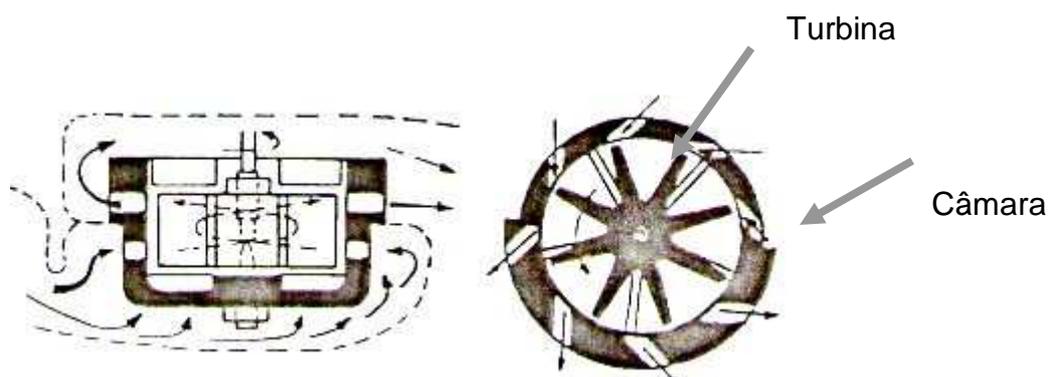
medidores multijato trabalhem melhor em vazões baixas e menores vazões de início de funcionamento.

No presente estudo utilizou-se este modelo de hidrômetro porque seu mecanismo de regulagem atua, hidrodinamicamente falando, mais isoladamente do que no modelo unijato, também fabricado pela empresa na qual atua o autor. Este fato colabora no sentido de reduzir as variáveis que atuam sobre a regulagem, já que, no modelo unijato a água que circula no duto *by-pass* acaba incidindo diretamente sobre a turbina, e no caso do medidor em estudo trata-se de um circuito totalmente paralelo em relação ao volume que atravessa a câmara de medida.

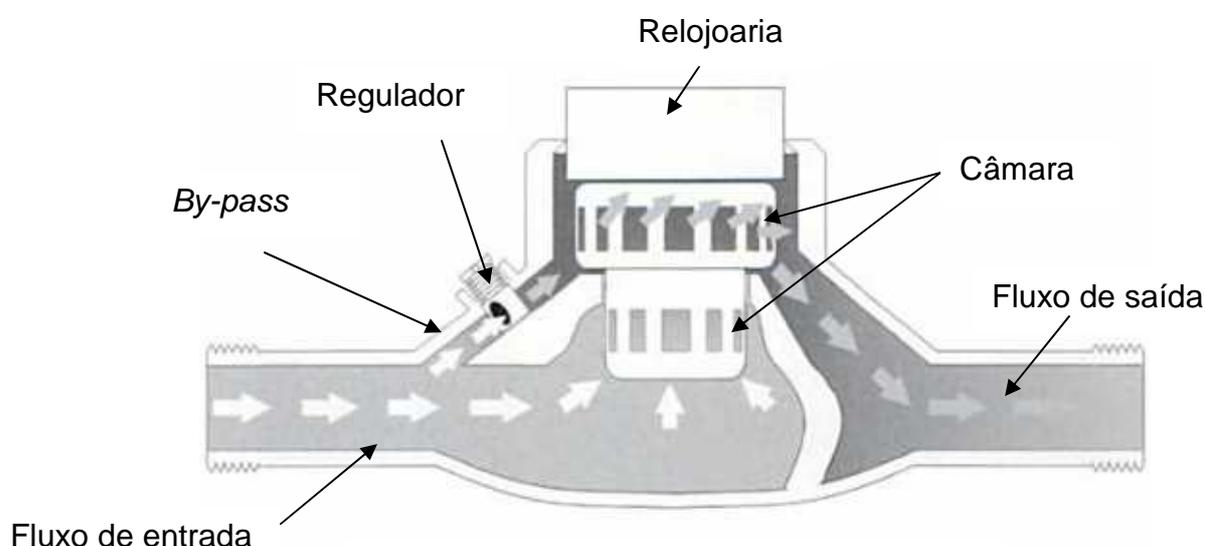
A figura 2 a seguir mostra um hidrômetro do tipo multijato. A figura 3 mostra a câmara deste medidor e a figura 4 o seu mecanismo de regulagem.



**Figura 2:** Aspecto interno de um medidor multijato. A) Relojoaria, B) Turbina, C) Câmara, D) Filtro da câmara ( o medidor em estudo não emprega este filtro). E) Carcaça, F) Filtro do bocal de entrada. Fonte: Arregui *et al.* (2006)



**Figura 3:** Câmara de um medidor Multijato. Fonte: Coelho (1997).



**Figura 4:** Desenho esquemático do mecanismo de regulagem. Fonte: Arregui *et al.* (2006)

#### 4.1.4.1 Mecanismo de regulagem

Nos medidores multijato, o ajuste da curva de erros é executado por meio de um parafuso regulador que controla a quantidade de água que passa por meio de um circuito *by-pass*. Deste modo, a água pode passar pelo medidor por dois diferentes caminhos, um através da câmara de medidas e outro através do *by-pass* que é regulado pelo parafuso. Quanto mais alta a vazão através do *by-pass*, menor é o volume totalizado pelo medidor enquanto sua curva de erros é deslocada no sentido dos erros negativos. Quando o regulador é fechado, a vazão através da câmara de medidas é aumentada e a curva de erros é deslocada em direção aos erros positivos. Observar a figura 4 acima.

#### 4.1.4.2 Acoplamento entre turbina e mecanismo totalizador

O acoplamento entre a turbina e a relojoaria pode ser mecânico ou magnético (Figuras 5 e 6). Os acoplamentos do tipo magnético são mais empregados em medidores classe B, enquanto que os mecânicos em medidores classe C (ARREGUI *et al.*, 2006).

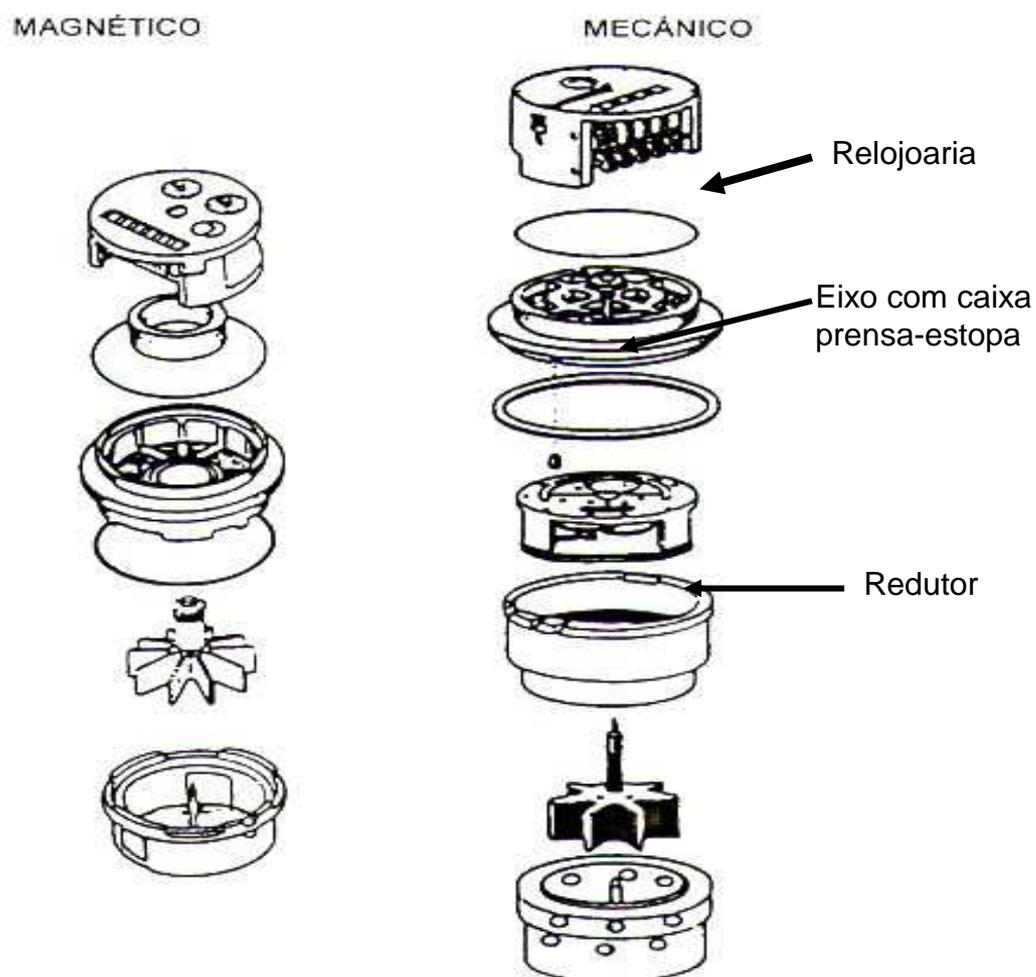
A questão das classes indica indiretamente a sensibilidade que o medidor deve possuir. Por exemplo: Um hidrômetro cuja designação é diâmetro nominal 15 mm, vazão nominal 1,5 m<sup>3</sup>/h e é de **classe B** indica o volume que o atravessou com um erro admissível de mais ou menos 5%, operando em um regime de 0,030 m<sup>3</sup>/h, que é a vazão mínima estabelecida na norma pertinente. Caso tivéssemos o mesmo medidor, só que em vez de ser **classe B** fosse **classe C**, ele ainda teria que apresentar os mesmos mais ou menos 5% de erro admissível, porém, a vazão mínima definida pela norma não mais seria os 0,030 m<sup>3</sup>/h, e sim 0,015 m<sup>3</sup>/h, o que o torna mais sensível por ser capaz de medir com a mesma faixa de erros uma vazão que é a metade da definida para classe B. A tabela 2 informa as vazões definidas pela norma para as diversas classes.

O tipo de acoplamento dos medidores empregados neste estudo é o magnético. Medidores de Classe B em geral utilizam relojoarias secas, ou seja, o mecanismo totalizador fica totalmente isolado do fluido sendo medido. A transmissão do movimento se dá pelo arrasto de um campo magnético de um ímã localizado na parte superior da turbina, e que, mesmo estando separado da relojoaria por uma parede rígida, consegue fazer girar o ímã posicionado na parte inferior da mesma que movimenta todo o restante do engrenamento, inclusive os elementos que indicarão o volume utilizado.

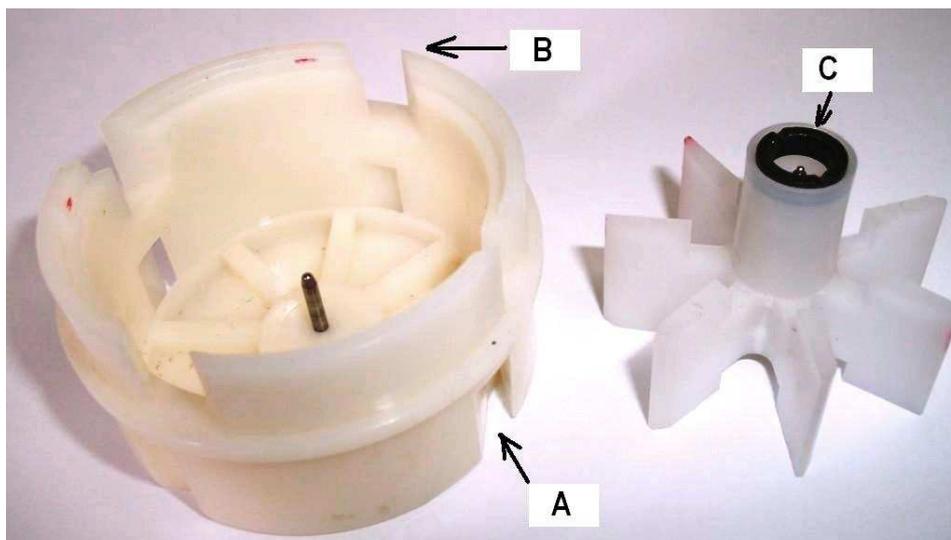
Nos medidores de transmissão mecânica, o movimento é transmitido aos elementos indicadores do volume consumido diretamente por meio de engrenagens e um eixo dotado de gaxetas, conjunto comumente conhecido como prensa-estopa ou *stuffing box*.



**Figura 5:** Transmissão magnética. Fonte: Coelho (1997).



**Figura 6:** Transmissões magnéticas e mecânicas. Fonte: Coelho (1997).



**Figura 7:** Câmara e turbina do medidor multijato LAO empregado neste estudo  
A) Canal de entrada; B) Canal de saída ; C) Ímã da turbina

**Tabela 2:** Principais características dos medidores classe C e B. Fonte: Arregui *et al.* (2006).

Classe Metrológica	B	C	B	C	B	B	B	B
Diâmetro (mm)	15	15	20	20	25	30	40	50
Vazão nominal (m <sup>3</sup> /h)	1,5	1,5	2,5	2,5	3,5	5	10	15
Vazão máxima (m <sup>3</sup> /h)	3	3	5	5	7	10	20	30
Vazão de transição (+/-2%) (l/h)	120	22,5	220	37,5	280	400	800	3000
Vazão mínima (+/-2%) (l/h)	30	15	50	25	70	100	200	450
Vazão de início de funcionam. (l/h)	7	7	12	12	25	25	35	45
Perda de carga em vazão máxima	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9

#### 4.1.5 Princípio e prática dos testes dos hidrômetros

A exatidão ou erro, de maneira simplificada, pode ser definida como o quociente entre o valor da leitura esperada (volume teórico) e o volume real do fluido

que atravessou o medidor. Assim, um medidor que registrou 9 m<sup>3</sup> quando, na realidade 10 m<sup>3</sup> de água passaram por ele, tem uma exatidão de 9/10 ou 90%.

Frequentemente utiliza-se o erro positivo ou negativo. Um medidor que registra 95 m<sup>3</sup> quando 100 m<sup>3</sup> passaram por ele apresenta um erro negativo de 5%. Para facilitar, as literaturas oferecem uma fórmula que relaciona diretamente as leituras obtidas nas relojoarias do medidor para o cálculo do erro de medidores sendo aferidos em um banco de prova. Por exemplo, Senra (2009) assim coloca:

*Determinação dos erros de indicação: Consiste em comparar as indicações das medidas de volumes encontrados com as leituras do padrão adotado, sendo os erros relativos calculados pela fórmula abaixo:*

$$E = [(L_f - L_i) - V_e] / V_e \times 100$$

Onde:

*E* – valor do erro de indicação calculado (%)

*L<sub>f</sub>* – Leitura final do instrumento ensaiado

*L<sub>i</sub>* – Leitura inicial do instrumento ensaiado

*V<sub>e</sub>* – volume escoado durante o ensaio (tanque padrão)

#### **4.1.6 Definições normativas relativas aos hidrômetros**

Por tratar-se de um instrumento com características de funcionamento e desempenho regulamentados pelos órgãos da metrologia legal, serão dadas a seguir as definições estabelecidas empregadas neste estudo. Todas estas definições fazem parte da NBR NM 212, 1999, foi preservada a numeração original do item para facilitar a identificação.

[...] 3.1 O medidor de água é um instrumento destinado a indicar e totalizar continuamente o volume de água que o atravessa. (no presente trabalho utilizamos também a denominação “hidrômetro” totalmente reconhecida e consagrada).

3.2 Medidor velocimétrico: instrumento instalado num conduto fechado, que consiste de um elemento móvel acionado diretamente pela velocidade do fluxo de água, cujo movimento é transmitido por meios mecânicos ou outros, ao dispositivo indicador que totaliza o volume.

3.2.1 Medidor monojato: Medidor velocimétrico cujo mecanismo medidor é acionado pela incidência de um único jato tangencial de água sobre o componente móvel.

3.2.2 Medidor multijato: Medidor velocimétrico onde o mecanismo medidor é acionado pela incidência de vários jatos tangenciais de água sobre o componente móvel. [...]

[...] 3.3 Vazão: ( $q$ ) : Quociente entre o volume de água que atravessa o medidor e o tempo de passagem deste volume, expresso em metros cúbicos por hora.

3.4 Vazão permanente ( $q_p$ ) : Vazão até a qual o medidor pode funcionar de forma satisfatória, sob condições normais de uso e que determina o valor numérico da designação do medidor, por exemplo: em condições de escoamento uniforme ou intermitente. Em alguns países membros do MERCOSUR esta vazão se determina “vazão nominal” e seu símbolo é  $q_n$ .

3.5 Vazão de sobrecarga ( $q_s$ ): Vazão até a qual o medidor pode funcionar de forma satisfatória por um curto período sem danificar-se e cujo valor é o dobro do valor de  $q_p$ .

3.6 Vazão mínima ( $q_{min}$ ): A menor vazão em que o medidor deve registrar sem que os erros sejam maiores que o máximo admissível.

3.7 Campo de medição: Campo limitado pela vazão de sobrecarga,  $q_s$ , e a vazão mínima,  $q_{min}$ , dentro do qual, as indicações do medidor não devem apresentar por um erro maior que os máximos admissíveis. Este campo está dividido em duas zonas denominadas “superior” e “inferior”, separadas pela vazão de transição,  $q_t$ .

3.8 Vazão de transição ( $q_t$ ): Valor da vazão situada entre as vazões de sobrecarga e a mínima, no qual o campo de medição divide-se em duas zonas, superior e inferior, cada uma caracterizada pelo valor do erro máximo admissível.

3.9 Dispositivo totalizador: Componente que recebe a transmissão dos movimentos, indicando e totalizando o volume escoado.

3.10 Pressão de trabalho: pressão do fluido imediatamente à montante do medidor.

3.11 Pressão nominal (PN): pressão que designa o medidor, corresponde à pressão máxima de trabalho, utilizada para dimensionamento e ensaios.

3.13 Diâmetro nominal (DN) Designação numérica comum a todos os componentes do sistema de tubulação. É um número inteiro usado apenas para referência, próximo das dimensões construtivas.

3.14 Designação do medidor (N): Valor numérico, precedido da letra N, que designa o medidor com relação a vazão permanente  $q_p$ . [...]

Sobre o dispositivo totalizador, ou relojoaria, temos a seguir os requisitos gerais utilizados neste estudo:

[...] 4.2.2 Dispositivos suplementares: O medidor pode incluir dispositivos

suplementares que podem estar incorporados de forma permanente ou temporária. Estes dispositivos podem ser utilizados para detectar o movimento do mecanismo de medição antes que este seja claramente visível no indicador. Quando as disposições legais permitirem, estes dispositivos podem ser utilizados como controle do ensaio de verificação inicial do medidor, sempre que por outros meios se assegure a operação satisfatória do dispositivo indicador, de acordo com 4.2.3.5. Estes dispositivos podem ser utilizados para leitura remota do medidor de acordo com os requisitos de 4.5.

4.3 Dispositivos de regulagem: Os medidores deverão estar providos de um dispositivo de regulagem externa que permita modificar a relação entre os volumes indicados e o volume que circula realmente, dentro da faixa de no mínimo 4% para medidores com valores de vazão permante ( $q_p$ ) menor que 10 m<sup>3</sup>/h e 2% para medidores de vazão permante ( $q_p$ ) maior ou igual a 10 m<sup>3</sup>/h, entre a posição totalmente aberta e totalmente aberta e totalmente fechada com uma vazão igual a vazão permante ( $q_p$ ).

#### 5.1 Erros máximos admissíveis

Os erros máximos admissíveis devem ser expressos em porcentagem usando a seguinte fórmula.:

$$E\% = ((V_i - V_c) / V_c) * 100$$

Onde:

$V_c$  é o volume de referência

$V_i$  é o volume indicado pelo medidor

Os erros máximos admissíveis para cada zona são:

- a) zona inferior,  $q_{min} \leq q < q_t$  : erro máximo admissível + / - 5%;
- b) zona superior,  $q_t \leq q \leq q_s$  : erro máximo admissível + / - 2%;

5.2 Classes metrológicas: Os medidores dividem-se em três classes metrológicas de acordo com os valores de  $q_{min}$  e  $q_t$ , conforme apresentado na tabela 3. [...]

**Tabela 3:** Classes Metrológicas

<i>Classe</i>	<i>Valor numérico da designação do medidor N &lt; 15 m³/h</i>
Classe A	
$q_{\min}$	0,04 N
$q_t$	0,10 N
Classe B	
$q_{\min}$	0,02 N
$q_t$	0,08 N
Classe C	
$q_{\min}$	0,01 N
$q_t$	0,015 N

## 4.2 BANCOS DE PROVA

Os fabricantes de hidrômetros, bem como as companhias de saneamento e oficinas recuperadoras, devem possuir bancos de prova que garantam a exatidão dos medidores de água novos e recuperados, além de poderem determinar suas características de funcionamento.

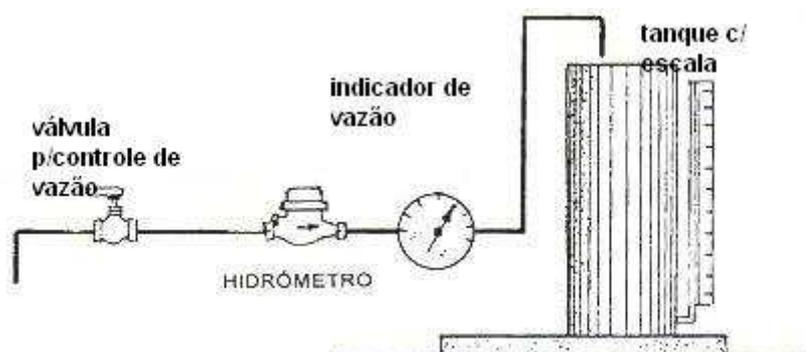
Segundo Coelho (1995), os bancos de prova mais usuais no mercado são de três tipos:

- a) volumétricos
- b) gravimétricos
- c) óptico-eletrônicos

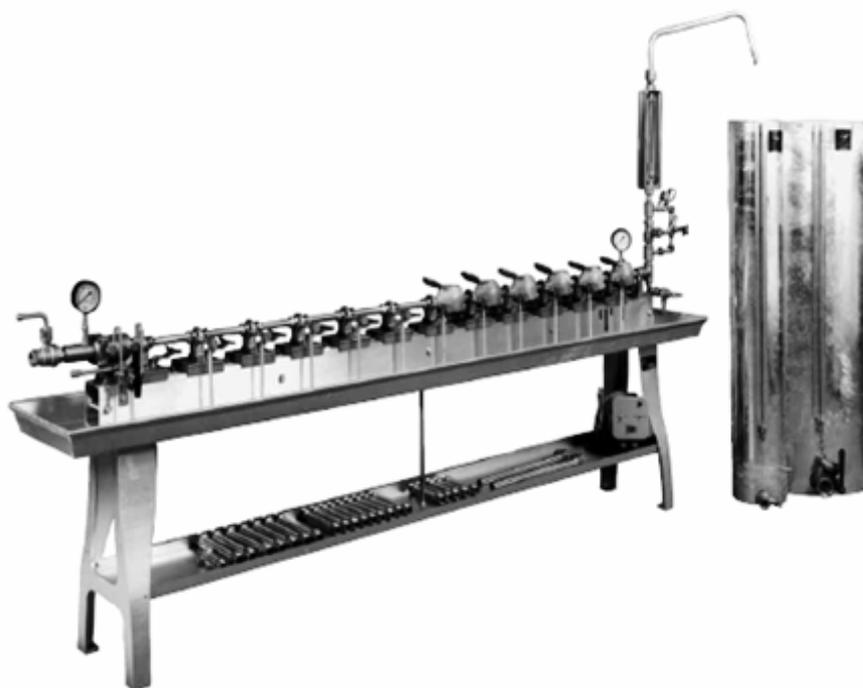
### a) Bancos de prova volumétricos

Utilizam tanques com escalas graduadas que permitem saber a quantidade de água que passa pelo hidrômetro sendo aferido. São simples e fáceis de operar. Sua exatidão é garantida pelo emprego de tanques com dimensões e formas bem definidas e controladas. Seus tanques são geralmente feitos de aço inoxidável para que não haja variação destas dimensões devido à corrosão (COELHO, 1997). Os bancos de prova, para que sirvam como instrumentos de aferição de outros

instrumentos são também verificados e rastreados pela autoridade metrológica legal.



**Figura 8:** Desenho esquemático de um banco volumétrico. Fonte: Coelho (1997).

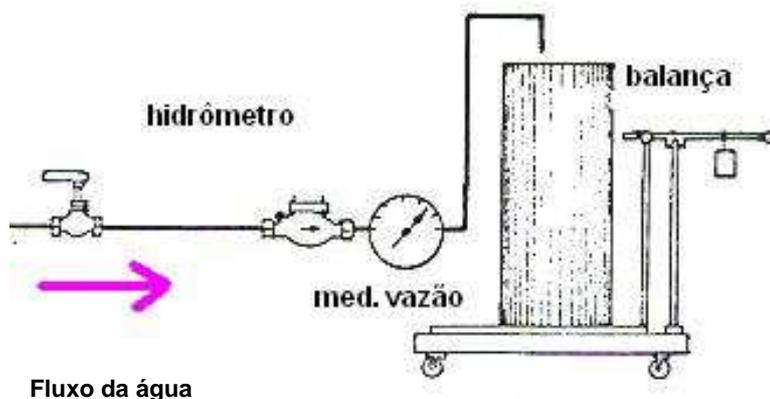


**Figura 9:** Banco de prova volumétrico fabricado pela empresa Ford (E.U.A): Fonte: *Test Bench Manual 6/2009. Installation, Operation, and Maintenance for Ford Water Meter Testing Equipment (2009)*

#### **b) Bancos de prova gravimétricos**

Utilizam uma balança cuja escala pode ser graduada em unidades de volume. Têm reservatórios de dimensões livres e são mais exatos que seus similares volumétricos, mas não são tão fáceis de operar (COELHO, 1997).

De acordo com Senra (2009), estes bancos utilizam balanças eletrônicas, que numa relação entre massa e peso específico da água, definem o volume que atravessou o hidrômetro sendo aferido.



**Figura 10:** Desenho esquemático de banco de prova gravimétrico Fonte: Coelho (1997).

### c) Bancos de prova de princípio optoeletrônico

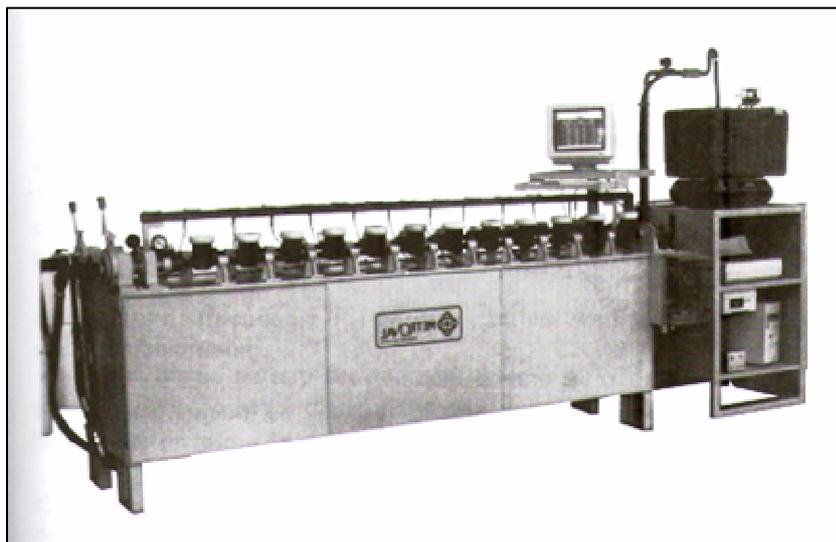
Utilizam o princípio de leitura óptica de diversos tipos para efetuar o sensoramento do medidor padrão e dos hidrômetros em aferição. O erro é determinado a partir da comparação das leituras do padrão e dos medidores sendo aferidos (SENRA, 2009). Este sistema é muito empregado porque permite a calibração em um tempo substancialmente menor do que nos bancos de princípio volumétrico e gravimétrico. A título de comparação, um banco convencional volumétrico B-100 (tanque com capacidade de 100 litros) calibra 10 medidores em 4 horas, um banco eletrônico executa a mesma tarefa em 15 minutos (COELHO, 1997).

A leitura por sensor óptico se presta bem a este serviço, pois não existe nenhum tipo de atrito mecânico que cause prejuízo à sensibilidade da leitura. O modelo **Itron BPA**, que é uma variação deste sistema, utiliza como padrão um pistão cuja haste é dotada de um fuso especial, de exatidão, que se acopla a um *encoder*; deste modo, conhecendo a área do pistão, o passo do fuso e o número de pulsos do *encoder* por revolução, pode-se determinar o volume de água deslocada pelo êmbolo a cada volta do seu fuso (ITRON, 2005). A regulagem da vazão de prova é

feita mediante o envio de um sinal digital determinado pelo operador para controlar o variador de velocidade do motor. Vale esclarecer que este banco, por tratar-se de um equipamento para calibração de hidrômetros em regime de produção em massa, é capaz de controlar todos os parâmetros de aferição eletronicamente, obedecendo aos comandos do operador. Este banco é ligado a um microcomputador que possui um aplicativo especialmente desenvolvido em linguagem DELPHI que controla as operações do banco e calcula os erros obtidos para cada hidrômetro testado, além de gravar um banco de dados MS Access para registro de informações e futuras análises das leituras obtidas.



**Figura 11:** Vista das rampas de aferição de hidrômetros do banco BPA – 5/2 da empresa Itron (Espanha).



**Figura 12** – Banco de princípio optoeletrônico fabricado pela Turbimax, com medidor padrão e cabeças leitoras dotadas de foto-célula. Fonte: Coelho (1997).



**Figura 13** Banco de provas eletrônico produzido pela empresa Maddalena. Fonte: Hidrobolivar (2007).

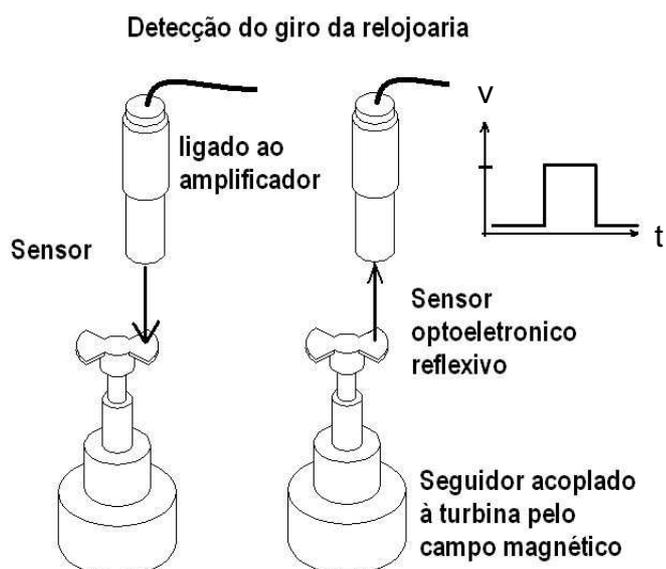
#### 4.2.1 O mecanismo de leitura da relojoaria

Ainda sobre os bancos optoeletrônicos, a captação da leitura do medidor a

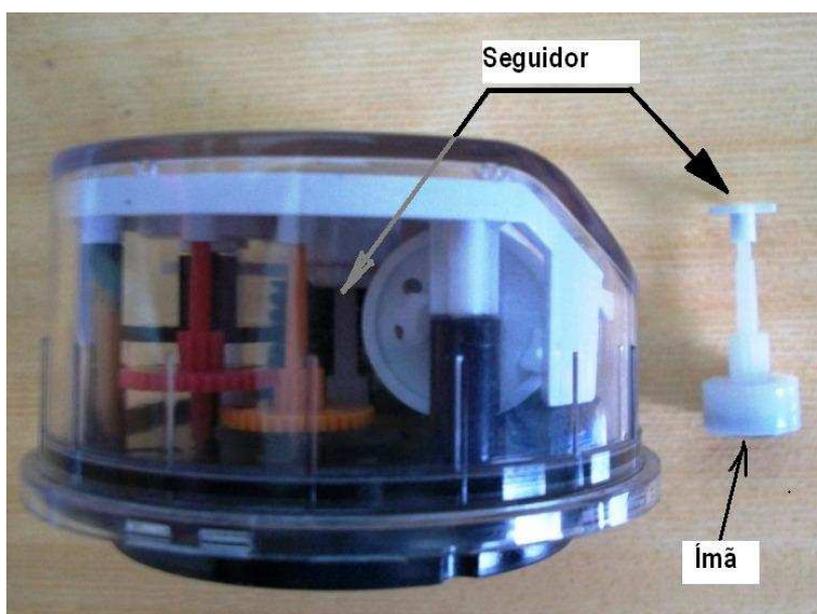
ser comparada com o padrão, qualquer que seja ele, é feita por um sensor optoeletrônico acoplado à relojoaria do hidrômetro. A maioria dos medidores atualmente fabricados possui na relojoaria um componente chamado “disco indicador”, o qual é um disco cuja superfície é interrompida ou gravada em outra cor mais escura do que a do fundo, costumeiramente branca, e que, ao ser interceptado por um feixe proveniente de um diodo laser, transforma as revoluções em pulsos, os quais serão posteriormente digitalizados pelo sistema eletrônico e transmitidos a um totalizador, que contará fielmente o número de revoluções do disco. A figura 15 ilustra seu funcionamento: O citado sensor é do tipo reflexivo, quando intercepta a superfície do disco interrompido, muda seu estado lógico. O sensor é ligado por fibra óptica a um amplificador que reforça o nível de tensão e filtra o sinal. No banco de provas utilizado neste estudo empregou-se um sensor e um amplificador fabricados pela empresa Keyence. O disco está sempre acoplado ao seguidor.



**Figura 14:** Cabeças de leitura optoeletrônicas do banco de provas Maddalena.  
Fonte: Hidrobolivar (2007).



**Figura 15:** Funcionamento das cabeças de leitura optoeletrônicas.



**Figura 16:** Disposição do seguidor e disco indicador no centro da relojoaria.

#### 4.2.2 Definições normativas relativas aos bancos de prova

Sobre os banco de provas, também chamados bancadas de ensaio, são descritas abaixo as definições normativas úteis a este estudo. Todas estas definições fazem parte da NBR NM 212, 1999. Foi preservada a numeração original do item para facilitar a identificação.

[...] 8.2.1 Bancada de ensaio de calibração denominada no presente trabalho também como banco de provas

8.2.1.1 Deve ser projetada e construída de forma que seu desempenho seja satisfatório e não introduza erros significativos nos resultados dos ensaios. O princípio da bancada de ensaio pode ser volumétrico, gravimétrico ou medidor padrão, podendo seus procedimentos ser automatizados ou assistidos por processadores eletrônicos.

NOTA: No caso de ensaios de medidores em série, a bancada deve preservar as características individuais de cada medidor, não podendo haver interferência entre eles.

8.2.1.3 A alimentação da bancada deve ser suficientemente estável de modo que durante os ensaios a variação de vazão seja inferior a +/- 5 % na faixa  $q_t$  e  $q_{max}$ , inclusive, e + - 2,5% na faixa entre  $q_{min}$  e  $q_t$ , inclusive.

8.2.1.6 Bancada gravimétrica

8.2.1.6.1 Deve possuir balança para pesagem da massa de água deslocada através dos medidores, e deve cumprir com o estabelecido em 8.2.1.1 a 8.2.1.3.

8.2.1.6.2 A massa de água determinada deve ser convertida em volume de acordo com a massa específica da água em função da temperatura.

8.2.1.6.3 A resolução da balança deve ser menor ou igual a 0,5% da massa medida. O erro máximo admissível da balança é de 0,2%.

8.2.1.7 Bancada com medidor padrão

8.2.1.7.1 Pode-se utilizar para determinação do volume escoado um medidor padrão, desde que cumpra com o estabelecido em 8.2.1.5.3, que o mesmo tenha sido certificado para tanto e seja calibrado periodicamente.

8.2.4 Medidor de vazão

O erro máximo admissível para a medição da vazão é de 2% da vazão do ensaio.

8.2.5 Termômetro

A temperatura da água deve ser determinada por instrumentos adequados cujo erro máximo não deve superar 1°C.

8.2.6.2 Bancada de ensaio de vazão contínua

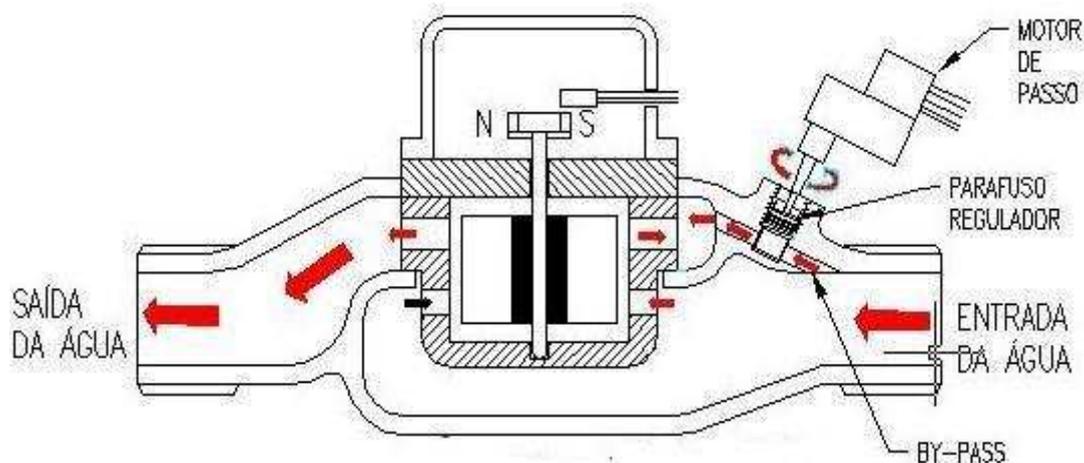
A bancada utilizada no ensaio de vazão contínua deve ter estrutura mecânica, registros, manômetros e bombas hidráulicas suficientes para a vazão de sobrecarga, e a saída do fluxo devem estar localizados em nível mais elevado que a parte mais alta dos medidores.

8.2.7 Cronômetro

A resolução deve ser maior ou igual a 0,2 s. [...]

## 5 PROPOSTAS DE CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA

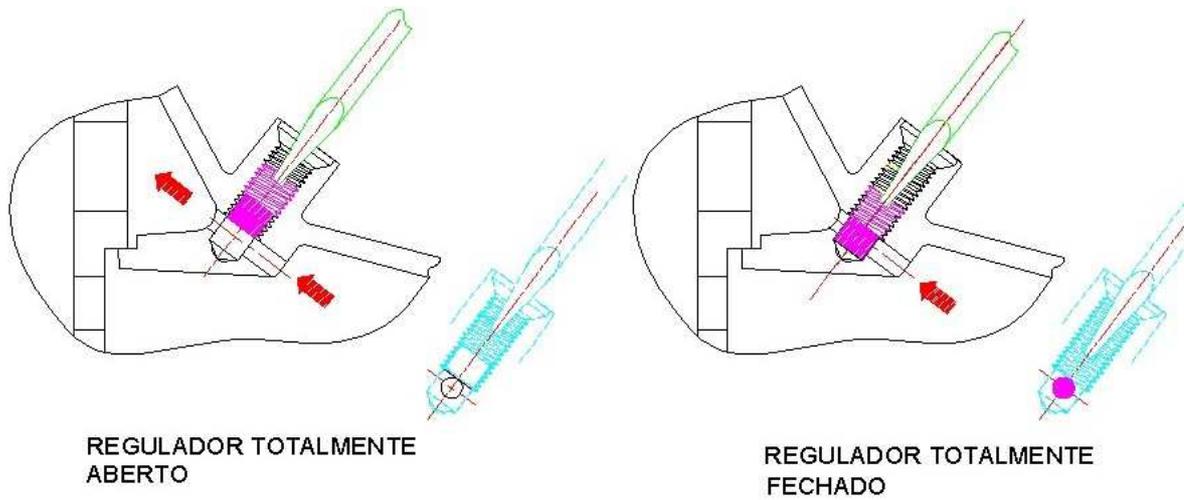
### 5.1 A AÇÃO DE CALIBRAÇÃO



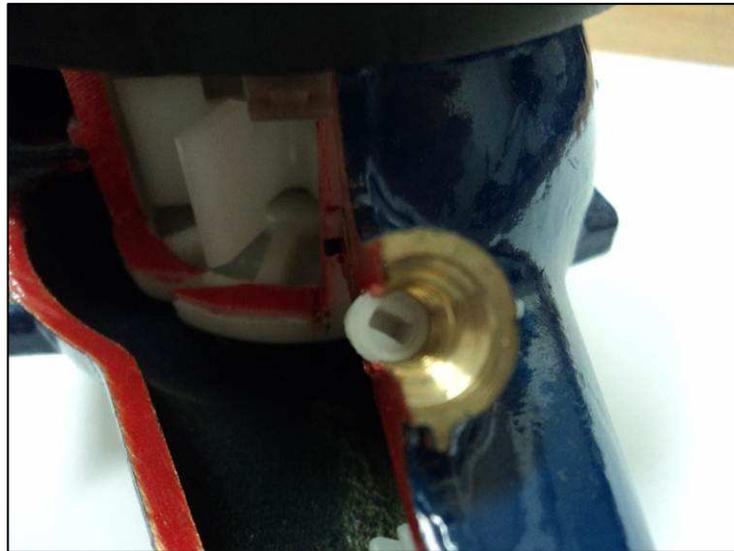
**Figura 17:** Desenho esquemático da regulação automatizada

Retomando o mecanismo de regulação do hidrômetro visto no item 4.1.4.1, temos que a passagem *by-pass* que permite uma quantidade de água que entra no medidor atravessar sem que seja contabilizada pela câmara de medidas, ou seja, sem fazer girar a turbina, passando para a parte superior da câmara já ligada à saída do hidrômetro.

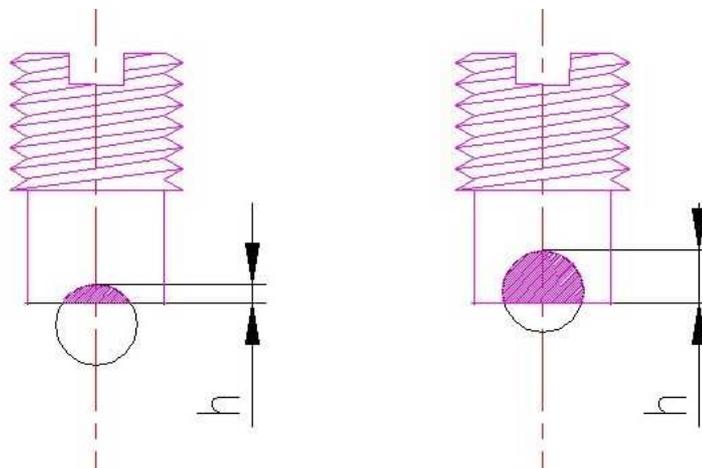
A passagem *by-pass*, por questões de facilidade de usinagem, é feita na carcaça por um processo comum de furação, utilizando-se uma broca cilíndrica para metais. Este furo é interceptado pelo regulador, que é uma peça injetada em acetal copolímero (POM) e dotado de rosca em uma extremidade e, na outra extremidade, de uma região cilíndrica de diâmetro pouco maior que o furo do *by-pass*. Na mesma extremidade da rosca há uma fenda para que seja possível parafusá-lo utilizando uma chave de fenda comum, fechando gradualmente a passagem *by-pass* à medida que se gira esta chave (figura 18).



**Figura 18:** Ação do regulador



**Figura 19:** Detalhe da fenda do regulador em carcaça cortada



**Figura 20:** Detalhe da obstrução do *by-pass*

A ação da regulagem ocorre fechando ou abrindo esta passagem de acordo com o erro que desejamos corrigir na leitura do medidor, o detalhe é que esta ação de correção não é linear ou facilmente determinada matematicamente, isto se deve a quatro razões básicas:

a) Dependendo do ponto de interceptação em que se encontra o regulador em relação ao diâmetro do *by-pass*, um mesmo grau de giro do regulador pode apresentar uma variação na área de passagem maior ou menor (Figura 20).

b) À medida que se restringe a passagem, há variação das velocidades tanto na parte superior quanto na parte inferior da câmara. Fazer esta quantificação por meios matemáticos seria complicado, além do que, perder-se-ia sua referência facilmente porque há mais de uma dezena de tolerâncias geométricas e dimensionais atuando nestas variáveis.

c) Ainda há a influência de outros elementos que nem aparecem na câmara de medidas propriamente dita, mas impactam na leitura do medidor, como a variação dos campos magnéticos dos ímãs da transmissão, atrito mecânico existente na relojoaria e rugosidade da parte interna da carcaça.

d) A ação dos anteparos dispostos propositadamente no interior da câmara de medidas, como resultado de inúmeros testes práticos durante o desenvolvimento do medidor, faz com que o comportamento da velocidade de rotação da turbina não siga exatamente o que se prevê para uma turbina teórica, isto se deve a turbilhonamentos que aparecem por ação destes mesmos anteparos, mas que são necessários para que o medidor apresente uma adequada curva de erros.

## **5.2 ENSAIOS INICIAIS NA BUSCA DE UMA ESTRATÉGIA PARA CALIBRAÇÃO**

Historicamente, na LAO indústria, local em que este projeto foi desenvolvido, os medidores têm sido calibrados manualmente desde o início de sua fabricação, em 1928, quando ainda era um produto praticamente artesanal. Por razões diversas nunca houve a busca da automatização desta operação e, conseqüentemente, não

havia nenhum estudo preliminar a este respeito. Assim, foram iniciados os estudos analisando as curvas de erros resultantes da ação da abertura do regulador buscando-se um padrão de comportamento, que pudesse ser transformada matematicamente em regra para a calibração do modelo de hidrômetro empregado neste estudo.

### 5.2.1 A primeira alternativa com emprego da lógica *fuzzy*

Segundo Kordon (2010), há duas fontes principais para criar sistemas *fuzzy*: o conhecimento de especialistas ou uma base de dados. Como primeira tentativa de modelagem procurou-se desenvolver um sistema baseado em valores de ação de calibração obtidos em função do ângulo de giro do regulador, permitindo deste modo associar variáveis lingüísticas a estes valores e aos ângulos. O ponto a que se quis chegar é exemplificado na Tabela 4 a seguir. Nesta tabela imaginou-se um teste de um medidor Multijato em que supõe-se resultados de valores de calibração atingidos em função do ângulo de abertura do regulador, já sugeridas também variáveis lingüísticas. Estas duas grandezas, erro e ângulo de correção, seriam respectivamente a entrada e a saída em um sistema do tipo Mamdani. Adicionalmente, poderia ser incluída mais uma entrada que seria a vazão de teste.

**Tabela 4:** Exemplo das variáveis lingüísticas para ação de regulagem de um medidor

<i>Valores de calibração (erro) atingidos, ou porcentagem de correção - variável lingüística.</i>	<i>Ângulo de giro do regulador – variável lingüística</i>
+2% - Grande Positivo – GP	0° - Muito Pequeno - MP
+1% - Pequeno Positivo - PP	180° - Pequeno – P
Zero % - Médio – M	360° - Médio - M
-1% - Pequeno Negativo – PN	540° - Grande – G
-2% - Grande Negativo – GN	720° - Muito Grande - MG

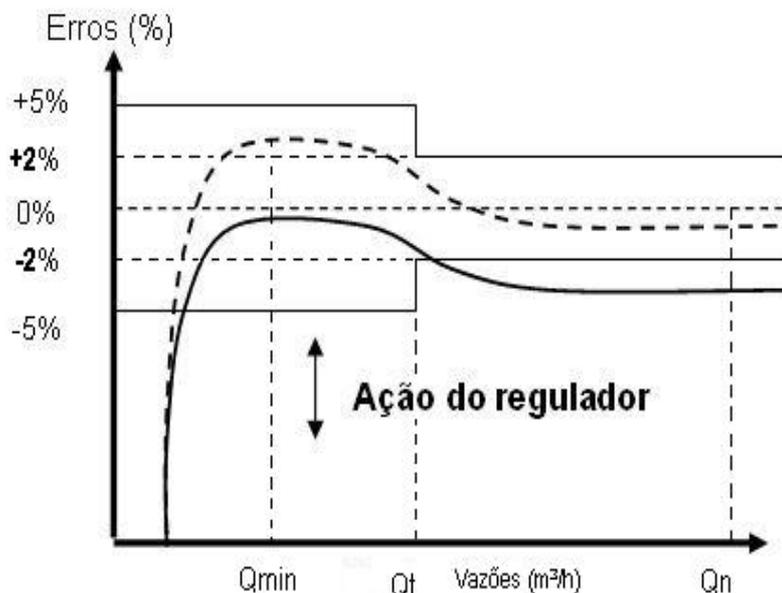
A geração das regras se originaria da extensão de um comportamento percebido em medidores de maior capacidade, mas que até então não se sabia ser válido para o caso do modelo de medidor empregado nesta dissertação. Este

comportamento observado para os grandes medidores refere-se a como o a posição de abertura do regulador influencia no formato da curva de erros, por exemplo, se o regulador está quase todo aberto, ele atua mais na calibração do erro na vazão mínima do que na vazão máxima. Se estivesse todo fechado, comporta-se de modo inverso.

Entretanto, com base em um levantamento de curvas de erros de 30 amostras válidas de Multijatos, não se detectou o mesmo comportamento reconhecido nos medidores de grande capacidade, mais especificamente os Multijatos de DN 50 e  $Q_{\text{máx}} 30 \text{ m}^3/\text{h}$ . Este fato foi atribuído às diferenças entre geometrias das duas carcaças. Nem mesmo foram encontrados medidores já calibrados com reguladores em posição de **quase todo aberto** ou **completamente fechado**, de maneira que não se pode estender o raciocínio e estabelecer as regras a partir do princípio que se pretendia inicialmente. A título de confirmação, estudaram-se amostras maiores e chegou-se à mesma conclusão.

### 5.2.2 Redução da solução por meio do ajuste de curva

Observando-se mais detalhadamente a calibração, percebeu-se que havia um comportamento que se apresentava de forma mais consistente e repetitiva: a ação do regulador se traduzia mais em transladar a curva de erros como um todo, para cima ou para baixo, do que atuando diferentemente em faixas de vazões mais estreitas. Percebeu-se também que, segundo as amostras analisadas, não era possível separar os hidrômetros em classes de acordo com erros apresentados para mesmas aberturas de regulador, como se o conjunto de particularidades de cada hidrômetro o colocasse em um tipo determinado de curva. A figura 21 ilustra o deslocamento da curva: girando-se o regulador no sentido horário (fechando-o), a curva de erros “sobe”, ou os erros tornam-se mais positivos. Ao girá-lo no sentido anti-horário, ocorre o inverso. Ainda na figura 21, a curva em linha cheia é um exemplo de um medidor não regulado, a curva tracejada seria a do medidor regulado.



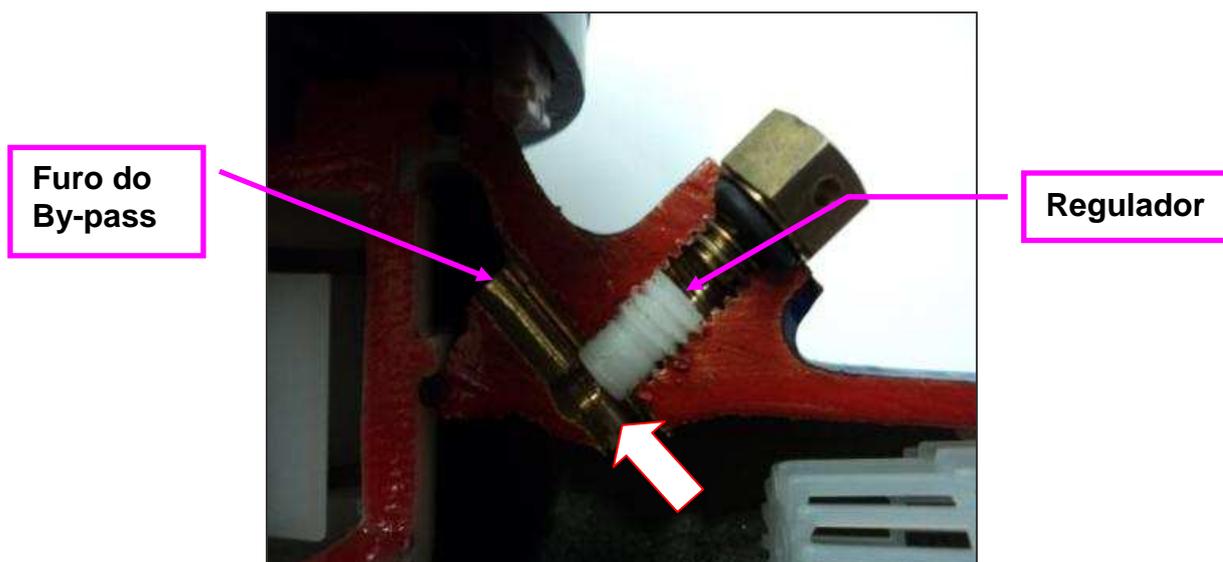
**Figura 21:** Ação do regulador:

A partir do estabelecido nos dois parágrafos anteriores uma segunda proposta foi elaborada segundo um outro ponto de vista em relação às estratégias de controle: uma comparação entre uma implementação *fuzzy* e uma de redução por ajuste de curva.

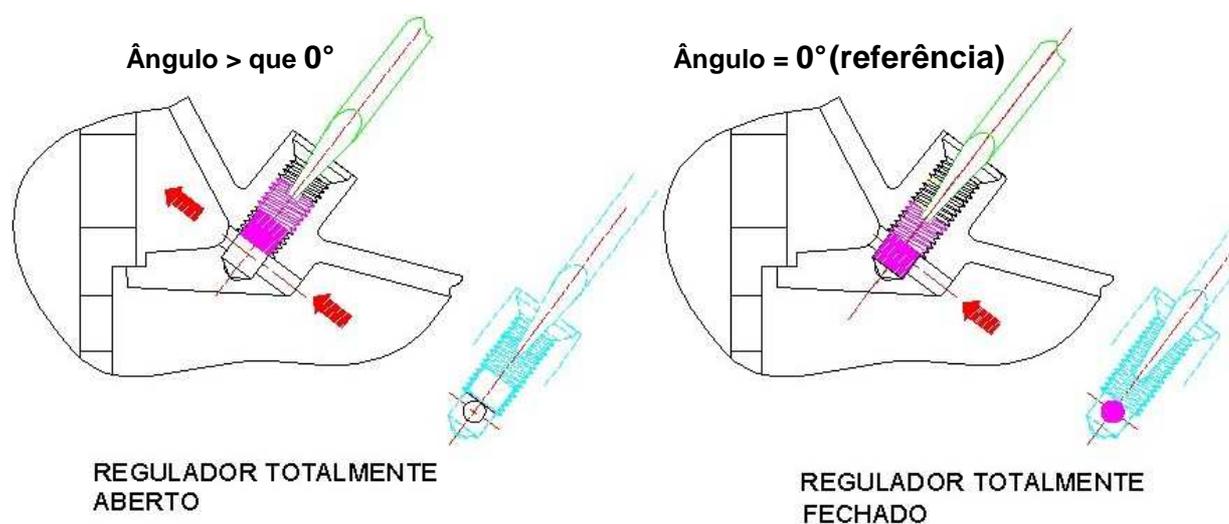
O desenvolvimento da redução por ajuste de curva teve sua origem também em dados mensuráveis e procurou estabelecer uma relação entre o valor de calibração e o ângulo de acionamento do regulador. Para melhor compreender a ação do regulador foram disponibilizadas fotografias das peças em corte nas figuras 22 e 23 a seguir.



**Figura 22:** Fotografia do medidor com a região da entrada cortada para visualização da câmara e mecanismo de regulação.



**Figura 23:** Detalhe do regulador e *by-pass* em corte do hidrômetro multijato DN 20 3m<sup>3</sup>/h.

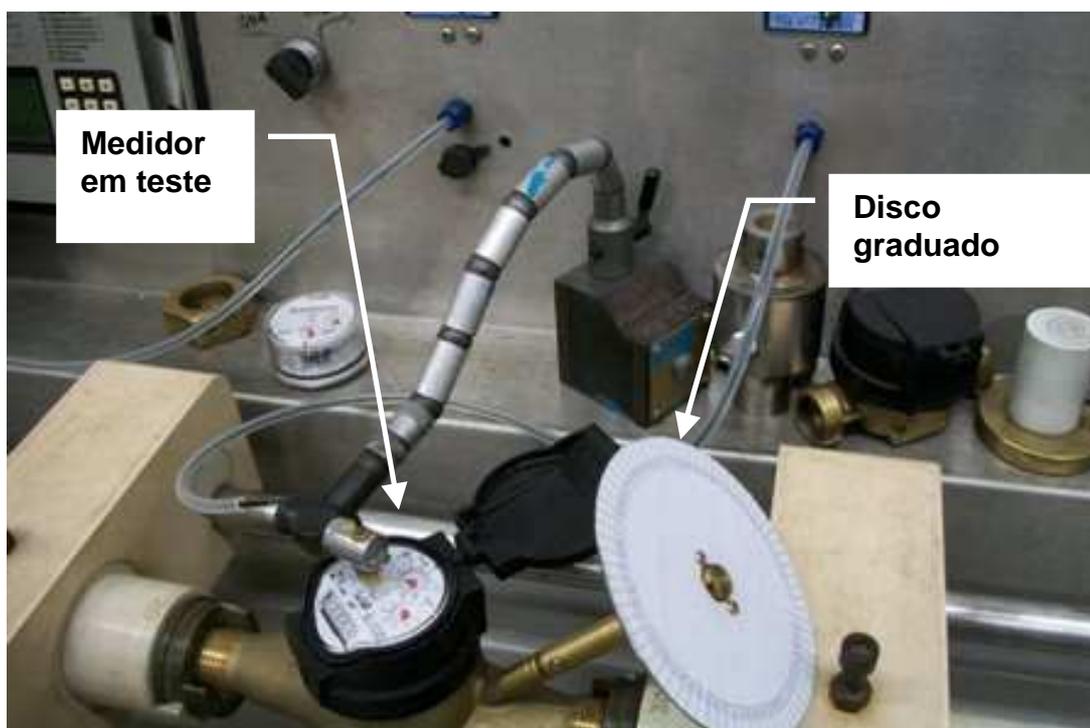


**Figura 24:** Referência do regulador para determinação da curva Erro x Ângulo.

### 5.2.3 Determinação do erro em função do ângulo

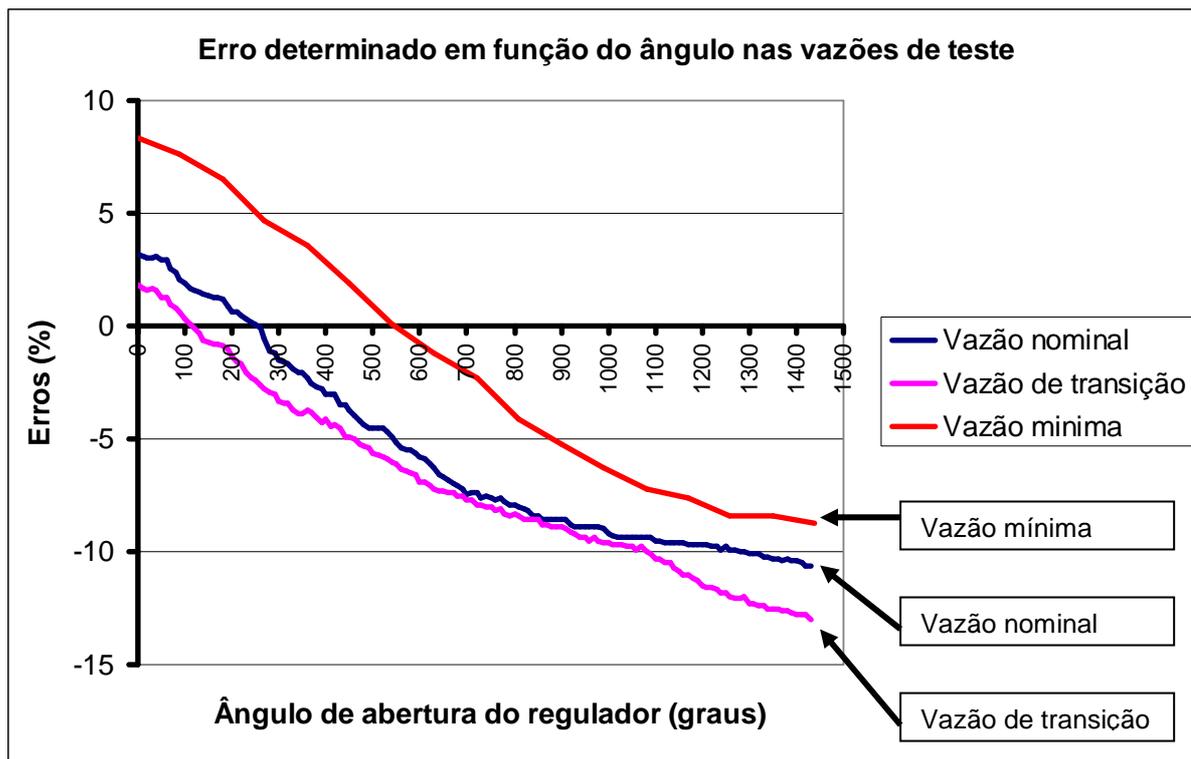
Inicialmente, foram determinadas as curvas completas dos erros em função da posição angular do regulador tomando-se um medidor já aprovado, ou seja, uma amostra válida para ter-se certeza da representatividade da curva. Foi afixado ao regulador um eixo provido de um disco, contendo uma graduação angular (ver figura

25 abaixo) e as leituras foram tomadas de 5° em 5°, a partir da posição totalmente fechada, considerada como 0°, até cobrir-se todo o curso do regulador que totalizou 1430°, ou, aproximadamente quatro voltas, variando pouco para mais ou para menos 90°, de acordo com as tolerâncias de usinagem da carcaça.



**Figura 25:** Fotografia do disco graduado acoplado ao regulador.

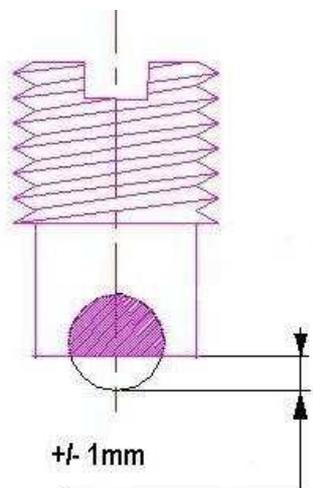
Os erros foram levantados no banco de provas eletrônico do laboratório de hidrômetros da LAO Indústria, o qual faz a indicação direta do erro sem a necessidade de leitura dos roletes. Deste modo, foram obtidas três diferentes curvas de acordo com as vazões de teste: a primeira, a curva de erros abrindo o regulador na vazão mínima, a segunda, a mesma operação, porém na vazão de transição e, finalmente a terceira, a curva de erros utilizando-se a vazão nominal.



**Figura 26:** Gráfico do erro em função do ângulo do regulador.

As três curvas se assemelham, apesar das diferenças dos erros, isto é resultado das dinâmicas hidráulicas que ocorrem segundo as diferentes vazões. Este fato reforça o mencionado acima com respeito ao deslocamento da curva pela ação do regulador. Outro fato percebido durante a fase de testes foi que ao utilizar-se todo o campo de regulagem disponível ao regulador, do seu ponto mais fechado ao mais aberto, consegue-se alterar o erro do hidrômetro em 13%, porém, parte deste curso não tem utilidade e poderia ser reduzido. Medindo-se 30 amostras de medidores, já adequadamente **calibrados**, observou-se que a posição dos reguladores variava menos de um milímetro, interceptando o furo do *by-pass* sempre perto de sua metade inferior (ver figura 27) cujos erros a corrigir para as vazões nominais e de transição encontram-se sempre numa faixa de 2 % para mais e 2% para menos, ou seja, os demais 7% do campo não tem utilidade. Daí sugere-se duas melhorias economicamente significativas nos medidores, primeiro, a diminuição do comprimento de rosca, reduzindo a massa de latão da carcaça, esforços de corte das ferramentas e tempo de usinagem, refletindo na diminuição do custo de matéria prima e de processamento, e a segunda melhoria, no momento da montagem do regulador, antes da calibração, poderia garantir-se mecânica ou eletronicamente

sempre a mesma posição do regulador, isto iria proporcionar o menor tempo de calibração possível, o menor nível de falhas, além do que muitos medidores deixariam a etapa de montagem já pré-calibrados.



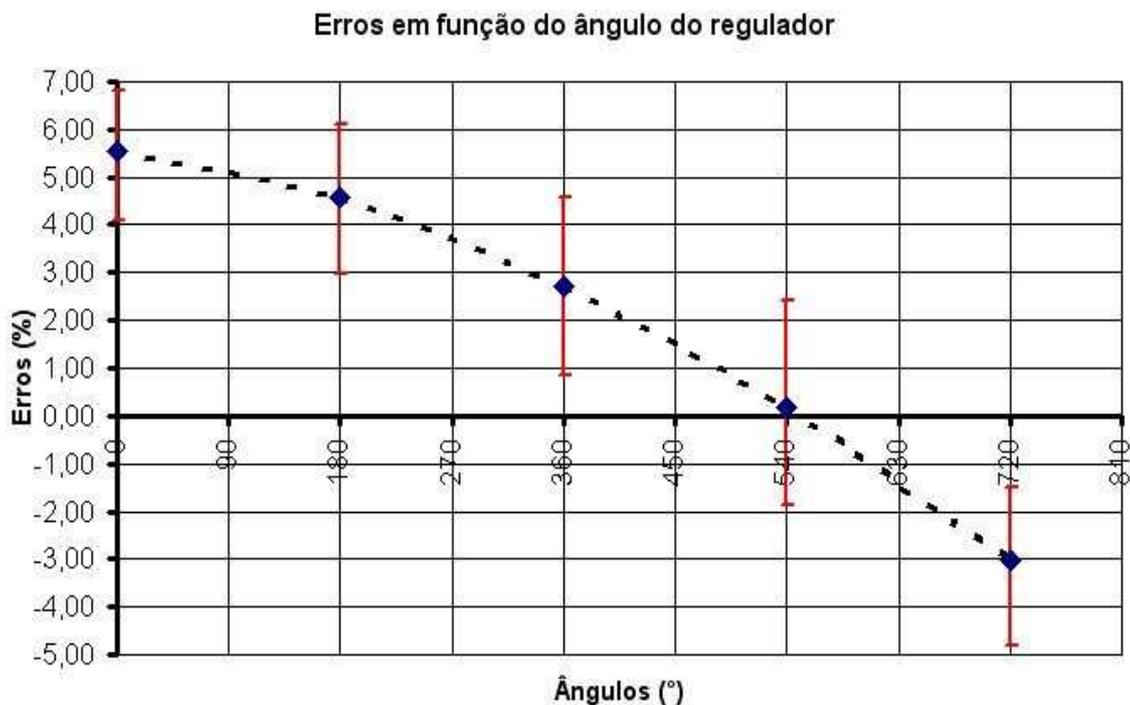
**Figura 27:** Provável posicionamento do regulador.

Com o intuito de se determinar uma curva aperfeiçoada e representativa do modelo em estudo, escolheram-se na linha de produção medidores com curvas cujos erros determinados nas vazões mínima, de transição e nominal estivessem o mais próximo possível da curva de maior incidência nos hidrômetros produzidos, ou seja, com diferenças de erro entre  $Q_{min}$  e  $Q_n$  de 2,6% e  $Q_t$  e  $Q_n$  de 1,2%. De posse destes medidores selecionados, foi determinada uma curva média a partir de ângulos escolhidos com intervalos de  $180^\circ$  de giro do regulador. Estes dados são exibidos abaixo.

**Tabela 5:** Erros segundo ângulo do regulador em 23 amostras escolhidas.

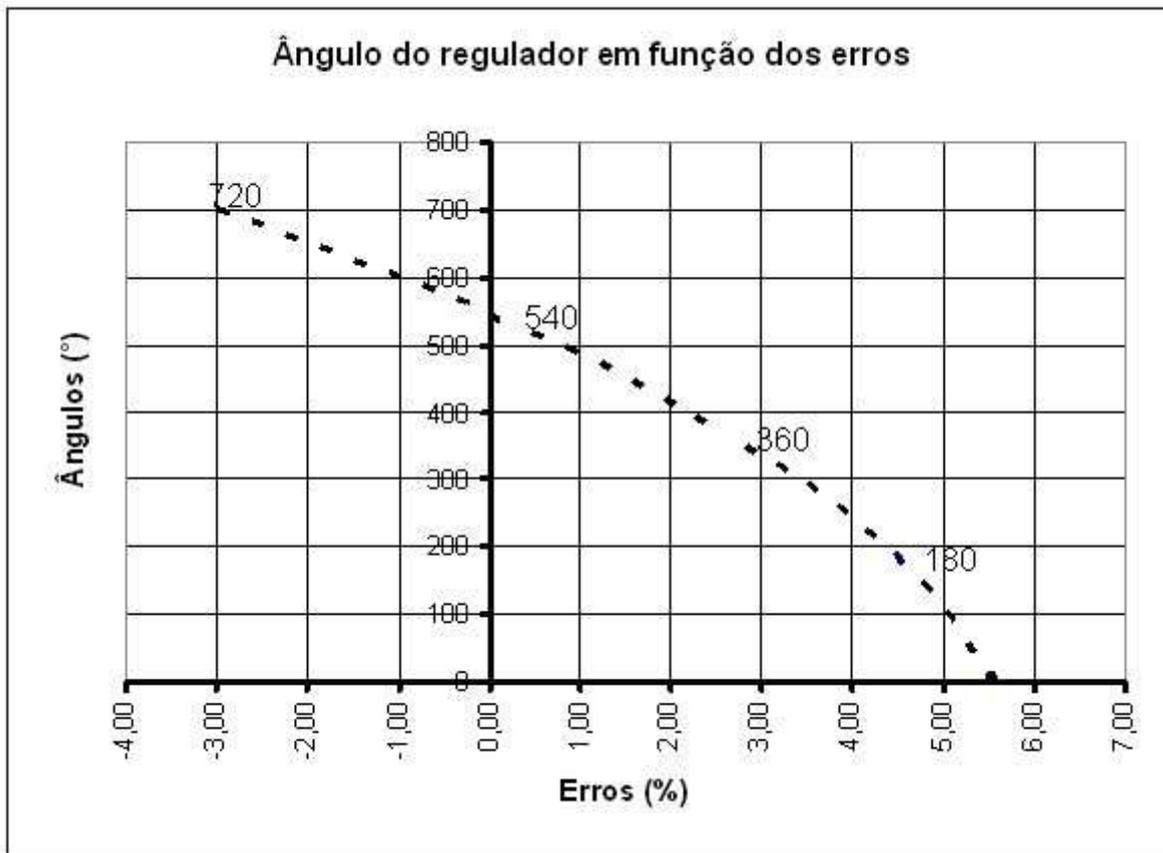
Ângulo (graus)	0°	180°	360°	540°	720°
Hidr. 1	5,54	4,48	2,62	-0,58	-2,88
Hidr. 2	4,3	2,98	0,86	-1,4	-4,72
Hidr. 3	5,22	5,07	4,12	1	-2,44
Hidr. 4	4,98	4,39	3	-0,24	-2,4
Hidr. 5	6,62	5,73	4,04	1,68	-1,58
Hidr. 6	5,84	4,77	2,9	0,24	-3,34
Hidr. 7	6,82	6,1	4,58	2,42	-1,78
Hidr. 8	6,04	5,3	3,76	0,82	-2,32
Hidr. 9	4,08	3,65	2,42	0,78	-2,6
Hidr. 10	6,18	4,99	3	1,04	-1,94
Hidr. 11	5,64	3,48	1,32	-1,46	-4,09
Hidr. 12	5,1	4,12	1,96	-0,48	-4,12
Hidr. 13	6,26	5,86	2,86	0,04	-3,1
Hidr. 14	6,32	5,14	2,9	-0,16	-2,7
Hidr. 15	4,56	3,22	1,14	-1,3	-4,16
Hidr. 16	5,78	4,7	2,98	1,4	-4,1
Hidr. 17	5,48	3,52	1,06	-1,86	-4,8
Hidr. 18	5,5	4,64	3	0	-2,94
Hidr. 19	5,32	3,92	1,62	-1,1	-4,14
Hidr. 20	5,60	4,6	2,80	0,20	-2,80
Hidr. 21	6,00	5,1	3,40	0,70	-2,40
Hidr. 22	4,90	4,2	2,70	0,60	-2,30
Hidr. 23	5,70	5,05	3,60	1,40	-1,50
<b>Médias</b>	<b>5,56</b>	<b>4,57</b>	<b>2,72</b>	<b>0,16</b>	<b>-3,01</b>
<b>D.Padrão</b>	<b>0,68</b>	<b>0,82</b>	<b>0,98</b>	<b>1,09</b>	<b>0,99</b>

Tomando-se por base os valores médios da penúltima linha da tabela acima, foi elaborado um gráfico representativo das amostras colhidas tomando-se o cuidado também de considerar somente o campo útil e não a totalidade das quatro voltas do regulador. O campo útil foi definido pela observação das amostras colhidas e pelo passo da rosca do regulador. A rosca é do tipo  $\frac{1}{4}$ " BSW, que possui 20 fios por polegada, ou seja, um passo é igual a 1,27 mm. Ao considerarmos 2 voltas completas, o regulador se desloca exatamente 2,54 mm, o suficiente para regular qualquer medidor fabricado segundo as especificações atuais deste projeto. Abaixo demonstra-se o novo gráfico com uma curva correspondente às médias dos erros com a indicação também dos máximos e mínimos obtidos para cada ponto ângulo. Apesar de que os erros são valores discretos, utilizou-se uma representação tracejada demonstrando como provavelmente seria se os erros tivessem sido determinados em intervalos infinitesimais.



**Figura 28:** Gráfico de erros variando segundo ângulo em uma média de 23 amostras escolhidas.

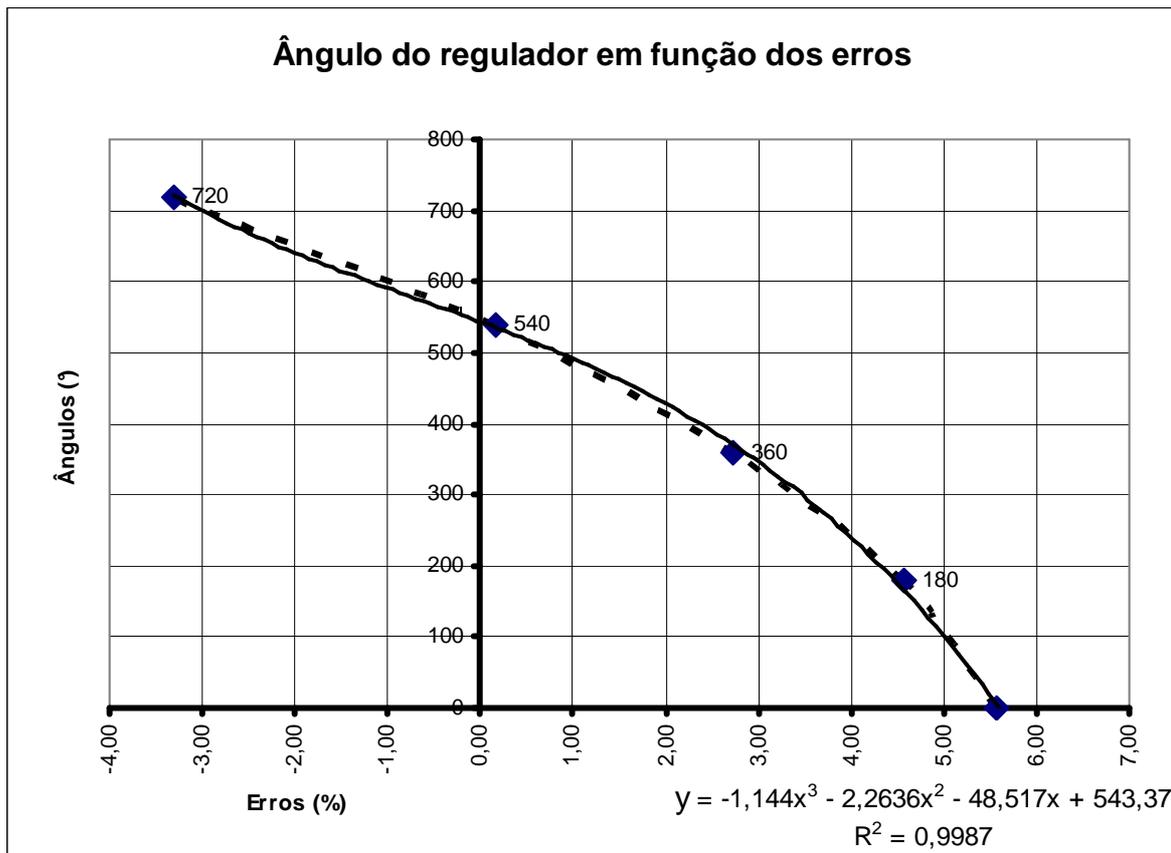
A partir do gráfico anterior pode-se prever, de modo aproximado em função das médias, que um medidor que apresenta um erro de, por exemplo, 0%, em um teste de vazão nominal, provavelmente tem seu regulador rotacionado 540° a partir da posição totalmente fechada, ou deslocada em 1,9 mm. Mais ilustrativa para este estudo seria a proposta da inversão dos eixos do gráfico. Se tivéssemos o erro e quiséssemos determinar o ângulo a corrigir. Invertendo o gráfico então temos a situação abaixo:



**Figura 29:** Inversão dos eixos: Erros nas ordenadas (categorias) e ângulo nas abscissas (séries).

A partir deste gráfico, com a utilização do MS Excel, obteve-se uma curva de tendência com a sua devida função e valor R-quadrado. Esta curva, denominada a partir daqui como ajuste de curva, é demonstrada na figura 30 em linha cheia.

A utilização das médias da tabela 5 como a representação da atividade do regulador foi considerada uma aproximação adequada, porque, como já discutido no item 5.2.2, a ação do regulador se traduz majoritariamente no deslocamento da curva, para cima ou para baixo, e não na alteração de seu formato. A utilização das médias retém o formato das curvas dos 23 medidores. Deste modo, já que o sistema fará a calibração a partir de um erro obtido na prova inicial do medidor em teste, o próprio programa já compensa em grande parte a diferença de posição existente entre a curva do hidrômetro sendo calibrado e a curva obtida a partir das médias.



**Figura 30:** Ajuste de curva. A curva indicada em linha cheia representa uma curva de tendência polinomial de 3ª ordem. Abaixo se tem o seu valor R-quadrado.

Tem-se então que a função que aproximadamente determina o ângulo por meio do erro a corrigir é:  $y = -1,144x^3 - 2,2636x^2 - 48,517x + 543,37$ , onde  $y$  é o ângulo e  $x$ , o erro.

### 5.2.3.1 Testando o ajuste de curva na calibração de um hidrômetro

Se ao executar-se uma prova de vazão nominal obtivermos no hidrômetro um erro de 3%, quanto teríamos de girar o regulador?

Pela função sabe-se que se desejássemos um erro de 0% na vazão nominal que isto aconteceria na posição 543,37°, bastando para isso igualar  $x$  a zero.

$$y = -1,144*(0)^3 - 2,2636*(0)^2 - 48,517*(0) + 543,37$$

$$y = +543,37^\circ$$

Este ângulo é considerado a partir do regulador totalmente fechado. Assim, teríamos que girar somente a diferença entre o regulador na posição 3% e a posição 0%, daí:

Regulador na posição 3%

$$y = -1,144x^3 - 2,2636x^2 - 48,517x + 543,37$$

$$y = -1,144 * (3)^3 - 2,2636 * (3)^2 - 48,517 * (3) + 543,37 = 346,5586^\circ$$

Regulador na posição 0% = 543,37°

Subtraindo: Regulador na posição 3% = 346,55°

**196,81°**

Ou seja, devemos girar 196,81° no sentido anti-horário o (desparafusar).

Outro exemplo:

Supondo que na determinação do erro, após um teste de vazão nominal obtivéssemos o valor de -2,6%, como seria feita calibração?

$$y = -1,144 * (-2,6)^3 - 2,2636 * (-2,6)^2 - 48,517 * (-2,6) + 543,37 = 674,219^\circ$$

novamente, com regulador na posição 0% = 543,37°

subtraindo o regulador na posição -2,6% = 674,219°

**-130,95°**

Ou seja, devemos girar o regulador **130,95°** no sentido horário (parafusar).

### **5.2.3.2 Testes práticos empregando-se o ajuste de curva para calibração de um hidrômetro**

A fim de testar a aplicabilidade do ajuste de curva foram realizados testes práticos repetindo-se o estabelecido acima.

**Amostras:** Em um lote de medidores já calibrados e regulados foram retiradas aleatoriamente 16 amostras, e, em todos eles girou-se, com o auxílio de uma pequena chave de fenda, o regulador ângulos variados, a esmo, uns mais, outros menos, mas nunca maiores que uma volta completa. Tomou-se o cuidado de escolher amostras anteriormente calibradas para que não se corresse o risco de ter escolhido um medidor que não fosse passível de regulagem. Seguem abaixo o

resultado destas regulagens, lembrando que um medidor será considerado aprovado se apresentar os seguintes erros: Erro admissível na vazão nominal ( $Q_n$ ): +/- 2%, na vazão de transição ( $Q_t$ ): +/- 2%, na vazão mínima ( $Q_{min}$ ): +/- 5%.

**OBS.:** Na coluna “Leituras” tem-se pares de valores por hidrômetro, por exemplo, no Hidrômetro 1, o valor superior (1038,28 m<sup>3</sup>) representa a leitura final, feita depois do teste. O valor inferior, 943,06 m<sup>3</sup> é a leitura inicial deste medidor. Esta mesma representação é repetida em todas as outras tabelas de testes. Os medidores 11 até 17 na tabela 6 tiveram seus erros levantados diretamente por meio do sensor optoeletrônico, por este motivo não tiveram suas leituras indicadas.

**Tabela 6:** Determinação da regulagem

	Primeira leitura $Q_n / 100l$		Regular	
	Leituras (m <sup>3</sup> )	Erros (%)	Angulo a girar (°)	
<b>Banco volumétrico BP100</b>	Hid. 1	1038,28	Fechar	
		943,06	-4,78	305,13
	Hid. 2	859,76	-4,38	Fechar
		764,14		265
	Hid. 3	863,32	-3,4	Fechar
		766,72		183
	Hid. 4	862,22	-3,04	Fechar
		765,26		158
	Hid. 5	852,98	-4,42	Fechar
		757,4		269
Hid. 6	2056,5	-2,9	Fechar	
	1959,4		150	
Hid. 7	852,36	-5,28	Fechar	
	757,64		361	
Hid. 8	1078,22	-2,86	Fechar	
	981,08		147	
Hid. 9	860,32	-4,48	Fechar	
	764,8		274	
Hid. 10	5577,74	1,02	Abrir	
	5476,72		53	
<b>Banco eletrônico AE1052</b>	Hid. 11	Sensor	Fechar	
			-3,9	223
	Hid. 12	Sensor	-2,3	Fechar
				113
	Hid. 13	Sensor	-2,7	Fechar
				137
	Hid. 14	Sensor	-2	Fechar
				97
	Hid. 15	Sensor	-3,4	Fechar
		191		
Hid. 16	Sensor	-2,9	Fechar	
			150	
Hid. 17	Sensor	-2,7	Fechar	
			137	

Tabela 7: Resultados após a regulagem nas três vazões de teste

	Qn após regulagem		Qt após regulagem		Qmin após regulagem	
	Leituras (m³)	Erros (%)	Leituras (m³)	Erros (%)	Leituras (m³)	Erros (%)
<b>Banco volumétrico BP100</b>	1137,94		1158,36		1168,62	
	1038,28	-0,34	1148,18	1,80	1158,94	-3,20
	959,88		980,30		991,40	
	859,76	0,12	970,18	1,20	980,98	4,20
	963,12		983,54		994,60	
	863,32	-0,2	973,42	1,20	984,22	3,80
	963,4		981,70		992,04	
	862,22	1,18	971,62	0,80	982,34	-3,00
	952,3		972,62		983,60	
	852,98	-0,68	962,54	0,80	973,30	3,00
	2206		2217,44		2229,6	
	2106,5	-0,50	2207,2	2,40	2219,12	4,80
	953		973,50		984,48	
	852,36	0,64	963,34	1,60	974,14	3,40
	1177,36		1197,58		1208,66	
	1078,22	-0,86	1187,52	0,60	1198,24	4,20
	960,24		980,60		991,68	
	860,32	-0,08	970,50	1,00	981,28	4,00
	5677,34		5697,98		5709,14	
	5577,74	-0,4	5687,74	2,40	5698,64	5,00
<b>Banco eletrônico AE1052</b>	Sensor		Sensor		Sensor	
		0,3		1,8		-1,4
	Sensor		Sensor		Sensor	
		-1		0,6		4,5
	Sensor		Sensor		Sensor	
		-0,6		-0,1		2,4
	Sensor		Sensor		Sensor	
		-0,7		0,5		-2
	Sensor		Sensor		Sensor	
		-0,7		0,2		1,8
Sensor		Sensor		Sensor		
	-0,5		0,1		1,5	
Sensor		Sensor		Sensor		
	-0,1		1,2		2,1	

A tabela 6 na página anterior mostra o erro obtido em uma prova de vazão nominal após os medidores terem sido desregulados. Na coluna da direita aparece o sentido de regulagem, se abrir ou fechar, e o ângulo.

A tabela 7 mostra os resultados para o teste de Qn, Qt e Qmin. Percebe-se que a calibração foi bem sucedida para todas as amostras. Nos hidrômetros 6 e 10 os erros estão iguais a 5%, ou próximos de 5%, para mais ou para menos. Estes

medidores apresentam uma tendência positiva grande na vazão mínima, mas os resultados na vazão nominal ( $Q_n$ ) estão muito bons, que é a vazão para qual se objetivava regulá-los em primeiro lugar. A calibração destes dois medidores ainda pode ser melhorada, bastaria que fossem regulados não objetivando o 0% na  $Q_n$ , mas, -1,5%, o que faria com que o 5% se transformasse em 3,5% e a nominal e a transição ainda estariam conformes.

#### **5.2.4 Proposta de regulação com um modelo de inferência *Fuzzy* do tipo Sugeno**

Quase todas as aplicações, incluindo-se as de controle embarcado, podem obter alguns benefícios da aplicação dos conceitos de lógica *fuzzy*. A sua incorporação pode levar a um melhor desempenho, maior simplicidade e produtividade, custo e tempo de desenvolvimento reduzido (IBRAHIM, 2004). A lógica *fuzzy* tem a vantagem de modelar problemas não lineares complexos linguisticamente ao invés de modelá-los matematicamente, e é esta característica que fez com que ela tenha sido utilizada como um dos métodos de regulação comparados neste estudo.

A título de comparação entre o sistema de regulação por meio do ajuste de curva e um controle que emprega um algoritmo de lógica *fuzzy*, foi desenvolvido um sistema de inferência do tipo proposto por Sugeno (Takagi Sugeno Kang, em 1985), também chamado método TS. A principal diferença entre os métodos Mamdani e Sugeno reside na parte conseqüente das regras *fuzzy*. Os sistemas do tipo Mamdani utilizam conjuntos *fuzzy* como saída enquanto os sistemas do tipo Sugeno usam funções lineares das variáveis de entrada como saídas. O método Mamdani de inferência *fuzzy* é visto com mais freqüência e está entre os primeiros sistemas de controle utilizando a teoria dos conjuntos *fuzzy* para controlar um motor a vapor e foi baseado no trabalho de Zadeh sobre algoritmos *fuzzy* para sistemas complexos e processos de decisão. A inferência do tipo Mamdani espera que funções de pertinência de saída sejam conjuntos *fuzzy*. Após o processo de agregação há um conjunto *fuzzy* para cada variável de saída que necessita de defuzificação. É possível, e em muitos casos mais eficiente, utilizar uma única e infinitesimal faixa como função de pertinência de saída no lugar de um conjunto *fuzzy* mais distribuído.

Se a largura desta faixa tender a um único valor tem-se uma função de pertinência de saída *singleton* (REZNIK, 1997), que pode ser imaginada como um conjunto *fuzzy* pré-defuzificado. Este enfoque aumenta a eficiência do processo de defuzificação porque simplifica muito a computação da saída se comparado ao caso da inferência do tipo Mamdani, onde se deve integrar uma função bidimensional em um centróide. O modelo de inferência Sugeno faz exatamente isto.

Em geral, os sistemas Sugeno podem ser utilizados para modelar qualquer tipo de inferência na qual as funções de pertinência da saída sejam lineares ou constantes.

Uma regra típica em um modelo Sugeno teria o seguinte formato:

$$\text{Se } x \text{ é } A \text{ e } y \text{ é } B, \text{ ENTÃO } z = f(x,y) = ax + by + c$$

Onde A e B são os conjuntos *fuzzy* antecedentes e  $z = f(x,y)$ , é uma função *crisp* na parte conseqüente. Quando  $f(x, y)$  é um polinômio de primeira ordem, tem-se um modelo *fuzzy* Sugeno de primeira ordem. Quando  $f$  é constante tem-se um sistema de ordem zero que pode ser também visto como um caso especial do modelo Mamdani, no qual a saída de cada regra é especificada por um *singleton fuzzy*.

A escolha entre os tipos Mamdani e Sugeno não foi aleatória. Por tratar-se de um sistema com uma entrada e uma saída, erro e ângulo respectivamente, e que também teria que aproximar os resultados da curva de ação do regulador, percebeu-se que as saídas do tipo  $z = ax + by + c$  podiam ser inicialmente reduzidas como sendo de ordem zero, sem as partes lineares “a” e “b”. É claro, o índice “b” não existiria de nenhum modo, pois não há uma segunda entrada, daí  $a = b = 0$ .

Na etapa de agregação do modelo Sugeno a saída final é a média ponderada de todos os pesos das regras:

$$\text{Saída final} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i z_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

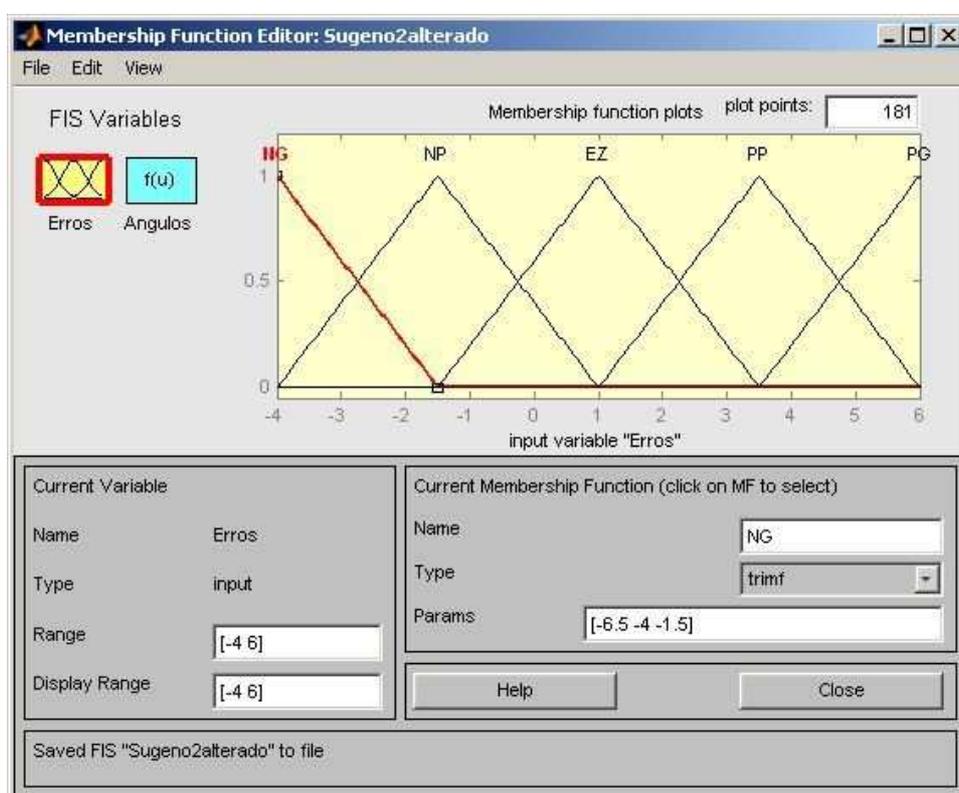
Onde  $z$  é o nível da saída e  $w$  é o peso da regra.

Para desenvolver o sistema Sugeno procurou-se escrever a parte conseqüente de cada regra de modo a se aproximar ao comportamento da ação do

regulador, como visto na figura 29, utilizando-se a própria função do ajuste de curva, demonstrada no gráfico da figura 30.

Apesar de ter sido, por disponibilidade, desenvolvido no MS Excel, o sistema foi testado também no MATLAB, onde se obtiveram resultados iguais ao do Excel. Segue abaixo, para visualização, o proposto no MATLAB nas três etapas de criação.

**1ª) Entradas:** Foram criadas 5 funções de pertinência na entrada. Erro negativo grande (NG), neg. pequeno (NP), erro zero (EZ), positivo pequeno (PP) e positivo Grande (PG).



**Figura 31:** Funções de pertinência de entrada.

**2ª) Saídas:** Foram criadas 5 funções de saída: Ângulo muito pequeno (MP), Ângulo pequeno (P), Ângulo médio (M); Ângulo grande (G), Ângulo muito grande (MG), seus níveis são:

$$Z1 = 0 \cdot x + 0$$

$$Z2 = 0 \cdot x + 0,33$$

$$Z3 = 0 \cdot x + 0,6$$

$$Z4 = 0 \cdot x + 0,8$$

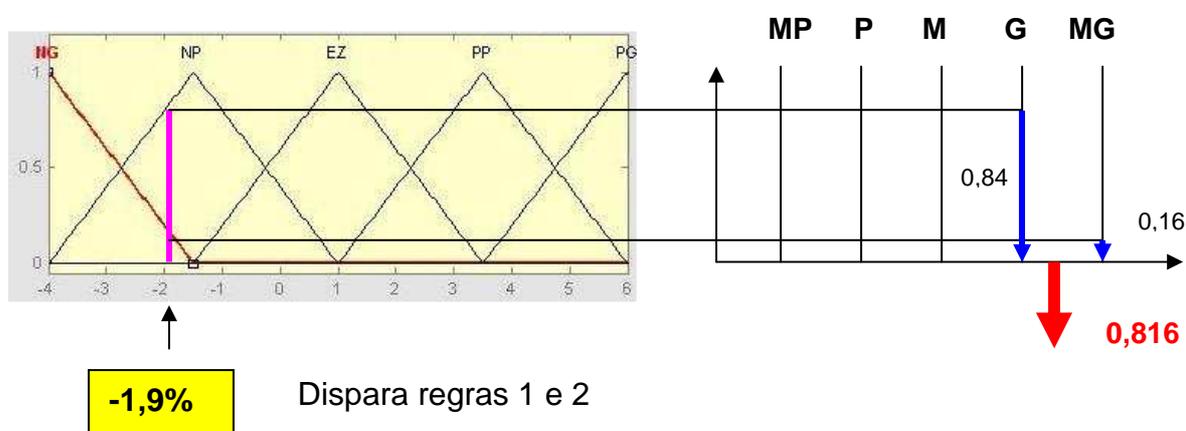
$$Z5 = 0 \cdot x + 0,9$$

**3ª) Regras:** As regras ficaram definidas como:

- 1 - Se a entrada é negativa grande (NG) então a saída é muito grande (MG).
- 2 - Se a entrada é negativa pequena (NP) então a saída é grande (G).
- 3 - Se a entrada é erro zero (EZ) então a saída é média (M).
- 4 - Se a entrada é positiva pequena (PP) então a saída é pequena (P).
- 5 - Se a entrada é positiva grande (PG) então a saída é muito pequena (MP).

Exemplo de cálculo:

Supondo-se que se deseja calcular o ângulo de acionamento para um erro levantado em um teste de vazão nominal que resultou em -1,9%.



**-1,9%**

Dispara regras 1 e 2

1 - Se (input é NG) then (output é MG)  $Z5 = 0 \cdot x + 0,9$

2 - Se (input é NP) then (output é G)  $Z4 = 0 \cdot x + 0,8$

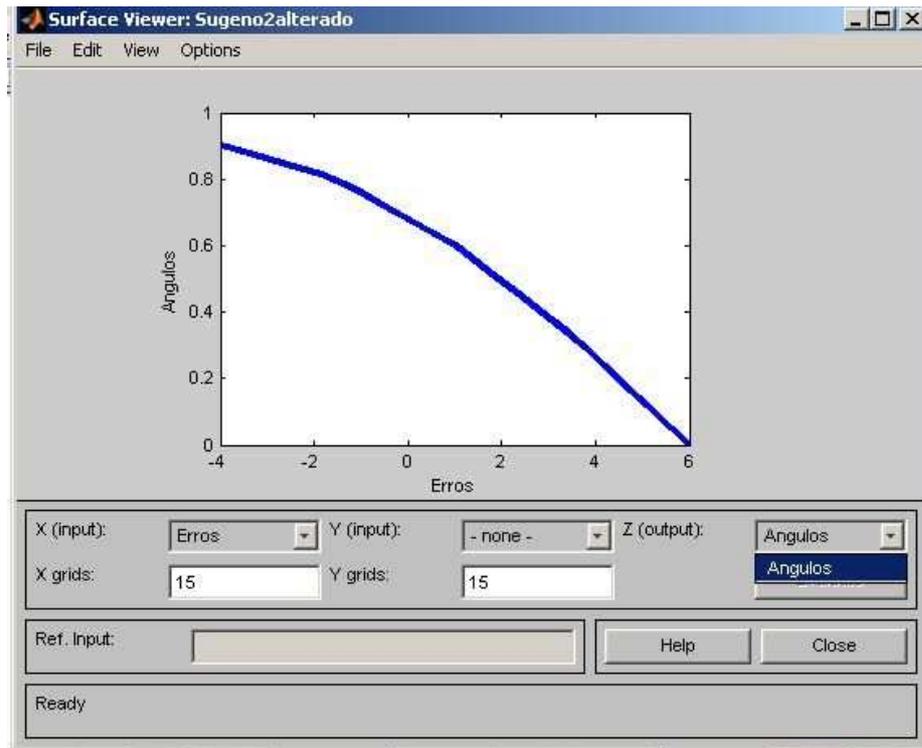
**Saída = Média ponderada =  $((0,16 \cdot 0,9) + (0,84 \cdot 0,8)) / (0,16 + 0,84) = 0,816$**

**0,816** não é o valor do ângulo a ser acionado. Como foi feita uma proporção do ângulo máximo em relação ao valor máximo do range dos conjuntos de saída, temos que multiplicar o valor por 800.

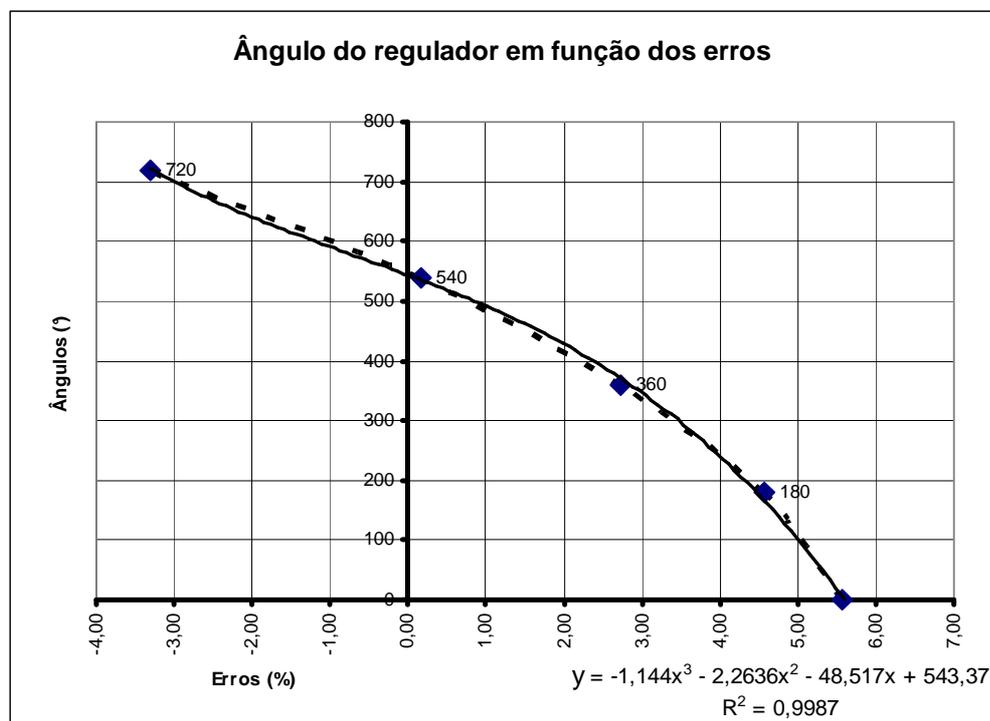
**Ângulo =  $800 \cdot 0,816 = 652,80^\circ$**

Subtraindo-se do valor do ângulo teórico para o erro 0% =  $543,37^\circ$ , finalmente temos a resposta:  $543,37^\circ - 652,80^\circ = -109,43^\circ$ , ou seja, fechar o regulador em  **$109,43^\circ$** .

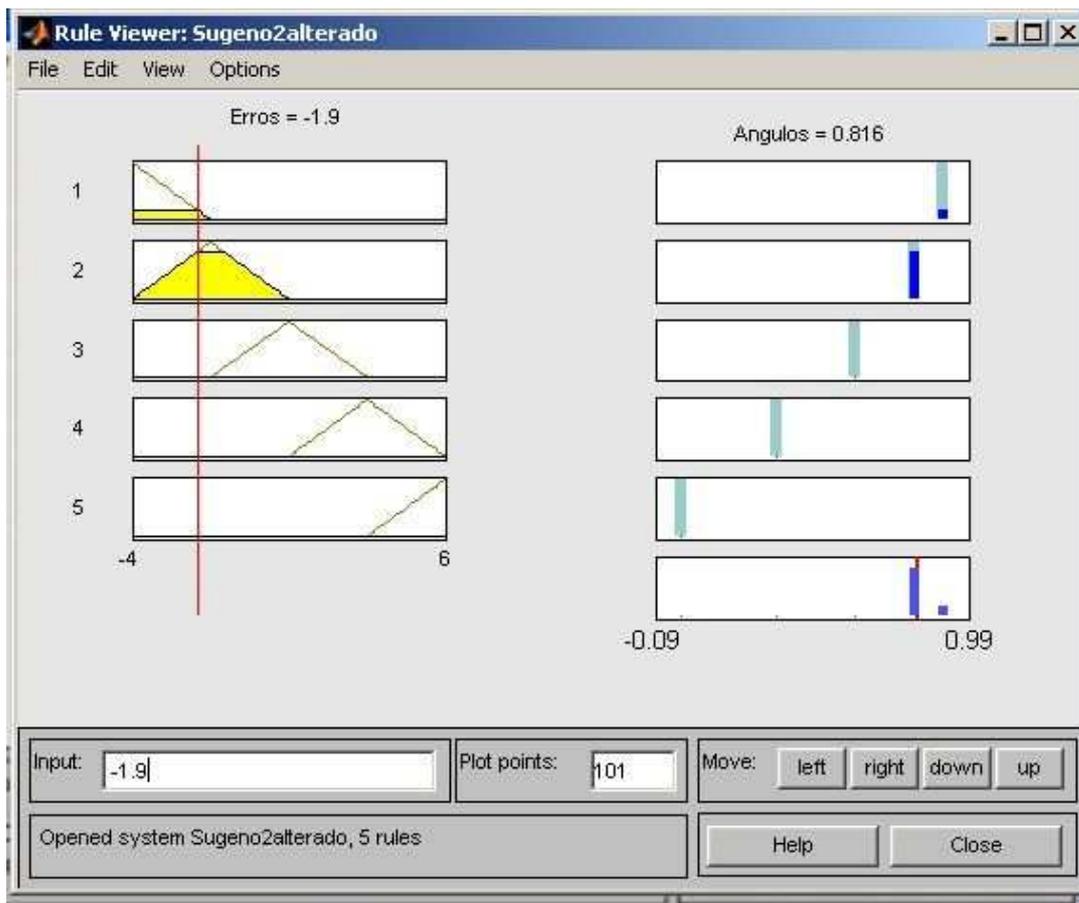
A seguir, pode-se visualizar a semelhança do gráfico do ajuste de curva original com a superfície exibida pelo MATLAB (Figura 32).



**Figura 32:** Curva gerada no MATLAB



**Figura 33:** Comparação da defuzificação do MATLAB com a curva de ajuste (em linha cheia) da função da regulação.



**Figura 34:** Solução apresentada pelo MATLAB para as mesmas situações de entrada e saída.

#### 5.2.4.1 Testes práticos empregando o sistema de inferência tipo Sugeno

Seguindo os mesmos passos iniciais que foram executados nos testes anteriores, foram realizadas as provas com a regulagem obedecendo ao ângulo indicado pela inferência *fuzzy* do tipo Sugeno. Os testes vêm demonstrados abaixo seguidos pelos devidos comentários.

**Tabela 8:** Determinação da regulagem

	Primeira leitura Qn / 100l		Regular Ângulo a girar (°)
	Leituras (m³)	Erros(%)	
Hid. 1	2037,84	-3,5	fechar
	1941,34		160
Hid.2	1871,62	-3,7	fechar
	1775,32		167
Hid.3	1681,84	1,58	abrir
	1580,26		113
Hid.4	1893,44	-2,6	fechar
	1796,04		132
Hid.5	1660,9	-3,02	fechar
	1563,92		145
Hid.6	1692,3	0,18	abrir
	1592,12		10,89
Hid.7	1674,58	4,06	abrir
	1570,52		338
Hid.8	1886,29	-1,07	fechar
	1787,36		69
Hid.9	1668,72	0,58	abrir
	1568,14		36,49
Hid.10	1515,42	-2,74	fechar
	1418,16		136
Hid.11	1502,68	-2,72	fechar
	1405,4		135
Hid.12	1502,4	-2,96	fechar
	1405,36		143
Hid.13	1888,82	-2,56	fechar
	1791,38		130
Hid.14	1500,52	-2,56	fechar
	1403,08		130
Hid.15	1745,32	-0,66	fechar
	1645,98		42
Hid.16	1116,62	-3,56	fechar
	1020,18		166
Hid.17	1162,16	-4,42	fechar
	1066,58		190
Hid.18	1470,78	-1,46	fechar
	1372,24		94

**Tabela 9:** Resultados após a regulagem nas três vazões de teste

	Qn após reg. Sugeno.			Qt após reg. Sugeno.			Qmin após reg. Sugeno.	
	Leituras (m³)	Erros (%)		Leituras (m³)	Erros (%)		Leituras (m³)	Erros (%)
Hid. 1	2136,92	-1,4	2147,02	1	2157,6	-4,4		
	2038,32		2136,92		2148,04			
Hid. 2	1969,98	-1,64	1979,91	-0,7	1991,47	1,3		
	1871,62		1969,98		1981,34			
Hid. 3	1781,94	0,1	1794,04	2,4	1804,46	4,2		
	1681,84		1783,8		1794,04			
Hid. 4	1991,74	-1,7	2002,01	0,4	2012,77	-4,4		
	1893,44		1991,97		2003,21			
Hid. 5	1760,18	-0,72	1772,82	-1,4	1801,34	-4,8		
	1660,9		1762,96		1791,82			
Hid. 6	1792,48	0,18	1804,6	3,2	1814,96	3,6		
	1692,3		1794,28		1804,6			
Hid. 7	1774,14	-0,44	1786,02	1	1796,14	1,2		
	1674,58		1775,92		1786,02			
Hid. 8	1985,04	-1,25	1998	1,6	2008,42	4,2		
	1886,29		1987,84		1998			
Hid. 9	1769,3	0,58	1781,34	2,4	1791,64	3		
	1668,72		1771,1		1781,34			
Hid. 10	1617,32	1,9	1683,5	3,4	1693,18	-3,2		
	1515,42		1673,16		1683,5			
Hid. 11	1602,68	0	1667,48	0,8	1677,68	2		
	1502,68		1657,4		1667,48			
Hid. 12	1601,68	-0,72	1665	-0,8	1675,28	2,8		
	1502,4		1655,08		1665			
Hid. 13	1987,51	-1,31	2051,62	0	2061,74	1,2		
	1888,82		2041,62		2051,62			
Hid. 14	1601,28	0,76	1666,68	2,2	1676,94	2,6		
	1500,52		1656,46		1666,68			
Hid. 15	1844,94	-0,38	1913,94	0,4	1924,2	2,6		
	1745,32		1903,9		1913,94			
Hid. 16	1215,12	-1,5	1225,23	1,1	1237,63	3,1		
	1116,62		1215,12		1227,32			
Hid. 17	1260,7	-1,46	1324,68	0	1334,32	-3,6		
	1162,16		1314,68		1324,68			
Hid. 18	1571,82	1,04	1637,32	1,8	1647,68	3,6		
	1470,78		1627,14		1637,32			

**Análise:** O primeiro fato verificado foi que na regulagem com o ajuste de curva anteriormente proposto, os valores obtidos na Qn eram mais próximos de 0%. Na coluna dos erros, vê-se que os hidrômetros 6, 9 e 11 estão próximos de 0%, mas na prova antes da regulagem os hidrômetros 6 e 9 já estavam praticamente regulados, o que foi mero acaso, porque todos os medidores foram desregulados de

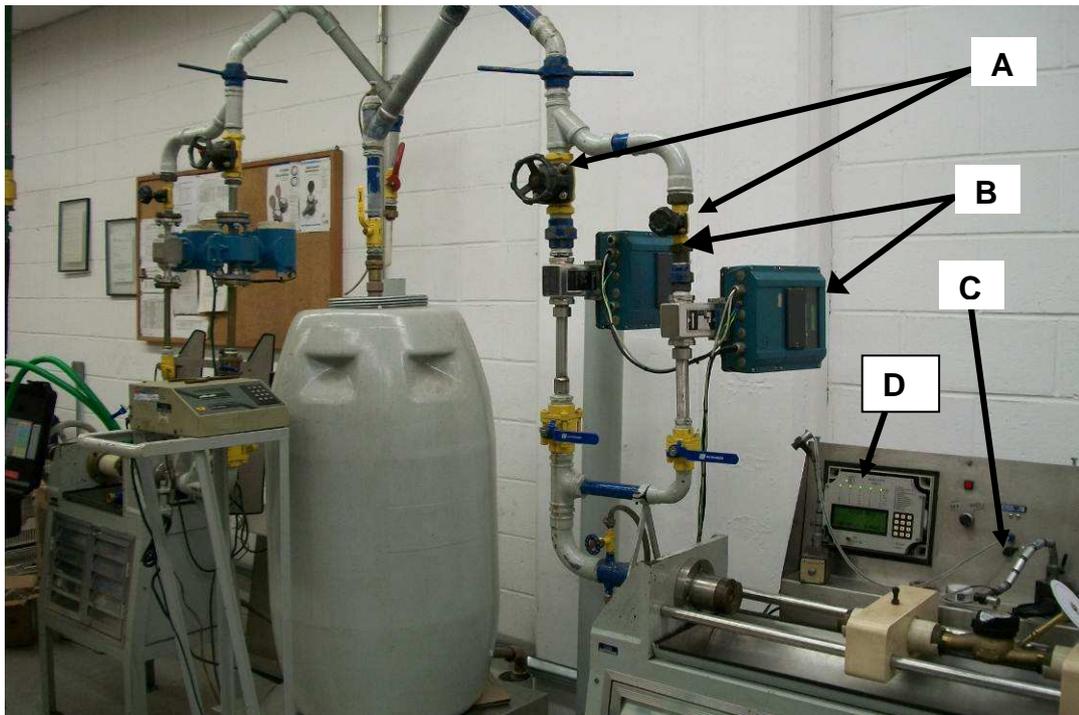
propósito. Outro aspecto é que há mais medidores que apresentaram valores perto dos limites, talvez seja devido à questão de que, apesar de ser matematicamente mais simples do que o ajuste de curva, o controlador não estaria ajustado adequadamente. Isto pode ser analisado como decorrente de que o sistema *fuzzy* já foi desenvolvido como uma aproximação do ajuste de curva, desta maneira, já desde o início, carrega pequenas diferenças em relação à curva original.

Atualmente, os operadores dos bancos de prova que fazem a regulação manual dos hidrômetros são instruídos a considerar como adequados medidores que apresentam erros na vazão nominal na ordem de mais ou menos 0,5%.

### **5.2.5 Validade dos testes práticos deste estudo**

Todos os testes executados nos itens precedentes foram realizados nos bancos de prova existentes no laboratório de hidrômetros da empresa LAO indústria, fabricante de hidrômetros e medidores de gás para os segmentos residenciais e industriais. Estes bancos têm sua calibração periodicamente aferida pelo IPEM (Instituto de Pesos e Medidas), desta maneira tem-se a segurança de que o trabalho realizado será condizente com a necessidade de exatidão dos medidores calibrados dentro dos limites estabelecidos nas normas vigentes para este tipo de instrumento.

As vazões de teste são meticulosamente controladas com válvulas de diafragma ou lentilhas especiais para controle da vazão, e a leitura dos erros é realizada por meio de um equipamento especialmente desenvolvido chamado Midmaster e acoplado a um medidor do tipo eletromagnético fabricado pela Endress Hauser, no caso do banco AE 1052 (figura 35) e, para o caso dos bancos volumétricos dotados de lentilha para controle da vazão, chamados B-100, o erro é determinado comparando-se a leitura da relojoaria com o volume indicado na escala afixada ao tanque.



**Figura 35:** Banco AE1052: Fotografia do banco de provas no qual foi feito o levantamento de dados. (Propriedade da LAO Indústria, São Paulo, Brasil. A) Válvulas de ajuste de vazão; B) Medidores de vazão eletromagnéticos; C) Hidrômetro em teste; D) Midmaster.

## 6 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

### 6.1 ETAPAS DA CALIBRAÇÃO

O processo manual atualmente empregado na calibração sugere as ações que o código fonte deve contemplar, deste modo, procurou-se escrevê-lo como uma extensão natural do já executado. As ações para conclusão da calibração foram então projetadas na seguinte ordem:

1. Coloca-se o medidor nos bocais do banco de prova.
2. Coloca-se o sensor e a relojoaria no medidor, e posiciona-se o engate que acionará o regulador do hidrômetro.
3. Inicia-se a passagem da água pelo medidor, na vazão nominal de 1500 l/h.
4. Pressionando-se um botão “inicia/reset”, inicia-se a calibração disparando a contagem dos pulsos durante determinado tempo pré-estabelecido.
5. Depois de decorrido este tempo de prova, o microcontrolador pára automaticamente de totalizar os pulsos e indica no visor (LCD ou monitor do PC) o término da prova.
6. Aperta-se um botão no painel do sistema para que o microcontrolador exiba no visor ou no monitor qual foi o erro obtido nesta primeira calibração. (ver nota abaixo).
7. Sabendo-se o valor deste erro, o usuário determina ou não se executa a calibração. Em caso positivo, o texto no visor indica qual botão deve ser pressionado a fim de que seja executada a calibração. Este botão é denominado “calibrar”.
8. O botão “calibrar” é pressionado e o microcontrolador executa automaticamente a ação de calibração por meio de do motor de passo ligado à haste de comando do regulador.
9. As etapas 4, 5 e 6 podem ser executadas novamente se assim determinado, e então, caso o medidor apresente erro compatível com a faixa admitida na vazão nominal, o medidor é considerado aprovado e é encaminhado à lacração. Caso não seja aprovado, deve ser encaminhado para o retrabalho.

## Notas:

- 1) O motivo pelo qual se determinou que o medidor não fosse automaticamente calibrado após o cálculo do erro é que diversas companhias de saneamento solicitam que os medidores sejam calibrados com erros mais positivos para compensar a perda de sensibilidade ao longo da operação do instrumento. É claro que isto poderia ser diretamente contemplado no *firmware*, mas, mesmo assim considera-se importante que o operador decida ou não se deve calibrar. Sabe-se que medidores velocimétricos, após alguns anos de uso, tendem a perder sensibilidade passando a totalizar um volume menor do que realmente passa por ele. Esta perda de exatidão é fato reconhecido e admitido no momento que se aferem medidores usados (INMETRO, 2000).
- 2) Os passos acima descrevem uma etapa de calibração apenas, como é executado em bancadas de pré-aferição. O teste completo pode envolver mais vazões, tais como a de transição e mínima. Contudo, a calibração é feita no teste mais rápido que é a que ocorre na vazão nominal.

A figura 36 é o fluxograma do programa gravado no microcontrolador.

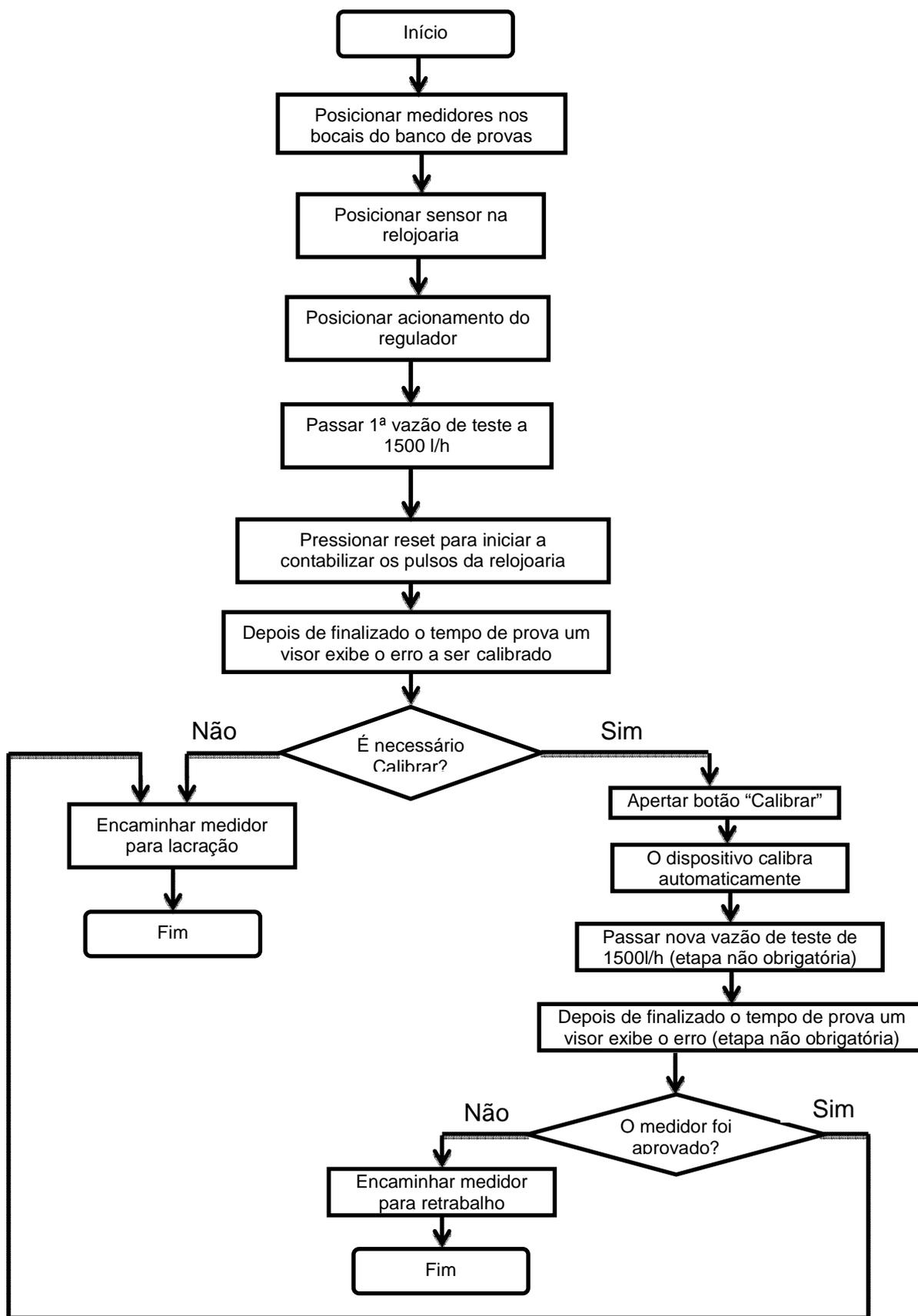


Figura 36: Fluxograma do programa.

## 6.2 CIRCUITO ELETRÔNICO SIMPLIFICADO DO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO

O circuito protótipo do sistema de calibração é exibido na figura 37. Inicialmente, o sistema foi executado utilizando-se uma plataforma de desenvolvimento **Multipic 4** fabricada pela empresa SmartRadio. Contudo, o *driver* de potência para acionamento do motor de passo não foi disponibilizado nesta placa devido ao fato que tensão de operação é de 12 V DC, mas o motor de passo requer 24 V DC, então se utilizou um *driver* externo tipo ULN 2803. A tensão de alimentação deste *driver* é fornecida por uma fonte independente do **Multipic 4**, que é alimentado pelo próprio computador por meio de uma porta USB. Para visualização da seqüência de operação e dos erros foi empregado o software *Hyperterminal* disponível no MS Windows XP, e que foi conectado por meio de uma porta serial com protocolo RS-232. Na montagem do protótipo final utilizou-se o visor LCD 16x2.

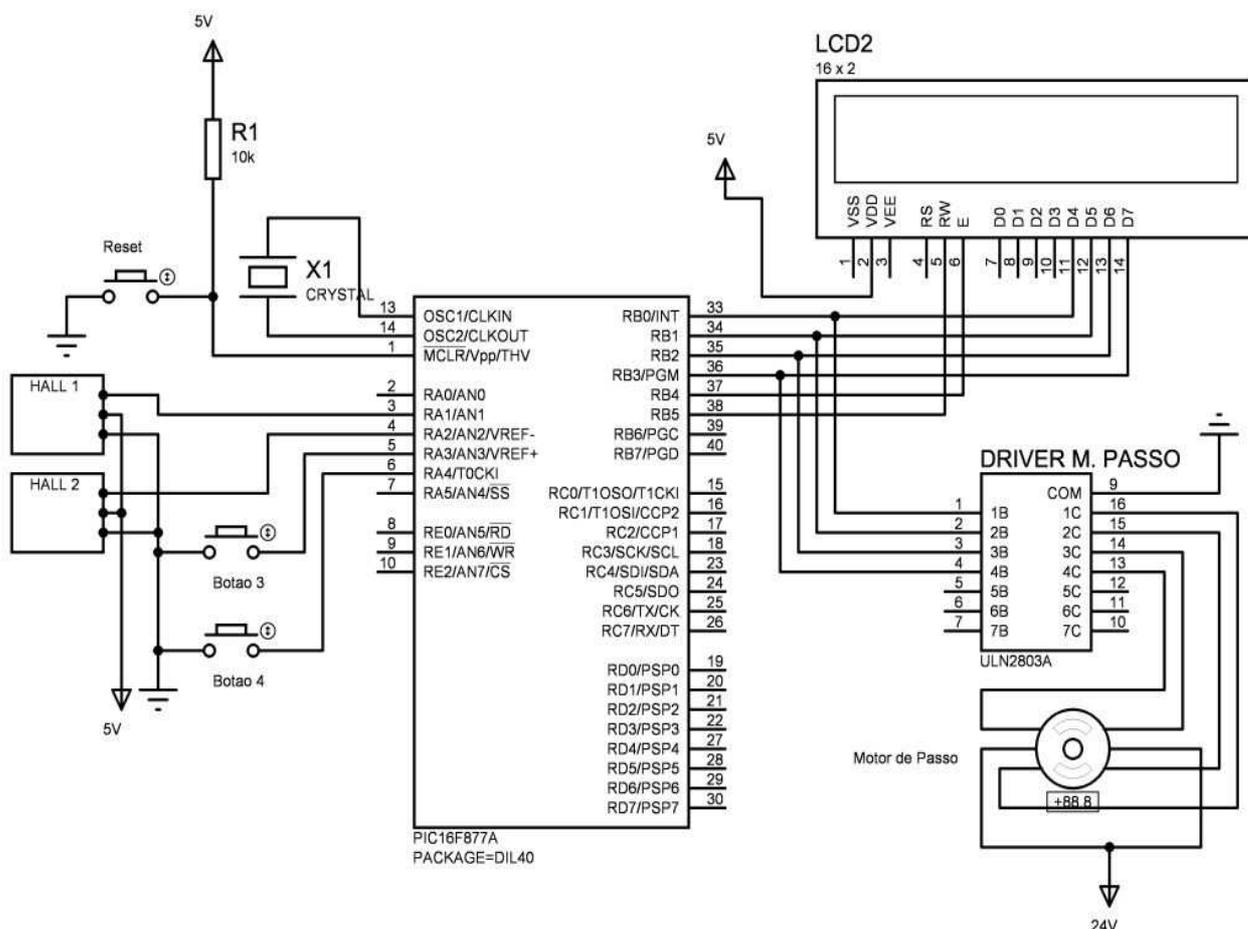


Figura 37: Esquema elétrico do protótipo com visor LCD 16 x 2.

### 6.3 O MOTOR DE PASSO

Um motor de passo foi o dispositivo escolhido para acionar o giro do regulador do hidrômetro. Essa escolha deve-se a dois fatores. O principal deles é que, em certos casos, pode dispensar o controle em malha fechada, bastando para tal que o torque gerado pelo motor seja capaz de girar a carga acoplada (SOUZA, 2006), ou seja, não seria necessário verificar se houve erro entre os passos programados e os passos que o motor realmente executou. O segundo fator é a facilidade de seu acionamento por meios digitais. O motor de passo é um tipo particular de transdutor que converte pulsos elétricos em rotação de seu eixo à taxa de um ângulo incremental específico.

Segundo Gupta (2011), o motor de passo é um motor síncrono com um campo magnético eletricamente chaveado que faz girar o ímã da armadura solidário ao eixo. O citado ângulo incremental é repetido precisamente a cada pulso enviado a uma ou mais bobinas, excitado por um circuito apropriado, que, no caso do presente trabalho, vem a ser o microcontrolador acoplado ao *driver* de potência necessário devido às baixas correntes e tensões disponibilizadas nos portos do 16F887A, (valores máximos de 250 mA, e 5 V).

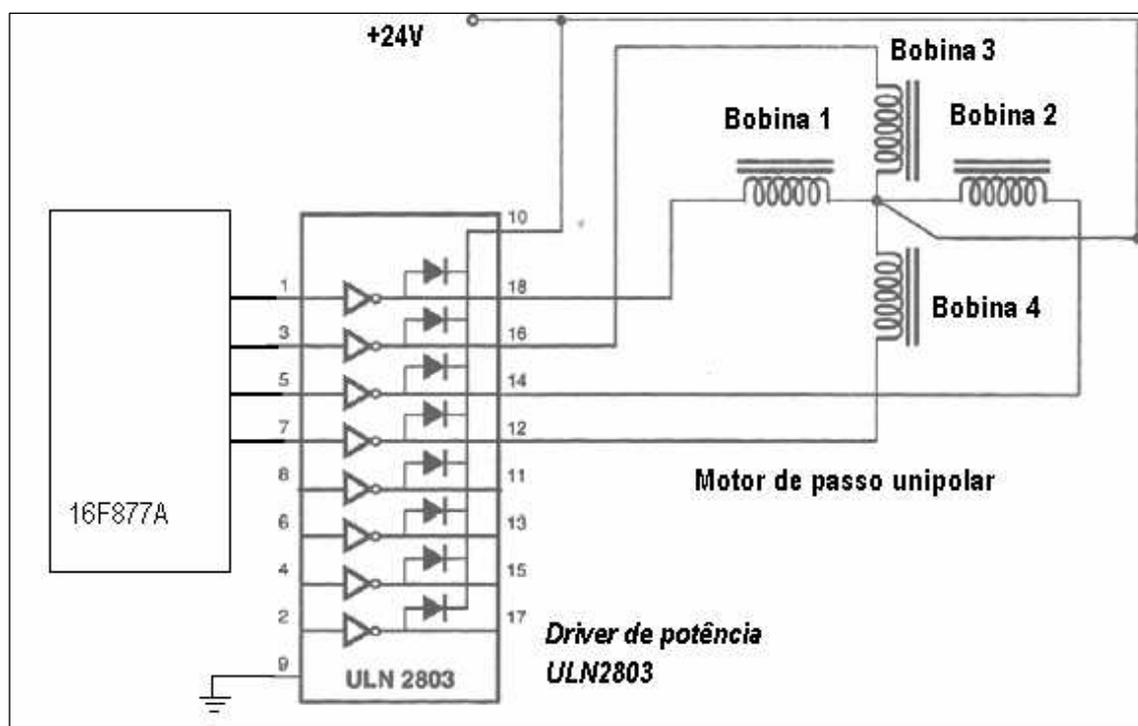
Ainda sobre o erro que possa existir num determinado ângulo incremental, ele é geralmente menor que 5%, mas não acumulativo (SOUZA, 2006). Ademais de ser uma diferença insignificante para o emprego aqui determinado, a própria redução pinhão/corona existente no sistema de calibração, diminuiria ainda mais o efeito desta eventual diferença de 5%. De acordo com sua folha de especificações, o motor é capaz de fornecer um torque máximo de 0,25 N.m, este torque é ampliado pela redução pinhão / coroa o que colabora para executar o giro do regulador montado em seu alojamento na carcaça do medidor.

Ainda de acordo com Gupta (2011), existem diversas relações entre os pulsos aplicados e a rotação do eixo do motor. A sequência dos pulsos está relacionada ao sentido de giro. A frequência dos pulsos está relacionada à velocidade e, finalmente, o ângulo percorrido, à quantidade de pulsos aplicados às bobinas. Por tratar-se de um número de voltas relativamente pequeno (4 voltas, no máximo), a velocidade de rotação tem uma importância secundária. Desse modo, procurou-se manter uma velocidade baixa para evitar “escorregamento” do rotor e assim garantir que não fosse necessária uma malha de controle fechada para verificar o movimento do

motor de passo. Inicialmente, projetou-se a duração do pulso de alimentação das bobinas com o sendo 50 ms, valor levantado experimentalmente. A figura 38 mostra o aspecto externo do motor empregado, e a Figura 39 mostra o circuito de acionamento empregado.



**Figura 38:** Motor de passo unipolar empregado no sistema de calibração, modelo PM55L-48. Fonte: Minibea *datasheet*.



**Figura 39:** Circuito de acionamento do motor de passo unipolar. O porto B do MCU controla o ULN2803 e consequentemente o motor.

O acionamento do motor pode ser feito de vários modos, os mais comuns são o passo completo 1 (uma fase ligada), passo completo 2 (2 fases ligadas), meio

passo (uma e duas fases ligadas) e o micro passo (as correntes do motor variam continuamente). Cada um destes métodos possui vantagens e desvantagens. No presente trabalho adotou-se o **passo completo 2**, onde duas bobinas são conectadas por vez, por exigir pouca corrente da alimentação e possibilitar maior velocidade, ainda que o torque disponibilizado seja menor do que, por exemplo, no passo completo 1.

**Tabela 10:** Acionamento tipo Passo completo 2

<i>Nº do passo</i>	<i>Bobina 1</i>	<i>Bobina 2</i>	<i>Bobina 3</i>	<i>Bobina 4</i>	<i>Endereço de memória</i>
<b>1</b>	0	1	1	0	0x06
<b>2</b>	1	1	0	0	0x0C
<b>3</b>	1	0	0	1	0x09
<b>4</b>	0	0	1	1	0x03

O modo de acionamento do motor inicia-se com o próprio código fonte escrito, que após ser compilado e transformado em código de máquina, faz com que o motor execute sua função no devido momento. Pode-se entender melhor esta questão olhando-se para este código. O processamento é feito por meio de uma função e de uma matriz de 4 valores que são justamente os endereços de memória apresentados na tabela 10 acima, do lado direito, e que receberão os devidos bits, que, ao fim, traduzem-se na energização das bobinas corretas.

### **Exemplo de declaração da matriz**

```
char FullStepBackward [4]={0x06, 0x0C, 0x09, 0x03};
```

·  
·  
·

### **Exemplo da função de execução do giro anti-horário**

```
void FullStepMotorCCW( ) // função passo completo anti-horário
{
PORTB=FullStepBackward[pos]; // assinala porto B p/ saída do motor segundo matriz de posições
[pos]
delay_ms(50); // delay entre pulsos
pos=(pos+1)%4; // mudança de estados na matriz
}
·
```

### Exemplo de condicional para determinação do sentido de giro

```
if (erro < 1.0000) // Se erro < que 1 executar código){
    PulseNum = (ângulo/7.5); // comando para executar a quantidade correta de pulsos
    for(i=0;i<PulseNum;i++) FullStepMotorCCW(); // comando para incrementar pulsos
    //obedecendo à função FullStepMotorCCW()
}
```

#### Onde:

**FullStepBackward:** declaração da matriz.

**[4]:** é a quantidade de posições.

**{0x06, 0x0C, 0x09, 0x03}:** são os endereços de memória da matriz.

**void FullStepMotorCCW( ):**  é a função passo completo anti-horário.

**PORTB=FullStepBackward[pos];** endereça o porto B segundo a matriz cujas posições são dadas por

**pos=(pos+1)%4;** que faz contagem de 1 até 4 e volta ao 1.

**if (erro < 1.0000) :** significa que se o erro é menor que 1 executa os comandos a seguir que são:

**PulseNum = ângulo/7.5 ;** define o número de pulsos a percorrer.

**for(i=0;i<PulseNum;i++) FullStepMotorCCW();** que é o comando que executa a energização das bobinas segundo a função FullStepMotorCCW().

## 6.4 SENSORES DE DETECÇÃO DO MOVIMENTO DAS CÂMARAS DE MEDIDA

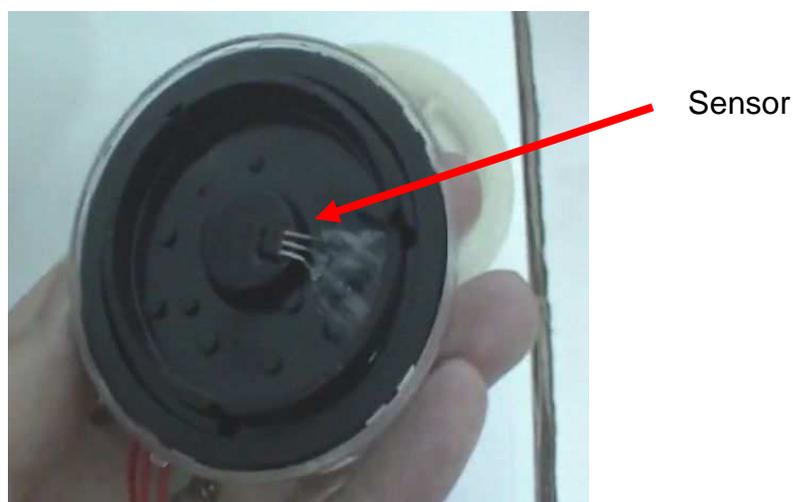
Como já citado no capítulo sobre hidrometria, ao se fazer passar pelo hidrômetro um determinado volume de água, uma parte da energia cinética das moléculas do fluido que são postas em movimento pela diferença de pressões nas extremidades da tubulação é captada e transformada em rotação pela turbina de um hidrômetro velocimétrico ou na rotação de um pistão rotativo em um hidrômetro volumétrico. Existe certa proporcionalidade entre a quantidade de voltas que cada um destes elementos executa e o volume de água que o atravessou. Assim sendo, ao computar-se eletronicamente o número de voltas destes elementos pode-se calcular os volumes e os erros que são os pontos de partida para execução deste projeto. Pela sua eficácia, possibilidade de acoplamento digital e tamanho reduzido, adotou-se um sensor de efeito Hall para transformar as rotações da turbina em sinais elétricos adequados ao processamento. Os circuitos integrados sensores de efeito Hall, são transdutores que variam a sua tensão de saída em resposta a um

campo magnético. Sensores de efeito Hall são usados no chaveamento por proximidade, posicionamento, detecção de velocidade e detecção de corrente.

No sistema de calibração foi empregado para detecção da rotação das turbinas um modelo A1120LUA-T, fabricado pela empresa Allegro MicroSystems Inc. Este C.I. executa um chaveamento unipolar, ou seja, cada vez que o pólo sul de um ímã aproxima-se deste sensor surge uma tensão de nível lógico alto entre seus terminais 2 e 3. O nível torna-se baixo novamente quando o campo é removido. Seu encapsulamento contém um regulador de tensão, um gerador de tensão Hall, um amplificador de pequenos sinais, um disparador Schmitt, um estabilizador Chopper e uma saída de dreno aberto capaz de fornecer até 25 mA (ALLEGRO, 2011). Além das características já listadas, seu reduzido tamanho, 1,52 mm de espessura permitiu que fosse montado entre os ímãs da turbina e da relojoaria. A figura 40 mostra o aspecto externo deste sensor e a figura 41, o protótipo do sensor montado na câmara. Foi feito um vídeo do sensor funcionando, ele pode ser enviado pela internet se solicitado.



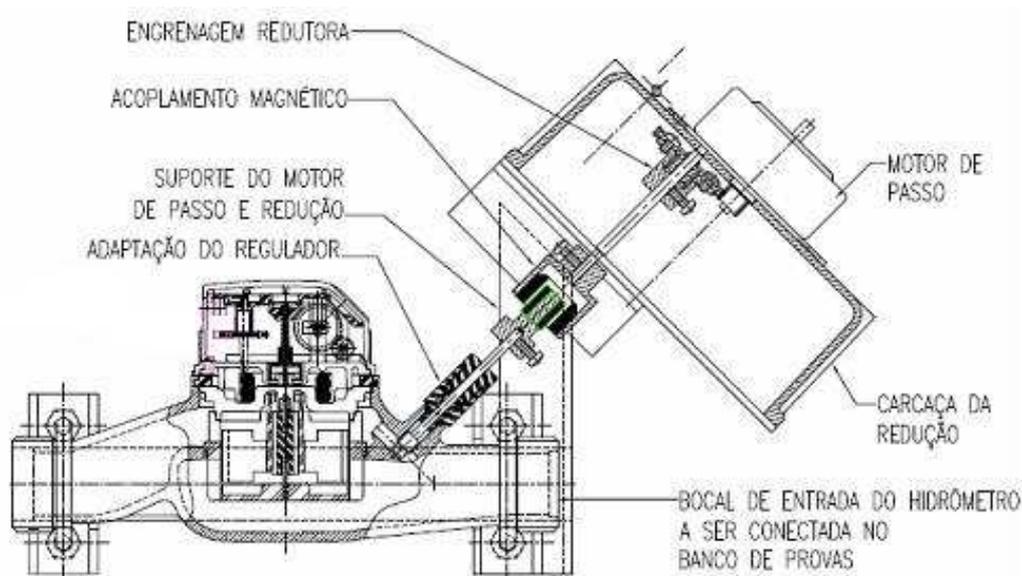
**Figura 40:** Aspecto externo do sensor de efeito hall. Terminal 1 é a alimentação Vcc de 3 a 24 V, terminal 2 é o terra e o terminal 3 é a saída. Fonte: Allegro *datasheet*.



**Figura 41:** Protótipo de um sensor Hall montado na relojoaria.

## 6.5 PARTES MECÂNICAS E ADAPTAÇÃO AO BANCO DE PROVAS

Na figura 42 vê-se um hidrômetro multijato, em corte parcial, fixado à uma estrutura de aço carbono que sustenta a carcaça da redução e o motor de passo. Todo este conjunto foi montado no banco de prova para execução dos testes de calibração. No acionamento do regulador há uma guarnição que permite que o motor gire sem que haja fuga de água pelo eixo. A redução compõe-se de uma coroa solidária ao eixo do regulador que é acionada pelo pinhão do motor. Esta redução tem o intuito de possibilitar uma maior exatidão de controle do ângulo de giro do regulador, além de aumentar o torque.



**Figura 42:** Componentes mecânicos do sistema de calibração.

## 7 RESULTADOS OBTIDOS COM O PROTÓTIPO AUTOMATIZADO

### 7.1 DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMAS PROTÓTIPO ANTERIORES À GRAVAÇÃO DO MICROCONTROLADOR.

Antes da definição da versão final dos dois programas que seriam gravados no microcontrolador, até mesmo para evitar danificar acidentalmente os chips, foram escritas versões para o compilador Dev C++, para execução em um PC comum. A

possibilidade de fazer testes numéricos em grande número com estes dois programas permitiu enxergar a oportunidade de melhoria nas funções de saída da modelagem Sugeno a fim de ajustar seus parâmetros. As novas saídas ficaram assim definidas:

$$Z1 = 0 \cdot x + 0$$

$$Z2 = 0 \cdot x + 0,41$$

$$Z3 = 0 \cdot x + 0,6$$

$$Z4 = 0 \cdot x + 0,8$$

$$Z5 = -0,02 \cdot x + 0,9$$

As mudanças ocorreram na Z2, que era  $Z2 = 0 \cdot x + 0,33$ , e na Z5, que passou a ter uma parte linear, mas que era simplesmente  $Z5 = 0 \cdot x + 0,9$ . Estes novos parâmetros foram obtidos sobrepondo as curvas provenientes do modelo Sugeno e do ajuste de curva. Diminuindo-se o intervalo entre os pontos de teste, perceberam-se quais eram os pontos nos quais ocorriam os maiores afastamentos de ângulos resultantes para as duas propostas.

## 7.2 TESTES COM PROTÓTIPOS AUTOMATIZADOS

Utilizando como base os programas criados no Dev C++, foram finalizados os dois *firmwares* para gravação nos microcontroladores dos protótipos automatizados. As listagens dos dois programas para o Dev C++ e os outros dois para o microcontrolador estão disponíveis nos apêndices, no final desta dissertação.

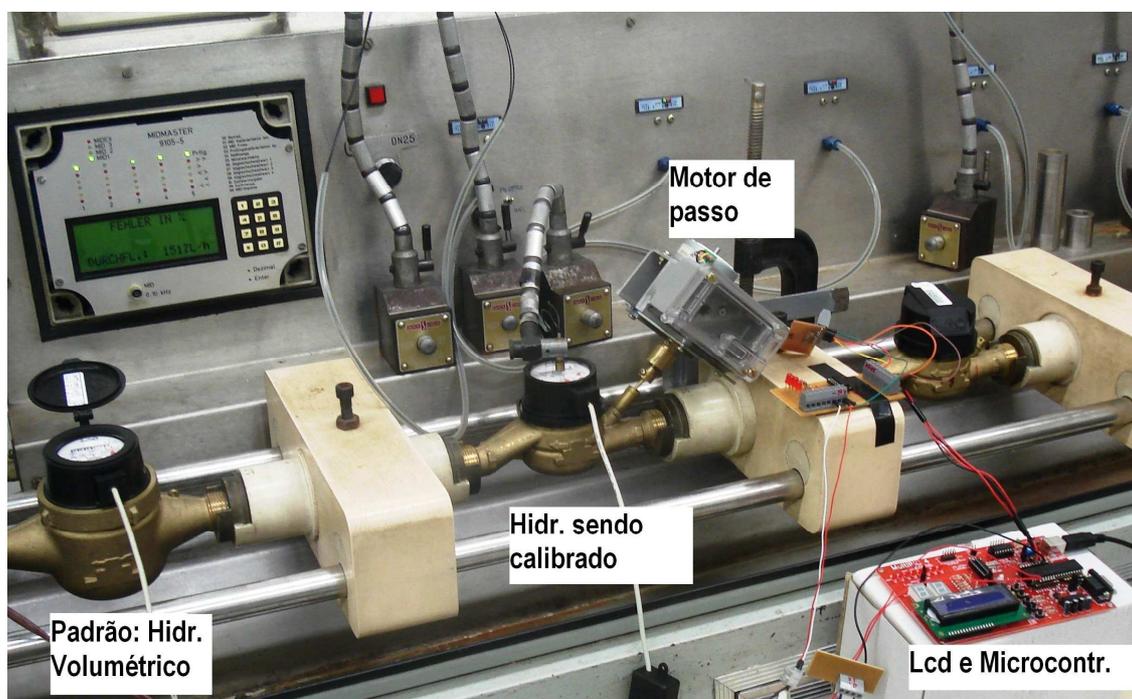
Agora então, com o circuito eletrônico completo e a parte mecânica já acoplada ao banco de provas, os testes com o protótipo automatizado puderam ser feitos.

Do mesmo modo como foi realizado no item 5.2.3.2, colheu-se na linha de produção um lote de amostras de medidores já calibrados manualmente. Para se ter uma idéia do desvio padrão da calibração manual, os erros para um teste realizado em vazão nominal foram transcritos na tabela 11 e calculou-se o desvio padrão.

Após esta análise, todas estas amostras foram desreguladas propositalmente girando-se o regulador com ângulos aleatórios. Então, estes medidores foram posicionados no banco de provas dotado do sistema de calibração automático e

foram calibrados segundo as etapas previstas no fluxograma da figura 36. A figura 42 abaixo demonstra um momento durante uma das provas.

A tabela 12 lista os erros obtidos nos visores LCD dos medidores antes de terem sido automaticamente calibrados para demonstrar que realmente necessitavam da calibração. Depois de terem sido calibrados no protótipo automatizado, os hidrômetros foram montados em um banco de prova volumétrico e novamente tiveram seus erros nas vazões nominal, de transição e mínima, para confirmar se a calibração atendia aos limites normativos, lembrando que um medidor será considerado aprovado se apresentar os seguintes limites de erro: Erro máximo admissível na vazão nominal ( $Q_n$ ):  $\pm 2\%$ , na vazão de transição ( $Q_t$ ):  $\pm 2\%$ , na vazão mínima ( $Q_{min}$ ):  $\pm 5\%$ . Como medidor padrão a ser utilizado na determinação do erro relativo, empregou-se um hidrômetro volumétrico, classe C, bem selecionado para que na vazão de 1500 l/h seu erro relativo médio fosse de 0%. A vazão teórica de teste empregada foi também de 1500 l/h e o tempo de prova 1 minuto, que corresponde a um escoamento de 25 litros, em média, pelos medidores em teste e padrão conectados em série. Foi feito um vídeo do sistema funcionando, ele pode ser enviado pela internet se solicitado.



**Figura 43:** Um medidor em teste com o protótipo do sistema automático de calibração.

**Tabela 11:** Amostra de erros em medidores calibrados manualmente, para vazão nominal, no banco de provas da produção.

Valores de produção	
Número do hydr.	Erro em % após calibração (Qn)
63020	-1,6
63021	0,2
63022	-0,5
63023	-0,9
63024	0,6
63025	-0,7
63026	0,3
63027	-1,3
63028	-0,9
63029	-1,4
63030	0,1
63031	-0,9
63032	0,7
63033	-0,9
63034	-1,3
63035	-1,4
63036	0,7
63037	-1,6
63038	0,3
63039	-1,2
63040	-1,2
63041	0,7
Média	-0,555
Desv. Padr.	0,814

**Tabela 12:** Leitura de erros antes da calibração.

Ajuste de curva		Sugeno	
Valores exibidos no LCD		Valores exibidos no LCD	
Número do hidr.	Erro em % antes da calibração (Qn)	Número do hidr.	Erro em % antes da calibração (Qn)
1	-2,7443	23	3,3602
2	-2,8242	24	-4,1328
3	3,8472	25	2,1982
4	-3,6232	26	-3,2914
5	-2,7543	27	-1,5083
6	-4,4122	28	2,8776
7	-4,6020	29	-2,8907
8	-3,0040	30	1,6572
9	-5,0414	31	4,2818
10	-5,9003	32	2,4829
11	-3,5034	33	-3,4316
12	-2,5676	34	-2,4154
13	-3,4950	35	-2,9783
14	-3,6543	36	-2,8230
15	-4,9886	37	-3,7740
16	-1,9218	38	-2,5707
17	-4,6899	39	-3,7546
18	-4,1522	40	-1,9108
19	-2,5590	41	-3,3276
20	-3,8336	42	-2,1437
21	-3,9331	43	-3,7546
22	-3,1764	44	-3,1723

### 7.3 RESULTADOS E ANÁLISES

As tabelas 13 e 14 demonstram os resultados de erros na vazão nominal (Qn), vazão de transição (Qt) e vazão mínima (Qmin) dos medidores calibrados no sistema automatizado. Estes dados foram coletados em um banco de provas volumétrico do tipo B-100 do laboratório de hidrômetros da LAO Indústria. As tabelas 13 e 14 correspondem às calibrações realizadas com os protótipos gravados com o programa de ajuste de curva e com o algoritmo Sugeno, respectivamente. A análise dos dados e do protótipo como um todo é exposta após as tabelas.

**Tabela 13:** Resultados nas três vazões de teste usando a calibração com a função de ajuste de curva.

Número do hidr.	Leituras	Erro em % após calibração (Qn)	Leituras	Erro em % após calibração (Qt)	Leituras	Erro em % após calibração (Qmin)
1	2,82488	-0,09	2,85198	-1,12	2,90160	2,90
	2,72514		2,83186		2,88102	
2	4,06658	-0,69	4,09408	-2,40	4,14316	1,60
	3,96744		4,07422		4,12284	
3	4,21868	0,35	4,24648	-1,32	4,29508	3,80
	4,11850		4,22640		4,27432	
4	4,07952	-0,83	4,10688	-1,30	4,15596	0,94
	3,98052		4,08714		4,13578	
5	2,90706	-0,48	2,93468	-1,91	2,98184	-3,60
	2,80771		2,91472		2,96256	
6	4,32870	-0,64	4,35622	-0,50	4,40320	-3,90
	4,22951		4,33632		4,38398	
7	7,96574	-0,87	7,99558	-0,04	8,04628	4,80
	7,86678		7,97524		8,02532	
8	4,44124	-0,59	4,46870	-1,20	4,61790	0,80
	4,34200		4,44894		4,59774	
9	3,38786	0,58	3,41578	-0,83	3,46594	4,10
	3,28746		3,39560		3,44512	
10	2,39430	0,72	2,42210	-1,32	2,46990	-3,10
	2,29376		2,40202		2,45052	
11	10,47664	-0,87	10,50418	-0,50	10,55356	2,20
	10,37768		10,48428		10,53312	
12	2,51204	-0,18	2,53240	1,80	2,54192	-4,80
	2,41270		2,51204		2,53240	
13	5,11756	-0,51	5,13770	0,70	5,14796	2,60
	5,01854		5,11756		5,13770	
14	2,19234	-0,14	2,21240	0,30	2,22252	1,20
	2,09296		2,19234		2,21240	
15	2,16542	-0,04	2,18556	0,70	2,19574	1,80
	2,06594		2,16542		2,18556	
16	2,19024	-0,73	2,21030	0,30	2,22042	1,20
	2,09144		2,19024		2,21030	
17	2,73522	-0,45	2,75520	-0,10	2,76534	1,40
	2,63614		2,73522		2,75520	
18	4,10764	-0,95	4,12769	0,24	4,13792	2,32
	4,00906		4,10764		4,12769	
19	2,75064	-0,67	2,77065	0,06	2,78078	1,28
	2,65178		2,75064		2,77065	
20	10,94932	-0,73	10,96940	0,40	10,97958	1,80
	10,85052		10,94932		10,96940	
21	2,17788	-0,37	2,19800	0,60	2,20812	1,20
	2,07872		2,17788		2,19800	
22	2,40496	-0,65	2,42502	0,31	2,43534	3,18
	2,30608		2,40496		2,42502	
	Média	-0,40				
	Desv. Padr.	0,46				

**Tabela 14:** Resultados nas três vazões de teste usando a calibração com a inferência Sugeno.

Sugeno						
Número do hydr.	Leituras	Erro em % após calibração (Qn)	Leituras	Erro em % após calibração (Qt)	Leituras	Erro em % após calibração (Qmin)
23	2,76484	-0,77	2,78478	-0,30	2,79492	1,40
	2,66588		2,76484		2,78478	
24	5,36040	-1,77	5,38016	-1,20	5,39026	1,00
	5,26244		5,36040		5,38016	
25	2,44384	-0,45	2,46374	-0,50	2,47384	1,00
	2,34456		2,44384		2,46374	
26	2,40998	-0,99	2,42980	-0,90	2,43986	0,60
	2,31124		2,40998		2,42980	
27	2,43440	-1,65	2,45420	-1,00	2,46398	-2,20
	2,33802		2,43440		2,45420	
28	2,98854	1,80	3,00884	1,50	3,01914	3,00
	2,88702		2,98854		3,00884	
29	4,35088	-0,96	4,37084	-0,20	4,38060	-2,40
	4,25382		4,35088		4,37084	
30	3,00124	-0,57	3,02112	-0,60	3,03110	-0,20
	2,90208		3,00124		3,02112	
31	11,18652	1,03	11,20668	0,80	11,27696	1,60
	11,08650		11,18652		11,26680	
32	2,42280	-1,22	2,44240	-2,00	2,45210	-3,00
	2,32402		2,42280		2,44240	
33	2,64914	-1,27	2,66894	-1,00	2,67908	1,40
	2,55068		2,64914		2,66894	
34	7,32446	-0,26	7,55814	1,10	7,57736	-3,90
	7,22178		7,53792		7,55814	
35	4,95796	-1,21	5,18930	-0,30	5,20950	1,00
	4,85626		5,16936		5,18930	
36	1,45392	-0,63	1,68656	1,80	1,70668	0,60
	1,35162		1,66620		1,68656	
37	4,89754	-1,10	5,12918	-0,20	5,14782	-6,80
	4,79572		5,10922		5,12918	
38	3,58424	-1,54	3,81776	0,70	3,83698	-3,90
	3,48288		3,79762		3,81776	
39	8,65246	-0,63	8,87524	0,70	8,89658	6,70
	8,55016		8,85510		8,87524	
40	3,24670	-0,21	3,27788	0,40	3,29740	-2,40
	3,14688		3,25780		3,27788	
41	5,11338	-0,90	5,34578	1,50	5,36608	1,50
	5,01136		5,32548		5,34578	
42	4,07208	-0,32	4,30570	0,80	4,32624	2,70
	3,96946		4,28554		4,30570	
43	3,50102	-0,61	3,73408	1,60	3,75462	2,70
	3,39870		3,71376		3,73408	
44	4,74342	-0,77	4,97584	0,01	4,99598	0,69
	4,64126		4,95584		4,97584	
	Média	-0,68				
	Desv. Padr.	0,79				

### 7.3.1 Análise dos dados

De acordo com os testes, todos os medidores, exceto os de números 37 e 39, apresentaram erros dentro dos limites admissíveis normativos. Os medidores 37 e 39, calibrados com o *firmware* Sugeno foram reprovados porque seus erros em  $Q_{min}$  são -6,8% e 6,7%, respectivamente, onde o limite é de 5%, para mais ou para menos. Buscou-se a razão deste fato inicialmente comparando-se as duas propostas, observando-se justamente a diferença de qualidade de calibração proporcionada pelo sistema Sugeno em relação ao do ajuste de curva. Por exemplo, ao comparar-se o desvio padrão dos erros em  $Q_n$  para as duas propostas, (0,46 e 0,79), observa-se que para o tipo implementado com a inferência Sugeno, os resultados não estão tão concentrados quanto na primeira proposta. Este fato e o caso do medidor 37, que poderia ter sido aprovado se tivesse sido calibrado de modo mais centralizado, podem ser explicados, uma vez que as funções de pertinência de entrada e de saída não conseguem “seguir” com tanta proximidade os ângulos resultantes, como os proporcionados pelo ajuste de curva, havendo pequenas diferenças entre as respostas das duas propostas. O medidor 39 foi bem calibrado para  $Q_n$  e  $Q_t$ , mas atribuiu-se o erro de 6,7% em  $Q_{min}$  a uma condição mecânica do próprio medidor e não à calibração automática.

Outro aspecto relevante percebido nos resultados são os valores de erro obtidos nas vazões nominais e de transição empregando-se a função baseada no ajuste de curva. Na tabela 13 observa-se que o medidor 15 alcançou um valor de erro de -0,04% em relação ao zero pretendido. Os demais valores distribuem-se com um desvio padrão de 0,46, que é quase a metade do apresentado na calibração manual cujo valor é de 0,814, encontrado na tabela 11. A possibilidade de regular o sistema para um de erro especificado em  $Q_n$  é uma grande vantagem. Mesmo que sendo capaz de regular adequadamente, uma mesma qualidade de resultados não foi repetida quando o sistema usado empregava a inferência Sugeno pelo mesmo motivo explicado no parágrafo anterior.

Ainda sobre o sistema Sugeno, a literatura ressalta sua maior eficiência computacional e conveniência em análises matemáticas (REZNIK, 1997). Não se pôde avaliar a implementação neste sentido, porque, por tratar-se de um sistema que é retro-alimentado apenas uma vez, é difícil identificar um ganho comparativo

em tipo de resposta ou velocidade. Curiosamente, no momento da gravação dos programas em linguagem C nos microcontroladores, puderam-se observar as quantidades de memória ocupadas pelas duas propostas:

**Ajuste de curva:** Memória RAM usada: 42% , Memória ROM usada: 37%.

**Inferência Sugeno:** Memória RAM usada: 49% , Memória ROM usada: 47%.

O que difere nos dois programas é somente a parte de como é calculada a resposta em ângulo, seja com a função tendência ou com as expressões condicionais do algoritmo Sugeno. Apesar de a utilização da memória no sistema *fuzzy* ter sido a maior das duas, os cálculos realizados são na verdade simples, mas em um número de linhas bem maior.

## 8 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo como base os resultados obtidos neste estudo, conclui-se que a implementação do sistema automatizado de calibração proposto apresenta vantagens importantes, tanto na qualidade da calibração quanto na produtividade.

**Qualidade:** Mais vantajoso seria adotar o sistema controlado pelo ajuste de curva, e em segundo lugar, o controlado com o sistema com a inferência Sugeno. Para termos esta medida, comparam-se os desvios padrões para as três situações de calibração. Temos então:

Sistema implementado com ajuste de curva: Desvio Padrão de **0,46 %**

Sistema implementado com inferência Sugeno: Desvio Padrão de **0,79 %**

Sistema manual: Desvio Padrão de **0,814 %**

A comparação entre o ajuste de curva e a inferência Sugeno é discutida em separado, mais à frente.

A qualidade de calibração refletida nos desvios listados é de fundamental importância, pelo fato de a possibilidade de regular o sistema, de forma repetitiva e confiável, para um erro especificado em  $Q_n$  oferecer a vantagem de poder centralizar em média os resultados para que se adaptem melhor aos limites normativos. É dizer, por exemplo, se um lote de medidores tiver tendência de valores muito negativos para  $Q_{min}$ , em torno de -5%, já no limite, bastaria mudar o programa para que almejasse erros de 1,5% na  $Q_n$ , o que automaticamente também conduziria a valores de erro em  $Q_{min}$  na ordem de -3,5%, transladando a curva por igual. O desvio padrão da calibração, se comparado ao manual, foi reduzido em 35,4%.

**Produtividade:** De acordo com informações levantadas no Departamento de Engenharia de Processos da LAO Indústria, de 15% a 20% dos medidores são calibrados duas vezes porque na primeira vez não conseguiu-se colocá-los dentro dos limites normativos. Com a implementação do sistema automatizado, mesmo com a proposta Sugeno, estes 15%, ou 20% de retrabalho, deixariam de existir, ou seja, no mínimo um ganho de 15% em produtividade.

**Custo e possibilidade de implementação:** Adaptar o sistema desenvolvido aos bancos já existentes não seria algo de baixo custo, entretanto, pode-se estudar qual seria o retorno sobre o investimento e descobrir se vale a pena adaptar os bancos atuais ou encomendar um novo já dotado deste dispositivo. Outra possibilidade de menor custo seria, ao invés de um banco completo, construir uma bancada simples que já entregasse os medidores calibrados para verificação final no banco de prova.

**Comparação entre as duas possibilidades de controle:** Para este caso, os resultados indicaram que a técnica do ajuste de curva foi mais vantajosa do que a o controle *fuzzy* Sugeno. Também, durante a execução deste trabalho, o ajuste das entradas, saídas e regras da inferência para chegar-se ao resultado desejado foi percebida como uma tarefa trabalhosa, porém, mesmo assim, o valor do conhecimento e da possibilidade de utilização de um controle com a técnica *fuzzy* é grande e muito útil. Estes adjetivos podem ser entendidos com facilidade se dissermos que erros em função de uma variação de vazão na câmara de medidas de um hidrômetro também podem ser determinados teoricamente com auxílio da hidrodinâmica, porém seu cálculo é mais complexo e não leva em conta todas as variações dimensionais envolvidas\*.

**Ganhos adicionais:** Como oportunidade de ganhos adicionais percebidos no desenvolvimento desta dissertação pode-se citar duas constatações já relatadas no item 5.2.3: A necessidade de desenvolvimento de um equipamento de pré-posicionamento de regulador, que faria com que os medidores deixassem a etapa de montagem de carcaças quase já no ponto ideal de calibração, e, a economia de material se fosse reduzido o curso do regulador, uma vez que o curso necessário é bem menor do que o existente no formato atual de carcaça.

Importantíssimo também é o ganho da produtividade e qualidade de vida dos operadores dos bancos de prova, que evitariam o esforço repetitivo de abrir e fechar o regulador com uma chave de fenda e o cansaço proveniente da atenção constante em calibrar o medidor, sempre da melhor forma possível, para evitar a reprovação. Em média, durante suas 8 horas de trabalho, um operador calibra 420 medidores.

\* Este cálculo pode ser encontrado no livro *Hydrometry: Theory and Practice of Hydraulic Measurements*, de A. T. Trokolanski, 1960.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEGRO, A1120, A1121, A1122, and A1125, **Chopper Stabilized Precision Hall Effect Switches**, 2010, Allegro MicroSystems Inc. Disponível em <[www.allegromicro.com](http://www.allegromicro.com)> Acesso em: 01 dez. 2011.

AMENDOLA, Mariângela; SOUZA, Anderson Luiz de; BARROS, Laércio Carvalho. **Manual do uso da teoria dos conjuntos fuzzy no MATLAB 6.5. Versão II.** Campinas, SP: FEAGRI & IMECC/ UNICAMP, 2005. Disponível em: <[http://www.ime.unicamp.br/~laeciocb/manual\\_fuzzy\\_matlab.pdf](http://www.ime.unicamp.br/~laeciocb/manual_fuzzy_matlab.pdf)>. Acesso em: 22 de ago. 2011.

ARREGUI, Francisco, CABRERA JR. Enrique; COBACHO, Ricardo. **Integrated water meter management**, EUA: IWA Publishing, 2007, 274 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 212** Medidores velocimétricos de água potável fria até 15 m<sup>3</sup>/h. 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15538**: hidrômetros para água fria - ensaios para avaliação de desempenho de hidrômetros em alta e baixa vazões em hidrômetros até 2,5 m<sup>3</sup>/h de vazão nominal para água fria. 2007

BAE, Jun Young; BADR, Youakim; ABRAHAM Ajith. **A Takagi-Sugeno fuzzy model of a rudimentary angle controller for artillery fire**. 2009.

BARG, Eduardo Klaus. 2002, **Protótipo de um controlador de temperatura baseado em lógica fuzzy utilizando um microcontrolador**. Blumenau SC: Universidade Regional de Blumenau – Centro de Ciências Exatas e Naturais. 2002. Disponível em: <<http://campeche.inf.furb.br/tccs/2002-I/2002-1eduardoklausbargvf.pdf>> Acesso em: 16 de jul. 2011.

COELHO, Adalberto Cavalcanti. **Medición de agua**: política y práctica, manual de consulta. Recife, PE: Comunigraf, 1997, 374 p.

DELMÉE, Gerard J. **Manual de medição de vazão**. 3 ed. São Paulo, SP: Edgard Blücher Ltda., 2003, 346 p.

FORD. **Ford water meter testing equipment**, Section K 7/2003 Web revision 1/2011. E.U.A. Disponível em <<http://www.fordmeterbox.com/catalog/k/flippingbook/files/kjpeg.pdf>> Acesso em: 15 de set. 2011.

GAYAKWAD, Radhesham. Optimized fuzzy logic for motion control - Karnataka, India: **Acta Polytechnica Hungarica**, v. 7, n. 5, 2010.

GOMIDE, F. A. C., GUDWIN, R. R., TANSCHKEIT, R. **Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações**. Campinas, SP: Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial (DCA), Faculdade de Engenharia Elétrica (FEE), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). (s/a).

GUPTA, Bhaskar. **Understanding various types of stepper motors and controlling it through parallel port**. Indian Institute of Information Technology, Allahabad, India. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/65827204/Documentation-Stepper-Motor>> Acesso em: 12 dez. 2011, 22h00.

HIDROBOLIVAR, **Tecnologia para Calibración de Medidores de Água**. 2007. Disponível em [http://www.hidrobolivar.gob.ve/DI\\_publicaciones/DI\\_archivos/Publicacion\\_21.pdf](http://www.hidrobolivar.gob.ve/DI_publicaciones/DI_archivos/Publicacion_21.pdf) Acesso em 22 de set 2012.

IBRAHIM, Ahmad M. **Fuzzy logic for embedded system applications**. Burlington, MA, EUA: Elsevier Science – Newnes, 2004. 312 p.

INMETRO, Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - **Portaria nº 246 de 17 de outubro de 2000**, 2000.

ITRON. **Manual de mantenimiento banco de pruebas itron BPAll**, 2005.

JOHN, Robert. I. Fuzzy inferencing systems - problems and some solutions, **CMS Working Paper No. 62** - De Montfort University: School of Computing Sciences. 1995 Disponível em: <<http://www.cse.dmu.ac.uk/~rij/newrep/newrep.html> > Acesso em: 4 de out. 2011.

KORDON, Arthur K. **Applying computational intelligence: how to create value**, Texas, E.U.A: Springer, 2010, 235 p.

MARCHESE Luca. **Reti neurali su personal computer + fuzzy logic**. 1995. Disponível em: < <http://www.synaptics.org/neurbook/neurbook.html> > Acesso em: 23 de ago. 2011.

MATHWORKS, Fuzzy logic toolbox. Disponível em <<http://www.mathworks.com/help/toolbox/fuzzy/fp49243.html>> Acesso em: 18 de jan. 2012.

MICROCHIP. **PIC16F87XA Datasheet 28/40/44-pin enhanced flash microcontrollers**, 2003, Disponível em: <[www.microchip.com](http://www.microchip.com)> Acesso em: 10 de nov. 2011.

MIKROELETRONICA, **User's Manual, C Compiler for Microchip PIC Microcontrollers**, 2006, 419p. Disponível em: [www.mikroe.com/pdf/mikroc/microc\\_manual.pdf](http://www.mikroe.com/pdf/mikroc/microc_manual.pdf) Acesso em 7 ago. 2011, 17h00.

MIRANDA, Pedro; VILELA JR., Mauro Barbosa; KRONBAUER, Diego. **Sistema de controle difuso de Mamdani aplicações**: pêndulo invertido e outras. Mato Grosso do Sul, MT. Departamento de Computação e Estatística - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2003. Disponível em: <[www.dct.ufms.br/~mzanusso/producao/PedroMir.pdf](http://www.dct.ufms.br/~mzanusso/producao/PedroMir.pdf)> Acesso em: 15 de ago. 2011.

PATYRA, Marek J., GRANTNER, Janus L. ,KOSTER, Kirby., Digital *fuzzy* logic controller: design and implementation. **IEEE Transaction on Fuzzy Systems**, v. 4 n.4, 1996.

REZNIK, Leonid. **Fuzzy controllers**. Oxford, U.K: Newnes, 1997, 287 p.

SENRA, José Geraldo Quintão. **Métodos e princípios básicos aplicáveis na calibração de medidor de águas**, 1ª ed. Belo Horizonte, MG: C.S.O, 2009, 114 p.

SOLBET, **Considerações básicas sobre o 16F877A**, 2007, Disponível em: <<http://www.solbet.com.br>>, Acesso em: 10 de jan. 2012.

SOUSA, Fernando Simplicio; MULERO, Fábio Perkowitsch; **Linguagem embarcada para microcontroladores**, s.d. Disponível em: <[www.microgenios.com.br](http://www.microgenios.com.br)> Acesso em: 15 de jan. 2012.

SOUZA, Paulo José Alves de. **Motor de passo**. Universidade Federal de Minas Gerais – Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica Tecnologia da Automação, 2006. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/15263863/Motor-de-Passo>> Acesso em: 23 dez. 2011, 19h00.

TROSKOLANSKI, Adam T., **Hydrometry: Theory and Practice of Hydraulic Measurements**, Pergamon Press, 1960, 648p.

VENCIGUERRA, Alessandro, **Controlador PID de temperatura com PIC 16F877**. Universidade Metodista de Piracicaba, 2005. Disponível em : <<http://pt.scribd.com/doc/39151260/TG1-Control-Ad-Or-PID-de-Temperatura-Com-PIC16F877>> Acesso em: 10 jan. 2012, 13h00.

VERLE, Milan, **PIC Microcontrollers - Programming in C**. 1<sup>st</sup> ed. MikroElektronika, 2009, 336 p.

VIOT, Greg. **Creating a fuzzy-based inference engine**. 1993. Disponível em: <<http://drdobbs.com/article/print?articleId=184408940&siteSectionName=>>> Acesso em: 15 de ago. 2011.

## Apêndice A – Lógica *fuzzy*

### A.1 Os conjuntos *fuzzy*

De acordo com Ibrahim (2004), os conjuntos *fuzzy* podem ser vistos como uma generalização dos conjuntos clássicos, ou conjuntos *crisp* como às vezes são chamados. Os conjuntos clássicos e suas operações são particularmente úteis para expressar a lógica clássica e nos conduzem à lógica Booleana e sua aplicação em sistemas digitais. Conjuntos e operações *fuzzy*, por outro lado, são úteis também para aplicações em controles *fuzzy*.

Um conjunto clássico é definido como uma coleção de objetos que podem compartilhar certas características. Por exemplo, o conjunto dos números inteiros positivos. Em um conjunto clássico um objeto  $x$  pode ser um membro de um dado conjunto  $A$  (expresso como  $x \in A$ ) ou não sê-lo (o que seria expresso como  $x \notin A$ ); neste caso um grau de pertinência parcial não é permitido.

De acordo com Ibrahim (2004), uma das diversas maneiras de definir um conjunto é por meio de uma função de pertinência, assim, a função de pertinência,  $\mu$ , pode ser usada para defini-lo:

$$\mu_A(x) = 1 \quad \text{se } x \in A, \text{ e}$$

$$\mu_A(x) = 0 \quad \text{se } x \notin A \text{ para todos os valores de } x.$$

#### Exemplo:

Tomando-se um conjunto, chamado aqui de universo de discurso, como o composto pelos seguintes elementos:  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ .

Então, um conjunto de números ímpares poderia ser expresso deste modo:

$$\{(1,1), (2,0), (3,1), (4,0), (5,1), (6,0), (7,1), (8,0), (9,1), (10,0)\}.$$

Onde cada membro do universo de discurso está associado a um valor de pertinência de forma (número,  $\mu$ ). Os números 1, 3, 5, 7 e 9 estão associados a  $\mu = 1$  porque eles formam o conjunto de ímpares extraídos do universo de discurso.

Este método de definição pode facilmente ser estendido para definir um conjunto *fuzzy* atribuindo-lhe pertinências parciais.

## A.2 Conceitos básicos sobre conjuntos *fuzzy*

Um conjunto *fuzzy* é um conjunto cujos graus de pertinência entre 1 e 0 são permitidos, ou seja, é possível uma pertinência parcial. Eles podem, assim, melhor refletir o modo de pensar das pessoas. Por exemplo, uma pessoa não classificará os demais indivíduos como sendo amigos ou inimigos; há um grau de variação entre estes dois extremos. Não reconhecer que há graus em cada característica pode levar à decisão errônea. As expressões humanas vagas, tais como alto, quente, frio, etc. podem ser expressas por conjuntos *fuzzy* da forma:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}$$

Onde  $X$  representa o universo de discurso e  $\mu_A(x)$  como uma faixa de valores de 0 a 1. (IBRAHIM, 2004).

### Exemplo:

Tomando-se os seguintes valores de temperatura em °C como:

$$T = \{0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40\}.$$

Então, o termo “quente” pode ser definido em um conjunto *fuzzy* deste modo:

$$\text{Quente} = \{(0, 0), (5, 0.1), (10, 0.3), (15, 0.5), (20, 0.6), (25, 0.7), (30, 0.8), (35, 0.9), (40, 1.0)\}.$$

Este conjunto *fuzzy* reflete o ponto de vista que 0°C não é quente, 5, 10, e 15°C são pouco quentes, e 40°C é de fato quente. É claro o que estes pontos de vista podem variar de pessoa para pessoa.

## A.3 Representações dos conjuntos *fuzzy*

Os conjuntos *fuzzy* podem ser descritos de diversos modos, porém, todos eles permitem que a pertinência parcial seja expressa (IBRAHIM, 2004). O método de pares ordenados descrito acima no exemplo do item 5.3.2.2 pode aparecer em diversos formatos, tais como:

$$A = \mu_1/x_1 + \mu_2/x_2 + \mu_3/x_3 + \dots$$

Aqui, a barra ( / ) não indica divisão, nem o símbolo gráfico “mais” (+) indica a soma, ele é usado simplesmente para conectar os termos e assim significar a união de subconjuntos de um único item.

**Exemplo:**

Seja  $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ . Pode-se definir um conjunto *fuzzy* como sendo:

$A = 0.8/x_1 + 0.4/x_2 + 0.1/x_3 + 0.9/x_4$  que é equivalente a  $A = \{(0.8, x_1), (0.4, x_2), (0.1, x_3), (0.9, x_4)\}$

Conjuntos *fuzzy* podem também ser definidos por assinalar uma função contínua para descrever a pertinência, tanto analítica quanto graficamente. Algumas pertinências comumente utilizadas são ilustradas nas figuras 44-a, 44-b e 44-c. A função de pertinência triangular na Figura 44-a pode também ser expressa como:

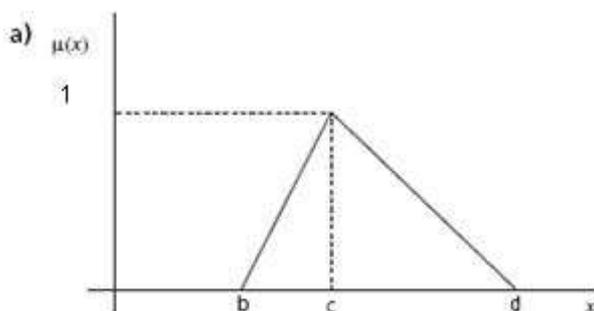
$$\begin{aligned} \mu(x) &= (x-b) / (c-b), \quad b \leq x \leq c \\ &= (d-x) / (d-c), \quad c \leq x \leq d \\ &= 0; \quad \text{para todos os outros valores.} \end{aligned}$$

A função trapezoidal da Figura 15-b pode ser expressa como:

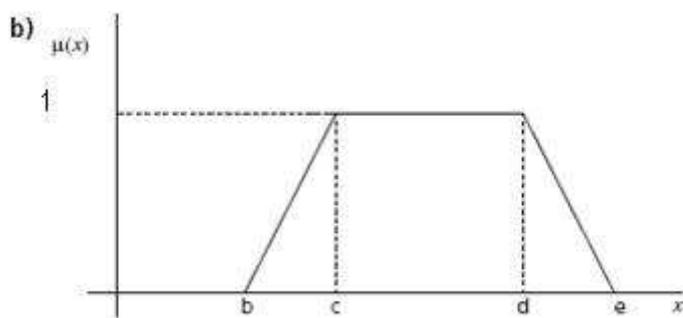
$$\begin{aligned} \mu(x) &= (x - b) / (c - b), \quad b \leq x \leq c \\ &= 1, \quad c \leq x \leq d \\ &= (e-x) / (e-d), \quad d \leq x \leq e \\ &= 0, \quad \text{para todos os outros valores.} \end{aligned}$$

A função Gaussiana da figura 15-c pode ser expressa como:

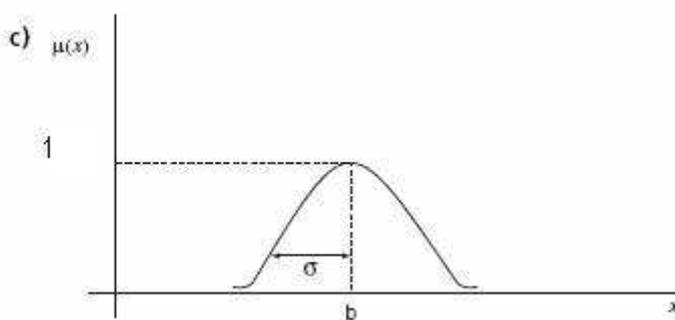
$$\mu(x) = e^{-\sigma(x-b)^2} \quad (\text{IBRAHIM,2004})$$



**Figura 44-a:** Função de pertinência triangular. Fonte Ibrahim (2004).



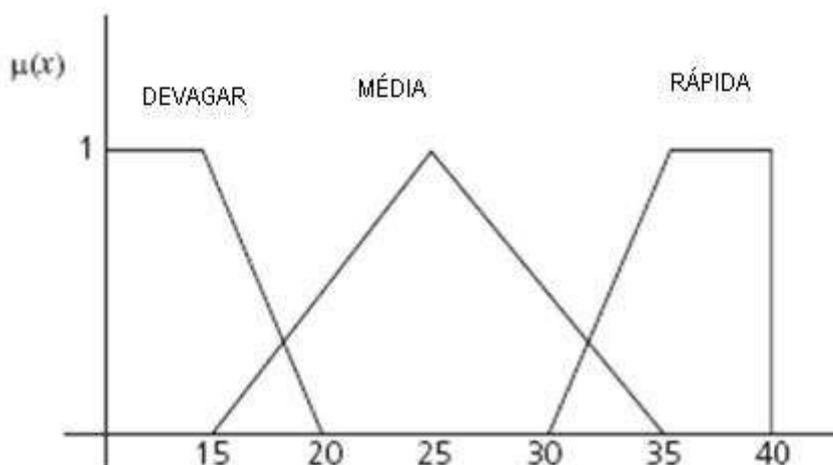
**Figura 44-b:** Função de pertinência trapezoidal. Fonte Ibrahim (2004).



**Figura 44-c:** Função de pertinência Gaussiana. Fonte Ibrahim (2004).

### Exemplo:

A Figura 45 mostra três conjuntos definidos graficamente para representar os conjuntos *fuzzy* “devagar”, “média” e “rápida” para representar o modo de pensar em valores de velocidade em uma faixa de 0 até 40 Km/h.



**Figura 45:** Possível representação gráfica de conjuntos *fuzzy* retratando a faixa de velocidades de 0 a 40Km/h, Fonte Ibrahim (2004).

## A.4 A determinação das funções de pertinência

As funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* servem para capturar o modo de pensar das pessoas. Elas podem ainda ser determinadas subjetivamente em problemas práticos baseados na opinião de um especialista. Em tal situação pode-se pensar em funções de pertinência como uma técnica para formalizar a solução de problemas empíricos baseada mais na experiência do que no conhecimento da teoria. O pensamento do especialista pode ser retratado diretamente ou por meio de um algoritmo especial. Tal determinação poderia se tornar mais focada por medidas físicas se a necessidade assim o determinar.

Histogramas de frequência disponíveis e outros dados probabilísticos podem também auxiliar na construção das funções de pertinência. Entretanto é importante perceber que os valores de funções de pertinência não são probabilidades e a sua soma não deve resultar em 1. A construção das pertinências pode ser simplificada, selecionando-se sua forma a partir de uma família menor comumente utilizada como as descritas nas figuras 44-a, 44-b e 44-c.

## A.5 As variáveis linguísticas

Segundo Pereira (1995) *apud* Barg (2002), variáveis linguísticas são variáveis cujos valores são palavras em linguagem natural representadas em conjuntos *fuzzy*. Por exemplo, uma variável linguística retratando a posição angular do regulador do hidrômetro poderá assumir um dos membros do conjunto {grande negativo, pequeno negativo, médio, pequeno positivo, grande positivo}. Para se atribuir um significado aos termos linguísticos, associa-se a cada um deles um conjunto *fuzzy* definido sobre um universo de discurso comum. A principal função das variáveis linguísticas é fornecer uma maneira sistemática para a caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos (BARG, 2002). Miranda *et al.* (2003) definem o valor das variáveis linguísticas da seguinte maneira:

“Cada valor de uma variável linguística representa um conjunto difuso em um universo de discurso determinado. Estritamente, uma variável linguística está formada por cinco partes ( $x$ ,  $T(x)$ ,  $U$ ,  $G$ ,  $M$ ), em que:

$x$ : nome da variável.

$T(x)$ : conjunto de valores linguísticos de  $x$ .

$U$ : universo de discurso em que se define  $T(x)$ .

G: regra sintática para gerar os nomes dos valores de x.  
 M: regra semântica para associar cada valor a seu significado.

Por exemplo: Velocidade é uma variável linguística. O conjunto de valores lingüísticos (partição *fuzzy* de seu universo de discurso) é:

$T(\text{Velocidade}) = \{\text{muito baixa, baixa, média, alta, muito alta}\}$

Cada termo em  $T(\text{Velocidade})$  está caracterizado por um conjunto *fuzzy* no universo de discurso, exemplo:  $U = [0, 200]$  km/h. A regra sintática G determina a ordem das palavras dos valores lingüísticos de Velocidade: como em muito alta, na qual muito é um modificador que precede ao termo primário alta. A regra semântica M associa cada valor linguístico com seu significado: {alta é maior ao redor de 180}, e {baixa é menor ao redor de 30}, etc.”

## A.6 Expressão *fuzzy* do conhecimento

Segundo Marchese (1995), a expressão do conhecimento empregado na lógica *fuzzy* faz parte dos sistemas de decisão baseados nas regras do tipo *se-então-senão*, ou mais simplesmente, baseados no conhecimento (*Knowledge Based Processing*). A base de conhecimento de um sistema é como uma espécie de base de dados composta de relações entre associações de conseqüências resultantes de condições particulares de hipóteses. Tudo isto claramente expresso em regras tipo *se-então-senão*, ou, outras vezes, somente *se-então*. Exemplificando, um conjunto de condições que descrevem uma parcela observável das saídas do processo é associado a uma ação de controle que irá levar o processo às condições de operações desejadas (BARG, 2002). Miranda *et al.* (2003) chamam estas regras de *Regras de Produção fuzzy* e declaram que é a maneira mais comum de armazenar informações em uma base de conhecimento, e que elas teriam duas partes principais:

*If* <antecedente> *Then* <conseqüente>

O antecedente é composto por um conjunto de condições que, quando satisfeitas (mesmo parcialmente), determinam o processamento do conseqüente da regra por um mecanismo de inferência. Por sua vez, o conseqüente é composto de um conjunto de ações ou diagnósticos que são gerados com o disparo da regra. Os conseqüentes das regras disparadas são processados em conjunto para gerar uma resposta determinística, para cada variável de saída do sistema (MIRANDA *et al.*, 2003).

Concluindo, as regras de controle *fuzzy* conectam os valores de entrada com as propriedades da saída do sistema. Estão expressas como proposições condicionais:

Se [Estado do processo] Então [Ação de controle]

Para este estudo, baseando-se na própria experiência do autor observada na etapa de levantamento de dados de calibração de um medidor, citam-se dois exemplos de regras na tabela 15.

**Tabela 15:** Exemplos de regras

<b>Se</b> ( <i>Erro a ser corrigido é</i> )	<b>E</b> ( <i>Vazão de teste</i> )	<b>Então</b> ( <i>ângulo de giro do regulador</i> )
Grande Negativo (-7,3%)	1500 litros por hora	Grande Negativo (todo aberto)
<b>Pequeno Negativo (1,2%)</b>	1500 litros por hora	Regulador Zero (meio do curso)

## A.7 Operações lógicas com conjuntos *fuzzy*

Segundo Ibrahim (2004), as operações citadas a seguir são as mais comumente empregadas em aplicações de engenharia.

### a) O complemento

O complemento absoluto de um conjunto *fuzzy* A é identificado por  $\bar{A}$  e sua função de pertinência é definida por:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \text{ para todo } x \in X$$

#### Exemplo:

Tomando-se  $A = 0.7/1+1/1+0.6/3+0.2/4+0/5$ .

Então,  $\bar{A} = 0.3/1+0/2+0.4/3+0.8/4+1/5$ .

### b) A união

A união de dois conjuntos *fuzzy* A e B resulta em outro conjunto cuja função de pertinência é definida por

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max [\mu_A(x), \mu_B(x)].$$

### Exemplo:

Tomando-se

$$A=0.3/1+0.2/2+0.4/3+0.8/4+1/5, \text{ e } B=0.2/1+0.3/2+0.1/3+0.2/4+0.4/5.$$

Então,

$$A \cup B=0.3/1+0.3/2+0.4/3+0.8/4+1/5$$

### c) A intersecção

A intersecção de dois conjuntos *fuzzy* A e B é um conjunto *fuzzy* cuja função de pertinência é definida por

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)].$$

### Exemplo:

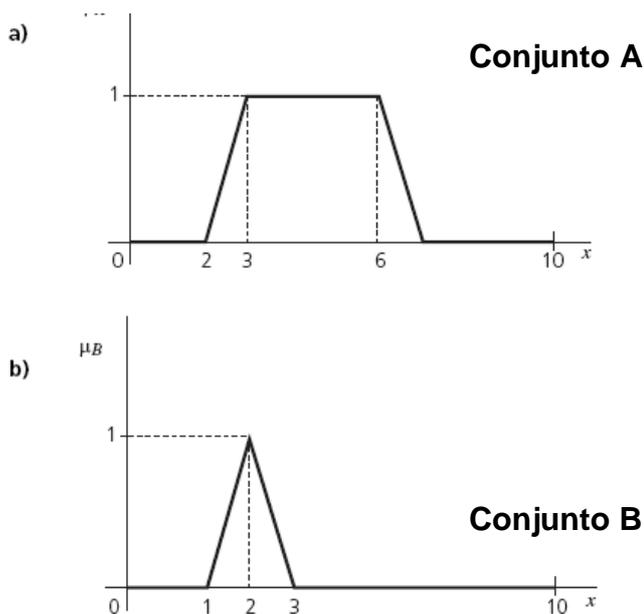
$$A=0.3/1+0.2/2+0.4/3+0.8/4+1/5, \text{ e}$$

$$B=0.2/1+0.3/2+0.1/3+0.2/4+0.4/5.$$

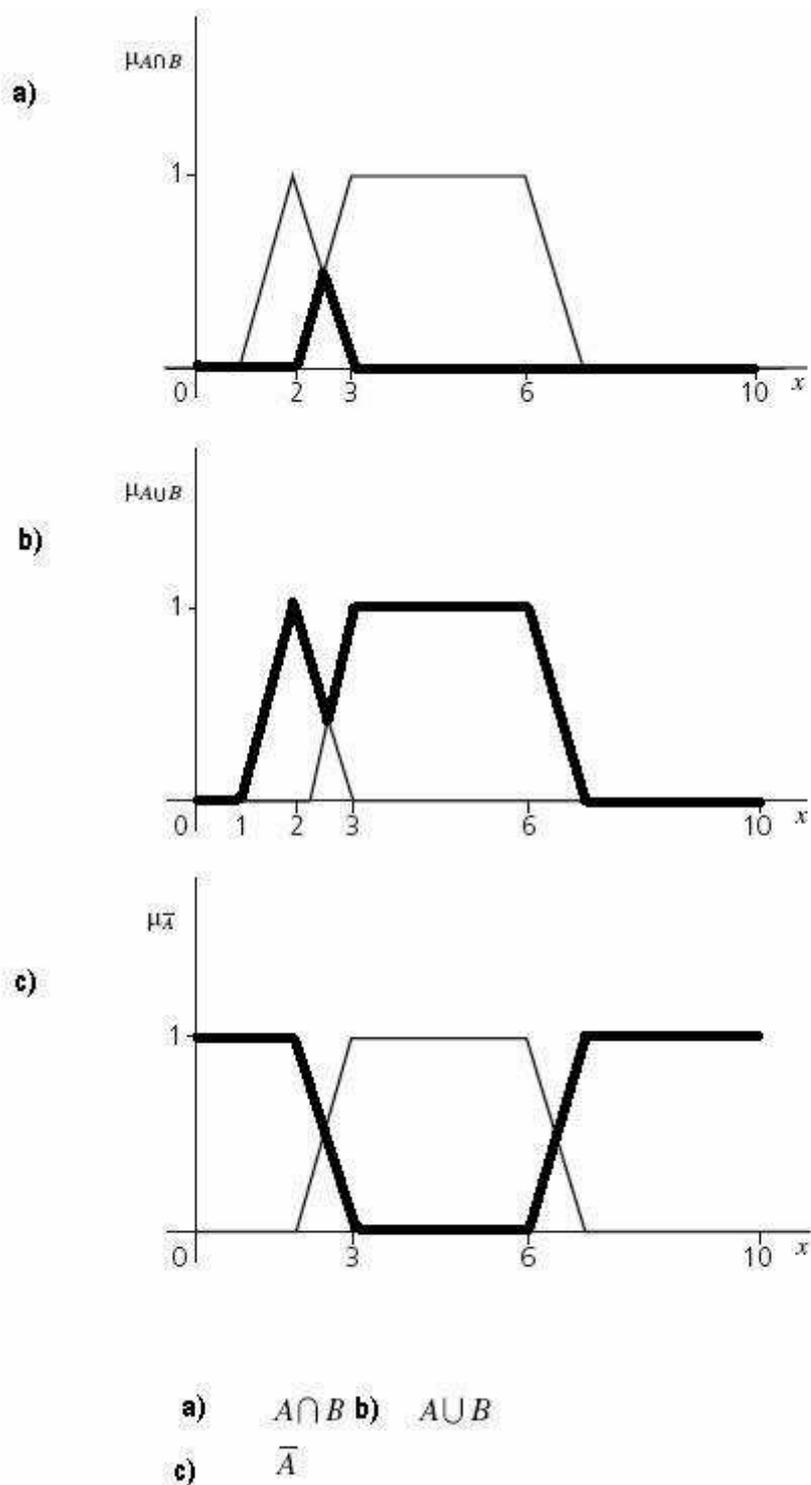
Então,

$$A \cap B=0.2/1+0.2/2+0.1/3+0.2/4+0.4/5$$

Graficamente, podemos observar as mesmas operações na figura 47.



**Figura 46:** Representação gráfica dos conjuntos *fuzzy*. a) Conjunto A, e b) Conjunto B. Fonte Ibrahim (2004).



**Figura 47:** Representação gráfica das operações com conjuntos *fuzzy*. c) operação de intersecção, d) operação de união; e) o complemento. Fonte Ibrahim (2004).

Segundo Barg (2002) a teoria originária dos conjuntos *fuzzy* foi fundamentada nos termos das três operações realizadas com conjuntos (*complemento, união e*

*interseção*) que são equivalentes às operações da lógica booleana (*negação, ou, e*).

## **A.8 A forma e a quantidade de funções de pertinência**

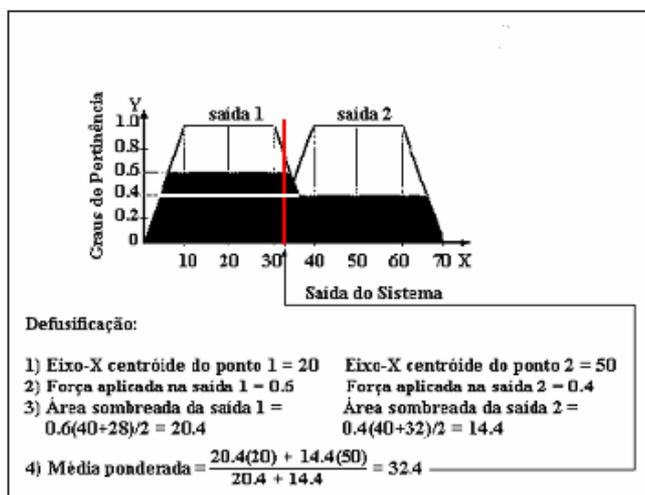
De acordo com Viot (1993), o número de funções de pertinência, bem como sua forma, depende de fatores como exatidão requerida, resposta e estabilidade do sistema, facilidade de implementação, manipulação, manutenção, entre outros. Segundo Reznik (1997), a questão da escolha da forma destas funções não foi resolvida teoricamente e a suavidade oferecida por funções de ordem mais alta, além de consumir maior esforço computacional, não se reflete fortemente na qualidade do modelo fuzzy. Ainda a este respeito, tem-se também que, de acordo com John (1995), a forma de qualquer função de pertinência depende da aplicação, e que, para a maioria dos problemas de controle de lógica fuzzy assumem-se funções frequentemente de formato triangular. Por este motivo, escolheu-se utilizar conjuntos *fuzzy* de forma triangular, em um número que será determinado pelos dados físicos levantados. Este número será modificado conforme a necessidade.

## **A.9 Métodos de “fuzificação” e “defuzificação”**

De acordo com Viot (1993), a fuzificação é o determinar ou calcular um valor para representar o grau de pertinência de uma entrada em um ou mais grupos qualitativos denominados conjuntos *fuzzy*. Já segundo Ibrahim (2004), o “fuzificar” é traduzir valores de entradas *crisp*, ou valores medidos, em conceitos lingüísticos. Agora, a conversão de *fuzzy* novamente para escalar, ou *crisp*, transforma informações qualitativas em quantitativas. Este processo é chamado de “defuzificação” (MIRANDA, 2003).

Os métodos de defuzificação mais utilizados são: o do centro de área e o da média dos máximos. O método do centro de área consiste de vários passos. Inicialmente, um ponto centróide sobre o eixo das abscissas é determinado para cada função de pertinência de saída, então, as funções de pertinência são limitadas em altura pela força da regra aplicada, e as áreas das funções de pertinência são calculadas (VIOT, 1993). Por fim, estas áreas são multiplicadas pelas distâncias até

cada um dos centros de gravidade individuais e divididos pela somatória das áreas. Esta operação resolve a questão da sobreposição das funções de pertinência. Um detalhamento sobre este aspecto para o método Sugeno já foi incluído oportunamente no corpo do texto.



**Figura 48:** Método do centro das áreas. Fonte: Miranda *et al.* (2003)

## A.10 Métodos de inferência *fuzzy*

O método de inferência *fuzzy* mais empregado é sem dúvida o método Mamdani. (MATHWORKS, 2012). Este, porém, não foi o método empregado no presente trabalho.

Segundo Ibrahim (2004), inferência *fuzzy* é o processo de mapeamento do espaço de entrada para um espaço de saída, utilizando o raciocínio *fuzzy*. Dentre os diversos tipos de inferência *fuzzy*, o tipo de inferência Mamdani, é aquele no qual, os conjuntos *fuzzy* originários da parte conseqüente de cada regra são combinados por meio do operador de agregação e o conjunto *fuzzy* resultante é “defuzificado” para resultar na saída do sistema.

Já na inferência do tipo Sugeno, tem-se que a parte conseqüente de cada regra é uma combinação linear das entradas. A saída é uma combinação linear ponderada das conseqüentes e não envolve um processo de “defuzificação”.

Por exemplo, Reznik (1997) explica que Mamdani propôs controlar uma planta estabelecendo algumas regras condicionais *fuzzy*. Abaixo está uma destas regras:

**Se** o Erro da Pressão (EP) é Grande Negativo (GN), **Então** a Troca de Calor (TC) é Grande Positiva (GP)

Podem-se medir as saídas de uma planta e calcular a ação de controle de acordo com este tipo de regras. O processamento das regras é chamado mecanismo de inferência e de modo geral, as regras de Mamdani poderiam ser assim escritas:

$R^i$ : **SE**  $A_{i1}(x_1), A_{i2}(x_2), A_{i3}(x_3), \dots, A_{im}(x_m)$  **ENTÃO**  $Y$  é  $B_i$

**Onde:**

$x_1, x_2, x_3 \dots x_m$  são variáveis de entrada. Ex.: pressão, temperatura, etc...

$A_{ij}(x_j)$  ( $j= 1, 2, \dots m$ ) é um conjunto fuzzy em  $X_j$

$Y$  é uma variável de saída

$B_i$  é um conjunto fuzzy em  $Y$

**Portanto, na regra:**

**Se o Erro da Pressão (EP) é Grande Negativo (GN) Então a Troca de Calor (TC) é Grande Positiva (GP)**

Erro da Pressão (EP) é  $X_1$

a Troca de Calor (TC) é  $Y$

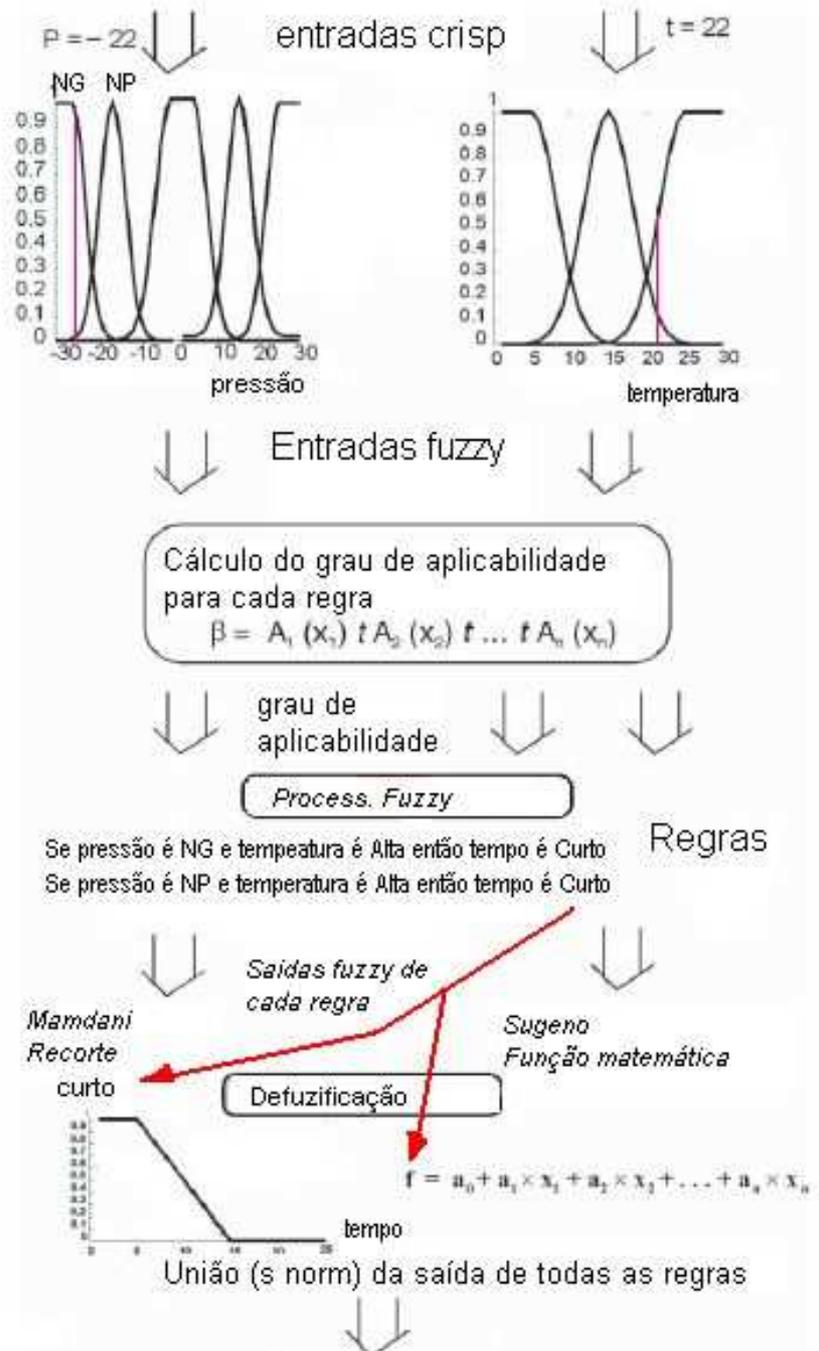
$A_{i1}(x_1)$  é Grande Negativo (GN)

$B_i$  é Grande Positiva (GP)

Para um maior embasamento quanto à escolha do método, Reznik (1997) diz que as vantagens do método Mamdani são a facilidade de compreensão por parte do especialista que determinará as regras e a simplicidade na formulação das mesmas, além de ser o tipo de regra mais comumente utilizado. Quanto ao método

Sugeno, é computacionalmente mais eficiente, mais conveniente em análises matemáticas e é capaz de garantir a continuidade da superfície de saída.

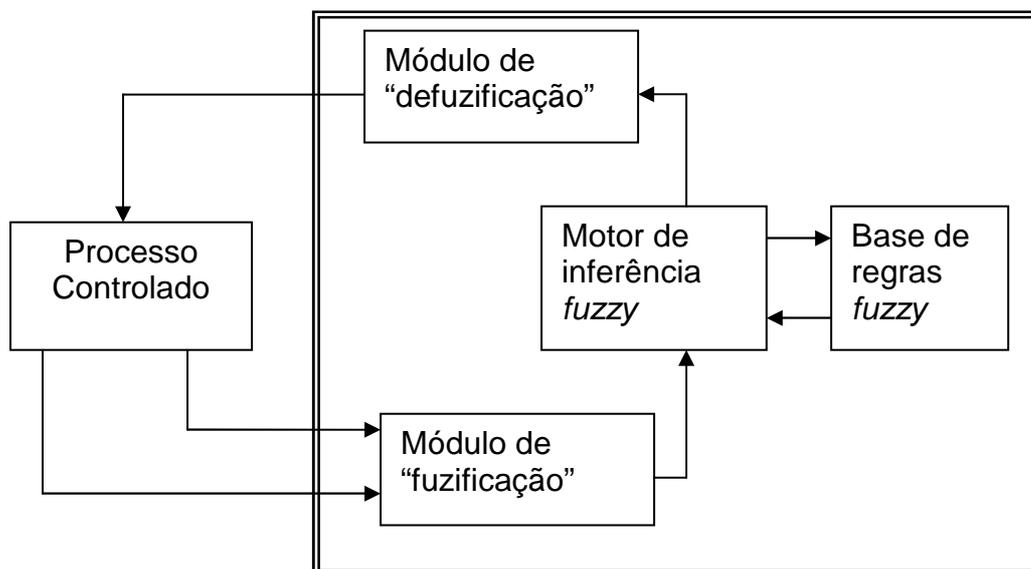
O esquema apresentado na figura 49 dá uma visão geral dos dois tipos de raciocínio *fuzzy*.



**Figura 49:** Métodos Mamdani e Sugeno. Fonte: Reznik (1997)

### A.11 Projeto de um controlador *fuzzy*

Segundo Gayakwad (2010), de maneira geral, um controlador que usa a lógica *fuzzy* (*FLC*, *fuzzy logic controller*) possui quatro módulos: 1) módulo de “fuzificação”, 2) uma base de regras *fuzzy*, 3) um módulo de inferência *fuzzy*, e 4) um módulo de “defuzificação”. As conexões entre estes módulos podem ser vistas na figura 50 abaixo.



**Figura 50:** Blocos básicos de um controlador *fuzzy*. Fonte: Gayakwad (2010).

Já refletindo o presente estudo, os seguintes passos devem ser executados para que tenhamos o processo controlado, ou melhor dizendo, o medidor calibrado:

a) São realizadas medições das variáveis que representam condições relevantes para o controle do processo, ou seja, um volume de teste atravessa o medidor e o sensor registra um determinado número de pulsos ao término da passagem da vazão de teste. O valor da vazão, apesar de não ser medido pelo sistema de calibração, se necessário, pode ser um dado de entrada direta para um conjunto *fuzzy*. Sabe-se previamente qual será a vazão de teste empregada. Assim, têm-se as duas entradas do sistema.

b) Estas duas medidas, que são conjuntos *crisp* (número de pulsos e valor de vazão), são os valores da entrada a serem transportados a conjuntos *fuzzy*

apropriados, para expressar as variações na medição. Esta operação chama-se “fuzificação”.

c) Estas medições “fuzificadas” são empregadas agora na lógica de tomada de decisão para avaliar as regras de controle captadas na base de conhecimento *fuzzy*. O resultado desta avaliação é um conjunto *fuzzy* definido pelo universo da possível ação.

d) Este conjunto *fuzzy* é então convertido em um único valor *crisp* de número de pulsos a ser enviado a um motor de passo, com determinado sentido e velocidade, que, de algum modo é a melhor representação do conjunto *fuzzy* de saída. Esta conversão é chamada “defuzificação”. O valor “defuzificado” representa a ação final realizada pelo controlador *fuzzy*.

## Apêndice B – MICROCONTROLADORES E A LINGUAGEM

### C

#### B.1 O Microcontrolador PIC 16F877A da Microchip

O termo microcomputador é usado para descrever um sistema que contém, no mínimo, um microprocessador, memória de programa, memória de dados e um dispositivo de entrada e saída de dados. Alguns microcomputadores incluem sistemas adicionais, tais como temporizadores, contadores e conversores análogo-digitais. Assim, um sistema microcomputador pode ser algo entre um grande computador, com unidades de leitura de CD e impressora, por exemplo, até um único chip controlador (IBRAHIM, 2008), o qual pode ser denominado também microcontrolador.

Diferentemente dos microprocessadores, os microcontroladores possuem em um único chip elementos como CPU, memórias ROM e RAM, portas de comunicação serial, além dos conversores analógico-digitais e contadores/temporizadores já descritos acima. O seu baixo preço (em torno de R\$15,00), alta qualidade e disponibilidade, fazem dele uma ótima solução no controle de diversos aparelhos eletrônicos domésticos, dispositivos de controle de máquinas e medição de variáveis de processos industriais, entre outras aplicações. (VERLE, 2009). A grande variedade de modelos disponíveis, seu tamanho reduzido e a robustez mecânica de seu encapsulamento acabam também refletindo na sua versatilidade de usos.

A tecnologia dos microcontroladores atuais tem seus primórdios no desenvolvimento dos circuitos integrados. Esta tecnologia permite armazenar centenas de milhares de transistores no encapsulamento de um único chip (VENCIGUERRA, 2005).

Neste trabalho utilizou-se um modelo PIC (*peripheral interface controller*) manufaturado pela *Microchip Technology Inc.* modelo 16F877A. O número 16 significa que ele faz parte da família "MID-RANGE". É um microcontrolador da família de oito bits. Isto significa que a ALU (*Arithmetic and Logic Unit* ou Unidade Aritmética e Lógica em português) lida com palavras de no máximo oito bits. A letra F indica que a memória de programa deste PIC é do tipo Flash. Cada linha da memória é uma palavra de 14 bits. Os três últimos números permitem identificar

precisamente o tipo de PIC, que neste caso é um do tipo 877. A referência 16F877 pode ter um sufixo do tipo "-XX", onde XX representa a frequência máxima de *clock* o que o PIC pode receber.

Abaixo estão listadas as principais características deste componente. O que motivou a adoção desta variação é a disponibilidade de seus periféricos, memórias de programa e de dados, temporizadores, interrupções e o número de portos, característica que confere flexibilidade e simplificação do código. É provável que existam outros modelos disponíveis capazes de cumprir as mesmas funções a um custo menor, porém, devido a seus numerosos recursos, o tipo escolhido acabou simplificando o *hardware*, tornando-o também mais estável e confiável devido ao modo que disponibiliza o controle de seus registradores específicos. As principais características deste microcontrolador abaixo listadas foram levantadas no catálogo *Microchip PIC16F87XA Data Sheet 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers* (2003).

### **B.1.1 Principais características do 16F877A**

- CPU RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) de alto desempenho: processadores com conjunto de instruções reduzidos, em nosso caso são 35 instruções simples de uma única palavra.
- Todas as instruções são de ciclo único exceto as de ramificação, que são de dois ciclos.
- Velocidade de operação: *clock* de 20 MHz e 200 ns de ciclo de instruções.
- Até 8K x 14 palavras de memória de programa Flash, até 368 x 8 bytes de memória de dados (RAM) e até 256 x 8 bytes de memória de dados EEPROM.
- Disposição dos pinos compatível com outros dispositivos de 28 ou 40/44 pinos, tipos PIC16CXXX e PIC16FXXX.
- Os terminais de entrada e saída são divididos em 5 portos bidirecionais configurados individualmente como entrada e saída capazes de acionar pequenas cargas.

#### **Características dos periféricos**

- Temporizador/contador *Timer0* de 8 bits com pré-escalador de 8 bits.

- Temporizador/contador *Timer1* de 16 bits com pré-escalador. Pode ser incrementado durante repouso por meio de cristal ou sinal de *clock* externo.
- Módulo USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*) com endereçamento de detecção de 9 bits.
- Circuito de *Brown-out Reset* (BOR) para detecção de *Brown-out*.

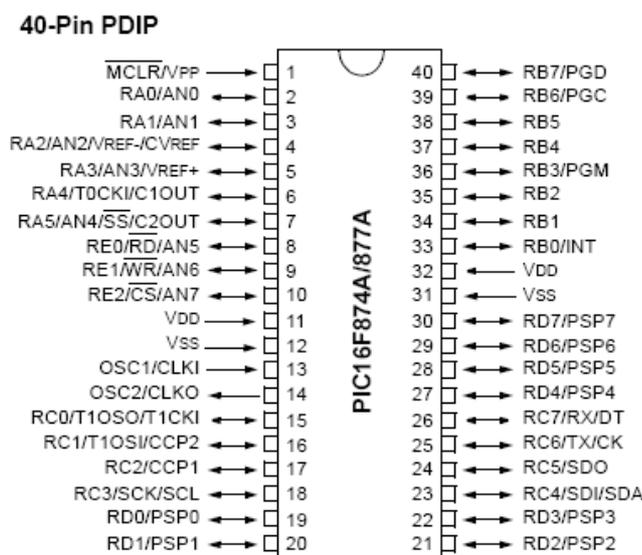
### Características especiais do microcontrolador:

- Retenção de dados da EEPROM superior a 40 anos.

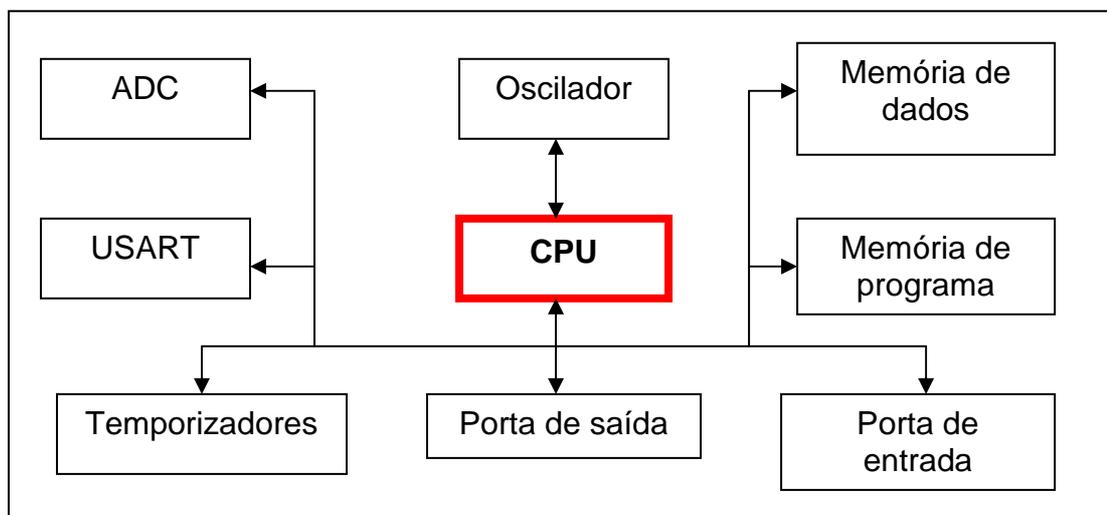
### Tecnologia CMOS

- Tecnologia Flash/EEPROM de baixa potência e alta velocidade.
- Design completamente estático.
- Ampla faixa de tensão de operação (2.0V a 5.5V).
- Disponível em faixas de temperatura de trabalho comerciais e Industriais.
- Baixo consumo de energia.

A disposição dos pinos, com nomenclatura dos portos, pode ser vista na figura 51 abaixo. O diagrama de blocos pode ser visto na figura 53.



**Figura 51:** Disposição dos pinos do microcontrolador 16F877A no encapsulamento PDIP . Fonte: Catálogo Microchip 16F87XA (2003).



**Figura 52:** Conexão entre a CPU e os periféricos de um microcontrolador em um desenho simplificado.

### B.1.2 Blocos de um microcontrolador

Os blocos principais de um microcontrolador podem ser vistos na figura 52 acima. Microcontroladores não saem da fábrica prontos para o uso como CI's comerciais, é necessário que haja um *hardware* e um *software* para o gerenciamento de suas estruturas (VENCIGUERRA, 2005). Basicamente, um microcontrolador executa um programa carregado em sua memória de programa. Sob o controle deste programa, dados são recebidos de dispositivos externos (entradas, ou *inputs*), manipulados, e então enviados para dispositivos externos (saídas ou *outputs*).

A CPU é o cérebro do microcontrolador, na qual todas as operações lógicas e aritméticas são executadas. As memórias podem ser classificadas em dois tipos bem generalistas: memória de programa e memória de dados. A memória de programa armazena o programa escrito pelo programador e geralmente é do tipo não volátil, ou seja, os dados não são perdidos após ser retirada a alimentação de energia elétrica. A memória de dados armazena temporariamente os dados usados no programa e, ela geralmente, é do tipo volátil, seus dados são perdidos após ter sido retirado o suprimento de energia elétrica.

O 16F877A possui três áreas de memórias: a área de programas, a área de registros de arquivos e a EEPROM de dados. O bloco com o nome "memória de programa" é onde ficam residentes as instruções de programa do PIC16F877A. Esta

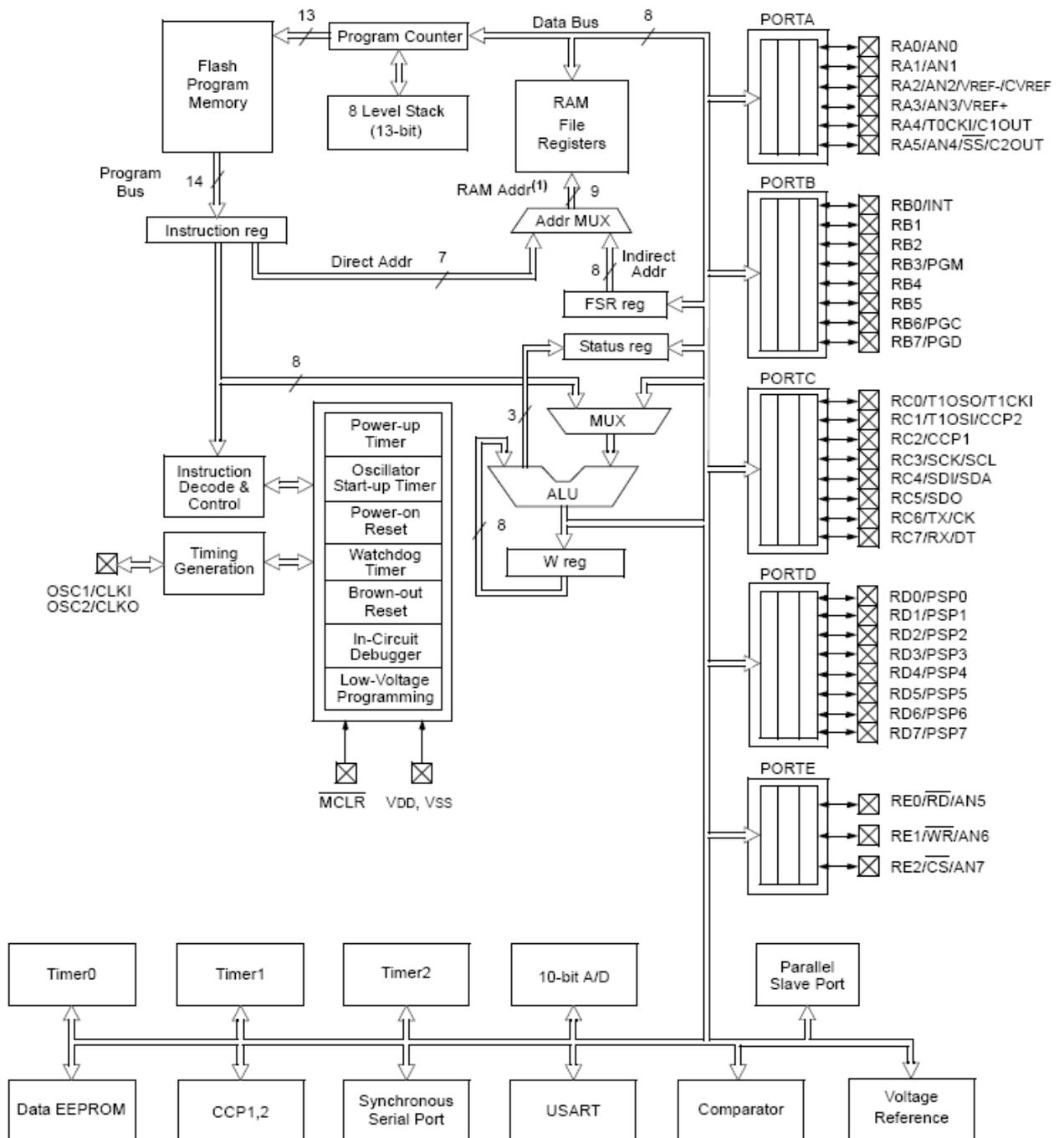
memória pode ser programada e alterada com pulsos elétricos, facilitando a experimentação com diversos programas (SOLBET, 2007).

O segundo bloco de memória é aquele correspondente aos registros de arquivos, "*Register File*". Nesta área de memória ficam as informações que definem a forma de funcionamento do microcontrolador e também os dados do programa do usuário. O microcontrolador tem total acesso para escrever e ler nesta área. Existem quatro bancos de memória para armazenar os registros.

O terceiro bloco é o Flash EEPROM, que é uma versão da memória EEPROM (*electrically erasable programmable read only memory*). Este tipo de memória tornou-se popular em microcontroladores e é usada para armazenar o programa do usuário. A *Flash* EEPROM é do tipo não volátil e geralmente muito rápida. Dados podem ser apagados e então reprogramados, utilizando-se um dispositivo programador adequado. Para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se um programador MULTIPROG ICD2.

Os portos de entrada e de saída são os elementos por meio dos quais o microcontrolador interage com o meio ambiente. Os portos digitais assumem valores discretos, normalmente referenciados como 0 ou 1, correspondentes a 0 V ou 5 V DC de saída, respectivamente. O valor de tensão correspondente ao nível lógico 1 é normalmente a tensão de alimentação do microcontrolador.

Todos os microcontroladores precisam de um circuito oscilador (ou *clock*) para funcionar. Geralmente compostos de dispositivos temporizadores externos conectados ao microcontrolador, eles são, na maioria dos casos, um cristal e mais dois pequenos capacitores. Podem ser construídos também com um conjunto de resistor e capacitor. Alguns modelos oferecem também circuitos temporizadores embutidos. No presente estudo foi utilizado um cristal de 4 MHz.



**Figura 53:** Diagrama de blocos do microcontrolador 16F877A. Fonte: Catálogo Microchip 16F87xA (2003).

## B.2 A linguagem C

A primeira versão da linguagem C foi criada por Dennis Ritchie em 1972, nos laboratórios Bell. Pelo ponto de vista técnico, o surgimento do C iniciou-se com a linguagem ALGOL 60, definida em 1960. O ALGOL era uma linguagem de alto nível, que permitia ao programador trabalhar sem conhecimento específico da máquina, sem se preocupar com os aspectos de como cada comando ou dado era armazenado ou processado na máquina. Em 1967 surgiu a CPL (*Combined Programming Language*) nas universidades de Londres e Cambridge com o objetivo, segundo a equipe do projeto, de simplificar o ALGOL, porém, não foi bem aceito devido à sua dificuldade de implementação. Ainda em 1967, em Cambridge, Martin Richards criou o BCPL (*Basic CPL*), uma simplificação do CPL, tentando manter apenas as partes funcionais do CPL.

Em 1970, a Bell Labs implementou um compilador para uma versão mais reduzida da CLP, a linguagem B. Mais tarde, com o desenvolvimento de novos computadores, tanto a BCPL como a B demonstraram-se limitadas, e, para resolver este problema, a Bell Labs encarregou o projetista Dennis Ritchie de projetar uma nova linguagem, sucessora do B, que viria então, a ser chamada de C.

A linguagem C buscou manter o poder de manipulação de hardware e ainda assim dar ao programador novas condições para o desenvolvimento de programas em áreas diversas como, comercial, científica e engenharia.

O mais interessante desta versão de C era que os programas-fonte criados para rodar em um tipo de computador podiam ser transportados e recompilados em outros computadores sem grandes problemas, característica denominada portabilidade. Em 1985, a ANSI (*American National Standards Institute*) estabeleceu um padrão oficial de C, a chamada "C ANSI" que é adotado até hoje (SOUSA *et al.*).

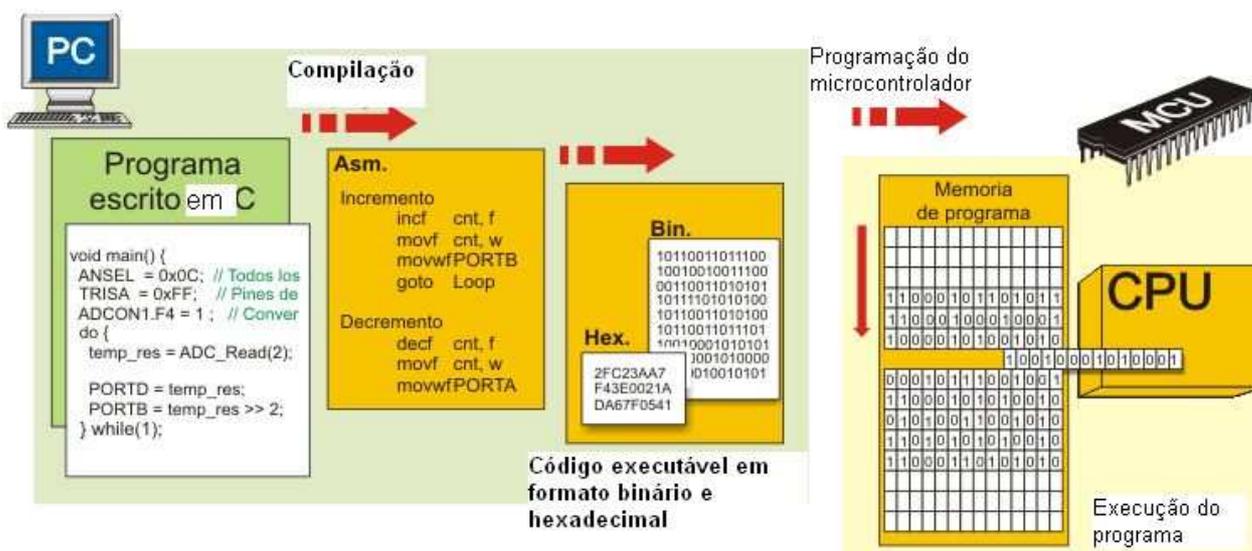
### B.2.1 A escrita do código fonte em linguagem C

O microcontrolador executa o programa carregado em sua memória Flash. Este programa é denominado código executável e é composto de uma série de uns e zeros, aparentemente sem significado. Dependendo da arquitetura do controlador, o código binário pode ser composto de palavras de 12, 14 ou 16 bits de comprimento. Cada palavra é interpretada pela CPU como uma instrução a ser

executada durante o funcionamento do microcontrolador. Como é mais fácil trabalhar com o sistema hexadecimal, o código executável é representado frequentemente por uma série de números hexadecimais denominada código HEX. Nos microcontroladores PIC com palavras de programa com 14 bits de comprimento, o conjunto de instruções tem 35 instruções diferentes, buscadas uma a uma na memória de programa, decodificadas para executar as operações requeridas (SOUSA *et al.*).

Tradicionalmente, os microcontroladores têm sido programados utilizando-se a linguagem *Assembly*, que embora tenha representado um grande avanço em relação à escrita do código executável em linguagem de máquina e possibilite maior velocidade de execução e tamanhos menores de código, tem diversas desvantagens. Um programa *Assembly* (ASM) consiste de abreviaturas com significado, o que faz com que o aprendizado e a manutenção do programa escrito sejam consideravelmente difíceis, além do que, microcontroladores fabricados por diferentes empresas têm diferentes linguagens *Assembly* (IBRAHIM, 2008).

Microcontroladores podem também ser programados linguagens de alto nível como BASIC, PASCAL, ou C. Linguagens de alto nível são mais fáceis de aprender do que a linguagem *Assembly*, além de facilitarem também o desenvolvimento de grandes e complexos programas. No presente estudo utilizou-se a linguagem C na escrita do programa que carregará o microcontrolador. A linguagem C dispõe de todas as vantagens de uma linguagem de alto nível e permite realizar operações tanto em bits como em bytes. Além disto, também é uma linguagem compilada, que significa que os arquivos fontes que contém o código C se traduzem em linguagem de máquina pelo compilador. A figura 54 abaixo demonstra isto. No mercado, estão disponíveis diversos compiladores tais como o PICC18, C18, CCS, MPLAB e MikroC, este último utilizado na execução deste estudo (IBRAHIM, 2008).



**Figura 54:** Conversão de linguagem C em linguagem de máquina. Fonte: Verle (2009).

## B.2.2 A IDE MikroC

A IDE (*Integrated Development Environment* ou Ambiente de desenvolvimento Integrado,) MikroC é um poderoso compilador especialmente desenvolvido para microcontroladores da família PIC da Microchip. Compatível com o padrão ANSI de linguagem dispõe de um amplo conjunto de bibliotecas, documentação detalhada e exemplos de programas em seu próprio arquivo de ajuda.

Este programa disponibiliza um editor de código avançado com recursos de auto-correção, auto-completar, um conversor de formato e terminal de comunicação para protocolos RS-232 como auxílio no desenvolvimento de aplicações. Ele também compila e indica problemas de sintaxe ou incompatibilidade de código fonte. (MIKROELETRONICA, 2006).

O compilador MikroC está disponível para *download* no sitio da internet [www.mikroelektronica.com](http://www.mikroelektronica.com) e a versão para demonstração limita o tamanho dos códigos fonte em 2K. A figura 55 abaixo mostra o editor do MikroC.

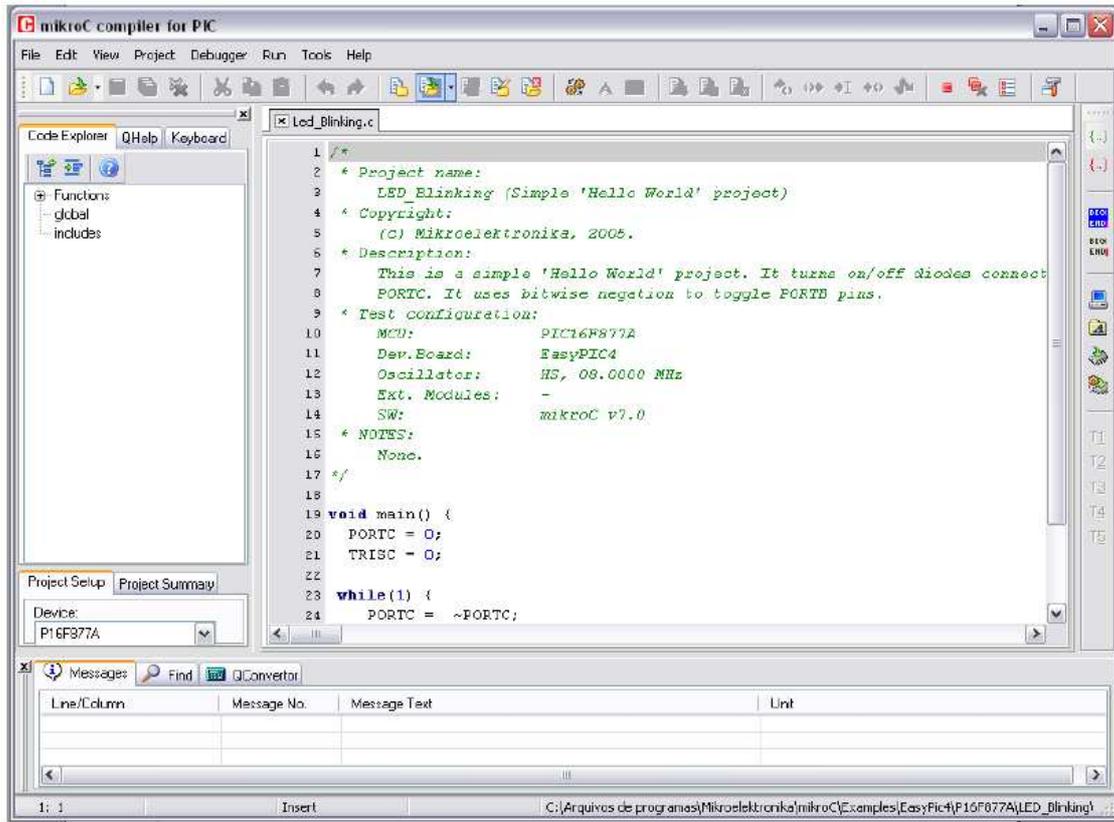


Figura 55. A IDE MikroC. Fonte: Verle (2009).

## Apêndice C– Programas

### C.1 Programa protótipo função ajuste de curva para PC

```

#include <iostream.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#define A -1.144
#define B -2.264
#define C -48.517
#define Compensacao 543.37
float Erro = 0;
float Angulo = 0;
float Ang_compensado = 0;

main()
{
printf("*****\n");
printf("*****\n");
printf("Digite o erro Erro= ");
scanf("%f",&Erro);
printf("\n\n");
printf("O valor digitado e' = %5.2f", Erro);
printf("\n\n");

if (Erro < -5.50)
{
printf("reposicionar regulador");
}
else if (Erro > 6.00)
{
printf("reposicionar regulador");
}
else
{
Angulo = ((A * pow(Erro,3))+ (B * pow(Erro,2)) + (C * pow(Erro,1)))*3.75;
Ang_compensado = - Angulo;
printf("O Angulo sem compensar e' = %5.2f", Angulo);
printf("\n\n");
printf("O Angulo a corrigir e' = %5.2f", Ang_compensado);
printf("\n\n");
if (Ang_compensado >=0)
{
printf("Abrir o regulador (Sentido anti-horario)");
}
else
{
printf("Fechar o regulador (Sentido horario)");
}
}
}

```

```

}
printf("\n\n");
printf("*****\n");
printf("*****\n");
system("PAUSE");
return 0;
}

```

## C.2 Programa protótipo Sugeno para PC

```

// Programa para determinação do ângulo em função do erro versão 2
// para sistema de calibração automático utilizando a técnica proposta por
// Takagi Sugeno
// OBS: Para redução do tamanho do código as expressões foram reduzidas ao máximo

```

```

#include <iostream.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#define Compensacao 543.37

// As regras são
//1 - Se (input é NG) then (output é mf5)
//2 - Se (input é NP) then (output é mf4)
//3 - Se (input é EZ) then (output é mf3)
//4 - Se (input é PP) then (output é mf2)
//5 - Se (input é PG) then (output é mf1)

//Os pesos das funcoes da saída são
//Z1 = 0*x + 0
//Z2 = 0*x + 0,41
//Z3 = 0*x + 0,6
//Z4 = 0*x + 0,8
//Z5 = -0.02*x + 0,9

float Erro = 0;
float Angulo = 0;
float Ang_compensado = 0;
float NG = 0;
float NP = 0;
float EZ = 0;
float PP = 0;
float PG = 0;
float Media = 0;
float Z5 = 0;
main()
{
printf("*****\n");
printf("*****\n");
printf("Digite o Erro = ");

```

```

scanf("%f",&Erro);
printf("\n\n");
printf("O valor digitado e' = %5.2f",Erro);
printf("\n\n");

if (Erro < -4.00)
{
printf(">>>Pre calibrar novamente\n\n");
}
if (Erro > 6.00)
{
printf(">>>Pre calibrar novamente\n\n");
}
if (Erro >= -4.00 && Erro < -1.50 )
{
NG = 1.00 - ((Erro + 4.00)*0.40);
NP = 1.00 - NG;
printf("NG %5.2f \nNP %5.2f \n", NG, NP);
Z5 = (-0.02*Erro)+ 0.9;
Media = (Z5 * NG)+ (NP * 0.80);
printf("Media = %5.2f \n", Media);
Angulo = Compensacao -(Media * 800);
printf("Angulo = %5.2f \n", Angulo);
}
if (Erro >= -1.50 && Erro < 1.00)
{
NP = 1.00 - ((Erro + 1.50)*0.40);
EZ = 1.00 - NP;
printf("NP %5.2f \nEZ %5.2f \n", NP, EZ);
Media = (NP * 0.80)+ (EZ * 0.60);
printf("Media = %5.2f \n", Media);
Angulo = Compensacao -(Media * 800);
printf("Angulo = %5.2f \n", Angulo);
}
if (Erro >= 1.00 && Erro < 3.50)
{
EZ = 1.00 - ((Erro - 1.00)*0.40);
PP = 1.00 - EZ;
printf("EZ %5.2f \nPP %5.2f \n", EZ, PP);
Media = (EZ * 0.60)+ (PP * 0.41);
printf("Media = %5.2f \n", Media);
Angulo = Compensacao -(Media * 800);
printf("Angulo = %5.2f \n", Angulo);
}
if (Erro > 3.50 && Erro <= 6.00)
{
PP = 1.00 - ((Erro - 3.50)*0.40);
PG = 1.00 - PP;
printf("PP %5.2f \nPG %5.2f \n",PP,PG);
Media = (PP * 0.41);

```

```

printf("Media = %5.2f \n", Media);
Angulo = Compensacao -(Media * 800);
printf("Angulo = %5.2f \n", Angulo);
}
if (Angulo<0)
{
printf("Fechar regulador (sentido horario)\n");
}
if (Angulo>0)
{
printf("Abrir regulador (sentido anti-horario)\n");
}
printf("*****\n");
printf("*****\n");
    system("PAUSE");
    return 0;
}

```

### C.3 Programa função ajuste de curva para MCU

```

// Calibração função ajuste de curva
// Este código conta os acionamentos de dois sensores (botões sw1 e sw2)
// Durante um certo tempo de prova.
// o botao sw3 quando apertado mostra o valor dos sensores na porta serial
// o botão sw4 aciona o motor de passo de forma correta
#define Compensacao 543.37
#define A -1.144
#define B -2.264
#define C -48.51
#define rt -1.000

unsigned cn;          //contador para determinacao do tempo
void interrupt()     // funcao interrupt
{
if(TMR0IF_bit) {
    cn++;           // increment counter
    TMR0IF_bit = 0; // clear TMR0IF
    TMR0 = 96;
}
}

//unsigned char *ltr = "Pressionar rst para inicio de prova";
unsigned short oldstate = 0 ; //declara estado do botão
unsigned short oldstate1 = 0 ; //declara estado do botão
unsigned short oldstate2 = 0 ; //declara estado do botão
unsigned short oldstate3 = 0 ; //declara estado do botão
unsigned int cnt1 = 0 ; // declara contador 1 e inicia com 0
unsigned int cnt2 = 0 ; // declara contador 2 e inicia com 0
unsigned int i = 0; // declara contador da repeticao dos pulsos
float a = 0; // declara variavel pra acerto de unidade
float b = 0; // declara variavel para acerto de unidade

```

```

float erro = 0 ;           // declara erro inicial
char txt1[10];           // declara string para escrever na serial RS232
char pos=0;
char FullStepBackward[4]={0x06, 0x0C, 0x09, 0x03} absolute 0x24;
char FullStepForward[4]={0x03, 0x09, 0x0C, 0x06} absolute 0x20;

unsigned int PulseNum = 0;
float Angulo = 0;
//funcao motor de passo sentido horario abrir regulador
void FullStepMotorCW() // função full step horário
{
PORTB=FullStepForward[pos];
delay_ms(50);
pos=(pos+1)%4;
}
// funcao motor de passo sentido anti horariofechar regulador
void FullStepMotorCCW() // função full step anti horario
{
PORTB=FullStepBackward[pos];
delay_ms(50);
pos=(pos+1)%4;
}
// funcao escreve linha
void UART1_Write_Line(char *uart_text) // função de texto
{
UART1_Write_Text(uart_text);
UART1_Write(13);
UART1_Write(10);
}

// Conexões do LCD
sbit LCD_RS at RB5_bit;
sbit LCD_EN at RB4_bit;
sbit LCD_D4 at RB0_bit;
sbit LCD_D5 at RB1_bit;
sbit LCD_D6 at RB2_bit;
sbit LCD_D7 at RB3_bit;
sbit LCD_RS_Direction at TRISB5_bit;
sbit LCD_EN_Direction at TRISB4_bit;
sbit LCD_D4_Direction at TRISB0_bit;
sbit LCD_D5_Direction at TRISB1_bit;
sbit LCD_D6_Direction at TRISB2_bit;
sbit LCD_D7_Direction at TRISB3_bit;
//Termino do LCD
void main() // programa principal
{
OPTION_REG = 0X84; // atribui prescale de 1:1 para TMR0
ANSEL = 0 ;
ANSELH = 0 ;
C1ON_bit = 0; // Disable comparators

```

```

C2ON_bit = 0;
TRISB = 0;      // porta b como saída
PORTB = 0;      // inicia com todos valores com 0
TMR0 = 96;      //atribui valor inicial para TMR0
INTCON = 0xA0;  //habilita interrupcao do TMR0 e seta registros
                //GIE e TOIE

cn = 0 ;
TRISA = 0b00011110; // entradas botao 1, 2, 3 e 4 porta A
PORTA = 0;          // porta a inicia tudo como 0
UART1_Init(9600);   // Inicializa serial UART com 9600 bps
Delay_ms(100);      // Espera estabilizar o modulo UART
//UART1_Write_Line("Inicio pr bt0");
//UART1_Write_Line("prova 15s");
Lcd_Init();
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);
Lcd_Out(1, 1, "Inicio pr bt0");
Lcd_Out(2, 1, "Prova 1 minuto");
while (cn<=25000) //tempo de prova
{
    if (Button(&PORTA, 1, 5, 1)) // se botao 1 é pressionado e igual a nivel 1
    {
        oldstate = 1;
    }
    if (oldstate && Button(&PORTA, 1, 5, 0)) // rotina do botão 2 parte
    {
        oldstate = 0 ;
        cnt1++;          // contador 1
        a = (float)cnt1; // converte em float
    }
    if (Button(&PORTA, 2, 5, 1)) //se botao 2 é pressionado e igual a nivel 1
    {
        oldstate1 = 1; // se coincidir com 1, não faz nada (estado normal)
    }
    if (oldstate1 && Button(&PORTA, 2, 5, 0)) // sebotão for pressionado cai para 0
    {
        oldstate1 = 0; // se coincidir com 0, procede rotina abaixo
        cnt2++;        // contador 2
        b=(float)cnt2; // converte em float
    }
    if(cn > 25000)
    {
        Lcd_Out(1, 1, "Pr.Bt3>erro em %");
    }
} // fecha primeiro while

Delay_ms(100);
erro = (float)((a - b)/b)*100.00000; // atraso para realizar operação
Angulo = 3.75*((-1.144*erro*erro*erro) + (-2.264*erro*erro) + (-48.517*erro));

```

```

do
{
if (Button(&PORTA, 3, 5, 1)) //se botao 3 é pressionado e igual a nivel 1
{
oldstate2 = 1;          // se coincidir com 1, não faz nada (estado normal)
}
if (oldstate2 && Button(&PORTA, 3, 5, 0)) // sebotão for pressionado cai para 0
{
oldstate2 = 0;          // se coincidir com 0, procede rotina abaixo
Delay_ms(100);
//UART1_Write(10);
//UART1_Write(13);
FloatToStr(erro,txt1);
Delay_ms(1000);
UART1_Write_Text(txt1);
UART1_Write(10);
UART1_Write(13);
Lcd_Out(1, 1, txt1);
//UART1_Write_Line("Pr Bt4 calibr");
Lcd_Out(2, 1, "Pr.Bt4>calibrar");
}
    if(Angulo > 0.000000)
    {
    if (Button(&PORTA, 4 ,5 ,1))
    {
    oldstate3 = 1;
    }
    if (oldstate3 && Button(&PORTA, 4 ,5 ,0))
    {
    oldstate3 = 0;
    PulseNum = (unsigned int)(Angulo*0.133333);
    for(i=0;i<PulseNum;i++)FullStepMotorCCW();
    }
    }

    if (Angulo < 0.000000)
    {
    if (Button(&PORTA, 4 ,5 ,1))
    {
    oldstate3 = 1;
    }
    if (oldstate3 && Button(&PORTA, 4 ,5 ,0))
    {
    oldstate3 = 0;
    PulseNum = (unsigned int)(Angulo* 0.133333);
    for(i=0;i<PulseNum;i++) FullStepMotorCW();
    }
    }
}
while(1); }

```

## C.4 Programa Sugeno para MCU

```

// Calibração Sugeno 3acertado.c
// Este código conta os acionamentos de dois sensores (PortaA A1 e A2)
// Durante um certo tempo de prova.
// o botao sw3 quando apertado mostra o valor dos sensores na porta serial
// o botão sw4 aciona o motor de passo de forma correta

//As regras Fuzzy Sao
//1- Se (input e NG) then (output e mf5)
//2- Se (input e NP) then (output e mf4)
//3- Se (input e EZ) then (output e mf3)
//4- Se (input e PP) then (output e mf2)
//5- Se (input e PG) then (output e mf1)

// Os pesos da funcoes de saida sao
// Z1 = 0*X + 0
// Z2 = 0*X + 0.41
// Z3 = 0*X + 0.6
// Z4 = 0*X + 0.8
// Z5 = -0.02*X + 0.9

#define Compensacao 543.37
#define rt -1.000

unsigned cn = 0;          //contador para determinacao do tempo
void interrupt()        // funcao interrupt
{
  if(TMR0IF_bit) {
    cn++;                // incrementa o contador
    TMR0IF_bit = 0;     // zera o TMR0IF
    TMR0 = 96;          // valor INICIAR TMR0
  }
}

unsigned short oldstate = 0 ; //declara estado do botão
unsigned short oldstate1 = 0 ; //declara estado do botão
unsigned short oldstate2 = 0 ; //declara estado do botão
unsigned short oldstate3 = 0 ; //declara estado do botão
unsigned int cnt1 = 0 ; // declara contador 1 e inicia com 0
unsigned int cnt2 = 0 ; // declara contador 2 e inicia com 0
unsigned int i = 0; // declara contador da repeticao dos pulsos
float a = 0; // declara variavel pra acerto de unidade
float b = 0; // declara variavel para acerto de unidade
float erro = 0 ; // declara erro inicial
float NG = 0; // declara Negativo grande
float NP = 0; // declara Negativo pequeno
float EZ = 0; // declara Erro zero
float PP = 0; // declara Positivo pequeno
float PG = 0; // declara Positivo grande
float Media = 0; // declara Media defuzificacao
float Z5 =0; // declara Peso funcao de saida 5

```

```

char txt1[10];          // declara string para escrever transf. em texto
char pos=0;            // declara posicao para motor de passo
char FullStepBackward[4]={0x06, 0x0C, 0x09, 0x03} absolute 0x24;
char FullStepForward[4]={0x03, 0x09, 0x0C, 0x06} absolute 0x20;

unsigned int PulseNum = 0;
float Angulo = 0;
//funcao motor de paso sentido horario abrir regulador
void FullStepMotorCW() // função full step horário
{
PORTB=FullStepForward[pos];
delay_ms(50);
pos=(pos+1)%4;
}
// funcao motor de passo sentido anti horariofechar regulador
void FullStepMotorCCW() // função full step anti horario
{
PORTB=FullStepBackward[pos];
delay_ms(50);
pos=(pos+1)%4;
}
// funcao escreve linha na serial
void UART1_Write_Line(char *uart_text) // função de texto
{
UART1_Write_Text(uart_text);
UART1_Write(13);
UART1_Write(10);
}

// Conexões do LCD
sbit LCD_RS at RB5_bit;
sbit LCD_EN at RB4_bit;
sbit LCD_D4 at RB0_bit;
sbit LCD_D5 at RB1_bit;
sbit LCD_D6 at RB2_bit;
sbit LCD_D7 at RB3_bit;
sbit LCD_RS_Direction at TRISB5_bit;
sbit LCD_EN_Direction at TRISB4_bit;
sbit LCD_D4_Direction at TRISB0_bit;
sbit LCD_D5_Direction at TRISB1_bit;
sbit LCD_D6_Direction at TRISB2_bit;
sbit LCD_D7_Direction at TRISB3_bit;
//Termino do LCD
void main() // programa principal
{
OPTION_REG = 0X84; // atribui prescale de 1:1 para TMR0
ANSEL = 0 ; // todas entradas digitais
ANSELH = 0 ; // todas entradas digitais
C1ON_bit = 0; // Desabilita comparadores
C2ON_bit = 0; // Desabilita comparadores
}

```

```

TRISB = 0;           // porta b como saida
PORTB = 0;           // inicia com todos valores com 0
TMR0 = 96;           //atribui valor inicial para TMR0
INTCON = 0xA0;       //habilita interrupcao do TMR0 e seta registros
                    //GIE e TOIE

cn =0 ;
TRISA = 0b00011110; // entradas botao 1, 2, 3 e 4 porta A
PORTA = 0;           // porta a inicia tudo como 0
//UART1_Init(9600); // Inicializa serial UART com 9600 bps
Delay_ms(100);       // Espera estabilizar o modulo UART
Lcd_Init();          // Icinicaliza Lcd
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);
Lcd_Out(1, 1, "Inicio > Bt 0"); // mensagem inicial LCD
Lcd_Out(2, 1, "Prova 1 min "); // mensagem inicial LCD
while (cn<=11719) //tempo de prova
    {
        if (Button(&PORTA, 1, 5, 1)) // se botao 1 é pressionado e igual a nivel 1
        {
            oldstate = 1;
        }
        if (oldstate && Button(&PORTA, 1, 5, 0)) // rotina do botão 2 parte
        {
            oldstate = 0 ;
            cnt1++; // contador 1
            a = (float)cnt1; // converte em float
        }
        if (Button(&PORTA, 2, 5, 1)) //se botao 2 é pressionado e igual a nivel 1
        {
            oldstate1 = 1; // se coincidir com 1, não faz nada (estado normal)
        }
        if (oldstate1 && Button(&PORTA, 2, 5, 0)) // se botão for pressionado cai para 0
        {
            oldstate1 = 0; // se coincidir com 0, procede rotina abaixo
            cnt2++; // contador 2
            b=(float)cnt2; // converte em float
        }
        if(cn > 11719)
        {
            Lcd_Out(1, 1, "Pr Bt3> erro %"); // Escrita no Lcd quando termina a prova
        }
    } // fecha primeiro while

Delay_ms(100);
erro = (float)((a - b)/b)*100.00; // atraso para realizar operação
//Trecho fuzzy Sugeno
if (erro >= -4.00 && erro < -1.5)
    {
        NG = 1.00 - ((erro + 4.00)*0.40);
        NP = 1.00 - NG;
    }

```

```

Z5 = (-0.02*erro) + 0.9;
Media = (Z5 * NG) + (NP * 0.80);
Angulo = 3.75 * (Compensacao - (Media * 800));
}

if (erro >= -1.50 && erro < 1.00)
{
NP = 1.00 - ((erro + 1.50)*0.40);
EZ = 1.00 - NP;
Media = (NP * 0.80) + (EZ * 0.60);
Angulo = 3.75 * (Compensacao - (Media * 800));
}

if (erro >= 1.00 && erro < 3.50)
{
EZ = 1.00 - ((erro - 1.00)*0.40);
PP = 1.00 - EZ;
Media = (EZ * 0.60) + (PP * 0.41);
Angulo = 3.75 * (Compensacao - (Media * 800));
}

if (erro > 3.50 && erro <= 6.00)
{
PP = 1.00 - ((erro - 3.50)*0.40);
PG = 1.00 - PP;
Media = (PP * 0.41) ;
Angulo = 3.75 * (Compensacao - (Media * 800.00));
}

do
{
if (Button(&PORTA, 3, 5, 1)) //se botao 3 é pressionado e igual a nivel 1
{
oldstate2 = 1;          // se coincidir com 1, não faz nada (estado normal)
}
if (oldstate2 && Button(&PORTA, 3, 5, 0)) // sebotão for pressionado cai para 0
{
oldstate2 = 0;          // se coincidir com 0, procede rotina abaixo
Delay_ms(100);
FloatToStr(erro,txt1);
Delay_ms(1000);
//UART1_Write_Text("DATA, TIME,  "); // funcao para impressao na serial
(desativada)
//UART1_Write_Text(txt1);          // funcao para impressao na serial
(desativada)
Lcd_Out(1, 1, txt1);
Lcd_Out(2, 1, "Pr Bt4 calibrar");
}

if(Angulo > 0.000000)
{
if (Button(&PORTA, 4, 5, 1))

```

```

    {
    oldstate3 = 1;
    }
    if (oldstate3 && Button(&PORTA, 4 ,5 ,0))
    {
    oldstate3 = 0;
    PulseNum = (unsigned int)(Angulo*0.133333);
    for(i=0;i<PulseNum;i++)FullStepMotorCCW(); //motor de passo anti
horario
    }
    }

    if (Angulo < 0.000000)
    {
    if (Button(&PORTA, 4 ,5 ,1))
    {
    oldstate3 = 1;
    }
    if (oldstate3 && Button(&PORTA, 4 ,5 ,0))
    {
    oldstate3 = 0;
    PulseNum = (unsigned int)(Angulo* 0.133333);
    for(i=0;i<PulseNum;i++) FullStepMotorCW(); //motor de passo
horario
    }
    }
    }
while(1);
}

```