



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

**APLICAÇÕES DE TÉCNICAS DE CONTROLE FUZZY EM
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA VISANDO
MELHORIA NO RENDIMENTO ENERGÉTICO E HIDRÁULICO**

por

Wil Lavor Lucena Camboim

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do grau de Doutor.*

João Pessoa – Paraíba

Outubro/2012

WIL LAVOR LUCENA CAMBOIM

**APLICAÇÕES DE TÉCNICAS DE CONTROLE FUZZY EM
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA VISANDO
MELHORIA NO RENDIMENTO ENERGÉTICO E HIDRAULICO**

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

Orientador: Professor Dr. Simplicio Arnaud da Silva

João Pessoa – Paraíba

Outubro/2012

C176a Camboim, Wil Lavor Lucena.

Aplicações de técnicas de controle Fuzzy em sistemas de abastecimento de água visando melhoria no rendimento energético e hidráulico / Wil Lavor Lucena Camboim.-- João Pessoa, 2012.

129f. : il.

Orientador: Simplício Arnaud da Silva

Tese (Doutorado) – UFPB/CT

1. Engenharia Mecânica. 2. Controle Fuzzy. 3. Eficácia energética. 4. Eficiência hidráulica.

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 esposa, amiga e cúmplice 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

À 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. Pelo desprendimento e confiança destinada a mim. 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.

A minha esposa Michele Souza, pela compreensão, ajuda e carinho. Por estar presente sempre. Pelos incentivos e por sempre acreditar em nossa capacidade. Pelo tempo abdicado quando estava perto e pelo sentimento empenhado quando estava distante.

Aos meus irmãos pelo respeito e confiança a que têm por mim.

Ao Prof. Simplicio Arnaud da Silva por assumir a orientação do trabalho, colocando-o como fruto do seu projeto PRÓ-ENGENHARIA. A disponibilidade e atenção empreendida, pelo repasse de valiosos ensinamentos. E, sobretudo, pela confiança e forma de conduzir o trabalho. Agradeço também as cobranças e incentivos, tão necessárias ao bom andamento do trabalho.

Ao Prof. Heber Pimentel Gomes por colocar o trabalho como fruto do LENHS – UFPB, laboratório que coordena com empreendedorismo e competência, além de incluir-me em seu corpo técnico.

Aos amigos e companheiros de academia: Magno José, sempre atento e solícito às minhas necessidades; Roberta Macêdo, Renato de Souza e Gennisson Carneiro companheiros de atividades no laboratório.

Aos demais amigos da universidade: Paulo Sergio e Moisés Salvino, presentes nos instantes de dúvidas, companheiros de algumas das mais importantes discussões sobre o trabalho e profundos colaboradores nos métodos aplicados. Meus sinceros agradecimentos.

À toda a Equipe PEX, sobretudo a Vinicius de Andrade e Iuri Lavor, por durante esse período, comandarem os nossos projetos, com competência, disponibilidade e maestria.

Aos amigos cupulares por simplesmente serem meus amigos, fieis, tolerantes e, presentes mesmo estando ausentes.

Ao prof. Ronildo I. S. Alencar pelas longas conversas e auxílio técnico.

A todos que de direta ou indiretamente colaboraram com esse trabalho.

APLICAÇÕES DE TÉCNICAS DE CONTROLE FUZZY EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA VISANDO MELHORIA NO RENDIMENTO ENERGÉTICO E HIDRÁULICO

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de um sistema Fuzzy, em ambiente LabviewTM, para o controle de pressão de redes de distribuição de água, por meio de dois conjuntos motor-bomba acionados por conversores de frequência. O acionamento dos conjuntos motor-bomba é realizado com motores de indução trifásico com velocidade de rotação variável visando a economia de energia elétrica e água. Para isso foi desenvolvido uma bancada experimental instrumentalizada emulando um sistema de abastecimento real. O sistema proposto é constituído de conjuntos motor-bomba em paralelo, devido à variação de demanda de vazão requerida. Essas duas imposições geram ao sistema um grande número de possibilidades do modo de associações dos conjuntos motor-bomba, com velocidades de rotação diferentes. O controlador Fuzzy identifica a melhor opção, referente ao consumo energético e rendimento do sistema e toma a decisão alusiva ao estado dos motores (ligado, desligado ou com velocidade de rotação parcial). Todo esse processo é realizado na condição de atender a demanda de vazão do sistema, além de manter a pressão constante em um valor pré-determinado. Para validação do controlador foram realizados diversos testes que comprovaram a eficiência do sistema de controle e a influência desse no consumo de energia elétrica e água. Pode-se concluir que o desempenho do sistema Fuzzy se mostrou satisfatório, podendo ser implantado com relativa facilidade em outros sistemas de distribuição de água com características similares. Os resultados trouxeram, além da redução do consumo energético, a conservação da pressão em níveis constantes, o aumento do grau de confiabilidade do sistema e a provável redução dos custos com manutenção.

Palavras chave: Controle Fuzzy, Eficiência Energética, Eficiência Hidráulica.

TECHNICAL APPLICATIONS OF FUZZY CONTROL IN WATER SUPPLY SYSTEMS AIMED AT IMPROVING ENERGY EFFICIENCY AND HYDRAULIC

ABSTRACT

This paper presents the development of a fuzzy system, in Labview™ environment for the pressure control of distribution of water through two sets of motor-driven pump drives. The drive motor-pump sets is accomplished with three-phase induction motors with variable speed in order to save electricity and water. For this we developed an experimental bench instrumentalized emulating a real supply system. The proposed system consists of motor-pump assemblies in parallel due to varying flow demand required. These two charging system to generate a large number of possibilities mode associations of the motor-pump assemblies with different rotational speeds. The Fuzzy controller identifies the best option for the energy consumption and system performance and makes the decision alluding to the state of the engines (on, off or partial rotation speed). This entire process is performed under the condition of meeting the demand flow system, and maintain constant pressure at a predetermined value. To validate the controller were performed several tests that proved the efficiency of the control system and its influence on the consumption of electricity and water. It can be concluded that the performance of the fuzzy system has proved satisfactory, and can be deployed with relative ease other water distribution systems with similar characteristics. The results brought, besides the reduction of energy consumption, conservation of pressure at constant levels, increasing the degree of system reliability and the probable reduction of maintenance costs.

Keywords: Fuzzy Control, Power Efficiency, Hydraulics Efficiency.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	5
1.2. METODOLOGIA	6
1.3. RELEVÂNCIA DO TRABALHO	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1. SISTEMA DE CONTROLE EM ABASTECIMENTO DE ÁGUA	9
2.2. CONVERSORES DE FREQUÊNCIA APLICADOS AO BOMBEAMENTO.....	13
2.3. LÓGICA FUZZY	17
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
3.1. SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	22
3.2. MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	24
3.3. CONVERSORES DE FREQUÊNCIA	27
3.4. FUNDAMENTOS DA LÓGICA FUZZY	29
3.4.1. Definição das Variáveis	33
3.4.2. Fuzzificação	34
3.4.3. Base de Regras – Inferência Fuzzy	35
3.4.4. Defuzzificação.....	38
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	41

4.1. EQUIPAMENTOS.....	42
4.2. FERRAMENTA COMPUTACIONAL.....	52
4.3. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	55
4.3.1. Experimento 01:.....	55
4.3.2. Experimento 02:.....	57
4.3.3. Experimento 03.....	58
4.3.4. Experimento 04:.....	58
4.3.5. Experimento 05:.....	59
5. MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE.....	60
5.1. SISTEMA PROPOSTO.....	61
5.2. CONTROLADORES FUZZY.....	66
5.3. CONTROLADOR FUZZY PRIMÁRIO.....	71
5.3.1. Variável Linguística de Entrada “Pressão”.....	72
5.3.2. Variável Linguística de Entrada “Derivada da Pressão”.....	74
5.3.3. Variável Linguística de Saída “Delta de Rotação”.....	76
5.3.4. Base de Regras, Inferência e Defuzificação:.....	78
5.4. CONTROLADOR FUZZY SECUNDÁRIO.....	80
5.4.1. Variável Linguística de Entrada “Pressão”.....	83
5.4.2. Variável Linguística de Entrada “Potência BP”.....	85
5.4.3. Variável Linguística de Entrada “Potencia BS”.....	86
5.4.4. Variável Linguística de Saída “Delta de Rotação”.....	86
5.4.5. Base de Regras, Inferência e Defuzificação:.....	88
5.5. CONTROLADOR FUZZY ACIONAMENTO.....	90
5.5.1. Variável Linguística de Entrada “Vazão”.....	91
5.5.2. Variável Linguística de Entrada “Derivada da Vazão”.....	93
5.5.3. Variável Linguística de Saída “Acionamento”.....	94
5.5.4. Base de Regras, Inferência e Defuzificação:.....	96
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	98
6.1. EXPERIMENTO 01 – Sistema com Variação de Demanda Sem Controlador.....	98
6.2. EXPERIMENTO 02 – Sistema com Variação de Demanda Atuação do Controlador Fuzzy.....	102

6.3. EXPERIMENTO 03 – Características de desempenho do sistema submetido a um distúrbio sob a ação do controlador Fuzzy.....	105
6.4. EXPERIMENTO 04 – Busca dos Menores Consumos.	108
6.5. EXPERIMENTO 05 – Sistema com Reservatório.....	110
7 CONCLUSÕES	114
7.2. RECOMENDAÇÕES	117
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Estator de uma máquina de indução.	24
Figura 2 - Curvas de conjugado (Torque) x velocidade de rotação para vários valores de frequência de alimentação do motor.	25
Figura 3 - Variação das curvas características das bomba em função da variação de velocidade de rotação (TSUTIYA, 2004).	27
Figura 4 - Conjunto idade nas abordagens: (a) booleana e (b) Fuzzy.	31
Figura 5 - Diagrama de bloco de um controlador Fuzzy.	32
Figura 6 - Definição das variáveis do controlador Fuzzy.	33
Figura 7 - Funções de pertinência triangular, trapezoidal, gaussiana e singleton.	34
Figura 8 - Agregação de um sistema com duas regras.	37
Figura 9 - Defuzzificação pelo centro de máximo.	38
Figura 10 - Bancada experimental.	42
Figura 11 - Desenho esquemático da bancada.	43
Figura 12 - Diagrama de blocos do sistema. Caminhamento do fluxo de ações.	44
Figura 13 - Conjunto motor-bomba, CAM-W10, (Dancor).	45
Figura 14 - Curvas características da bomba centrífuga (catálogo) CAM-W10, (Dancor).	45
Figura 15 - Curvas características das bombas centrífugas (levantamento na bancada experimental) CAM-W10 (Dancor).	46
Figura 16 - Conversor de frequência CFW-11 (WEG).	47
Figura 17 - Medidor de vazão eletromagnético.	48
Figura 18 - Transdutor de pressão PTX 7217 (DRUCK).	49
Figura 19 - Válvula proporcional ARB24-SR (Belimo).	50
Figura 20 - Interface de aquisição de dados NI-USB 6229 (National Instruments).	50
Figura 21 - Painel frontal programação labVIEW (interface usuário).	53
Figura 22 - Diagrama de blocos (código gráfico do programa).	54
Figura 23 - Curva de consumo médio. (Fonte: Gomes, 2004)	56
Figura 24 - Abertura da válvula e vazão associada.	56
Figura 25 - Curva do sistema para a demanda máxima.	62
Figura 26 - Região de funcionamento do sistema.	62
Figura 27 - Linha a ser atendida dentro da região de operação do sistema.	63
Figura 28 - Região de funcionamento dos conjuntos motor-bomba.	64

Figura 29 - Ciclo de ação sistema x resposta controlador.....	65
Figura 30 - Curva de demanda do sistema com combinação de atuação dos controladores.	67
Figura 31 – Fluxograma do controlador Fuzzy primário.....	68
Figura 32 – Fluxograma do controlador Fuzzy acionamento.....	69
Figura 33 - Fluxograma controlador Fuzzy secundário.....	70
Figura 34 - Esquema básico do controlador Fuzzy principal.....	71
Figura 35 – Funções de pertinência variável linguística “PRESSÃO” (controlador Primário).....	73
Figura 36 – Modelo de cálculo da derivada da pressão.....	74
Figura 37 – Funções de pertinência variável linguística “DERIVADA DA PRESSÃO” (controlador Primário).....	75
Figura 38 – Funções de pertinência variável de saída “DELTA DE ROTAÇÃO” (controlador Primário).....	77
Figura 39 - Base de regras do controlador Fuzzy primário.....	78
Figura 40 – Esquema de funcionamento do controlador Fuzzy Secundário.....	83
Figura 41 - Função de pertinência variável de entrada "Pressão"(controlador Fuzzy secundário).....	84
Figura 42 - Funções de pertinência variável linguística “POTÊNCIA BP ” (controlador secundário).....	85
Figura 43 - Funções de pertinência variável de saída “DELTA DE ROTAÇÃO” (controlador secundário).....	87
Figura 44 - Base de regras controlador Fuzzy secundário.....	89
Figura 45 – Diagrama de blocos de funcionamento do controlador Fuzzy acionamento. ..	91
Figura 46 - Funções de pertinência variável de entrada “VAZÃO” (Controlador Acionamento).....	92
Figura 47 – Funções de pertinência variável linguística "DERIVADA DA VAZÃO"(Controlador Acionamento).....	93
Figura 48 – Funções de pertinência variável de saída “ACIONAMENTO” (Controlador Acionamento).....	95
Figura 49 - Base de regras controlador Fuzzy acionamento.....	96
Figura 50 - Pressão e vazão experimento 01 - atuação apenas do CMB-Principal.....	99
Figura 51 - Pressão e vazão experimento 01- Atuação do CMB-Principal e do CMB-Secundário.....	100
Figura 52 - Avaliação energética experimento 01 (Situação 1 e 2).....	101
Figura 53 – Pressão, vazão e acionamento de motores do experimento 02.....	103
Figura 54 - Avaliação energética experimento 02.....	104
Figura 55 - Pressão e rotação dos motores - Experimento 03.....	106
Figura 56 - Pressão e rotação dos motores - Experimento 02 (Figura 55) - AMPLIADO DO INSTANTE T=85s AO INSTANTE T=120s.....	107
Figura 57 – Ajuste do controlador ao menor consumo energético – Experimento 03.....	109
Figura 58 - Vazão e variação de rotação dos CMB's - Experimento 05.....	112
Figura 59 - Potência instantânea do conjuntos motor-bomba.....	112

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Características das funções de pertinência da variável de entrada "PRESSÃO" (controlador Fuzzy Primário)	74
Tabela 2 - Características das funções de pertinência da variável de entrada "DERIVADA DA PRESSÃO" (controlador Fuzzy Primário)	76
Tabela 3 - Características das funções de pertinência da variável de saída "DELTA DE ROTAÇÃO" (controlador Fuzzy Primário)	77
Tabela 4 - Base de regras efetiva do controlador Fuzzy primário	79
Tabela 5 - Características do controlador Fuzzy primário	79
Tabela 6 - Possibilidades de combinação dos CMB's para $Q=11\text{ m}^3/\text{h}$	81
Tabela 7 - Possibilidades de combinação dos CMB's para $Q=13,5\text{ m}^3/\text{h}$	82
Tabela 8 - Possibilidades de combinação dos CMB's para $Q=15,7\text{ m}^3/\text{h}$	82
Tabela 9 - Características das funções de pertinência da variável de entrada "PRESSÃO" (Controlador Fuzzy Secundário)	84
Tabela 10 - Características das funções de pertinência da variável de entrada "POTÊNCIA BP" (controlador fuzzy secundário)	86
Tabela 11 - Características das funções de pertinência da variável de saída "POTÊNCIA DELTA DE ROTAÇÃO" (controlador fuzzy secundário)	88
Tabela 12 – Características do controlador Fuzzy secundário	90
Tabela 13 - Características das funções de pertinência da variável de entrada "VAZÃO" (controlador fuzzy acionamento).....	92
Tabela 14 - Características das funções de pertinência da variável de entrada "DERIVADA DA VAZÃO" (controlador fuzzy acionamento)	94
Tabela 15 - Características das funções de pertinência da variável de saída "ACIONAMENTO" (controlador fuzzy acionamento).....	95
Tabela 16 - Base de regras efetiva controlador Fuzzy acionamento	97
Tabela 17 - Características do controlador Fuzzy acionamento.....	97
.Tabela 18 – Resultados experimento 01 – Sistema com variação de demanda sem controlador.....	102
Tabela 19 - Resultados experimento 02 – Sistema com variação de demanda atuação do controlador Fuzzy	105
Tabela 20 - Sequência de ação de resposta do controlador Fuzzy para distúrbio (2).....	107
Tabela 21 - Resumo dos parâmetros de controle.....	108
Tabela 22 - Resumo da redução do consumo energético - Experimento 04	110

Tabela 23 - Comparativo experimento 02 e 05	113
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BP	conjunto motor-bomba primário
BS	conjunto motor-bomba secundário
BST	<i>buster</i>
CAMUSA	companhia municipal de saneamento da cidade de Novo Hamburgo/RS
CCO	central de controle operacional
CE	consumo específico de energia elétrica
CLP	computador lógico programável
CMB	conjunto motor-bomba
C-o-A	centro da área
C-o-M	centro do máximo
CRD	centro de reservação e distribuição
DAQ	módulo de aquisição de dados
DN	diâmetro nominal
DP	derivada da pressão
DSP	processador de sinal digital
ETA	estação de tratamento de água
IV	instrumentos virtuais
LENHS	laboratório de eficiência energética e hidráulica em saneamento
M-o-M	média do máximo
PID	controlador proporcional, integral e derivativo
PVC	policloreto de vinila (plástico utilizado na fabricação das tubulações)

RPM	rotações por minuto
SAA	sistema de abastecimento de água
SANASA	sociedade de abastecimento de água e saneamento de Campinas - SP
SCADA	sistemas de supervisão e aquisição de dados
SDA	sistema de distribuição de água
VRP	válvula redutora de pressão
ud	universo de discurso

LISTA DE SIMBOLOS

C1	conversor 1
C2	conversor 2
F	frequência em Hz
Hz	hertz (1/s)
H	altura monométrica
H1	altura manométrica relativa à velocidade da bomba na condição 1
H2	altura manométrica relativa à velocidade da bomba na condição 1
Ns	número de rotações por minuto
N1	velocidade de rotação da bomba na condição 1
N2	velocidade de rotação da bomba na condição 2
p	numero de pólos do motor
p1	potência consumida da bomba na condição 1
P1	potência consumida da bomba na condição 1
P2	potência consumida da bomba na condição 1
Q	vazão
q1	vazão relativa à velocidade de rotação da bomba na condição 1
Q1	vazão relativa à velocidade de rotação da bomba na condição 1
Q2	vazão relativa à velocidade de rotação da bomba na condição 1
s	segundo
Σ	somatório

$\mu_{0,K}(y_i)$	ponto de máximo da função de pertinência do método C-o-M
μ_A	função característica
$\mu_A(x)$	função de pertinência de x em A
μ_{OUT}	termo de saída Fuzzy do método C-o-A

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A conservação de energia, em especial a de energia elétrica, é uma preocupação do mundo moderno, devido à sua ligação direta com questões econômicas e ambientais. Segundo o Ministério de Minas e Energia, em 2009, o setor industrial brasileiro atingiu um consumo de 43,7% da energia elétrica produzida pelo país. Dado que este é o setor que mais consome energia elétrica (o segundo maior consumidor-setor residencial- tem apenas o índice de 23,9%) e que grande parte desta energia é destinada a alimentar seus conjuntos motrizes, é coerente que esses sistemas estejam sendo apontados como alvo principal das ações que visam garantir a economia de energia elétrica.

Inseridos nesse setor industrial, as companhias de abastecimento e distribuição de água contribuem significativamente com esses números, uma vez que, são raros os sistemas de distribuição de água que operam exclusivamente por gravidade, sendo dotados de, no mínimo, um conjunto motor-bomba para recalcar água a diversos pontos (reservatórios, rede hidráulica e adutoras) (Bezerra, 2009). Além disso, o intenso processo de urbanização, nas últimas décadas, tem exigido grandes esforços no âmbito técnico, organizacional e financeiro das empresas de saneamento, principalmente devido ao consequente aumento das demandas de água para abastecimento. Os sistemas de distribuição de água estão cada vez mais complexos e maiores, resultando em elevados gastos com a produção de água tratada e com a energia elétrica proveniente do funcionamento de motores elétricos.

Segundo GOMES e CARVALHO (2012), os sistemas de abastecimento e de esgotamento sanitário são responsáveis por, aproximadamente, 3% da energia consumida no mundo. De acordo com o Programa Nacional de Conservação de Energia para o setor de saneamento (Procel Saneam), entre 2 e 3% do consumo total de energia elétrica no nosso país, equivalente a cerca de 10 bilhões de kWh/ano, são consumidos por prestadoras de serviço de água e esgotamento sanitário.

Especificamente, em sistemas de bombeamento de água, da captação às elevatórias, passando pelas estações de tratamento de água (ETA's), o consumo de energia elétrica, corresponde, na maioria das empresas, à principal parcela das despesas com energia. Segundo JAMES *et al.* (2002), o consumo de energia na maioria dos sistemas de água em todo o mundo poderia ser reduzido em pelo menos 25% por meio de ações de eficiência energética e hidráulica.

Essa ineficiência é fruto da utilização de equipamentos de bombeamento de baixo rendimento (velhos, antigos e mal dimensionados), de linhas adutoras com excesso de perda de carga, falta de manutenção dos sistemas, de procedimentos operacionais inadequados, entre outros fatores. Assim, a adequação dos sistemas de abastecimento a níveis aceitáveis de eficiência, principalmente buscando a redução no consumo de energia, é imperativa.

No Brasil, a redução do consumo de energia elétrica é impulsionada pela limitação, em médio prazo, do aumento da disponibilidade energética do nosso país. A eficiência energética dos sistemas funciona como uma fonte de “geração virtual” e “limpa” de energia, apresentando-se como a melhor alternativa para o meio ambiente.

Diante desse cenário, nos últimos anos, as empresas prestadoras de serviço de saneamento estão buscando adotar medidas para aumentar sua eficiência energética. Com isso buscam diminuir seus custos operacionais, além de abraçar toda causa ambiental oriunda da redução do consumo energético. Porém, é evidente que o combate a esse excesso de consumo de energia deve ser feito sem que haja comprometimento na qualidade do serviço de abastecimento.

Além do melhoramento dos sistemas elétricos, outra alternativa, bastante eficiente, para reduzir o consumo de energia das companhias é por meio da diminuição das

vazões e pressões nas redes a adutoras. Segundo BEZERRA (2009), para amortizar o volume de água fornecido, sem que haja racionamento e/ou “racionalização forçada”, a forma mais impactante é a diminuição das perdas de água, por meio da redução da pressão dos sistemas. As perdas são inerentes à engenharia dos sistemas do setor de abastecimento, ocorrendo em todos os pontos, desde a captação até o usuário final; por isto, é irreal a idéia de eliminar as perdas. O problema é que as empresas de saneamento estão convivendo com altos índices de perdas e, conseqüentemente, de receita, desperdiçando água e energia por falta de ações eficientes.

Segundo CARVALHO (2012) o controle de pressão nas redes de abastecimento é fundamental para a redução de perdas reais em sistemas urbanos de distribuição de água. A pressão excessiva na rede além de onerar, desnecessariamente, os custos energéticos de bombeamento, provoca avarias nas tubulações e acessórios, além de provocar uma redução na vida útil de equipamentos e válvulas de controle.

Os trabalhos relativos ao controle de pressão e vazão em sistemas de distribuição de água, principalmente os alimentados diretamente por conjuntos motor-bomba, apontam, principalmente, para a implantação de conversores de frequência. RODRIGUES (2007) 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. TSUTIYA (2007) enfatiza que o conversor de frequência é um equipamento de fundamental importância no combate ao desperdício de água e energia.

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.

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.

Para o aproveitamento da potencialidade dos conversores de frequência, é imprescindível o desenvolvimento e/ou aplicação de técnicas que busquem a otimização do processo. É fundamental um controle e acompanhamento das faixas de rendimento em que

operam os conjuntos motor-bomba, a fim de mantê-los em níveis aceitáveis, de forma a não comprometer os bons resultados elétricos dos sistemas.

Percebe-se, então, que quanto mais extenso for o sistema de distribuição de água, maiores serão os problemas operacionais em decorrência dos muitos elementos, potencialmente, sujeitos as mudanças de estado envolvidas no transporte da água. A gama de possibilidades de decisões operacionais faz com que os técnicos das empresas não tenham pleno domínio do comportamento do sistema. Na maioria dos casos, as regras operacionais implementadas ficam sujeitas a elevado grau de empirismo, com o objetivo de garantir a continuidade do abastecimento público, sem a preocupação de alcançar uma eficiência operacional e econômica. Os procedimentos de controle operacional têm um forte componente heurístico em que a qualidade das decisões fica vinculada à experiência dos operadores e raramente se faz um acompanhamento da eficiência hidráulica e energética dos sistemas.

A necessidade de otimização das operações implica na adoção de medidas operacionais voltadas ao ajuste de equipamentos, por meio de correção do fator de potência e melhoramento no rendimento além de modificações no controle operacional, como abertura e fechamento de válvulas, acionamento e controle de velocidade de rotação de conjuntos motor bomba e controle de reservatórios. 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 utilizadas para esse fim, a engenharia está 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 (2006), 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, podendo ser computadorizada ou mecânica, cuja função é diminuir ou suprir a interferência humana.

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, a melhoria dos processos busca, não só, uma diminuição nos custos e aumento dos rendimentos das empresas, mas a sociedade 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 e aumenta a confiabilidade na operação dos sistemas.

1.1. OBJETIVOS

Desenvolver um sistema de controle, fundamentado em técnicas de controle Fuzzy, capaz de controlar um sistema de abastecimento de água. O produto desenvolvido manterá a pressão no sistema em níveis constantes por meio da variação da velocidade de rotação dos conjuntos motor-bomba. Além disso, toda essa ação deverá ser feita buscando sempre os maiores rendimentos dos conjuntos motor-bomba e os menores valores de consumos energético.

1.1.1. Objetivos Específicos

- ❖ Montagem de bancada experimental instrumentalizada nas dependências do LENHS – Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica da UFPB;
- ❖ Avaliar a utilização de conversores de frequência em sistemas de abastecimento com mais de um conjunto motor-bomba funcionado em paralelo;

- ❖ Desenvolvimento do controlador com interface de supervisão do sistema de distribuição;
- ❖ Desenvolvimento do controlador, fundamentado em técnicas de controle Fuzzy, responsável por tomar a melhor decisão referente ao estado dos motores (ligado, desligado, em velocidade de rotação intermediária);
- ❖ Desenvolver técnicas para que tal controlador exija dos motores uma configuração de funcionamento sempre com os menores consumos energéticos, sem deixar de atender a vazão e pressão mínima exigida;

1.2. METODOLOGIA

O sistema é composto por dois conjuntos motor-bomba (operando em paralelo), devido a grande variação da vazão bombeada. Seu acionamento é do tipo múltiplo podendo estar ligada uma ou outra, ou as duas a qualquer instante. Também existe a possibilidade de “acionamento parcial”, com variação da velocidade de rotação de cada conjunto motor-bomba, devido a utilização de conversores de frequência.

O controlador atuará, principalmente, nos instantes de maior consumo, onde normalmente a utilização de um conjunto motor-bomba é insuficiente (evidentemente para grandes sistemas), sendo necessário o acionamento, em paralelo, do segundo conjuntos motor-bomba. Essa necessidade, juntamente com a possibilidade da utilização de conversores de frequência, possibilita obter inúmeras combinações de velocidade de rotações dos motores envolvidos no bombeamento. A lógica computacional terá como objetivo escolher aquele que proporcione o menor consumo energético e o melhor nível de rendimentos dos conjuntos sem, contudo, abdicar de manter a pressão do sistema constante e em níveis aceitáveis.

Para avaliar e quantificar a aplicação do trabalho, foi montado uma bancada experimental emulando uma rede de distribuição real, com as características descritas anteriormente. A montagem foi realizada nas dependências do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba – LENHS UFPB.

1.3. RELEVÂNCIA DO TRABALHO

Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos no sentido de reduzir custos de energia e água em sistemas de abastecimento de água. Os conversores de frequência já são uma realidade e unanimidade frente ao acionamento dos conjuntos motor-bomba em vários estudos e até mesmo em sistemas reais instalados. Nesse sentido, a maior contribuição desta pesquisa é a forma como esses mecanismos serão utilizados. Os fundamentos empregados para seu acionamento, além de utilizar técnicas de controle inteligente, consideram, principalmente, parâmetros como rendimento (de bombas e motores) e consumo de energia (dos motores). Dessa forma desenvolver-se-á um sistema não só preocupado em controlar a pressão ou vazão de forma automática, mas que faça isso com o máximo de rendimento e menor consumo de energia, retirando dos equipamentos o melhor de sua performance e tendo aquelas variáveis como parâmetros de decisão.

Portanto, para a o trabalho proposto, além da utilização de conjuntos motor-bomba em paralelo, adotou-se o consumo energético como variável de entrada, auxiliando no processo de decisão das condições do sistema. Essa iniciativa garante que o estado escolhido para o funcionamento dos conjuntos motor-bomba sejam, de fato, o mais eficiente, visto que em trabalhos anteriores variáveis como rendimento e consumo energético, serviam apenas de elementos de comparação confirmando os bons resultados dos trabalhos.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As técnicas utilizadas na área de distribuição pressurizada de água, principalmente as relativas ao abastecimento urbano, sofreram, nos últimos 20 anos, um acentuado desenvolvimento, derivado especificamente, do avanço tecnológico na área de informática e de novos equipamentos. Apesar dos princípios físicos da hidráulica clássica, relativos a escoamento de água em condutos forçados, permanecerem inalterados, há de se frisar que houve avanços significativos na metodologia da análise e operação de sistemas de abastecimento de água (GOMES *et al.*, 2007).

É notório também, o avanço tecnológico dos equipamentos hidráulicos, elétricos, mecânicos e de automação (aplicação de sistemas de controle), disponibilizados a um melhor projeto, monitoramento, controle e operação de sistemas de distribuição de água. A aplicação desses equipamentos e a criação de um supervisor de comando nas redes de abastecimento de água, são medidas comprovadamente viáveis e, se bem utilizadas, podem trazer grandes benefícios técnicos, econômicos e ambientais.

Na prática, vê-se algumas ações e implementações pontuais, porém, a utilização de tais técnicas implicam também na adoção de uma série de decisões por parte das concessionárias/usuários 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 FILHO (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 e que busquem oportunidade de conservação de energia, a partir da implementação de modelos hidráulicos de simulação ao longo do tempo.

A aplicação da automação em sistemas de distribuição de água (SDA) é uma prática consagrada, porém são escassos os trabalhos científicos de dinâmica e controle automático de sistemas voltados para o setor de saneamento, já que os processos não necessitam de um controle, em termos relativos, com boa exatidão das variáveis envolvidas. Na prática, os controladores automáticos utilizam técnicas de controle “convencionais”, tipo PID (Proporcional, Integral e Derivativo), desenvolvidas e acopladas pelos vários fabricantes dos equipamentos eletrônicos (BEZERRA *et al.*, 2008).

Isso tem provocado a utilização de tais tecnologias com o simples objetivo de automatizar as operações. Evidente que tais ações já trazem muitos benefícios, principalmente, quando existe a preocupação do controle da pressão, visto que os sistemas de abastecimentos no Brasil, salvo uma ou outra exceção, encontram-se operando de forma precária. Porém, devido a sua complexidade, a busca de decisões mais adequadas, em termos de políticas operacionais, só pode ser alcançada com o auxílio de processos otimizados a serem obtidos mediante rotinas computacionais apropriadas.

Pode-se deduzir, então, que é imprescindível a aplicação de tecnologias operacionais atuais em controle aos sistemas de abastecimento, como forma de melhor viabilizar o seu correto funcionamento, buscando não apenas a utilização de modernos equipamento e técnicas, mas o máximo do seu desempenho.

2.1. SISTEMA DE CONTROLE EM ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Um sistema de controle é uma disposição de componentes físicos, conectados ou relacionados de tal forma a comandar, dirigir ou regular a si mesmo ou a outros sistemas.

A automação de sistemas de abastecimento de água tem como finalidade possibilitar a operação assistida e/ou controle automático de processos. Por meio da automação é possível monitorar, controlar e interferir nas diversas unidades do sistema, em tempo real, possibilitando uma melhoria no desempenho operacional, mensuração de todas as atividades e a redução de custos.

A indústria da água no Brasil, vem tentando acompanhar o desenvolvimento tecnológico dos demais setores industriais, onde a presença da automação é uma realidade. Entende-se por automático todo o processo que se desenvolve sem a necessidade da intervenção humana, seja uma simples medição ou complexas tomadas de decisões.

Alguns trabalhos já têm sido desenvolvidos buscando esses benefícios, e algumas aplicações práticas pontuais, também podem ser encontradas. Porém, percebe-se que a aplicação dos processos de automação e controle em sistemas reais de abastecimento, com o emprego de inteligência artificial, tal como a lógica Fuzzy são difíceis de serem encontradas.

Os primeiros trabalhos e estudos buscando o controle dos sistemas de abastecimento estão por conta de FALLSIDE e PERRY (1975). Sem grandes pretensões referentes à automação e/ou controle do sistema JENKINS *et al.* (2004) desenvolveram um modelo ótimo através da avaliação do sistema de abastecimento de água da Califórnia.

TROJAN e MARÇAL (2005) aplicaram conceitos de sistemas de automação na produção e distribuição de água no sistema de abastecimento de água do Paraná, mais precisamente na cidade de Ponta Grossa. Foi realizado um estudo de caso buscando resultados na redução nos índices de perdas de água e, conseqüentemente, outros benefícios importantes como a redução da pressão média nas tubulações transportadoras, rapidez e qualidade nos reparos das tubulações e formação de uma espécie de banco de dados para criação de programas para novas instalações. Dessa forma, foram instalados válvulas de controle automáticas, sensores de medição de vazão e pressão nos principais pontos críticos do sistema e um sistema de supervisão SCADA, onde são gerenciados todos os pontos da automação. Após a aplicação do sistema, os autores perceberam uma redução nos índices de perdas físicas e redução do consumo de energia no acionamento e operação dos motores. Os resultados encontrados demonstram que a automação de um sistema de abastecimento de água permite o controle e a atuação rápida para corrigir

distorções que ocorrem naturalmente, como as perdas no abastecimento e o consumo de energia.

GOMES *et al.* (2007) fizeram uma coletânea de trabalhos relacionados aos avanços na área de distribuição pressurizada de água. A publicação enfatiza o *estado da arte* e as técnicas avançadas de dimensionamento, análise, operação e instalação já desenvolvidas e disponibilizadas em várias partes do mundo. Os autores relatam que o desenvolvimento está desde o desenvolvimento de modelos de otimização econômica à criação de processos de controle utilizando inteligência artificial. A obra evidencia ainda que parte desse avanço deve-se ao desenvolvimento dos equipamentos envolvidos no processo, sejam eles elétricos, hidráulicos, mecânicos ou eletrônicos. Além do avanço da informática que possibilita a comunicação entre todas essas áreas.

GOMES (2007) publicou um livro intitulado “Sistema de Bombeamento – Eficiência Energética”. A publicação foi escrita por vários autores com larga experiência acadêmica e prática, na área de sistema de abastecimento e de esgotamento sanitário. O livro aborda, de forma integrada, os diversos assuntos da mecânica dos fluidos, da hidráulica pressurizada, das bombas, motores elétricos e equipamentos associados. Dedicou também um capítulo para automação e controle dos sistemas de abastecimento de água descrevendo métodos de concepção e aplicações de automação em sistemas. O Capítulo ressalta ainda, os objetivos da automação e as possíveis ações que os sistemas automáticos devem envolver.

KUTSCHER e PUREZA (2008) implantaram um sistema de supervisão na CAMUSA – Companhia Municipal de Saneamento da cidade de Novo Hamburgo/RS. A idéia era, além de trazer todos os benefícios de um sistema automático, eliminar ocorrências pontuais do sistema: redução de tempo de resposta na detecção dos problemas dos conjuntos motor-bomba, eliminação do extravasamento dos reservatórios, identificação fácil e rápida de vazamentos e rompimentos nas adutoras principais.

A implantação foi realizada em três etapas. Na primeira foi implantada um sistema de supervisão juntamente com a Central de Controle Operacional (CCO) efetivando as seguintes ações: monitoração de níveis de reservatórios, operação remota de booters, motores e Válvulas Redutores de Pressão (VRP's). Na segunda etapa foram adotados mecanismos de partida e controle de velocidade de rotação dos motores. E por

fim, na terceira etapa, os operadores do Sistema de Abastecimento de Água (SAA) engenheiros, técnicos e programadores, por meio da análise dos diversos indicadores de sistema, desenvolveram ferramentas adicionais ao sistema de supervisão de modo a otimizar o desempenho energético do SAA. A rede de comunicação do sistema automatizado era composta por um computador de supervisão executando um aplicativo supervisório na plataforma Elipse ESCADA, um Computador Lógico Programável (CLP) central e CLP's escravos instalados nas unidades remotas. Foram alcançados resultados satisfatórios referentes à redução no consumo de energia. Além disso, criou-se uma possibilidade da análise dos bancos de dados oriunda desse sistema, visando um contínuo desenvolvimento dessa operação eficiente energeticamente.

BEZERRA (2009) desenvolveu uma ferramenta capaz de controlar de forma automática o plano piezométrico de sistemas de distribuição de água, por meio do uso simultâneo de conversores de frequência e válvulas redutoras de pressão. A ferramenta mantém a pressão constante para quaisquer valores de referência, não havendo limite de números de pontos monitorados e controlados. Todo o trabalho foi desenvolvido em uma bancada experimental montada no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em saneamento (LENHS), da UFPB. Foram obtidos excelentes resultados referentes à redução do consumo de água, de energia, do controle da pressão e das perdas do sistema.

CARVALHO (2012) desenvolveu um controlador que mantém a pressão de um sistema de bombeamento em patamares pré-determinados resultando no aumento da qualidade no abastecimento e redução no consumo energético. O controlador não linear foi desenvolvido utilizando a técnica de controle Fuzzy e executava suas tarefas de forma automática, por meio do uso simultâneo de conversores de frequência, válvulas redutoras de pressão, conjuntos motor-bomba e *busters*. Para elaboração do trabalho foi desenvolvida uma bancada experimental simulando uma rede de distribuição, com sistema de impulsão distribuído, composta por duas zonas de consumo, com topologias diferenciadas, além de diversos instrumentos de controle e de monitoramento. O sistema de impulsão era composto por um conjunto motor-bomba (CMB) e um *buster* (BST) que atendia exclusivamente a zona mais desfavorecida. O sistema além de conseguir manter as pressões constantes, comportando-se de forma adequada às diversas exigências impostas pelos testes realizados, apresentou uma redução no consumo de energia de 39%.

Com a evolução dos estudos e técnicas desenvolvidas percebe-se uma nova tendência nas linhas de pesquisa que buscam aprimorar este setor. A automação propriamente dita não é mais um grande progresso tornando-se um instrumento de aperfeiçoamento dos sistemas melhorando sua produtividade e fazendo isso com a máxima eficiência.

A necessidade de sistemas de controle de processos para as plantas do setor de saneamento é uma realidade. O requisitos de alta disponibilidade, fácil operação, supervisão local e remota das operações, e diagnóstico otimizado dos eventos, impões uma demanda tecnológica crescente sobre as soluções de controle implementadas nos novos projetos. Para atender plenamente a todas essas demandas, a escolha do sistema de automação é de vital importância, pois uma decisão baseada apenas no custo inicial do investimento pode-se revelar desvantajosa ao longo da vida útil da instalação, se as opções de expansão, flexibilidade para alterações posteriores e conectividade com outros sistemas revelarem-se limitadas, inadequadas ou inexistentes.

2.2. CONVERSORES DE FREQUÊNCIA APLICADOS AO BOMBEAMENTO

Dentre as possibilidades para o controle de fluxo em um sistema de bombeamento, o ajuste da velocidade de rotação da bomba tem-se mostrado o mais eficiente. Quando a rotação da bomba é reduzida menos energia é dado ao fluido, conseqüentemente, menos energia precisa ser gasta. Dentre as opções para realizar essas ações, o conversor de frequência apresenta-se como a técnica mais eficiente.

O conversor de frequência é um equipamento eletrônico que proporciona a variação de rotação do motor elétrico e conseqüentemente da rotação do rotor da bomba, acarretando alteração na vazão e pressão fornecida pelo conjunto motor-bomba.

Em particular, as muitas aplicações dos conversores de frequência em bombeamento que requerem velocidade de rotação variável, oferecem grande potencial de economia e as vantagens vão além da redução do consumo energético. Incluem, entre

outras, o aumento da confiabilidade, da vida útil dos equipamentos além de possibilitar o controle da pressão.

As aplicações típicas de conversores de frequência em sistemas de distribuição de água ocorrem quando o bombeamento é direto na rede de distribuição, isto é, quando não existe reservatório de regularização. A variação da vazão demandada ao sistema de impulsão atinge um valor máximo na hora de maior consumo (normalmente entre nove e quinze horas) e um valor mínimo durante a madrugada. Com o conjunto motor-bomba de velocidade fixa nesses instantes as pressões na rede de abastecimento serão bastante elevada, além do motor trabalhar com potência superior a requerida, ocasionando perda de energia.

A utilização de conversores de frequência já é uma realidade para o acionamento de motores, inclusive no setor de abastecimento de água. Apesar de em poucas situações atuarem de forma “inteligente” (com acionamento por meio de controladores com essas características), normalmente conseguem trazer grandes benefícios para seus sistemas. Alguns trabalhos práticos e/ou acadêmicos já foram publicados enfatizando suas características e benfeitorias.

DEWINTER e KEDROSKY (1989) descreveram a expansão da capacidade de bombeamento da “AEC Pipelines”, uma divisão da Companhia de Energia de Alberta (Canadá) de 130.000 barris/dia para 180.000 barris/dia por meio da instalação de uma nova estação de bombeamento composta de um motor de 3500HP, com velocidade de rotação variável. Foi utilizado um conversor de frequência fornecido pelo fabricante General Electric. Essa foi a primeira aplicação de conversores de frequência no Canadá e a maior aplicação em motores de indução bombeando óleo.

Naquela época, depois de detectado a necessidade de expansão os engenheiros e operadores tiveram de decidir entre duas opções: ou um motor com velocidade de rotação fixa e uma válvula de controle de estrangulamento na descarga ou um motor com velocidade de rotação variável sem a utilização de válvula de controle. Acabaram por optar pela utilização do conversor de frequência devido a redução nos custos com energia. Uma alternativa aceita pelo setor industrial devido a confiabilidade e manutenção. Além disso, o sistema de alimentação elétrico da área tinha uma capacidade muito limitada, o que

inviabilizaria a utilização de motores com velocidade de rotação variável, principalmente no seu acionamento. Ao todo foi investido \$800.000,00 (dólares canadenses).

CARVALHO *et al.*(2000) avaliou o uso de um conversor de frequência de 25 cv na irrigação, considerando diferentes demandas de água como manejo. A avaliação foi constituída de uma análise de custos e benefícios. O custo foi calculado com base no fator de recuperação do capital, para taxas de juros de 6 e 12% e períodos de amortização de 5 e 15 anos. O benefício consistiu da economia de energia proporcionada pelo conversor de frequência em relação aos procedimentos usuais de controle da vazão. Relacionaram-se os parâmetros econômicos e de manejo da irrigação, com o objetivo de se avaliar o equipamento para qualquer situação de projeto. Os autores observaram que o uso do conversor de frequência, visando controlar vazão, pode ser viável, especialmente em se dispondo da vida útil do mesmo, para amortização do investimento devendo-se, no entanto, avaliar cuidadosamente a redução de potência e o tempo de funcionamento da irrigação durante o ano.

ARAUJO (2003) avaliou o comportamento elétrico e hidráulico de um conjunto motor-bomba em um sistema de irrigação por aspersão em condições de acionamento convencional com rotação constante e variável por meio uso de um conversor de frequência. Para a realização do experimento em uma primeira fase, o autor instalou um sistema de bombeamento convencional por aspersão operando com rotação constante. Em uma segunda fase instalou um sistema de acionamento com rotação variável, composto de um transdutor de pressão e um conversor de frequência o qual atuou adequando a pressão pré estabelecida em relação à variação de vazão.

Por meio de um confronto técnico entre os dois sistemas ARAUJO (2003) demonstrou a viabilidade econômica da instalação de conversores de frequência no acionamento de motores elétricos trifásicos nos sistemas de irrigação por aspersão. Segundo o autor, com a implantação do sistema em campo, pode-se avaliar e quantificar a economia de energia elétrica, entre os dois sistemas analisados, demonstrando a viabilidade técnica e econômica, do conversor de frequência em função do número de horas anuais de funcionamento. O sistema operando com conversor de frequência manteve a pressão de serviços dos aspersores constante beneficiando o seu funcionamento hidráulico e com isso propiciando uma economia de energia elétrica da ordem de aproximadamente 30%.

RODRIGUES e LUVIZZOTO JUNIOR (2003) avaliaram o sistema de bombeamento do Centro de Reservação e Distribuição (CRD) de São Bernardo do Campo, SP, sob gerenciamento da Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A – Campinas – SP (SANASA), que teve a partir de meados de 2002 a implantação de um conversor de frequência. Foram analisadas as mudanças operacionais, os ganhos com a inserção deste dispositivo e, questionado em até que ponto este investimento tem resultado significativo na economia de energia elétrica.

As análises apresentadas nesse trabalho mostraram os benefícios da implantação dos conversores de frequência no CRD São Bernardo, no que se refere a confiabilidade operacional (evitando esgotamentos e transbordamentos do reservatório elevado), assim como, os reflexos de natureza econômica, ilustrado pela significativa redução no consumo de energia elétrica. Mesmo não existindo nenhum estudo mais aprofundado visando uma melhor utilização do conversor (com a bomba trabalhando sempre nos pontos de melhor rendimento) a redução no consumo de energia foi significativa.

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

GURGEL e TSUTYIA (2006) concluíram 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 necessite operar durante muito tempo próximo a velocidade de rotação nominal do motor.

BEZERRA (2009) utilizou conversores de frequência, juntamente com válvulas de controle, no desenvolvimento de um sistema automático de bombeamento e controle da altura manométrica. Segundo o autor o sistema é robusto e pode atuar com quaisquer valores de referência de pressão, não havendo limites para o número de pontos monitorados e controlados, podendo, inclusive, variar os valores de referência com o

tempo. Os experimentos foram extremamente bem sucedidos, principalmente nas funções exercidas pelos conversores. As pressões foram mantidas próximas aos valores estabelecidos e o erro de regime permanente máximo ficou dentro do tolerável

GOMES e CARVALHO (2012) publicaram um manual de sistemas de bombeamento cujo objetivo é proporcionar aos profissionais da área de saneamento, ensinamentos necessários a adoção de medidas que proporcionem o aumento da eficiência energética dos sistemas de abastecimento e de esgotamento sanitário. Em vários trechos do livro, os autores recomendam e apontam a utilização de conversores de frequência como a melhor solução para a variação de rotação e conseqüente controle de fluxo dos sistemas impulsores desse setor.

Assim, os conversores de frequência tem se mostrado bastante eficientes e com aplicações já bem consagradas. Porém, sua implantação em sistemas de bombeamento nem sempre é viável técnica e economicamente. Para se atestar a viabilidade, deve-se efetuar um estudo detalhado da hidráulica operacional do sistema, associando com estudos eletromecânicos, além do quantitativo de custos e da economia proporcionada de energia elétrica. Em alguns casos as vantagens de implantação no sistema não superam as condições operacionais específicas do sistema de bombeamento.

2.3. LÓGICA FUZZY

A área de inteligência artificial tem se estabelecido nos últimos anos em diversas frentes. Certamente o uso de computadores, micro controladores, processadores digitais de sinais, aliados a técnicas de controle tem permitido um campo fértil para viabilizar complexos algoritmos nas mais variáveis aplicações.

A lógica Fuzzy, como parte integrante daquele grupo de controladores, é um sistema de decisão que vem sendo amplamente utilizado em várias áreas da sociedade que lidam com imprecisão. Na captura de imagens para engenharia de tráfego (LEMOS, 2000), na biomedicina (QUEIROZ *et al.*, 1998; MATTOS *et al.*, 1999; ORTEGA, 2001), na arte contemporânea (MARTINS, 2004), na agronomia (VARGENS *et al.*, 2003; BRESSAN *et*

al., 2006), biblioteconomia (VANDERLEI *et al.*, 2002), na área pedagógica (RIEDER *et al.*, 2005), no setor de administração e avaliação das organizações (SILVA e LOPES, 2004; SILVEIRA *et al.*, 2005).

No setor de abastecimento e bombeamento de água e dentro do objetivo e ações que vem sendo aplicados para a obtenção de redução de custos de energia desses sistemas, trabalhos já foram apresentados usando algumas dessas tecnologias alcançando resultados satisfatórios e desenvolvendo seus controladores (técnicas de automação) por meio da lógica Fuzzy.

BORDON (2004) desenvolveu um controlador digital simples e eficiente, utilizando conceitos de lógica Fuzzy, aplicado no acionamento de um motor de indução trifásico. Trata-se de um trabalho de engenharia aplicada, que apresenta o projeto de um controlador Fuzzy de arquitetura simplificada, que emprega uma estrutura padronizada para representação das funções de pertinência e permite efetuar a ponderação dos termos linguístico. Para avaliar o desempenho desse 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 desse 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 desse controlador, 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. Esse 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 rotação de um conjunto motor-bomba. O controle de velocidade de rotação do motor de acionamento da bomba (motor elétrico de indução trifásico) foi feito por meio de um conversor de frequência variável, comandado por um sinal elétrico de tensão variável. Esse sinal elétrico foi fornecido por um computador, por meio de uma interface e muda em função das condições e características do solo. Esse sistema de controle visou proporcionar maior

produtividade as culturas, pois o solo estará sempre com a umidade adequada para o seu desenvolvimento.

SOUZA *et al.* (2007) desenvolveram uma técnica para melhorar a eficiência dos motores de velocidade de rotação variável, com ênfase no controle vetorial dos motores de indução. A técnica combina a busca “on line” do ponto de funcionamento e uma busca de uma melhor eficiência baseada no controle Fuzzy. Para uma dada condição de funcionamento, caracterizada por uma determinada velocidade de rotação e torque de carga, um controlador determina o nível de fluxo que resulta em uma mínima potência de alimentação. Uma vez que o nível de fluxo ótimo foi encontrado, essa informação é utilizada para atualizar a base de regras do controlador Fuzzy, que desempenha o modelo matemático implícito no sistema.

BEZERRA *et al.* (2008) e CAMBOIM (2008) apresentaram um sistema Fuzzy, desenvolvido no programa computacional Labview™, para o controle de pressão em sistemas de bombeamento de água. O controle é realizado através de um conversor de frequência comandado por um computador portátil, que possui um módulo de aquisição de dados acoplado. A velocidade de rotação do motor elétrico é definida, em tempo real, a partir de sistema Fuzzy baseados em regras estritamente linguísticas.

SUETAKE *et al.*(2008) propuseram o desenvolvimento de um sistema Fuzzy utilizando 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. O algoritmo do sistema de controle Fuzzy foi implementado no DSP. O dispositivo é encarregado de mensurar a velocidade de rotação 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 de rotação e gerar os sinais com modulação senoidal para acionar o conversor trifásico.

MENDONÇA (2008) buscou reduzir as oscilações em edifícios altos, causadas pela ação dos ventos por meio de um sistema de controle híbrido. A técnica de controle utilizada foi a Fuzzy, que segundo o autor se mostrou adequada para a redução de vibração na estrutura. Para o trabalho foi desenvolvido um protótipo de uma estrutura teste,

simulando um edifício de dois andares construído em chapas de aço com colunas de alumínio de seções transversais quadradas.

A solução proposta pela pesquisa baseia-se na utilização de atenuadores dinâmicos de oscilação de estrutura, que são sistemas auxiliares que geram força de controle sobre a estrutura com o objetivo de reduzir a amplitude das vibrações. Após a análise numérica e experimental da estrutura foi constatado que o controlador Fuzzy apresentou-se bastante eficiente.

BEZERRA (2009) apresentou um sistema Fuzzy que foi desenvolvido em ambiente LabviewTM, para controle piezométrico de sistemas de distribuição de água por meio do uso simultâneo de válvulas de controle e conversores de frequência acoplados a conjunto motor-bomba. O sistema de controle atuava na determinação da velocidade de rotação do motor e no ângulo de abertura da válvula de controle. O sistema era robusto e pode atuar com quaisquer valores de referência de pressão, não havendo limite para o número de pontos monitorados e controlados, podendo inclusive, variar os valores de referência com o tempo. O sistema Fuzzy se mostrou satisfatório, podendo ser implementado facilmente em outros sistemas de distribuição de água, a fim de proporcionar redução de água e energia elétrica, diminuição no custo de manutenção e aumento no grau de confiabilidade dos procedimentos. Todo o trabalho foi desenvolvido em um bancada experimental de distribuição de água, montado no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba – LENHS. A bancada era composta por uma bomba, válvulas de controle e transdutores de pressão e vazão.

Em muitos processos onde a dinâmica é complexa e não pode ser descrita matematicamente, mesmo por projetistas experientes, ou que necessitam controlar processos de sistemas não lineares e com várias entradas e saídas, os controladores Fuzzy tem se mostrado altamente eficientes (BEZERRA e SILVA, 2009).

JULIO (2010) apresentou um projeto de controlador Fuzzy para uma mesa de coordenada X-Y, com dois graus de liberdade. Ambas as bases que compõem a mesa se deslocam horizontalmente, sendo acionadas por motores de indução trifásicos alimentados por conversores de frequência. Para a detecção de posição das bases foram acoplados encoders ópticos aos eixos dos motores, a fim de serem obtidos seus deslocamentos

angulares. O controlador Fuzzy foi responsável por determinar as variáveis de controle que acionam os motores. Ao fim dos experimentos realizados, os resultados apresentados foram dentro do esperado, além de todos os erros de regime permanente relatados foram nulos.

Os sistemas Fuzzy podem, ainda, ser utilizados conjuntamente com outras técnicas de controle, como Sistemas Neuro-Fuzzy (HENRIQUES, 1999; HENRIQUES 2004; MEDEIROS *et al.*, 1995), Fuzzy e Algoritmos Genéticos (ROMÃO *et al.*, 1999).

CAPÍTULO III

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresentam-se os principais fundamentos teóricos utilizado no desenvolvimento da pesquisa. Todos os conhecimentos explanados aqui se mostram de fundamental importância no desenvolvimento do trabalho, seja na simples montagem da bancada experimental à sua configuração e ligação de equipamentos. Evidente que todos os conhecimentos culminam no desenvolvimento do controlador em questão.

As informações repassadas nesta seção estão longe de esgotarem os conhecimentos e questões sobre cada tema, porém, por se tratar de um trabalho multidisciplinar, onde profissionais e técnicos de várias áreas estão envolvidos, apresenta-se os conhecimento mínimos necessários para o andamento do projeto.

3.1. SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Segundo GOMES (2009) sistemas de abastecimento de água é o conjunto de equipamentos, obras e serviços voltados para o suprimento de água à comunidade, para fins de consumo doméstico, industrial e público. Sua concepção e dimensionamento ocorrem de forma integrada, o que requer, geralmente, o emprego de uma equipe de profissionais especializados.

No seu desenvolvimento, o fator econômico, que leva em consideração custos de investimentos e operação dos sistemas, exerce um papel marcante e diferencial. A operação dos sistemas de abastecimento constituem a principal ação de gestão das empresas de saneamento, o que nos leva ao compromisso de criar mecanismos para otimizar essa operação.

Nesse sentido, o controle de pressão é fundamental para a redução das perdas reais em sistemas urbanos de distribuição de água (VITKOVSKY *et al.*, 2000). Além disso, está diretamente relacionado ao consumo de água e energia elétrica. Logo, esse controle é fundamental para que os sistemas atuais se tornem mais eficientes e menos onerosos.

A influência da pressão nos sistemas de abastecimento é conhecida há muito tempo pelos pesquisadores e técnicos das companhias de saneamento. Segundo PEARSON *et al.* (2005) uma das maiores vantagens da gestão da pressão é a redução significativa na frequência de novos rompimentos de tubulação. Por sua vez, a redução no número de rompimento diminui o desperdício de água tratada, o custo com mão de obra para reparos, além do desconforto aos usuários que deverão ficar sem abastecimento no período do reparo.

Outro fator relevante que contribui para a adoção desta medida é a redução no desgastes de peças, válvulas e equipamentos. Sistemas de bombeamento que estão submetidos a pressões de serviços muito elevadas normalmente têm a vida útil de seus equipamentos e até mesmo conexões reduzidas.

Segundo BEZERRA (2009) as principais ações para o controle da pressão em sistemas de distribuição de água são: setorização do sistema de distribuição de água, instalação de válvulas redutoras de pressão e utilização de bombas com velocidade de rotação variável. Evidente que a utilização de cada uma dessas medidas depende desde fatores simples como a disponibilidade financeira para a implantação do sistema à real necessidade técnica de cada medida.

Nesta pesquisa pretende-se fazer uso de duas destas ações: a setorização do sistema de abastecimento, por meio da instrumentação da rede e total conhecimento de todos os parâmetros que a caracterizam e a utilização de bombas com velocidade de rotação variável. Esta segunda opção se dá graças ao acionamento por meio de conversores

de frequência para motores de indução trifásico, responsáveis pela propulsão das bombas hidráulicas.

3.2. MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O motor elétrico é um equipamento que transforma energia elétrica em energia mecânica disponibilizada em um eixo em rotação. É a máquina mais largamente utilizada na indústria, no meio rural, nos serviços e nas residências devido as qualidades inerentes da energia elétrica, que é limpa, de baixo custo e de fornecimento instantâneo.

Os motores de indução trifásico, cujo princípio de funcionamento está baseado na indução eletromagnética, respondem por mais de 95% do total de motores elétricos instalados. São caracterizados pela robustez que garante uma vida útil bastante longa aliada ao menor custo e facilidade de instalação e manutenção.

Segundo FRANCHI (2009) no seu processo de funcionamento a energia elétrica fornecida aos circuitos do conjunto estacionário (estator) é transferida por indução, para os circuitos da parte rotativa (rotor). O rotor está situado no interior do estator e separado dele por uma estreita zona de ar (entreferro).

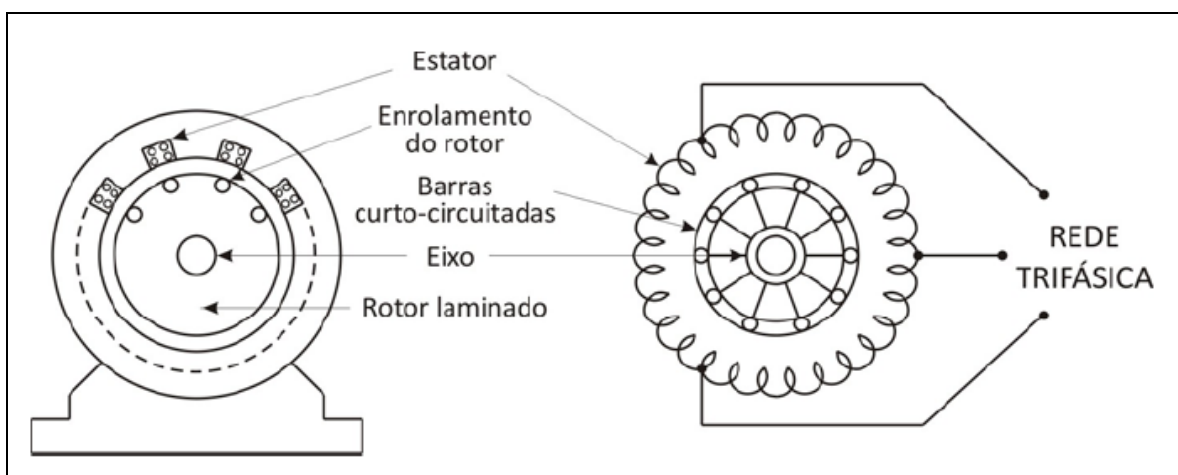


Figura 1 - Estator de uma máquina de indução.

O funcionamento do motor de indução trifásico é baseado na aplicação da tensão alternada dos enrolamentos (bobinas) da armadura (estator), resultando em um campo eletromagnético rotativo. Os enrolamentos do rotor do motor, influenciados pelo campo

eletromagnético oriundos das bobinas do estator, produzem corrente e força eletromotriz induzidas e, como consequência, um conjugado motor (torque), transformando a energia elétrica em energia mecânica.

Ao longo do estator têm-se grupos trifásicos de bobinas em cada pólo; esses grupos seguem uma ordem pré-determinada 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:

$$N_s = \frac{120 \times f}{p} \quad (1)$$

Onde: N_s : número de rotações em rpm;
 f : frequência de rede em hz.
 p : número de pólos.

Existem várias formas de variar a velocidade de rotação de um motor de indução trifásico, porém, a forma mais eficiente é por meio da variação da frequência da tensão de alimentação do estator (Equação 1). 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 (Torque) como mostrado na Figura 2.

Na Figura 2 constata-se que a redução da velocidade de rotação do motor por meio da redução da frequência da rede de alimentação não altera o conjugado máximo que o motor pode proporcionar. Essa característica é importante para a aplicação em sistemas de abastecimento de água.

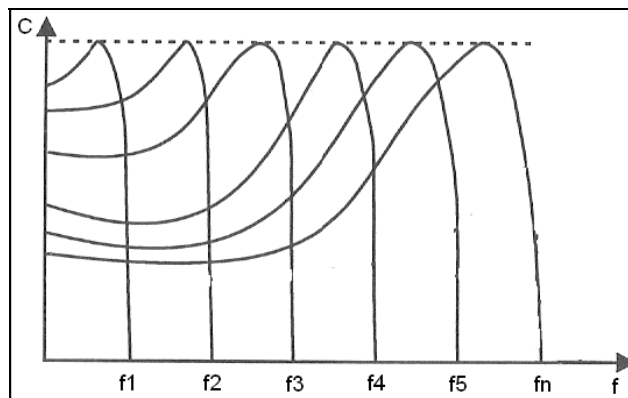


Figura 2 - Curvas de conjugado (Torque) x velocidade de rotação para vários valores de frequência de alimentação do motor.

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

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

(2)

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (3)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (4)$$

Sendo: N_1 e N_2 = velocidade de rotação da bomba¹;

Q_1 e Q_2 = vazão relativa à velocidade de rotação da bomba¹;

H_1 e H_2 = altura manométrica total relativa à velocidade de rotação da bomba¹;

P_1 e P_2 = potência consumida da bomba relativa a velocidade de rotação da bomba¹;

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

Na Figura 3 apresenta-se a variação da curva característica da bomba (Q-H), rendimento e potência, decorrente da variação da velocidade de rotação da bomba.

Conforme se observa na Figura 3 não haverá grandes perdas adicionais ao sistema hidráulico mesmo com a diminuição da vazão, o rendimento da bomba praticamente continua o mesmo.

¹ O índice subscrito 1 utilizados nas variáveis das equações 2,3 e 4, referem-se a condição inicial enquanto o 2 a condição final.

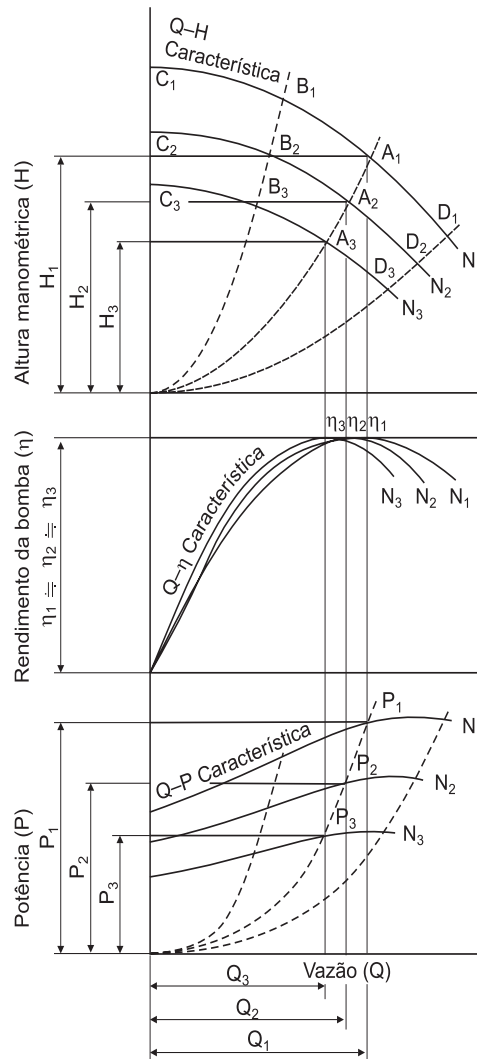


Figura 3 - Variação das curvas características das bomba em função da variação de velocidade de rotação (TSUTIYA, 2004).

3.3. CONVERSORES DE FREQUÊNCIA

Nos processos modernos de variação da velocidade de rotação do motor de indução trifásico os conversores de frequência são os equipamentos mais utilizados (SILVA, 2009). Esses equipamentos, por meio de um comando microprocessado, controlam dispositivos semicondutores que ajustam a frequência da tensão de alimentação do motor. Por meio desse ajuste, conforme verificado na Equação 1, pode-se variar a velocidade de rotação do motor.

Com o ajuste das variáveis (frequência, número de pólos) o conjugado e a velocidade de rotação são ajustados a necessidade da carga, ou seja, a velocidade de rotação necessária pode ser obtida sem o empobrecimento da regulação de velocidade de rotação do motor.

Segundo RALIZE e MARQUES (2006), os conversores de frequência apresentam as seguintes vantagens e desvantagens:

- Vantagens:

- ❖ montagem simples;
- ❖ a corrente do motor se comporta de forma suave, sem picos;
- ❖ proteções elétricas 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 elevado;
- ❖ produz interferências na rede elétrica de alimentação (harmônicas) devido a alta frequência de chaveamento dos seus componentes internos.

Os conversores de frequência podem operar no modo escalar ou no modo vetorial. No modo escalar a relação entre tensão e frequência é mantida constante, independente da velocidade de rotação do motor. Segundo SILVA (2009) controle escalar em conversores de frequência é utilizado em aplicações normais que não requerem elevada dinâmica, nem elevada exatidão e controle no conjugado. Um conversor com controle escalar pode controlar a velocidade de rotação do motor com precisão de 0,5% da velocidade de rotação nominal para sistemas sem variação de carga.

O conversor de frequência com controle vetorial é utilizado em aplicações onde se faz necessário um alto desempenho dinâmico, respostas rápidas e elevada exatidão precisão de regulação de velocidade de rotação, onde o motor elétrico deverá fornecer,

assencialmente, um controle com exatidão elevada de conjugado para uma faixa extensa de condições de operação. No modo vetorial, o conversor controla a relação tensão/frequência (V/f) independente da velocidade de rotação e do conjugado requerido.

A tensão de saída do conversor de frequência apresenta distorção harmônica (forma de onda não perfeitamente senoidal), provocando aumento na corrente eficaz e, conseqüentemente, aumento de perdas, além de reduzir o fator de potência real.

As distorções harmônicas, quando em valores excessivos, têm como consequência a redução da vida útil dos capacitores, má operação dos equipamentos e aumento das perdas em cabos de alimentação, transformadores e motores elétricos, além de altos níveis de ruído introduzidos na rede de alimentação.

Existem vários filtros capazes de reduzir as harmônicas geradas pelos conversores, porém não é objetivo desse trabalho tratá-los aqui.

3.4. FUNDAMENTOS DA LÓGICA FUZZY

Segundo BEZERRA (2009), automação pode ser definida como qualquer aplicação de técnica computadorizada ou mecânica para diminuir ou suprimir a interferência humana em qualquer processo. Mecanismos automáticos podem ser adotados tanto no auxílio de controle de processos simples como no controle automático de grandes sistemas.

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 em informações, o sistema automático calcula a ação mais apropriada para a ocasião. 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 essa seção 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.

A Lógica Fuzzy incorpora a forma humana de pensar, substituindo as decisões rígidas tomadas, por meio de regras baseados em dois valores lógicos: “verdadeiro ou falso”. Através de suas teorias as variáveis podem assumir valores intermediários criando situações que recebem valores lógicos equivalentes a “pouco verdadeiro” ou “quase falso”, por exemplo (SIMÕES e SHAW, 2007).

A Lógica Fuzzy provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em valores numéricos. Isso abre portas para se converter a experiência humana em uma forma compreensível pelos computadores, possibilitando a inclusão da experiência dos controladores humanos, os quais controlam processos e plantas industriais, em controladores computadorizados.

Essa característica dispensa a necessidade, presente nos controles tradicionais, de se fazer a modelagem matemática do sistema. Nos modelos matemáticos, geralmente na forma de equações diferenciais, muitas restrições são feitas a fim de alcançar resultados. A consideração de que o processo é linear (pelo menos em torno de alguns pontos de operação) e que o sistema é invariante com o tempo (apesar de na realidade ocorrer deterioração dos componentes do sistema, etc) são algumas das simplificações consideradas pelo projetista na tentativa de encontrar uma descrição matemática para o processo.

Nos sistemas Fuzzy o conhecimento matemático não é tão necessário, entretanto, o projetista precisa de uma profunda compreensão de como as imprecisões e incertezas ocorrem em seus processos e como elas afetam as aplicações do seu controlador, possibilitando a configuração dos objetivos almejados.

Dessa forma, devido ao fato de emular a inteligência humana, a Lógica Fuzzy é referida como inteligente. Os assim chamados “sistemas inteligentes” são aqueles que fornecem respostas que solucionam problemas. Tais respostas apropriadas às situações específicas desses problemas, mesmo que sejam novas ou inesperadas, fazendo com que cada comportamento seja único ou até mesmo considerado criativo (SIMÕES e SHAW, 2007). Além disso, a lógica Fuzzy atribui variáveis linguísticas à seus elementos tornando o trato com os parâmetros mais amigáveis e de fácil absorção.

Em nosso cotidiano poucos são os casos 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, trazendo a condição para os sistemas de abastecimento, 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, ou ainda, que aquela condição de associação de motores é a que produz um menor consumo energético, pois vários fatores relacionados anteriormente intervirão nesse sentido.

Então, para explicar o conceito da Lógica Fuzzy e sua diferença com a Lógica Booleana² apresenta-se, na Figura 4, um exemplo clássico e já demonstrado em vários outros trabalhos, mas que retrata fácil e perfeitamente seus princípios.

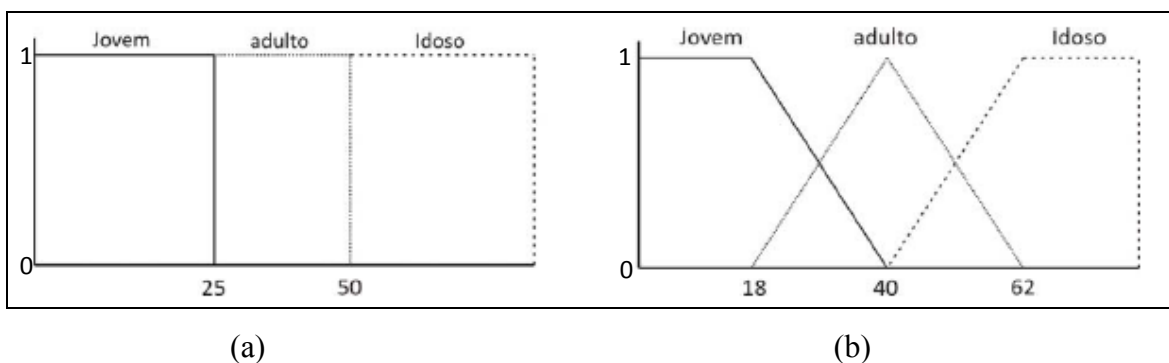


Figura 4 - Conjunto idade nas abordagens: (a) booleana e (b) Fuzzy.

² Lógica desenvolvida por George Boole, do tipo binária, cujas declarações e linhas de raciocínio só podem assumir o valor verdadeiro ou falso, 1 ou 0, não permitindo uma transição gradual ou meias verdades dos conjuntos.

Observa-se, na abordagem booleana (Figura 4(a)), que as transições entre os conjuntos “jovem” e “adulto”, e entre os conjuntos “adulto” e “idoso”, são bruscas. Uma pessoa que passar dos 24 anos e 11 meses para os 25 anos em um dia, sai da categoria de “jovem” diretamente para “adulto”; essa abordagem é incompatível com a lógica de pensamento humano. Já na abordagem Fuzzy (Figura 4(b)), vê-se que as transições são suaves, sendo que o indivíduo a partir dos 18 anos deixa de ser 100% “jovem” e começa a pertencer parcialmente aos conjuntos “jovem” e “adulto”. É importante observar o conceito de grau de pertinência, este define o “quanto” uma variável pertence a um determinado conjunto, variando geralmente no intervalo (0 a 100%) (BEZERRA, 2009).

A Lógica Fuzzy 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).

O processo de tomada de decisão por meio da Lógica Fuzzy segue o diagrama de dados mostrado na Figura 5, composto pelos seguintes blocos funcionais:

- ❖ Fuzzificação
- ❖ Inferência Fuzzy
- ❖ Defuzzificação.

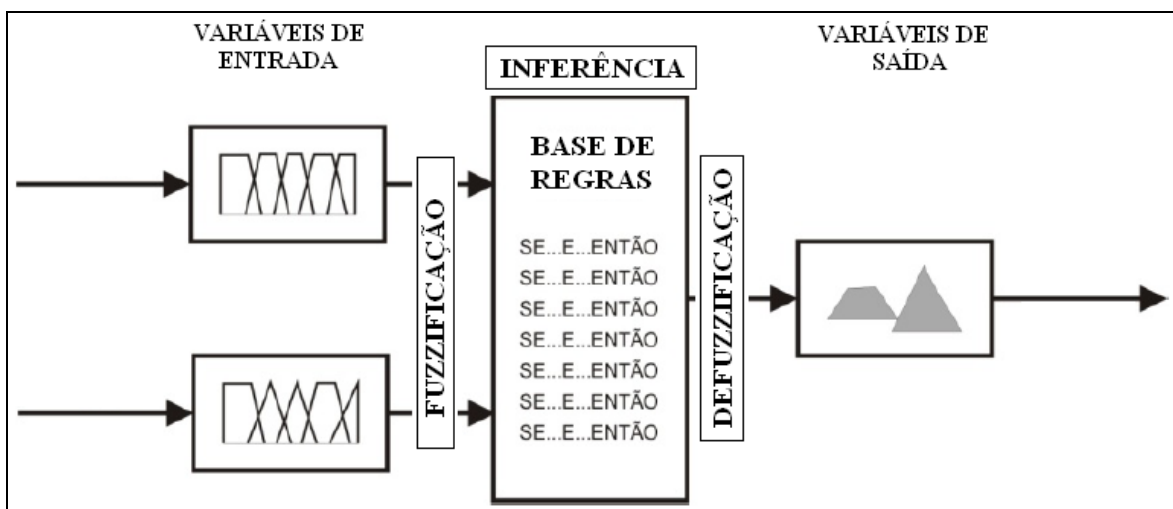


Figura 5 - Diagrama de bloco de um controlador Fuzzy.

3.4.1. Definição das Variáveis

Antes de iniciar o processo Fuzzy, deve-se definir as variáveis que estarão envolvidas no processo. As variáveis (de entrada e de saída) são as grandezas que darão suporte para a tomada de decisão ou as grandezas a serem controladas. A Lógica Fuzzy provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em uma forma compreensível pelos computadores e as variáveis podem assumir seus próprios nomes.

Para cada variável linguística deve ser adotado um universo de discurso, que serão todos os valores que a variável poderá assumir. Dessa forma, para cada variável de entrada, são criadas funções de pertinência dentro desse universo de discurso, que por meio do grau de pertinência atribuído a função definirá o valor da entrada. Por exemplo, a *pressão do sistema* (variável de entrada) poderá assumir valores *muito baixo*, *baixo*, *ótimo*, *alto* e *muito alto* (funções de pertinência), inclusive podendo assumir mais de um valor linguístico, evidentemente com diferentes graus de pertinência.

Na Figura 6 é mostrado um exemplo com um valor de 17 mca da variável de entrada de pressão que assumirá um valor linguístico “muito baixa” com grau de pertinência 0,7.

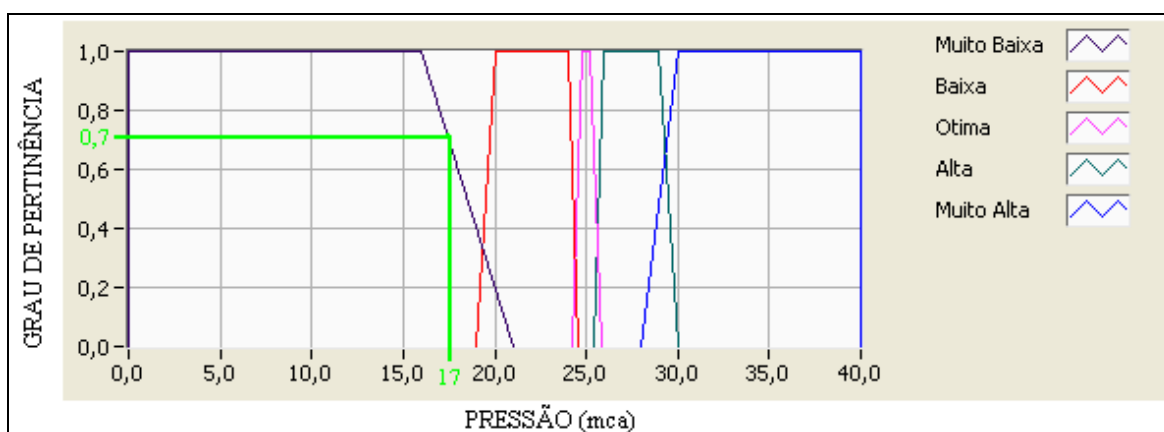


Figura 6 - Definição das variáveis do controlador Fuzzy.

As funções de pertinência indicam o quanto um elemento pertence a um dado conjunto, conforme pode-se verificar na Figura 6. Suas curvas podem assumir vários formatos: triangular, trapezoidal, gaussiana (forma de parábola), singleton (grau de

pertinência 1 para um único valor) (Figura 7). Existem ainda outros formatos de funções menos utilizados e, portanto, de menor importância.

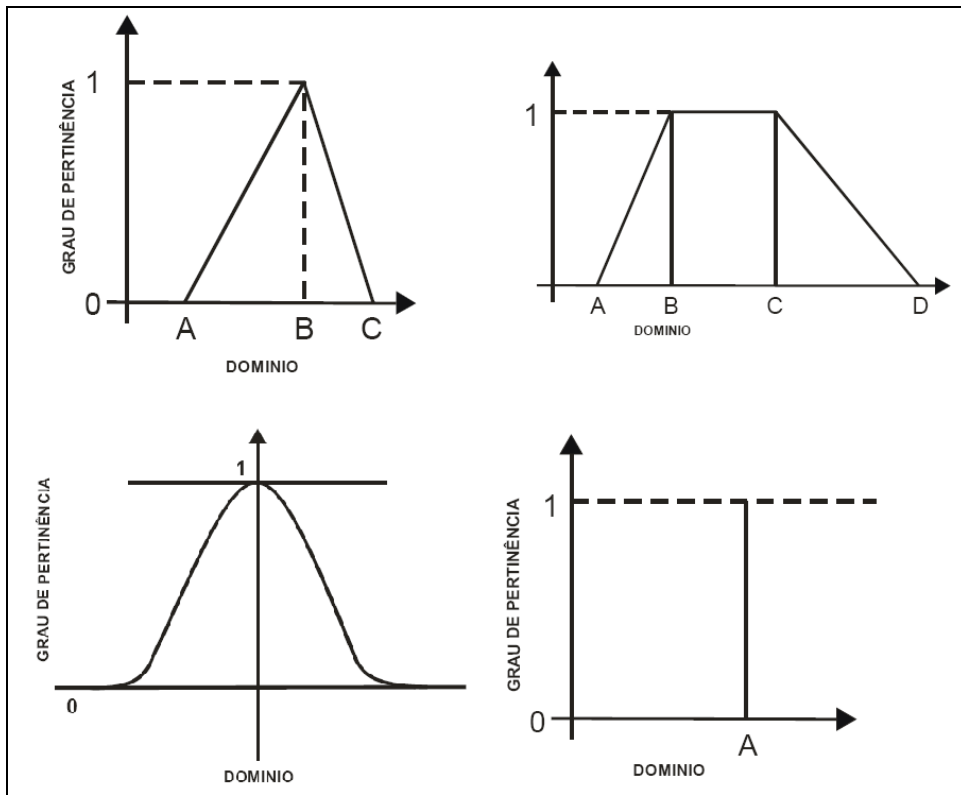


Figura 7 - Funções de pertinência triangular, trapezoidal, gaussiana e singleton.

Segundo SIMÕES e SHAW (2009) a quantidade de funções de pertinência em um universo de discurso e seu formato são escolhidos com base na experiência, na natureza do processo a ser controlado, ou em uma entrevista com um operador humano especializado, que realiza as funções de controle manualmente. Porém, pode-se dizer que um número prático de conjuntos Fuzzy lingüístico (funções de pertinência) é algo entre 2 e 7.

Assim, esse processo é feito para todas as variáveis envolvidas no controlador, sejam elas de entrada ou de saída.

3.4.2. Fuzzificação

Segundo JANTZEN (2007), fuzzificação é um processo de pesquisa entre as funções para obter os graus de pertinência. É um mapeamento do domínio dos números reais para o domínio Fuzzy. A fuzzificação também representa que há atribuições de

valores linguístico, descrições vagas ou qualitativas, definidas por funções de pertinência às variáveis de entrada.

Na fuzzificação faz-se um mapeamento do domínio de números reais (em geral discretos) para o domínio Fuzzy. 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.

Então o processo de fuzzificação consiste em atribuir um grau de pertinência referente a cada função de pertinência, para os valores de entradas em suas respectivas variáveis. Nesse sentido se for utilizado o exemplo da Figura 6 tem-se que o equivalente Fuzzyficado da entrada +17 mca na variável de entrada do controlador pertencerá apenas à função de pertinência *muito baixo* com grau de pertinência 0,7 e todas as outras funções de pertinência Fuzzy com grau de pertinência 0,0. Assim, o vetor Fuzzy equivalente ao número discreto +17 mca é $\{0,7;0;0;0;0\}$.

3.4.3. Base de Regras – Inferência Fuzzy

A base de regra relaciona as variáveis do controlador, obtendo conclusões a partir das variáveis de entrada. Segundo LIMA (2007), as regras do tipo mais comumente utilizadas são as sentenças linguísticas e são extremamente importantes no desempenho de um Sistema de Inferência Fuzzy. As regras normalmente são fornecidas por especialistas, conhecedores do sistema, operadores de plantas ou processos industriais quando da aplicação de Controle e Modelagem Fuzzy.

Quando uma entrada é fornecida a um controlador Fuzzy, ele dispara cada regra em paralelo para inferir um resultado de saída. Essa operação paralela é o que garante aos controladores Fuzzy sua alta velocidade de processamento (SIMÕES e SHAW, 2009).

Os sistemas Fuzzy raciocinam com os conjuntos linguístico, definidos pelas variáveis de entrada e de saída, ao invés de proposições lógicas bivalentes (modelo bolleano). A forma geral de uma inferência Fuzzy é:

SE<condições>**ENTÃO**<conclusão>.

SE pressão = < *muito alta* > **E** vazão = < *baixa* > **ENTÃO** válvula < *abrir* >.

Um especialista humano deverá formular o conjunto de regras Fuzzy, articulando associações de entrada e saída linguísticas. O sistema Fuzzy produzirá estimativas de um sistema não-linear complexo sem recorrer a modelos matemáticos.

O conectivo mais utilizado (e o único utilizado neste trabalho) é o “**E**”, aplicado como multiplicativo. Porém, conectivos do tipo “**E NÃO**”, contrários ao anterior também são possíveis. O que geraria regras do tipo:

SE pressão = < *muito baixa* > **E NÃO** =<zero>**ENTÃO** ...

Outra possibilidade é utilizar uma constante na conclusão, que pode ser representada por uma função singleton (Figura 7), ocasionando as vantagens de gerar regras mais simples e intuitivas:

SE pressão = < *muito baixa* > **LOGO** controle = <10>.

A determinação de como as regras são ativadas e combinadas, bem como a forma como ocorrem as operações com os conjuntos Fuzzy é definida pelo tipo de inferência do controlador. Para o controlador deste trabalho utilizou-se a inferência *MAX-MIN*.

Esse método de inferência utiliza o operador *min* que corresponde ao conectivo **E** de acordo com as regras da intersecção Fuzzy, com uma operação chamada de agregação.

Na Figura 8 é mostrado um exemplo cujas entradas discretas do sistema são p_1 e q_1 . As linhas verticais que representam p_1 e q_1 cruzam as funções de pertinência (alta, baixa e muito baixa). O conectivo **E** (método *mim*) obtém o menor valor assinalado nas funções de pertinência, e projeta uma linha horizontal (tracejada) sobre o conjunto Fuzzy consequente. A linha azul (Figura 8) corresponde ao universo de discurso das funções de pertinência.

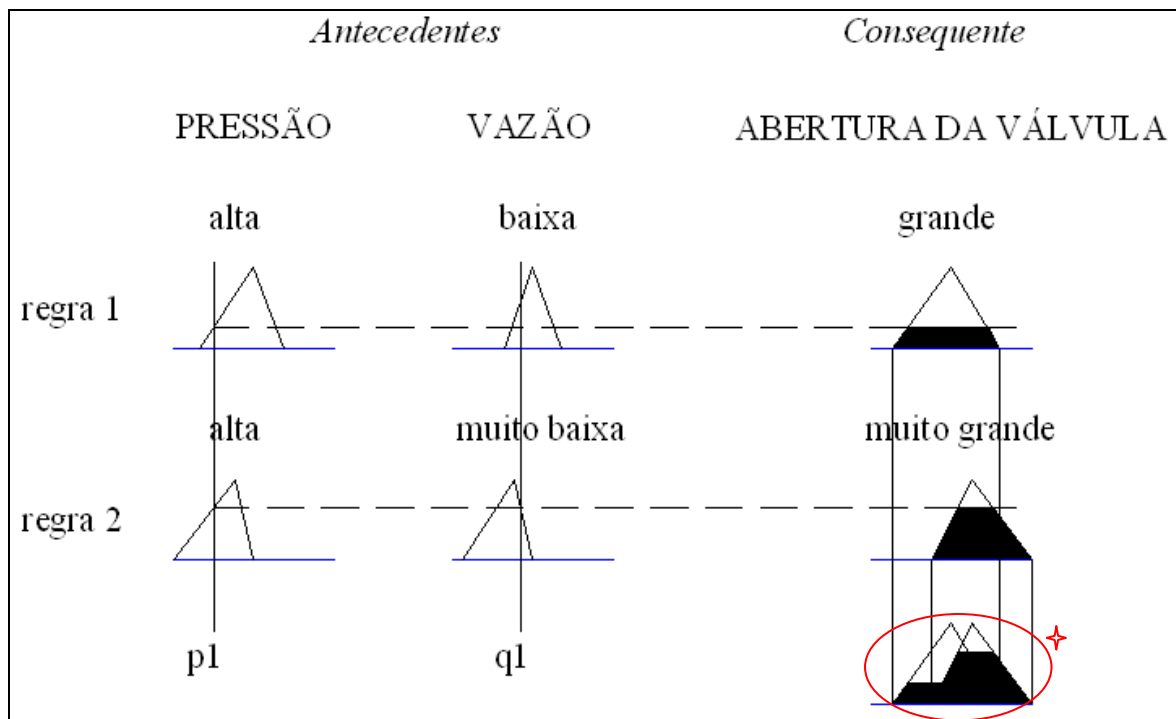


Figura 8 - Agregação de um sistema com duas regras³.

O operador *max*, do sistema de inferência, que corresponde ao conectivo **OU** de acordo com as regras de união Fuzzy, proporciona uma operação de composição. O operador *max* cria o contorno ou envelope comum aos dois conjuntos Fuzzy consequentes.

Existem outros 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 a descrita anteriormente denominada Método de Mamdani.

Segundo (SANTOS, 2003) o Método Mamdani foi proposto em 1975 por Ebrahim Mamdani. Conforme visto anteriormente, 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.

³ ✦ Ver processo de defuzzificação Figura 9

3.4.4. Defuzzificação

Uma vez feitas as avaliações das proposições (regras) Fuzzy deve-se determinar o valor real da saída do sistema. Este processo chama-se Defuzzificação. Segundo BEZERRA (2009) para situações que requerem uma resposta numérica, o conjunto Fuzzy da saída é transformado num valor único pelo processo de defuzzificação, ou seja, o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras Fuzzy será traduzido em um valor discreto.

O objetivo é obter-se um único valor numérico discreto que melhor represente os valores Fuzzy inferidos da variável linguística de saída, ou seja, a distribuição das possibilidades. Assim, a defuzzificação é uma transformação inversa que traduz a saída do domínio Fuzzy para o domínio discreto. Vários métodos podem ser utilizados nesse processo: Centro da Área (C-o-A), Centro do Máximo (C-o-M) e Média do Máximo (M-o-M) (SIMÕES e SHAW, 2009).

No método de defuzzificação Centro de Máximo (método utilizado nesse trabalho) os picos das funções de pertinência são representados no universo de discurso da variável de saída. Na Figura 9 é mostrado resultado da mesma operação do exemplo mostrado na Figura 8, para a variável de saída abertura de válvula. Os valores não nulos do vetor de possibilidade de saída são posicionados nos picos correspondentes, assumindo que representam pesos. O valor de saída defuzzificado, discreto, é determinado achando-se o ponto de apoio onde os pesos ficam equilibrados. A saída discreta é calculada como uma média ponderada dos máximos, cujos pesos são os resultados da inferência.

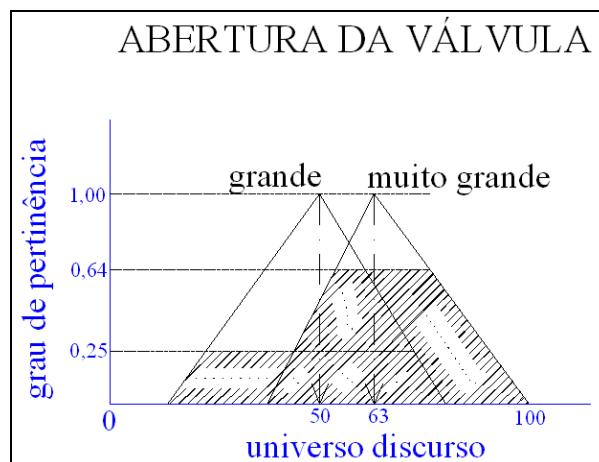


Figura 9 - Defuzzificação pelo centro de máximo.

O cálculo do valor defuzzificado é realizado por meio da Equação 4 onde $\mu_{0,k}(u_i)$, indicam os pontos em que ocorrem os máximos das funções de pertinência de saída.

$$u = \frac{\sum_{l=1}^N u_l \times \sum_{k=1}^N u_{out}(u_l)}{\sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^N u_{out}(u_l)} \quad u = \frac{\sum_{l=1}^N u_l \times \sum_{k=1}^N \mu_{out}(u_l)}{\sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^N \mu_{out}(u_l)} \quad (4)$$

Onde:

$\sum_{l=1}^N u_l$ = somatório do grau de pertinência do valor fuzzificado referente a função consequente;

$\sum_{k=1}^N u_{out}(u_l)$ = somatório do máximo valor da função consequente no universo de discurso.

$\sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^N u_{out}(u_l)$ = multiplicação do somatório dos graus de pertinência do valor fuzzificado referente as funções consequentes;

Assim, supondo o processo de defuzzificação da abertura de válvula mostrado na Figura 9, tem-se o seguinte valor discreto:

$$u = \frac{0,25 \times 50 + 0,64 \times 63}{0,25 + 0,64} = 59,3 \quad (5)$$

Segundo SIMÕES e SHAW (2009) essa abordagem representa um melhor compromisso entre possíveis saídas com multiplicidade de disparo de conjunto Fuzzy. Ou seja, se três regras forem acionadas, duas impondo uma saída e uma impondo outra, pelo método de defuzzificação centro do máximo, a saída com mais regras fica reforçada. Além disso, em aplicações em malha fechada, a propriedade da continuidade é importante, pois se a saída de um controlador Fuzzy controla uma variável do processo, mudanças bruscas

na saída do controlador podem causar instabilidade e oscilações, logo é prudente optar pela defuzzificação C-o-M.

CAPÍTULO IV

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresenta-se toda descrição dos experimentos realizados na pesquisa, bem como todos os equipamentos e técnicas utilizadas no seu desenvolvimento. O objetivo é colocar em prática todos os conhecimentos e parâmetros descritos nos capítulos anteriores.

Os experimentos foram divididos em três módulos. No primeiro as perturbações do sistema ficavam por conta de um simulador de demanda, que causava perturbações lentas no sistema semelhante à variação de demanda de um sistema real. Posteriormente realizaram-se experimentos com perturbações bruscas no sistema, causando altas variações na pressão. E por fim, uma avaliação da busca pelo melhor desempenho energético do sistema. Em paralelo às excitações do sistema houve um rigoroso controle na pressão mantendo-a em valores ideais, previamente fixados, além da constante busca pelo menor consumo energético. Para isso fez-se uso da Lógica Fuzzy, desenvolvido na Fuzzy Logic Toolbx do LabVIEWTM, os quais foram ativados, desenvolvidos e implementados no ambiente computacional de LabVIEWTM 8.2 (2006).

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

4.1. EQUIPAMENTOS

Os experimentos foram realizados em uma bancada experimental compacta montada nas dependências do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba – LENHS UFPB. O objetivo e a função da realização dos experimentos em bancada experimental foram, primeiramente, pela dificuldade em realizar e instrumentalizar uma rede de abastecimento real. Além disso, uma bancada compacta oferece total controle, inclusive visual, de todos os processos, equipamentos e tubulações, facilitando o monitoramento e a realização de ajustes e calibrações necessárias. Na Figura 10 é mostrada a bancada experimental com seus equipamentos.



Figura 10 - Bancada experimental.

A bancada experimental emula um sistema de abastecimento real com todos os componentes necessários para o seu bom funcionamento. Por se tratar de um modelo experimental foi concebida como um circuito fechado, onde seu ponto de descarga (ponto de consumo) tem ligação com o reservatório que abastece o sistema. Na Figura 11 é apresentado o desenho esquemático da concepção da montagem da bancada, que é composta por um reservatório apoiado, dois conjuntos motor-bomba (CMB), dois

conversores de frequência, cinco transdutores de pressão (PT), dois transdutores de vazão (FT), uma válvula de controle (CV), uma fonte de alimentação, uma interface de aquisição de dados (IAD) e um computador portátil. Além disso, foram utilizados tubos, conexões e registros para a instalação hidráulica e cabos, disjuntores de proteção, hastes de aterramento e quadros para a alimentação elétrica.

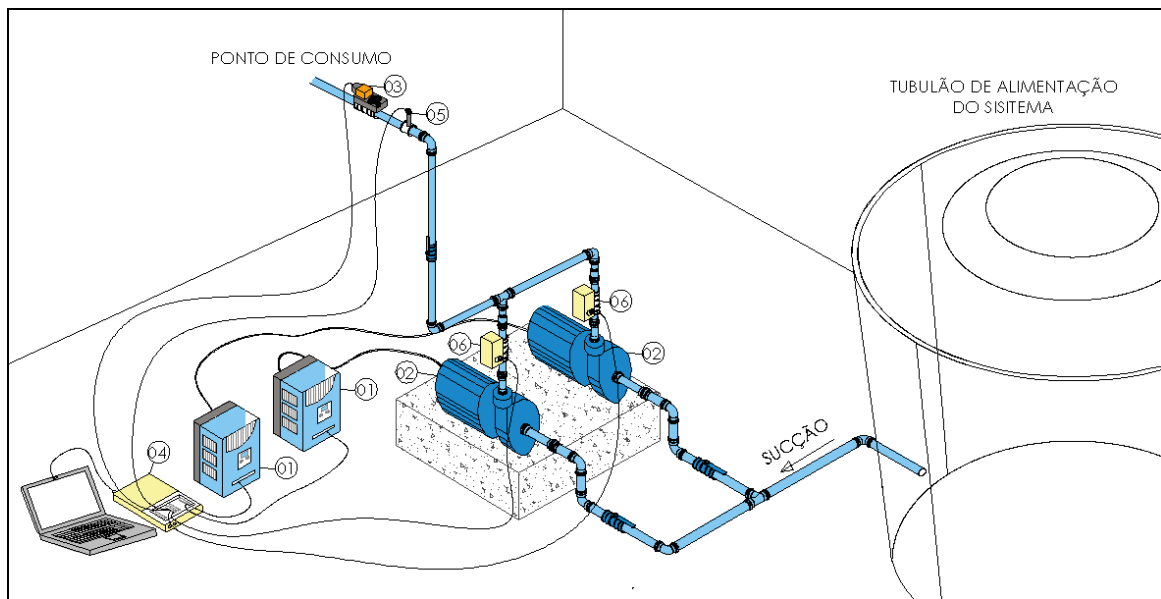


Figura 11 - Desenho esquemático da bancada.

Todo sistema opera obedecendo um fluxo de dados/ações apresentado na Figura 12. Inicialmente o sistema sofre perturbações decorrente da ação da válvula proporcional, o que representa a variação do consumo do usuários (aumento ou diminuição da vazão demandada). Essa variação interfere diretamente na vazão e pressão do sistema, que são captados pelos transdutores de pressão e vazão (fluxo azul - Figura 12). Os dados referente à vazão e à pressão são enviados para os controladores por meio da interface de aquisição de dados (IAD). Além da pressão e vazão, a IAD, recebe as informações referentes a potencia instantânea dos CMB primário e secundário. A partir desses dados o controlador Fuzzy adota ações corretivas em busca de alcançar os valores requeridos de pressão e vazão.

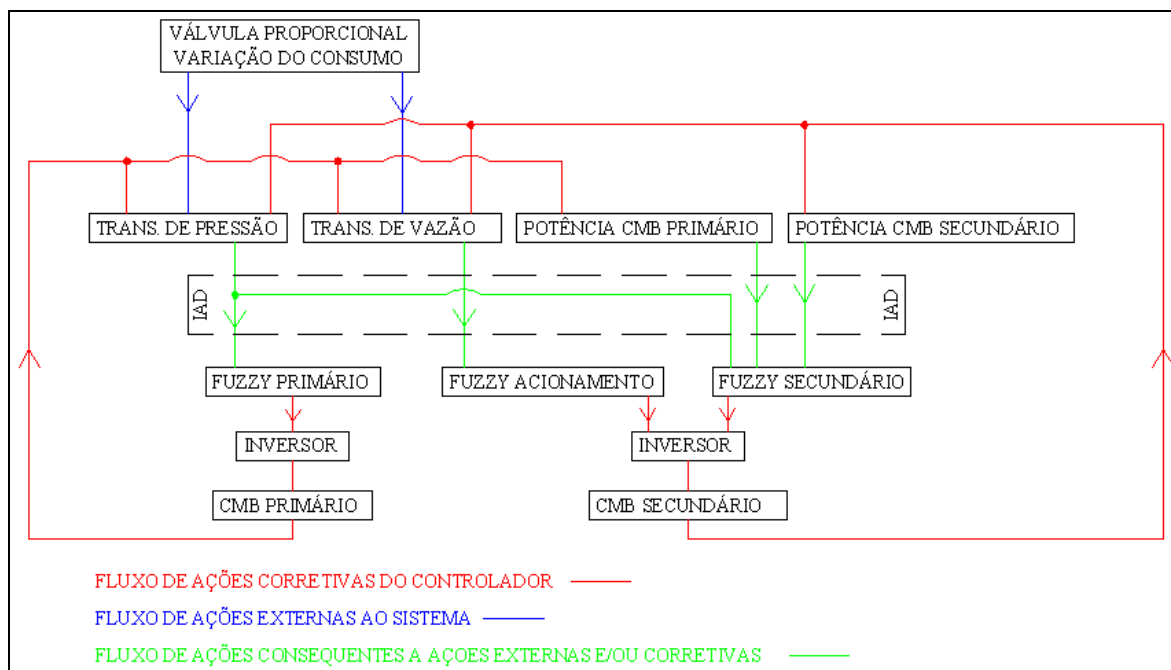


Figura 12 - Diagrama de blocos do sistema. Caminhamento do fluxo de ações.

As ações corretivas referem-se ao estado de rotação dos motores (ligados, desligados ou com velocidade de rotação variável), e são enviados aos respectivos conversores de frequência, que são responsáveis por impulsionar os conjuntos-motor-bomba. As ações dos CMB's geram novas condições de pressão, vazão e potência, o que torna o círculo de ações intermitente.

Com relação às instalações físicas, o início do sistema se dá em um reservatório apoiado de 500 litros em fibra de vidro, responsável por suprir a demanda de água da rede.

Os conjuntos motor-bomba são responsáveis pelo fornecimento de energia ao sistema de bombeamento de água na forma de vazão e pressão. Os CMB's (Figura 13) são monobloco, modelo CAM-W10, da marca Dancor, constituído de um motor de indução trifásico, 220/380 V, 60 Hz, 3 cv, isolamento classe B, proteção IP-21, categoria N, velocidade de rotação nominal de 3450 rpm; uma bomba centrífuga, monoestágio, com

altura de sucção máxima inicial de 6 mca, diâmetro do rotor de 162 mm, altura manométrica máxima de 45 mca e vazão máxima de 12 m³/h.



Figura 13 - Conjunto motor-bomba, CAM-W10, (Dancor).

As curvas características da bomba centrífuga, fornecidas pelo fabricante, são mostradas na Figura 14.

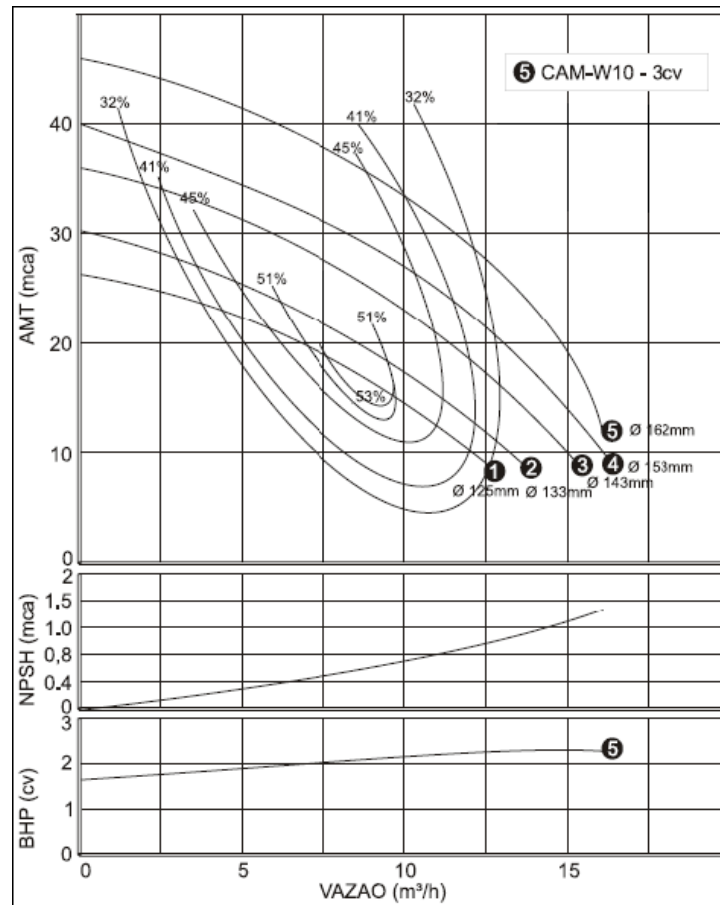


Figura 14 - Curvas características da bomba centrífuga (catálogo) CAM-W10, (Dancor).

Por se tratar de um conjunto motor-bomba usado, mesmo que antes de iniciar os experimentos, tenha passado por uma manutenção preventiva, optou-se por um novo levantamento de suas curvas características, a fim de ter o conhecimento real de suas possibilidades. Essas curvas são apresentadas na Figura 15.

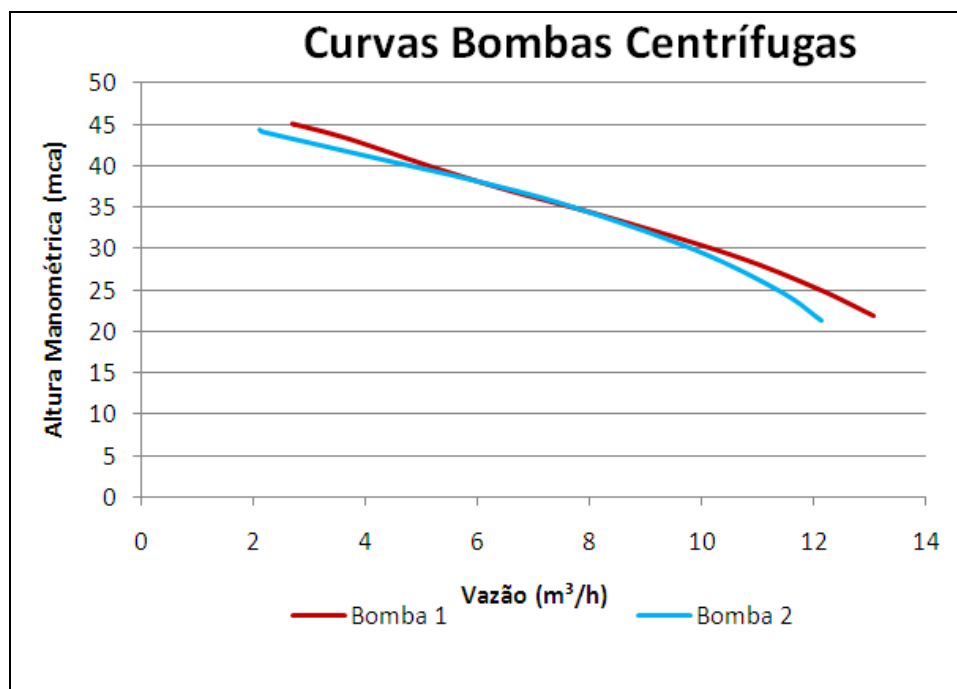


Figura 15 - Curvas características das bombas centrífugas (levantamento na bancada experimental) CAM-W10 (Dancor).

Percebe-se uma leve diferença entre as curvas das bombas e entre a curva fornecida pelo fabricante. Porém, já era esperado uma vez que, como mencionado anteriormente, trata-se de bombas usadas. Esse fato não comprometerá a realização dos experimentos, uma vez que a diferença de comportamento entre as bombas é pequena e o sistema foi desenvolvido de forma que bombas com essas curvas características atendam suas necessidades no melhor regime de funcionamento.

Os conjuntos motor-bomba foram instalados de forma afogadas a fim de diminuir-se os riscos de cavitação, além da não necessidade da escorva da bomba, reduzindo a possibilidade de problemas no sistema.

Os conversores de frequência utilizados foram o CFW-11 da marca WEG. Possuem uma tensão de alimentação de 380 a 480 Vca trifásica, com corrente nominal de

saída de 16 A. A sua função é acionar os motores elétricos e trazer a possibilidade de funcioná-los com velocidade de rotação variável. Ele atuará na resposta do sistema, que segundo as regras do controlador, incidirá uma menor ou maior velocidade de rotação no motor. Essa característica possibilitará o controle da pressão no sistema, foco maior desse trabalho.

Para cada CMB foi instalado um conversor de frequência. Sua alimentação é feita de forma trifásica diretamente da rede de alimentação elétrica. O conversor de frequência, por sua vez, alimenta os motores elétricos. O sinal de tensão de comando, responsável por variar a sua frequência e, conseqüentemente, a velocidade de rotação do motor é transmitido em forma de tensão e varia em uma faixa de 0 a 10 Vcc, sendo 0 Vcc para a frequência mínima, 0 Hz, motor parado e 10 Vcc, para a frequência máxima, 60 Hz, motor com a velocidade de rotação nominal (3450 rpm).

O conversor de frequência CFW-11 dispõe de uma interface homem máquina, onde são configuradas todas as características necessárias ao seu funcionamento (tempo de aceleração e desaceleração, entradas e saídas digitais, entradas e saídas analógicas, etc), conforme mostrado na Figura 16.

Este equipamento possibilitou também a aquisição da potência energética instantânea dos conjuntos motor-bomba utilizados no experimento. Esse dado representa o consumo energético instantâneo no conjunto motor+bomba+inversor e servirá de parâmetro para os controladores definirem suas ações.



Figura 16 - Conversor de frequência CFW-11 (WEG).

Os transdutores de vazão eletromagnético foi instalado com o objetivo de informar sobre o comportamento da demanda hidráulica do sistema em detrimento da vazão. Foram instalados equipamentos na saída de cada conjunto motor-bomba para obter-se a vazão de um conjunto ou do sistema representado pela soma das duas vazões. O equipamento é da marca Incontrol, série VMS, modelo VMS 038. Sua alimentação se dá por meio de uma tensão de 24Vcc, enquanto o sinal de saída é transmitido em corrente na faixa de 4 a 20mA, sendo 4 mA para o limite inferior da faixa de medição e 20mA para o limite superior da faixa de medição, o que corresponde a um intervalo de medição de vazão de 1,24 a 40,8 m³/h (Figura 17).



Figura 17 - Medidor de vazão eletromagnético.

Os transdutores de pressão (Figura 18) foram instalados antes e depois dos conjuntos motor-bomba, com o objetivo de obter as características do sistema. Também foi instalado um medidor de pressão no ponto final da rede, local onde se pretende controlar a pressão. Portanto esse medidor fornecerá dados para o controlador além de ser a própria variável a ser controlada.

Os transdutores de pressão utilizados foram da marca DRUCK, modelo PTX 7217, com faixa de medição entre 0 e 60 psi (0 e 42,18 mca). O sensor é do tipo piezo-resistivo de silício e o sinal de saída é de 4 a 20 mA, sendo 4 mA sua menor pressão registrada e 20 mA a maior. O tempo de resposta é 1 milissegundo, a precisão de $\pm 0,2\%$ e a tensão de alimentação de 24 Vcc.



Figura 18 - Transdutor de pressão PTX 7217 (DRUCK).

A válvula de controle proporcional tem a função de controlar o fluxo, variando a demanda de vazão do sistema. Por meio dela simulou-se a abertura e fechamento do sistema, para obter, conseqüentemente, uma maior ou menor demanda de água. A válvula proporcional, instalada a jusante do medidor de pressão, não faz parte diretamente do controle, ela funciona como um instrumento perturbador que vai impor mudanças nas condições de operação do sistema que deverá ser atendida pelo controlador.

Esta interferência poderia ser feita de forma manual, por meio de um simples registro. Porém, como forma de facilitar as simulações optou-se por utilizar a válvula proporcional controlada de forma remota. Tal processo permitiu a criação de rotinas computacionais que emulassem o consumo de água durante um período maior de operação do sistema, com resultados bastante satisfatórios e sem a necessidade de um operador para comandar a válvula. A partir de então denomina-se a esta solução (equipamento+rotina computacional) de emulador de demanda.

A válvula mostrada na Figura 19 é do tipo esfera acionada por um motor elétrico com tensão de alimentação de $24 \text{ Vcc} \pm 10\%$ e torque de 20Nm . O ângulo de abertura varia de 0° a 90° (podendo também ser ajustado manualmente) sendo a pressão máxima de operação de $140,62 \text{ mca}$.

O controle da válvula é feito por meio de um sinal de tensão de 2 a 10 Vcc. Sendo 2 Vcc para a válvula totalmente fechada e 10 Vcc para a válvula totalmente aberta. Para valores intermediários a válvula assume posições intermediárias. Juntamente com a alimentação e os sinais de comando é transmitido um sinal indicador do estado atual de

abertura da válvula (também na forma de tensão de 2 a 10 Vcc), visto que a válvula movimenta-se de forma lenta (o ciclo completo de fechamento x abertura dura 90 segundos).



Figura 19 - Válvula proporcional ARB24-SR (Belimo).

A interface de aquisição de dados (Figura 20) recebe e transmite o sinal dos equipamentos para um computador onde se tem a interface homem máquina. Foi utilizado o módulo de aquisição de dados (DAQ) da marca National Instruments NI-USB 6229. A DAQ possui 32 entradas e 4 saídas analógicas, com taxa de transferência de 1,25 MS/s para as entradas e de 2,86 MS/s para as saídas, sendo as tensões de excitação elétricas variáveis entre -10 e +10 Vcc.



Figura 20 - Interface de aquisição de dados NI-USB 6229 (National Instruments).

Como modo de processamento de sinal da interface é em tensão e alguns equipamentos, como os transdutores de pressão, geram o sinal em corrente, tornou-se necessário fazer uma transformação do sinal em corrente para um sinal em tensão. Para isso utilizou-se uma resistência elétrica, com valor definido, colocada em paralelo com a saída do equipamento para fornecer uma tensão compatível com o sinal de entrada da interface (0 a 10 Vcc).

Ao todo foram utilizadas oito entradas analógicas referentes aos transdutores de pressão, transdutores de vazão, válvula proporcional e aos conversores de frequência; E ainda três saídas analógicas para o comando da válvula de controle e os comandos dos conversores de frequência.

Como já mencionado anteriormente a interface homem máquina se deu em um computador portátil equipado com processador Intel Centrino de 1,66 GHz, 1,49 GB de RAM e sistema operacional Windows XP.

Além de todos esses equipamentos foram utilizados tubos e conexões em PVC, soldável, DN 50 mm, todos em conformidade com a NBR 5648/99 – Tubos e Conexões de PVC 6,3, PN 750 kPa, com junta Soldável – Requisitos. Ainda foram instalados registros manuais para facilitar a instalação, manutenção e possíveis ajustes na perda de carga da rede simulada.

A tensão de alimentação foi de 380 Vca e se deu por meio de cabos de cobre 2,5 mm², com revestimento em PVC, todos em conformidade com a NBR NM 247-5 – Cabos Isolados com Policloreto de Vinila (PVC), para Tensões Nominais até 450/750. A origem da alimentação foi a própria rede elétrica do laboratório. Ainda foi tomado cuidado na montagem do quadro de alimentação para a instalação de disjuntores de proteção contra sobrecorrente e curto-circuito.

A alimentação elétrica em tensão 24 Vcc e inferiores se deram por meio de cabos balanceados com condutor e blindagem de fita de alumínio e cobre trançado, fabricado em cobre estanhado OFHC (isento de oxigênio), 0,20 mm², diâmetro de 3,0 mm, com isolamento em polietileno e cobertura em PVC flexível. A origem da alimentação foi uma fonte de alimentação variável 0 -30 Vcc, 0-20 A, da marca Instruterm.

Todas as instalações de controle e sinal foram conectadas a um sistema de aterramento composto por três hastes de cobre 2400x160mm, interligados com cabos de cobre nú de 4,0 mm². Esse sistema é independente do sistema de aterramento das instalações do laboratório, responsável pelo aterramento dos motores.

Antes de iniciarem-se os experimentos todos os equipamentos foram testados e aferidos tomando como parâmetros outros equipamentos similares, em busca da repetição dos resultados. Após isso, os mais consistentes foram selecionados para serem instalados na bancada.

4.2. FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Neste trabalho foi utilizado a linguagem de programação LabVIEW 8.2 (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), uma linguagem de programação desenvolvida pela National Instruments. A primeira versão surgiu em 1986 para o Macintosh e atualmente existem também ambientes de desenvolvimento integrados para os sistemas operativos Windows, Linux e Solaris.

Os principais campos de aplicação do LabVIEW são realizações de medição e automação. A programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados, o que oferece a esta linguagem vantagens para a aquisição de dados e para a sua manipulação.

Segundo RONCERO e ALBUQUERQUE (2000), diferente das demais linguagens de programação, que utilizam linhas de código, o programa computacional LabVIEWTM 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 LabVIEWTM utiliza programação baseada em fluxo de dados, onde o fluxo dos dados determina a execução.

Os programas em LabVIEWTM são chamados de instrumentos virtuais ou, simplesmente, IVs (Ou VI no Inglês). São compostos pelo painel frontal (Figura 21), que contém a interface, e pelo diagrama de blocos (**Erro! Fonte de referência não**

encontrada.), que contém o código gráfico do programa. O programa não é processado por um interpretador, mas sim compilado. Deste modo a sua performance é comparável à exibida pelas linguagens de programação de alto nível.

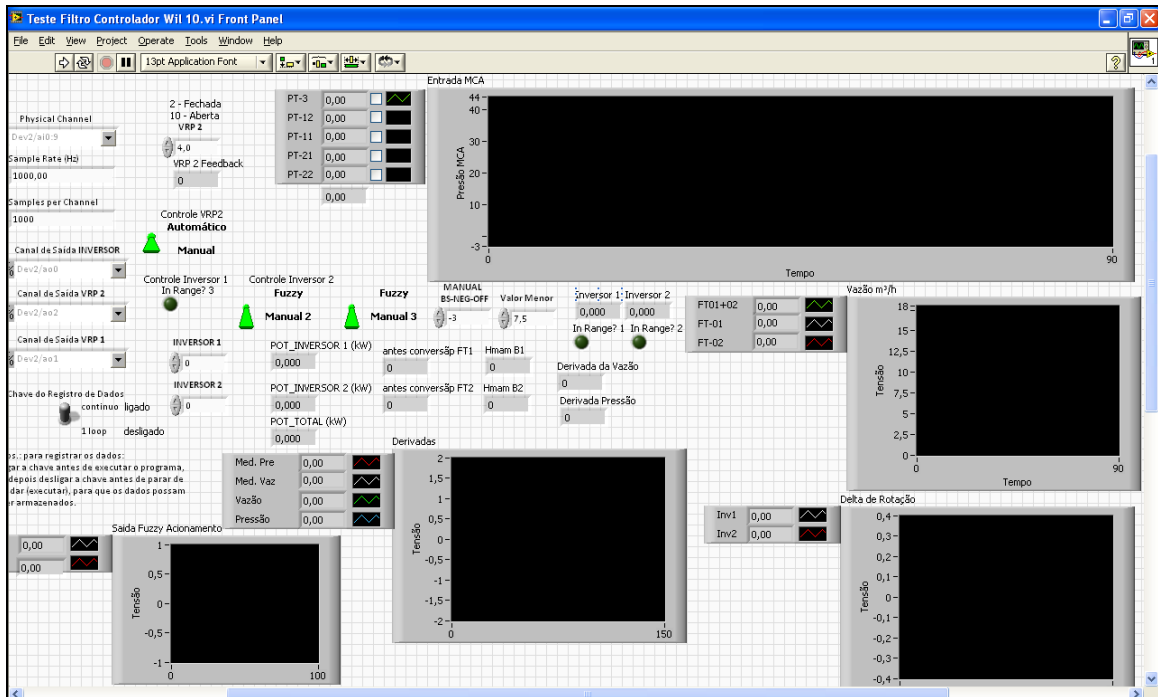


Figura 21 - Painel frontal programação labVIEW (interface usuário).

Uma importante consequência das características do LabView é a facilidade com que podem ser criados processos paralelos, uma vez que os comandos que não possuem entradas ou que as entradas já foram definidas, são processados instantaneamente. Essa peculiaridade oferece muita mobilidade, sem perder velocidade de processamento.

O fato de ser totalmente compatível com a interface de aquisição de dados utilizada, já que são do mesmo fabricante, foi aspecto fundamental para a escolha na sua utilização.

Porém essa linguagem de programação pode apresentar algumas desvantagens face a programação por texto. Pequenas mudanças podem obrigar a profundas reestruturações do programa, uma vez que sempre que se insere um novo bloco é necessário voltar a ligar os fios e os símbolos para restabelecer o funcionamento. Para

evitar confusões de linhas é habitual introduzir mais variáveis do que aquelas que são estritamente necessárias, diminuindo-se assim, a velocidade de programação e contrariando-se, de algum modo, o modelo de fluxo de dados (SOUZA, 2006).

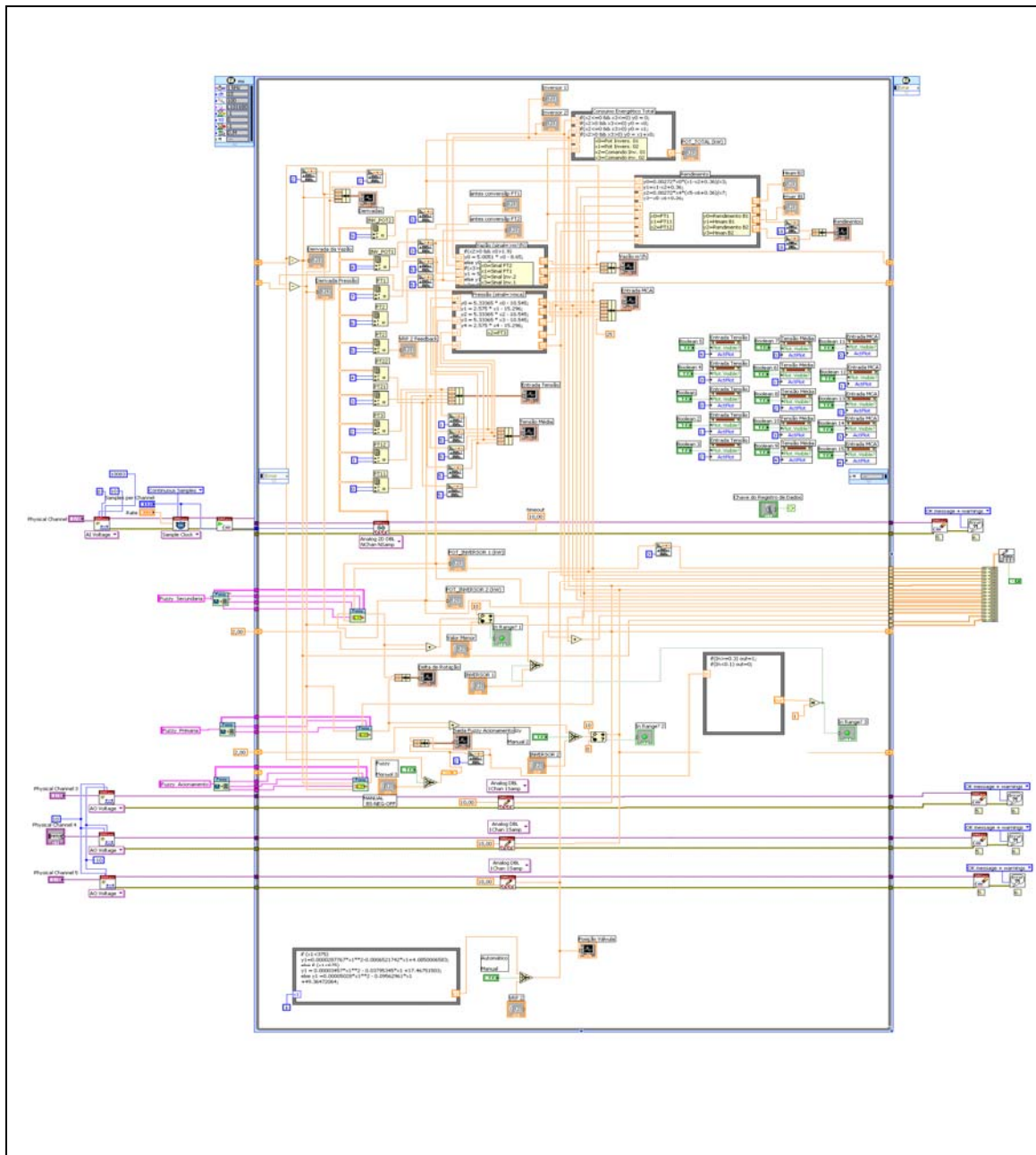


Figura 22 - Diagrama de blocos (código gráfico do programa).

Portanto, o LabVIEW™ se enquadra como um software de projetos gráfico de sistemas que oferece a engenheiros e cientistas as ferramenta necessárias para criar e

implementar sistemas de medição e controle por meio de uma integração de hardwares sem precedentes.

No LabVIEW, foi instalado o Fuzzy Logic Toolkit, uma ferramenta computacional que funciona como aplicativo do LabVIEW, onde foram configuradas as características do controlador a ser desenvolvido. Por meio dele pode-se criar um controlador Fuzzy configurando todas as suas características, desde a criação das variáveis ao processo de fuzzificação e defuzzificação.

4.3. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Ao todo foram realizados 05 experimentos, com a finalidade de testar e validar o desempenho do controlador Fuzzy desenvolvido. Eles foram realizados emulando o abastecimento de uma rede de distribuição e as interferências que ocorrem.

Em uma rede de abastecimento real as perturbações são provenientes da demanda variável dos usuários, de vazamentos ou manobras bruscas na rede. O objetivo do controlador é manter a pressão do sistema constante em 25 mca, mesmo com tais perturbações e fazendo isso sempre com o menor consumo de energia.

A seguir descreve-se detalhadamente cada um dos experimentos realizados:

4.3.1. Experimento 01:

No experimento 01 foi imposto ao sistema uma variação de demanda semelhante à de um sistema de abastecimento típico (Figura 23).

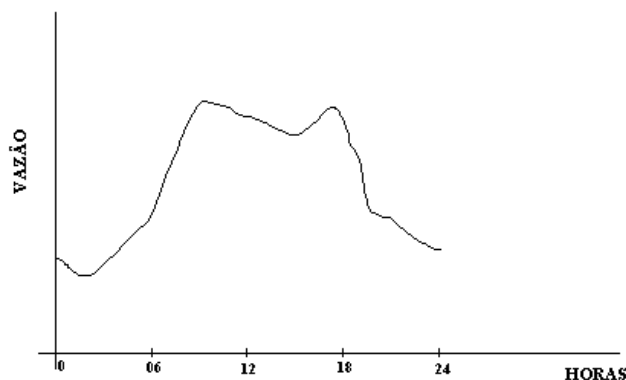


Figura 23 - Curva de consumo médio. (Fonte: Gomes, 2004)

O gráfico da Figura 23 trata-se de uma média, uma vez que as curvas de demanda de vazão dos sistemas de abastecimento variam de acordo com uma série de fatores (clima, cultura, nível econômico, etc). Porém, como o objetivo era simular a demanda de um sistema real esse dado foi suficiente para a realização do experimento.

Baseado nesta curva de demanda desenvolveu-se uma lógica computacional de acionamento da válvula proporcional para impor ao sistema uma demanda de vazão semelhante, por meio da sua abertura e fechamento gradual.

Na Figura 24 é mostrado o comportamento de abertura da válvula e a consequente vazão associada. Como já mencionado anteriormente, a válvula tem um ângulo de abertura entre 0 e 90°, sendo 0° válvula totalmente aberta e 90° válvula totalmente fechada. Porém, os valores utilizados experimentalmente foram de 22,5° a 68,6°, pois nessas regiões as suas variações não resultava em mudanças expressivas no sistema.

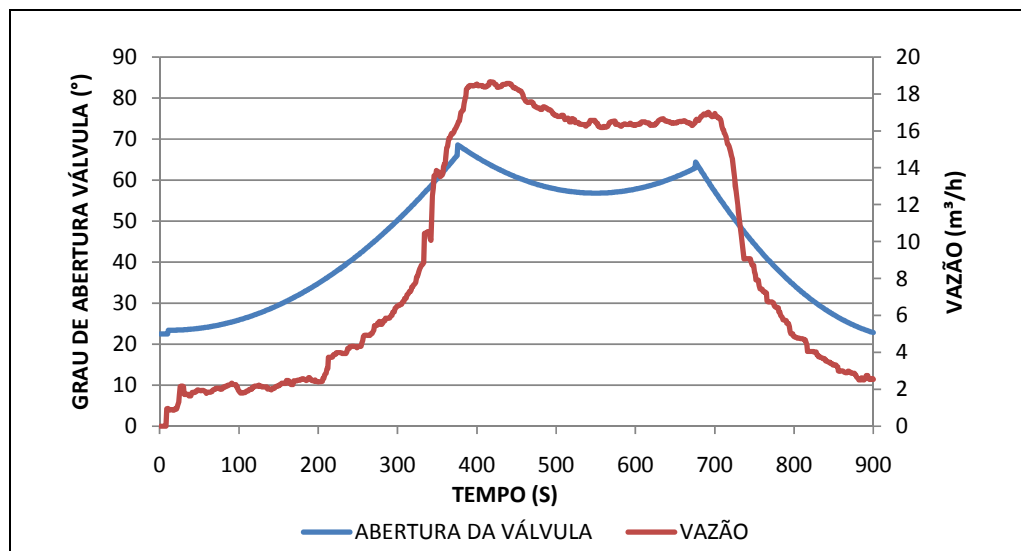


Figura 24 - Abertura da válvula e vazão associada.

Assim, no experimento 01, as necessidades do sistema serão atendidas com os conjuntos motor-bomba funcionando em malha aberta (sem a ação do sistema de controle) e sem a variação de sua velocidade de rotação (os conjuntos motor bomba trabalharam sempre na velocidade de rotação nominal).

O experimento 01 emulou a atuação de um sistema convencional, sem a utilização de automação e sem a utilização dos conversores de frequência. A única ação aceitável nessa condição é ativação e a desativação de um segundo conjunto motor-bomba, simulando uma operação manual do sistema.

O objetivo desse experimento foi criar subsídios para comparar o sistema funcionando sob a ação do controlador com um suposto sistema convencional.

4.3.2. Experimento 02:

No caso mostrado no experimento 01, considerou-se, para o dimensionamento do sistema, a demanda máxima horária, já que deve-se atender a situação mais desfavorável do projeto, que corresponde à hora de maior consumo ao longo do dia (GOMES, 2004).

É evidente 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 (CAMBOIM, 2008).

Fundamentado nesse panorama, propôs-se o experimento 02, onde atuará 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 exigida.

Então, no experimento 02 foi imposta a mesma condição ao sistema de bombeamento do experimento 01. A abertura e o fechamento da válvula proporcional foi de forma gradual, impondo ao sistema uma demanda de vazão semelhante a de um sistema de abastecimento real. As condições de operação da válvula (características de abertura e fechamento) foram as mesmas do experimento 01, como mostrado na Figura 24.

A ação do conversor de frequência desse experimento foi definida pelo controlador Fuzzy desenvolvido, o qual determinou a velocidade de rotação de cada conjunto motor-bomba. Sua atuação tomou como parâmetros a pressão do sistema além do consumo energético de cada conjunto motor-bomba. Então o controlador ajustou a pressão com o menor consumo energético possível.

Assim, no experimento 02 as necessidades do sistema foram atendidas com os conjuntos motor-bomba funcionando em malha fechada (com a atuação do sistema de controle Fuzzy) e com o controle da velocidade de rotação das bombas.

4.3.3. Experimento 03

No experimento 03 submeteu-se o sistema a variações bruscas de pressão a fim de analisar o seu comportamento e obter os parâmetros de controle: tempo de assentamento, sobre-sinal e erro de regime permanente. Segundo DORF e BISHOP (2001) o tempo de assentamento é definido como o tempo para a variável controlada alcançar e permanecer dentro da faixa aceitável (valor de referência \pm erro estacionário). O sobre-sinal (overshoot, em inglês) é a diferença entre o valor máximo atingido pela variável controlada e o valor de referência (do sistema em questão 25 mca). O erro de regime permanente, também chamado de erro de estado estacionário, é a diferença entre a entrada e a saída para uma entrada de teste, quando o tempo tende para o infinito.

As variações bruscas de pressão foram obtidas por meio do fechamento e/ou abertura rápida da válvula proporcional. Portanto, o sistema partiu do repouso a fim de alcançar a pressão considerada ótima de operação de 25 mca. Após a estabilização submeteu-se o sistema as interferências (entradas degrau de pressão).

4.3.4. Experimento 04:

O objetivo do experimento 04 é confirmar que o sistema Fuzzy proposto não só proporciona o controle de pressão, como faz isso de forma eficiente, consumindo a menor quantidade de energia possível.

Neste experimento buscou-se confirmar a capacidade do controlador de buscar sempre o menor consumo de energia para o sistema de bombeamento. Então, depois do sistema com a pressão estabilizada adicionou-se uma entrada degrau na pressão, a fim de desestabilizá-lo. Após a atuação do controlador em retornar ao valor da pressão de referência comparou-se o consumo energético dos primeiros instantes em que a pressão foi estabilizada, com o consumo energético posterior, ou seja, após alguns instantes de atuação do sistema Fuzzy.

4.3.5. Experimento 05:

O objetivo da realização desse experimento 05 foi comparar o sistema de controle Fuzzy proposto (experimento 02) com mais uma forma de abastecimento e chegar a uma conclusão da melhor opção avaliando o consumo energético, atendimento a demanda de vazão, o controle de pressão e os custos de instalação.

Neste experimento foi criada uma situação de sistema de abastecimento também convencional, em opção à forma de abastecimento desenvolvido no sistema 01. Nessa situação, toda a vazão demandada foi bombeada de uma só vez a um suposto reservatório superior, de onde a partir daí abasteceu os pontos de consumo por gravidade.

A vantagem dessa condição é que os conjuntos motor-bomba funcionarão sempre na sua condição ideal, além disso, como a vazão excedente, não é utilizada nos períodos de menor consumo, poderia ser armazenada para utilização posterior. Essa situação daria a possibilidade do não acionamento dos conjuntos motor-bomba nos períodos em que a tarifa de energia tivesse um custo diferenciado (horários de ponta), o que evidentemente tornaria o processo mais barato.

Porém, essa configuração de abastecimento possui o inconveniente da necessidade de um espaço reservado para a construção do suposto reservatório de acumulação. Normalmente esses espaços são terrenos em cotas elevadas, com dimensões relativamente grandes responsáveis por abrigar, também, outros espaços necessários ao seu funcionamento (central de manutenção, casa de operação de registros, abrigo para operador, etc)

CAPÍTULO V

MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE

Neste capítulo é apresentada a modelagem do controlador Fuzzy e as configurações de montagem física do sistema de abastecimento proposto (bancada experimental).

As técnicas de controle especiais, utilizadas nesta pesquisa, permitem o desenvolvimento do controlador sem o conhecimento prévio do modelo matemático correspondente. A técnica de controle Fuzzy, que consiste em realizar uma tarefa de acordo com a experiência prévia e conhecimento do funcionamento e comportamento do sistema, faz uso do método heurístico. Em vez de utilizar uma expressão matemática, uma expressão linguística é utilizada para descrever a relação entre a variável de entrada e a variável de saída (SIMÕES e SHAW, 2007).

O controlador visa manter a pressão na rede de abastecimento em níveis adequados melhorando a eficiência do sistema. Para isso atua na variação da velocidade de rotação dos conjuntos motor-bomba, aumentando-a ou diminuindo-a conforme a necessidade. Isso se dá por meio da definição de incrementos, positivos ou negativos, na velocidade de rotação do conjunto motor-bomba.

No sistema proposto, a grande variação de vazão entre o máximo e o mínimo consumo, motivou a utilização de dois conjuntos motor-bomba em paralelo. Essa ação,

por si só, já se apresenta como uma possibilidade da efficientização do sistema, uma vez que gera a possibilidade do acionamento de apenas um dos motores nos momentos de menores vazões demandadas. Desta forma, também pretende-se otimizar esse acionamento deixando a cargo do controlador a determinação do melhor instante em que o segundo conjunto motor-bomba deve atuar. Este instante é definido em função da demanda de vazão e do consumo energético dos motores. Além disso, o controlador deve gerenciar as seqüências de ativação do motor a fim de evitar acionamentos em intervalos de tempo muito curtos o que comprometeria a vida útil das máquinas.

É importante ressaltar que o maior objetivo do controlador é realizar todas essas ações com o melhor rendimento possível (menor consumo energético dos motores), sem comprometer o atendimento à demanda de vazão e sem prejudicar a pressão estabelecida em projeto.

5.1. SISTEMA PROPOSTO

A bancada experimental descrita no capítulo anterior tem o objetivo de emular um sistema de abastecimento real. Nesse sentido, ela foi concebida, tendo seus conjuntos motor-bomba dimensionados para atender o instante de maior consumo do sistema em uma possível utilização de injeção direta na rede.

A rede de abastecimento foi instalada de forma que no instante de maior consumo (máxima vazão requerida), os conjuntos motor-bomba estarão no melhor do seu rendimento. Na Figura 25 é mostrada a curva do sistema desenvolvido e para o qual os conjuntos motor-bomba foram dimensionados.

Como já mencionado anteriormente o sistema foi desenvolvido para operar em uma pressão constante de 25 mca. Portanto, na Figura 25 mostrado também o ponto de operação para o qual os conjuntos motor-bomba foram dimensionados.

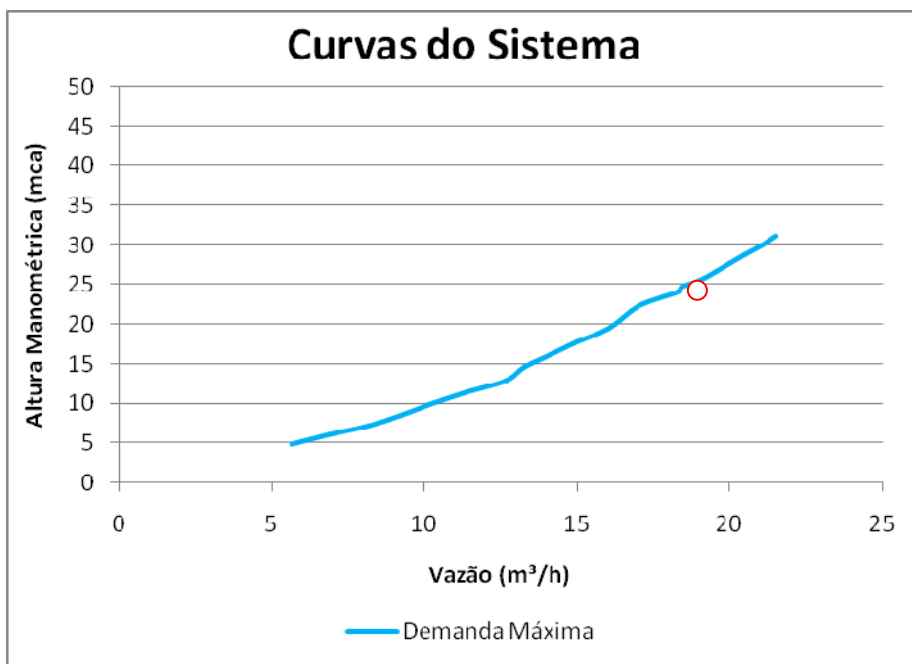


Figura 25 - Curva do sistema para a demanda máxima.

Para a emulação de um sistema real existe uma variação na demanda de sua vazão. Essa variação simula a alteração no perfil de consumo dos usuários da rede (Figura 23). É evidente que, com a mudança de características dos consumos dos usuários existe uma alteração na curva do sistema. Nesse sentido a área de atuação dos conjuntos motor-bomba passa a ser uma região compreendida entre a curva do sistema na demanda máxima e a curva no sistema na demanda mínima (Figura 26).

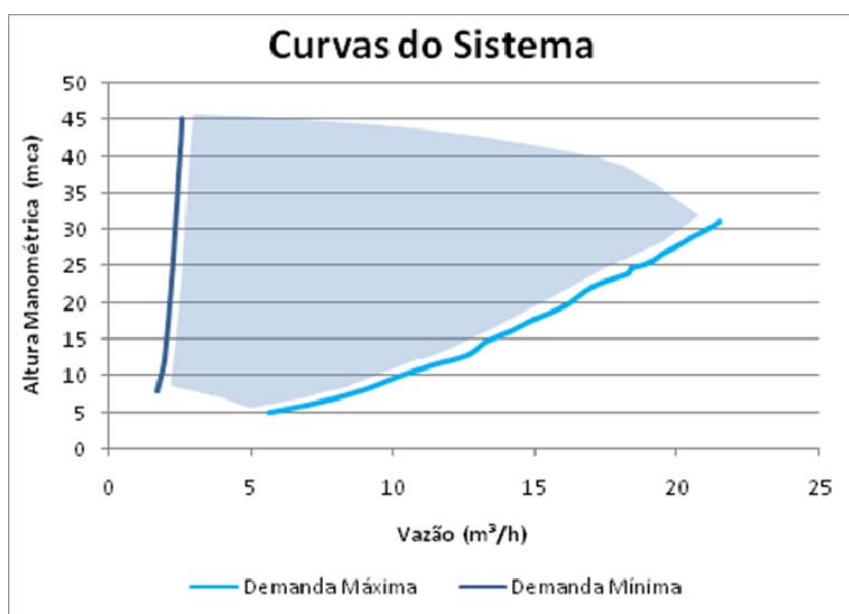


Figura 26 - Região de funcionamento do sistema.

Como se pretende manter a pressão constante em 25 mca o controlador deverá atender uma linha dentro da região de operação do sistema, conforme mostrado na Figura 27.

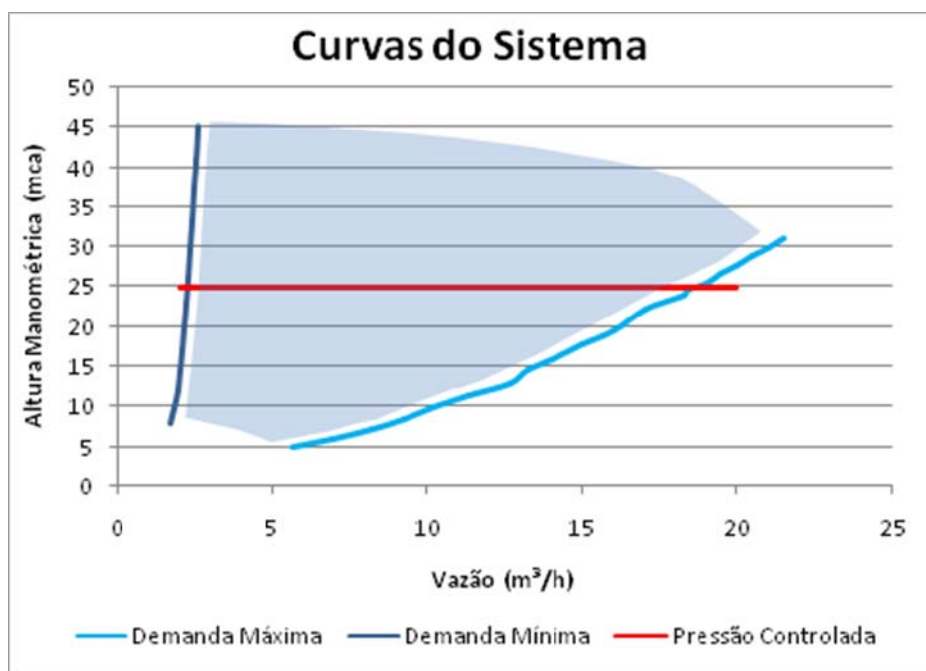


Figura 27 - Linha a ser atendida dentro da região de operação do sistema.

Assim, por meio das combinações possíveis da associação dos conjuntos motor-bomba o objetivo do controlador é manter o sistema operando sobre a linha de pressão controlada (linha vermelha - Figura 27), independente da variação de demanda do sistema dentro de sua região de atuação.

Para que isso ocorra utilizaram-se conjuntos motor-bomba acionados com conversores de frequência, o que possibilita a variação na configuração das curvas da bomba, semelhante ao ocorrido na curva do sistema.

Na Figura 28, são mostradas as possibilidades de funcionamento dos conjuntos motor-bomba a fim de atender as necessidades do sistema.

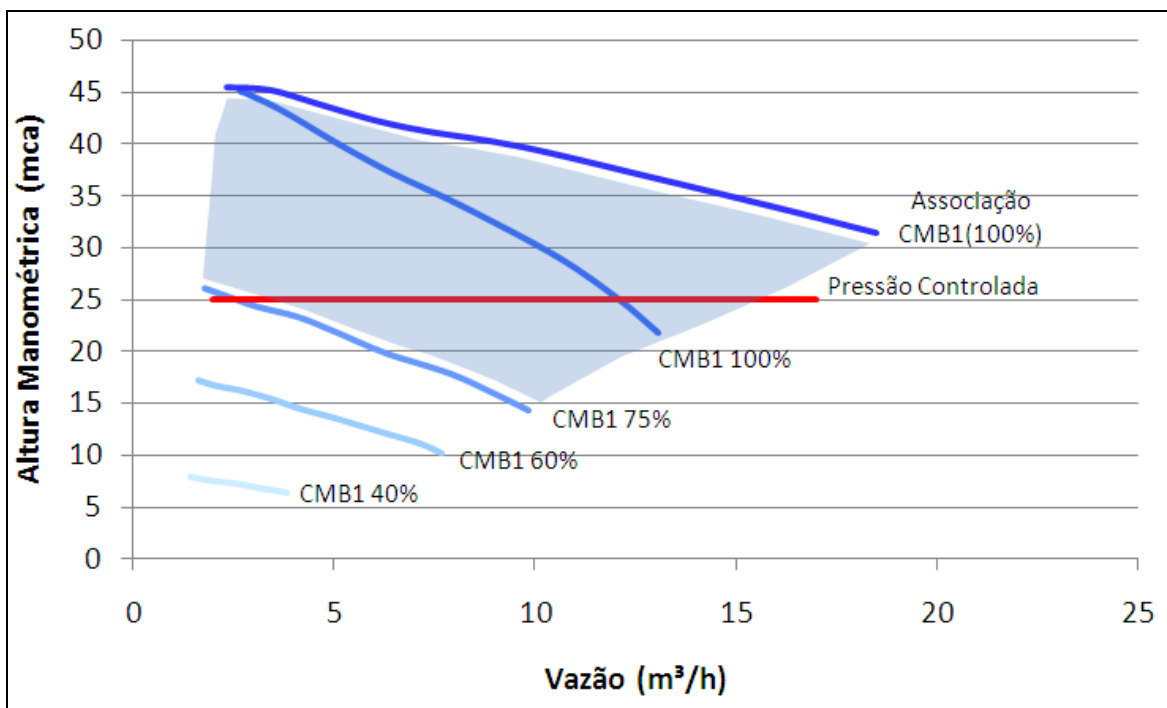


Figura 28 - Região de funcionamento dos conjuntos motor-bomba.

Analisando-se da Figura 28 constata-se que as combinações de acionamento dos motores possuem algumas restrições:

1. Quando a demanda de vazão requerida pelo sistema exigir o acionamento apenas de um conjunto motor-bomba, a menor velocidade de rotação imposta a esse conjunto será em torno de 75% da sua velocidade de rotação nominal, pois é a partir dessa curva de bomba que se atinge a linha de pressão controlada (Figura 28).
2. Quando a demanda de vazão requerida pelo sistema exigir o acionamento dos dois conjuntos motor-bomba a diferença entre velocidade de rotação dos dois conjuntos não deve exceder valores próximos a 25%, pois a associação de bombas em paralelo exige uma altura manométrica comum entre as curvas para serem somadas as vazões (fato que não ocorre caso essa diferença seja superior - Figura 28)

É evidente que esses valores representam as especificidades do sistema proposto para a pesquisa. Não é objetivo do trabalho o estudo desses valores de forma exata e/ou de

forma generalizada para qualquer tipo de sistema, já que não é necessário o desenvolvimento de um modelo matemático que represente a situação. Porém, é de fundamental importância o conhecimento de sua existência uma vez que um controlador Fuzzy é desenvolvido de acordo com a experiência prévia, o conhecimento do funcionamento e comportamento do sistema por parte do programador.

Assim, após descrever todas as etapas que farão parte da ação do sistema, apresenta-se, na Figura 29, a forma como o controlador se comportará para manter os parâmetros nos valores pré-determinados.

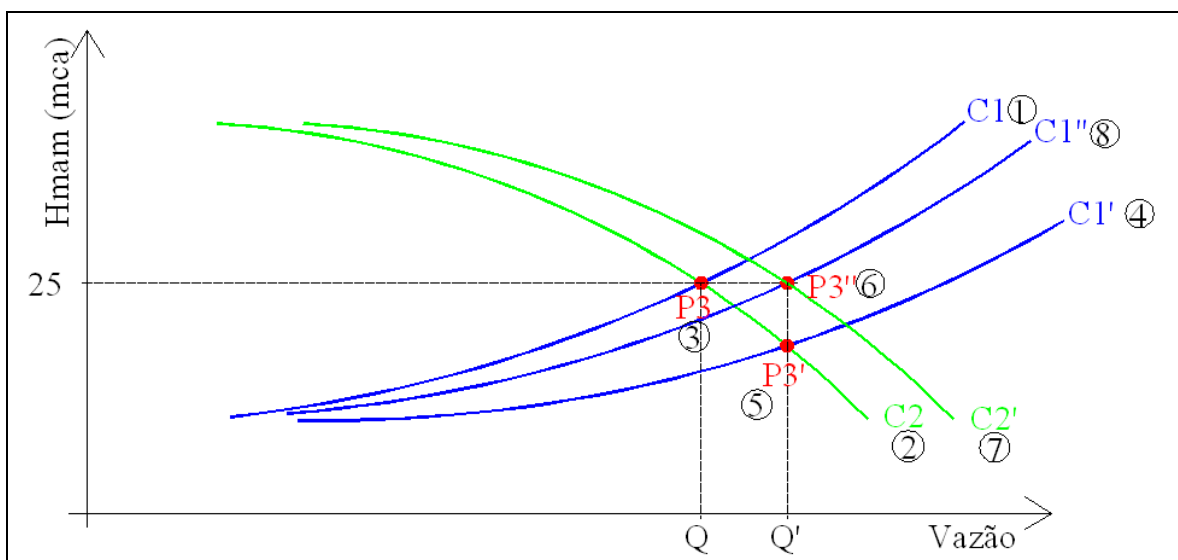


Figura 29 - Ciclo de ação sistema x resposta controlador.

A resposta do controlador corresponde a um ciclo de ações e consequências no sistema representado na figura anterior que percorre as seguintes etapas:

- Ação ①- C1: representa a curva do sistema em determinado instante.
- Ação ②- C2: representa a curva da bomba responsável por atender a demanda do sistema na pressão pré-definida (25 mca).

Dependendo da vazão requerida pelo sistema, a curva C2 representa a associação dos dois conjuntos motor-bomba ou simplesmente de um único conjunto. Isto será definido pelo controlador por meio de parâmetros que serão explicados posteriormente.

- Ação ③- P3: representa o ponto de operação do sistema e do conjunto motor-bomba. Deverá sempre atender a pressão pré-definida (25 mca).

- Ação ④- $C1'$: representa a nova curva do sistema posterior a curva $C1$ e consequente a uma alteração da demanda de vazão para Q' .
- Ação ⑤- $P3'$: representa o novo ponto de operação do sistema decorrente da ação ④. Percebe-se que esse ponto de operação atende a demanda de vazão Q' , mas não atende a pressão pré-determinada.
- Ação ⑥- $P3''$: representa o ponto de operação onde o controlador deve levar o sistema a atuar. Nesse ponto serão atendidas as demandas de vazão Q' e a pressão pré-determinada.
- Ação ⑦- $C2''$: representa a nova curva dos conjuntos motor-bomba, responsável por levar o sistema a atuar no ponto de operação $P3''$.
- Ação ⑧- $C1''$: representa a última curva do sistema consequente às variações de configuração dos conjuntos motor-bomba.

Esse ciclo de ações se repete a cada segundo, uma vez que esse é o tempo de amostragem, e todas as ações referente à variação da vazão do sistema se dá através da abertura ou fechamento da válvula (emulador de demanda ou variações bruscas) e representam desde o consumo natural de um sistema a eventos como vazamentos, rompimentos de tubulações e diminuições repentinas de consumo.

Todas as ações referentes à variação da velocidade de rotação dos conjuntos motor-bomba, sua associação, momentos de acionamentos, definição de quanto cada um contribuirá no abastecimento será definido pelo controlador Fuzzy.

5.2. CONTROLADORES FUZZY

Para o sistema de controle estabelecido foram projetados três controladores Fuzzy. Um responsável pelo acionamento do conjunto motor-bomba principal, denominado Fuzzy Principal, o segundo responsável pelo acionamento do conjunto motor-bomba secundário, denominado Fuzzy Secundário e o terceiro responsável por definir o instante em que o conjunto motor-bomba deverá ser acionado, denominado Fuzzy Acionamento.

O controlador Fuzzy Primário está envolvido em todo o processo de bombeamento, seja nos períodos de menor vazão requerida (faixa azul - Figura 30), onde é necessário apenas o acionamento de um conjunto motor-bomba ou nos períodos de maior consumo, onde será necessário o funcionamento dos dois conjuntos motor-bomba, para suprir toda vazão requerida pelo sistema (faixa vermelha - Figura 30). Porém, apesar de estar presente em todo o processo sua função é de controlar apenas o conjunto motor-bomba primário.

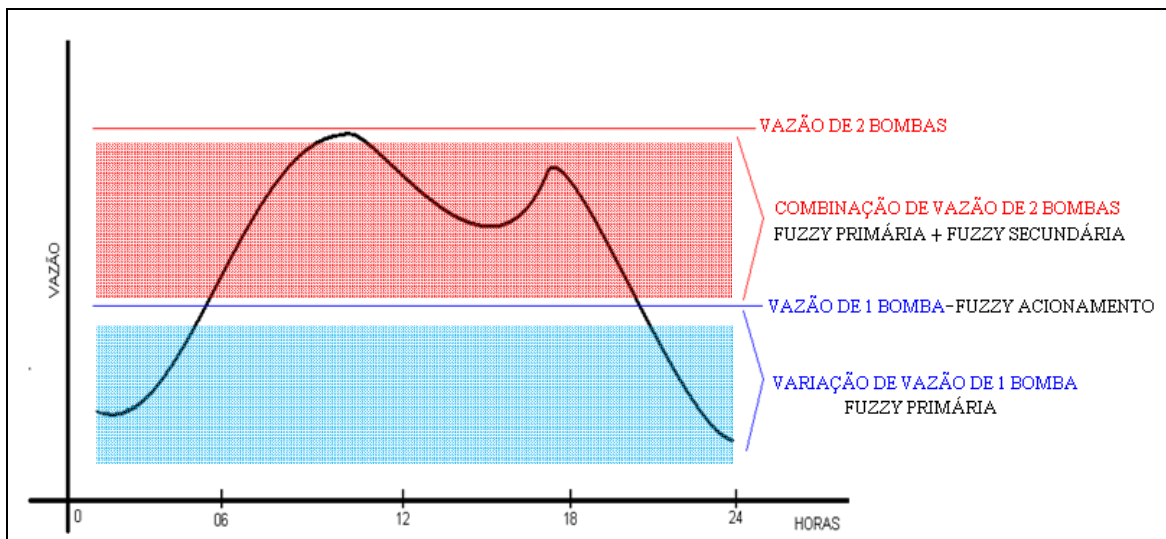


Figura 30 - Curva de demanda do sistema com combinação de atuação dos controladores.

Em função da pressão a ser controlada e da sua derivada o controlador Fuzzy primário determinará um delta de rotação que será somado à velocidade de rotação do conjunto motor-bomba primário – sistema em malha fechada. O delta de rotação pode assumir valores positivos ou negativos para aumentar ou diminuir a velocidade de rotação do conjunto motor bomba primário. Essa ação implica no aumento ou redução da pressão a ser controlada possibilitando assim o ajuste da mesma. Na Figura 31 é mostrado um diagrama de controle da velocidade de rotação do conjunto motor bomba primário.

A nova velocidade de rotação do CMB Primário altera as condições do sistema de bombeamento gerando uma nova pressão e conseqüentemente uma nova derivada dessa pressão. Esses novos parâmetros fazem com que o ciclo torne-se infinito e realizado a cada segundo (tempo de amostragem do computador). Outros fatores também alteram a

condição inicial do sistema: as interferências externas (aumento ou diminuição do consumo, rompimento de tubulações, etc.) e o controlador Fuzzy secundário.

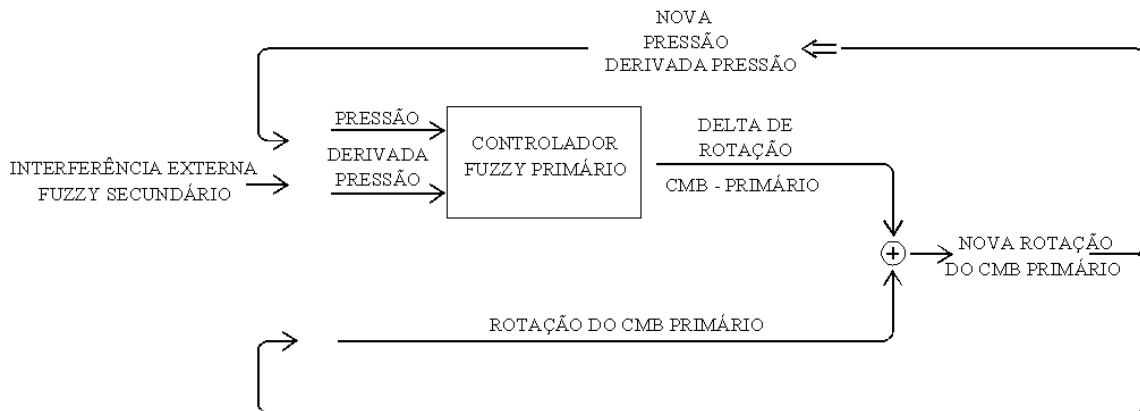


Figura 31 – Fluxograma do controlador Fuzzy primário.

A nova velocidade de rotação do CMB Primário altera as condições do sistema de bombeamento gerando uma nova pressão e conseqüentemente uma nova derivada dessa pressão. Esses novos parâmetros fazem com que o ciclo torne-se infinito e realizado a cada segundo (tempo de amostragem do computador). Outros fatores também alteram a condição inicial do sistema: as interferências externas (aumento ou diminuição do consumo, rompimento de tubulações, etc.) e o controlador Fuzzy secundário.

O controlador Fuzzy secundário só é acionado e conseqüentemente também interferindo no controlador Fuzzy primário, quando a vazão demandada pelo sistema não é suprida apenas pelo CMB-01. Esse instante é determinado pelo controlador Fuzzy Acionamento.

O controlador Fuzzy Acionamento entra em operação para definir o exato momento em que o conjunto motor-bomba secundário deverá ser acionado. Optou-se por utilizar um controlador Fuzzy para essa decisão, porque não existe um valor exato e/ou fixo para que isso ocorra. Essa ação pode ser realizada dentro de uma faixa de vazão e deverá respeitar algumas regras visando preservar o bom estado de funcionamento dos motores (evitar acionamentos e desativação consecutivas e seguidas) além do pré-requisito do sistema (manter a pressão mínima controlada em 25 mca).

Por meio da vazão do sistema e da sua derivada o controlador Fuzzy acionamento determinará um fator que pode assumir valores de -1 a 1. Assim quando o parâmetro tomar

valores maiores ou iguais a 0,3 um comando de acionamento será enviado ao CMB secundário e ele começará, também, a fazer parte do processo de controle da pressão do sistema de bombeamento. De outro modo, quando adquirir valores menores que 0,1 um comando de desacionamento será enviado ao CMB secundário e ele deixará de fazer parte do processo de controle. Os valores 0,1 e 0,3 tem o objetivo de criar uma faixa de acionamento x desacionameto do CMB, evitando ações repetidas.

Na Figura 32 é mostrado como funciona o diagrama de fluxo do Controlador Fuzzy Acionamento. Trata-se de um sistema de controle sem retroalimentação - tipo malha aberta.



Figura 32 – Fluxograma do controlador Fuzzy acionamento.

Uma vez acionado, o controlador Fuzzy Secundário é responsável por gerenciar o controle de rotação do conjunto motor-bomba secundário. Seu funcionamento se dará exclusivamente nos períodos onde a vazão requerida não puder ser suprida apenas pelo conjunto motor-bomba principal. Além disso, o controlador Fuzzy Secundário gerencia a potência dos motores levando-os a operar sempre com os menores consumos energéticos.

Para isso o controlador avalia os parâmetros pressão, potência do CMB primário e potência do CMB secundário e determina um delta de rotação que será somado à rotação do conjunto motor-bomba secundário – sistema em malha fechada. Assim como no controlador primário o delta de rotação pode assumir valores positivos e negativos; conseqüentemente a rotação do conjunto motor-bomba secundário poderá aumentar ou diminuir. Essa ação implica no aumento ou redução da pressão a ser controlada, possibilitando assim o ajuste da mesma. Na Figura 33 é mostrado como funciona esse fluxo de dados.

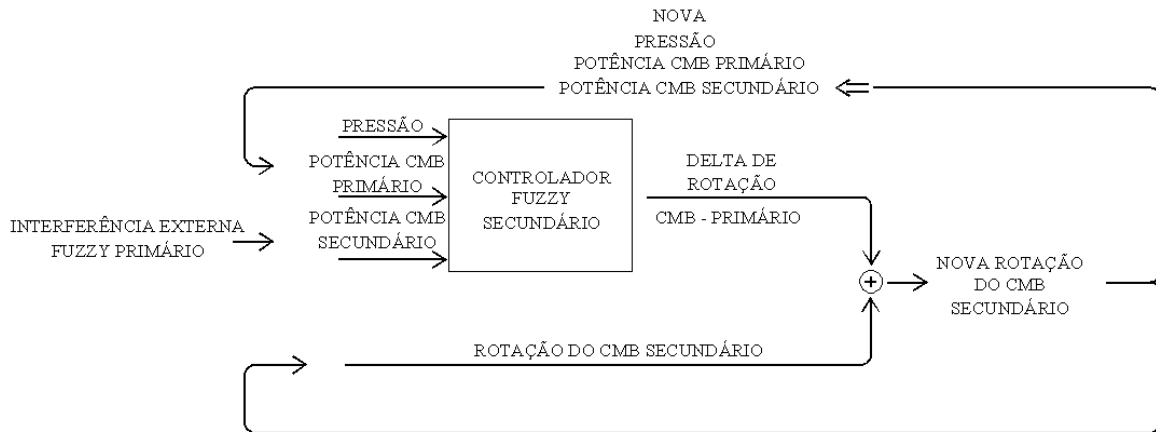


Figura 33 - Fluxograma controlador Fuzzy secundário.

O controlador Fuzzy Secundário também sofre interferências externas e do controlador Fuzzy Primário.

Como já mencionado anteriormente, para o projeto do controlador Fuzzy não há necessidade de modelo matemático, bastando executar os seguintes passos (CAMBOIM, 2008):

1. Identificar as variáveis de entrada e de saída da planta;
2. Definir e dividir o universo de discurso entre as variáveis;
3. Determinar as funções 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 linguísticas de cada controlador, determinou-se, para cada variável, seu universo de discurso, a partição do conjunto de termos e os respectivos conjuntos Fuzzy.

As variáveis linguísticas de entrada e de saída tiveram suas faixas de valores, quantidades, formato das funções de pertinências e universo de discurso estabelecido por

meio de contato com especialistas em sistemas de abastecimento hidráulico e também dos conhecimentos adquiridos nos testes iniciais e na montagem do sistema experimental. No desenvolvimento dos controladores utilizou-se o próprio nome das grandezas envolvidas bem como um universo de discurso com os próprios valores assumidos pelas variáveis. Esse procedimento foi uma tentativa de facilitar o entendimento dos usuários, reduzir o tempo de processamento e promover uma fácil e rápida avaliação dos dados uma vez que não será necessário parametrizações.

5.3. CONTROLADOR FUZZY PRIMÁRIO

Por meio da análise do comportamento do sistema de bombeamento definiu-se o controlador primário com duas variáveis de entradas: Pressão e Derivada da Pressão, onde a primeira representa a pressão na rede que é a variável a ser controlada e deve manter-se no valor de 25 mca. A segunda representa a derivada da variável a ser controlada, a qual tende a antecipar o comportamento futuro da pressão auxiliando na retroalimentação para se antecipar as ações do sistema.

A variável de saída do controlador Fuzzy Primário foi definida como Delta de Rotação. Essa variável representa um incremento na rotação que será adicionada à condição inicial do conjunto motor-bomba primário (CMB-01).

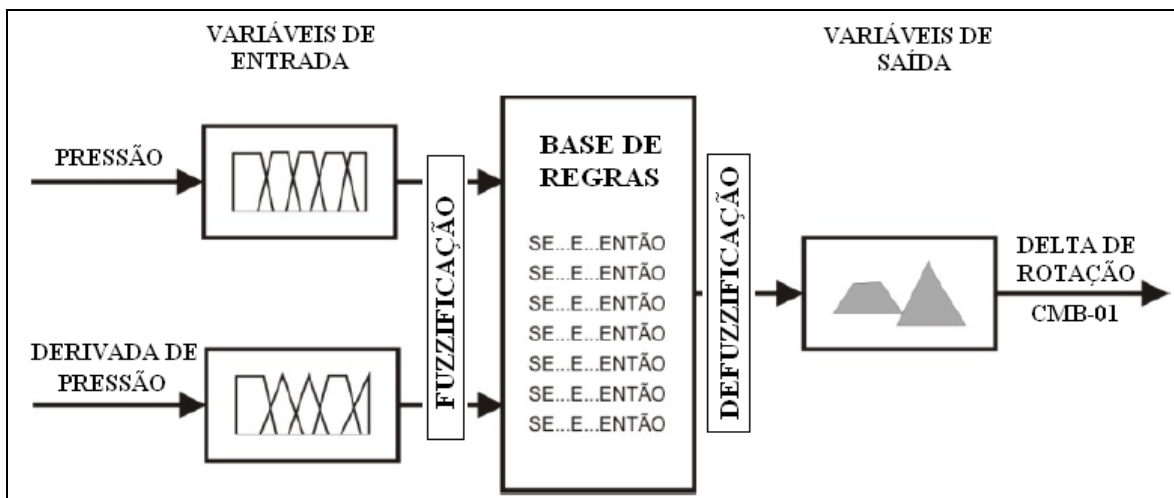


Figura 34 - Esquema básico do controlador Fuzzy principal.

O Delta de Rotação pode assumir valores negativos ou positivos e com isso terá a possibilidade de aumentar ou diminuir a velocidade de rotação do motor, conforme a necessidade de pressão e vazão do sistema. Na Figura 34 apresenta-se o esquema de funcionamento do controlador Fuzzy principal.

5.3.1. Variável Linguística de Entrada “Pressão”

A variável de entrada “Pressão” representa a pressão em um ponto da rede. Adotou-se 25 mca como valor de referência, o valor alvo que o sistema de controle automático tentará alcançar. Ou seja, o controlador foi desenvolvido considerando o valor de 25 mca como ótimo para a variável em questão.

Para a variável “Pressão” foram adotadas cinco funções de pertinências. Segundo SIMÕES e SHAW (2007) 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 em uma entrevista com um operador humano especializado, que realize as funções de controle manualmente. O seu universo de discurso, que representa o intervalo numérico de todos os possíveis valores reais que a variável especificada pode assumir, foi de 0 a 40 mca.

As funções de pertinência possíveis para essa variável foram: Muito Baixa, Baixa, Ótima, Alta e Muito Alta. Pressões do tipo “Muito Baixa” e “Muito Alta” são pressões totalmente fora dos padrões previstos para o funcionamento do sistema e exigirão ações mais rígidas de correções. Pressões do tipo “Baixas” e “Altas” são pressões que já estão mais próximas do valor adotado de referência, porém, necessitando de ajustes. A pressão do tipo “Ótima” já se encontra em níveis aceitáveis de controle, precisando apenas da manutenção em caso de interferências.

Na Figura 35 são apresentadas as funções de pertinência relacionadas à variável linguística “PRESSÃO”.

Seguindo as orientações de SIMÕES e SHAW (2007), que afirma que funções de pertinência trapezoidais com patamares largos e laterais superpostas bastante íngremes podem ser usadas onde a saída Fuzzy não é sensível a mudanças de valores de entrada que recaiam sob as porções constantes dos trapezoides, adotou-se esse tipo de formato para todas as funções de pertinência dessa variável linguística (Figura 35).

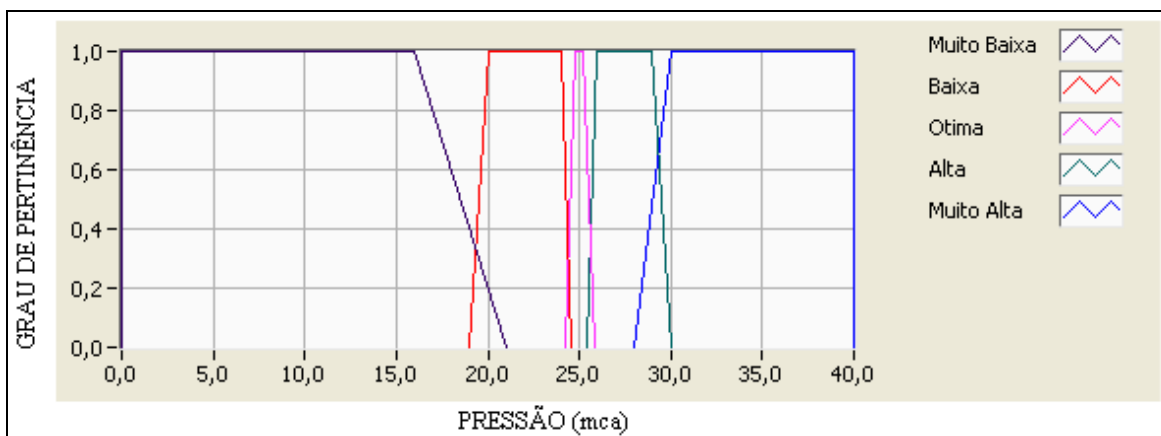


Figura 35 – Funções de pertinência variável linguística “PRESSÃO” (controlador Primário).

A faixa “MUITO BAIXA” começa com um grau de pertinência máximo um (1) no valor do universo de discurso zero, isto é, pressão extremamente baixa, provavelmente com o sistema ainda parado, chegando ao grau de pertinência mínima em 21,0 mca, resultando nos seguintes parâmetros MUITO_BAIXA[0 0 16 21]. Quando o sistema de controle estiver atuando, com uma pressão nesta faixa, recebe inicialmente um incremento maior que uma pressão em faixas superiores, conforme será definido no item Base de Regras; a pressão “BAIXA” começa com pertinência mínima a partir do valor 19,0 no universo de discurso (UD) e termina também com valor mínimo de pertinência (zero) em 24,60 do UD. Nesse intervalo alcança o valor máximo de pertinência entre os valores 20,0 e 24,0 (BAIXA[19 20 24 24,60]). Para a faixa de pressão “ÓTIMA” também utilizou-se uma função de pertinência tipo trapezoidal, onde o grau de pertinência mínimo estava nos valores 24,20 e 25,80 mca, e o grau de pertinência máximo (um) entre os valores 24,80 e 25,20 mca, resultando no parâmetro ÓTIMO [24,20 24,80 25,20 25,80]. Na função “ALTA”, novamente utiliza-se a função trapezoidal, iniciando no mínimo em 25,40, terminando também com mínima pertinência em 30 mca, tendo um patamar de pertinência máxima no intervalo de 26,0 a 29,0 (ALTA[25,40 26 29 30]). E por fim, também com função trapezoidal, a função “MUITO ALTA” inicia com pertinência mínima em 20, alcançando a máxima em 30 (MUITO ALTA [28 30 40 40]).

Na Tabela 1 é apresentado um resumo das características das funções de pertinência da variável de entrada pressão.

Tabela 1 - Características das funções de pertinência da variável de entrada "PRESSÃO" (controlador Fuzzy Primário).

Variável Linguística: Pressão. Tipo:Entrada. / Universo de Discurso: 0-40 mca.		
Valor Linguístico	Forma	Faixa de Função (Parâmetros)
Pressão MUITO BAIXA	Trapezoidal	[0 0 16 21]
Pressão BAIXA	Trapezoidal	[19 20 24 24,60]
Pressão ÓTIMA	Trapezoidal	[24,20 24,80 25,20 25,80]
Pressão ALTA	Trapezoidal	[25,40 26 29 30]
Pressão MUITO ALTA	Trapezoidal	[28 30 40 40]

5.3.2. Variável Linguística de Entrada “Derivada da Pressão”:

A variável linguística “Derivada da Pressão” representa a inclinação da reta daquela função em determinado instante. Na prática tende a descrever a tendência ao qual deve seguir sua variável e pode ser obtida pela diferença registrada entre a pressão atual e a pressão anterior. Essa variável facilita as ações do controlador em se antecipar às perturbações do sistema tornando-o mais eficaz. O seu valor ideal é zero uma vez que indica que a variável “PRESSÃO” não esta sofrendo variação. Na Figura 36 representa-se como é realizado o cálculo da derivada da pressão.

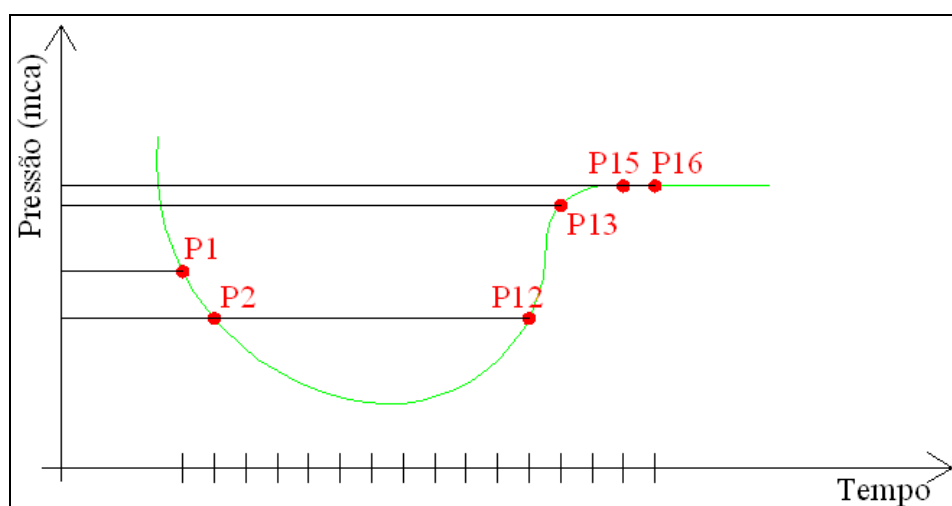


Figura 36 – Modelo de cálculo da derivada da pressão.

No instante P2 a derivada da pressão (DP) é calculada pela equação $DP=P2-P1$. Pela análise do gráfico percebe-se que nesse instante obter-se-á um valor negativo, confirmando o prognóstico de redução da pressão. No instante P13 a DP é calculada pela equação $DP=P13-P12$. Pela análise do gráfico percebe-se que nesse instante obter-se-á um valor positivo, confirmando o prognóstico de aumento da pressão. E na situação do instante P16, seguindo o mesmo raciocínio de cálculo tem-se uma derivada nula, caracterizando uma pressão constante.

O universo de discurso dessa variável está entre três negativo e três positivo (em mca) e foi definido através dos resultados obtidos nos primeiros testes. A variável pode assumir valores superiores (módulo) aos do universo de discurso, porém não serão considerados uma vez que esse limite já é bastante representativo.

Para a variável “Derivada da Pressão” foram definidas três funções de pertinência: Negativo, Neutro e Positivo (Figura 37). Pressões com derivadas classificadas como Negativas demonstram que a variável está diminuindo. Da mesma forma que as pressões classificadas como positivas demonstram que a variável está aumentando. A função de pertinência Neutra demonstra que não está havendo variação na pressão ou esta dentro de uma faixa de variação considerada aceitável.

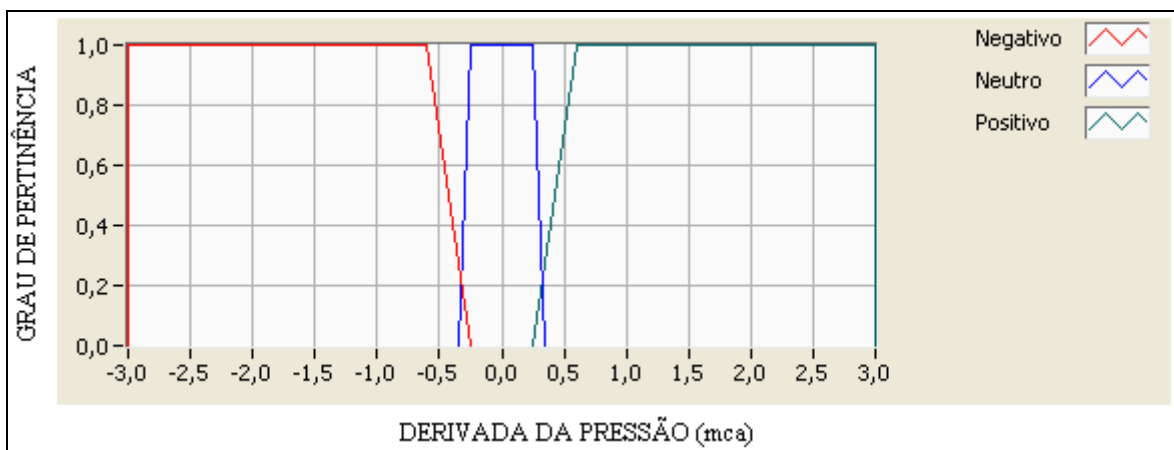


Figura 37 – Funções de pertinência variável linguística “DERIVADA DA PRESSÃO” (controlador Primário).

Na Tabela 2 é apresentado um resumo com os parâmetros da variável linguística Derivada da Pressão.

Tabela 2 - Características das funções de pertinência da variável de entrada "DERIVADA DA PRESSÃO" (controlador Fuzzy Primário)

Variável Linguística: Derivada da Pressão.		
Tipo: Entrada. / Universo de Discurso: -3~3 mca.		
Valor Linguístico	Forma	Faixa de Função (Parâmetros)
Derivada da Pressão NEGATIVA	Trapezoidal	[-3 -3 -0,6 -0,25]
Derivada da Pressão NEUTRA	Trapezoidal	[-0,35 -0,25 0,25 0,35]
Derivada da Pressão POSITIVA	Trapezoidal	[0,25 0,60 3 3]

5.3.3. Variável Linguística de Saída “Delta de Rotação”:

A variável linguística de saída representa a resposta do controlador à condição de operação instantânea do sistema. Toda sua ação será sempre com o objetivo de alcançar o parâmetro de pressão pré-determinado. O universo de discurso dessa variável é de -0,4 a 0,4 V. Como já foi mencionado, os conversores de frequência que controlam a velocidade de rotação dos motores, são acionados com um sinal de tensão de 0 V a 10 V, fornecidos através da interface de aquisição de dados, o que corresponde a uma frequência de saída do conversor entre 0 e 60 Hz, para uma velocidade de rotação nominal de 3450 rpm, para 60 Hz.

Quando o controlador define um valor negativo para a variável de saída, Delta de Rotação, esse valor será subtraído do sinal de excitação atual, resultando em uma tensão menor e conseqüentemente reduzindo a velocidade de rotação do conjunto motor-bomba. Do contrário, quando o controlador define uma tensão positiva para essa variável, será somada a tensão inicial, resultando em uma tensão maior e conseqüentemente aumentando a velocidade de rotação dos motores.

Na Figura 38 são apresentados o universo de discurso e as funções de pertinência da variável de saída do controlador primário.

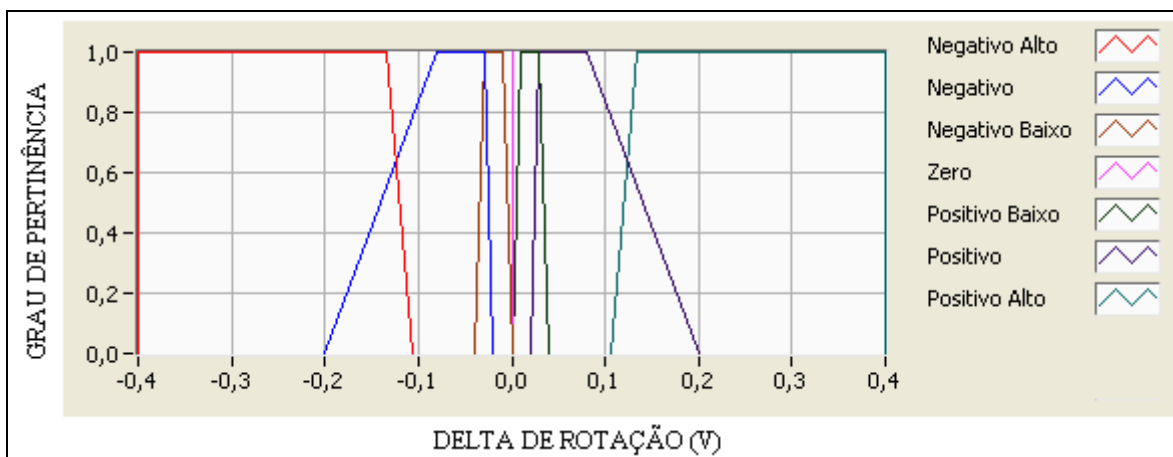


Figura 38 – Funções de pertinência variável de saída “DELTA DE ROTAÇÃO” (controlador Primário).

Para a variável de saída Delta de Rotação foram definidas sete função de pertinência: Negativo Alto, Negativo, Negativo Baixo, Zero, Positivo Baixo, Positivo, Positivo Alto. Foram utilizadas funções matemáticas tipo trapezoidal e singleton. Essa variável de saída é determinada a partir das funções de entrada e representa os vários valores que podem ser implementados à velocidade de rotação do motor, conforme as necessidades do sistema.

Tabela 3 - Características das funções de pertinência da variável de saída "DELTA DE ROTAÇÃO" (controlador Fuzzy Primário)

Variável Linguística: Delta de Rotação.		
Tipo: Saída / Universo de Discurso: -0,4~0,4 mca.		
Valor Linguístico	Forma	Faixa de Função (Parâmetros)
Delta de Rotação NEGATIVO ALTO	Trapezoidal	[-0,4 -0,4 -0,13 -0,11]
Delta de Rotação NEGATIVO	Trapezoidal	[-0,20 -0,08 -0,03 -0,02]
Delta de Rotação NEGATIVO BAIXO	Trapezoidal	[-0,04 -0,03 -0,01 0]
Delta de Rotação ZERP	Singleton	[0]
Delta de Rotação POSITIVO BAIXO	Trapezoidal	[0 0,01 0,03 0,04]
Delta de Rotação POSITIVO	Trapezoidal	[0,02 0,03 0,08 0,2]
Delta de Rotação POSITIVO ALTO	Trapezoidal	[0,11 0,13 0,4 0,4]

As funções de pertinência Negativo Alto e Positivo Alto resultam em um delta de rotação de módulo alto e são utilizados quando pretende-se uma ação rápida dos conjunto

motor-bomba, seja de aumento ou redução da pressão. As funções intermediárias têm o mesmo propósito, porém, com menor intensidade, sendo implementadas quando necessitasse de pequenos ajustes na pressão. A função de pertinência Zero, do tipo singleton, com um valor no universo de discurso de 0 V, sendo adotada quando a pressão encontra-se na sua zona ótima.

5.3.4. Base de Regras, Inferência e Defuzificação:

Com as funções de pertinência definidas e seus respectivos valores linguístico, foram criados quinze regras de inferência.

Na Figura 39, 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.

Rule-Nr.	Pressão	Der. Pressão	Delta de Rotação	DoS
1	Muito Baixa	Negativo	Positivo Alto	1,00
2	Muito Baixa	Neutro	Positivo Alto	1,00
3	Muito Baixa	Positivo	Positivo Alto	1,00
4	Baixa	Negativo	Positivo	1,00
5	Baixa	Neutro	Positivo	1,00
6	Baixa	Positivo	Zero	1,00
7	Otima	Negativo	Zero	1,00
8	Otima	Neutro	Zero	1,00
9	Otima	Positivo	Zero	1,00
10	Alta	Negativo	Zero	1,00
11	Alta	Neutro	Negativo	1,00
12	Alta	Positivo	Negativo	1,00
13	Muito Alta	Negativo	Negativo Alto	1,00
14	Muito Alta	Neutro	Negativo Alto	1,00
15	Muito Alta	Positivo	Negativo Alto	1,00

Figura 39 - Base de regras do controlador Fuzzy primário.

Devido à repetição das variáveis de saída no controlador (Figura 39 – Quadro vermelho), o número de regras efetivo para esse controlador foram nove. Essa otimização reduz a carga de cálculos para o controlador, tornando o sistema mais rápido. Dessa forma a base de regras efetiva é representada na Tabela 4.

O método de inferência usado para controladores Fuzzy foi o máximo-mínimo, ou seja, em cada uma das regras da base de regras Fuzzy, adotou-se o operador matemático mínimo para o conectivo lógico “e” e o operador máximo para o conectivo lógico “ou”. As sentenças “se...e...então...” foram modeladas pela aplicação mínimo e o relacionamento entre as regras são modelados pela aplicação máximo, conforme explicado nas sessões 3.4.3 e 3.4.4.

Tabela 4 - Base de regras efetiva do controlador Fuzzy primário.

		PRESSÃO				
		MUITO BAIXA	BAIXA	ÓTIMA	ALTA	MUITO ALTA
DERIVADA PRESSÃO	NEGATIVO	Positivo Alto	Positivo	Zero	Zero	Negativo Alto
	NEUTRO		Positivo		Negativo	
	POSITIVO		Zero		Negativo	

Para o processo de defuzzificação foi utilizado o Centro de Máximo. Segundo SIMÕES e SHAW (2007), essa abordagem representa um melhor compromisso entre possíveis saídas com multiplicidade de disparo de conjunto Fuzzy. Ou seja, será reforçada a saída que obtiver o maior número de acionamentos. Além disso, ainda segundo SIMÕES e SHAW (2007) em processos em malha fechada a propriedade de continuidade é importante pois se a saída de um controlador Fuzzy controla uma variável do processo, como é o caso (PRESSÃO), saltos na saída do controlador podem causar instabilidades e oscilações.

Tabela 5 - Características do controlador Fuzzy primário

Controlador:	Fuzzy Primário
Modelo:	Mandani
Ferramenta Computacional:	Fuzzy Logic Control (Labview™)
Número de Entradas:	2
Número de Saídas:	1
Entradas:	Pressão do Sistema Derivada da Pressão do Sistema
Saída:	Delta de Rotação CMB 01
Número de Regras:	15

Número de Regras Efetivo:	09
Método de Inferência:	Máximo e Mínimo
Método de DeFuzzyficação:	Centro de Máximo

Portanto, a Tabela 5 apresenta um resumo de todas as especificações do controlador adotado:

5.4. CONTROLADOR FUZZY SECUNDÁRIO

O controlador Fuzzy Secundário é responsável por controlar a velocidade de rotação do segundo conjunto motor-bomba, que será acionado nos momentos de maiores demandas de vazão. Também é sua função gerenciar o consumo energético do sistema e fazê-lo operar nas melhores condições. Para isso foram selecionadas como variáveis de entradas, além da pressão do sistema, a potência do conjunto motor-bomba primário e a potência do conjunto motor secundário. Foram denominadas Pressão, Potência BP e Potência BS.

O controlador Fuzzy Secundário avaliará a melhor opção entre as possibilidades de combinação de rotação dos conjuntos motor-bomba para atender à pressão pré-determinada e ajustará a velocidade de rotação do conjunto motor-bomba secundário.

Por consequência da ação do controlador Fuzzy Primário o conjunto motor-bomba principal se ajustará em função da velocidade de rotação do conjunto motor-bomba secundário.

A velocidade de rotação de operação dos conjuntos motor bomba é definida em função da pressão do sistema e do consumo energético dos conjuntos motor bomba. O controlador sempre busca a situação que ofereça a pressão constante (no patamar determinado) e o menor consumo energético possível.

Para atender esta condição, e partindo da premissa que a lógica fuzzy utiliza-se do conhecimento do programador para o desenvolvimento de suas regras e consequentemente de suas ações, foram realizados vários testes experimentais relacionando para uma mesma vazão e pressão constante, algumas possibilidades de combinação de rotação dos conjuntos

motor-bomba. Nos testes foram registrados o consumo energético do sistema para cada situação, o que evidentemente define a melhor condição de trabalho para os motores.

Os dados dos testes são apresentados na tabelas abaixo e serviram de subsídio para a elaboração da base de regras do controlador.

Inicialmente avaliaram-se as possibilidades para uma vazão demandada de 11 m³/h. Essa vazão está relacionada ao instante de menor vazão exigida porém, necessário o funcionamento de dois conjuntos motor-bomba, uma vez que um só não atenderia essa vazão. Para essa situação obteve-se os seguintes dados (Tabela 6).

Tabela 6 - Possibilidades de combinação dos CMB's para Q=11m³/h.

Q=11 m ³ /h / P=25 mca				
SIT.		CMB1	CMB2	CMB 1+2
1	Velocidade rotação	100%	75%	3,5 kW
	Potência	2,7 kW	0,8 kW	
	Rendimento	0,28	0,14	
2	Velocidade rotação	95%	80%	3,2 kW
	Potência	2,2 kW	1,0 kW	
	Rendimento	0,28	0,24	
3	Velocidade rotação	90%	85%	3,1 kW
	Potência	1,7 kW	1,3 kW	
	Rendimento	0,26	0,29	
4	Velocidade rotação	88%	86%	3,2 kW
	Potência	1,65 kW	1,55 kW	
	Rendimento	0,25	0,24	

Para a essa condição a melhor possibilidade de funcionamento foi a situação 3, uma vez que apresenta o menor consumo energético total.

Também se avaliou as possibilidades para uma vazão demandada de 13,5 m³/h, cujas possibilidades estão apresentadas na Tabela 7.

Para a essa condição a melhor possibilidade de funcionamento foi a situação 2, uma vez que apresenta o menor consumo energético total.

Por fim, avaliaram-se as possibilidades para uma vazão demandada de 15,7 m³/h. Essa vazão está relacionada a um instante de vazão elevada próximo a demanda máxima do sistema. (Tabela 8).

Tabela 7 - Possibilidades de combinação dos CMB's para Q=13,5 m³/h.

Q=13,5 m ³ /h / P=25 mca				
SIT.		CMB1	CMB2	CMB 1+2
1	Velocidade rotação	100%	82%	3,9 kW
	Potência	2,7 kW	1,2 kW	
	Rendimento	0,28	0,25	
2	Velocidade rotação	95%	86%	3,7 kW
	Potência	2,2 kW	1,5 kW	
	Rendimento	0,29	0,29	
3	Velocidade rotação	92%	88%	3,8 kW
	Potência	2,05 kW	1,75 kW	
	Rendimento	0,28	0,30	
4	Velocidade rotação	91%	90%	3,9 kW
	Potência	1,95 kW	1,95 kW	
	Rendimento	0,28	0,29	

Tabela 8 - Possibilidades de combinação dos CMB's para Q=15,7 m³/h.

Q=15,7 m ³ /h / P=25 mca				
SIT.		CMB1	CMB2	CMB 1+2
1	Velocidade rotação	100%	88%	4,4 kW
	Potência	2,7 kW	1,7 kW	
	Rendimento	0,26	0,29	
2	Velocidade rotação	97%	92%	4,5 kW
	Potência	2,5 kW	2,0 kW	
	Rendimento	0,28	0,30	
3	Velocidade rotação	95%	94%	4,5 kW
	Potência	2,2 kW	2,2 kW	
	Rendimento	0,27	0,29	

Para a essa condição a melhor possibilidade de funcionamento foi a situação 1, uma vez que apresenta o menor consumo energético total.

Como já mencionado anteriormente, esses dados servirão de base para o desenvolvimento da base de regras do controlador fuzzy secundário. Fundamentado nesses

dados, o controlador determinará a opção de combinação de velocidade de rotação dos motores com menor consumo energético possível.

Para isso o controlador utilizou como variável de saída um Delta de Rotação. Essa variável representa um incremento na velocidade de rotação que será adicionada à condição atual de operação do conjunto motor-bomba secundário (CMB-02). O Delta de Rotação pode assumir valores negativos ou positivos e com isso terá a possibilidade de aumentar ou diminuir a velocidade de rotação do motor, conforme a necessidade de pressão, vazão e consumo energético do sistema.

Na Figura 40 é apresentado o diagrama esquemático de funcionamento do controlador Fuzzy Secundário.

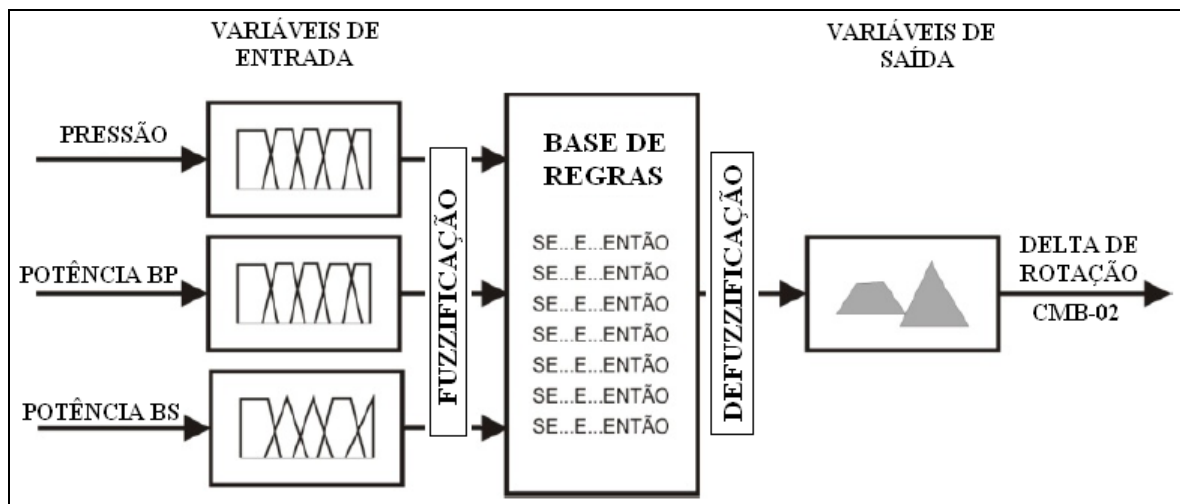


Figura 40 – Esquema de funcionamento do controlador Fuzzy Secundário.

5.4.1. Variável Linguística de Entrada “Pressão”:

A variável de entrada “Pressão” é definida como a pressão em um ponto da rede. É a mesma utilizada como variável de entrada no controlador Fuzzy Primária. Por se tratar da mesma grandeza, sua caracterização como variável Fuzzy no controlador Secundário foi semelhante.

No controlador Fuzzy Secundário o universo de discurso, também, varia de 0 a 40 mca. Essa variável igualmente se caracterizará por cinco funções de pertinências, com os mesmos valores reais assumidos pela grandeza: Muito Baixa, Baixa, Ótima, Alta e Muito

Alta. Na Figura 41 representam-se as funções de pertinência e seus valores no universo de discurso.

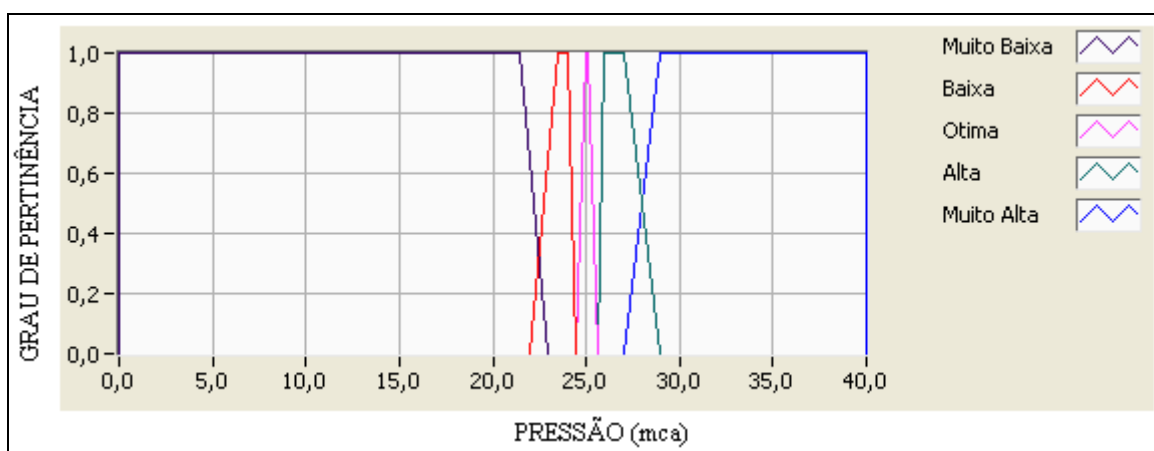


Figura 41 - Função de pertinência variável de entrada "Pressão"(controlador Fuzzy secundário).

Se comparada com as funções de pertinência da mesma variável de entrada "Pressão" do controlador primária (Figura 35), percebe-se o mesmo comportamento, porém no controlador Fuzzy Secundário tem-se uma conduta mais restritiva, ou seja, os intervalos de cada função são menores. Esse procedimento foi adotado, pois o controlador Fuzzy Secundário é acionado posteriormente ao primário e com ele em funcionamento, portanto, para que aquele efetivamente tivesse uma ação sobre o sistema foi necessário que exigisse melhores resultados. Do contrário, as ações do controlador Fuzzy Primário sempre se sobressairiam em relação ao secundário, principalmente logo no seu acionamento, quando a diferença de rotação é maior.

Tabela 9 - Características das funções de pertinência da variável de entrada "PRESSÃO" (Controlador Fuzzy Secundário)

Variável Linguística: Pressão.		
Tipo:Entrada. / Universo de Discurso: 0-40 mca.		
Valor Linguístico	Forma	Faixa de Função (Parâmetros)
Pressão MUITO BAIXA	Trapezoidal	[0 0 21,50 23]
Pressão BAIXA	Trapezoidal	[22 23,50 24 24,40]
Pressão ÓTIMA	Trapezoidal	[24,40 24,95 25,05 25,60]
Pressão ALTA	Trapezoidal	[25,60 26 27 29]
Pressão MUITO ALTA	Trapezoidal	[27 29 40 40]

5.4.2. Variável Linguística de Entrada “Potência BP”:

A variável de entrada “Potência BP” (BP- bomba primária) é definida como a potência instantânea consumida, em Watts, pelo motor do conjunto motor-bomba, acionado pelo controlador Fuzzy Primário. Esse parâmetro é obtido através do conversor de frequência instalado no conjunto motor-bomba. O modelo do Conversor de frequência utilizado na bancada experimental (CFW11-WEG) tem a capacidade de oferecer uma série de parâmetros elétricos, entre eles a potência instantânea dos equipamentos.

Para seu universo de discurso (UD) também foram utilizados valores reais, evitando parametrizações, e varia de 0 a 3,5 kW, pois este é o intervalo de consumo dos motores utilizados. Foram adotadas três funções de pertinência: Baixo, Médio e Alto. O consumo do tipo Baixo é o procurado pelo controlador, pois como o próprio nome sugere é o que impõe menos custo ao sistema. Conseqüentemente as demais funções, Médio e Alto são alternativas posteriores.

É importante ressaltar que o consumo energético (Potência BP) não é variável de controle (variável de controle do sistema é a pressão), porém serve como subsídio e parâmetro para que o controlador tome as decisões mais acertadas e eficientes.

Na Figura 35 apresentam-se as funções de pertinência relacionadas à variável linguística “POTÊNCIA BP”.

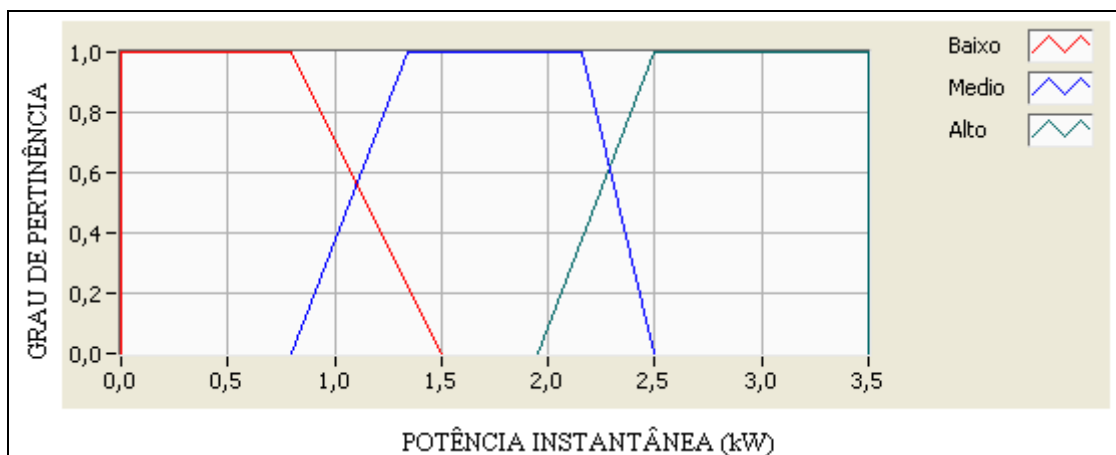


Figura 42 - Funções de pertinência variável linguística “POTÊNCIA BP ” (controlador secundário).

Para todos os valores foram adotadas as funções de pertinência trapezoidais e suas características e parâmetros são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 - Características das funções de pertinência da variável de entrada "POTÊNCIA BP" (controlador fuzzy secundário)

Variável Linguística: Potência BP.		
Tipo:Entrada. / Universo de Discurso: 0-3,5 kW.		
Valor Linguístico	Forma	Faixa de Função (Parâmetros)
BAIXO	Trapezoidal	[0 0 0,8 1,5]
MÉDIO	Trapezoidal	[0,8 1,34 2,16 2,50]
ALTO	Trapezoidal	[1,96 2,50 3,50 3,50]

5.4.3. Variável Linguística de Entrada “Potencia BS”:

A variável de entrada “Potência BS” ” (BS – bomba secundária) possui as mesmas características e parâmetros da variável discriminada anteriormente (Potência BP). Potência BS foi concebida com os mesmos princípios e bases de fundamentos porém destinada a analisar o comportamento do conjunto motor-bomba acionado pelo controlador Fuzzy Secundário (CMB-02).

Portanto todos os seus parâmetros também podem ser avaliados através da Figura 42 e da Tabela 10, que demonstram os valores linguísticos, formas e faixas numéricas da variável linguística.

5.4.4. Variável Linguística de Saída “Delta de Rotação”:

Assim como no controlador Fuzzy Primário, a variável linguística de saída do secundário representa a resposta do controlador à condição de operação instantânea do sistema. Toda sua ação será sempre com o objetivo de alcançar o parâmetro de pressão pré-determinado, porém, no caso do controlador Fuzzy Secundário, após alcançar esse objetivo, busca uma combinação entre as velocidades de rotação dos conjuntos motor-bomba que, além de atender seu objetivo, o faça com o menor consumo energético.

Assim como no primeiro controlador, o universo de discurso dessa variável é de -0,4 a 0,4 V. Foi utilizada uma faixa de tensão devido ao acionamento dos conversores de frequência dar-se nessa unidade (faixa de 0~10 V).

A Figura 43 mostra o universo de discurso e as funções de pertinência da variável de saída do controlador secundário.

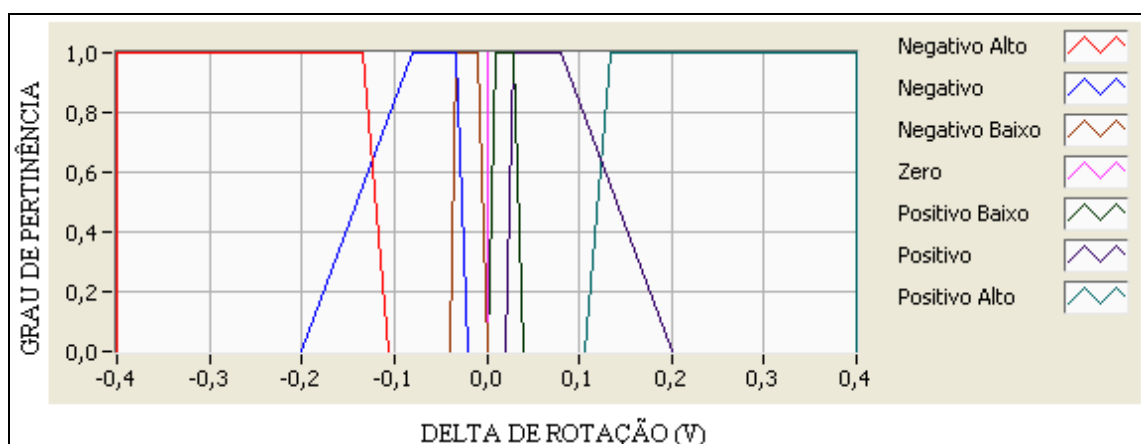


Figura 43 - Funções de pertinência variável de saída “DELTA DE ROTAÇÃO” (controlador secundário).

Quando o controlador define uma tensão negativa para a variável de saída Delta de Rotação esse valor será somado à tensão de acionamento inicial resultando em uma tensão menor e conseqüentemente reduzindo a velocidade de rotação do conjunto motor-bomba. Do contrário quando o controlador define uma tensão positiva para essa variável, também será somada à tensão inicial resultando em uma tensão maior e conseqüentemente aumentando a velocidade de rotação dos motores. Toda essa ação será em busca de atingir a pressão pré-determinada (25 mca).

Após os controladores estabilizarem a pressão, o sistema Fuzzy Secundário inicia o processo de busca de uma combinação de rotação (dos conjuntos motor-bomba 01 e 02) que tenha o menor consumo energético possível. Essa ação é possível pois, existem inúmeras possibilidades, proporcionadas pelos conversores de frequência, de combinação de rotação dos motores que atendem a pressão exigida. Todo esse procedimento é realizado em tempo real e a cada instante, decorrente das ações e demandas do sistema.

Foram definidas sete funções de pertinência: Negativo Alto, Negativo, Negativo Baixo, Zero, Positivo Baixo, Positivo, Positivo Alto. Foram utilizadas funções matemáticas tipo trapezoidal e singleton.

Essa variável de saída é determinada a partir das funções de entrada resultantes da base de regras que definem o controlador. Quando definidas nas funções de pertinência Negativo Alto e Positivo Alto resultam em um delta de rotação de módulo alto e são utilizados quando pretende-se uma ação rápida dos conjunto motor-bomba seja de aumento ou redução da pressão. As funções intermediárias (Negativo, Negativo Baixo, Positivo, Positivo Baixo) têm o mesmo propósito porém, com menor intensidade, sendo implementadas quando necessita-se de pequenos ajustes na pressão. A função de pertinência Zero, do tipo singleton, de um valor no universo de discurso de 0 V, sendo adotada quando a pressão encontra-se no seu valor ótimo.

Tabela 11 - Características das funções de pertinência da variável de saída "POTÊNCIA DELTA DE ROTAÇÃO" (controlador fuzzy secundário)

Variável Linguística: Delta de Rotação.		
Tipo: Saída / Universo de Discurso: -0,4~0,4 mca.		
Valor Linguístico	Forma	Faixa de Função (Parâmetros)
Delta de Rotação NEGATIVO ALTO	Trapezoidal	[-0,4 -0,4 -0,13 -0,11]
Delta de Rotação NEGATIVO	Trapezoidal	[-0,20 -0,08 -0,03 -0,02]
Delta de Rotação NEGATIVO BAIXO	Trapezoidal	[-0,04 -0,03 -0,01 0]
Delta de Rotação ZERO	Singleton	[0]
Delta de Rotação POSITIVO BAIXO	Trapezoidal	[0 0,01 0,03 0,04]
Delta de Rotação POSITIVO	Trapezoidal	[0,02 0,03 0,08 0,2]
Delta de Rotação POSITIVO ALTO	Trapezoidal	[0,11 0,13 0,4 0,4]

5.4.5. Base de Regras, Inferência e Defuzificação:

Com as funções de pertinência definidas e seus respectivos valores linguístico, foram criados quarenta e cinco regras de inferência. A quantidade de regras foi definida pela combinação das funções de pertinência das três variáveis linguísticas. Suas configurações foram definidas a partir dos dados apresentados nas Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8. Na Figura 44, são apresentadas as regras estabelecidas para o controlador Fuzzy. Todas as funções de pertinência foram implementadas por meio do Fuzzy Logic Toolkit instaladas no Labview. Assim como no controlador Fuzzy Primário, 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.

Rulebase Editor

Utils	IF			THEN	With
Rule-Nr.	Pressão	Potencia BP	Potencia BS	Delta de Rotação	DoS
1	Muito Baixa	Baixo	Baixo	Zero	1,00
2	Muito Baixa	Baixo	Médio	Positivo	1,00
3	Muito Baixa	Baixo	Alto	Positivo Baixo	1,00
4	Muito Baixa	Medio	Baixo	Positivo	1,00
5	Muito Baixa	Medio	Médio	Zero	1,00
6	Muito Baixa	Medio	Alto	Positivo Baixo	1,00
7	Muito Baixa	Alto	Baixo	Positivo Alto	1,00
8	Muito Baixa	Alto	Médio	Positivo Alto	1,00
9	Muito Baixa	Alto	Alto	Positivo	1,00
10	Baixa	Baixo	Baixo	Positivo Baixo	1,00
11	Baixa	Baixo	Médio	Positivo Baixo	1,00
12	Baixa	Baixo	Alto	Positivo Baixo	1,00
13	Baixa	Medio	Baixo	Positivo	1,00
14	Baixa	Medio	Médio	Positivo	1,00
15	Baixa	Medio	Alto	Positivo Baixo	1,00
16	Baixa	Alto	Baixo	Positivo	1,00
17	Baixa	Alto	Médio	Positivo	1,00
18	Baixa	Alto	Alto	Positivo	1,00
19	Otima	Baixo	Baixo	Zero	1,00
20	Otima	Baixo	Médio	Negativo Baixo	1,00
21	Otima	Baixo	Alto	Negativo Baixo	1,00
22	Otima	Medio	Baixo	Positivo	1,00
23	Otima	Medio	Médio	Zero	1,00
24	Otima	Medio	Alto	Negativo Baixo	1,00
25	Otima	Alto	Baixo	Positivo	1,00
26	Otima	Alto	Médio	Positivo	1,00
27	Otima	Alto	Alto	Zero	1,00
28	Alta	Baixo	Baixo	Negativo Baixo	1,00
29	Alta	Baixo	Médio	Negativo	1,00
30	Alta	Baixo	Alto	Negativo	1,00
31	Alta	Medio	Baixo	Negativo Baixo	1,00
32	Alta	Medio	Médio	Negativo	1,00
33	Alta	Medio	Alto	Negativo	1,00
34	Alta	Alto	Baixo	Negativo Baixo	1,00
35	Alta	Alto	Médio	Negativo Baixo	1,00
36	Alta	Alto	Alto	Negativo	1,00
37	Muito Alta	Baixo	Baixo	Negativo	1,00
38	Muito Alta	Baixo	Médio	Negativo	1,00
39	Muito Alta	Baixo	Alto	Negativo Alto	1,00
40	Muito Alta	Medio	Baixo	Negativo Baixo	1,00
41	Muito Alta	Medio	Médio	Negativo	1,00
42	Muito Alta	Medio	Alto	Negativo	1,00
43	Muito Alta	Alto	Baixo	Negativo Baixo	1,00
44	Muito Alta	Alto	Médio	Negativo Baixo	1,00
45	Muito Alta	Alto	Alto	Negativo Alto	1,00

Defuzzification Method
Center of Maximum

default term
Zero

if no rule is active
Take last value

Inference Method
Max-Min

Select form of Rulebase
 normal Rulebase

total rules 45
 used rules 45
 default DoS 1,00

Up

Help

QUIT

Dn

Figura 44 - Base de regras controlador Fuzzy secundário.

O método de inferência usado para controladores Fuzzy foi o máximo-mínimo, ou seja, em cada uma das regras da base de regras Fuzzy adotou-se o operador matemático mínimo para o conectivo lógico “e” e o operador máximo para o conectivo lógico “ou”. As

sentenças “se...e...então...” são modeladas pela aplicação mínimo, e o relacionamento entre as regras são modelados pela aplicação máximo, semelhante ao utilizado no controlador Fuzzy primário. Para o processo de defuzzificação utilizou-se o Centro de Máximo. A Tabela 12 apresenta um resumo de todas as especificações do controlador adotado:

Tabela 12 – Características do controlador Fuzzy secundário

Controlador:	Fuzzy Secundário
Modelo:	Mandani
Ferramenta Computacional:	Fuzzy Logic Control (Labview™)
Número de Entradas:	3
Número de Saídas:	1
Entradas:	Pressão do Sistema Potência Bomba Primária Potência Bomba Secundária
Saída:	Delta de Rotação CMB 02
Número de Regras:	45
Número de Regras Efetivo:	45
Método de Inferência:	Máximo e Mínimo
Método de DeFuzzyficação:	Centro de Máximo

5.5. CONTROLADOR FUZZY ACIONAMENTO

O Controlador Fuzzy Acionamento é responsável por controlar o instante em que o conjunto motor-bomba secundário será ativado e desativado. Optou-se por gerenciar essa ação por meio de um controlador Fuzzy devido esse processo envolver várias incertezas e condições difíceis de serem avaliadas e/ou transformadas em um processo lógico.

É importante ressaltar que esse controlador não interfere no objetivo principal da pesquisa que é manter a pressão constante em torno de 25 mca. Porém ratifica a afirmação de que os sistemas Fuzzy se adaptam as mais diversas situações, inclusive não-lineares, e podem gerenciar problemas complexos.

Para o seu desenvolvimento foram atribuídas duas variáveis de entrada: vazão e derivada da vazão. Essas variáveis foram escolhidas uma vez que cada conjunto motor-bomba possui um limite de vazão máxima, que deverá ser suprida pela outro no momento oportuno, a fim de atender a demanda requerida pelo sistema de abastecimento. Com a utilização dos conversores de frequência esse instante pode ser antecipado ou retardado dependendo da necessidade. A derivada da vazão possibilitará o conhecimento da tendência ou projeção da variável vazão, auxiliando no processo de decisão.

A variável de saída desse controlador Fuzzy é a resposta ao acionamento ou desacionamento do conjunto motor-bomba secundário. Na Figura 45 mostra-se o diagrama de blocos de funcionamento do controlador Fuzzy Acionamento.

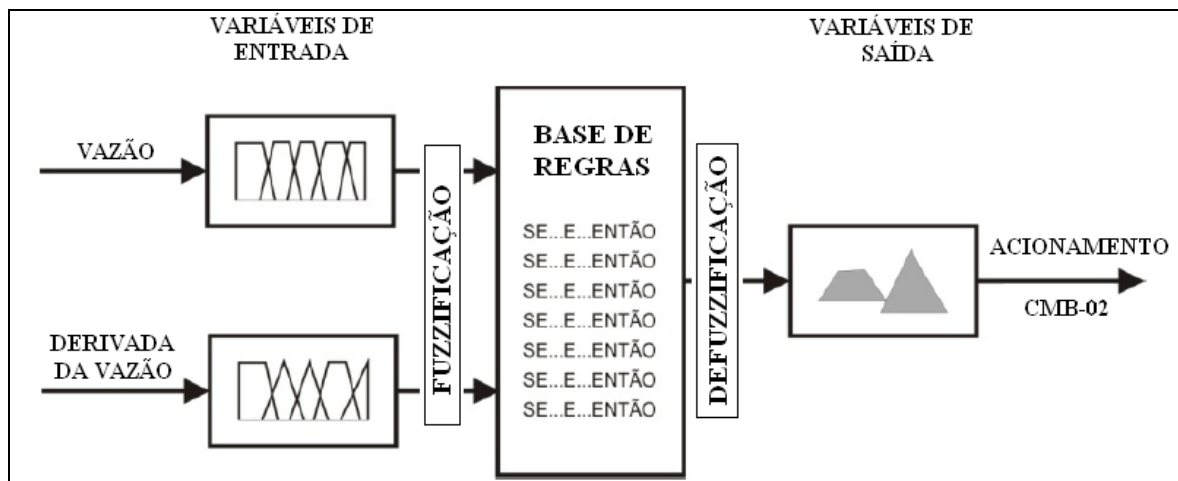


Figura 45 – Diagrama de blocos de funcionamento do controlador Fuzzy acionamento.

5.5.1. Variável Linguística de Entrada “Vazão”:

A variável de entrada “Vazão” é definida como a vazão do sistema. Representa a demanda requerida por possíveis usuários do sistema de abastecimento emulado e por isso é um valor variável. O universo de discurso adotado foi de 0 a 20 m³/h e representa todos os valores que essa variável pode assumir, em qualquer situação, inclusive na associação dos conjuntos motor-bomba.

Foram adotadas cinco funções de pertinência para representar essa variável: Baixa, Baixa Limite, Limite, Alta Limite e Alta. A vazão caracterizada como “Limite” está na faixa de atendimento limite de um conjunto motor-bomba assinalando a necessidade de

acionar o segundo conjunto. Essa faixa atendida como limite refere-se ao rendimento do conjunto motor-bomba, uma vez que segundo as curvas da bomba, o sistema até poderia continuar a ser atendido por um único conjunto, porém a partir daí seu rendimento cairia consideravelmente.

As funções de pertinência baixa, baixa limite, alta e alta limite caracterizam-se por representarem vazões distantes, seja para menos ou para mais, da considerada como ideal para o funcionamento de um conjunto motor-bomba. Na Figura 46 são mostradas as funções de pertinência dessa variável de entrada.

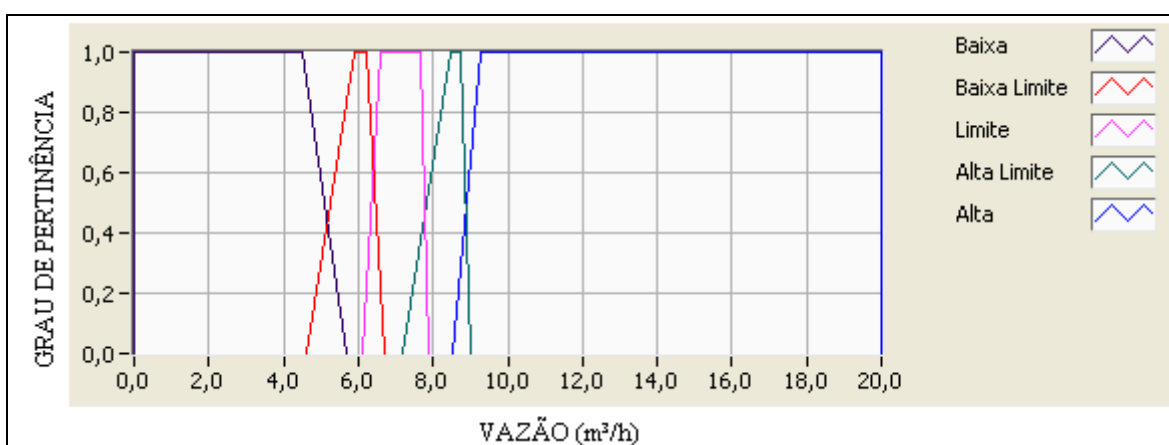


Figura 46 - Funções de pertinência variável de entrada “VAZÃO” (Controlador Acionamento).

Tabela 13 - Características das funções de pertinência da variável de entrada "VAZÃO" (controlador fuzzy acionamento)

Variável Linguística: Vazão.		
Tipo: Saída / Universo de Discurso: 0~20 m³/h.		
Valor Linguístico	Forma	Faixa de Função (Parâmetros)
Vazão BAIXA	Trapezoidal	[0 0 4,5 5,7]
Vazão BAIXA LIMITE	Trapezoidal	[4,6 5,9 6,2 6,7]
Vazão LIMITE	Trapezoidal	[6,10 6,60 7,68 7,9]
Vazão ALTA LIMITE	Trapezoidal	[7,20 8,46 8,73 9,03]
Vazão ALTA	Trapezoidal	[8,50 9,25 20 20]

Todas as funções de pertinência adotadas foram no formato trapezoidal e os seus parâmetros estão especificados na Tabela 13.

5.5.2. Variável Linguística de Entrada “Derivada da Vazão”

A variável linguística “Derivada da Vazão” representa a inclinação da reta daquela função no determinado instante. Assim como no controlador Fuzzy Primário esse tipo de variável tem a função de descrever a tendência ao qual deve seguir sua variável e pode ser calculada através da diferença registrada entre a pressão atual e a pressão anterior. Essa variável facilita as ações do controlador em se antecipar as perturbações do sistema tornando-o mais eficaz. Diferente da variável linguística, derivada da pressão do controlador Fuzzy Primário, essa variável não possui valor ideal. Seu valor é ilustrativo servindo de parâmetro para a tomada de decisão.

Sua forma de cálculo é semelhante a do controlador Fuzzy primário (Figura 36) e o seu universo de discurso varia de -1 a 1 m³/h. Dentro dessa faixa de possibilidades foram atribuídas três funções de pertinências todas em formato trapezoidal: Negativo, Neutro e Positivo. Essas funções irão classificar se a vazão esta com valores crescente, decrescente ou constantes.

Na Figura 47 são mostradas as funções de pertinência da variável.

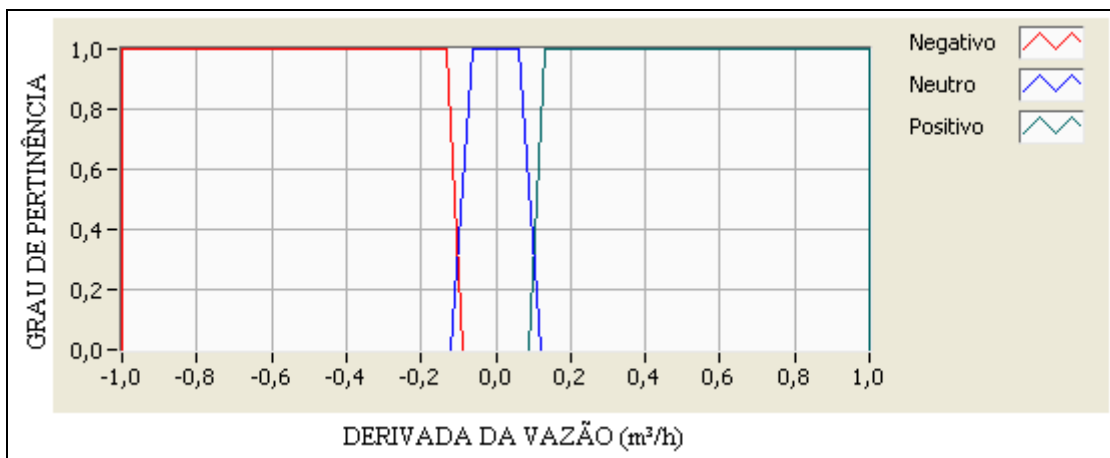


Figura 47 – Funções de pertinência variável linguística "DERIVADA DA VAZÃO"(Controlador Acionamento).

Na Tabela 14 é mostrado um resumo com os parâmetros da variável linguística Derivada da Vazão.

Tabela 14 - Características das funções de pertinência da variável de entrada "DERIVADA DA VAZÃO" (controlador fuzzy acionamento)

Variável Linguística: Derivada da Vazão.		
Tipo: Entrada. / Universo de Discurso: -1~1 mca.		
Valor Linguístico	Forma	Faixa de Função (Parâmetros)
Derivada da Vazão NEGATIVA	Trapezoidal	[-3 -3 -0,6 -0,25]
Derivada da Vazão NEUTRA	Trapezoidal	[-0,35 -0,25 0,25 0,35]
Derivada da Vazão POSITIVA	Trapezoidal	[0,25 0,60 3 3]

5.5.3. Variável Linguística de Saída “Acionamento”:

A variável linguística Acionamento representa a resposta do controlador Fuzzy Acionamento a condição instantânea do sistema. Como já dito anteriormente esse controlador não interfere diretamente no objetivo principal do controlador de manter a pressão no sistema sempre constante. Sua ação é acionar e desativar o conjunto motor-bomba secundário e possibilitar a ação dos demais controladores em alcançar o parâmetro de pressão pré-determinado.

Foram definidas três funções de pertinência para essa variável: Não Acionado, Não Acionado 2 e Acionado. Os próprios nomes das funções já definem a ação a ser dada pelo controlador ao conjunto motor-bomba secundário definindo sua condição entre ligado ou desligado.

Seu universo de discurso está entre -1 e 1 sendo um valor adimensional cujo valor resultante quanto mais próximo de 1 (positivo), maior será o grau de pertinência da função Acionado e quanto mais próximo o valor de -1(negativo) maior será o grau de pertinência da função Não Acionado (Figura 48).

Portanto quando a variável de saída tiver como resultado um valor definido pela função de pertinência “Acionado”, o controlador enviará um comando para ligar o conjunto motor-bomba secundário. Do contrário, quando a variável de saída tiver como resultado um valor definido pela função de pertinência “Não Acionado”, o controlador enviará um comando para desligar o conjunto motor-bomba secundário.

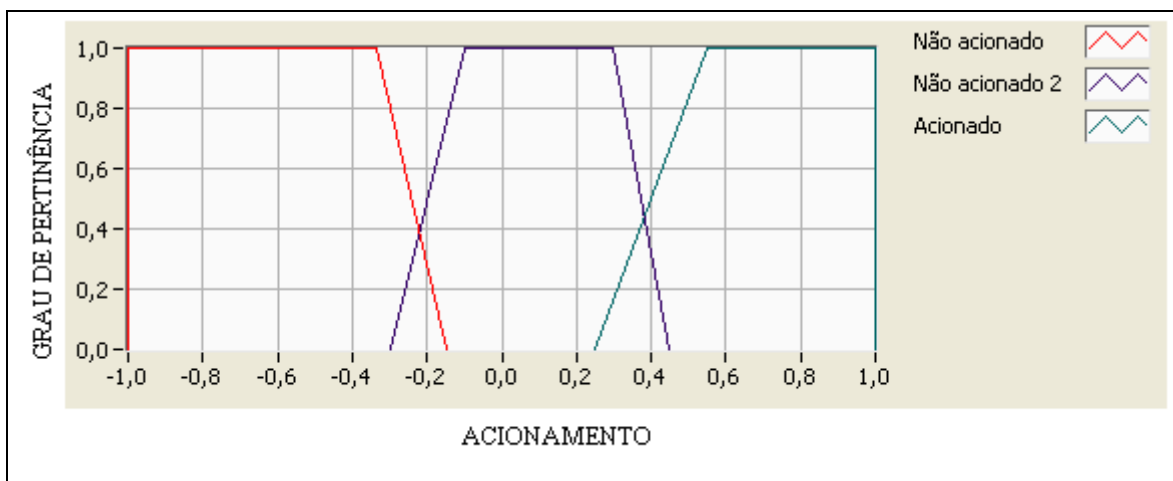


Figura 48 – Funções de pertinência variável de saída “ACIONAMENTO” (Controlador Acionamento).

Na Tabela 15 mostram-se os parâmetros para cada uma das funções de pertinência definidas para essa variável.

Tabela 15 - Características das funções de pertinência da variável de saída "ACIONAMENTO" (controlador fuzzy acionamento)..

Variável Linguística: Acionamento.		
Tipo: Saída / Universo de Discurso: -1~1 mca.		
Valor Linguístico	Forma	Faixa de Função (Parâmetros)
Motor Secundário NÃO ACIONADO	Trapezoidal	[-1 -1 -0,33 -0,15]
Motor Secundário NÃO ACIONADO 2	Trapezoidal	[-0,30 -0,10 0,30 0,45]
Motor Secundário ACIONADO	Trapezoidal	[0,25 0,55 1 1]

Além da ação do Controlador Fuzzy Acionamento, foi desenvolvido um mecanismo para evitar ações de ativação e desativação consecutivas em um pequeno período de tempo, o que poderia danificar os motores. Essa solução consistiu em adotar uma faixa de ativação/desativação dentro do universo de discurso da variável ao invés de um valor discreto. Dessa forma, definiu-se que o sistema será acionado quando a variável de saída atingir valores superiores a 0,3 e desativado quando atingir valores inferiores a 0,1.

5.5.4. Base de Regras, Inferência e Defuzificação:

Com as funções de pertinência definidas e seus respectivos valores linguístico, foram criadas quinze regras de inferência. Essas regras foram resultados da combinação das funções de pertinência das variáveis de entrada e estão apresentadas na Figura 49. 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.

Rule-Nr.	Vazão	Der. Vazão	Acionamento	DoS
1	Baixa	Negativo	Não acionado	1,00
2	Baixa	Neutro	Não acionado	1,00
3	Baixa	Positivo	Não acionado	1,00
4	Baixa Limite	Negativo	Não acionado 2	1,00
5	Baixa Limite	Neutro	Não acionado 2	1,00
6	Baixa Limite	Positivo	Acionado	1,00
7	Limite	Negativo	Não acionado	1,00
8	Limite	Neutro	Acionado	1,00
9	Limite	Positivo	Acionado	1,00
10	Alta Limite	Negativo	Acionado	1,00
11	Alta Limite	Neutro	Acionado	1,00
12	Alta Limite	Positivo	Acionado	1,00
13	Alta	Negativo	Acionado	1,00
14	Alta	Neutro	Acionado	1,00
15	Alta	Positivo	Acionado	1,00

Configuration options on the right:

- Defuzzification Method: Center of Maximum
- default term: <65535>
- if no rule is active: Take last value
- Inference Method: Max-Min
- Select form of Rulebase: normal Rulebase
- total rules: 15
- used rules: 15
- default DoS: 1,00

Figura 49 - Base de regras controlador Fuzzy acionamento.

Assim como na base de regras do controlador Fuzzy Primário existem algumas repetições das variáveis de saída no controlador (Figura 49 - Quadro Vermelho). Essa repetição resulta em número efetivo de regras menor que a quantidade de regras possíveis. Essa redução de regras, reduz a carga de cálculos para o controlador tornando o sistema mais rápido. Dessa forma a base de regras efetiva é representada na Tabela 16.

Tabela 16 - Base de regras efetiva controlador Fuzzy acionamento

		VAZÃO				
		BAIXA	BAIXA LIMITE	LIMITE	ALTA LIMITE	ALTA
DERIVADA VAZÃO	NEGATIVO	Não Acionado	Ñ Acion. 2	Ñ Acionad.	Acionado	Acionado
	NEUTRO		Ñ Acion. 2	Acionado		
	POSITIVO		Acionado	Acionado		

Assim, como nos demais controladores foi utilizado o método de inferência máximo-mínimo e para o processo de defuzzificação utilizou-se o método Centro de Máximo.

Dessa forma na Tabela 17 apresenta-se um resumo de todas as especificações do controlador adotado:

Tabela 17 - Características do controlador Fuzzy acionamento

Controlador:	Fuzzy Acionamento
Modelo:	Mandani
Ferramenta Computacional:	Fuzzy Logic Control (Labview™)
Número de Entradas:	2
Número de Saídas:	1
Entradas:	Vazão do Sistema Derivada da Vazão do Sistema
Saída:	Acionamento
Número de Regras:	15
Número de Regras Efetivo:	07
Método de Inferência:	Máximo e Mínimo
Método de DeFuzzyficação:	Centro de Máximo

CAPÍTULO VI

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados alcançados com os controladores Fuzzy, a fim de validar o sistema de controle proposto. Destaca-se que o objetivo do controlador sugerido é manter a pressão do sistema constante em vinte e cinco mca, sem comprometer o fornecimento de água, ou seja, sem reduzir a vazão fornecida pelos conjuntos motor-bomba. Além disso, é esperado que o controlador realize essa tarefa sempre buscando os menores de consumo energético.

Foram realizados ao todo cinco experimentos emulando além de situações reais de um sistema de abastecimento, algumas condições críticas, a fim de avaliar a capacidade do controlador em alcançar seus objetivos.

Em seguida faz-se uma breve explicação do procedimento e apresentando os resultados.

6.1. EXPERIMENTO 01 – Sistema com Variação de Demanda Sem Controlador.

O experimento 01 simulou um sistema de abastecimento direto, semelhante a um sistema tido como convencional, sem a variação de rotação dos conjuntos motor-bomba. Nesse experimento não há a ação do Controlador Fuzzy. O objetivo é obter dados para comparar com o sistema de controle proposto.

Para isso foi imposto ao sistema uma variação de demanda semelhante à de um sistema de abastecimento real (Figura 23). Essa variação foi possível por meio da abertura e fechamento gradual da válvula proporcional instalada na rede (emulando o aumento e a diminuição da demanda pelos usuários). É evidente que essa abertura e fechamento da válvula provocou variação na vazão requerida pelo sistema e conseqüentemente uma variação na sua pressão.

A Figura 24 mostrou os ângulos de abertura da válvula, em graus (sendo 0° totalmente fechada e 90° totalmente aberta) e a vazão associada requerida pelo sistema.

Assim, para esse primeiro experimento, o objetivo é atender à demanda de vazão da rede, sem reduzir a pressão para valores inferiores a 25 mca e sem a utilização de sistemas de controle. O único procedimento adotado foi a possibilidade do acionamento do conjunto motor-bomba secundário nos instantes de maior consumo.

Na Figura 50 apresentam-se os resultados desse primeiro experimento apenas com a atuação do CMB-Principal. Percebe-se que nos momentos de maior demanda, mesmo com o CMB-Principal funcionando à rotação plena, a pressão mínima (25 mca) não foi atendida. Na Figura 24c, percebe-se que a vazão também ficou abaixo do requerido pelo sistema. Além disso, nos instantes de menor consumo ($t=0\sim 325s$ e $t=733\sim 900s$) a pressão registrada estava bem acima do necessário. Dessa forma, observa-se que essa primeira situação não atendeu às necessidades impostas pela rede de abastecimento, não servindo para comparação com o sistema com controlador.

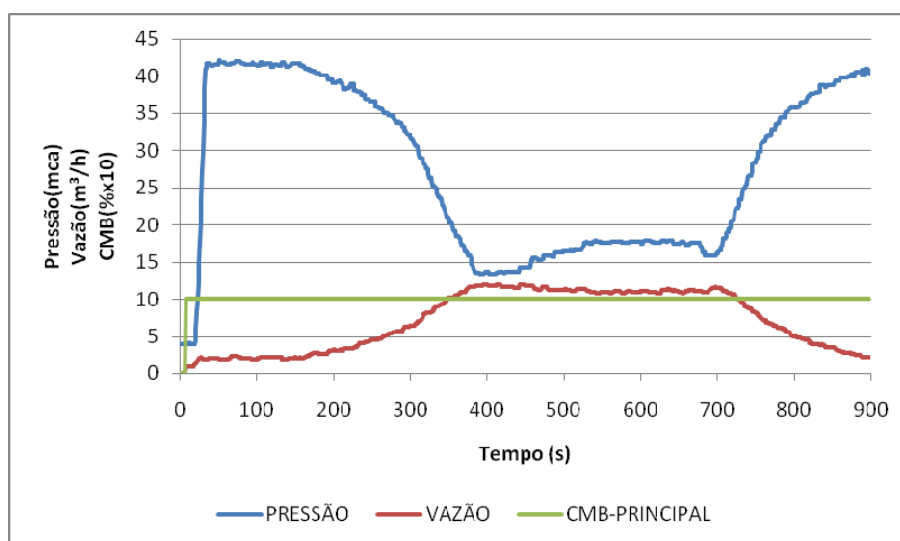


Figura 50 - Pressão e vazão experimento 01 - atuação apenas do CMB-Principal.

Na Figura 52 apresenta-se a potência total consumida pelos motores no período de funcionamento dos sistemas. Logo se percebe que a situação 2 apresenta um aumento no consumo de energia entre os instantes $t=329s$ e $t=714s$, pois é justamente nesse período que é acionando o CMB-Secundário passando o sistema a operar com dois conjuntos motor-bomba (situação 1 – acionamento apenas do CMB-principal / situação 2 – acionamento do CMB-principal e CMB-secundário).

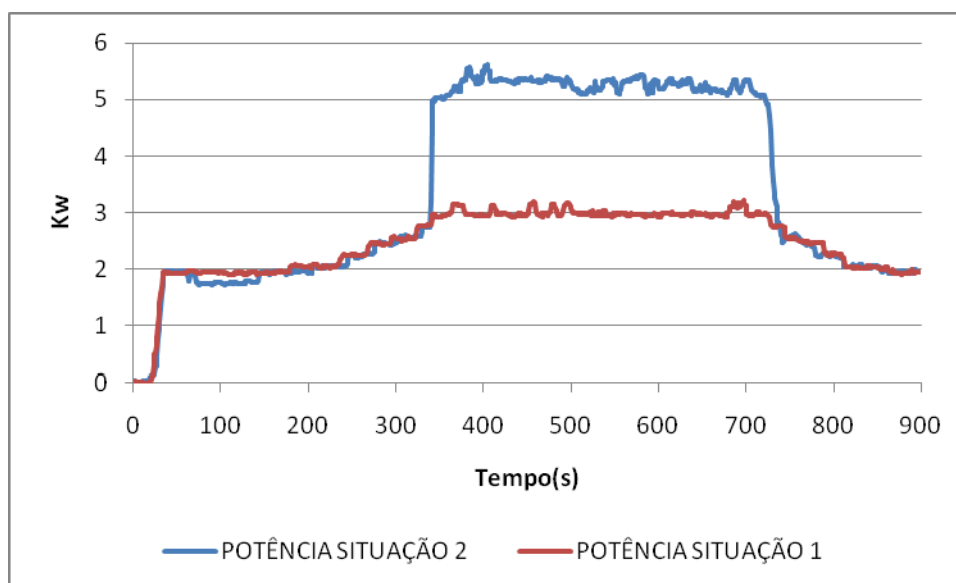


Figura 52 - Avaliação energética experimento 01 (Situação 1 e 2).

Na Tabela 18 apresentam-se os dados do experimento 01. Como já esperado o consumo energético do sistema operando apenas com um CMB é menor, uma vez que em nenhum momento possui dois motores em funcionamento. A pressão média das duas situações está acima do valor tido como objetivo do sistema (25 mca) e também são valores que estão oscilando dentro de uma faixa de pressão muito alta (42 mca a 12 mca - Figura 50 e Figura 51). A vazão total bombeada do sistema também foi menor para situação 1.

Ainda como forma de avaliar a eficiência energética do sistema experimental utilizou-se os indicadores de Consumo Específico de Energia Elétrica (CE). O CE, largamente utilizado no setor, é a relação entre o consumo de energia (kWh) de um determinado grupo e o volume bombeado (m^3), na unidade de tempo. Ele reflete a

eficiência do conjunto motor-bomba misturada com a eficiência do sistema hidráulico a jusante da bomba. Esse parâmetro também é apresentado na Tabela 18.

.Tabela 18 – Resultados experimento 01 – Sistema com variação de demanda sem controlador.

	CMB-Principal (A)	CMB-Principal+ CMB-Secundário (B)
Energia (kWh)	2,21	3,06
Pressão Média (mca)	27,33 (oscilante ⁴)	31,27 (oscilante ²)
Volume Total Bombeada (m³)	1,77	2,36
CE (kWh/m³)	1,25	1,29

O experimento na sua situação 1 não atende as condições de pressão e consequentemente vazão requerida pelo sistema. Portanto usou-se apenas a situação 2 como parâmetro de referência para comparar com o sistema proposto, uma vez que essa situação atende às condições de pressão e vazão do sistema de bombeamento.

6.2. EXPERIMENTO 02 – Sistema com Variação de Demanda Atuação do Controlador Fuzzy.

No experimento 02 o sistema foi submetido à mesma variação de demanda do experimento 01, oriunda da abertura e fechamento da válvula que emula os usuários da rede (Figura 24). Porém, nesse experimento, os conjuntos motor-bomba sofreram a ação dos Controladores Fuzzy proposto, submetendo-o a um rígido controle de pressão, com o objetivo de fornecer à rede de abastecimento apenas a pressão desejada (25 mca).

Então, pela da variação de velocidade de rotação dos conjuntos motor-bomba e do acionamento e desativação do CMB-Secundário pretende-se manter a pressão constante, sem comprometer a demanda de vazão e com menor consumo de energia.

Na Figura 53 apresentam-se os resultados referentes à pressão, vazão e à condição de acionamento de cada motor. A pressão do sistema esteve praticamente constante em 25

⁴ O termo oscilante refere-se ao fato da média ter valores máximos e mínimos muito distantes.

mca até o instante de 304s. A partir desse instante o CMB-Secundário foi acionado e passou a atuar no sistema. A sua atuação, por ser um elemento a mais no sistema, provocou pequenos distúrbios na rede. Além disso, o funcionamento dos dois conjuntos motor-bomba, permitiu a possibilidade do controlador Fuzzy buscar entre as várias combinações de velocidade de rotação dos motores, a que melhor atenda o funcionamento eficiente do sistema, do ponto de vista de eficiência energética. Essa condição faz com que o controlador teste as possibilidades na busca da melhor opção, ocasionando uma leve oscilação na pressão.

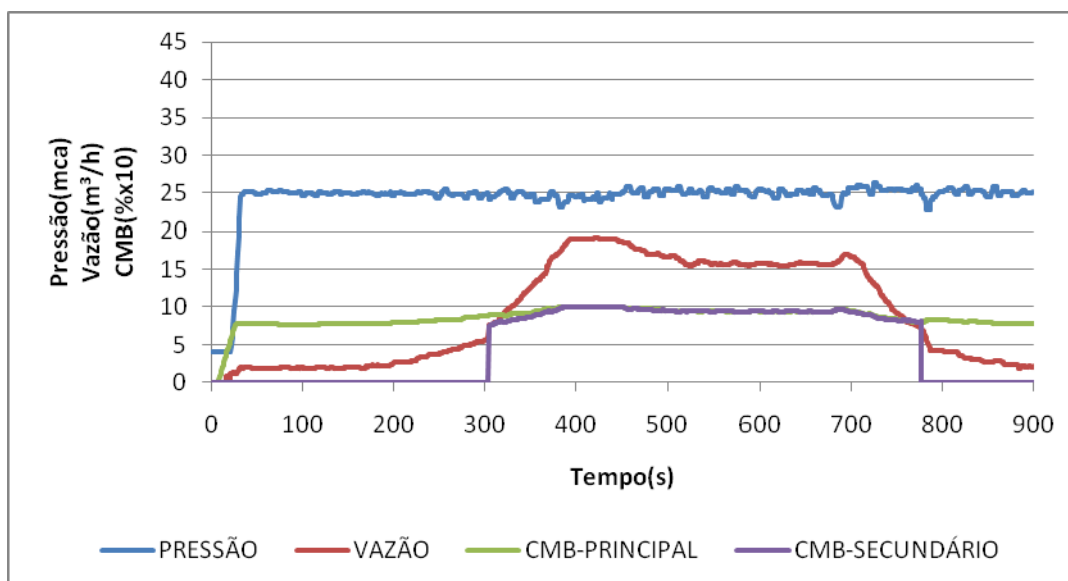


Figura 53 – Pressão, vazão e acionamento de motores do experimento 02.

Por se tratar de um sistema com injeção direta na rede o CMB-Principal funcionou durante todo período do experimento, oscilando sua velocidade de rotação entre 64% nos momentos de menor consumo e 100% nos momentos de pico. O CMB-Secundário foi acionado no instante $t=304s$ e desacionado no instante $t=777s$, também conforme decisão do controlador Fuzzy, com variação de velocidade de rotação entre 75% e 100% da sua velocidade de rotação nominal.

A vazão do sistema foi atendida conforme variação apresentada na Figura 53 e é alterada conforme demanda do sistema, emulando o consumo dos usuários pela variação de abertura da válvula.

Dessa forma, as condições de pressão e vazão do sistema foram atendidas, fazendo-a ainda com a pressão controlada, que é o objetivo principal do controlador.

Na Figura 54 apresenta-se o consumo energético de cada motor durante o experimento. O CMB-Principal funcionou durante todo o processo tendo um consumo energético variando entre 0,9 kW e 2,80 kW, devido às mudanças de velocidade de rotação do motor imposta pelo controlador Fuzzy. O CMB Secundário funcionou apenas nos períodos de maior consumo que foram entre os instantes $t=304s$ e $t=777s$. Nesse período o consumo energético do motor oscilou entre 0,81 kW e 3,01 kW, também em função da variação de velocidade de rotação do motor imposta pelo controlador.

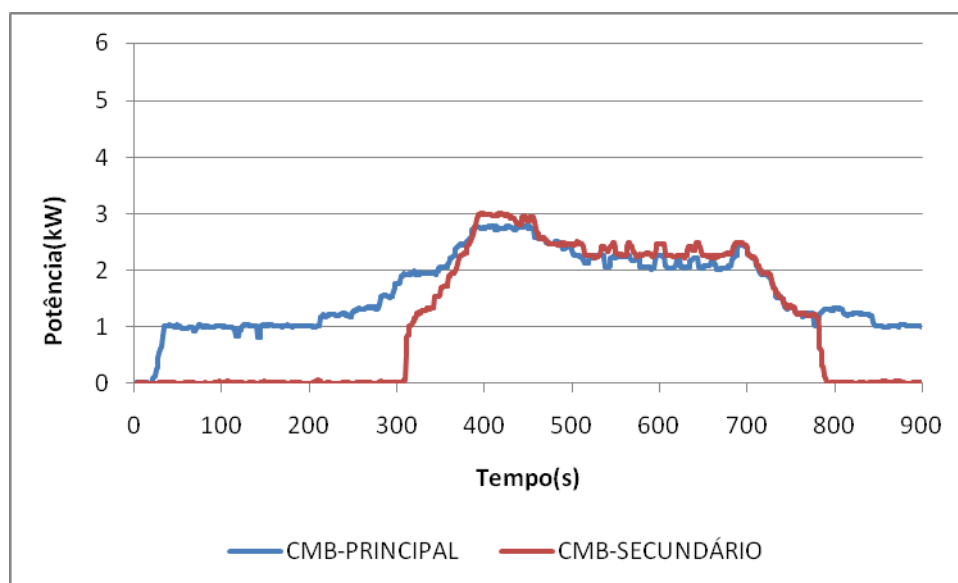


Figura 54 - Avaliação energética experimento 02.

Na Tabela 19 mostram-se os resultados obtidos com a aplicação do controlador e um comparativo com o sistema convencional sem a atuação do controlador Fuzzy (experimento 01). Houve uma redução no consumo energético de 17,32% além de manter a pressão constante durante todo o experimento, com uma média geral da pressão no sistema de 24,32 mca (Figura 53). Considerando as pressões após o instante $t=35s$, momento em que a pressão é estabilizada, uma vez que o sistema partiu do repouso, essa média melhora para 24,95 mca.

Outro parâmetro importante a ser avaliado é o volume bombeado. Para o sistema com o controlador Fuzzy obteve-se um volume de 2,31 m³ de água bombeada, valor que

representou uma redução de apenas 2,11% com relação ao sistema convencional. Ou seja, o sistema operado com o controlador Fuzzy, atendeu a demanda de vazão da rede de abastecimento (com uma redução mínima), mantendo a pressão controlada e com um consumo energético menor.

O indicador de Consumo Específico de Energia Elétrica (CE) teve uma redução de 1,29 para 1,09 (15,50%), refletindo a melhora na qualidade do ponto de vista da eficiência energética.

Tabela 19 - Resultados experimento 02 – Sistema com variação de demanda atuação do controlador Fuzzy

	Experimento 02 Controlador Fuzzy	Experimento 01 Sistema Convencional	% Redução
Energia (kWh)	2,53	3,06	17,32%
Pressão Média	24,32 (constante ⁵) 24,95 (constante)	31,27 (oscilante) 32,09 (oscilante)	-
Volume Total Bombeada (m³)	2,31	2,36	2,11%
CE (kWh/m³)	1,09	1,29	15,50%

6.3. EXPERIMENTO 03 – Características de desempenho do sistema submetido a um distúrbio sob a ação do controlador Fuzzy.

O experimento 03 teve como objetivo testar a “robustez” do controlador e obter os índices de desempenho do controlador. Nessa emulação verificou-se o tempo de assentamento, sobre-sinal e erro de regime permanente.

Para isso foram introduzidos distúrbios na rede de abastecimento através de registros manuais, os quais foram fechados ou abertos bruscamente, ocasionando um aumento e redução instantânea da pressão. Portanto, o sistema partiu do repouso a fim de alcançar a pressão considerada ótima de operação de 25 mca e após a estabilização submeteu-se o mesmo a perturbações.

Na Figura 55 apresenta-se as curvas de resposta do sistema durante esse experimento. A região (1) mostra o sistema saindo do repouso até atingir a pressão ótima

⁵ O termo constante refere-se ao fato da média possuir valores máximos e mínimos próximos.

de 25 mca, no instante $t=28s$ (tempo de assentamento), permanecendo estável até então. Para atingir tal objetivo o controlador iniciou utilizando apenas o CMB-Principal e a partir do instante $t=18s$ o CMB-Secundário também passou a atuar, colaborando para o sistema permanecer com a pressão constante.

Nessa ação, o sobre-sinal da variável de controle foi de 3,62% (0,907 mca) e o erro de regime permanente foi de 2,27% (0,569 mca). Para esse distúrbio o sistema mostrou-se extremamente robusto, com respostas bastante precisas.

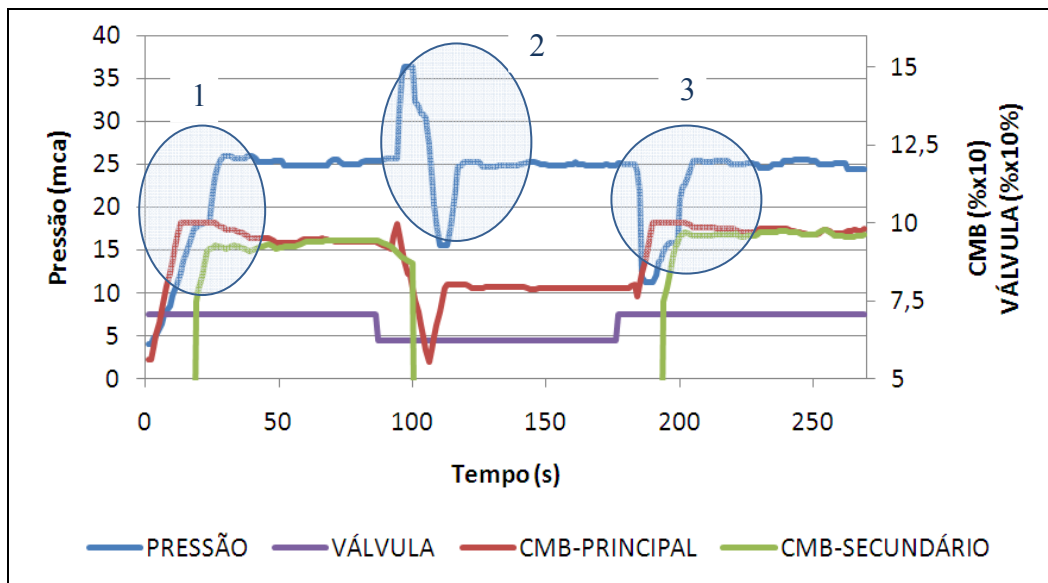


Figura 55 - Pressão e rotação dos motores - Experimento 03.

O segundo distúrbio (2) mostra o sistema na condição de estabilidade sendo aplicada uma entrada degrau (11 mca) na variável de controle pressão, no instante $t=87s$, através do fechamento rápido da válvula. Na Figura 56 mostra-se o tempo ocorrido desse distúrbio ampliado e na Tabela 20 apresenta-se a seqüência de ação dos Controladores Fuzzy e os respectivos intervalos de tempo para tal ação de controle.

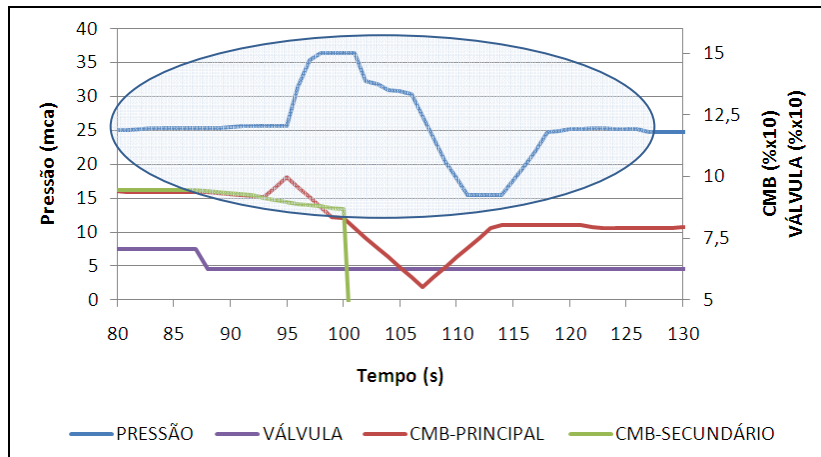


Figura 56 - Pressão e rotação dos motores - Experimento 02 (Figura 55) - AMPLIADO DO INSTANTE T=85s AO INSTANTE T=120s.

Tabela 20 - Sequência de ação de resposta do controlador Fuzzy para distúrbio (2)

Ação Nº	Instante (s)	Tempo de Reação (s)	Descrição da Ação
1	87	-	Ação de fechamento da válvula para entrada degrau na variável de entrada pressão (11 mca).
2	95	8	Repercussão do aumento na pressão no sistema.
3	96	1	Ação do controlador em reduzir a rotação do CMB-Principal e CMB-Secundário.
4	100	4	Ação do controlador em desligar o CMB-Secundário.
5	101	1(5)	Repercussão da diminuição na pressão no sistema.
6	107	6 (11)	Pressão do sistema fica inferior ao valor ótimo 25 mca.
7	107	0	Ação do controlador em aumentar a rotação do CMB-Principal.
8	114	7	Repercussão do aumento na pressão do sistema.
9	118	4	Estabilização da pressão

(tempo de reação referente a ação 3)

Apesar do erro de regime permanente permanecer satisfatório, 1,06% (0,266 mca), o controlador apresentou alguns valores altos para seus parâmetros de controle: tempo de assentamento 29s, sobressinal 9,47 mca. Porém, conforme avaliado na Tabela 20, percebe-se que grande parte da lentidão no sistema se dá pela não-linearidade e atraso do sistema hidráulico em responder as ações do controlador (faixas hachuradas - Tabela 20). É evidente que esse tipo de comportamento é inerente aos sistemas hidráulicos e que dificilmente alguma ação poderá mudar tal característica. Cabe ao controlador se adequar ao processo e gerenciá-lo da forma mais eficiente. As ações do controlador proposto foram sempre rápidas e coerentes com a necessidade do sistema (ações nº 3, 4 e 7 – Tabela 16), mostrando que por se tratar de um teste extremo os resultados se mostram aceitáveis.

O terceiro distúrbio (3) mostra o sistema também na condição de estabilidade sendo aplicada uma entrada degrau (-13 mca) na variável de controle de pressão, no instante $t=183s$ (Figura 55), através da abertura rápida da válvula (procedimento inverso ao distúrbio 2). O controlador respondeu com o aumento da rotação do CMB-Principal e o acionamento do CMB-Secundário no instante $t=193s$, estabilizando a pressão em seguida no instante 205s (tempo de assentamento de 22s).

Nessa ação o sobre-sinal da variável de controle foi de 1,78% (0,445 mca) e o erro de regime permanente foi de 2,32% (0,580 mca). Para esse distúrbio o sistema também se mostrou eficiente extremamente robusto, com respostas bastante precisas.

Na Tabela 21 apresenta-se um resumo dos índices de desempenho do controlador, obtidos com os distúrbios a que o controlador foi submetido nesse experimento.

Tabela 21 - Resumo dos parâmetros de controle

	Distúrbio (1)	Distúrbio (2)	Distúrbio (3)
Tempo de assentamento (s)	28	29	22
Sobre-sinal (mca)	0,907	9,47	0,445
Erro de regime permanente (%)	2,27	1,06	2,32

6.4. EXPERIMENTO 04 – Busca dos Menores Consumos.

No experimento 04 realizaram-se manobras e medições para confirmar a característica do controlador em atingir seu objetivo principal: controlar a pressão de forma eficiente, com o menor consumo de energia.

Então, com o sistema em funcionamento, após a pressão estabilizada, adicionou-se uma entrada degrau a fim de desestabilizá-lo. Após a atuação do controlador, para fazer o sistema retornar ao valor da pressão desejada, comparou-se o consumo energético dos primeiros instantes em que a pressão foi estabilizada, com o consumo energético posteriores, ou seja, após alguns instantes de atuação do controlador Fuzzy.

Na Figura 57 apresenta-se o comportamento da pressão e do consumo energético ao longo da realização do experimento 03. Esse experimento não avaliará as ações do

controlador, pois os mesmos já foram analisados nas simulações anteriores. Pretende-se acompanhar o comportamento do consumo energético frente a suas ações.

Inicialmente o sistema partiu do repouso até atingir a estabilidade em 25 mca. Nesse instante a potência consumida pelo sistema foi inferior a 2 kW, por isso não está presente na figura, uma vez que, para uma melhor visualização após o ação do distúrbio, a escala de visualização adotada para a potência está entre 2 e 4 kW (Figura 57).

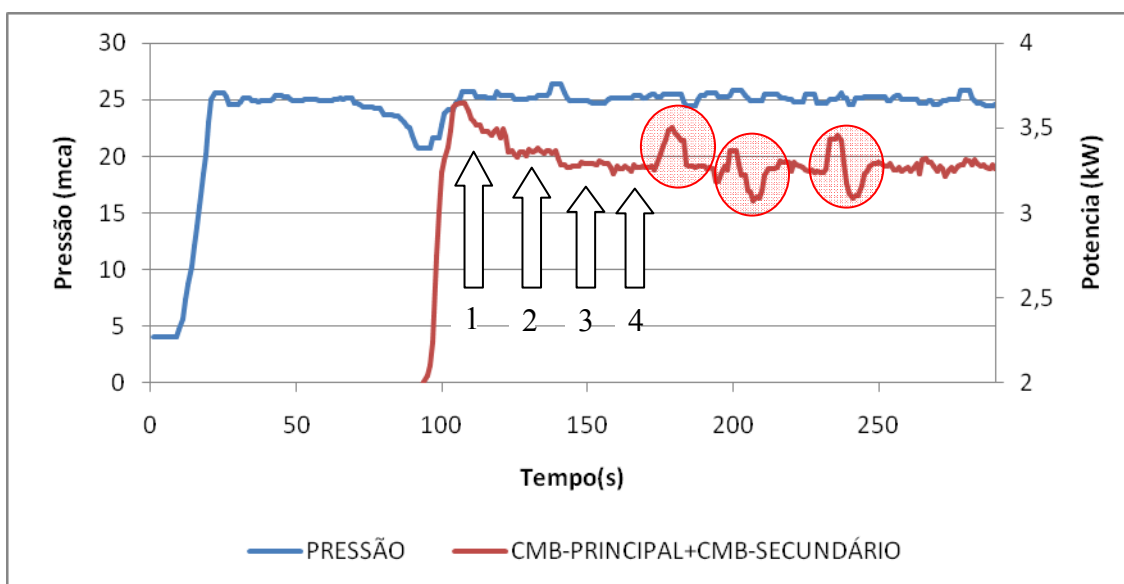


Figura 57 – Ajuste do controlador ao menor consumo energético – Experimento 03.

No instante $t=67s$, provocou-se um distúrbio no sistema por meio da abertura rápida da válvula, o controlador Fuzzy respondeu à ação estabilizando a pressão no instante $t=106s$, atendendo ao objetivo principal do controlador em manter o sistema com a pressão constante.

A partir daí o controlador inicia uma série de ações para reduzir o consumo energético sem, contudo, desviar a pressão do sistema, apenas alterando as várias possibilidades de combinação de rotação entre os conjuntos motor-bomba.

Assim, no setor 1 (Figura 57), que compreende ao instante $t=107s$ a $t=122s$, teve um consumo energético 59,78 kWh; com a ação do controlador o consumo reduziu para o setor 2, que compreende do instante $t=123s$ ao $t=139s$, com um consumo energético de

57,10 kWh. Posteriormente, alcançou o setor 3, dos instante =140s ao t=158s, com um consumo energético de 55,88 kWh até enfim alcançar a condição de menor consumo, no setor 4, com um consumo de 55,53 kWh. O consumo energético foi obtido através da potencia instantânea consumida pelo conjunto que é fornecida pelo conversor de frequência.

Após o setor 4 percebe-se três tentativas, sem sucesso, do controlador em mudar a configuração de combinação de rotação entre os motores para continuar reduzindo o consumo energético. Essas tentativas do controlador não chegam a desestabilizar a variável de controle do sistema (pressão), mas são suficientes para causar pequenas oscilações no seu valor, sendo portanto, esse um dos motivos do sistema ser mais preciso quando a atuação de apenas um conjunto motor-bomba (CMB-Principal) do que quando necessário a atuação dos dois conjuntos motor-bomba (CMB-Principal e CMB-Secundário), conforme já mencionado no experimento 02.

Na Tabela 22 mostra-se a redução do consumo energético devido à evolução das ações do controlador. Como já esperado as reduções vão ficando menores à medida que os setores vão evoluindo, uma vez que vão se esgotando as possibilidades de ajustes no sistema. Dessa forma obteve-se uma redução total de 7,11% em um intervalo de tempo total de 68s.

Tabela 22 - Resumo da redução do consumo energético - Experimento 04

	Intervalo de Tempo (s)	Consumo Energético (kWh)	Redução (%)	Redução Acumulada (%)
Setor 1	107s~122s = 16s	59,78	-	-
Setor 2	123s~139s = 17s	57,10	4,48	4,48
Setor 3	140s~158s = 19s	55,88	2,14	6,52
Setor 4	159s~175s = 16s	55,53	0,63	7,11
	Total = 68s			

6.5. EXPERIMENTO 05 – Sistema com Reservatório.

No experimento 05 foi criada uma possibilidade para o sistema de abastecimento com utilização de um reservatório elevado. A idéia é minimizar a variação de pressão na rede de abastecimento uma vez que o reservatório funcionaria como um equalizador das

pressões. Além disso, nesta situação toda a vazão demandada é bombeada de uma vez ao reservatório superior, que por sua vez abastecerá a rede por gravidade. Esse tipo de configuração de rede de abastecimento é o mais presente nas cidades brasileiras.

Essa condição de abastecimento dá ainda, a possibilidade dos motores funcionarem sempre na sua condição ideal de vazão e pressão, uma vez que não haverá variação de demanda para o sistema de bombeamento absorvida pelo reservatório. Os conjuntos motor-bomba despejarão suas vazões livremente no reservatório.

As vantagens e desvantagens dessa forma de abastecimento já foram comentadas na secção 4.3.5.

Dessa forma, para esse experimento adotou-se o mesmo ciclo utilizado nos experimento 01 e 02 (900 s) e bombeou-se o volume requerido nesse período de uma única vez, já que o mesmo pode ser armazenado no suposto reservatório e utilizado posteriormente.

O objetivo da realização desse experimento foi comparar o sistema de controle Fuzzy proposto (experimento 02) com mais uma forma de abastecimento e chegar a uma conclusão da melhor opção avaliando o consumo energético, atendimento a demanda de vazão, o controle de pressão e os custos de instalação.

Lembrando que conforme demonstrado na Tabela 18 a vazão requerida pelo sistema no ciclo do experimento é de 2,36 m³.

Na Figura 58 mostra-se o comportamento dos conjuntos motor-bomba CMB-Principal e CMB-Secundário durante o experimento. Os dois motores funcionaram sempre em sua velocidade de rotação nominal até serem desligados devido o volume bombeado ter alcançado o requerido para o ciclo de abastecimento (vazão requerida em 900s, que simula um dia de abastecimento da rede – já explicado na secção 5.1).

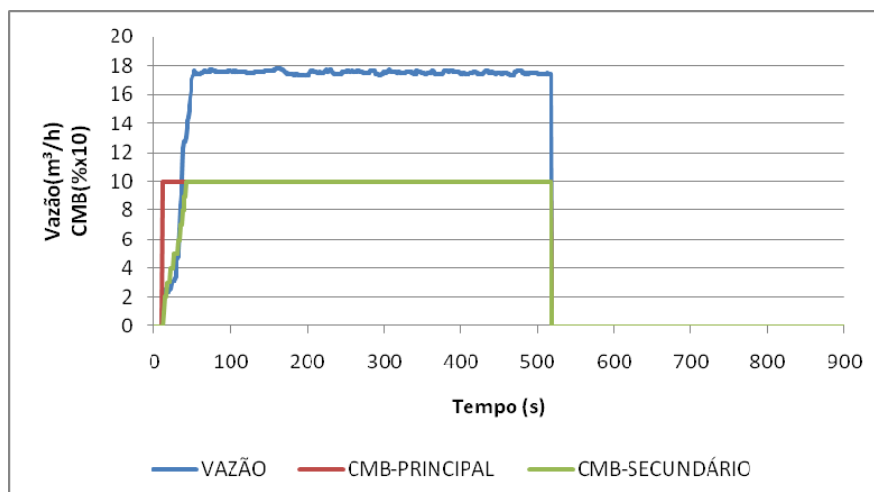


Figura 58 - Vazão e variação de rotação dos CMB's - Experimento 05.

Na Figura 58, também, mostra-se a vazão do sistema de bombeamento durante o ciclo do experimento. A vazão é sempre constante até o desligamento dos motores. Isso ocorre pois os conjuntos motor-bomba estão operando sempre na sua velocidade de rotação nominal e a descarga do sistema de bombeamento é livre, diretamente no reservatório elevado sem absorver variação da demanda dos usuários finais da rede.

Na Figura 59 mostra-se a potência instantânea dos motores elétricos que possuem um consumo constante até o instante $t=518s$, momento em que os motores são desligados. Nessa configuração, conforme se pode verificar, o sistema de bombeamento funciona apenas 57,44% do tempo (do instante inicial até $t=518s$).

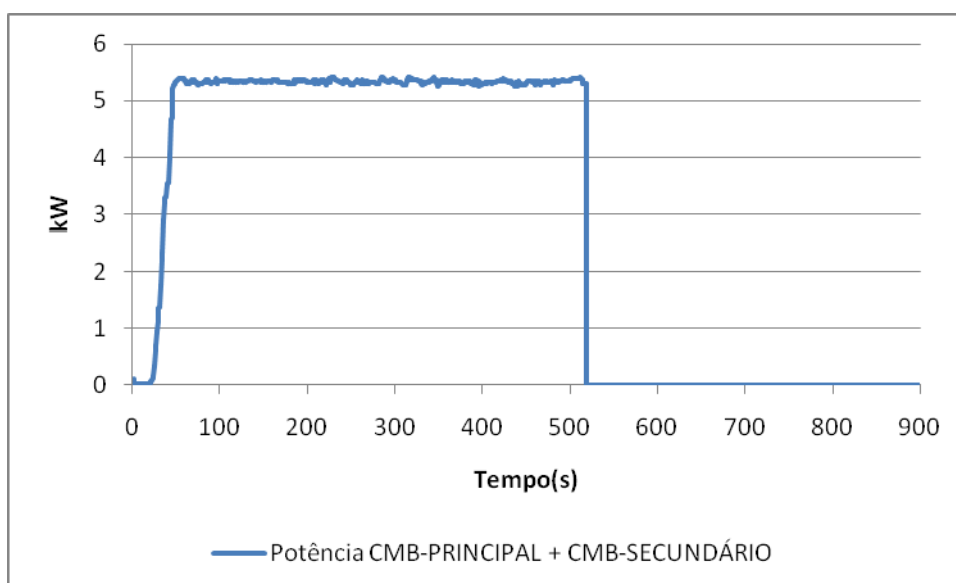


Figura 59 - Potência instantânea do conjuntos motor-bomba.

Na Tabela 23 apresentam-se os parâmetros do experimento 05 em comparação com os do experimento 02 (proposto com controlador Fuzzy).

Tabela 23 - Comparativo experimento 02 e 05

	Experimento 02 Controlador Fuzzy	Experimento 05 Sistema Reservatório	Redução (%)
Energia (kWh)	2,53	2,58	1,92
Pressão Média	24,32 (constante) 24,95 (constante)	Pouco Variável – nível reservatório	-
Vazão Total Bombeada (m³)	2,31	2,37	2,53
CE (kWh/m³)	1,09	1,09	-

Assim percebem-se os dados do experimento com controlador Fuzzy proposto muito próximo dos dados adquiridos na condição do experimento 05. Porém, o sistema com utilização de reservatório apresenta ainda uma séria de custos e despesas que a princípio são difíceis de mensurar. A necessidade de um local para a construção do reservatório superior, que não será fácil, pois com a valorização imobiliária das cidades os terrenos estão cada vez mais caros tornando esse custo bastante alto. O próprio custo de construção e manutenção do reservatório também se apresenta como bastante dispendioso, já que se trata de uma obra de porte considerável uma vez que deverá armazenar um volume de água (segundo o experimento 05) de um ciclo.

Essa configuração também apresenta suas vantagens já que dá a possibilidade do desligamento dos conjuntos motor-bomba nos períodos considerados de ponta pela concessionária elétrica (período em que tarifa de energia pode chegar a várias vezes o valor convencional) e cria uma reserva para a rede em caso de parada do bombeamento.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se um sistema de controle Fuzzy para o gerenciamento da pressão de uma rede de abastecimento de água. Esse processo foi realizado por meio de conversores de frequência que acionaram os conjuntos motor-bomba possibilitando a sua variação de velocidade de rotação.

Para isso foi concebida uma rede de abastecimento de água experimental e um sistema supervisor de controle utilizando o software LABVIEW.

O controle da pressão trouxe benefícios como: diminuição 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.

Em todos os experimentos o sistema de controle desenvolvido ajustou-se e manteve satisfatoriamente a pressão dentro do limite especificado.

O controlador Fuzzy se mostrou confiável, principalmente devido a forma abrangente com a qual modela seus sistemas, conseguindo atender às especificidades do sistema, bastando para isso uma boa base de regras e funções de pertinência desenvolvidas coerentemente.

Assim, a lógica Fuzzy se mostrou uma ferramenta eficaz no controle da pressão de sistemas hidráulicos por meio da variação de velocidade de rotação dos conjuntos motor-bomba, 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. Além disso, mostrou-se de implementação simples possibilitando, facilmente, a instalação em outros sistemas de distribuição de água sem a necessidade de modelagem do sistema a ser controlado e, ainda, com a possibilidade de incorporar os conhecimentos heurísticos dos operadores humanos.

Parte da eficiência do controlador Fuzzy deve ser creditada às potencialidades do conversor de frequência no acionamento dos conjuntos motor-bomba. Já é sabido que a sua utilização traz grandes benefícios para um sistema de abastecimento/bombeamento, porém só é coerente sua utilização em sistemas que requeiram grandes variações de demanda de vazão e em sistemas com injeção direta na rede.

O sistema de abastecimento por injeção direta na rede é uma prática já adotada em alguns países, confirmando a aplicação deste trabalho juntamente com o controlador Fuzzy e o conversor de frequência. Os experimentos confirmaram que os custos de bombeamento dessa modalidade de alimentação estão abaixo, mesmo do sistema com reservatórios, aliando-se, ainda, os benefícios de controle de pressão e não construção, manutenção e operação do reservatório elevado.

Dessa forma, o trabalho trouxe como contribuição maior o desenvolvimento de um controlador Fuzzy para manter a pressão de um sistema de abastecimento de água constante, que possui como variável de entrada e parâmetro de auxílio na tomada de decisão o consumo energético. Assim, esse importante dado que até então era utilizado como parâmetro de comparação entre os sistemas propostos e os convencionais/existentes agora atuou no gerenciamento das ações do controlador.

A seguir são destacadas as conclusões que foram reveladas pela utilização do controlador proposto:

- ❖ O sistema de controle manteve a pressão constante mesmo com perturbações bruscas sejam elas de aumento ou diminuição da vazão (experimento 02, 03 e 04).

- ❖ Para as situações impostas, o tempo de assentamento máximo foi de 29 segundos, o erro de regime permanente foi 2,32% e o sobresinal foi 9,47 mca (experimento 03).
- ❖ O consumo energético e o indicador hidráulico CE tiveram uma redução de 17,32% e 15,50%, respectivamente, se comparado com o sistema com injeção direta na rede sem o controle de pressão (experimento 02).
- ❖ A redução na vazão foi mínima 2,11%, comparando-se o sistema proposto com o sistema com injeção direta na rede sem o controle de pressão, confirmando a manutenção na qualidade do abastecimento (experimento 02).
- ❖ Dentro de uma mesma condição imposta pelo sistema, o controlador conseguiu manter a pressão constante, além de buscar uma condição de menor consumo 7,11% (experimento 04).
- ❖ O sistema com controlador Fuzzy obteve melhores resultados que um sistema com bombeamento indireto (com utilização de reservatório), 1,92% de redução do consumo de energia e ainda possibilita a economia na não necessidade da construção, manutenção e operação do reservatório.
- ❖ A utilização do consumo energético como variável de entrada se mostrou uma excelente ferramenta para aperfeiçoamento dos controladores.

Dessa forma, concluiu-se pelo êxito do desenvolvimento do controlador utilizando-se da teoria Fuzzy para o seu desenvolvimento, com vistas aos resultados relatados anteriormente. Além disso, a praticidade e confiabilidade da metodologia usada deve ser manifestada como avanço tecnológico por trazer também: redução no consumo de água, redução no consumo de energia, otimização das pressões, modernização dos sistemas de abastecimento, monitoramento da real condição do sistema, construção de um banco de dados com informações de operação de todas as variáveis do sistema facilitando a tomada de decisão por parte dos gestores.

7.2. RECOMENDAÇÕES

Em complemento aos estudos realizados nesse trabalho sugerem-se alguns estudos a serem realizados:

- ❖ Aplicar o conceito do consumo energético com fator para tomada de decisão em sistemas com vários ramais;
- ❖ Estudar além da economia energética, a economia de água e gastos operacionais, confrontando com o custo de implantação do sistema (tempo de retorno);
- ❖ Estudar a possibilidade do desenvolvimento de um sistema de controle com as mesmas características deste, porém utilizando outro tipo de controle, tais como, neuro-Fuzzy;
- ❖ Criar novos parâmetros de desempenho hidráulicos e energéticos para sistemas de abastecimento de água.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, J. A. B., 2003, *Aplicação de Conversor de Frequência para Economia de Energia Elétrica em Sistema de Irrigação por Aspersão*. Tese de D.Sc., Faculdade de Ciências Agrônomicas do Campus de Botucatu/UNESP, Botucatu, SP, Brasil.

BEZERRA, S. T. M., 2009, “*Sistema Fuzzy para o Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando a Economia de Água e Energia*”. Tese D.Sc., Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM/UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

BEZERRA, S. T. M., CAMBOIM, W. L. L., SILVA, S. A., 2008, “*Lógica Fuzzy aplicada ao controle de pressão em sistemas de bombeamento*”. In: RAMOS, H. M., COVAS, D. I. C, GONÇALVES, F. V., SOARES, A. K. (eds). *Alterações Climáticas e Gestão da Água e Energia em Sistemas de Abastecimento e Drenagem*. 1 ed., Lisboa, Portugal, João Pessoa, Brasil, IST - CEHIDRO.

BEZERRA S. T. M., SILVA, S. A., 2009, “*Automação e Controle*”. In: GOMES, H. P. *Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética*. 1 ed., João Pessoa, Brasil, Editora Universitária.

BORDON, M. E., 2004, *Controlador Nebuloso de Arquitetura Simplificada Estudo de Caso: Acionamento de Motor de Indução Trifásico*. Tese de D.Sc., Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

BRESSAN, G. M., KOENIGKAN, L. V., OLIVEIRA, V. A., “*Sistema de Classificação Fuzzy para o risco de infestação por plantas daninhas considerando a sua variabilidade espacial.*”. *Planta Daninha*, Viçosa-MG, v. 24, n. 2, p. 229-238, 2006.

CAMBOIM, W. L. M., 2008, *Aplicações de Técnicas de Controle Fuzzy para Sistemas de Abastecimento de Água*. Dissertação de M.Sc., PPGEM/UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

CARVALHO, J. A., MELLO, C. R., BRAGA JÚNIOR, R. A., 2000, “Utilização do conversor de frequência em sistemas de irrigação para controle de vazão”. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 4, n. 1, pp. 51-56.

CARVALHO, P. S. S., 2012, “*Controle para Bombeamento Distribuído com Vistas a Minimização dos Custos Energéticos Aplicados a Sistemas de Abastecimento de Água*”. Tese D.Sc., Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM/UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

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

DEWINTER, A. D., KEDROSKY, B. J., 1989, The application of a 3500-hp variable frequency drive for pipeline pump control. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 25, n. 6 (Nov), pp. 1019-1024.

FALLSIDE, F., PERRY, P. F., 1975, “*Hierarchical optimization of a water supply network*”. In: *Proc. IEE*, v. 122, n. 2 (Feb), pp. 202-208.

FRANCHI, C.M. 2009. “*Acionamento elétricos*”. 4ª Edição. Editora Erica, São Paulo, Brasil.

GOMES, H. P., CARVALHO, P. S. O., 2012. “*Manual de Sistema de Bombeamento – Eficiência Energética*”. 1ª Edição. Editora Universitária, UFPB, João Pessoa, Brasil.

GOMES, H. P., GARCIA, R. P., REY, P. L. I., 2007. “*Abastecimento de Água – Estado da Arte e Técnicas Avançadas*”. 1ª Edição. Editora Universitária, UFPB, João Pessoa, Brasil.

GOMES, H. P. 2009. “*Sistemas de Abastecimento de Água – Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatórias*”. 3ª Edição. Editora Universitária, UFPB, João Pessoa, Brasil.

GURGEL, B. B. F. A., TSUTYIA, M. T., 2006, “*Proposição de Uma Metodologia para Avaliação de Conversores de Frequência em Estações Elevatórias de Água. Estudo de Caso no Sistema de Abastecimento de Água de São José dos Compos*”. Dissertação de M.Sc., Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo. Brasil.

HENRIQUES, L. O. A. P., 1999. “*Compensação das Oscilações de Torque de um Acionamento de Relutância Chaveado Utilizando técnicas de Controle Neuro Fuzzy*”. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal da Paraíba, Rio de Janeiro, Brasil’

HENRIQUES, L. O. A. P., 2004. “*Implementação de estratégia de minimização e oscilações de torque e remoção de sensor de posição para um acionamento de relutância variável usando técnica neuro-fuzzy*.”. Tese D.Sc., Programa de Pós Graduação de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil’

JAMES, K., CAMPBELL, S. L., GODLOVE, C. E., 2002, *Água e Energia - Aproveitando as Oportunidades de Eficientização de Água e Energia não Exploradas nos Sistemas Municipais*. ALLIANCE - Aliança para Conservação de Energia. Washington, USA.

JANTZEN, J., 2007. “*Foundations of Fuzzy Control*”. 1ª Edição. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, England.

JENKINS, M.W., LUND, J. R., HOWITT, R. E., DRAPER, A. J., MSANGI, S. M., TANAKAS, S. K., RITZEMA, R. S., MARQUES, G. F., 2004. Optimization of California’s Water Supply System: Results and Insights. Journal of Water Resources Planning and Management. California. Estados Unidos.

JÚLIO, E. F. J., 2012. *Controlador Fuzzy Aplicado a um Sistema de Controle de Posição Acionado por Motores de Indução Trifásico*. Dissertação, Mc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.

KUTSCHER, M. M., PUREZA, J. R. L., 2008. "Controle Operacional do Sistema de Abastecimento de Água via Sistema Supervisório – Otimização de Processos com Vistas a Eficiência Energética". 38ª Assembléia Nacional da ASSEMAE, Salvador, Brasil.

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 do potencial matricial da água no solo visando à otimização de processos de irrigação*. Tese de D.Sc., PPGEM/UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

MACINTYRE, A. J., 1987. "Bombas e Instalações de Bombeamento". Editora Guanabara, Rio de Janeiro, Brasil.

MARTINS, N. S. M., 2004, "Mundos de Incerteza: A Lógica Fuzzy na Contemporaneidade". *Revista Mackenzie*, pp.135-140, São Paulo, SP, Brasil.

MATTOS, M. C., NASSAR, S. M., SOUZA, E. C., 1999. "O Raciocínio Fuzzy no Desenvolvimento de um Sistema de Controle da Assistência Respiratório em Neonatos". Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

MEDEIROS, A. V., SOUZA, F. E. C., MAITELLE, A. L., 1995. "Implementação de um sistema de extra conhecimento de redes neuro Fuzzy".

MENDONÇA, G. L. F., 2008. *Aplicação de Técnicas de Controle Fuzzy na absorção de Estruturas Aporticadas*. Tese D. Sc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.

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

PEARSON, D., FANTOZZI, M., SOARES, D., 2005, "Searching for N2: how does pressure reduction reduce burst frequency?". In: *Leakage 2005 – Conference Proceedings*.

PEDROSA FILHO, L. A., 2007. “*Um Modelo de operação de sistemas Adutores de Abastecimento de Água com Vistas a Minimização dos Custos Energéticos*”. Tese D.Sc., Programa Institucional de Doutorado Temático em Recursos Naturais, Campina Grande, PB, Brasil.

QUEIROZ, G. A. F., TOZZI, C. L., LANGONA, F 1998, “*Avaliação Morfológica e Morfométrica de Axônios Mielínicos Utilizando Classificador Fuzzy*”. UNICAMP/FEED/DCA, Campinas, Brasil.

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

RIEDER, R., MORO, F. T., PIEROZAN, C. 2005. “*Mercadão GL-Um jogo STI-Fuzzy para o Ensino da Matemática Fundamental*”. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. Erechim, Brasil.

RODRIGUES, W., LUVIZOTTO JUNIOR, E., 2003, “*Conversor de Frequência em Sistemas de Bombeamento*”. In: 7ª Exposição de Experiências Municipais em Saneamento, 2003, Santo André/SP. Anais da 33ª Assembléia Nacional da ASSEMAE. Jaboticabal/SP: ASSEMAE.

RODRIGUES, W., 2007, “*Critérios para o Uso Eficiente de Conversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água*”. Tese D.Sc., Programa de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

ROMÃO, W., NIEDERAUER, C. A. P, MARTINS, A., 1999. “*Algoritmos Genéticos e Conjuntos Difuso Aplicado ao Controle do Processo Térmico*”. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal da Paraíba de Santa Catarina.

RONCERO, V. G., ALBUQUERQUE, M. P., 2000. “*LabVIEW*”. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF. Rio de Janeiro. RJ.

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

SILVA, S. A., 2009, “*Acionamentos de Motores Elétrico*”. In: GOMES, H. P. *Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética*. 1 ed., João Pessoa, Brasil, Editora Universitária.

SILVA, V. L., LOPES, P. A. L., 2004. “*Modelo Integral Fuzzy para Avaliação da Satisfação do Usuário dos Serviço de Transporte Regular de Passageiros de Empresas de Linhas Aéreas*”. Instituto Militar de Engenharia.

SILVEIRA, A. M., FURTADO, A. B., OLIVEIRA, L. C. L., 2005. “*Identificação de Abordagens Administrativas: um ensaio com lógica Fuzzy*”. Universidade Federal do Pará. Departamento de Informática., Brasil.

SIMÕES, M. G., SHAW, I. S., (2007), *Controle e Modelagem Fuzzy*, ed. 1, São Paulo-SP, Editora Edgard Blücher Ltda.

SIMÕES, M. G., SHAW, I. A., (2009), *Controle e Modelagem Fuzzy*, ed. 2, São Paulo-SP, Editora Blücher Ltda.

SOUZA, V. A., 2006. “*Artigo sobre o LabVIEW*”. Cerne-Tec Tecnologia. São Paulo. SP.

SOUZA, D. A., ARAGAO FILHO, W. C. P., SOUSA, G. C. D., 2007, “*Adaptive Fuzzy Controller for Efficiency Optimization of Induction Motors*”. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 54, n. 4, pp. 2157-2164, Ago.

SUETAKE, M. ; SILVA, I. N. ; GOEDTEL, A. *Controle Escalar Fuzzy V/f Embarcado em DSP para o Controle Velocidade de Motores de Indução Trifásicos*. In: XVII Congresso Brasileiro de Automática, 2008, Juiz de Fora. Anais do XVII Congresso Brasileiro de Automática (CD-ROM // Paper No. 41265 // 06 Páginas), 2008.

TROJAM, F., 2005. “*Automação em sistemas urbanos de abastecimento de água: uma ferramenta para redução de perdas de produção*”. I Encontro Estadual de Engenharia da Produção e I Simpósio de Gestão Industrial, Ponta Grossa, Brasil.

TROJAM, F., MARÇAL, R. F. M., 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., 2004, *Abastecimento de Água*. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil.

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

TSUTIYA, M. T., 2007. “Uso de Conversores de Frequência para Diminuição do Consumo de Energia em Bombeamentos”. In: GOMES, H.P., GARCIA, R. P., REY, P. L. I. (eds), *Abastecimento de Água - O Estado da Arte e Técnicas Avançadas*, 1 ed., capítulo 6, João Pessoa, PB, Brasil, Editora Universitária da UFPB.

VANDERLEI FILHO, D., FERREIRA, T. A. E., LUDERMIR, T. B., 2002, “Um Modelo de Previsão Baseado em Inteligência Artificial na Gestão de Bibliotecas Universitárias”. In: *Anais do XII Seminário Nacional de Bibliotecas Universitárias da América Latina e do Caribe / II Simpósio de Diretores de Bibliotecas Universitárias da América Latina e Caribe*, Recife, PE, Brasil.

VARGENS, J. M., TANSCHKEIT, R., VELLASCO, M. M. B. R. 2003. “Previsão de Produção Agrícola Baseada em Regras Linguísticas e Lógica Fuzzy”. *Revista Controle e Automação*. Volume 14. Numero 2.

VITKOVSKY, J. P., SIMPSON, A. R., LAMBERTET, M. F., 2000, “Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 126, n, 4, pp. 262-265.