



*Universidade Federal da Paraíba*  
*Centro de Tecnologia*  
*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*  
*-Mestrado-*

**APLICAÇÕES DE TÉCNICAS DE CONTROLE FUZZY PARA  
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

por

Wil Lavor Lucena Camboim

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da  
Paraíba para obtenção do grau de Mestre.*

**WIL LAVOR LUCENA CAMBOIM**

**APLICAÇÕES DE TÉCNICAS DE CONTROLE FUZZY PARA  
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal da Paraíba,  
em cumprimento às exigências  
para obtenção do Grau de Mestre.

**Orientador : Professor Dr. Heber Pimentel Gomes**

João Pessoa – Paraíba

Setembro/2008

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a meus pais, grandes incentivadores, que depositam em mim toda credibilidade, confiando e me apoiando em todas minhas ações; a Michele, minha namorada, amiga e companheira de lutas e vitórias; a meus irmãos também pela credibilidade depositada e a meus tios Alba e José Geraldo, que comemoram minhas conquistas como sendo suas.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por me guiar e cuidar de tudo em minha vida.

Ao meu pai por se orgulhar de quem não faz mais que sua obrigação e oferecer condições de alcançar meus objetivos. À minha mãe pelo incentivo, apoio, confiança dedicada e por ser simplesmente quem ela é. Forte e pilar central da nossa família, presente em todas as situações de todos os filhos.

Ao Prof. Heber Pimentel Gomes por assumir a orientação do trabalho, colocando-o como fruto do LENHS, projeto que assumiu com competência e empreendedorismo e que me incluiu em seu corpo técnico. Agradeço também as cobranças e incentivos, tão necessárias ao bom andamento do trabalho.

Ao Prof. Simplicio Arnaud da Silva pela ajuda na elaboração do projeto do trabalho, a dois anos atrás, sendo atencioso e disponível em nosso primeiro contato.

Aos amigos e companheiros de academia: Magno José, sempre atento e solícito às minhas necessidades; Wesley Souto e Edil de Jesus pelas várias horas que passamos juntos estudando; Moisés pelas ajudas computacionais; Paulo Sergio e Roberta Macêdo companheiros de atividades no laboratório.

A Saulo de Tarso, amigo, verdadeiro irmão e orientador, sempre vigilante à minhas ações, repreendendo e incentivando nos momentos necessários, companheiro de algumas das mais importantes discussões sobre o trabalho e profundo colaborador nos métodos aplicados. Meus sinceros agradecimentos.

Aos demais colegas da universidade: Wibys Pereira, João Silvino, Cícero, Abel Lima, Elida Fernanda.

A Michele pela ajuda nas correções ortográficas que passaram inócuas nos momentos de maior cansaço, pela paciência e apoio empreendido, pela compreensão nos momentos de ausência.

À Iuri pelos desenhos no computador.

À Vinicius de Andrade, por durante esse período, levar o nosso projeto praticamente sozinho, com competência, disponibilidade e paciência.

À Alexandre Camboim, meu tio, sempre pronto a me ajudar nos textos em inglês.

À Tio Chico, professor universitário, pelo incentivo.

# **APLICAÇÕES DE TÉCNICAS DE CONTROLE FUZZY PARA SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

## **RESUMO**

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de um sistema Fuzzy, para o controle da pressão de uma rede de distribuição de água. Este sistema de controle mantém a pressão na rede de abastecimento de água constante, de forma automática, por meio da variação de velocidade de rotação do conjunto motor-bomba. O controle de velocidade do motor de acionamento da bomba (motor elétrico de indução trifásico) é feito através de um conversor de frequência variável, comandado por um sinal elétrico de tensão variável. Este sinal elétrico é fornecido por um computador, por meio de uma placa de aquisição de dados, e muda em função das condições e características do sistema. Estas peculiaridades são admitidas através de sensores e transdutores que apresentam ao controle fuzzy dados referente à pressão, vazão e velocidade de rotação do motor. A modelagem foi feita no Fuzzy Logic Controller Desing (Toolkit do LabVIEW™) do programa computacional LABVIEW™. O trabalho busca efficientizar o sistema, racionalizando o consumo de água e energia e reduzindo, conseqüentemente os custos operacionais. O trabalho foi aplicado a uma bancada experimental de distribuição de água do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, LENHS, da UFPB. Com a aplicação da modelagem desenvolvida, obteve-se uma redução 27,4% no consumo de energia sem comprometer as características hidráulicas do sistema de abastecimento.

Palavras chaves: Controle fuzzy, Conversor de frequência, Eficiência Energética.

# **APPLICATIONS OF FUZZY TECHNIQUE CONTROL SYSTEMS FOR WATER SUPPLY**

## **ABSTRACT**

At this study we introduce the development of a FUZZY system with the purpose of controlling the pressure in the water supply. This system, automatically, keeps the pressure in the water supply constantly through the velocity variation of the water pump rotation. The pump speed control is done through a estimating frequency converter, controlled by an electric signal of a varied voltage. This signal is provided by a computer through an acquisition data board which changes according to the characteristics of the system. Those particularities information are revealed by a sensor that gives the FUZZY control data referring to pressure, quantity of water and rotation of the pump. Everything was designed by the FUZZY logic controller design (Toolkit of the LabVIEW™) from the computer program LabVIEW™. The work tries to improve the system, controlling the consumption of water and energy reducing costs. The work was applied to an experimental bench of a water supply from the electricity and hydraulic laboratory of efficiency, LENHS, from UFPB. With the application of the developed model designed, we got a reduction of 27.4% on electricity consumption without compromising the hydraulic system characteristics.

Keywords: Fuzzy control, frequency converter, energy efficiency.

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA .....	3
AGRADECIMENTOS .....	4
LISTA DE FIGURAS .....	11
LISTA DE TABELAS .....	13
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....	14
1.INTRODUÇÃO .....	16
1.1 OBJETIVO .....	19
1.2 CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS .....	19
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
2.1 INTRODUÇÃO .....	21
2.2 SISTEMAS DE CONTROLE EM ABASTECIMENTO DE ÁGUA .....	22
2.3 CONVERSORES DE FREQUÊNCIA EM BOMBEAMENTO .....	24
2.4 SISTEMAS DE CONTROLE UTILIZANDO LÓGICA FUZZY .....	28
2.5 TRABALHOS DE OUTRAS ÁREAS .....	29
3.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	30
3.1 INTRODUÇÃO .....	30
3.2 CONTROLE FUZZY .....	30
3.2.1 Porque utilizar lógica fuzzy: .....	31
3.2.2 Histórico .....	32
3.2.3 Parâmetros de um sistema fuzzy .....	34
3.2.3.1 Variáveis Linguísticas e Grau de Pertinência (base de dados) .....	36
3.2.3.2 Processo de Fuzzificação .....	37
3.2.3.3 Base de Regras e Processo de Inferência .....	41

3.2.3.4. Processo de Defuzzificação:.....	43
3.2.4 Controle Fuzzy .....	44
3.3 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO .....	45
3.4 INVERSOR DE FREQUÊNCIA .....	49
3.4.1 Conversores de freqüência em bombeamento.....	53
3.4.2 Vantagens e desvantagens do conversor: .....	56
3.5 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES.....	56
4.MATERIAIS E MÉTODOS.....	58
4.1 INTRODUÇÃO.....	58
4.2 EQUIPAMENTOS .....	59
4.3. FERRAMENTA COMPUTACIONAL .....	65
4.4 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO .....	68
4.5 COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES.....	70
5.MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE.....	72
5.1 INTRODUÇÃO.....	72
5.2. MODELAGEM .....	73
5.3 VARIÁVEIS DE ENTRADA (ROTAÇÃO DO MOTOR E PRESSÃO NO SISTEMA). 74	
5.4 VARIÁVEL DE SAÍDA (DELTA DE ROTAÇÃO).....	74
5.5 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DO SISTEMA DE CONTROLE.....	75
5.5.1 Função de Pertinência Variável Rotação do Motor (RM).....	76
5.5.2 Função de Pertinência Variável Pressão no Sistema (PS).....	78
5.5.3 Função de Pertinência Variável Delta de Rotação (DR) .....	80
5.6 BASE DE REGRAS E PROCESSO DE INFERÊNCIA .....	82
5.7 CARACTERÍSTICAS DO CONTROLADOR (RESUMO) .....	86
6.RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	87
6.1 INTRODUÇÃO.....	87
6.2 EXPERIMENTOS.....	87
6.2.1 Experimento 01 e 02:.....	88
6.2.2 Experimento 03: .....	95

7.CONCLUSÕES .....	98
7.2 PERSPECTIVAS FUTURAS .....	99
REFERÊNCIAS .....	101

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 – HMI supervisor Novo Hamburgo .....	24
Figura 2. 2 – Esquema operacional do Setor Santana da Cidade de São Paulo – Situação Inicial (BRAGHIROLI <i>et.al.</i> , 2005).....	26
Figura 2. 3 – Esquema operacioanl do Setor Santana da cidade de São Paulo – Situação Final (BRAGHIROLI <i>et.al.</i> , 2005).....	27
Figura 3. 1 - Diagrama de blocos lógica fuzzy.....	35
Figura 3. 2 – Relação de função x grau de pertinência.....	37
Figura 3. 3 – Forma de função triangular. ....	38
Figura 3. 4 - Forma de função trapezoidal. ....	39
Figura 3. 5 - Forma de função trapezoidal com três parâmetros. ....	39
Figura 3. 6 - Forma de função gaussiano. ....	40
Figura 3. 7- Função de pertinência fuzzy Singleton.....	41
Figura 3. 8 - Estator de uma máquina de indução. ....	46
Figura 3. 9 - Características eletromecânicas de um motor de indução típico. ....	46
Figura 3. 10 - Região de funcionamento de um motor de indução típico. ....	47
Figura 3. 11 - Curvas de Conjugado versus Velocidade de Rotação, de um motor de indução trifásico, para vários valores de frequência. ....	47
Figura 3. 12 - Curvas características de operação de um motor de indução. ....	48
Figura 3. 13 - Motor de indução trifásico.....	48
Figura 3. 14 - Diagrama de blocos de conversor tipo PWM.....	50
Figura 3. 15 - Curva representativa da variação $U/f$ .....	50
Figura 3. 16 - Curva característica conjugado x velocidade.....	51

Figura 3. 17 - Curva característica da potência de saída do conversor. ....	51
Figura 3. 18 - Exemplo de curva de conjugado com tensão proporcional e frequência.....	52
Figura 3. 19 - Curva de conjugado x frequência pra uso de motor com converdor de frequência. ....	53
Figura 3. 20 - Relações características das bombas centrífugas (TSUTIYA, 2004).....	55
Figura 4. 1 - Bancada experimental.....	59
Figura 4. 2 - Bancada compacta instrumentalizada.....	60
Figura 4. 3 - Conjunto motor bomba. ....	60
Figura 4. 4 - Curvas características da bomba centrífuga.....	61
Figura 4. 5 - Válvula redutora, medidores de pressão e medidor de vazão.....	63
Figura 4. 6 - Módulo de aquisição de dados da National Instruments – USB 6229. ....	63
Figura 4. 7 - Analisador de energia Instruterm AE-200.....	64
Figura 4. 8 - Interface gráfica do controlador.....	66
Figura 4. 9 – Diagrama de blocos do programa de controle de simulação.....	67
Figura 4. 10 - Curva de consumo médio diário (Fonte: Gomes, 2005).....	68
Figura 4. 11 - Curva de Consumo Diário (Simulador de Demanda).....	69
Figura 5. 1- Sistema de controle de pressão: 2 entradas, 1 saída, 25 regras.....	75
Figura 5. 2 - Funções de pertinência variável lingüística “Rotação do Motor”. ....	77
Figura 5. 3 - Funções de pertinência variável lingüística “Pressão do Sistema”.....	79
Figura 5. 4 - Funções de pertinência variável lingüística “Delta de Rotação”.....	81
Figura 5. 5 - Superfície de Controle (base de regras).....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5. 1 - Características da variável “Rotação do Motor”.....	78
Tabela 5. 2 - Características da variável “Pressão do Sistema”.....	80
Tabela 5. 3 - Características da variável Delta de Rotação.....	82
Tabela 5. 4 - Base de Regras para o controlador Fuzzy.....	82
Tabela 5. 5 - Base de Regras para o controlador Fuzzy (otimizada).....	83
Tabela 5. 6 - Matriz associativa do controlador.....	85
Tabela 5. 7 - Características do Controlador.....	86
Tabela 6. 1 - Comparativo de consumo energético dos motores.....	91
Tabela 6. 2 - Comparativo do consumo de água do sistema.....	94
Tabela 6. 3 - Indicadores de consumo.....	95
Tabela 6. 4 - Parâmetros do sistema (1o distúrbio).....	96
Tabela 6. 5 - Parâmetros do sistema (2o distúrbio).....	96

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AL = Pressão alta

AP = Delta de rotação alto positivo

BA = Pressão baixa

BN = Delta de rotação baixo negativo

BP = Delta de rotação baixo positivo

CA = Corrente alternada

CCO = Centro de controle operacional

C-o-A = Centros de Área

C-o-M = Centro de Máximo

DR = Delta de rotação

DSP = Processador de sinal digital

EEEUFG = Escola de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Goiás

$f$  = Frequência da rede elétrica em Hertz

FP = Função de Pertinência

H = Altura manométrica total da bomba

HMI = Interface homem máquina

MA = Pressão muito alta

MAX = Rotação nominal

MB = Pressão muito baixa

ME = Pressão média

MIM = Rotação muito baixa

M-o-M = Média do Máximo

N = Rotação em RPM

AN = Delta de rotação alto negativo

P = Potência consumida da bomba relativa a rotação da bomba;

PAS = Placa acondicionadora de sinais.

PID = proporcional integral derivativo

Po = Número de pólos

PS = Pressão no sistema

Q = Vazão da bomba

RM = Rotação do motor

ROT2 = Rotação baixa

ROT3 = Rotação média

ROT4 = Rotação alta

SAA = Sistema de Abastecimento de água

SAEE = Sistema autônomo de água e esgoto de Guarulhos

VRP = Válvula redutora de pressão

ZE = Delta de rotação zero

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUÇÃO**

Um dos recursos naturais mais importantes para o bem estar da humanidade é a água. Durante muito tempo foi um bem usado pelo homem de forma inteiramente livre e despreocupada.

Com o progresso, surgiram os agrupamentos humanos, cujas várias atividades exigiam uma maior quantidade de água. O desenvolvimento levou, também, conforto aos usuários, fornecendo esse recurso natural de maneira cada vez mais cômoda em seus pontos de utilização, demandando instalações ainda mais complexas. Ainda como agravante, a maioria das empresas passaria a utilizar a água como matéria prima para confecção de seus produtos.

Esse cenário de necessidades gerou uma expansão desenfreada dos sistemas de abastecimentos de água. Hoje esses sistemas se mostram velhos e obsoletos, com problemas que vem se agravando ao longo dos anos devido ao envelhecimento das instalações, extensões desordenadas dos sistemas de abastecimento, ausência de sistemas adequados de medições e problemas de gestão operacional.

De acordo com dados do Sistema Nacional de Informação em Saneamento (SNIS, 2006) as perdas de Água (SAA) do Brasil, são da ordem de 40%, chegando a alcançar 70% em algumas cidades brasileiras. As perdas de água proporcionam inúmeros prejuízos ao sistema de abastecimento, dentre elas pode-se citar o desperdício de produtos químicos, de mão-de-obra, de energia elétrica, além de afetar a disponibilidade hídrica dos mananciais. Sendo assim a redução das perdas permite diminuir os custos de operação e manutenção do sistema, e otimizar a utilização das instalações, proporcionando aumento da oferta de água tratada.

Parte destes problemas podem ser reduzidos com o controle da pressão na rede. Segundo TSUTIYA (2004) o controle de pressão em sistemas de abastecimento de água é um dos aspectos importantes para definir e controlar as perdas, pois a relação pressão x vazamento é comprovadamente um componente potencial para as perdas.

No que diz respeito à metodologia a ser utilizada na diminuição das pressões nos sistemas de abastecimento de água, vários investigadores sugerem que a melhor solução faz uso de elementos provocadores de perdas de carga, tais como válvulas redutoras de pressão e válvulas de controle de perda de carga. Porém, fica claro que esses métodos em nada colaboram com uma racionalização e eficientização energética, pois como o próprio nome já sugere, provoca-se uma perda de carga nas instalações, penalizando energeticamente o sistema comprometendo seu rendimento.

Pesquisas têm conduzido principalmente à implantação de sistemas de bombeamento em velocidade variável, e, atualmente é fato o sucesso de inúmeras aplicações encontradas com soluções eficazes para esse problema.

RODRIGUES (2003) afirma que conversores de frequência incrementados aos sistemas de bombeamento com a função de manter a operação em níveis necessários ao pleno atendimento das demandas, podem evitar desperdícios ao proporcionar um melhor controle operacional.

Nesse sentido o uso de conversores de frequência é uma alternativa eficiente para manter o sistema de distribuição de água dentro dos níveis de pressão e vazão compatíveis com os parâmetros exigidos.

O uso de conversores elimina os bombeamentos com pressões excessivas, que provocam rompimento nas tubulações e aumento dos vazamentos, bem como pode dar a capacidade de substituição dos reservatórios elevados, responsáveis por uma parcela bastante relevante de custos não só de implantação, mas principalmente da manutenção.

Dessa forma, quando o assunto é avanço operacional dos sistemas de abastecimento, os conversores de frequência vêm se tornando quase que uma unanimidade, porém a sua utilização implica em uma série de comandos e decisões, que a princípio, estão sendo tomadas pelas concessionárias de forma empírica, visando apenas a garantia da continuidade do abastecimento.

Pode-se deduzir então, que para melhor viabilizar o seu correto funcionamento e dentro da realidade mundial de informatização dos processos é imprescindível a aplicação de técnicas computacionais na sua operação. Possibilitado pelo avanço da engenharia eletrônica, que desenvolveu computadores e teorias sofisticadas para serem utilizadas nesse fim, a engenharia esta cada vez mais assessorada pela informática, que serve de suporte não apenas para o gerenciamento, mas também para tomadas de decisões e comandos.

Nesse sentido sugere-se a automação e o desenvolvimento de novas tecnologias. Segundo TSUTIYA (2004), automação em saneamento básico consiste na aplicação da tecnologia dos processos de saneamento e da tecnologia da informação. A primeira contempla os avanços nas técnicas de distribuição de água, enquanto a segunda possibilita realizar a supervisão e os controles necessários destes processos de maneira a mantê-los operando com a melhor relação custo benefício.

Automação consiste em um conjunto de premissas e regras pré-definidas responsável pela tomada de decisões, tratando as informações com o objetivo de realizar a ação de controle propriamente dita. Sua função é retirar do sistema uma otimização máxima, visando à maximização de redução dos custos operacionais já referidos, acoplado a um desempenho aceitável das instalações.

Esses fatores associados à disponibilidade de equipamentos cada vez mais eficientes e sofisticados (válvulas, medidores, transdutores, etc.) geram subsídios para melhoria da gestão, operação e manutenção dos sistemas de abastecimento enquadrando-os na grande necessidade mundial de sustentabilidade e eficiência energética. Visto que atualmente a melhoria dos processos busca não só uma diminuição nos custos e aumento dos rendimentos das empresas, a população já espera e exige uma postura ambientalmente correta e preocupada na preservação dos recursos naturais do planeta.

É de certo que esses equipamentos e tecnologias aumentam os custos do sistema e possuem um valor de implantação alto, porém uma comparação técnica-econômica entre a sua utilização ou não, normalmente, leva a optar pelo uso dessas técnicas, pois diminui os custos de pessoal, reduz o consumo de energia elétrica, melhora a eficiência dos processos, aumenta a confiabilidade na operação dos sistemas, etc.

Diante do exposto anteriormente, percebe-se uma ampla possibilidade na melhoria do funcionamento dos sistemas de abastecimento, desde a instalação de uma simples válvula até a

implantação de complexos sistemas de automação. A pesquisa realizada busca reunir todos esses conceitos e técnicas, e aplicá-las na tentativa de tornar o sistema mais eficiente.

## **1.1 OBJETIVO**

O objetivo geral da pesquisa é o desenvolvimento de um sistema de controle automatizado, com o emprego de técnicas Fuzzy, para operação de sistemas de distribuição de água, proporcionando à redução de perdas de água e energia. A ferramenta computacional desenvolvida automatizará a tomada de decisão na operação dos sistemas de distribuição, acarretando ações referentes ao estado dos motores (velocidade de rotação), aumentando ou diminuindo sua velocidade de rotação por meio da utilização de um conversor de frequência.

Todo o procedimento ocorrerá, em tempo real, buscando sempre a diminuição do excesso de pressão no sistema e proporcionando, conseqüentemente, redução no consumo de energia elétrica e água (principal foco do estudo). Com isso, as decisões das manobras dos equipamentos passam a ser orientadas a partir de uma lógica computacional, sendo escolhida, a cada instante, aquela que apresentar melhores condições para manutenção da pressão constante, respeitando as restrições inerentes aos sistemas pressurizados de distribuição de água, a capacidade mecânica dos motores e a disponibilidade energética da rede de abastecimento.

## **1.2 CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS**

No capítulo II, apresenta-se a revisão bibliográfica com um estudo do que se produziu em relação ao tema comentando. Mostra-se trabalhos que vem sendo desenvolvidos na área utilizando algumas das tecnologias empregada na pesquisa em questão bem como alguns estudos em outros campos de atuação .

No capítulo III, é realizado a fundamentação teórica, onde se discute alguns princípios necessários ao entendimento dos processos desenvolvidos nos experimentos. Discute-se a lógica Fuzzy, explicando seus procedimentos e características, descrevendo cada

item que compõe a sua configuração, e uma justificativa da sua utilização nesta pesquisa. Uma abordagem sobre conversor de frequência mostrando algumas aplicabilidades e um histórico sobre automação em abastecimento de água.

No capítulo IV, é descrito a realização experimental, bem como todos os equipamentos e técnicas que foram utilizados. Nessa seção é explicada a bancada experimental, o esquema de alimentação e sinais dos instrumentos.

No capítulo V, é realizado a modelagem do sistema de controle fuzzy para o experimento em análise. São definidos todos os parâmetros e especificações para o desenvolvimento do controlador Fuzzy.

No capítulo VI, são apresentados os resultados dos experimentos e feito uma discussão sobre eles. São mostrados os gráficos e tabelas com um comparativo dos sistemas com e sem controlador.

No capítulo VII, são feitas os comentários finais e as conclusões do estudo. Ainda é proposto uma série de idéias de continuidade de trabalho a fim de promover mais pesquisas nesta área.

## **CAPÍTULO II**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 INTRODUÇÃO**

Segundo GURGEL (2006) o bombeamento de água pode constituir um método econômico de se levar água a todos os pontos de uma cidade onde a topografia não permite escoamento por gravidade. Em muitos casos é mais econômico substituir o reservatório elevado por estações de bombeamento. O problema está em planejar adequadamente esse sistema de abastecimento, e poder tomar decisões criteriosas sobre quando, onde e como fazer esse bombeamento.

Além dessas disposições existem diversas tecnologias novas, tais como automação (aplicação de um sistema de controle), utilização de conversores de frequência, instrumentalização do sistema e criação de supervisórios de comando, que se bem utilizadas podem trazer grandes benefícios técnicos, econômicos e ambientais. Porém, a utilização de tais técnicas implicam também na adoção de uma série de decisões por parte das concessionárias que normalmente são implementadas de forma empírica, e visam, principalmente, a garantia da continuidade do abastecimento público, sem a preocupação de explorar o consumo energético e hidráulico.

Segundo PEDROSA (2007) as empresas do setor de saneamento estão despertando o interesse em melhorar a gestão da área operacional, implementando ações que visem o desenvolvimento de ferramentas de engenharia, que busquem oportunidade de conservação de energia, a partir da implementação de modelos hidráulicos de simulação ao longo do tempo.

Pode-se deduzir, então, que é imprescindível a aplicação de modernas tecnologias operacionais aos sistemas de abastecimento, como forma de melhor viabilizar o seu correto funcionamento.

## **2.2 SISTEMAS DE CONTROLE EM ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Os sistemas de controle são parte integrante da sociedade moderna. Numerosas aplicações estão ao nosso redor: foguetes são disparados, peças metálicas são usinadas automaticamente, elevadores transportam pessoas diariamente, veículos pilotados remotamente. Estes são alguns exemplos de sistemas controlados que podemos citar. Porém a automação em saneamento ainda é pontual, podendo citar poucos casos: ABREU *et.al.*(2003) relatam que profissionais de SAAE desenvolveram e implantaram em conjunto com a estrutura mecânica e elétrica de alguns sistemas de bombeamento, um pressostato de mínima e máxima e um temporizador. Basicamente, a idéia era desenvolver meios que possibilitassem o funcionamento dos conjuntos de bombeamento sem intervenção de operadores, utilizando-se para isso, indicadores de pressão de sucção e recalque (pressostato). Estes inseridos na lógica de funcionamento do comando elétrico indicam a situação do sistema hidráulico, cujos parâmetros previamente definidos pela lógica de controle, orientam a operação do sistema em questão. ABREU *et.al.*(2003) enfocam ainda que a implementação de recursos da tecnologia de automação representaram uma redução nos custos operacionais e nas despesas com mão de obra do sistema de bombeamento de água e esgoto da cidade de Guarulhos.

Ao mesmo tempo em que a automação se apresenta como uma ferramenta de melhoria operacional dentro do planejamento estratégico das empresas, algumas preocupações se fazem presentes quando descemos até o nível de aplicação operacional dessa tecnologia. Uma destas preocupações diz respeito ao impacto que automação ocasiona nas estruturas, processo e espaços organizacionais (PINHEIRO, 2003).

As pesquisas envolvendo impactos da automação e da inovação tecnológica nas organizações mostram que os projetos de automação e de inovação tecnológica enfrentam barreiras naturais nas organizações (CARDOSO et al, 2004). Estas barreiras, se não forem devidamente identificadas e superadas, fazem com que os resultados obtidos fiquem abaixo

dos resultados esperados, e em muitos casos não atingem sequer objetivos de redução dos custos operacionais. As principais causas deste aparente fracasso para atingir os objetivos esperados pela automação residem exatamente no desequilíbrio que ocorre nas estruturas, processos e espaços organizacionais durante as fases de projeto, implantação e avaliação dos projetos de automação (MARQUES, 2004).

Segundo TROJAN (2005) um dos entraves enfrentado para a adoção da automação nesse segmento é o aspecto geográfico, que influencia os meios de comunicação. Geralmente as unidades de monitoração e controle remotos estão instaladas em locais que não possuem infra-estrutura de telecomunicação ou energia elétrica, implicando até no aproveitamento de estruturas alternativas. Os principais atrativos para se justificar o investimento em automação residem na melhoria da qualidade do tratamento de água através do monitoramento e controle em tempo real, redução de custos operacionais através do gerenciamento de energia elétrica consumida e controle de perdas físicas no sistema.

MARODIN et.al. (2005) avaliaram, através de um estudo de caso, quais as implicações da automação e seus impactos nos processos, estruturas e espaços organizacionais relacionando estes impactos sob a ótica da Gestão do Conhecimento. Os resultados obtidos atestam a importância de uma abordagem sistêmica na implantação de projetos de automação dentro de SAA, que não considere apenas aspectos de custos e melhoria no controle operacional, mas considere os impactos desta tecnologia nas competências requeridas e no binômio “estruturas / processos requerido” para sua plena utilização.

KUTSHER (2008) descreve a implantação de controle operacional do sistema de abastecimento de água via supervisório do município de Novo Hamburgo, onde inicialmente foi criado um sistema de supervisão juntamente com a criação do CCO (centro de controle operacional), para o controle do nível de reservatórios, a operação remota de três boosters, de um motor bomba e a operação remota de uma VRP. Em uma segunda fase foi realizada a automação e integração ao sistema da supervisão de oito elevatórias. Na terceira fase foi utilizada o acúmulo de experiência dos operadores do SAA e da análise dos diversos indicadores do sistema para desenvolver ferramentas adicionais ao sistema de supervisão de modo a otimizar o desempenho energético do SAA. A Figura 2.1 mostra a interface homem máquina (HMI) do supervisório utilizado.

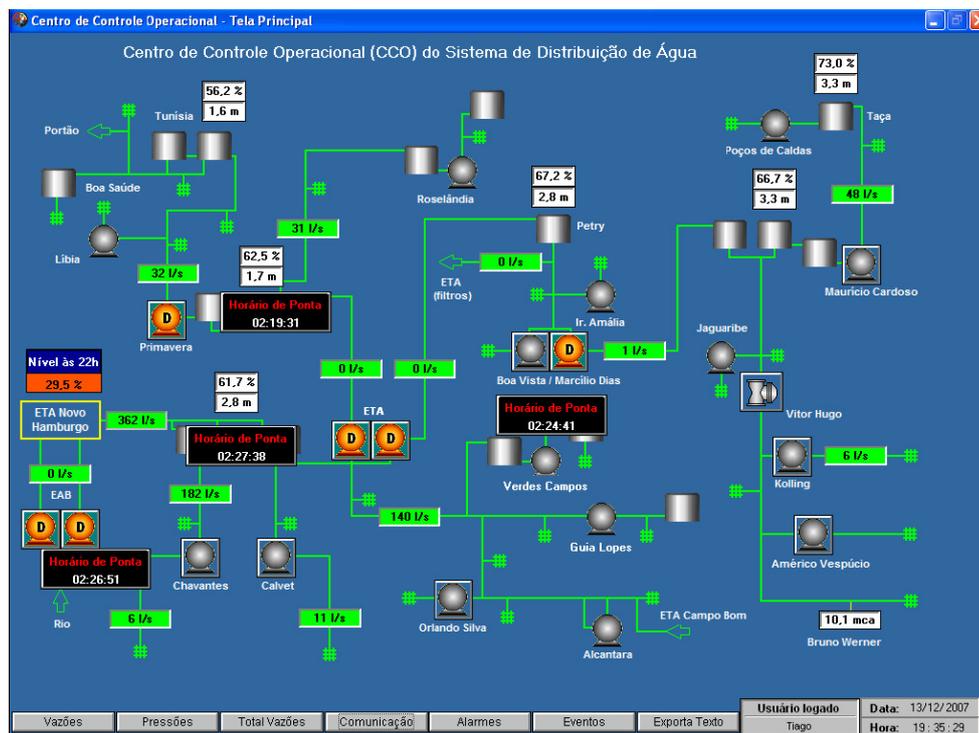


Figura 2. 1 – HMI supervisor Novo Hamburgo

## 2.3 CONVERSORES DE FREQUÊNCIA EM BOMBEAMENTO

A utilização de conversores de frequência em bombeamentos é uma técnica consagrada da qual já se alcançou excelentes resultados em diversas áreas de atuação.

ALVES *et. al.* (2001) realizaram um experimento com um conjunto motor-bomba ligado com um conversor de frequência, montado na micro usina da Escola de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Goiás (EEEUFG). O sistema foi dotado de transdutores de pressão e vazão e, no eixo do conjunto motor-bomba, um transdutor de rotação. Os transdutores foram interligados a uma placa acondicionadora de sinais (PAS) e esta a um computador. Foi variada a velocidade de rotação do motor e para cada rotação, variou a vazão recalçada pela abertura de uma válvula de gaveta. Os valores de Q e H, para cada velocidade de rotação e posição da válvula de gaveta, foram armazenados na PAS, o que permitiu o traçado das curvas características.

O resultado da aplicação do conversor foi à redução significativa da potencia média consumida, com foi 40,7 e 75,0%, com a adoção da redução da velocidade de rotação de 1800 para 1500 e 1100 rotações  $\text{min}^{-1}$ , respectivamente.

ARAUJO (2003) avaliou o comportamento elétrico e hidráulico de um conjunto motor-bomba em um sistema de bombeamento pra irrigação por aspersão em condições de acionamento convencional com velocidade de rotação constante e variável, através do uso de conversor de freqüência. Para a realização do experimento em uma primeira fase, instalou-se um sistema de bombeamento convencional por aspersão operando com velocidade de rotação constante. Em uma segunda fase instalou-se um sistema de acionamento com velocidade de rotação variável, composto de um transdutor de pressão e um conversor de freqüência o qual atuou adequando a pressão pré estabelecida em relação a variação de vazão. O confronto técnico entre os dois sistemas demonstrou a viabilidade econômica da instalação de conversores de freqüência no acionamento de motores elétricos trifásicos nos sistemas de irrigação por aspersão.

Com a implantação do sistema em campo, pode-se avaliar e quantificar a economia de energia elétrica, entre os dois sistemas avaliados, demonstrando a viabilidade técnica e econômica, do conversor de freqüência em função do números de horas anuais de funcionamento.

BRAGHIROLI *et.al.* (2005) apresentou os resultados de redução de consumo de energia elétrica associados à redução de perdas de água no setor Santana, na cidade de São Paulo. Além da utilização do conversor de freqüência aliou-se alterações técnicas de traçados de redes e alimentação para efficientizar o sistema.

Este setor possuía uma vazão média de consumo de água da ordem de 700 L/s para abastecer 136.500 pessoas através de 44.000 ligações de água e 320 km de redes de distribuição com uma estação elevatória contendo inicialmente dois conjunto motor-bomba de 200 cv e três conjuntos motor-bomba de 100 cv, operando com quatro efetivos e um de reserva.

O setor de Santana é composto de duas zonas de abastecimento denominadas zona alta e zona baixa. A zona baixa era abastecida de forma direta a partir do reservatório R1 de 16.000  $\text{m}^3$  e a zona alta a partir da estação elevatória de Santana por bombeamento direto na rede com um reservatório elevado denominado de torre de 500  $\text{m}^3$  operando como reservatório

de sobras. A Figura 2.2 apresenta um esquema da situação inicial do sistema de abastecimento de água do setor de Santana.

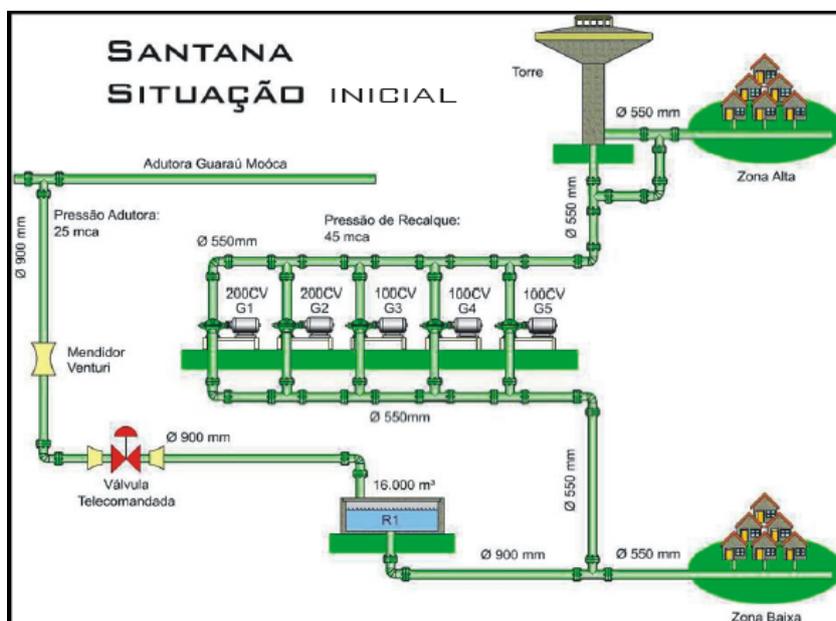


Figura 2. 2 – Esquema operacional do Setor Santana da Cidade de São Paulo – Situação Inicial (BRAGHIROLI *et.al.*, 2005)

Depois da análise técnica e juntamente com a aplicação do conversor de frequência no sistema, as derivações que abastecem as zonas alta e baixa foram separadas e trocados os conjuntos motor-bomba existentes por quatro novos conjuntos motor-bomba de 100 cv. Em uma das novas bombas foi instalado o conversor de frequência. O sistema do setor Santana passou a operar com a elevatória Santana recebendo água diretamente da adutora Guaraú-Moóca e abastecendo por bombeamento direto a rede da zona alta do setor. O reservatório elevado continuou a operar como reservatórios de sobra alterando a denominação por R1.

A zona baixa do setor Santana passou a ser abastecida de forma direta com uma válvula borboleta controlando a pressão e o reservatório R1 denominado R2, passou a operar como reservatório de sobras. A Figura 2.3 mostra a situação final do sistema.

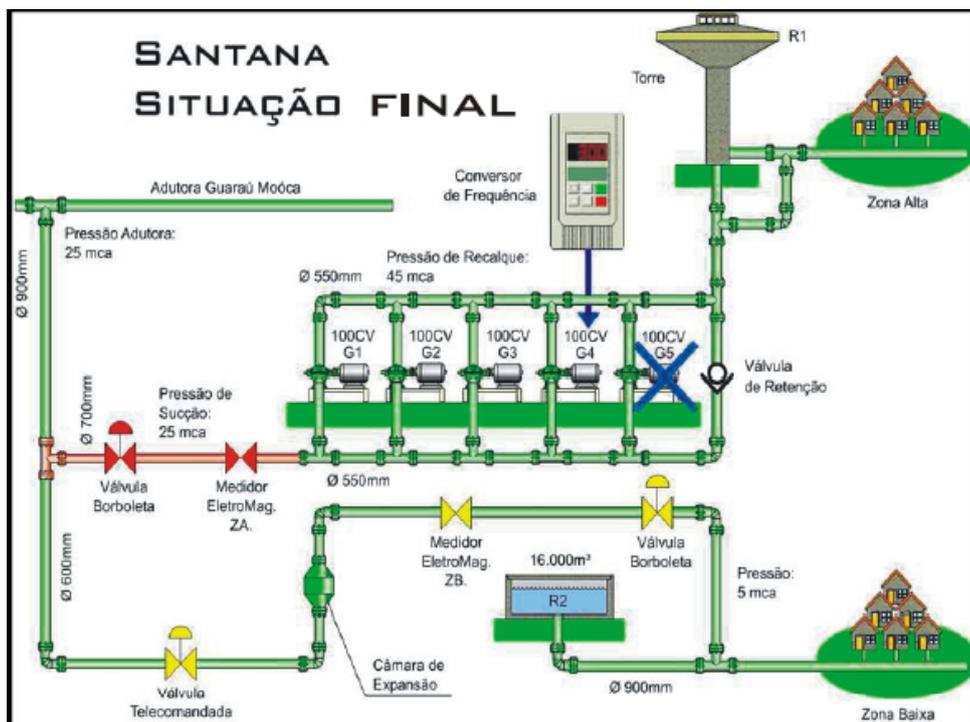


Figura 2. 3 – Esquema operacional do Setor Santana da cidade de São Paulo – Situação Final (BRAGHIROLI *et.al.*, 2005)

Com a aplicação dessa nova configuração BRAGHIROLI *et.al.* (2005) obteve benefícios não só com a redução das despesas com energia elétrica. A redução de perdas reais de água também foi significativa, devido a operação do conversor de frequência, rebaixando o plano piezométrico noturno em 18 mca na rede de distribuição da zona alta e a intensificação do programa de vazamento no setor.

GURGEL(2006) avaliou a utilização de conversores de frequência em estações elevatória de água tratada da cidade de São Jose dos Campos, estudando características técnicas de sistemas que operam com conversor de frequência. Além disso, foi desenvolvido uma tecnologia composta de um fluxograma e da análise gráfica dos dados do sistema estudado a fim de avaliar a escolha de conversores de frequência em abastecimento de água.

GURGEL (2006) concluiu que a utilização de conversores de frequência para abastecimento direto nas redes de abastecimento de água é eficiente para controlar pressões. Porém em termos de consumo energético pode se tornar inviável caso o sistema obrigue a sua operação durante muito tempo próximo a velocidade de rotação nominal do motor.

## 2.4 SISTEMAS DE CONTROLE UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

Dentro do objetivo e ações que vem sendo aplicado para a obtenção de redução de custos de energia dos sistemas de abastecimento, trabalhos já apresentam algumas dessas tecnologias alcançando resultados satisfatórios e desenvolvendo seus controladores (técnicas de automação) por meio da lógica Fuzzy.

BORDON (2004) desenvolveu um controlador simplificado, sem a necessidade de recorrer aos modelos matemáticos das máquinas, utilizando conceitos de lógica Fuzzy, aplicado no acionamento do motor de indução trifásico.

Para avaliar o desempenho do controlador, foi implementado um sistema para acionamento do motor de indução, com frequência de operação controlada e limitação de corrente, capaz de gerar em tempo real, um perfil de frequência adequado, sempre que um novo valor para frequência de operação seja estabelecido. No projeto deste controlador, optou-se pela utilização de um sistema digital de baixo custo, baseado em micro controladores de 8 bits, mesmo assim, os resultados obtidos superaram as expectativas, comprovando a viabilidade operacional deste controlador nebuloso de arquitetura simplificada, para acionamento do motor de indução, evitando que a corrente ultrapasse o limite estipulado e impedindo o desligamento desnecessário do sistema.

LIMA (2007) apresentou um estudo teórico e experimental de um sistema de controle inteligente Fuzzy. Este sistema de controle mantinha o potencial matricial da água no solo na faixa do tensiômetro de campo em níveis compatíveis com os requisitos de irrigação por meio de dotações hídricas variáveis de acordo com a velocidade de um conjunto motor-bomba. O controle de velocidade do motor de acionamento da bomba (motor elétrico de indução trifásico) é feito por meio de um conversor de frequência variável, comandado por um sinal elétrico de tensão variável. Este sinal elétrico é fornecido por um computador e muda em função das condições e características do solo. Com este sistema de controle foi possível proporcionar maior produtividade às culturas, pois o solo estará sempre com a umidade ideal para o seu desenvolvimento.

SUETAKE *et.al.*(2008) propuseram o desenvolvimento de um sistema fuzzy através de um processador de sinal digital (DSP), para o controle escalar de velocidade de motores de indução trifásicos, cuja estratégia residiu na manutenção da relação tensão frequência

constante. O acionamento do conversor trifásico foi realizado por sinais com modulação senoidal originados pelo DSP TMS320F2812 da Texas Instruments.

Neste contexto, o algoritmo do sistema de controle fuzzy foi implementado no DSP. O dispositivo é encarregado de mensurar a velocidade angular do motor mediante um encoder óptico (transdutores de movimento capazes de converter movimentos lineares ou angulares em sinais elétricos), executar o sistema de inferência fuzzy de controle de velocidade e gerar os sinais com modulação senoidal para acionar o conversor trifásico.

## **2.5 TRABALHOS DE OUTRAS ÁREAS**

Além do setor de abastecimento e bombeamento de água, a lógica Fuzzy é utilizada em diversas áreas de pesquisa. Alguns trabalhos, fruto destes estudos, também serviram de fundamentação para elaboração desta dissertação.

LEMOS (2000) apresentou uma proposta de solução, usando tecnologia Fuzzy, para controle de qualidade de imagem num sistema de aquisição de imagens para multas de trânsito. A solução fuzzy proposta envolve o controle de duas variáveis de saída a saber, brilho e contraste no sinal de entrada de vídeo. O controle é realizado em função de três variáveis de entrada: previsão do tempo, horário de captura da imagem e concentração de tons de cinza na imagem obtida anteriormente.

SILVA *et.al.*(2003) apresentou o desenvolvimento da simulação de um controlador aplicando as técnicas Fuzzy, no processo de fabricação de garrafas PET.

ORTEGA (2001) desenvolveu aplicação da teoria dos conjuntos Fuzzy em problemas de Biomedicina, auxiliando no tratamento de muitos problemas de cunho epidemiológico, bem como sistemas de diagnósticos. Mostrando também que ela pode trabalhar de forma efetiva em processos de decisão de Saúde Pública.

LEMOS (2007) observou ainda que apesar do conhecimento especialista mostrar-se incompleto, impreciso e compactado, os modelos fuzzy cobrem essas lacunas fornecendo uma resposta adequada para quaisquer valores sugeridos na entrada do controlador fuzzy.

## **CAPÍTULO III**

### **FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo apresenta-se fundamentos teóricos relacionados a lógica fuzzy, inversor de frequência e sistemas de bombeamento. Todos os conhecimentos explanados aqui mostram-se de fundamental importância para o desenvolvimento do trabalho servindo de base para o desenvolvimento do controlador em questão. É importante ressaltar que as informações repassadas estão longe de serem tudo sobre os temas, mas sim o mínimo necessário ao andamento do projeto.

#### **3.2 CONTROLE FUZZY**

SILVEIRA (1998) descreve automação como sendo um conjunto de técnicas, por meio das quais se constroem sistemas ativos capazes de atuar com uma eficiência ótima pelo uso de informações recebidas do meio sobre o qual atuam.

Automação de sistemas pode contribuir, significativamente, para um melhor aproveitamento de vários recursos naturais, seja no simples controle da iluminação de um ambiente ou no controle operacional de um sistema de abastecimento de água de uma cidade.

Com base nas informações, o sistema calcula a ação corretiva mais apropriada para a execução da ação. Para tanto, são utilizados controladores que, por meio da execução

algorítmica de um programa ou circuito eletrônico, comparam o valor atual com o valor desejado, efetuando o cálculo para ajuste e correção (TROJAM, 2005). Dessa forma, tratamos os controladores como os “cérebros” do sistema, tomando decisões cada vez mais complexas e substituindo o homem de forma cada vez mais eficiente.

Neste trabalho foi utilizado como controlador a Lógica Fuzzy e esse ítem descreve todo o mecanismo e princípio do seu funcionamento, explicando os seus procedimentos e formas de tomar decisões. Nesta etapa justifica-se também, a utilização desse método de controle, apresentando fundamentos técnicos que motivaram a sua escolha.

### **3.2.1 Porque utilizar lógica fuzzy:**

Na engenharia existe uma necessidade de estruturas matemáticas e computacionais, que possibilitem lidar com imprecisões e incerteza de forma mais crítica e realista. Essa questão é mais evidente ainda no abastecimento de água. Os sistemas de abastecimento de água envolvem vários níveis de imprecisão e incerteza.

A vazão requerida por um determinado sistema de abastecimento possui uma variação extremamente elevada, essa necessidade dependerá da estimativa do consumo per capita da população, dos consumos industriais, de combate a incêndio e de serviços públicos (irrigação de jardins, lavagens de parques, praças, monumentos, etc), levando-se em consideração o aumento da população durante o período de alcance de projeto, e das perdas físicas de água do sistema de distribuição (GOMES, 2004); ou seja, depende-se de fatores extremamente imprecisos como: tendência de crescimento da população, vida útil de equipamentos, clima, padrões de vida, dentre outros. Além disso, durante um único dia existe uma variação na vazão bastante significativa, alcançando altos índices durante o dia e valores mínimos durante a noite.

Outro parâmetro que exerce um papel fundamental no projeto de abastecimento urbano é a pressão. Seus valores estão compreendidos em uma faixa extremamente variável chegando a diferença aceitável entre os valores mínimos e máximos a mais de 200%.

As válvulas proporcionais também se apresentam como um grande ponto não só de incerteza, mas também de não linearidade do sistema, já que manobras próximas ao seu estado

de completo fechamento ou abertura são muito menos significantes na alteração das características do sistema do que quando a mesma se encontra em estado médio.

Estes efeitos costumam ser geradores de muitas incertezas e imprecisões afetando a tomada de decisões dos projetistas, operadores e controladores desses sistemas. Neste caso, a Teoria de Probabilidades (estatística) é, em geral, o método mais indicado, porém, ela não consegue, na maioria das vezes, abordar o problema da subjetividade que tão bem é tratado pelo raciocínio humano (ORTEGA, 2001). Esses podem ser tratados entre, outros métodos, com a teoria da Lógica Fuzzy.

Esta tem sido desenvolvida para lidar com o conceito de verdade parcial, ou seja, com valores de verdade entre o completamente verdadeiro e o completamente falso da lógica Booleana.

Não é necessário muito esforço para se perceber que poucos são os casos do nosso cotidiano real em que há total certeza sobre as coisas e os fatos, fazendo parte da atividade humana tomar decisões considerando a verdade parcial existente (ORTEGA, 2001). Neste sentido, dificilmente pode-se determinar uma vazão necessária a um determinado projeto em certo período de tempo com cem por cento de certeza, bem como afirmar que uma válvula necessita estar mais ou menos fechada para se obter a pressão previamente estimada, em determinado ponto da rede, pois vários fatores relacionados anteriormente intervirão nesse sentido.

É através dessa vertente que a lógica fuzzy difere da lógica convencional, pois ela permite considerar afirmações com valores entre falso e verdadeiro, possibilitando inclusive trabalhar com variáveis lingüísticas. Ela pode ser considerada como uma das ferramentas matemáticas mais poderosas para lidar com incertezas, imprecisões e verdades parciais, permitindo a tratabilidade de problemas do mundo real muitas vezes com soluções de baixo custo (ORTEGA, 2001).

### **3.2.2 Histórico**

Na década de 60, um professor de engenharia elétrica e ciências da computação, chamado Lotfi Zadeh (1965) desenvolveu uma variação da tradicional teoria dos conjuntos e

lógica booleana para tornar a análise e controle de sistemas complexos mais tratáveis. Zadeh observou que muitas regras que as pessoas usavam para fazer inferências não eram conscientes, ou seja, não podiam ser explicadas pelas pessoas que as usavam. Por exemplo, podemos olhar para uma pessoa e dizer “ele parece ter por volta de 35 anos”, mas não se está preparado para explicar como sabemos disso. A idéia de Zadeh levou-o a desenvolver o que é conhecido como lógica fuzzy (RUSS, 1996).

Apesar de ter sido criticada inicialmente, a lógica fuzzy acabou sendo bem aceita por engenheiros e cientistas da computação, tornando-se comuns as suas aplicações. (COSTA, 2002).

Já na primeira década (1965-1975) os pesquisadores se esforçaram por estender os fundamentos da lógica fuzzy, introduzindo conceitos novos e desenvolvendo outras abordagens da teoria, bem como as relações fuzzy, as variáveis lingüísticas, os processos de decisão fuzzy, a medida fuzzy, sistemas topológicos, álgebra com números fuzzy, fuzzy clustering, etc.. Em 1972 formou-se no Japão o primeiro grupo de pesquisas em sistemas fuzzy, coordenado pelo professor Toshiro Terano, e em 1974 iniciou-se um importante capítulo no desenvolvimento desta teoria com a apresentação do primeiro controlador fuzzy criado por E. Mamdani, no Reino Unido. A partir de então vários foram os pesquisadores que buscaram aplicar a teoria de lógica fuzzy para controlar sistemas em engenharia.

Em 1976, na Dinamarca, Circle Cemente e SIRA utilizaram, pela primeira vez, sistema fuzzy industrial no controle de fornos de fábricas (REZNIK, 1997). Em 1977, Didier Dubois aplicou os conjuntos fuzzy em um estudo sobre condições de tráfego e neste mesmo ano surgiu o primeiro sistema especialista fuzzy (YEN, *et al.*, 1999). Em 1985 Masaka Togai e Hiroyuke Watanabe desenvolveram o primeiro chip fuzzy, no laboratório Bell (EUA). Em 1987 inaugurou-se com sucesso o primeiro trem controlado com lógica fuzzy, no sistema do metrô de Sendai (Japão). Foi também neste ano que a Yamaha desenvolveu seu helicóptero não-tripulado, Yamaha-50, totalmente controlado por um controlador fuzzy, dando origem a era do desenvolvimento tecnológico proporcionado por esta teoria. Em 1988 o primeiro sistema de comércio financeiro fuzzy começou a operar no Yamaichi Fuzzy Fund. Mas, foi em 1990 que esta teoria atingiu a popularidade com o lançamento no mercado da primeira máquina de lavar roupas fuzzy, da Matsushita Electric Industrial Co., marcando o início do desenvolvimento de produtos de consumo (REZNIK, 1997).

Hoje é possível encontrar, principalmente no Japão, toda a sorte de eletrodoméstico cujo sistema é baseado em controles fuzzy (televisão, câmera fotográfica, panela para cozimento de arroz, vídeos, etc.). Pioneiros no uso da lógica, os japoneses adquiriram grande conhecimento de sua utilização e o aplicam com frequência, aperfeiçoando aparelhos como aspiradores de pó, que usam controladores fuzzy nos sensores de pó, ajustando o poder de sucção por meio de complexos mecanismos. Nas câmeras fotográficas inteligentes, também há dispositivos que medem a claridade das imagens em seis regiões do campo de visão, e essas informações determinam o foco, rastreiam a taxa de mudança no movimento da lente, procurando o foco e controlam a velocidade para evitar overshoot. Outro exemplo são as máquinas de lavar Hitachi, que usam controladores fuzzy para a verificação de peso, do tipo de tecido, de sujeira, e automaticamente adapta os ciclos de lavagem para o uso otimizado de potência, água e detergente (MARTINS, 2005).

Existem ainda atualmente várias empresas (Siemens, Daimler-Benz, Klockner-Moeller, SGS-Thomson, General Motors, Motorola, Hewlett-Packard, etc.) que possuem laboratórios de pesquisa em lógica fuzzy para desenvolvimento de seus produtos. (ORTEGA, 2001).

Através desse histórico busca-se mostrar que a lógica fuzzy é um conceito já assimilado e difundido em várias áreas práticas de atuação, sendo incorporado a engenharia hidráulica, mas precisamente em sistemas de abastecimento, já que, como justificado anteriormente, se encaixar tão bem nos seus moldes e premissas.

### **3.2.3 Parâmetros de um sistema fuzzy**

Os sistemas fuzzy obedecem ao diagrama apresentado na Figura 3.1:

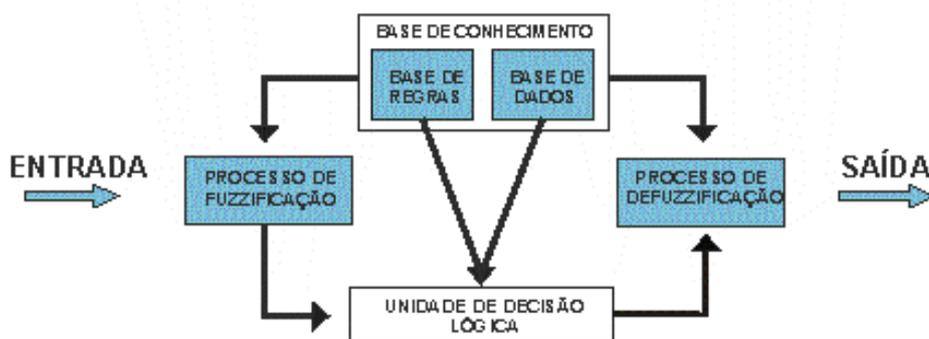


Figura 3. 1 - Diagrama de blocos lógica fuzzy.

As variáveis de entrada sofrem um processo de fuzzificação para serem tratadas pela unidade de decisão lógica. Fundamentada na base de conhecimentos (base de regras e base de dados), os dados são avaliados, resultando em elementos que necessitam passar pelo processo de defuzzificação para serem utilizados como variáveis de saída.

A lógica fuzzy representa uma forma de traduzir informações vagas e imprecisas, em valores numéricos, possibilitando a inclusão da experiência humana em controle computadorizado, tornando possível, decisões em problemas complexos. Além disso, possibilita um tratamento das implicações lógicas seguindo regras naturais de raciocínio, analisando condições e estipulando conseqüências (SHAW e SIMÕES, 2004). Seus fundamentos advêm da teoria dos conjuntos fuzzy (*fuzzy sets*), que permite a manipulação de expressões verbais abstratas (pequeno, próximo, muito rápido, etc.), que além de tornar a programação mais amigável, atende a conceitos nem sempre encontrada na lógica convencional.

A idéia de representar o conhecimento por meio de um conjunto de termos lingüísticos associados às variáveis de entrada e saída de um processo é absorvida nos processo de inferência fuzzy. Para tal, os controladores difusos usam regras para modelar explicitamente o conhecimento dos processos. As regras ligam as variáveis de entrada com as variáveis de saída, em termos de variáveis lingüísticas (ZIMMERMANN, 1996).

### 3.2.3.1 Variáveis Lingüísticas e Grau de Pertinência (base de dados)

Dentro da teoria da lógica fuzzy, o primeiro procedimento de elaboração do seu controlador é a determinação das variáveis lingüísticas. Esses conjuntos normalmente são os parâmetros do sistema (variáveis de entrada) e os termos a serem controlados (variáveis de saída).

Deste modo, uma variável lingüística pode assumir um valor lingüístico dentre vários outros em um conjunto de termos lingüísticos. Estas variáveis têm seu valor expresso qualitativamente por um termo lingüístico (que fornece conceito à variável) e quantitativamente por uma função de pertinência.

Na teoria clássica da probabilidade, há uma rigidez, de tal forma que um dado elemento do universo em discurso (domínio) pertence ou não ao referido conjunto. Na teoria dos conjuntos fuzzy existe um grau de pertinência de cada elemento a uma determinada variável lingüística.

Dessa forma os conjuntos fuzzy (variáveis lingüísticas) são conjuntos que não possuem fronteiras bem definidas, estando seu grau de pertinência responsável por determinar o quão representativo o valor é para o conjunto.

A função de pertinência mostra o grau de ligação de um elemento em relação a um determinado conjunto. Ela associa cada elemento “x” pertencente a “A” um número real  $\mu_A(x)$  no intervalo [0 , 1]. Este valor representa o grau de possibilidade de que o elemento “x” venha a pertencer ao conjunto “A”, isto é, o quanto é possível para o elemento “x” pertencer ao conjunto “A”(SANTOS, 2003).

Na Figura 3.2 tem-se o gráfico de uma função de pertinência (pressão), com seus valores lingüísticos (vermelho = muito baixa, azul = baixa, preto = ótima, róseo = alta e verde = muito alta). No eixo das abscissas têm-se os valores que a variável lingüísticas pode assumir enquanto no eixo das ordenadas, o grau de pertinência que determinado valor representa perante aquele valor lingüístico.

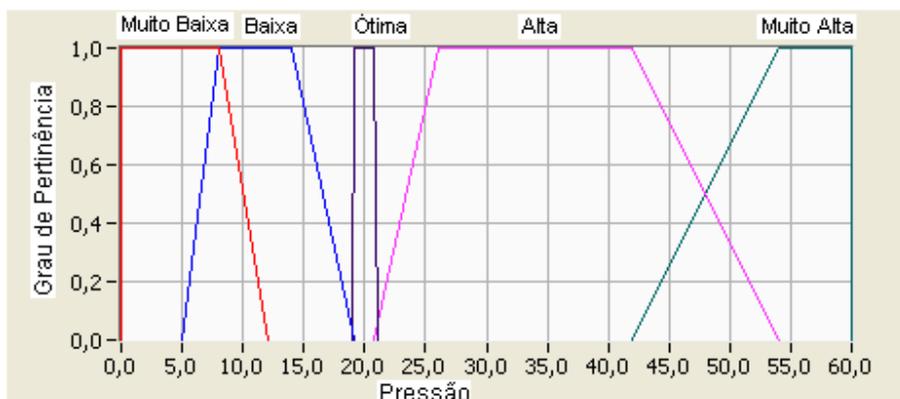


Figura 3. 2 – Relação de função x grau de pertinência.

De fato, uma variável lingüística é caracterizada por quatro parâmetros: o nome da variável, o conjunto dos valores lingüísticos, o domínio (os valores que a variável lingüística pode assumir) e o grau de pertinência.

Tomando como exemplo a variável lingüística da Figura 3.2, teremos:

- Variável Lingüística: Pressão;
- Valores Lingüísticos: muito baixa, baixa ótima, alta e muito alta;
- Domínio da Variável é o intervalo [0 60];
- Grau de Pertinência pode ser acompanhado pelo gráfico.

### 3.2.3.2 Processo de Fuzzificação

O processo de fuzzificação consiste em classificar as informações em conjuntos de valores lingüísticos. Estes representarão os termos “fuzzificados” dos valores exatos da variável.

Segundo TOURINO (2000) fuzzificação é o mapeamento do domínio de valores numéricos reais (como por exemplo, os valores obtidos de um sensor) para valores fuzzy, definidos pelas funções de pertinência.

A fuzzificação é uma espécie de pré-processamento de categorias ou classes dos sinais de entrada, reduzindo grandemente o número de valores a serem processados.

Com o processo de fuzzificação as funções de pertinência são mapeadas e ganham formas de acordo com seus parâmetros. As formas mais comuns são:

- Triangular:

É especificada por três parâmetros: base esquerda, centro e base direita [A B C], os quais determinam a coordenada “x” dos três cantos do triângulo, esse perfil tem a vantagem de ser computacionalmente simples. A Figura 3.3 exemplifica esse tipo de função.

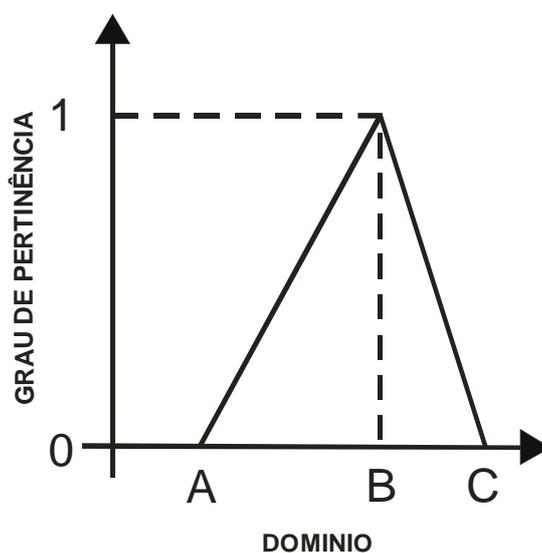


Figura 3.3 – Forma de função triangular.

- Trapezoidal:

É especificada por quatro parâmetros: base esquerda, topo esquerdo, topo direito e base direita [A B C D] e também é um modelo computacionalmente simples. A Figura 3.4 exemplifica esse tipo de função.

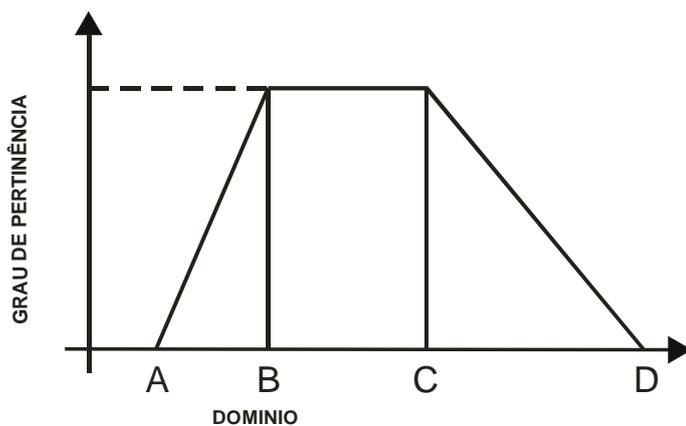


Figura 3. 4 - Forma de função trapezoidal.

Existe outra maneira de apresentação da função por três parâmetros: base esquerda, base direita e inclinação [A C E], porém, nesse caso a inclinação das duas bordas deve ser igual ao valor da tangente do ângulo interno ( $\text{tg } \theta = E$ ). A Figura 3.5 exemplifica esse tipo de função.

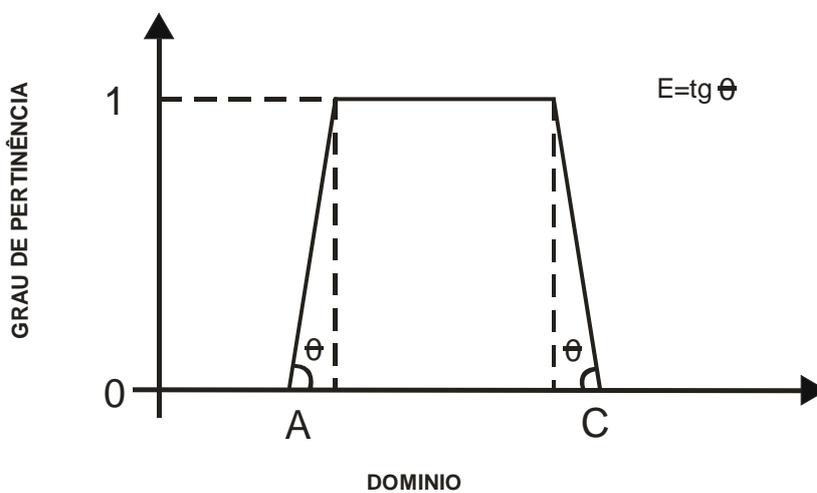


Figura 3. 5 - Forma de função trapezoidal com três parâmetros.

- Gaussiano:

Este perfil é descrito pela expressão abaixo (1), onde “m” é a média e “v” é o desvio padrão:

$$\mu(x) = e^{-\left(\frac{x-m}{v}\right)^2} \quad (1)$$

Este formato de FP é empregado em aplicações de agrupamentos (clusters) que utilizam medidas de similaridade (por ex. distância euclidiana), ou seja, padrões semelhantes exibem pequenas distâncias entre si. Quanto mais próximo da média ‘m’ está o padrão, maior o grau de pertinência do mesmo. A Figura 3.6, a seguir, ilustra este formato.

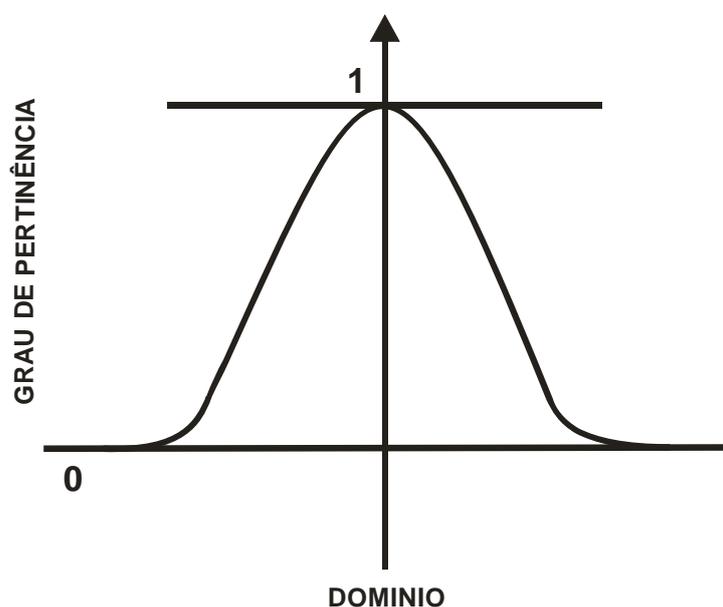


Figura 3. 6 - Forma de função gaussiano.

- Singleton:

Este formato compreende uma FP que apresenta o grau de pertinência igual a 1 apenas em um ponto do seu domínio e o grau 0 (zero) nos demais pontos. Sua principal vantagem é simplificar o processo de defuzzificação do sistema fuzzy (SOUZA, 1999). A Figura 3.7 ilustra um exemplo de FP ‘*Fuzzy Singleton*’ ou simplesmente ‘*Singleton*’. Nela o grau de pertinência da FP assume o valor 1 apenas em  $x=a$ .

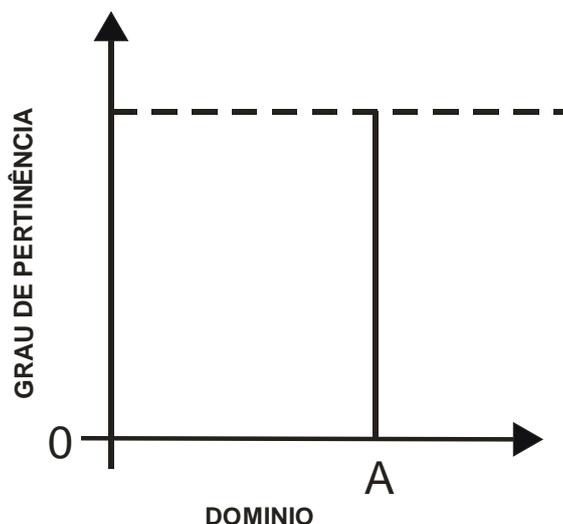


Figura 3. 7- Função de pertinência fuzzy Singleton.

Existem ainda outros formatos de funções menos utilizadas e, portanto, de menor importância, que não são descritos aqui, uma vez que não é objeto de estudo da presente dissertação.

### 3.2.3.3 Base de Regras e Processo de Inferência

As regras fuzzy são estruturas utilizadas em várias abordagens da teoria fuzzy e podem ser entendidas de diversas maneiras. Conceitualmente, as regras fuzzy descrevem situações específicas que podem ser submetidas à análise de um painel de especialistas, e cuja inferência nos conduz a algum resultado desejado. A inferência baseada em regras fuzzy pode também ser compreendida como um funcional que mapeia um conjunto de entradas do sistema para um conjunto de saídas (como em um esquema de interpolação) (SANTOS, 2003).

Segundo AGUIAR (1999), a base de regras contém um conjunto de regras/proposições fuzzy, onde as variáveis de entrada e saída (antecedentes/conseqüentes) são expressas de forma lingüísticas e os possíveis valores da variável lingüística são representados por conjuntos difusos. Uma proposição difusa expressa relações entre variáveis lingüísticas e conjuntos difusos.

A base de regras caracteriza os objetivos do controlador e sua estratégia usada, composta por uma parte antecedente (a parte SE) e uma parte conseqüente (a parte ENTÃO), resultando estrutura do tipo:

“Se antecedentes então conseqüentes”

Os antecedentes descrevem uma condição (premissas), enquanto a parte conseqüente descreve uma conclusão ou uma ação que pode ser esboçada quando as premissas se verificam.

Essa base de regras é manipulada por uma unidade de decisão lógica capaz de realizar as operações de inferência (ver figura 3.1), para obter, a partir da avaliação dos níveis de compatibilidade das entradas com as condições impostas pela base de regras, uma ação a ser realizada pelo sistema(saída).

Existem vários métodos de inferência possíveis e a escolha por um deles depende do sistema que está sendo analisado. No entanto, a inferência mais comum, e amplamente utilizada no controle de sistemas, é o Método de Mamdani (SANTOS, 2003).

O Método Mamdani foi proposto em 1975 por Ebrahim Mamdani. Nestes controladores ao se transferir o valor da função de pertinência para o conjunto de saída obtêm-se como resultado uma área para os valores inferiores ao da função pertinência. A união dessas áreas para todas as regras fornece o conjunto fuzzy de saída, que para transformar em valor numérico usa-se, por exemplo, a abscissa do centro de gravidade da área obtida (método centro de área).

O Modelo Fuzzy processa as regras em paralelo, ou seja, todas as regras (circunstâncias) são consideradas ao mesmo tempo, e ao final obtêm-se uma resposta que pode ser tanto um valor numérico clássico, quanto um conjunto fuzzy ou um funcional, a depender do tipo de conseqüente utilizado. Normalmente, é necessário que a saída do sistema seja um número, pois o sistema precisa ser re-alimentado. Nestes casos, se a saída do sistema for um conjunto fuzzy, então se faz necessário um processo de defuzzificação para se obter um número apropriado.

#### 3.2.3.4. Processo de Defuzzificação:

Uma vez feitas às avaliações das proposições (regras) fuzzy, deve-se determinar o valor real da saída do sistema. Este processo chama-se Defuzzificação.

A defuzzificação é um procedimento que permite interpretar a distribuição de possibilidades da saída de um modelo lingüístico fuzzy de forma quantitativa, ou seja, ele fornece um valor numérico representativo que captura o significado essencial dessa distribuição de possibilidades.

Os métodos de defuzzificação mais comumente utilizados são os Centros de Área (C-o-A), Centro de Máximo (C-o-M), e Média do Máximo (M-o-M).

O método de Centro de Área é freqüentemente chamado de centro de gravidade e a saída é o valor que divide a área sob a curva da função de pertinência em duas partes iguais.

O método de defuzzificação C-o-A apresenta pequenos problemas, um deles ocorre quando as funções de pertinência não possuem sobreposição, onde o centro geométrico da figura, na realidade, não deveria ter significado físico. Outro fator é que se mais de uma tiver regra a mesma saída Fuzzy há uma sobreposição de áreas que não é devidamente contabilizada. Além disso, a necessidade de integração numérica toma esforço computacional para cálculo (SHAW e SIMÕES, 1999).

No método Centro do Máximo a saída é calculada como uma média ponderada dos máximos, cujos pesos são os resultados da inferência. Segundo FERREIRA (2004) é o método mais popular e tem como principal vantagem o menor esforço computacional no cálculo da saída.

No método Média dos Máximos a saída precisa é obtida tomando-se a média entre os dois elementos extremos no universo que correspondem aos maiores valores da função de pertinência da saída.

### 3.2.4 Controle Fuzzy

A Lógica Fuzzy é uma tecnologia que vem se mostrando extremamente poderosa no tratamento das informações e está sendo utilizada em inúmeras aplicações industriais e científicas.

Segundo XAVIER (2008), o controle fuzzy tem a capacidade de considerar vários critérios de desempenho simultaneamente, tanto na forma matemática como na forma lingüística.

Os objetivos a serem alcançados por um controlador fuzzy são os seguintes:

- Controlar e operar automaticamente processos complexos, não-lineares e multivariáveis, com desempenho pelo menos igual ao dos operadores;
- Respeitar as especificações e restrições operacionais;
- Ser simples, robusto e operar em tempo real, XAVIER (2008) citando CAMPOS e SAITO(2004).

Além das vantagens que já foram explanadas anteriormente como: uso de variáveis lingüísticas, utilização do conhecimento de operadores experientes, desenvolvimento de um rápido protótipo do sistema, fácil manuseio de parâmetros não-lineares, soma-se os resultados satisfatórios que são alcançados em pesquisas, fortalecendo e justificando ainda mais seu uso.

Porém é importante ressaltar também algumas limitações e/ou desvantagens dessa tecnologia. Segundo SANTOS (2003), é um procedimento extremamente experimental, necessitado de muitos testes para obtenção dos melhores resultados; a falta de experiência com a planta pode levar à dificuldade em estabelecer regras corretamente e não existe uma definição matemática precisa.

### 3.3 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O funcionamento do motor de indução trifásico é baseado na aplicação da tensão alternada nos enrolamentos (bobinas) da armadura (estator), resultando em um campo eletromagnético rotativo. Os enrolamentos do rotor do motor, influenciados pelo campo eletromagnético oriundo das bobinas do estator produzem corrente e força eletromotriz (f.e.m) induzidas e, como consequência um conjugado motor, transformando a energia elétrica em energia mecânica.

Ao longo do estator tem-se grupos trifásicos de bobinas em cada pólo; esses grupos seguem uma ordem predeterminada e repetem-se tantas vezes quanto o número de pares de pólos que houver. O campo eletromagnético atuante gira (campo girante) segundo a frequência da rede e o número de pares de pólos, conforme a Equação a seguir:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2)$$

onde  $n_s$ : é o número de rotações síncronas em [rpm];

$f$ : é a frequência da rede em [Hz];

$p$ : é o número de pólos.

A equação (2) reflete o número de rotações efetuadas em um minuto pelo campo eletromagnético gerado nas bobinas existentes do primário (estator) do motor. Na verdade, para produzir um conjugado e este produzir velocidade de rotação no rotor, o campo eletromagnético do estator induz uma corrente nos condutores que formam as bobinas do rotor que será tanto maior quanto maior for o número desses condutores cortados pelo fluxo magnético originário do campo. No entanto, quanto mais próxima estiver a velocidade de rotação do rotor da velocidade de rotação do campo girante, menor será o número de condutores que o fluxo magnético cortará, diminuindo consequentemente o valor da corrente induzida e o conjugado produzido. Em decorrência, a velocidade de rotação do rotor nunca alcança a velocidade de rotação de sincronismo porque, neste caso, não haveria corrente induzida no rotor e o conjugado seria nulo.

A relação entre a velocidade de rotação do campo do campo girante e a velocidade de rotação do rotor chama-se escorregamento, e é dado por:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3) \quad \text{ou} \quad s(\%) = \frac{n_s - n_r}{n_s} 100 \quad (4)$$

onde  $s$  é o escorregamento;  
 $n_r$  é a velocidade de rotação nominal do motor em [rpm].

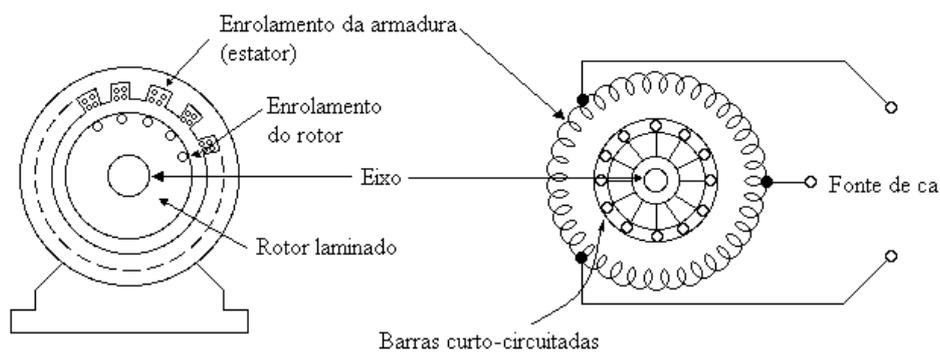


Figura 3. 8 - Estator de uma máquina de indução.

A Figura 3.9 mostra as curvas típicas de potência desenvolvida, corrente de estator e conjugado em função do escorregamento.

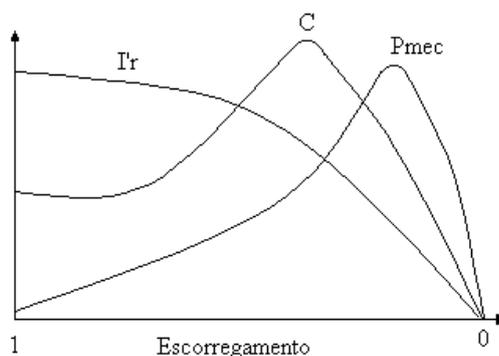


Figura 3. 9 - Características eletromecânicas de um motor de indução típico.

A Figura 3.10 mostra a região de funcionamento desde vazio até a plena carga (carga nominal) de um motor de indução típico.

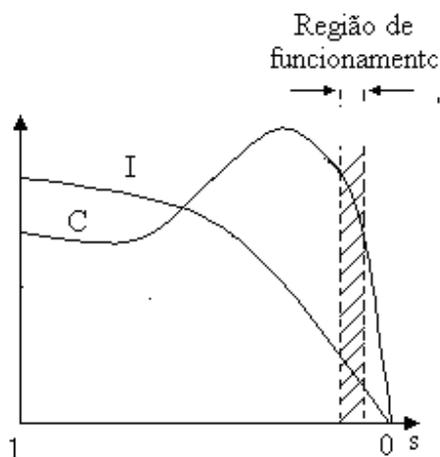


Figura 3. 10 - Região de funcionamento de um motor de indução típico.

Existem várias formas de se variar a velocidade de rotação de um motor de indução trifásico, porém, a forma mais eficiente é por meio da variação da frequência de alimentação da tensão de alimentação do estator. Desta forma, pode-se obter uma variação de velocidade de rotação contínua sem o empobrecimento da regulação. Usando esta técnica de controle, pode-se variar velocidade de rotação, modificando a curva de conjugado como mostra a Figura 3.11.

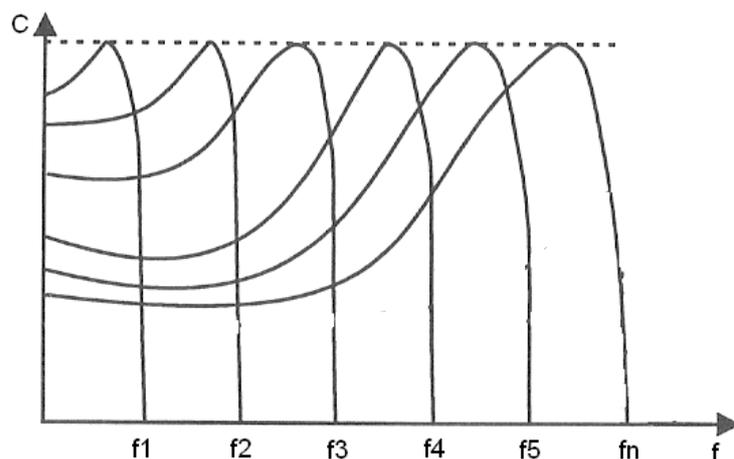


Figura 3. 11 - Curvas de Conjugado versus Velocidade de Rotação, de um motor de indução trifásico, para vários valores de frequência.

Em serviço, o motor de indução caracteriza-se por manter a velocidade de rotação praticamente constante, operando com escorregamento entre 1 e 8%. O comportamento dos

principais parâmetros como corrente, fator de potência e rendimento em função da potência desenvolvida é mostrado no gráfico da Figura 3.12.

É interessante observar que motores trabalhando em vazio ou com carregamento inferior a 40% da potência nominal apresentam péssimo rendimento e baixo fator de potência e, por isso, são agentes de desperdício de energia.

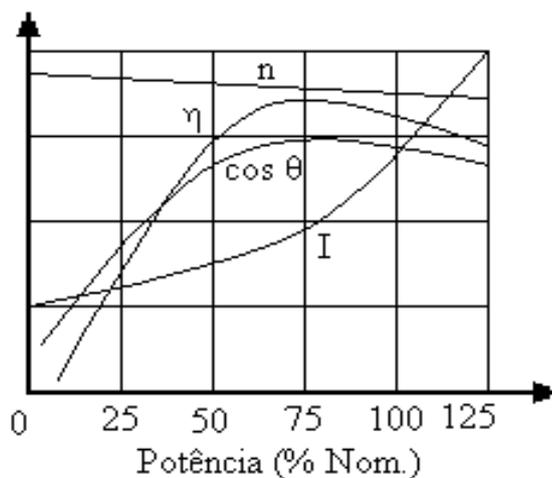


Figura 3.12 - Curvas características de operação de um motor de indução.

A Figura 3.13 mostra uma vista em corte de um motor de indução trifásico.

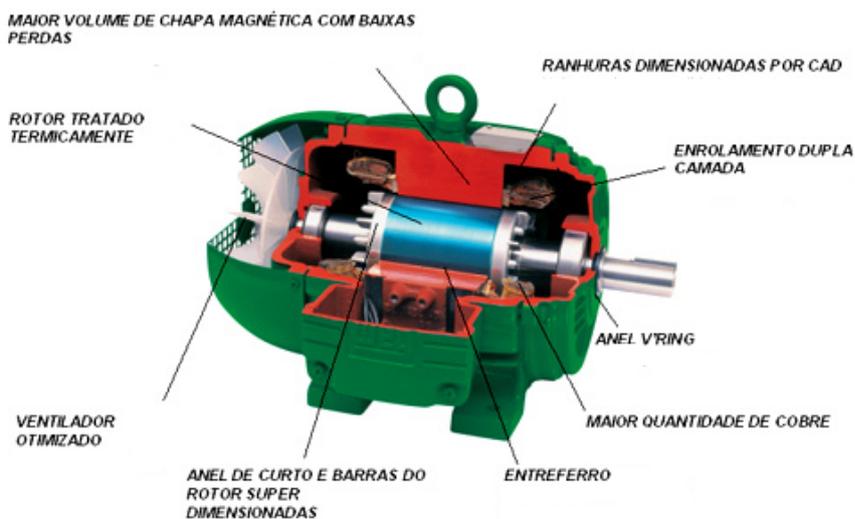


Figura 3.13 - Motor de indução trifásico.

### 3.4 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O mais eficiente método de controle de velocidade de motores de indução trifásico, com menores perdas no dispositivo responsável pela variação de velocidade, consiste na variação da frequência ( $f_1$ ) da fonte a alimentadora através de conversores de frequência, onde o motor pode ser controlado de modo a prover um ajuste contínuo da velocidade e conjugado com relação a carga mecânica.

Através do equacionamento da máquina assíncrona, sabe-se que, para o conjugado desenvolvido pelo motor assíncrono vale a seguinte relação:

$$C = \Phi_m \times I_2$$

e que o fluxo dependa da relação  $U_1 / f_1$ , desprezando-se a queda de tensão na resistência  $R_1$  e na reatância de dispersão  $X_{d1}$  do estator, pode-se dizer que:

$$\Phi_m = U_1 / f_1$$

Onde:  $\Phi$  = Fluxo de magnetização;

$I_2$  = Corrente do rotor;

$U_1$  = Tensão estatórica;

$f_1$  = Frequência da rede.

Para possibilitar a operação do motor com torque constante para diferentes velocidades, deve-se fazer variar a tensão  $U_1$  proporcionalmente com a variação da frequência  $f_1$  mantendo desta forma o fluxo constante.

Um conversor de frequência com modulação por largura de pulsos consiste basicamente dos seguintes blocos, conforme mostra a figura 3.14.

I- Fonte de tensão contínua elaborada a partir de uma fonte retificadora (diodos) alimentada por uma rede monofásica ou trifásica.

II- Filtro capacitivo (link DC)

III- Inversor constituído de transistores de potência.

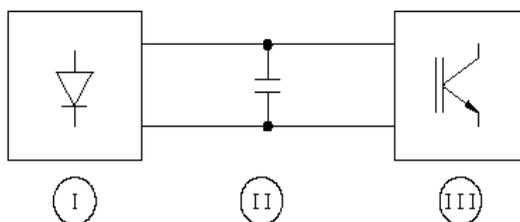


Figura 3. 14 - Diagrama de blocos de conversor tipo PWM.

A ponte retificadora de diodos transforma a tensão alternada de entrada em uma tensão contínua que é filtrada por um banco de capacitores. O circuito de corrente contínua é chamado CIRCUITO INTERMEDIÁRIO. Esta tensão contínua alimenta uma ponte inversora formada por transistores de potencia (BJT, IGBT, ou MOSFET) e diodos de roda livre. O comando das bases dos transistores, feito pelo circuito de comando (que utiliza um microcontrolador), permite a geração de pulsos para o motor com tensão e frequência controladas. O formato dos pulsos obedece ao princípio da modulação denominado PWM Senoidal, que permite um acionamento com corrente praticamente senoidal no motor.

A variação  $U/f$  é feita linearmente até a frequência nominal do motor (50/60 Hz), acima dest, a tensão que já é nominal permanece constante e há então apenas a variação da frequência que é aplicada ao enrolamento do estator.

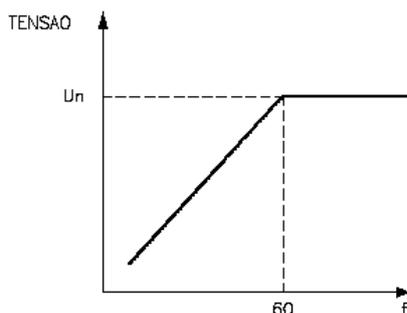


Figura 3. 15 - Curva representativa da variação  $U/f$ .

Com isto determinamos uma área acima da frequência nominal que chamamos região de enfraquecimento de campo, ou seja, uma região onde o fluxo começa a decrescer e, portanto, o torque também começa a diminuir.

Assim a curva característica conjugado x velocidade do motor acionado com conversor de frequência pode ser colocada da seguinte maneira:

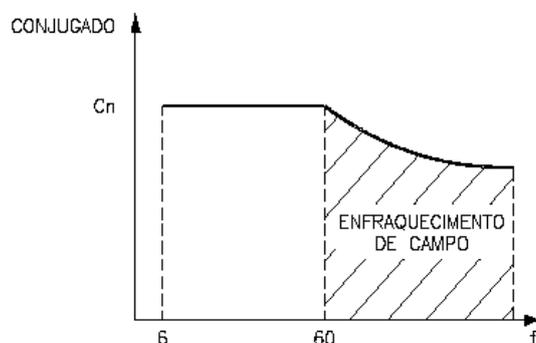


Figura 3. 16 - Curva característica conjugado x velocidade.

Podemos notar então, que o conjugado permanece constante até a frequência nominal e, acima desta, começa a decrescer. A potência de saída do conversor de frequência comporta-se da mesma forma que a variação  $U/f$ , ou seja, cresce linearmente até a frequência nominal e permanece constante acima desta.

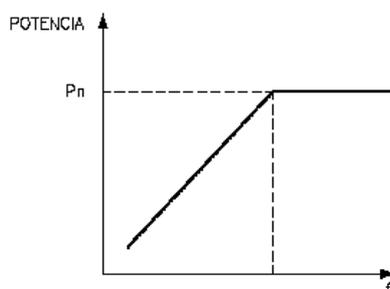


Figura 3. 17 - Curva característica da potência de saída do conversor.

Com a variação da frequência obtém-se um deslocamento paralelo da característica conjugado versus velocidade de rotação em relação a curva característica para a frequência nominal como mostra a Figura 3.18.

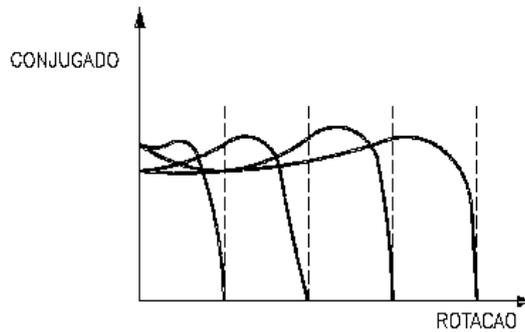


Figura 3. 18 - Exemplo de curva de conjugado com tensão proporcional e frequência.

Teoricamente existem duas faixas de atuação: uma com fluxo constante, até a frequência nominal, e outra, com enfraquecimento de campo, correspondente àquele acima da frequência nominal, ou seja:

$f_s = 0 \text{ Hz até } f_{nom}$  :  $U/f = \text{constante} = \text{fluxo constante}$ .

$f_s \text{ maior do que } f_{nom}$  :  $U/f = \text{enfraqecimento do campo}$ .

Entretanto, na realidade, para que essas duas faixas possam ser possíveis, há necessidade de se considerar os seguinte fatores:

1) Se um motor autoventilado trabalha com velocidade menor do que a nominal, terá sua capacidade de refrigeração diminuída.

2) A corrente de saída dos conversores apresenta uma forma não perfeitamente senoidal, o que implica em harmônicas de ordem superior, que provocam um aumento das perdas no motor.

Devido a isso, em caso de cargas com características de conjugado constante, é necessário reduzir-se o conjugado e potências admissíveis no motor ou seguir a curva da Figura 3.19.

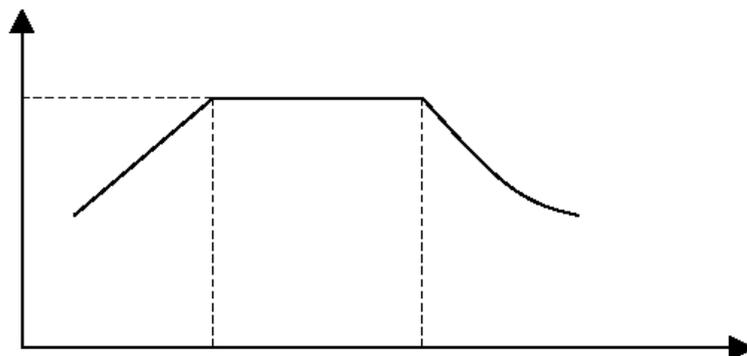


Figura 3. 19 - Curva de conjugado x frequência pra uso de motor com converdor de frequência.

### 3.4.1 Conversores de frequência em bombeamento

Segundo TSUTIYA (2007) em um sistema de abastecimento, quando o bombeamento de água é dirigido diretamente ao consumidor, torna-se necessário controlar a vazão em função da demanda.

O objetivo desse controle de vazão é manter a pressão constante ou em um valor pré-estabelecido. Caso esse controle não seja efetuado, a medida que a demanda diminui, a pressão de descarga da bomba aumenta, provocando vazamentos na rede, pressões elevadas nas áreas com cotas mais baixas chegando, às vezes, a comprometer a resistência das tubulações. Entretanto se a demanda for aumentada a pressão da bomba irá diminuir, prejudicando os consumidores localizados em pontos mais altos.

O controle de vazão das bombas pode ser realizado através de manobras de válvulas, que modificam as características do sistema de bombeamento, pelo controle do número de bombas ou variação da sua velocidade de rotação, que variam as curvas características da bomba.

Quando se estrangula o fluxo através da válvula, provocando uma perda de carga localizada na rede, haverá um aumento de pressão na bomba. A diminuição de velocidade de rotação da bomba, por sua vez, ocasionará uma modificação na curva da bomba, podendo proporcionar a mesma redução de vazão, porém com uma pressão muito menor. Com isso, a vida do mancal de uma bomba controlada por válvula, provavelmente será menor. Além do

mais, pressões altas causam esforço adicional nas válvulas, curvas e juntas, aumentando a possibilidade de falhas, trocas e manutenções.

Em abastecimento da água um equipamento bastante utilizado na variação da velocidade de rotação é o conversor de frequência que é um aparelho eletrônico que varia a frequência de tensão aplicada e conseqüentemente a velocidade de rotação do motor. No caso de bombas centrifugas isso resulta na possibilidade do controle de vazão. Além disso, o conversor pode ser utilizado para a partida e parada suave do motor, pois aumentando ou diminuindo sua velocidade de rotação, através de uma rampa de aceleração, faz-se com que a corrente de partida ou parada possa ser controlada.

Segundo MACYNTIRE (1987) para uma bomba centrifuga com o mesmo rotor, girando com velocidades diferentes, são válidas as seguintes relações:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (5)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (6)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (7)$$

sendo  $N_1$  e  $N_2$  = velocidade de rotação da bomba;

$Q_1$  e  $Q_2$  = vazão relativa à velocidade de rotação da bomba;

$H_1$  e  $H_2$  = altura manométrica total relativa à velocidade de rotação da bomba;

$P_1$  e  $P_2$  = potência consumida da bomba relativa a velocidade de rotação da bomba;

Essas relações, conhecidas como leis de semelhança, são utilizadas para se determinar o efeito da variação da velocidade de rotação na vazão, altura e potência de uma bomba (TSUTIYA 2004).

A Figura 3.20 apresenta a variação da curva característica da bomba (Q-H), rendimento e potência, decorrente da variação da velocidade de rotação da bomba.

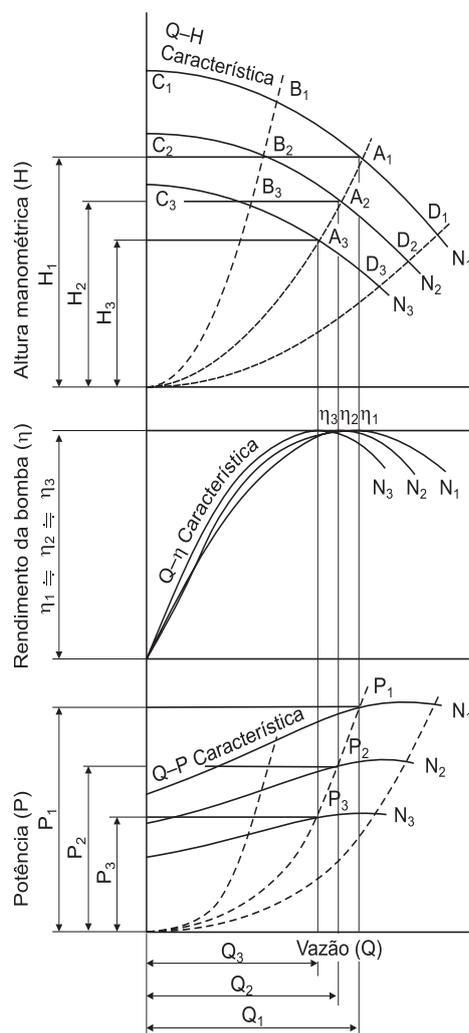


Figura 3. 20 - Relações características das bombas centrífugas (TSUTIYA, 2004).

Conforme se observa na Figura 3.20 não haverá grandes perdas adicionais ao sistema hidráulico e mesmo com a diminuição da vazão, o rendimento da bomba praticamente continua o mesmo.

### 3.4.2 Vantagens e desvantagens do conversor:

Segundo RALIZE e MARQUES (2006) as principais vantagens e desvantagens da utilização de um conversor de frequência são:

Vantagens:

- Montagem simples;
- A corrente do motor é controlada de forma suave, sem picos;
- Permite variar a velocidade de rotação do motor em função da variação da frequência de tensão;
- Proteções elétricas (sobrecorrente, supervisão trifásica, etc.) são incorporadas no próprio equipamento, reduzindo o número de componentes e o tamanho do painel;
- Elimina o baixo fator de potência;
- Proporciona economia de energia elétrica.

Desvantagens:

- Custo bastante elevado, por exemplo, cerca de R\$ 2.000,00 para motor de 3CV\* (apesar de estarem cada vez menores em virtude do desenvolvimento dos componentes eletrônicas cada vez mais baratos);
- Produz interferências na rede elétrica de alimentação (harmônicas) devido a alta frequência de chaveamento de seus componentes internos, necessitando o uso de filtros de correção.

\*Dados de 2008

## 3.5 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentaram-se os princípios da lógica e controle fuzzy. Foram discutidas suas vantagens, justificando sua utilização, bem como foram expostas algumas

“limitações” do sistema, tão pouco comentada pelos autores, mas que não a torna menos eficiente.

Através desse capítulo alcançamos subsídios para a aplicação prática do controle fuzzy além de entender que, devido suas características, o sistema de controle inteligente proposto, se apresenta adequado para a finalidade requerida.

Foram apresentados ainda conhecimentos referentes a motores de indução trifásico, sua forma de acionamento e modo de funcionamento explicando suas aplicações em conjunto com o inversor de frequência justificando sua boa aplicabilidade na área da hidráulica.

## **CAPÍTULO IV**

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **4.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo apresenta-se toda descrição dos experimentos realizados na pesquisa, bem como os equipamentos e técnicas utilizadas para o seu desenvolvimento. Sua função é pôr em prática todos os parâmetros que foram modelados no capítulo anterior.

Os experimentos foram divididos em dois módulos: no primeiro as perturbações do sistema estarão por conta do simulador de demanda, que simula uma vazão requerida pelo sistema semelhante à uma situação real, enquanto no segundo módulo o motor será submetido a perturbações bruscas. Haverá um rigoroso controle da pressão na rede de abastecimento, mantendo-a em valores ideais, previamente fixados, fazendo para isso o uso da Lógica Fuzzy, desenvolvido na Fuzzy Logic Toolbx do LabVIEW™, os quais foram ativados, desenvolvidos e implementados no ambiente computacional de LabVIEW™.

Para a realização dos experimentos optou-se pela criação de uma bancada reduzida, uma vez que assim tem-se um perfeito acompanhamento de todo o caminhamento da rede de tubulações, a localização e o comportamento físico dos equipamentos, facilitando a realização de ajustes.

## 4.2 EQUIPAMENTOS

Os experimentos foram realizados em uma bancada compacta, aparelhada com equipamentos, de forma a oferecer total condição de simulação de um sistema de abastecimento real. Composta de um conjunto motor bomba ligada ao conversor de frequência, uma válvula redutora de pressão, um transdutor de pressão, duas fontes de alimentação, um manômetro, medidor de vazão, uma placa de aquisição de dados, analisador de energia e um computador, além de toda uma estrutura de tubos, conexões e reservatórios que simulam um sistema de abastecimento real. A Figura 4.1 mostra a bancada experimental utilizada nesta dissertação, e todos os equipamentos necessários.



Figura 4. 1 - Bancada experimental.

A Figura 4.2, mostra um diagrama esquemático da bancada compacta com toda instrumentação utilizada no experimento.

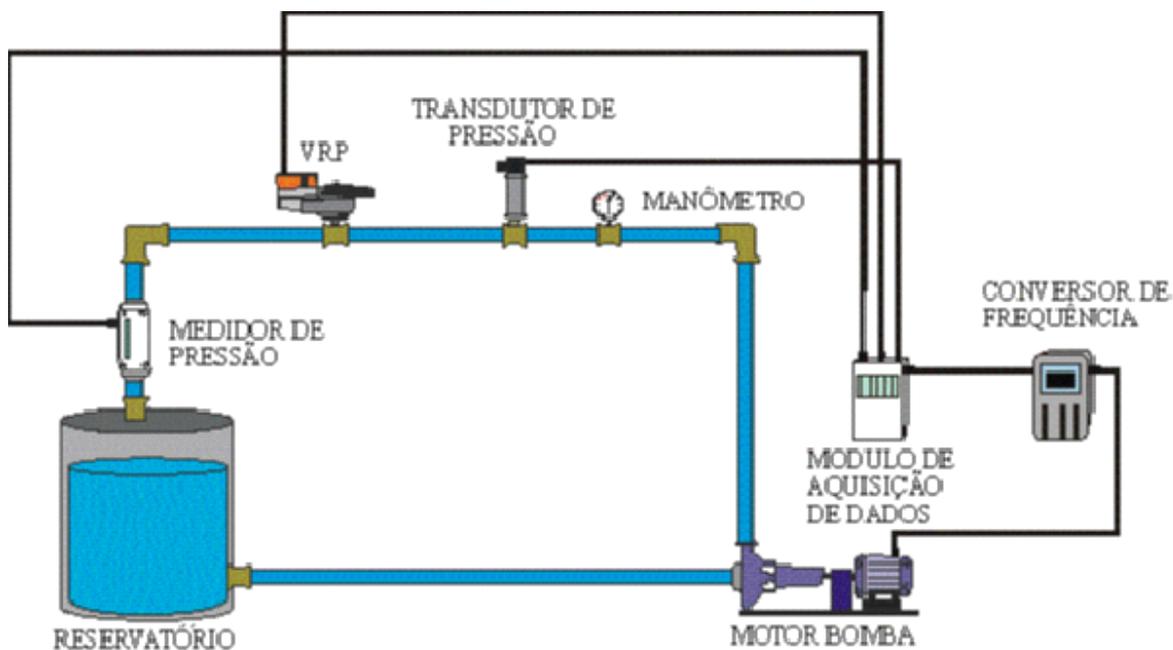


Figura 4. 2 - Bancada compacta instrumentalizada.

O transdutor de pressão assimila o valor atual da pressão na rede, proveniente da variação de demanda do sistema (ocasionada pela VRP) e transmite ao módulo de aquisição de dados. Este por meio da Lógica Fuzzy e do conversor de frequência reduz ou aumenta o rotação do conjunto motor-bomba ajustando a pressão para o patamar ideal.

O conjunto motor bomba utilizado foi da marca Dancor CAM-W10, 3 CV, 220/380 T NEMA 56 WEG, figura 4.3, que juntamente com o conversor de frequência marca WEG modelo, CFW 08, são responsáveis por manter a pressão na rede de distribuição, através de uma maior ou menor velocidade de rotação do motor.



Figura 4. 3 - Conjunto motor bomba.

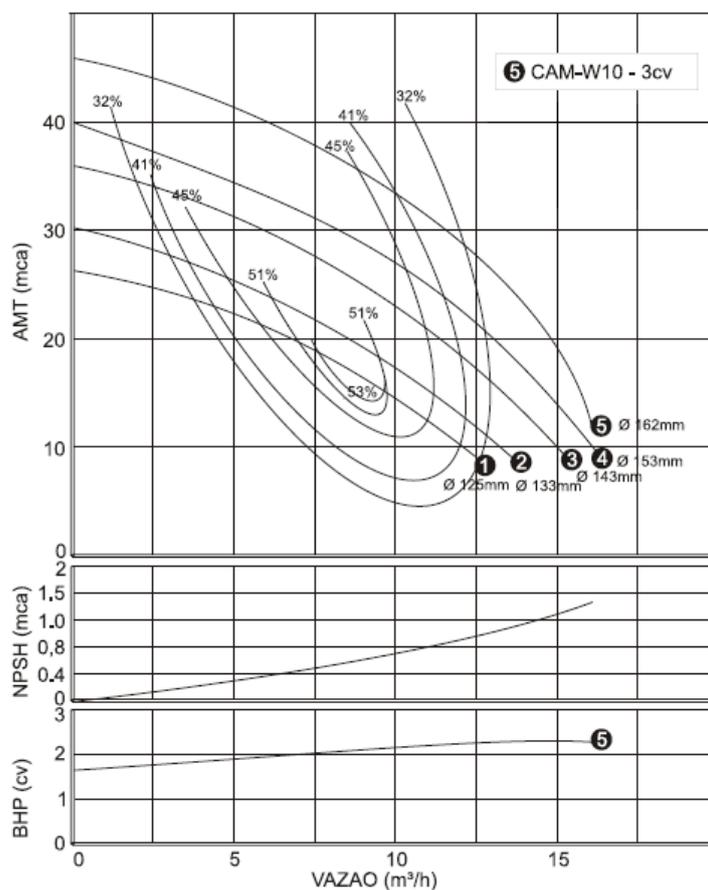


Figura 4. 4 - Curvas características da bomba centrífuga.

Optou-se pelo funcionamento da bomba de forma afogada, por diminuir a possibilidade de cavitação e da não necessidade da escorva da bomba.

O conversor de frequência atua na resposta do sistema, que segundo as regras do controlador, incidirá uma maior ou menor velocidade de rotação do motor. Sua alimentação é feita diretamente pela rede elétrica, de forma trifásica, e a partir daí alimenta o motor, também trifásico. O sinal de comando é transmitido em forma de tensão, variando em uma faixa de 0 a 10 V, sendo 0 V para a frequência mínima, 0 Hz, motor parado e 10 V, para a frequência máxima, 60 Hz, motor com a velocidade de rotação nominal.

A válvula redutora de pressão (proporcional), do fabricante Belimo, modelo ARB24-SR, está instalada a jusante do medidor de pressão e simula a demanda na rede de abastecimento. Portanto, quanto mais aberta maior a demanda e menor a pressão no sistema;

quanto mais fechada, menor a demanda e maior a pressão na rede. Este equipamento poderia ser acionado de forma manual, através de um simples registro, porém, optou-se, como forma de facilitar as simulações, utilizar a válvula proporcional controlada de forma remota. Tal processo permitiu a criação de rotinas computacionais que imitassem o consumo de água durante um período maior de simulação, com uma precisão bastante satisfatória e sem a necessidade de um operador para a válvula. A partir de então denomina-se a esta solução (equipamento+rotina computacional) de simulador de demanda.

O controle da válvula é feito através de um sinal de tensão que lhe é enviado, dentro de uma faixa de 2 a 10 V. Sendo 2 V a válvula totalmente fechada e 10 V totalmente aberta, tendo para valores intermediários aberturas intermediárias.

Em paralelo, a válvula fornece um sinal indicador do estado atual de abertura, visto que seu ciclo completo de operação, ou seja, de totalmente aberta para totalmente fechada e vice-versa, demora cerca de 90 segundos. Essa informação também é transmitida na forma de tensão e na faixa de 2 a 10 V.

O transdutor de pressão da marca DRUCK, modelo PTX 7217, com uma faixa de medição entre 0-60 psi, além de ser uma das variáveis de entrada do controlador, é a variável a ser controlada. Sua alimentação é de 24 V, enquanto seu sinal de resposta é transmitido em forma de corrente em um intervalo de 4 a 20 mA, sendo 4 mA sua menor pressão registrada e 20 mA a maior.

Ainda no intuito de verificar a pressão, instalou-se um manômetro cuja função é de comparar seu valor com o dado obtido pelo transdutor de pressão. Sua faixa de medição é entre 0 e 50 mca.

As fontes de alimentação, como o próprio nome já sugere, fornecem a tensão necessária ao transdutor de pressão, à válvula e ao medidor de vazão, pois estes equipamentos exigem uma tensão relativamente baixa, em torno de 24 V, impossibilitando a alimentação direta da rede elétrica. São da marca Instrutherm e modelo FA 3030.

O medidor de vazão eletromagnético tem a função de relatar o comportamento da demanda hidráulica do sistema em detrimento da vazão. O equipamento é da marca Incontrol, sua alimentação se dá por meio de uma tensão de 24 V, enquanto o sinal de saída é transmitido em corrente na faixa entre 4 a 20 mA.

A Figura 4.5 apresenta a válvula redutora de pressão e os medidores de pressão e vazão.



Figura 4. 5 - Válvula redutora, medidores de pressão e medidor de vazão.

A placa de aquisição é responsável pelo recebimento e transmissão dos dados, transmitido-os ao computador, onde tem-se a interface homem máquina. Foi utilizada o módulo de aquisição de dados da marca National Instruments NI USB-6229. Sua forma de processamento de sinal é por meio de tensão elétrica, por ser transmitida de forma mais eficiente e rápida. A Figura 4.6 mostra o módulo de aquisição de dados utilizada no experimento:



Figura 4. 6 - Módulo de aquisição de dados da National Instruments – USB 6229.

Devido à forma de processamento do sinal do módulo de aquisição de dados ser a tensão, e alguns equipamentos fazerem sua comunicação por meio de corrente, caso dos transdutores de pressão, foi necessário a utilização de uma resistência com grandeza definida, a fim de transformar o sinal de corrente em tensão, antes da conexão com a mesma.

Foram utilizadas três entradas analógicas referentes ao transdutor de pressão, ao medidor de vazão e à frequência do conversor – diretamente ligada à velocidade de rotação do motor, bem como duas saídas, para o comando da válvula e o comando do conversor (delta de rotação).

Um analisador de energia foi utilizado para dá subsídios na comparação dos parâmetros de consumo de energia. Ele fornece o valor TRUE RMS verdadeiro de tensão e corrente, bem como os valores das potências ativa reativa e aparente e o fator de potência. Seu fabricante é a Instrutherm e o modelo é AE-200.



Figura 4. 7 - Analisador de energia Instrutherm AE-200.

Por fim foi utilizado um computador responsável pela apresentação de todos os dados e por comportar a Lógica Fuzzy, que através do programa LabVIEW™ toma todas as decisões que foram previamente definidas por meio de regras de maior ou menor grau de pertinência.

Além de todos estes equipamentos foram utilizados também uma rede de tubos de PVC, soldável, DN 50, com todas as conexões necessárias, para a instalação desses instrumentos. Ainda foram instalados alguns registros de gaveta manual para auxiliar, tanto na instalação, como no ajuste da perda de carga da rede simulada.

### 4.3. FERRAMENTA COMPUTACIONAL

O aparecimento de vários pacotes de software para simulação tem facilitado o projeto e a análise de sistemas de controle. Neste trabalho foi utilizado, para implementação dos controladores avaliados, o LabVIEW™ 8.2 (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench), uma linguagem de programação desenvolvida pela National Instruments.

Diferente das demais linguagens de programação, que utilizam linhas de código, o programa computacional LabVIEW™ faz uso de uma linguagem conhecida como linguagem G, que é composta de muitos nodos conectados, ou seja é uma linguagem de programação gráfica que utiliza ícones em vez de linhas de texto para criar aplicações. Em contraste às linguagens de programação baseadas em texto, em que instruções determinam a execução do programa, o LabVIEW™ utiliza programação baseada em fluxo de dados, onde o fluxo dos dados determina a execução.

Assim toda programação e interface foram desenvolvidas no LabVIEW™, bem como a lógica Fuzzy foi incorporada por meio do Fuzzy Logic Toolbx. A Figura 4.8 apresenta a interface gráfica do controlador e a Figura 4.9 mostra toda programação do controlador atrelada a essa interface gráfica.

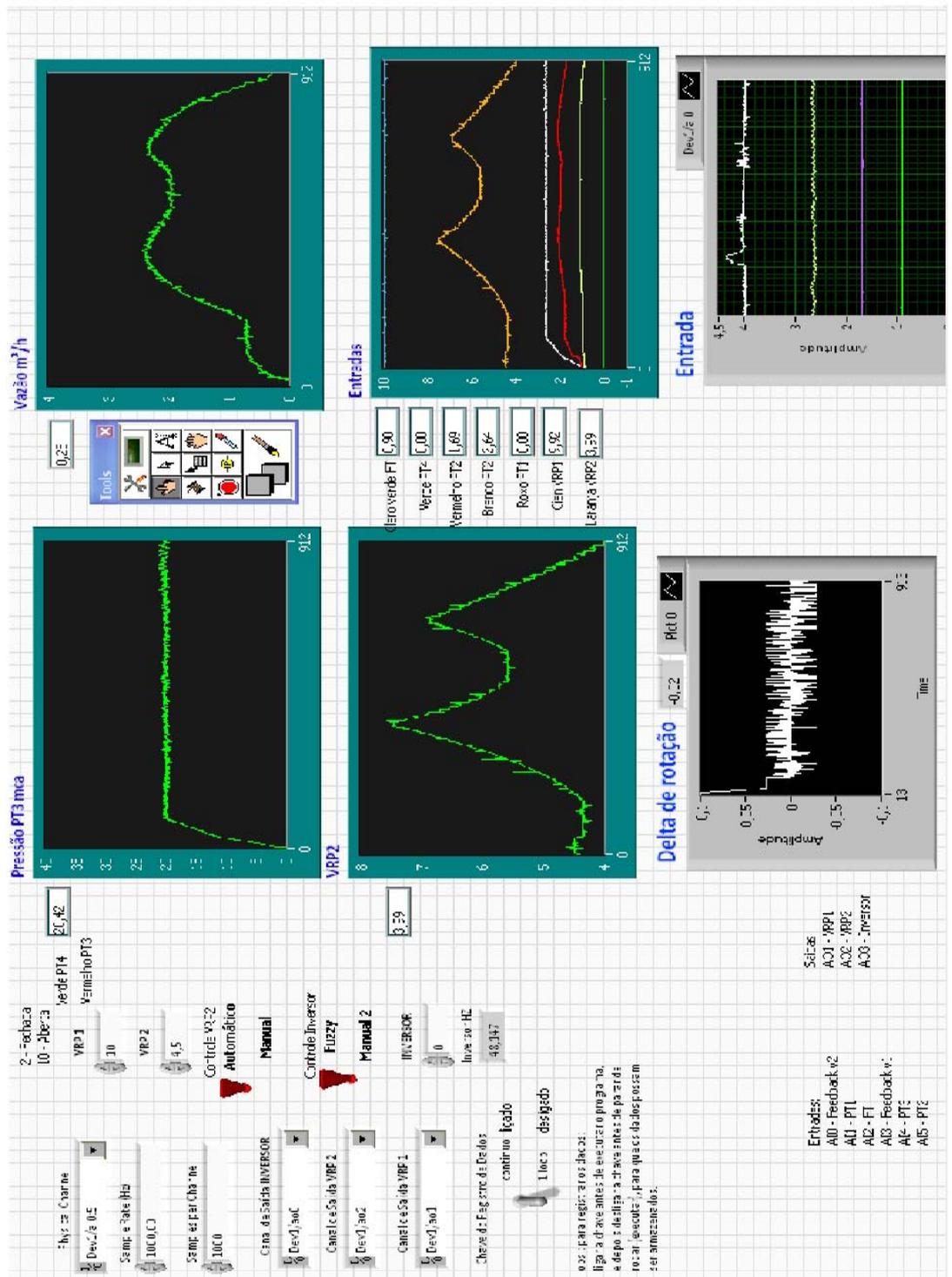


Figura 4. 8 - Interface gráfica do controlador.

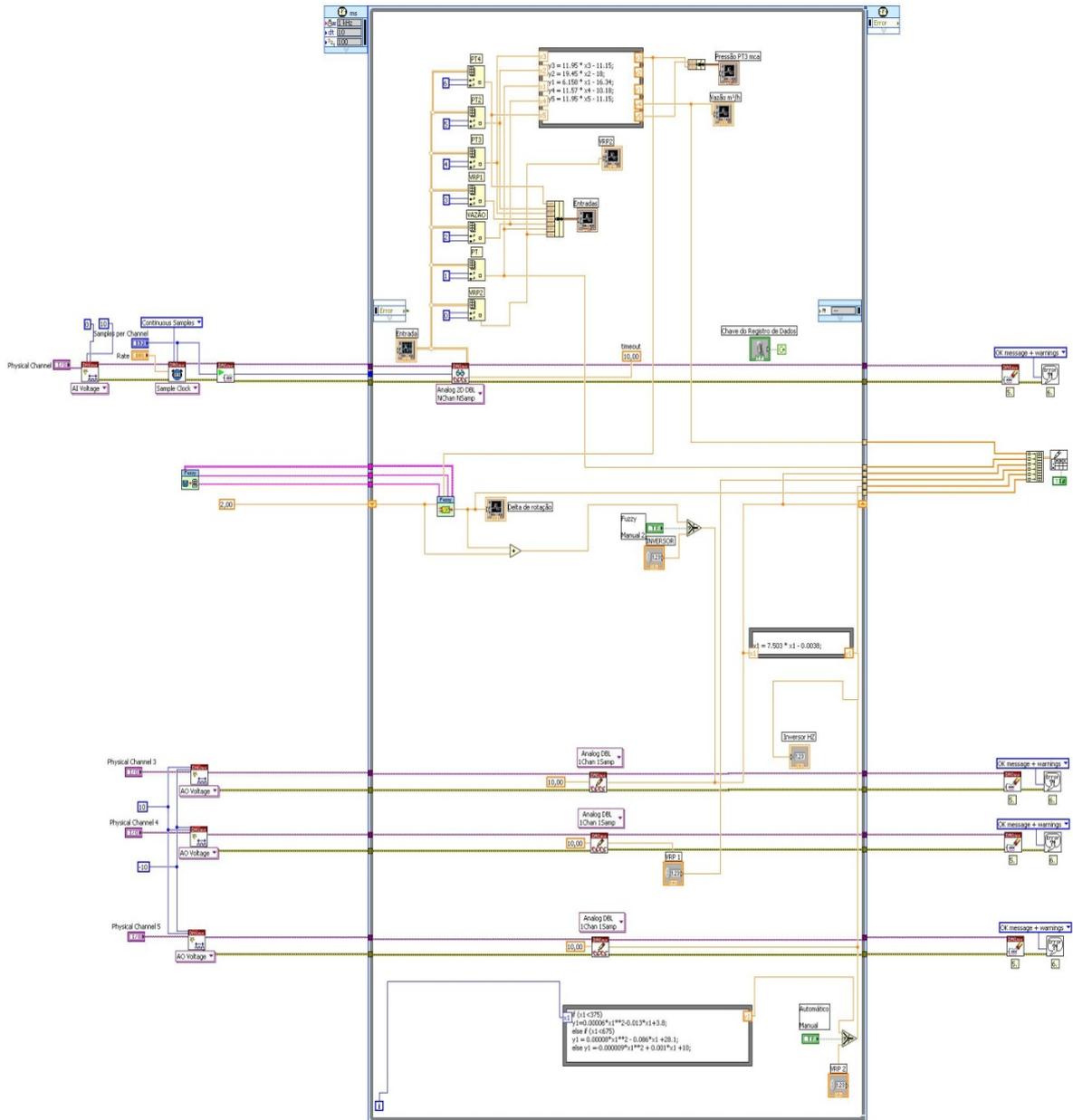


Figura 4. 9 – Diagrama de blocos do programa de controle de simulação.

#### 4.4 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Os experimentos foram realizados simulando o abastecimento de uma rede de distribuição, com um consumo diário padrão. Cada simulação durou quinze minutos (900 segundos), sendo as vinte e quatro horas normais do dia típico, convertidas nesse período.

Em uma rede de abastecimento real as perturbações são provenientes da demanda variável dos usuários, de vazamentos ou manobras bruscas na rede. Para o experimento foi desenvolvido, no ambiente LabVIEW™, um simulador de demanda, que através da operação remota da válvula, varia a vazão na rede simulando o consumo de água de um sistema real.

A Figura 4.10 apresenta uma curva de consumo médio diário e a Figura 4.11 a mesma simulação dada pela válvula através do comando remoto do LabVIEW™, utilizada no experimento.



Figura 4. 10 - Curva de consumo médio diário (Fonte: Gomes, 2005).

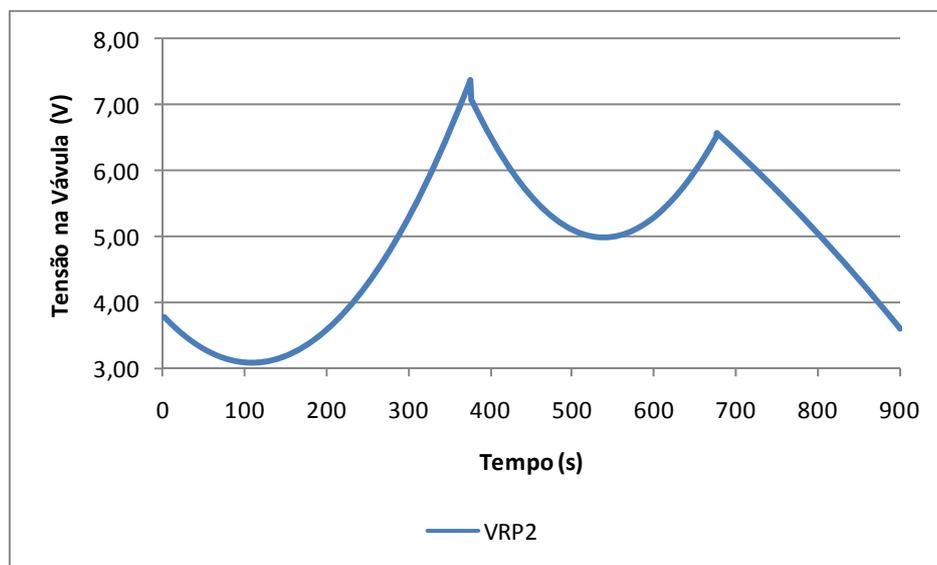


Figura 4. 11 - Curva de Consumo Diário (Simulador de Demanda).

Foram realizados três experimentos. No primeiro utilizou-se uma ligação convencional, ou seja, a bomba alimentada diretamente pela rede elétrica, suprindo a demanda de pressão e vazão do sistema de abastecimento. Neste caso para o dimensionamento considera-se a demanda máxima horária, já que o sistema deve atender à situação mais desfavorável de projeto, que corresponde à hora de maior consumo ao longo do dia (GOMES, 2004).

Evidentemente que nas demais horas existirá um excedente de pressão, devido a um consumo mais baixo por parte dos usuários e esta pressão excedente causa um desperdício de energia bastante significativo, além do desgaste na tubulação, aumento nos vazamentos, diminuição da vida útil das peças e conexões, etc

Fundamentado neste panorama, propôs-se um segundo modelo, onde atuaria um rígido controle de pressão, com o intuito de fornecer à rede de abastecimento apenas a pressão necessária para o bom uso da água pelos usuários. Para isso foi agrupado ao sistema o conversor de frequência que alimentará o motor bomba fornecendo uma maior ou menor velocidade de rotação, conforme a demanda diária.

Em ambos os experimentos foi utilizado o analisador de energia para armazenar as grandezas elétricas e posteriormente serem comparadas.

Finalmente com o intuito de avaliar a robustez e eficiência do controlador Fuzzy, realizou-se um terceiro experimento. Nesta situação submeteu-se o sistema a variações bruscas de pressão a fim de analisar seu comportamento e obter os parâmetros de controle. Inicialmente o sistema partiu do repouso a fim de alcançar a pressão considerada ótima de operação de 20 mca. Após sua estabilização o sistema foi submetido a um aumento de pressão instantâneo através de um fechamento de uma válvula.

Toda instalação dos equipamentos foi executada com cabos blindados SC20-2x0,20 mm<sup>2</sup>, e teve-se a preocupação de mantê-los separados os sistemas de alimentação e sinais, para com isso evitar interferências que uma possa causar na outra.

#### **4.5 COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES**

Este capítulo descreveu todo o processo utilizado na realização do experimento e as primícias adotadas para sua execução.

Várias dificuldades foram enfrentadas durante a instalação do sistema, sendo a principal delas a busca da qualidade do sinal dos equipamentos, principalmente devido às interferências que a rede elétrica causa na rede de sinais. Ressaltamos de forma imperativa a necessidade de utilização de cabos blindados e a separação dos sistemas de alimentação e sinais.

A localização dos transdutores também é um fator de grande relevância na qualidade do sinal, percebeu-se uma grande perturbação nos transdutores posicionados próximos a bomba. Acredita-se que tal perturbação seja provenientes do campo magnético gerado por esses equipamentos e também da própria vibração gerada na tubulação pelo movimento da bomba.

Em se tratando dos resultados da pesquisa, é evidente que se espera uma redução significativa no consumo energético, já que a utilização de inversores é uma técnica consagrada na eficientização dos sistemas e alimentação de bombas.

Dessa forma pretende-se então obter, com a técnica fuzzy, resultados satisfatórios, pois sabe-se que outras formas de controle convencionais, bastante difundidas no mercado

(PID), possuem grandes restrições em sistemas de comportamento não linear como é o caso de sistemas de abastecimento.

## **CAPÍTULO V**

### **MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE**

#### **5.1 INTRODUÇÃO**

O Sistema de Controle proposto visa manter a pressão na rede de abastecimento de água em níveis ideais melhorando a eficiência do sistema.

No desenvolvimento do sistema de controle da pressão de recalque na rede de abastecimento buscou-se sanar ou minimizar alguns problemas inerentes aos sistemas de bombeamento, tais como: vazamento, rompimento das tubulações, diminuição no custo de manutenção, redução do consumo de energia, além da diminuição do desgaste nas peças, conexões e do próprio conjunto motor bomba.

A minimização dos problemas referidos no parágrafo anterior se dá pelo fato do sistema de controle atuar sobre a pressão da rede de abastecimento, através da variação de velocidade no motor, possibilitado pelo uso do conversor. Com isso, regula-se a velocidade de rotação do conjunto motor-bomba adequando-a à vazão requerida, em função da pressão constante na linha de operação. Desta forma, pode-se reduzir o consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento, que intrinsecamente necessitam de variação de vazão, sem prejudicar a pressão estabelecida em projeto.

Tendo em vista que o comprimento das redes de distribuição de água das grandes cidades chega, com facilidade, a centena de milhares de metros e que os diâmetros utilizados são relativamente grandes, a utilização de técnicas de controle convencionais e mesmo de controle moderno são difíceis de serem aplicadas nestes sistemas, principalmente devido ao o

tempo morto existente. Este tempo morto resulta em um elevado tempo de resposta do sistema para uma ação do conjunto motor-bomba o que pode gerar conflito na decisão desses controladores.

Outro problema de difícil solução para a maioria das teorias de controle moderno é a modelagem do sistema envolvendo grandes não-linearidades, característica inerente das instalações de abastecimento.

Desta forma, este trabalho se propõe a desenvolver um “sistema de controle com controlador lógico Fuzzy”, pois, como visto no capítulo anterior, elevado tempo morto e não-linearidades acentuadas não são problemas para esse tipo de controlador.

O modelamento dos sistemas de controle foi implementado no Fuzzy Logic Controller Desing (Toolkit do LabVIEW™) do programa computacional LABVIEW™ 8.2, sendo utilizadas como dados de entradas, a velocidade de rotação do motor e a pressão no sistema. Como dados de saída foi utilizado um delta de rotação, que pode assumir valores positivos ou negativos, o qual será acrescido na velocidade de rotação do conjunto motor bomba, a fim de diminuir ou aumentar a velocidade do conjunto motor-bomba para se obter a pressão ideal requerida pelo sistema.

## **5.2. MODELAGEM**

Para o projeto do controlador fuzzy não há necessidade de modelo matemático, bastando executar os seguintes passos:

1. Identificar as variáveis de entrada e de saída da planta;
2. Definir e dividir o universo de discurso entre as variáveis;
3. Determinar uma função de pertinência para cada conjunto;
4. Formar uma base de regras;
5. Definir o método para transformar as entradas em valores difusos ("Fuzzificação");
7. Usar raciocínio difuso para inferir a contribuição de cada regra; e
9. Obter a saída ("Defuzzificação").

Dessa forma, uma vez identificadas as variáveis lingüísticas (rotação do motor, pressão no sistema e delta de rotação), determinou-se, para cada variável, seu universo de discurso, a partição do conjunto de termos e os respectivos conjuntos fuzzy.

As variáveis lingüísticas tiveram suas faixas de valores estabelecidas através de contato com especialistas em sistemas de abastecimento hidráulico e também dos conhecimentos adquiridos nos testes iniciais.

### **5.3 VARIÁVEIS DE ENTRADA (ROTAÇÃO DO MOTOR E PRESSÃO NO SISTEMA)**

As variáveis de entrada correspondem a dados reais que o sistema fornece ao controlador, para servir de subsídios para sua tomada de decisão.

Na modelagem do sistema, as duas entradas “rotação do motor” e “pressão no sistema” são denominadas RM e PS, e são referidas como variáveis lingüísticas Fuzzy de entrada do controlador. Tanto para a variável RM como PS, utilizou-se cinco vetores de pertinência para composição das funções de pertinência.

O espaço ou universo de discurso da variável RM foi delimitado entre 0 e 10,5, que corresponde à faixa de tensão de comando transmitida ao conversor de frequência, utilizado para acionar o motor de indução trifásico, sendo 0, correspondente a 0 V (motor parado) e 10,5, correspondente a 10,5 V (motor em sua velocidade de rotação nominal).

O espaço ou universo de discurso da variável PS foi delimitado entre 0 e 60, que corresponde à pressão na rede em metros de coluna d'água (0 – 60 mca).

### **5.4 VARIÁVEL DE SAÍDA (DELTA DE ROTAÇÃO)**

A saída do controlador refere-se a um delta de rotação relativamente pequeno. Tal valor deve ser aplicado à velocidade de rotação do motor. O controlador disponibilizará um incremento positivo ou negativo, que somado a velocidade de rotação inicial ajustará a rotação do sistema adequando-a à vazão requerida, em função da pressão na linha de operação.

Na modelagem do sistema, a saída “Delta de Rotação”, foi denominada DR e é referida como variáveis lingüísticas Fuzzy de saída do controlador.

Este Delta de Rotação está diretamente relacionado com a pressão disponível no sistema e a velocidade de rotação de funcionamento instantâneo do motor. Para o Delta de Rotação foram utilizadas cinco funções de pertinência distintas (ver descrição das funções de pertinência). Seu universo de discurso está compreendido entre -0,1 e 0,1 rpm, sendo o valor negativo da variável DR responsável por uma diminuição da velocidade de rotação e os positivos responsáveis por um aumento da mesma.

Na Figura 5.1 mostram-se as variáveis de entrada e de saída do sistema de controle fuzzy.

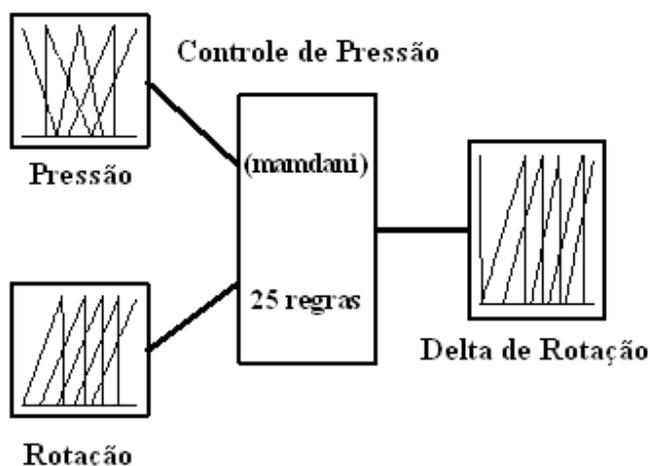


Figura 5. 1- Sistema de controle de pressão: 2 entradas, 1 saída, 25 regras.

## 5.5 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DO SISTEMA DE CONTROLE

Uma vez identificadas as variáveis lingüísticas, desenvolveram-se as funções de pertinência com seus respectivos universos de discurso e seus valores lingüísticos.

Segundo SANTOS (2003), a função de pertinência mostra o grau de atribuição de um elemento em relação a um determinado conjunto. Também chamada de função característica, ela associa a cada elemento “x” pertencente à função “A” um número real no intervalo [0 1].

Este valor representa o grau de possibilidade de que o elemento “x” venha a pertencer ao conjunto “A”.

As funções matemáticas utilizadas como funções de pertinência, para as variáveis lingüísticas foram funções triangulares, trapezoidais e Singleton. Segundo SHAW e SIMÕES (2004) a quantidade de funções em um universo de discurso e seu formato são escolhidos com base na experiência, na natureza do processo a ser controlado ou numa entrevista com um operador humano especializado, que realize as funções de controle manualmente. Ainda segundo SHAW e SIMÕES (2004), os formatos mais freqüentemente encontrados são triangulares e trapezoidais, pois são gerados com facilidade.

### **5.5.1 Função de Pertinência Variável Rotação do Motor (RM)**

A função matemática utilizada para essa variável lingüística foi a trapezoidal. Esse tipo de função se caracteriza pela existência de um patamar superior, sendo portanto necessário quatro parâmetros para sua caracterização: base esquerda, topo esquerda, topo direita e base direita.

À variável de entrada RM foram associadas cinco funções de pertinência: MIN (rotação muito baixa), ROT2 (rotação baixa), ROT3 (rotação média), ROT4 (rotação alta), MAX (rotação nominal). Estas cinco funções de pertinência foram implementadas para servirem de subsídios na escolha da variável de saída, servindo de parâmetro na escolha de um maior ou menor delta de rotação. MIN é uma rotação extremamente baixa, próximo ao estado de repouso do motor, o que possibilita um grande incremento positivo de rotação, ROT2 é uma segunda faixa de rotação, um pouco maior do que a anterior, porém ainda muito baixa, ROT3 é a faixa de rotação intermediária a rotação nominal do motor, ROT4 é uma rotação considerada alta e que já não suporta grandes incrementos positivos e MAX é a última faixa, chegando a alcançar os valores de rotação nominal estando susceptível apenas a valores de incremento negativo.

Na Figura 5.2 são apresentadas as funções de pertinência relacionadas à variável lingüística “Rotação do Motor”.

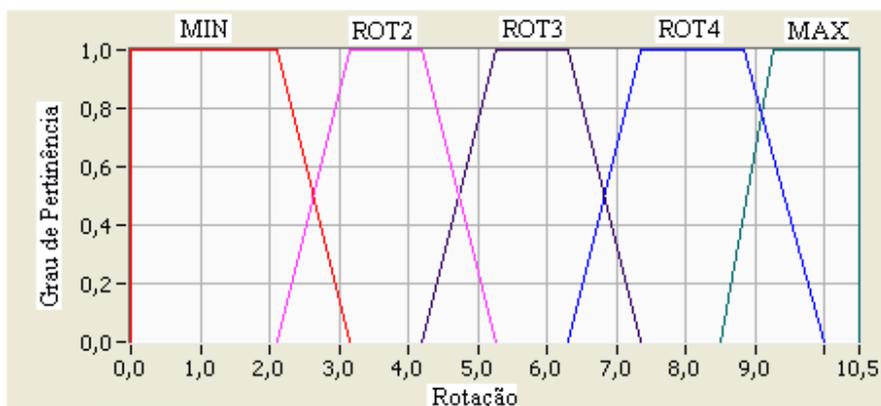


Figura 5. 2 - Funções de pertinência variável linguística “Rotação do Motor”.

Tomando-se como base a velocidade de rotação do motor, a faixa MIN começa com um grau de pertinência máxima (1) em zero, isto é, motor completamente parado (o universo de discurso é de 0 a 10), chegando ao grau de pertinência mínima em 3,15, resultando nos seguintes parâmetros  $MIN[0\ 0\ 2,10\ 3,15]$ . Quando o sistema de controle estiver atuando, uma velocidade de rotação nesta faixa, recebe inicialmente um incremento maior que uma rotação em faixas superiores, conforme será definido no item Base de Regras; a rotação ROT2 começa com pertinência mínima a partir do valor 2,10 no universo de discurso e termina com valor mínimo (zero) no valor 5,25 do UD. Nesse intervalo alcança o valor máximo de pertinência entre os valores 3,15 e 4,20 ( $ROT2[2,10\ 3,15\ 4,20\ 5,25]$ ). A mesma consideração é feita também para o ROT3, a função inicia em 4,2 com valor zero para o grau de pertinência e termina também com valor zero de pertinência em 7,35, com intervalo de pertinência máxima entre 5,25 e 6,30 ( $ROT3[4,20\ 5,25\ 6,30\ 7,35]$ ); ROT4 inicia no mínimo em 6,3, terminando também com mínima pertinência em 10, tendo um patamar de pertinência máxima no intervalo de 7,35 a 8,85 ( $ROT4[6,30\ 7,35\ 8,85\ 10,00]$ ). E por fim a função MAX inicia com pertinência mínima em 8,50, alcançando a máxima em 9,25 ( $MAX[8,50\ 9,25\ 10,50\ 10,50]$ ).

A tabela 5.1 mostra um resumo de todas as características da variável rotação do motor.

Tabela 5. 1 - Características da variável “Rotação do Motor”.

<b>Variável Lingüística: Rotação do Motor</b>			
<b>Universo de Discurso: 0-10</b>			
<b>Função (valores lingüísticos)</b>	<b>Denominação</b>	<b>Forma</b>	<b>Faixa de Função (parâmetros)</b>
Rotação muito baixa	MIM	Trapezoidal	[0 0 2,10 3,15]
Rotação baixa	ROT2	Trapezoidal	[2,10 3,15 4,20 5,25]
Rotação média	ROT3	Trapezoidal	[4,20 5,25 6,30 7,35]
Rotação alta	ROT4	Trapezoidal	[6,30 7,35 8,85 10,00]
Rotação nominal	MAX	Trapezoidal	[8,50 9,25 10,50 10,50]

### 5.5.2 Função de Pertinência Variável Pressão no Sistema (PS)

Uma das funções utilizadas para essa variável, assim como para a variável lingüística “rotação no motor”, foi a trapezoidal. Sendo necessário, portanto, quatro parâmetros para sua caracterização: base esquerda, topo esquerda, topo direita e base direita. Também foi utilizada para definição da variável pressão a função Singleton, que é definida com um único parâmetro.

A variável de entrada “PS” foi associada a cinco funções de pertinência: MB (pressão muito baixa), BA (pressão baixa), OT (pressão ótima), AL (pressão alta), MA (pressão muito alta). Juntamente com as demais funções de pertinência da variável lingüística rotação do motor estas cinco funções de pertinência também foram implementadas para servirem de subsídios na escolha da variável de saída, servindo de parâmetro na escolha de um maior ou menor delta de rotação.

Para o seu desenvolvimento foi determinado MB como uma pressão extremamente baixa, impraticável em sistemas de abastecimento de água, o que exige um grande incremento positivo de rotação, BA como uma segunda faixa de pressão, que já apresenta valores aceitáveis, porém ainda não são os ideais, OT é um valor de pressão intermediária, apresentando valores ótimos de pressão, AL são pressões altas e desnecessárias e que devem ser aplicado um delta de rotação negativo a fim de reduzi-las, MA é a última faixa, alcançando

valores extremamente altos e produzindo pressões (energia) que provavelmente não será utilizada e sim desperdiçadas.

Na Figura 5.3 são apresentadas as funções de pertinência relacionadas à variável lingüística “Pressão do Sistema”.

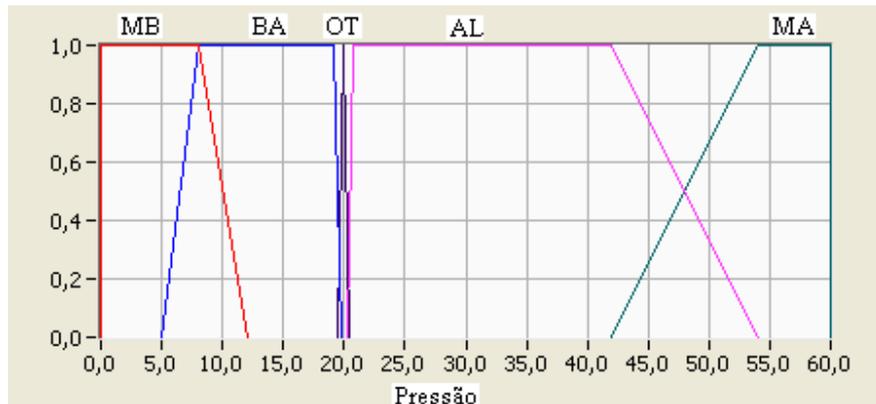


Figura 5. 3 - Funções de pertinência variável lingüística “Pressão do Sistema”.

Segundo TSUTIYA (2006), os valores ideais de pressão requeridos em uma rede de abastecimento, estão entre 15 e 40 mca. Tomando-se como base esses números, adotou-se como pressão ótima 20 mca. Dessa forma, para a faixa MB, foi utilizada a função trapezoidal e inicia com grau de pertinência máxima em zero, isto é, o sistema sem pressão (o universo de discurso é de 0 a 60), chegando ao grau de pertinência mínima em 12,11. Resultando nos seguintes parâmetros: (MB [0 0 8 12,11]). Quando o sistema de controle estiver atuando, isto significa que uma pressão nesta faixa exige um incremento maior que uma pressão em faixas superiores; a pressão BA começa com pertinência mínima a partir do valor 5 no universo de discurso e termina com valor mínimo (zero) no valor 19,8 do UD. Nesse intervalo alcança o valor máximo de pertinência entre os valores 8 e 19,2 (BA[5 8 19,2 19,8]). Para a faixa OT foi utilizada a função “Singleton”, representada por um grau de pertinência máxima no valor 20 (OT[20]); na função AL, novamente utiliza-se a função trapezoidal, iniciando no mínimo em 20,2, terminando também com mínima pertinência em 54, tendo um patamar de pertinência máxima no intervalo de 20,8 a 42 (AL[20,8 26 42 54]). E por fim, também com função trapezoidal, a função MA inicia com pertinência mínima em 42, alcançando a máxima em 54 (MA [42 54 60 60]).

A tabela 5.2 mostra um resumo de todas as características da variável pressão do sistema.

Tabela 5. 2 - Características da variável “Pressão do Sistema”.

<b>Variável Lingüística: Pressão do Sistema</b>			
<b>Universo de Discurso: 0-60</b>			
<b>Função (valores lingüísticos)</b>	<b>Denominação</b>	<b>Forma</b>	<b>Faixa de Função (parâmetros)</b>
Pressão muito baixa	MB	Trapezoidal	[0 0 8 12,11]
Pressão baixa	BA	Trapezoidal	[5 8 14 19,2]
Pressão ótima	OT	Singleton	[20]
Pressão alta	AL	Trapezoidal	[20,2 20,8 42 54]
Pressão muito alta	MA	Trapezoidal	[42 54 60 60]

### 5.5.3 Função de Pertinência Variável Delta de Rotação (DR)

As funções matemáticas utilizadas para essa variável lingüística foram a trapezoidal, a Singleton, já descritas anteriormente, e a triangular, que é definida por três parâmetros: base esquerda, centro e base direita.

À variável de saída DR, foram associadas cinco funções de pertinência: AN (delta alto negativo), BN (delta baixo negativo), ZE (delta zero), BP (delta baixo positivo), AP (delta alto positivo). Essa função de pertinência é determinada a partir das funções de entrada e representa os vários valores que podem ser implementados à velocidade de rotação do motor, conforme a necessidade do sistema. AN é um delta de rotação negativo de módulo alto, utilizado para reduzir as pressões na rede, pois quando implementado irá diminuir a velocidade de rotação no motor, BN é um delta de rotação também negativo, porém com um valor em módulo menor, ZE é um delta de rotação próximo a zero, implementado em situações onde a pressão está ideal, BP é um delta de rotação positivo de módulo baixo, utilizado para aumentar a pressão na rede, pois quando implementado irá subir a velocidade de rotação do motor, AP é um delta de rotação positivo, porém a uma taxa maior de crescimento.

Na Figura 5.4 são apresentadas as funções de pertinência relacionadas à variável lingüística “Delta de rotação”.

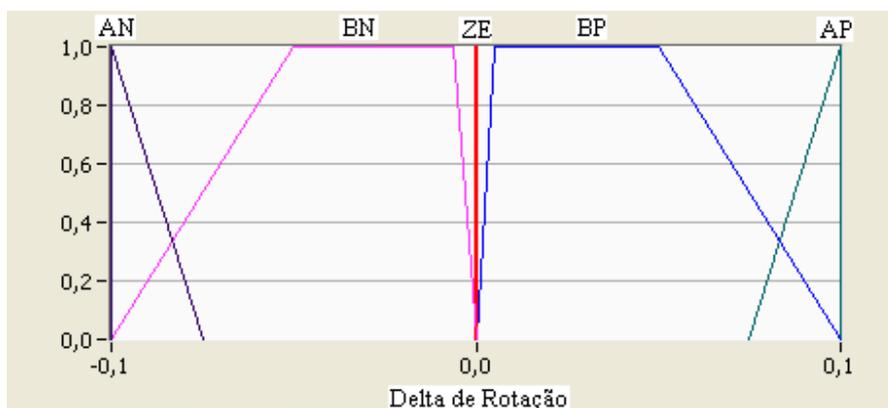


Figura 5. 4 - Funções de pertinência variável lingüística “Delta de Rotação”.

Foram utilizados os seguintes valores para cada uma das faixas do DR: a faixa AN, utiliza a função matemática triangular e começa com um grau de pertinência máxima em -0,1 (o universo de discurso é de -0,1 até 0,1), alcançando os valores mínimos em 0,08, resultando nos seguintes parâmetros: (AN [-0,1 -0,1 -0,08]); o delta de rotação BN utiliza a função matemática trapezoidal, começa com pertinência mínima a partir do valor -0,1 no universo de discurso e termina com valor mínimo (zero) no valor zero do UD. Neste intervalo alcança o valor máximo de pertinência no patamar -0,05 a -0,01 (BN[-0,1 -0,05 -0,01 0]). A função ZE, do tipo Singleton, tem ponto máximo em zero (ZE [0]); A função BP, novamente trapezoidal, inicia em 0,0 para o grau de pertinência mínimo e vai ao máximo no patamar de 0,01 a 0,05 e volta a zero em 0,1 (BP[0 0,01 0,05 0,1]). Por fim, a função AP, triangular, inicia com pertinência mínima em 0,08 alcançando a máxima em 0,1 (AP[0,08 0,1 0,1]).

A tabela 5.3 mostra um resumo de todas as características da variável delta de rotação.

Tabela 5. 3 - Características da variável Delta de Rotação.

<b>Variável Lingüística: Delta de Rotação</b>			
<b>Universo de Discurso: -0,1 – 0,1</b>			
<b>Função (valores lingüísticos)</b>	<b>Denominação</b>	<b>Forma</b>	<b>Faixa de Função (parâmetros)</b>
Delta alto negativo	NA	Triangular	[-0,1 -0,1 -0,08]
Delta baixo negativo	BN	Trapezoidal	[-0,1 -0,05 -0,01 0]
Delta zero	ZE	Singleton	[0]
Delta baixo positivo	BP	Trapezoidal	[0 0,01 0,05 0,1]
Delta alto positivo	AP	Triangular	[0,08 0,1 0,1]

## 5.6 BASE DE REGRAS E PROCESSO DE INFERÊNCIA

Com as funções de pertinência definidas e seus respectivos valores lingüísticos, foram criadas vinte e cinco regras de inferência. Tais regras foram definidas levando em conta a pressão no sistema, relacionando-a com a velocidade de rotação do motor. Na Tabela 5.4, são apresentadas as regras estabelecidas para o controlador Fuzzy. Observa-se que os valores utilizados na base de regras são valores Fuzzy do universo de discurso de cada variável do sistema de controle, não demonstrando valores diretamente numéricos.

Tabela 5. 4 - Base de Regras para o controlador Fuzzy.

1. Se a PRESSÃO é MB e a ROTAÇÃO é MIN, então o DELTA é AP.
2. Se a PRESSÃO é MB e a ROTAÇÃO é ROT2, então o DELTA é AP.
3. Se a PRESSÃO é MB e a ROTAÇÃO é ROT3, então o DELTA é BP.
4. Se a PRESSÃO é MB e a ROTAÇÃO é ROT4, então o DELTA é BP.
5. Se a PRESSÃO é MB e a ROTAÇÃO é MAX, então o DELTA é BP.

6. Se a PRESSÃO é BA e a ROTAÇÃO é MIN, então o DELTA é AP.
7. Se a PRESSÃO é BA e a ROTAÇÃO é ROT2, então o DELTA é AP.
8. Se a PRESSÃO é BA e a ROTAÇÃO é ROT3, então o DELTA é BP.
9. Se a PRESSÃO é BA e a ROTAÇÃO é ROT4, então o DELTA é BP.
10. Se a PRESSÃO é BA e a ROTAÇÃO é MAX, então o DELTA é ZE.
11. Se a PRESSÃO é OT e a ROTAÇÃO é MIN, então o DELTA é ZE.
12. Se a PRESSÃO é OT e a ROTAÇÃO é ROT2, então o DELTA é ZE.
13. Se a PRESSÃO é OT e a ROTAÇÃO é ROT3, então o DELTA é ZE.
14. Se a PRESSÃO é OT e a ROTAÇÃO é ROT4, então o DELTA é ZE.
15. Se a PRESSÃO é OT e a ROTAÇÃO é MAX, então o DELTA é ZE.
16. Se a PRESSÃO é AT e a ROTAÇÃO é MIN, então o DELTA é ZE.
17. Se a PRESSÃO é AT e a ROTAÇÃO é ROT2, então o DELTA é BN.
18. Se a PRESSÃO é AT e a ROTAÇÃO é ROT3, então o DELTA é BN.
19. Se a PRESSÃO é AT e a ROTAÇÃO é ROT4, então o DELTA é BN.
20. Se a PRESSÃO é AT e a ROTAÇÃO é MAX, então o DELTA é AN.
21. Se a PRESSÃO é MA e a ROTAÇÃO é MIN, então o DELTA é BN.
22. Se a PRESSÃO é MA e a ROTAÇÃO é ROT2, então o DELTA é BN.
23. Se a PRESSÃO é MA e a ROTAÇÃO é ROT3, então o DELTA é AN.
24. Se a PRESSÃO é MA e a ROTAÇÃO é ROT4, então o DELTA é AN.
25. Se a PRESSÃO é MA e a ROTAÇÃO é MAX, então o DELTA é AN.

Observa-se que devido a configuração do sistema, a quantidade de regras do controlador pode ser reduzida a vinte e uma, pois a condição de pressão ótima, induz a apenas um tipo de decisão, independente da velocidade de rotação do motor, convertendo cinco regras em apenas uma. Dessa forma utilizou-se as seguintes regras, mostradas na Tabela 5.5:

Tabela 5. 5 - Base de Regras para o controlador Fuzzy (otimizada).

1. Se a PRESSÃO é MB e a ROTAÇÃO é MIN, então o DELTA é AP.
2. Se a PRESSÃO é MB e a ROTAÇÃO é ROT2, então o DELTA é AP.

3. Se a PRESSÃO é MB e a ROTAÇÃO é ROT3, então o DELTA é BP.
4. Se a PRESSÃO é MB e a ROTAÇÃO é ROT4, então o DELTA é BP.
5. Se a PRESSÃO é MB e a ROTAÇÃO é MAX, então o DELTA é BP.
6. Se a PRESSÃO é BA e a ROTAÇÃO é MIN, então o DELTA é AP.
7. Se a PRESSÃO é BA e a ROTAÇÃO é ROT2, então o DELTA é AP.
8. Se a PRESSÃO é BA e a ROTAÇÃO é ROT3, então o DELTA é BP.
9. Se a PRESSÃO é BA e a ROTAÇÃO é ROT4, então o DELTA é BP.
10. Se a PRESSÃO é BA e a ROTAÇÃO é MAX, então o DELTA é ZE.
<b>11. Se a PRESSÃO é OT, então o DELTA é ZE.</b>
12. Se a PRESSÃO é AT e a ROTAÇÃO é MIN, então o DELTA é ZE.
13. Se a PRESSÃO é AT e a ROTAÇÃO é ROT2, então o DELTA é BN.
14. Se a PRESSÃO é AT e a ROTAÇÃO é ROT3, então o DELTA é BN.
15. Se a PRESSÃO é AT e a ROTAÇÃO é ROT4, então o DELTA é BN.
16. Se a PRESSÃO é AT e a ROTAÇÃO é MAX, então o DELTA é AN.
17. Se a PRESSÃO é MA e a ROTAÇÃO é MIN, então o DELTA é BN.
18. Se a PRESSÃO é MA e a ROTAÇÃO é ROT2, então o DELTA é BN.
19. Se a PRESSÃO é MA e a ROTAÇÃO é ROT3, então o DELTA é AN.
20. Se a PRESSÃO é MA e a ROTAÇÃO é ROT4, então o DELTA é AN.
21. Se a PRESSÃO é MA e a ROTAÇÃO é MAX, então o DELTA é AN.

A Figura 5.5 ilustra a superfície de controle adotada para o controlador, unindo as três variáveis no mesmo sistema de eixos:

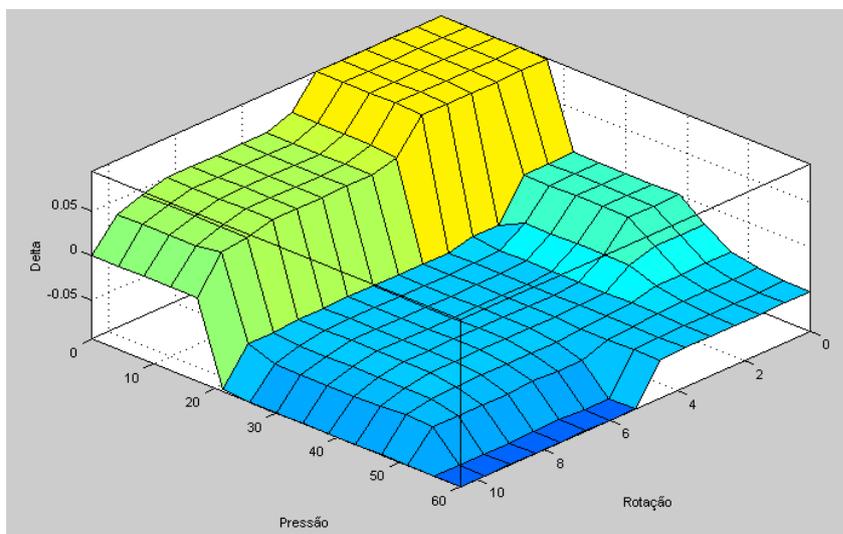


Figura 5. 5 - Superfície de Controle (base de regras).

Na tabela 5.6, apresenta-se a matriz associativa do controlador.

Tabela 5. 6 - Matriz associativa do controlador.

		ROTAÇÃO				
		MIN	ROT2	ROT3	ROT4	MAX
PRESSÃO	MB	AP	AP	BP	BP	ZE
	BA	AP	AP	BP	BP	ZE
	OT	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	AL	ZE	BN	BN	BN	AN
	MA	BN	BN	AN	AN	AN

Foi implementado o modelo Fuzzy tipo Mamdani, pois possibilita o rápido desenvolvimento de um controlador para um sistema físico, mesmo se o projetista não dispuser de um rigoroso modelo matemático do sistema a ser controlado.

Dessa forma, as variáveis lingüísticas foram então usadas para modelar o conhecimento intuitivo dos operadores do sistema e assim desenvolver as regras fuzzy tipo Mamdani que produzirão o controle.

O método de defuzzificação adotado foi o centro de máximo.

## 5.7 CARACTERÍSTICAS DO CONTROLADOR (RESUMO)

A Tabela 5.7, apresenta um resumo de todas as especificações do controlador utilizado:

Tabela 5. 7 - Características do Controlador.

<b>Controlador:</b>	Fuzzy
<b>Modelo:</b>	Mamdani
<b>Ferramenta Computacional:</b>	Fuzzy Logic Control (LabVIEW™)
<b>Nº de entradas:</b>	2
<b>Nº de saídas:</b>	1
<b>Entradas:</b>	Pressão do Sistema Rotação no Motor
<b>Saída:</b>	Delta de Rotação
<b>Nº de Regras:</b>	25
<b>Nº de Regras (otimizada):</b>	21
<b>Método de Defuzzificação:</b>	Centro de Máximo

## **CAPÍTULO VI**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **6.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo, apresenta-se os dados dos experimentos, realizando-se uma discussão sobre os resultados alcançados. Nas experiências foram aplicados todos os conhecimentos e técnicas desenvolvidos nos capítulos anteriores.

Como descrito anteriormente, foram realizados três experimentos, sendo dois de caráter comparativo (simulando uma situação de abastecimento sem controlador e outra com o controle fuzzy proposto) e um terceiro sendo aplicados degraus de entrada, a fim de testar a robustez do controlador.

Em todos os experimentos controlados (segundo e terceiro) o controlador fuzzy foi desenvolvido na Fuzzy Logic Toolbox do LabVIEW™, o qual também serviu de ambiente computacional para criar a interface com o operador.

#### **6.2 EXPERIMENTOS**

Foram simuladas três situações diferentes:

- Sistema funcionando com o simulador de demanda com o motor alimentado diretamente da rede elétrica (experimento 01).

- Sistema funcionando com o simulador de demanda com o motor alimentado pelo conversor de frequência e controlado pela lógica fuzzy (experimento 02).
- Sistema submetido a uma alteração brusca controlado pela lógica fuzzy (experimento 03).

A função da realização do terceiro experimento foi testar a robustez do controlador, verificando seu comportamento em situações extremas.

### 6.2.1 Experimento 01 e 02:

Todas as ações do controlador foram decorrentes de perturbações no sistema. Os experimentos 01 e 02 foram submetidos a uma demanda variável, provenientes do simulador de demanda. Para ambos os experimentos, inicialmente o sistema se encontrava em repouso.

A Figura 6.1 apresenta os resultados relativos à pressão obtidos nos dois experimentos:

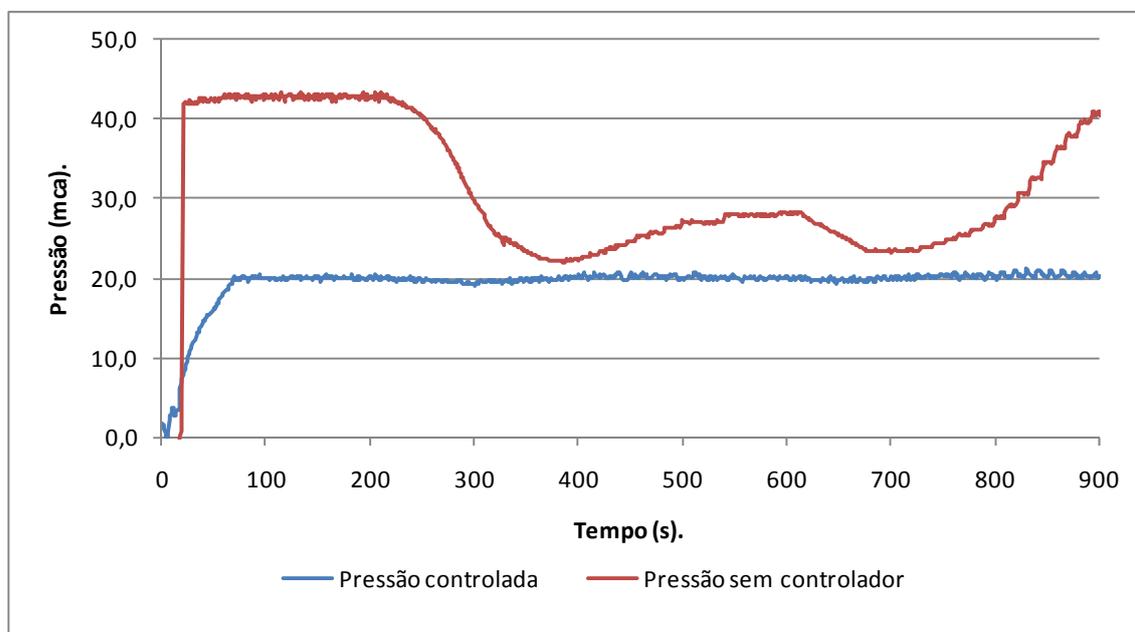


Figura 6. 1 - Curvas de pressão do sistema controlado e sem controlador.

Observa-se que para o experimento com o sistema sem controlador, a pressão oscila conforme a demanda. É evidente que, em momento algum, a pressão atinge valores inferiores a 20 mca, atendendo às necessidades mínimas de abastecimento. Em grande parte do período existe uma pressão excessiva na rede, tornando a instalação ineficiente.

No experimento com pressão controlada, os períodos com pressão excessiva foram suprimidos através da ação do conversor de frequência. Com o controlador fuzzy atuando, a velocidade de rotação da bomba varia, diminuindo o consumo de energia, melhorando, conseqüentemente, a eficiência do sistema.

A Figura 6.2, apresenta um comparativo da variação de velocidade de rotação do motor. No experimento 01 o conjunto trabalha com a rotação nominal (3440 rpm), enquanto que no experimento 02, com a atuação do controlador e do conversor de frequência, percebe-se a redução da velocidade de rotação nos períodos de menor demanda e uma rotação próxima à nominal nos períodos de maior demanda.

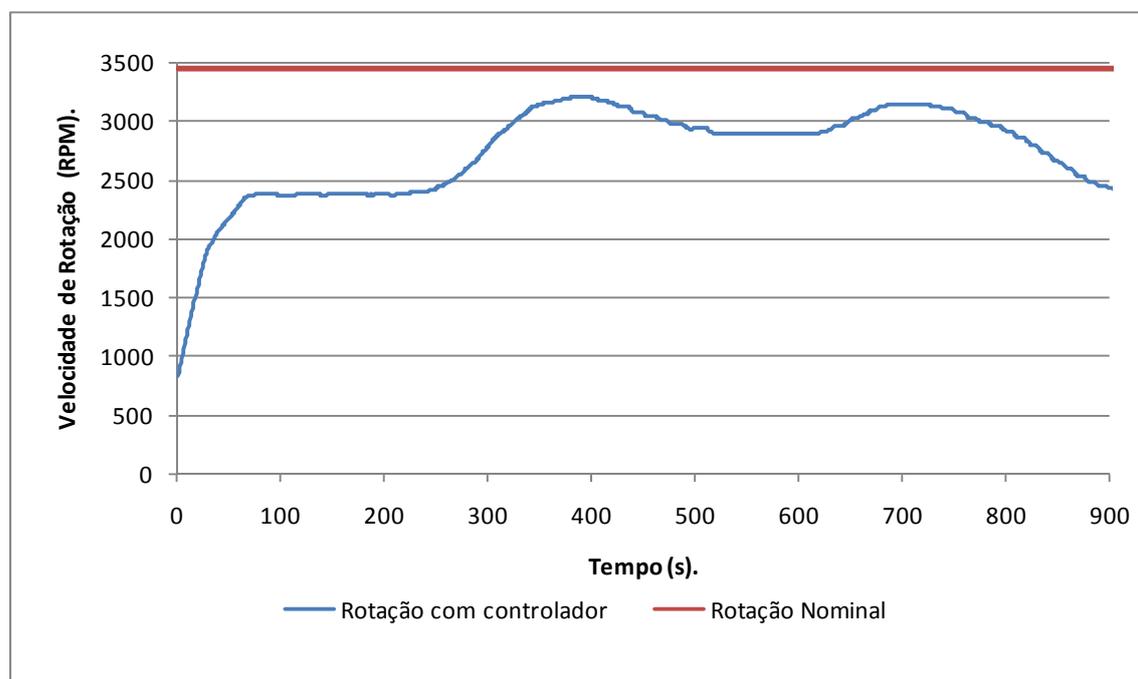


Figura 6. 2 - Rotação do motor com aplicação do controlador.

Como explicado no capítulo anterior, toda ação enviada pelo controlador ao motor é feita por meio de um incremento, delta de rotação, que sendo positivo ou negativo tem o poder de aumentar ou diminuir, respectivamente, a pressão do sistema. A Figura 6.3 mostra a variação do delta de rotação durante a realização do experimento 02.

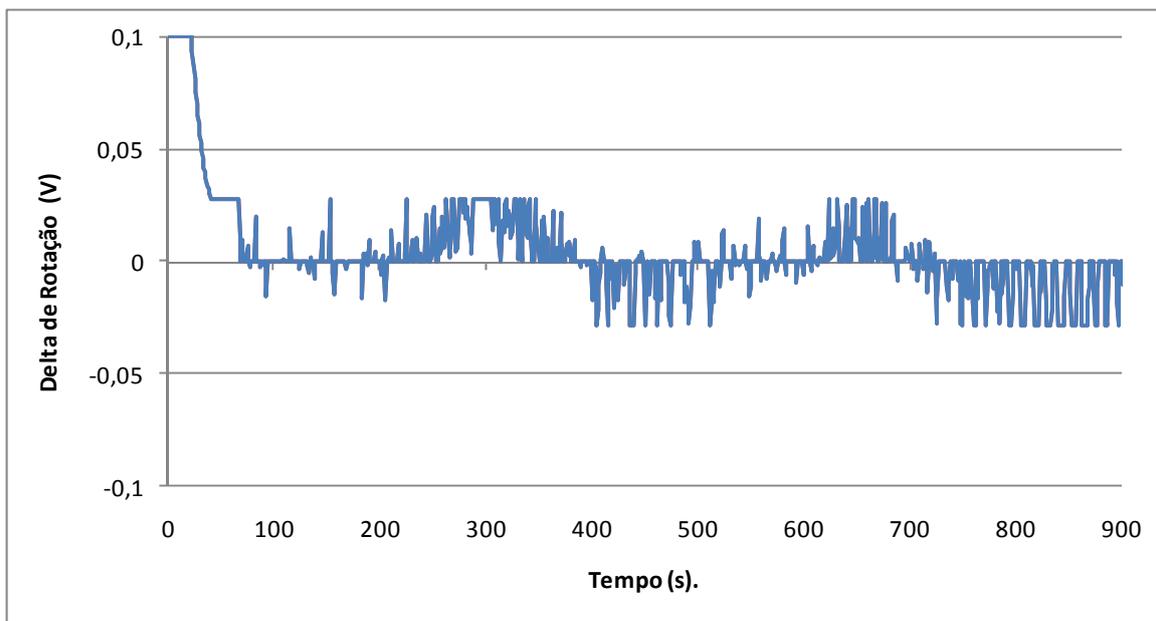


Figura 6. 3 - Delta de rotação.

Através da Figura 6.3 percebe-se claramente a decisão assumida pelo controlador, tomando valores positivos para os instantes em que se necessitava de mais pressão na rede e negativos para instantes de uma necessidade de pressões menores.

Paralelamente ao estudo das pressões, realizou-se uma análise do consumo energético em ambas as situações. Os dados foram registrados usando o analisador de energia. A aquisição de dados foi feita a cada 2 segundos, gerando uma massa de 450 amostras, que suscitou nos gráficos mostrados na Figura 6.4:

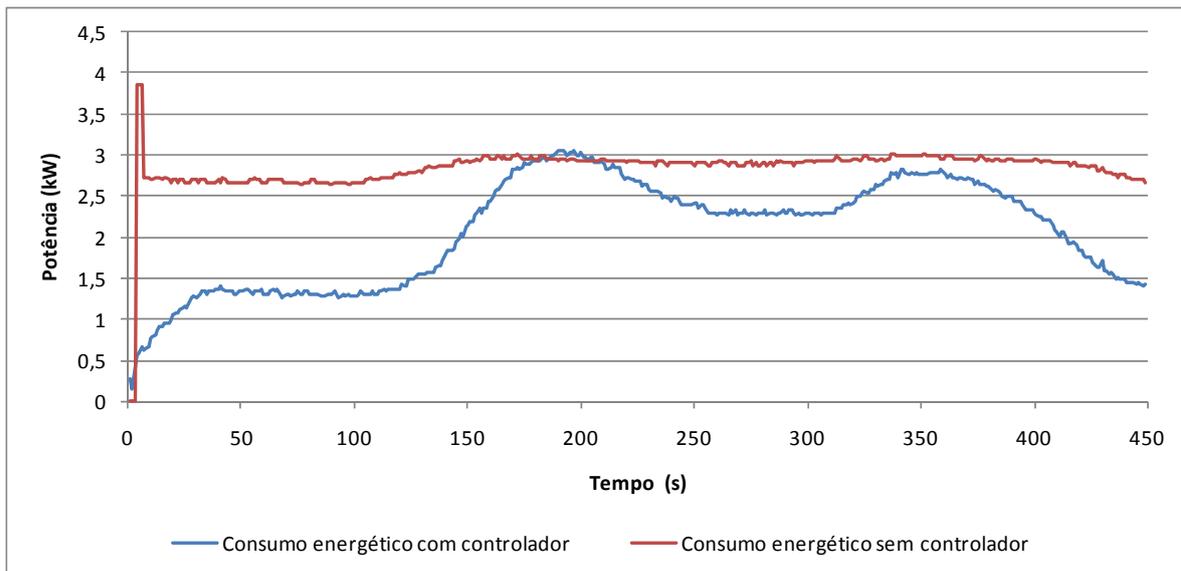


Figura 6. 4 - Consumo energético dos motores.

Percebe-se que o consumo energético do sistema sem controlador possui apenas uma leve variação, durante todo experimento, com exceção do pico inicial provocado pelo acionamento do motor. No sistema com controlador observa-se uma oscilação no consumo proporcional a velocidade de rotação do motor.

Como era esperado o consumo energético do motor, utilizando conversor de frequência, foi menor do que o consumo do motor alimentado diretamente pela rede elétrica, mostrado no quadro 6.1.

Tabela 6. 1 - Comparativo de consumo energético dos motores.

Situação	Energia Consumida no experimento (900s).Wh	Consumo diário. kWh.
Sem controlador	710,50	68,21
Com controlador	515,94	49,53

O consumo energético diário do sistema diminuiu de 68,21 para 49,53 kWh representando uma economia de 27,4%.

Outro resultado expressivo, facilmente analisado através da Figura 6.4 é a ausência de corrente de pico na partida do motor com a utilização do conversor de frequência. A corrente de pico é extremamente maléfica para o motor, diminuindo sua vida útil além de superar instantaneamente a potência requerida pelo sistema, provocando penalidade ao consumidor. No experimento a corrente de pico alcançou um valor 33% maior do que o valor de serviço. Com a utilização do conversor de frequência a corrente consumida apresentou incrementos gradativos.

É importante destacar, também, que o conversor de frequência provocou perdas de cerca de 5% da energia total do sistema, ocasionando um decréscimo de rendimento energético do motor. Entretanto, estas perdas são pequenas quando comparadas com a economia gerada. Porém, isto justifica o fato de mesmo não ter alcançado a velocidade de rotação nominal o consumo energético nas medições entre 187 e 205 segundos (Figura 6.4), serem superiores ao consumo em condições normais.

Finalmente, observando a Figura 6.5, pode-se fazer uma análise completa da ação do controlador. Nela está representada a pressão controlada, a pressão sem a ação do controlador e o delta de rotação (resposta do controlador).

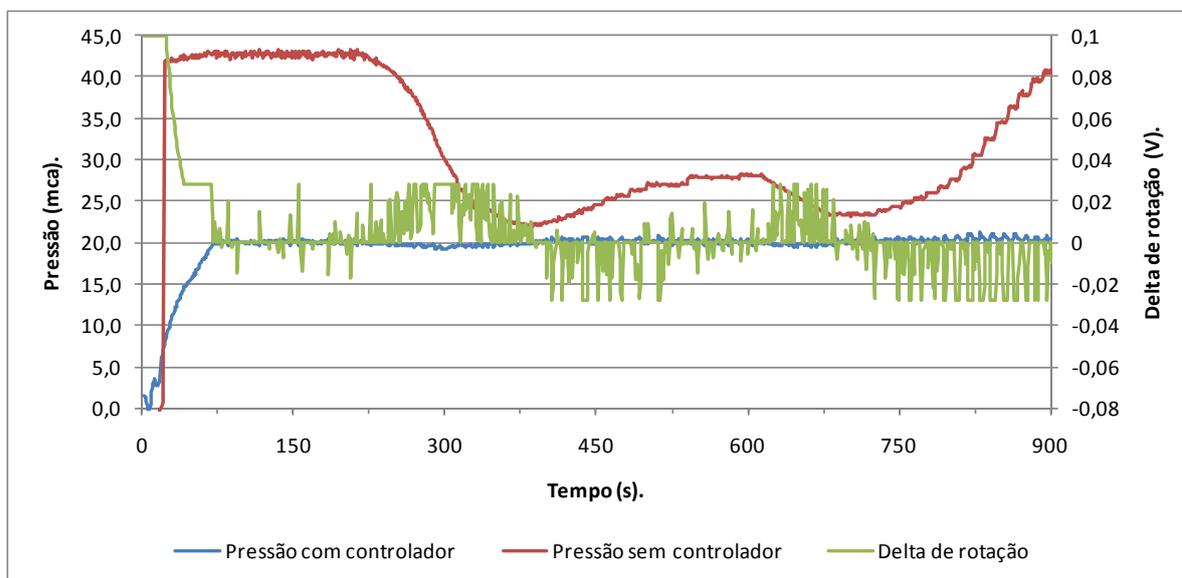


Figura 6. 5 - Comportamento geral do sistema.

Antes de o sistema alcançar a estabilidade toda a sua ação (delta de rotação) responde ao estado da “pressão com controlador”, logo, da aquisição 0 a 73 (Figura 6.5) o delta de rotação é positivo, pois a pressão é inferior a 20 mca.

A partir do ponto de estabilização da pressão (73 – Figura 6.5), as ações do sistema respondem ao estado da “pressão sem controlador”, com o objetivo de manter a “pressão controlada” no valor ideal de 20 mca. Desta forma, percebe-se que sempre que a “pressão sem controlador” está na forma descendente (por exemplo, da aquisição 230 a 386), o delta de rotação atinge valores positivos, que significa que houve uma redução na pressão demandada pelo sistema. Quando está na forma ascendente (por exemplo, da aquisição 735 a 900), que significa um aumento na pressão da rede, o delta de rotação assume valores negativos, sempre buscando a manutenção da pressão na rede.

Na Figura 6.6 apresenta-se o gráfico das vazões para os dois experimentos.

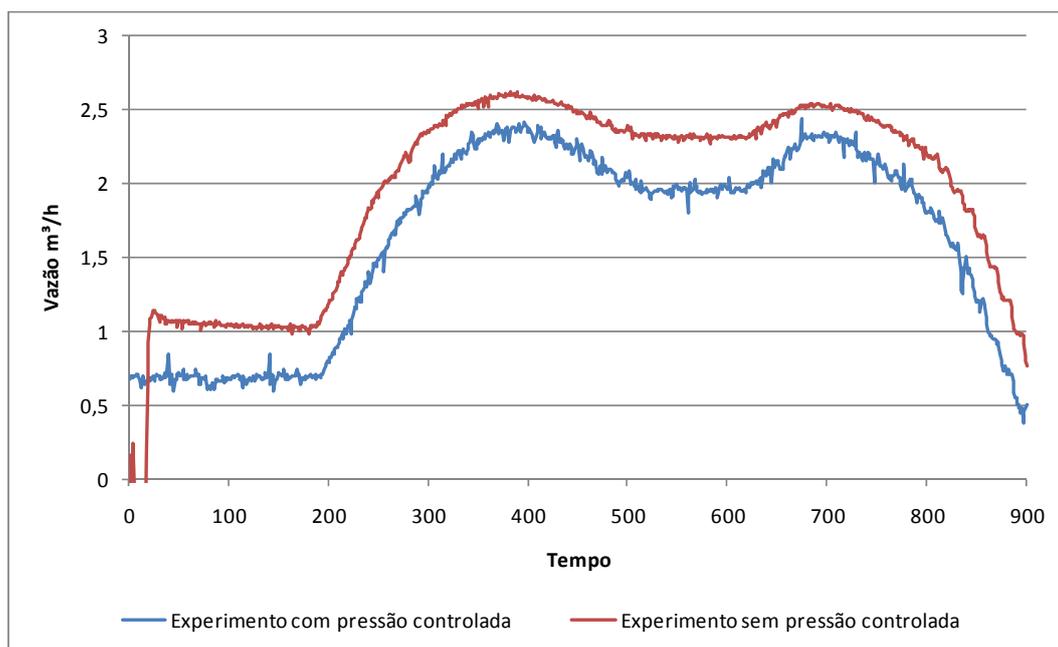


Figura 6. 6 - Comparativo de vazões.

Com a utilização do controlador, e conseqüentemente com a redução da pressão, percebe-se uma leve redução na vazão, pouco significativa e influente para bom funcionamento do sistema, mas que representa uma diminuição expressiva no consumo de água. A Tabela 6.2 mostra os dados referentes ao consumo de água do sistema:

Tabela 6. 2 - Comparativo do consumo de água do sistema.

Situação	Consumo de água no experimento (900s).m <sup>3</sup>	Consumo diário m <sup>3</sup> .
Sem controlador	0,48	46,43
Com controlador	0,40	38,58

O consumo de água diário diminuiu de 46,43 m<sup>3</sup> para 38,58 m<sup>3</sup>, representando uma redução de 16,9%.

Ainda como forma de avaliar a eficiência energética do sistema experimental, utilizou-se os indicadores de Consumo Específico de Energia Elétrica (CE) e o Consumo Específico de Energia Normalizado Inclusive a Eficiência Hidráulica a jusante da bomba (CON<sub>HID</sub>).

O CE, largamente utilizado no setor, é a relação entre o consumo de energia (kWh) de um determinado grupo e o volume bombeado (m<sup>3</sup>), na unidade de tempo. Ele reflete a eficiência do conjunto motor-bomba misturada com a eficiência do sistema hidráulico a jusante da bomba.

O CON<sub>HID</sub> é definido como a quantidade média de energia gasta para elevar 1 metro cúbico de água a 100 m de desnível geométrico, mais as perdas de carga a jusante das bombas, por meio de instalações de bombeamento (CEPEL, 2006).

A metodologia dos indicadores de consumo específico compõe uma ferramenta importante na avaliação de projetos, permitindo ponderar sua qualidade do ponto de vista da eficiência energética das instalações hidráulicas, subsidiando as ações para a melhoria da eficiência nos bombeamentos.

No Tabela 6.3 abaixo, apresentam-se os valores destes parâmetros obtido dos experimentos realizados.

Tabela 6. 3 - Indicadores de consumo.

	Sistema sem Controlador	Sistema Controlado
Consumo de Energia (kWh)	68,21	49,53
CE	1,47	1,28
CON <sub>HID</sub>	37,66	32,91

A redução nos dados expressa a melhoria do sistema, que tornou-se mais eficiente.

### 6.2.2 Experimento 03:

A fim de testar a robustez do controlador, bem como obter os parâmetros que o caracterizam, foi realizado o terceiro experimento. Assim como nos casos anteriores todas as ações do controlador foram decorrentes de perturbações no sistema. O experimento 03 foi submetido a mudanças bruscas de demanda provenientes de distúrbios provocados na rede. Foram obtidos os seguintes resultados mostrados na Figura 6.7:

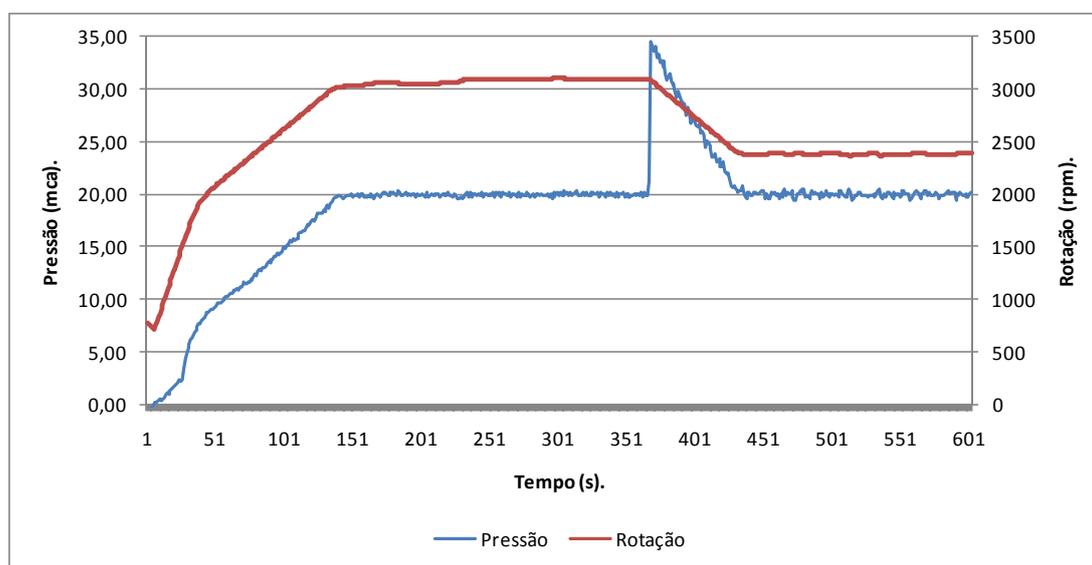


Figura 6. 7 - Pressão controlada proveniente de distúrbios na rede.

Inicialmente o sistema partiu do repouso até atingir a pressão ótima de 20 mca no ponto de aquisição 140, permanecendo a partir de então estável. A velocidade de rotação do motor sempre crescente estabiliza também no ponto de aquisição 140. A tangente da reta da velocidade de rotação do motor é proporcional ao delta de rotação, com isso percebe-se a redução do delta quando o valor da pressão alcança valores próximos de 20, mostrados com a redução da inclinação da reta.

Desse primeiro distúrbio foram obtidos os resultados expressos no Tabela 6.4:

Tabela 6. 4 - Parâmetros do sistema (1o distúrbio).

Tempo de assentamento	145 segundos.
Sobresinal	0.
Erro de regime permanente	$\pm 2,5\%$ (0,5 mca)

Após o ponto de aquisição 140, mesmo a pressão do sistema permanecendo estável, percebe-se um leve aumento na velocidade de rotação confirmando a não linearidade do sistema, justificando a utilização do método fuzzy.

No ponto de aquisição 370 foi aplicado um distúrbio no sistema em forma de degrau de 15 mca, a pressão foi elevada instantaneamente através do fechamento de uma válvula. Rapidamente o sistema de controle Fuzzy respondeu com uma redução na velocidade de rotação, retornando o valor da pressão para o patamar de controle no ponto de aquisição 430, com os parâmetros apresentados no Quadro 5.5:

Tabela 6. 5 - Parâmetros do sistema (2o distúrbio).

Tempo de assentamento	68 segundos.
Sobresinal	0.
Erro de regime permanente	$\pm 2,9\%$ (0,58 mca)

A seguir a Figura 6.8 apresenta o gráfico do erro para as duas perturbações:

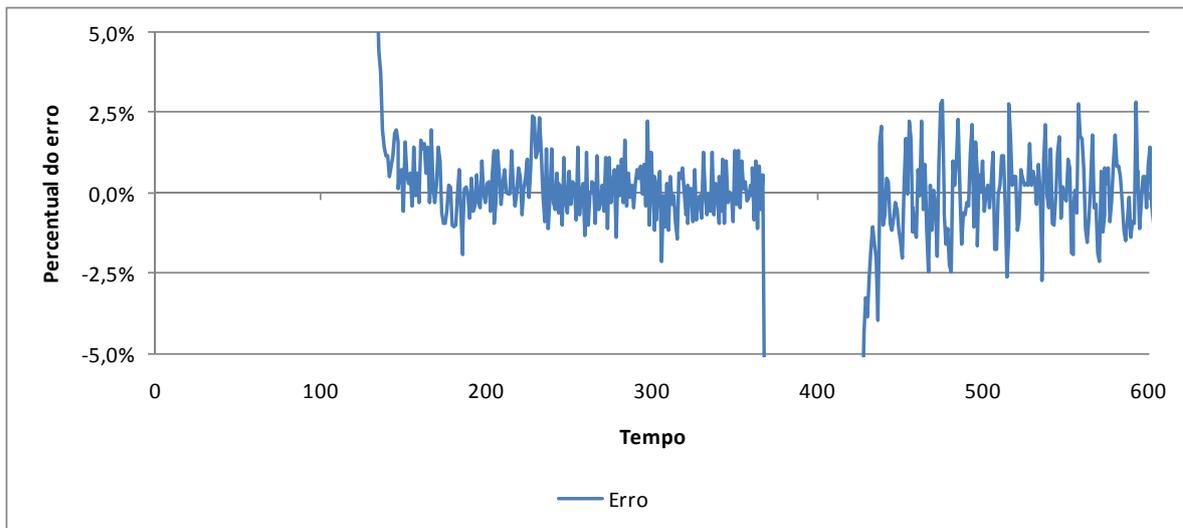


Figura 6. 8 - Erro do sistema estabilizado.

Percebe-se erros inferiores a 3% em todo o período de estabilização das perturbações, confirmando a robustez e eficácia do sistema.

Posteriormente tanto a pressão como a velocidade de rotação permanecem sem alterações até o final do experimento.

## **CAPÍTULO VII**

### **CONCLUSÕES**

O objetivo do trabalho foi desenvolver um controlador fuzzy que, através de um conversor de frequência, mantivesse, de forma automática, a pressão constante na rede, independente do consumo de água. Essa ação traz benefícios como: diminuição do desgaste das peças, do volume de vazamentos, da perda de carga e principalmente o custo com energia elétrica. Todas estas vantagens culminaram em uma questão extremamente discutida e de relevância no setor de abastecimento: a melhoria da eficiência energética e hidráulica dos sistemas de abastecimento de água.

O controlador fuzzy alcançou resultados bastante satisfatórios, creditados principalmente à forma abrangente que a lógica fuzzy modela seus sistemas, conseguindo atender as especificidades das redes de abastecimento, bastando para isso uma boa base de regras e funções de pertinência definidas coerentemente.

Nesse sentido a Lógica Fuzzy, por meio da atuação do conversor de frequência, se mostrou uma ferramenta eficaz para o controle da velocidade de rotação de conjunto motor-bomba (conseqüentemente o controle da pressão do sistema), apresentando respostas concisas e robustas, visto que as técnicas de controle convencionais nem sempre respondem bem ao alto grau de não-linearidade dos sistemas de distribuição de água.

Toda a eficiência obtida pelo controlador é creditada também à aplicação do conversor de frequência no acionamento do conjunto motor-bomba. Contudo o uso do equipamento é viável, desde que as características de funcionamento do sistema apresentem condições de operação que tenham variações de vazão nas tubulações.

Com a aplicação destas tecnologias na bancada experimental o controlador fuzzy manteve a pressão na rede constante, resultando no índice de redução do consumo de energia elétrica de 27,4%, devido a diminuição da velocidade de rotação da bomba. A diminuição da pressão proporcionou também uma redução na vazão do sistema (consumo de água) de 16,9%. Em sistemas reais a diminuição da pressão proporciona também uma redução nas perdas reais (perdas por vazamentos) tornando os sistemas mais eficiente. A pressão na rede permaneceu constante (20 mca), com uma variação inferior a 3% (erro de estado estacionário), o que confirma a estabilidade do sistema. Foi obtido também uma redução dos indicadores de consumo CE e  $CON_{HID}$  de 13,7% e 12,5% respectivamente.

Finalmente, constatou-se que em sistemas de abastecimento de água são poucos os trabalhos existentes que utilizam lógica fuzzy, sendo esta área ainda muito incipiente. Neste sentido, uma das contribuições importantes dessa dissertação é a de agregar algum conhecimento às pesquisas realizadas nessa área.

## **7.2 PERSPECTIVAS FUTURAS**

O trabalho desenvolvido nesta dissertação não encerrou conclusivamente algumas questões. Na verdade, a pesquisa apontou para um universo de aplicações e possibilidades nessa linha de pesquisa. A seguir propõe-se alguns trabalhos como continuação desta pesquisa:

- Estudar a possibilidade de se desenvolver um sistema de controle com as mesmas características deste, mas utilizando outro tipo de controle tais como neuro-fuzzy;
- Estudar além da economia energética, a economia de água e gastos operacionais, confrontando com o custo de implantação do sistema (tempo de retorno);
- Implementar o sistema proposto neste trabalho por meio de microcontroladores;
- Acrescentar Implementar ao sistema novas variáveis (válvulas e níveis de reservatórios), tornando-o ainda mais complexo e com novas possibilidades.

- Testar o controlador em Sistemas de Abastecimento Real, aplicando em campo.

## REFERÊNCIAS

ABREU, G.P., GALHO, L.A., SILVA, V.L., (2003), *Implementação de sistema automático de controle de bombeamento no sistema da abastecimento de água do SAAE de Guarulhos – SP.*

AGUIAR, H., OLIVEIRA, Jr.,(1999), *Lógica Difusa – Aspectos práticos e aplicações*, Rio de Janeiro: ed. Interciência.

ALVES, A.J., OLIVEIRA, L.F.C., OLIVEIRA, A.M.,(2001), *Verificação das relações de Rateaux pelo emprego de um conversor de frequência*”,Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.3, p.523-525.

ARAUJO, J.A.B.,(2003)”*Aplicação de conversor de frecuencia para economia de energia elétrica, em sistemas de irrigação por aspersão*”. Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências Agrônomas de Botucatu, UNESP, Botucatu, SP.

ARAUJO, L.S.,RAMOS, H.M., (2008), *Utilização Otimizada de Válvulas Redutoras de Pressão em Redes de Distribuição de Água*,Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.Belém,PA-Brasil.

BORDON, M.E.,(2004).”*Controlador Nebuloso de Arquitetura Simplificada. Estudo de Caso: Acionamento de Motor de Indução Trifásico*”.Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Brasil.

BOTURA, C.A., BOTURA, G.J., CARVALHO, J.A., et. al.,(1999), “*Lógica Difusa Aplicada ao Controle Ativo de um Combustor do Tipo Tubo de Rijke*”,Congresso Brasileiro de Redes Neurais, São José do Campos – SP- Brasil, 20-22 de Julho.

BRAGHIROLI, M.A., FREITAS, V.V., MOLINA, A.J. et. al. “*Gestão operacional para redução de perdas no sistema de abastecimento de água da unidade de negócio norte - RMSP*”

CARDOSO, R. R.;GOUVÊA C. S. E.; PINHEIRO L.E.(2004) “*Um estudo das “barreiras” organizacionais à introdução de novas tecnologias*”. Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP , Florianópolis.

CEPEL, 2006, *Indicadores relacionados ao consumo de energia utilizáveis em metodologias de avaliação hidráulica*, Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. Rio de Janeiro – RJ.

COSTA, A., et al., (2002), *Lógica Fuzzy: Conceitos e aplicações*, Exatec, UNISINOS.

DORF, R.C,BISHOP, R.H, (2001), “*Sistemas de controle modernos*”,8ª edição, Rio de Janeiro,LTC.

FERREIRA, A.L.G., PARANHOS, J.P.S.(2004), “*Controle em tempo real por lógica fuzzy*”Faculdade de Engenharia de Resende, Resende, RJ.

GOMES, H.P.,(2004), “*Dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias*”, 2ª edição,João Pessoa, Editora Universitária.

GOMES, H.P.,(2005), “*Eficiência hidráulica e energética: análise econômica de projetos*”, ed. 1, Rio de Janeiro –RJ, ABES.

GURGEL, B.B.F.A., (2006), “*proposição de um metodologia para avaliação de conversores de frequência em estações elevatórias de água estudo de casos no sistema de abastecimento*”

*de água de São José do Campos*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo-SP.

LEMOS, M.A., (2000), “*Controle Fuzzy na qualidade de imagem de um sistema de aquisição de imagens para aplicação de multas de trânsito*”. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

LIMA, F.M.C.,(2007).”*Desenvolvimento de um Sistema de Controle Fuzzy de Potencial Matricial da Água no Solo visando à Otimização de Processo de Irrigação*”. Tese de Doutorado. UFPB, Brasil.

MACINTYRE, A.J., “*Bombas e instalações de bombeamento*”,(1987), Rio de Janeiro, 2ª edição, Editora Guanabara.

MARODIN, J.K., SANTOS, L.C., TRAUTWEUIN, B. (2005),”*Impacto da automação em sistemas de abastecimento de água: aspecto de gestão do conhecimento*”, Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 18-23 setembro, Campo Grande , MS.

MARQUES, T. M. C., (2004), “*Uma abordagem para Integração de Tecnologias de Automação através do Desenvolvimento das competências Operacionais das Empresas*”. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Paraná PUC-PR. Curitiba.

MARTINS, N.S.M, (2005), “ *O mundo da incerteza: a lógica fuzzy na contemporaneidade*”, Revista Mack. Arte, pag 135.

NISE, N.S.,(2002), “*Engenharia de sistemas de controle*”,3ª edição, Rio de Janeiro, LTC.

OGATA, K.(2003), “*Engenharia de Controle Moderno*”,4ª edição, São Paulo, Prentice Hall.

ORTEGA, N. R. S., 2001, *Aplicação da Teoria de Conjuntos Fuzzy a Problemas da Biomedicina*. Tese de D.Sc., Instituto de Física/USP, São Paulo, SP, Brasil.

PEDROSA, L.A.F., GOMES, H.P., REY, P.L.I., (2007), “*Modelo de otimização operacional de sistemas adutores*”, In: Gomes, H.P., Garcia, R.P., Rey, P.L.I., *Abastecimento de água – O estado da arte e técnicas avançadas*. 1ª edição, Capítulo 9, João Pessoa – PB, Editora Universitária.

PINHEIRO, L.E.(2003), “*Uma Modelagem Organizacional Baseada em Elementos de Natureza Comportamental*”. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina UFSC. Florianópolis.

RALIZE, C.H.C, MARQUES, R.S.,(2006), “*Elementos de automação. Módulo I – Conceitos*”. Departamento de Engenharia de Manutenção. Sabesp, São Paulo – SP.

REZNIK, L., (1997), *Fuzzy Controllers*. Newnes, Reino Unido. URL: <http://books.google.com/books?hl=pt-BR&lr=&id=ar0-84SktfQC&oi=fnd&pg=PP9&dq=REZNIK,+1997&ots=eqV4i5yAO1&sig=jtgNcSobVfxL2fmy59rb6jyz5b0#PPP9,M1>. Acessado em 5 de setembro de 2008.

RODRIGUES, W., LUVIZOTTO, E.,(2003), *Conversor de Frequencia em Sistemas de Bombeamento*.

RUSS, E., SIMPSON, P., DOBBINS, R.,(1996), *Computational Intelligence PC tools*, London: ed. AP Professional.

SANTOS, G. J. C., (2003), *Lógica Fuzzy*, Monografia de Bel., DCET, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Bahia.

SHAW, I.S., SIMÕES, M.G.,(2004), *Controle e Modelagem Fuzzy*, ed. 1, São Paulo-SP, Editora Edgard Blücher Ltda.

SILVA, M.A.S, CECCOPIERRI, A.M.G, SANTANA, C.C.C., *et.al.*(2003),”*Simulação de um controlador nebuloso (fuzzy) no controle de qualidade da fabricação da garrafas PET*”.Metrologia para vida, 01-05 de setembro, Recife, Pernambuco ,Brasil.

SILVEIRA, P.R. & SANTOS, W.E., (1998), *Automação e Controle Discreto*. Érica. São Paulo.

SNIS, (2006), Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento, “*Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2006*, Brasília, MCIDADES. SNSA.

SOUZA, F., J., (1999), *Modelos Neuro-Fuzzy Hierárquico*, Tese de D.Sc., Departamento de Engenharia Elétrica, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.Rio de Janeiro, RJ.

TOURINO, S. R. G., (2000), *Guiagem do Robô Móvel XR4000 para Inspeção via Internet de Tubulações Industriais Soldadas*. Relatório de Projeto de Graduação. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. Brasília, Disponível em: <http://www.graco.unb.br/~tourino/xr4000/final.html>. Acessado em: 17 ago. 2004.

TROJAM, F., MARÇAL, R. F. M., *et al.*(2005),”*Automação em Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água*”. Encontro Estadual de Engenharia de Produção.Ponta Grossa, PR, Brasil.26-30 Setembro.

TSUTIYA, M.T., (2006), “*Abastecimento de água*”.3ª edição, São Paulo - SP, Editora Universitária.

TSUTIYA, M.T., (2007), “Uso de inversores de frequência para diminuição do consumo de energia em bombeamentos”, In: Gomes, H.P., Garcia, R.P., Rey, P.L.I., *Abastecimento de água – O estado da arte e técnicas avançadas*.1ª edição, Capítulo 7, João Pessoa – PB, Editora Universitária.

XAVIER, A., F., (2008), *Controlador Fuzzy Aplicado a um Sistema de Controle de Posição*, Dissertação de Mestrado, PPGEM /UFPB, João Pessoa, PB.

WILLIAN, S.M., KUBIK, A.W.,(1963), “*Variable speed drives for sewage pumps. Journal of the Water Pollution Control Federation*”,p. 1493 – 1500.

YEN, J., LANGARI, R., (1999). *Fuzzy Logic: Intelligence, Control, and Information*. Prentice Hall, EUA.

ZIMMERMANN, H-J., (1996), *Fuzzy set theory*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 3 ed. 1996.