



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

Sistema Fuzzy para Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando à Economia de Água e Energia

por

Saulo de Tarso Marques Bezerra

Tese de doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Doutor

Saulo de Tarso Marques Bezerra

**Sistema Fuzzy para Controle Piezométrico de
Sistemas de Distribuição de Água Visando à
Economia de Água e Energia**

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.

Orientadores: Professor Dr. Simplício Arnaud da Silva
Professor Dr. Heber Pimentel Gomes

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais João M. Bezerra e Maria Lina
Neta, minha irmã Sanmara M. Bezerra,
minha esposa Raquel A. L. Gomes e, em
especial, a minha filha JOANA L. MARQUES.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e pelas oportunidades colocadas em minha vida, permitindo meu êxito profissional.

Ao prof. Heber P. Gomes um agradecimento especial pela orientação neste trabalho; pelos ensinamentos, que foram essenciais na minha formação científica; e, principalmente, pela amizade nos últimos 10 anos.

Ao Prof. Simplício A. da Silva por acreditar em mim; orientando-me no desenvolvimento desta pesquisa com sabedoria, amizade, atenção e paciência.

A minha irmã Sanmara M. Bezerra e meu cunhado Aldemir Thomaz B. Garcia pelo apoio incondicional, me incentivando a seguir em frente e fornecendo todo o sustentáculo.

A minha esposa Raquel de A. L. Gomes pelo apoio, carinho e compreensão em todos os momentos.

Aos membros da banca examinadora - Eduardo R. Duarte, Carlos O. Galvão, Francisco Marconi C. Lima e Luiz Simão A. Filho - pelas sugestões para aperfeiçoamento do trabalho.

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

Aos meus amigos e colegas da UFPB - Paulo S. O. Carvalho, Wil L. L. Camboim, Magno J. G. Silva, Moisés M. Salvino, João S. O. P. Silva, Leonardo L. B. Montenegro, Roberta M. M. Gouveia, Wibys P. S. Oliveira - pelo auxílio e incentivo.

Ao Governo do Brasil, pelo apoio financeiro concedido através das Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS), da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq).

À UFPB e a UFCG, instituições que, através de seus docentes e funcionários, foram responsáveis pela minha formação acadêmica.

A todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho.

***“Man's mind stretched to a new idea never goes back to its
original dimensions”***

Oliver W. Holmes Jr. (juiz da Suprema Corte dos Estados Unidos)

SISTEMA FUZZY PARA CONTROLE PIEZOMÉTRICO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA VISANDO À ECONOMIA DE ÁGUA E ENERGIA

RESUMO

Apresenta-se, neste trabalho, um sistema fuzzy, que foi desenvolvido no ambiente Labview™, para o controle piezométrico de sistemas de distribuição de água por meio do uso simultâneo de válvulas de controle e conversores de frequência acoplados a conjuntos motor-bomba, visando à economia de água e energia elétrica. O conversor de frequência mantém a altura manométrica do sistema de bombeamento em um valor ótimo (mínimo possível), enquanto as válvulas de controle têm a função de eliminar o excesso de pressão em diversos pontos do sistema. O sistema de controle é formado por dois controladores fuzzy acoplados. Os controladores atuam na determinação da velocidade de rotação do motor e no ângulo de abertura da válvula de controle. Foram realizados cinco experimentos diferentes, que comprovaram a eficiência do sistema de controle e a influência deste na redução do consumo de energia elétrica e água. O sistema é 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. Pode-se concluir que o desempenho do sistema fuzzy se mostrou satisfatório, podendo ser implementado facilmente em outros sistemas de distribuição de água similares, a fim de proporcionar redução do consumo de água e energia elétrica, diminuição nos custos de manutenção e aumento do grau de confiabilidade dos procedimentos.

Palavras chaves - engenharia mecânica, sistema fuzzy, eficiência energética, eficiência hidráulica.

FUZZY SYSTEM APPLIED TO CONTROL PIEZOMETRIC OF WATER DISTRIBUTION SYSTEM IN ORDER INCREASE POWER AND HYDRAULICS EFFICIENCY

ABSTRACT

In this work is presented a fuzzy control system developed on a Labview™ platform to control piezometric of a water distribution system, by using control valves and variable frequency drive, simultaneously. The proposed system aims losses reduction of water and electrical power. The variable frequency drive tracks minimum head of the pumping system, while the control valves release the pressure by removing water excess in several points of the water distribution system. The control system consists of two coupled fuzzy controllers defining the motor rotation speed and the control valves opening angle. Five different experiments were carried out to demonstrate the control system efficiency, by considering the achieved water and power electrical losses reduction, and robustness. Moreover, it is able to track any reference pressure value, if it is time variant, and there is no limit for the number of monitored pressure points. The proposed system has been shown satisfactory to control piezometric of a water distribution system. Besides, it can be easily applied to similar water distribution systems in order to reduce the consumption of water and electricity, reducing the costs of maintenance and increase the degree of reliability of the procedures.

Keywords - mechanical engineering, fuzzy control system, power efficiency, hydraulics efficiency.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS	x
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivos Específicos	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	6
2.2 CONVERSORES DE FREQUÊNCIA	14
2.3 VÁLVULAS DE CONTROLE AUTOMÁTICAS.....	19
2.4 SISTEMAS FUZZY	20
3. CONTROLE DE PRESSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	27
3.1 INTRODUÇÃO.....	27
3.2 SETORIZAÇÃO	30
3.4 CMB OPERANDO COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO VARIÁVEL	35
3.5 CONVERSORES DE FREQUÊNCIA	42
4. SISTEMAS DE CONTROLE	54
4.1 INTRODUÇÃO.....	54
4.2 CONTROLE AUTOMÁTICO	55

4.3 SISTEMAS DE CONTROLE.....	56
4.4 SISTEMAS FUZZY	60
4.4.1 Fuzzificação	64
4.4.2 Defuzzificação	66
4.4.3 Controlador Fuzzy Paramétrico	68
4.4.4 Inferência Fuzzy	70
5. MATERIAIS E MÉTODOS	72
5.1 SISTEMA EXPERIMENTAL.....	72
5.2 MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE.....	78
5.3 MODELAGEM DO CONTROLADOR FUZZY DO CF	82
5.3.1 Variável Lingüística de Entrada PM.....	82
5.3.2 Variável Lingüística de Entrada FR	86
5.3.3 Variável Lingüística de Saída DF	87
5.3.4 Sistema de Inferência Fuzzy do Controlador do CF.....	89
5.3.5 Resultado das Simulações do Controlador do CF	91
5.4 MODELAGEM DO CONTROLADOR FUZZY DA CVc.....	92
5.4.1 Variável Lingüística de Entrada DP	92
5.4.2 Variável Lingüística de Entrada AV.....	94
5.4.3 Variável Lingüística de Saída DA	98
5.4.4 Sistema de Inferência Fuzzy do Controlador da CVc	99
5.4.5 Resultado das Simulações do Controlador da CVc	102
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	104
6.1 EXPERIMENTO 1	105
6.2 EXPERIMENTO 2	108
6.3 EXPERIMENTO 3	110
6.3.1 Avaliação do Consumo de Água	112
6.3.2 Avaliação do Consumo de Energia Elétrica	112
6.4 EXPERIMENTO 4.....	114
6.5 EXPERIMENTO 5	116
6.5.1 Avaliação do Consumo de Água	119

7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	120
	7.1 CONCLUSÕES.....	120
	7.2 RECOMENDAÇÕES	121
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Relação da variação da vazão perdida em função da pressão.....	29
Figura 3.2 - Exemplo de um sistema de distribuição de água setorizado.....	31
Figura 3.3 - Representação de operação de uma VRP com pressão de saída fixa	33
Figura 3.4 - Representação de operação de uma VRP com pressão de saída proporcional	33
Figura 3.5 - Representação de operação de uma VRP com pressão de saída modulada por tempo com duas atribuições (4 horas e 22 horas), ciclo diário.....	33
Figura 3.6 - Representação de operação de uma VRP com pressão de saída modulada pela vazão com três atribuições (vazão menor que 50% da máxima, vazão entre 50% e 80% da máxima, vazão acima de 80% da máxima), ciclo diário	34
Figura 3.7 - Esquema de funcionamento de uma VRP com modulação por vazão	34
Figura 3.8 - Curvas característica de uma bomba centrífuga	36
Figura 3.9 - Representação típica de um sistema de bombeamento de água.....	37
Figura 3.10 - Perfil de consumo do setor de Itaim Paulista, predominantemente residencial...	38
Figura 3.11 - Curvas características com controle de vazão e pressão através de válvulas	39
Figura 3.12 - Esquema do <i>by-pass</i> para controle de vazão	39
Figura 3.13 - Curvas características com controle de vazão e pressão através de <i>by-pass</i> .	39
Figura 3.14 - Comparativo do consumo de energia para os métodos de controle de pressão/vazão: <i>by-pass</i> , válvula de manobra e conversor de frequência.....	40
Figura 3.15 - Exemplo do comportamento das curvas características para um sistema com predominância de perda de carga na altura manométrica.....	41
Figura 3.16 - Exemplo do comportamento das curvas características para um sistema com predominância do desnível geométrico na altura manométrica	42
Figura 3.17 - Estator de uma máquina de indução	44
Figura 3.18 - Componentes do motor de indução com rotor tipo gaiola de esquilo	44
Figura 3.19 - Características eletromecânicas de um motor de indução típico	45
Figura 3.20 - Curvas características típicas de motores de indução trifásicos	46
Figura 3.21 - Circuito esquemático de um conversor de frequência.....	46

Figura 3.22 - Esquema de chaveamento do conversor de frequência	47
Figura 3.23 - Padrão de chaveamento da tensão e a corrente resultante numa fase do motor alimentado com conversor de frequência	48
Figura 3.24- Curva representativa da variação da tensão em função da frequência	48
Figura 3.25 - Curva característica conjugado versus frequência de alimentação	49
Figura 3.26 - Curva característica da potência em função da frequência	49
Figura 3.27 - Curva de conjugado com tensão proporcional e frequência	50
Figura 3.28 - Região de operação recomendada para o conversor de frequência	51
Figura 4.1 - Exemplo de um sistema SCADA de um sistema de distribuição de água.....	55
Figura 4.2 - Representação de um sistema ou processo a ser controlado.....	56
Figura 4.3 - Representação de um sistema de controle em malha aberta.....	56
Figura 4.4 - Diagrama de blocos conceitual de um sistema de controle em malha fechada..	57
Figura 4.5 - Diagrama de blocos funcional de um sistema de controle em malha fechada ...	58
Figura 4.6 - Conjunto idade: (a) abordagem booleana (<i>crisp</i>) e (b) abordagem fuzzy	62
Figura 4.7 - Esquema de um controlador fuzzy	64
Figura 4.8 - Funções de pertinência.....	66
Figura 4.9 - Exemplo de defuzzificação através do método C-o-A	67
Figura 4.10 - Exemplo de aproximação local através de um modelo fuzzy paramétrico....	69
Figura 4.11 - Exemplo de cálculo da saída discreta (<i>crisp</i>) de um controlador fuzzy	71
Figura 5.1 - Bancada experimental de distribuição de água.....	73
Figura 5.2 - Diagrama de blocos da bancada de teste	74
Figura 5.3 - Conjunto motor-bomba.....	75
Figura 5.4 - Curvas características da bomba centrífuga.....	75
Figura 5.5 - Conversor de frequência	76
Figura 5.6 - Válvula de controle.....	76
Figura 5.7 - Transdutor de pressão	77
Figura 5.8 - Módulo de aquisição de dados.....	78
Figura 5.9 - Analisador de energia elétrica	78
Figura 5.10 - Imagem do sistema de controle (supervisório).....	79
Figura 5.11 - Entradas e saídas do sistema supervisório desenvolvido.....	79
Figura 5.12 - Código fonte (programação) do sistema de controle desenvolvido.....	80
Figura 5.13 - Variáveis lingüísticas de entrada e saída do controlador fuzzy do CF	82

Figura 5.14 - Funções de pertinência da variável lingüística PM.	83
Figura 5.15 - Cálculo da variável de saída do controlador para PM = 17 e FR = 4.....	84
Figura 5.16 - Cálculo da variável de saída do controlador para PM = 19 e FR = 4.....	85
Figura 5.17 - Cálculo da variável de saída do controlador para PM = 17 e FR = 4,5.....	85
Figura 5.18 - Cálculo da variável de saída do controlador para PM = 19 e FR = 4,5.....	85
Figura 5.19 - Valores da freqüência da tensão de alimentação em função do sinal de controle	86
Figura 5.20 - Funções de pertinência da variável lingüística FR	87
Figura 5.21 - Funções de pertinência da variável lingüística DF	88
Figura 5.22 - Gráfico da variável DF <i>versus</i> PM	91
Figura 5.23 - Gráfico da variável DF <i>versus</i> FR	92
Figura 5.24 - Variáveis lingüísticas de entrada e saída do controlador fuzzy da CVc.....	92
Figura 5.25 - Funções de pertinência da variável lingüística DP	94
Figura 5.26 - Ângulo de abertura <i>versus</i> o sinal de controle da válvula de controle	94
Figura 5.27 - Variação do ângulo de abertura da válvula <i>versus</i> a pressão.....	95
Figura 5.28 - Funções de pertinência da variável lingüística AV	96
Figura 5.29 - Gráfico da variável DA <i>versus</i> DP para (a) AV = 19,1° e (b) AV = 19,09°	97
Figura 5.30 - Gráfico da variável DA <i>versus</i> DP para (a) AV = 57,9° e (b) AV = 57,91°	97
Figura 5.31 - Funções de pertinência da variável lingüística DA	99
Figura 5.32 - Código fonte (programação) de abertura da válvula CVc.....	101
Figura 5.33 - Gráfico da variável DA <i>versus</i> DP	102
Figura 5.34 - Gráfico da variável DA <i>versus</i> AV	103
Figura 6.1 - Curvas de pressões resultantes do Experimento 1	105
Figura 6.2 - Resposta do controlador fuzzy ao fechamento brusco da CVs - Experimento 1.	106
Figura 6.3 - Comportamento da variável de controle no Experimento 1	106
Figura 6.4 - Comportamento da saída do controlador do CF (variável DF) <i>versus</i> a pressão mínima do sistema - Experimento 1	107
Figura 6.5 - Curva do erro de regime permanente do Experimento 1	107
Figura 6.6 - Curva de abertura da válvula CVs do Experimento 2	108
Figura 6.7 - Curvas de pressão do Experimento 2.....	109
Figura 6.8 - Curvas de vazão do Experimento 2	109
Figura 6.9 - Curvas de abertura da válvula CVs - Experimento 3.....	110

Figura 6.10 - Curvas de pressão do Experimento 3.....	111
Figura 6.11 - Curvas de vazão do Experimento 3	111
Figura 6.12 - Curva de erro de regime permanente do Experimento 3	111
Figura 6.13 - Curvas de vazões totais dos experimentos 2 e 3.....	113
Figura 6.14 - Consumo energético do conjunto motor-bomba dos experimentos 2 e 3....	113
Figura 6.15 - Curvas do CE dos experimentos 2 e 3	114
Figura 6.16 - Curvas de resposta do sistema de controle em malha fechada - Experimento 4.....	115
Figura 6.17 - Comportamento das variáveis de controle do sistema - Experimento 4.....	115
Figura 6.18- Curva de erro de regime permanente do Experimento 4	116
Figura 6.19 - Curvas da variável de controle (sinal de controle) e do grau de abertura real da CVc do Experimento 4	116
Figura 6.20 - Curvas de resposta do sistema de controle em malha fechada do Experimento 5.....	117
Figura 6.21 - Curvas de abertura da CVc e da frequência de acionamento do motor-bomba - Experimento 5	118
Figura 6.22 - Curvas de resposta do erro de regime permanente do Experimento 5.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Regras de inferência <i>Modus Ponens</i>	70
Tabela 4.2 - Regras de inferência <i>Modus Tollens</i>	70
Tabela 5.1 - Características das funções de pertinência da variável de entrada PM	83
Tabela 5.2 - Características das funções de pertinência da variável de entrada FR	87
Tabela 5.3 - Características das funções de pertinência da variável de saída DF	88
Tabela 5.4 - Matriz associativa fuzzy do controlador do conversor de frequência	89
Tabela 5.5 - Base de regras do controlador fuzzy do CF	90
Tabela 5.6 - Características do controlador fuzzy do CF	91
Tabela 5.7 - Características das funções de pertinência da variável de entrada DP	93
Tabela 5.8 - Características das funções de pertinência da variável de entrada AV	96
Tabela 5.9 - Características das funções de pertinência da variável de saída DA	99
Tabela 5.10 - Matriz associativa fuzzy do controlador da CVc	99
Tabela 5.11 - Base de regras do controlador fuzzy do CF	100
Tabela 5.12 - Regras de decisão da válvula CVc	101
Tabela 5.13 - Características do controlador fuzzy da válvula CVc	102
Tabela 6.1 - Indicadores de consumo dos experimentos 2 e 3	114
Tabela 6.2 - Variáveis de controle dos experimentos 4 e 5 para o regime permanente	119
Tabela 6.3 - Resumo das pressões e volume perdido por vazamentos (estimado).....	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A1	primeira função de pertinência da variável lingüística AV
A2	segunda função de pertinência da variável lingüística AV
A3	terceira função de pertinência da variável lingüística AV
A4	quarta função de pertinência da variável lingüística AV
A5	quinta função de pertinência da variável lingüística AV
A6	sexta função de pertinência da variável lingüística AV
A7	sétima função de pertinência da variável lingüística AV
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACO	<i>Ant Colony Algorithm</i>
AG	Algoritmo Genético
AL	sexta função de pertinência da variável lingüística PM
AMT	altura manométrica total
ANFIS	<i>Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System</i>
AV	variável lingüística de entrada fuzzy
AWWA	<i>American Water Works Association</i>
BA	segunda função de pertinência da variável lingüística PM
BJT	transistor de junção bipolar
CCO	centro de controle operacional
CE	Consumo específico de energia elétrica
CESAN	Companhia Espírito Santense de Saneamento
CF	conversor de frequência
CLP	controlador lógico programável
CMB	conjunto motor-bomba
C-o-A	Centro de Gravidade
C-o-M	Centro de Máximo
CPU	unidade central de processamento

CVc	válvula de controle localizada a montante do PT1
CVs	válvula de controle localizada a jusante do PT1
DA	variável lingüística de saída fuzzy
DAE	Departamento de Água e Esgoto
DANE	segunda função de pertinência da variável lingüística DA
DANG	primeira função de pertinência da variável lingüística DA
DANP	terceira função de pertinência da variável lingüística DA
DAPG	sétima função de pertinência da variável lingüística DA
DAPO	sexta função de pertinência da variável lingüística DA
DAPP	quinta função de pertinência da variável lingüística DA
DAQ	módulo de aquisição de dados
DAZE	quarta função de pertinência da variável lingüística DA
DF	variável lingüística de saída fuzzy
DFNA	primeira função de pertinência da variável lingüística DF
DFNB-	quarta função de pertinência da variável lingüística DF
DFNB	terceira função de pertinência da variável lingüística DF
DFNE	segunda função de pertinência da variável lingüística DF
DFPA	nona função de pertinência da variável lingüística DF
DFPB	sétima função de pertinência da variável lingüística DF
DFPB+	sexta função de pertinência da variável lingüística DF
DFPO	oitava função de pertinência da variável lingüística DF
DFZE	quinta função de pertinência da variável lingüística DF
DP	variável lingüística de entrada fuzzy
EMBASA	Empresa Baiana de Águas e Saneamento
EUA	Estados Unidos da America
FR	variável lingüística de saída fuzzy
FT1	medidor de vazão localizado no ramal 1 da bancada experimental
FT2	medidor de vazão localizado no ramal 2 da bancada experimental
H ∞	Controlador H Infinito
IGBT	transistor bipolar com porta isolada
INSPEC	<i>Database for Physics, Electronics and Computing</i>
LG	Controlador Regulador Linear Gaussiano
LQR	Controlador Regulador Linear Quadrático

MA	sétima função de pertinência da variável lingüística PM
MB	primeira função de pertinência da variável lingüística PM
M-o-M	Média dos Máximos
MOSFET	transistor de efeito de campo de semiconductor de óxido metálico
NE	segunda função de pertinência da variável lingüística DP
NEMA	<i>National Electrical Manufactures Association</i>
NG	primeira função de pertinência da variável lingüística DP
NP	terceira função de pertinência da variável lingüística DP
NPSH	<i>Net Positive Suction Head</i>
OT	quarta função de pertinência da variável lingüística PM
PA	sexta função de pertinência da variável lingüística PM
PB	terceira função de pertinência da variável lingüística PM
PD	Controlador Proporcional Derivativo
PEAD	polietileno de alta densidade
PG	sétima função de pertinência da variável lingüística DP
PI	Controlador Proporcional Integral
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo
PM	variável lingüística de entrada fuzzy
PO	sexta função de pertinência da variável lingüística DP
PP	quinta função de pertinência da variável lingüística DP
PT1	transdutor de pressão localizado no ramal 1 da bancada experimental
PT2	transdutor de pressão localizado no ramal 2 da bancada experimental
PWM	modulação por largura de pulso
R1	primeira função de pertinência da variável lingüística FR
R2	segunda função de pertinência da variável lingüística FR
R3	terceira função de pertinência da variável lingüística FR
R4	quarta função de pertinência da variável lingüística FR
R5	quinta função de pertinência da variável lingüística FR
R6	sexta função de pertinência da variável lingüística FR
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SANASA	Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A
SCADA	sistemas de supervisão e aquisição de dados
SDA	sistema de distribuição de água

SF	sistema de controle fuzzy
SIG	sistema de informação geográfica
SNF	sistema neuro-fuzzy
T-S	<i>Takagi-Sugeno</i>
U	universo de discurso
VI	instrumento virtual, arquivo do Labview™
VRP	válvula redutora de pressão
ZE	quarta função de pertinência da variável lingüística DP
ZMC	zona de medição e controle

LISTA DE SÍMBOLOS

A	conjunto de elementos
B	conjunto de elementos
C	conjugado
$C(s)$	saída de um processo ou componente controlado
E	energia consumida no tempo t
$E(s)$	diferença entre o valor de referência e o sinal da malha de realimentação
f	freqüência da rede elétrica
g	aceleração da gravidade
H	altura manométrica
i	i -ésimo elemento
I	corrente elétrica
K_d	parâmetro relativo ao ganho derivativo do controlador PID
K_i	parâmetro relativo ao ganho integral do controlador PID
K_p	parâmetro relativo ao ganho proporcional do controlador PID
n	número de elementos
n	velocidade de rotação
Nl	expoente que depende do tipo de material
n_R	velocidade de rotação do motor
n_s	velocidade de rotação síncrona
p	número de pólos do motor
P	pressão
P_1	pressão medida no ponto de medição a jusante da CVc (PT1)
P_{1req}	valor de referência do ponto de medição a jusante da CVc (PT1)
P_2	pressão medida no ramal 2 (PT2) da bancada experimental
P_{2req}	pressão mínima no ramal 2 (PT2) da bancada experimental
Pe_i	pressão no ponto de medição i

P_{eixo}	potência fornecida pelo motor elétrico ao eixo da bomba
P_{med_i}	pressão medida no ponto de medição i
P_{ot}	potência
P_{req_i}	pressão requerida no ponto de medição i
Q	vazão
s	escorregamento do motor assíncrono
t	tempo
U	tensão elétrica
$U(s)$	excitação aplicada a um sistema
V	volume bombeado no tempo t
x	variável qualquer
x_{CVc}	ângulo de abertura da válvula de controle
x_i	i -ésima variável x
y	variável de saída
y_{CVc}	tensão de controle da válvula de controle
y_i	i -ésima variável y
ρ	densidade do líquido
Σ	somatório
$\mu_{o,k}(y_i)$	ponto de máximo da função de pertinência encontrado pelo 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
η_b	rendimento da bomba
π	constante pi (3,141593)

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 INTRODUÇÃO

As primeiras cidades foram fundadas há aproximadamente 3.500 anos antes de Cristo nos vales das bacias do Rio Nilo (Egito), dos Rios Tigre e Eufrates (Iraque) (GIDDENS, 1999 *apud* ESMPU, 2005). Os locais escolhidos para a moradia definitiva eram, em sua maioria, construídos as margens de rios ou grandes lagos, que, por sua vez, tornaram-se a fonte primária para as primeiras comunidades (FORMIGA, 2005).

Concomitantemente com o crescimento das primeiras cidades, ainda na Idade Antiga (4000 a.C. a 476 d.C.¹), surgiu a necessidade de se desenvolver técnicas para transportar água até os meios urbanos. Dentre as civilizações da época, pode-se destacar o Império Romano (31 a.C. a 476 d.C.¹), que foi responsável pela construção de inúmeras redes de distribuição de água em cidades com centenas de milhares de habitantes.

No século XIX, com o surgimento do motor elétrico - que foi acoplado a diversos instrumentos da indústria, incluindo as bombas - a água começou a ser impulsionada, independente do fim da aplicação, por conjuntos motor-bomba.

Atualmente, são raros os sistemas de distribuição de água que operam exclusivamente por gravidade. Estes são compostos geralmente por redes de distribuição de água, reservatórios e conjuntos motor-bomba. Assim sendo, a energia elétrica tornou-se essencial para tornar a água potável e movê-la através dos sistemas; cada litro de água que se move representa um determinado consumo de energia. Segundo TSUTIYA (2008) é necessário cerca de 0,6 kWh para produzir um metro cúbico de água potável.

¹ Fonte: Enciclopédia Larousse Cultural.

As empresas de saneamento consomem de 2 a 10% do total da eletricidade utilizada em um país (PELLI e HITZ, 2000 *apud* RODRIGUES, 2007). Os países latino-americanos gastam de 1 a 1,5 bilhões de dólares por ano apenas para bombear água (JAMES *et al.*, 2002). No Brasil, o setor de saneamento básico consome cerca de 2,5% do consumo total de energia elétrica, o equivalente a aproximadamente 10 bilhões de kWh/ano (ELETROBRÁS, 2008), sendo que 90% dessa energia é consumida por conjuntos motor-bomba TSUTIYA (2008). Os custos com energia elétrica em sistemas de bombeamento, na grande maioria das vezes, ultrapassam, ao longo da vida útil dos projetos, os custos de investimento das instalações (GOMES, 2005).

A otimização das operações de bombeamento pode gerar economias significativas, as quais, no caso de grandes sistemas, atingem milhões de reais por ano. Segundo JAMES *et al.* (2002), o consumo de energia, na maioria dos sistemas de distribuição de água em todo o mundo, poderia ser reduzido em pelo menos 25% com a implementação de ações de eficiência energética e hidráulica, o que equivale a toda energia utilizada na Tailândia. Vários estudos na Europa e nos Estados Unidos da América indicam que o setor industrial tem um potencial de redução de 30 a 50% do consumo em sistemas de bombeamento (HOVSTADIUS, 2007).

A alternativa mais eficiente para reduzir o consumo de energia elétrica das companhias é através da diminuição das vazões e pressões dos sistemas. Para amortizar o volume de água fornecido, sem que haja racionamento e/ou “racionalização forçada”, a forma mais impactante é a minimização das perdas reais de água. Entre as ações voltadas para a minimização destas perdas e do consumo de água, a comunidade científica (GERMANOPOULOS e JOWITT, 1989; SAVIC e WATERS, 1995; VITKOVSK'Y *et al.*, 2000; THORNTON, 2002; ARAUJO *et al.*, 2006; GARZÓN CONTRERAS e THORNTON, 2006; PILCHER *et al.*, 2007) e os técnicos das empresas destacam o controle da pressão. Destarte, observa-se que o controle piezométrico nas redes hidráulicas apresenta-se como uma ação diretamente impactante no consumo de energia elétrica e água.

Os atuais sistemas de automação, mais especificamente os sistemas tipo SCADA², possibilitam o controle de pressão em pontos do sistema. Porém, as decisões são vinculadas à experiência dos operadores, já que os sistemas SCADA, via de regra,

² Sistema de supervisão e aquisição de dados, geralmente, formado por sensores e atuadores (instrumentação), estações remotas (aquisição e controle), rede de comunicação e um sistema supervisor.

propiciam apenas a operação assistida. É possível monitorar, controlar e interferir nas diversas unidades do sistema em tempo real, mas não o controle automático dos processos. Nos casos em que há controle automático, este fica a cargo de CLP que operam de forma independente, local e em aplicações de processos simples, por exemplo, o liga/desliga de bombas com base no nível de um reservatório e o controle de pressão no barrilete através do acoplamento de um conversor de frequência ao conjunto motor-bomba.

Quanto mais extenso for o sistema de distribuição de água, obviamente, mais complexas serão as decisões. O grande número de elementos passíveis de terem seus estados alterados torna complexa a tarefa dos operadores definirem, num determinado instante, qual a melhor combinação do estado operacional das bombas e grau de abertura das válvulas (PEDROSA FILHO, 2006). Devido a esta elevada complexidade, a busca da decisão mais adequada em termos de política operacional deve ser feita com o auxílio de ferramentas computacionais apropriadas. Sem um planejamento otimizado, os sistemas de produção de água para abastecimento continuam desperdiçando [...] energia elétrica (PEDROSA FILHO, 2006).

Um grande campo de pesquisas se abre na busca do desenvolvimento de sistemas de controle voltados para a melhoria da eficiência energética e hidráulica dos sistemas de distribuição de água que resultem em confiabilidade operacional, redução dos custos e garantia da continuidade do abastecimento com qualidade.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é o desenvolvimento de um sistema fuzzy, no ambiente Labview™, para o acionamento automático e simultâneo de válvulas de controle e de um conversor de frequência, a fim de controlar a pressão em um sistema de distribuição de água. Para tanto, desenvolveu-se uma ferramenta computacional - sistema de controle - que trata a velocidade de rotação dos conjuntos motor-bomba e o grau de abertura das válvulas como variáveis de controle.

Atualmente, os equipamentos utilizados para o controle de pressão nas redes hidráulicas são os conversores de frequência e as válvulas de controle. O controle de velocidade de rotação, realizado pelo conversor de frequência acoplado ao motor, propicia apenas o controle de pressão em um ponto do sistema, o que faz com que os níveis piezométricos do sistema de distribuição diminuam ou aumentem de forma proporcional,

fazendo com que a determinação da rotação fique vinculada a um determinado ponto. As válvulas de controle utilizadas para reduzir a pressão são chamadas de válvulas redutoras de pressão e geralmente são localizadas nas entradas dos setores das redes hidráulicas. Conquanto acrescentem perda de carga ao sistema, aquelas propiciam uma redução do volume de água fornecida (diminuição do consumo mais perdas de água) ao setor de jusante, reduzindo indiretamente o consumo de energia. Por outro lado, com o crescimento dos sistemas de distribuição de água, surgiram situações onde há uma variação significativa da pressão ao longo da rede hidráulica; nestes casos, para garantir o controle piezométrico (vários pontos) é necessária a aplicação simultânea de válvulas de controle e conversores de frequência.

Diante do exposto acima, a principal contribuição deste trabalho está em desenvolver um sistema fuzzy para o controle piezométrico de redes de distribuição de água, em tempo real, minimizando o consumo de energia elétrica e o volume de água fornecido ao sistema. O conversor de frequência atua mantendo a altura manométrica do sistema de bombeamento em um valor ótimo (mínimo possível), enquanto as válvulas de controle têm a função de eliminar o excesso de pressão em diversos pontos do sistema; obviamente a diminuição da velocidade de rotação prevalece sobre o acréscimo da perda de carga através das válvulas.

1.2.1 Objetivos Específicos

São objetivos específicos dessa pesquisa:

- ✓ Análise da influência do uso de conversores de frequência em sistemas de bombeamento, identificando os principais questionamentos sobre a sua aplicação.
- ✓ Análise da influência de válvulas redutoras de pressão nas perdas de água em sistemas de abastecimento de água e as suas diversas aplicações.
- ✓ Implantação de uma bancada experimental, instrumentalizada e automatizada, no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da UFPB.
- ✓ Desenvolvimento de um sistema de controle com instrumentação virtual para a supervisão da bancada experimental.
- ✓ Desenvolvimento de um sistema de controle, composto por controladores fuzzy, para o acionamento automático e simultâneo de conjuntos motor-bomba e

válvulas de controle, a fim de controlar a pressão em dois pontos da bancada implantada.

- ✓ Avaliação do consumo energético na bancada experimental, com e sem o uso do sistema de controle desenvolvido.
- ✓ Estimar o potencial do volume de água perdida por vazamentos, com e sem o uso do sistema de controle desenvolvido, extrapolando os resultados da bancada experimental para sistemas reais.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

A automatização de sistemas de distribuição de água pode atingir níveis diferenciados em função da sua própria necessidade, de sua importância e do risco de falhas admissíveis (CARRIJO, 2004). O grau de automatização no saneamento é variável e depende do porte do sistema e de suas características. Os sistemas mais complexos tendem a evoluir de uma operação baseada em SCADA (Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados)³ para uma operação automática, de forma a liberar os operadores para tarefas de supervisão (ZAHED FILHO, 1990). Maiores detalhes sobre automação em sistemas de abastecimento de água são apresentados por TSUTIYA (2004).

A aplicação da automação em sistemas de distribuição de água (SDA) é uma prática consagrada, porém, são raros os trabalhos científicos de dinâmica e controle automático de sistemas voltados para o setor de saneamento. Na prática, os controladores automáticos utilizam técnicas de controle “convencionais”, tipo PID⁴, desenvolvidas e acopladas pelos vários fabricantes dos equipamentos eletrônicos. Estes equipamentos, quando automáticos, operam de forma isolada.

Atualmente, um grande número de sistemas europeus já utiliza modelos de otimização para gerar estratégias de 24 horas, com vistas a minimizar os custos e manter

³ SCADA são sistemas que utilizam um programa computacional para monitorar e supervisionar variáveis e dispositivos de um determinado sistema. Os SCADA podem assumir topologia mono-posto, cliente-servidor múltiplos servidores-clientes, ou utilizar protocolos de comunicação proprietários, como por exemplo, módulos de entradas/saídas remotas e controladores programáveis.

⁴ A técnica de controle PID consiste em calcular um valor de atuação sobre o processo a partir das informações do valor desejado e do valor atual da variável do processo. Este valor de atuação sobre o processo é transformado em um sinal adequado ao atuador utilizado (válvula, relé, etc).

um bom serviço aos consumidores (CEMBRANO *et al.*, 2000). Estes modelos operam de forma integrada com os sistemas SCADA. Os primeiros trabalhos foram desenvolvidos e implementados na década de 70 (FALLSIDE e PERRY, 1975; COULBECK, 1977). ORMSBEE e REDDY (1995) propuseram uma política operacional para estações de bombeamento visando à diminuição dos custos de operação de SDA. O sistema de apoio a decisão desenvolvido, formado por um modelo de simulação e um algoritmo baseado em uma técnica heurística não-linear para obtenção do menor custo, define regras para a operação diária dos conjuntos motor-bomba de estações elevatórias (CMB). Os dados foram obtidos através do sistema SCADA. Segundo os autores, o algoritmo tem a vantagem de ser computacionalmente eficiente e oferecer diversas soluções viáveis para o controle do sistema (flexibilidade na seleção de uma determinada solução), entretanto, não foram apresentados resultados de aplicações reais.

CEMBRANO *et al.* (2000) abordaram o uso de técnicas de otimização no controle de redes hidráulicas e descreveram a aplicação de uma ferramenta de controle desenvolvida, por um projeto de pesquisa europeu, para o sistema da cidade de *Sintra* (Portugal). O sistema de controle desenvolvido interage com o SCADA do sistema; os valores “ótimos” encontrados pela otimização são enviados como *valores de referência* (*set-point*) através do SCADA para os controladores locais nas estações remotas.

LEÓN *et al.* (2000) desenvolveram um sistema especialista híbrido chamado *Explore* para gerenciar o sistema de abastecimento de água da cidade de *Sevilha* (Espanha). O *Explore*, através da previsão de demanda de água, obtém o regime de operação diária das bombas, reduzindo o custo da operação de bombeamento. Os autores destacam que as informações repassadas pelos operadores do sistema servem para o refinamento do processo operacional através da simulação de novas estratégias. GUERREROS SIANCAS (2000) descreveu o sistema de automação e telecontrole do SDA da cidade de *Lima* (Peru), bem como a operação dos equipamentos à distância, o sistema de comunicação e os centros de controle.

MAHLER *et al.* (2003) apresentaram os principais resultados obtidos em decorrência da automação do sistema de distribuição de água principal da Região Metropolitana de Fortaleza. Os autores concluíram que o projeto de automação mostrou excelente atratividade sob os aspectos técnico, econômico, financeiro e ambiental. A automação como ferramenta de supervisão e controle aumentou a eficiência global do sistema, em função da otimização da operação dos processos. Os autores sugerem que

sejam criadas linhas de financiamento especiais no Brasil para automação dos processos do setor de saneamento, uma vez que o nível de automação das empresas operadoras dos serviços de água e esgoto no país ainda é incipiente. BRANDÃO JÚNIOR (2004) relatou a experiência operacional da implantação daquele sistema de automação, relatando que está em funcionamento desde janeiro 1999 e comprovadamente foi um projeto bem sucedido, de longo alcance nos aspectos operacionais e comerciais.

FONTENOT *et al.* (2003) acoplaram um modelo de simulação hidráulica e de qualidade a um sistema SCADA, de maneira que o modelo hidráulico seja calibrado e validado em tempo real com os dados obtidos pelo sistema SCADA. Utilizando a abordagem integrada para modelagem, as pressões e vazões da rede hidráulica são monitoradas automaticamente, possibilitando que os parâmetros sejam utilizados para a otimização do sistema. O sistema desenvolvido permite que qualquer sinistro na rede possa ser facilmente identificado e avaliado pelos operadores. O estado da arte da integração de modelos hidráulicos e sistemas SCADA é apresentado pelos autores.

XIAO *et al.* (2004) e SHINOZUKA *et al.* (2005) desenvolveram uma metodologia, baseada em Redes Neurais, para detectar e localizar danos em SDA através de um acompanhamento *on-line* da pressão em pontos estratégicos do sistema através de um SCADA. A rede neural é treinada analiticamente, usando dados simulados e validados por meio de um conjunto de dados que não foram usados nas simulações. Segundo os autores, o método proporciona, de forma rápida, eficaz e prática, a localização de rupturas em SDA.

DAVIDSON *et al.* (2005) apresentaram uma metodologia que utiliza o sistema SCADA para analisar, em tempo real, redes hidráulicas sujeitas a um determinado evento de contaminação. Esta abordagem faz uso da supervisão, controle e aquisição de dados para criar matrizes que combinam os efeitos de diversos cenários de propagação da contaminação, de maneira a determinar o pior cenário possível.

SALAMANCA e MOSQUERA (2005) avaliaram, sob os aspectos da operação e funcionalidades, as vantagens advindas da implantação da automação supervisionada do sistema SCADA na rede hidráulica da *Universidad Nacional de Colombia* (Colômbia). Através de análises hidráulicas com o EPANET 2, verificou-se também a necessidade da implantação de válvulas redutoras de pressão na entrada de cada edificação e a potencialidade de economia de água.

BUNN (2006) apresentou um programa de fiscalização em tempo real para SDA denominado Derceto. O Derceto é um pacote de programas de avaliação em tempo real, totalmente automático, voltado para minimizar os custos com energia. A partir de dados do sistema SCADA, ele determina as condições de operação das bombas e válvulas do sistema para as próximas 48 horas. De acordo com autor, o controle é realizado de forma automática, permitindo uma operação autônoma até mesmo em grandes sistemas. O sistema está em uso em quatro grandes operações, agendando decisões de mais de 80 bombas.

NALESSO e OLIVEIRA (2007) apresentaram o sistema informatizado SICAM (Sistema de Controle e Análise de Medições) desenvolvido para automatizar o processo de controle de perdas através da coleta e análise estatística de dados; definindo padrões de comportamento, bem como traçando perfis do processo. O sistema foi implementado na Unidade de Negócio do Alto Paranapanema da SABESP (Brasil) e aborda uma forma de controle dos processos operacionais ligados com o tratamento, reservação, controle das válvulas redutoras de pressão, bombeamento, distribuição e manutenção; utilizando para tanto, um controle estatístico de processos que possibilita verificar se os mesmos estão se comportando dentro de um padrão de trabalho pré-estabelecido. O uso desta forma de controle priorizou a facilitação do preenchimento de dados, bem como, o alcance da visualização dos resultados. A demonstração em gráficos e na variabilidade estatística facilita a conscientização e mudança de comportamento dos técnicos envolvidos, pois demonstra que os processos estão interligados e interferem entre si; além de possibilitar a consulta e acompanhamento dos resultados por toda a unidade. Os dados ficam disponíveis em rede, gerando um histórico protegido e disponível para futuras tomadas de decisão ou alocações de investimentos. De acordo com os autores, o sistema pode fornecer um levantamento histórico de diversos parâmetros, tais como níveis de reservatório, volumes produzidos, eficiência de válvulas, pressão máximas e mínimas, volume de água captada e tratada, vazões disponibilizadas, etc. O sistema possibilita mapear as zonas de distribuição de água com problemas.

WU *et al.* (2007) propuseram um modelo de otimização para acompanhamento *on-line* da qualidade da água em redes hidráulicas, a fim de reforçar a segurança do sistema contra ameaças de contaminação. A abordagem tem sido aplicada e avaliada na rede de distribuição de água de *Tianjin* (China), que é dotado de um sistema SCADA.

INGEDULD (2007), a fim de implementar a simulação hidráulica automática como ferramenta de apoio à decisão, acoplou o EPANET 2 a um sistema SCADA. O sistema de controle opera no modo de tempo real e é usado para atualização automática do modelo hidráulico, previsão em tempo real e tomada de decisão. Depois de processado os dados advindos do SCADA, o sistema de controle determina os *valores de referência (set-points)*, que são enviados para o agendamento automático do sistema. O trabalho também discute a experiência de desenvolvimento e implementação de um sistema que executa em tempo real a previsão do comportamento hidráulico de adução e distribuição de água.

BRITTO *et al.* (2007) relataram o desenvolvimento um Sistema de Informação Geográfica - SIG voltado para *Web*, utilizando um programa livre, com a finalidade de disseminar as informações espaciais e alfanuméricas por toda a rede corporativa da Empresa Baiana de Águas e Saneamento - EMBASA (concessionária responsável pelo abastecimento de água e coleta de esgoto de 85% dos municípios da Bahia, incluindo a capital). A ferramenta descrita vem apoiar as tomadas de decisão nas áreas comercial e operacional da referida organização, além de disseminar as informações geográficas por toda a organização, auxiliando no processo de gestão.

GOMES *et al.* (2008) apresentaram o sistema piloto de distribuição de água do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica da Universidade Federal da Paraíba - LENHS UFPB, que consiste de uma rede pressurizada de distribuição, alimentada por 3 conjuntos motor-bomba, instrumentalizada e automatizada mediante um CLP supervisionado por um sistema SCADA. Por ser um sistema automatizado, ele admite o desenvolvimento de rotinas de controle, simulação e monitoração em tempo real, produzindo uma massa de dados, em forma de relatórios, que possibilita a sua interpretação e análise. O sistema destina-se às atividades de ensino, pesquisa e extensão no âmbito da UFPB e de demais instituições do Brasil e do exterior. O sistema será um importante instrumento de pesquisa e de treinamentos destinados a engenheiros de empresas operadores de distribuição de água. As pesquisas e treinamentos serão direcionados, primordialmente, a trabalhos de redução de perdas de água e energia elétrica em sistemas pressurizados de abastecimento de água.

QIANG *et al.* (2008) desenvolveram um modelo para acompanhamento, *off-line* e *on-line*, da segurança de redes hidráulicas em relação a contaminações na água. Foi utilizada a Lógica Fuzzy para otimizar a seleção de métodos e pontos de monitoramento.

A avaliação global foi aplicada e validada no SDA de *Harbin* (China) através um sistema tipo SCADA.

BORGES *et al.* (2008) apresentaram um sistema de suporte à decisão para a operação do Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo. Foi desenvolvida uma interface do programa de simulação hidráulica com o SIG da SABESP. Para que o modelo hidráulico representasse o sistema real, a calibração fez uso de dados reais da operação adquiridos por um sistema SCADA. Foi adotado para a calibração, como fator de sucesso, um critério de máximo desvio entre as pressões medidas e calculadas. A calibração foi efetuada em três momentos, a partir dos quais se considerou os modelos validados. O sistema foi aplicado nos subsistemas Alto Tietê - Alça Leste e Guaraú - Mooca - ABV - Jabaquara que interligam quatro sistemas produtores. O trabalho apresentou os modelos matemáticos hidráulicos e um modelo de previsão de consumo do Sistema de Suporte à Decisão no planejamento da operação em tempo real.

A revisão da literatura apontou que a maioria dos trabalhos científicos do setor de saneamento, no tema abordado por esta tese, é voltada para a modelagem numérica da otimização da operação de sistemas de distribuição de água (SDA). Na prática, são raros os trabalhos científicos publicados sobre controle de processos em SDA, pois, geralmente, o desenvolvimento de controladores fica a cargo dos fabricantes dos equipamentos. Os equipamentos para controle automático de sistemas de distribuição de água, não obstante apresentarem benefícios e certo grau de sofisticação tecnológica, operam de forma isolada. Não foram encontrados na literatura e em aplicações práticas, controladores automáticos desenvolvidos para o controle simultâneo de dois ou mais tipos de equipamentos. Observa-se, ainda, que as pesquisas voltadas para a redução dos custos de bombeamento de água ficam, na maioria dos casos, restritas às estações elevatórias. A seguir são apresentadas algumas pesquisas recentes direcionadas para a otimização da operação de SDA.

A modelagem numérica de SDA se tornou uma prática padrão e essencial em qualquer tentativa séria para a avaliação hidráulica, de qualidade de água e aspectos econômicos (FARMANI *et al.*, 2007). Os modelos de simulação são ferramentas eficazes e necessárias não só na fase de planejamento e projetos, mas, principalmente, na fase de operação dos sistemas de distribuição de água (CARRIJO, 2004).

Atualmente, entre os simuladores utilizados pelos projetistas, segundo BISCOS *et al.* (2003), o EPANET 2 é aceito amplamente como “padrão mundial” na modelagem

hidráulica e de qualidade de água. Desenvolvido pela *Water Supply and Water Resources Division* (Divisão de Abastecimento de Água e Recursos Hídricos) da *US Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental Americana), o EPANET 2.00.12 (ROSSMAN, 2008)⁵ é um programa de domínio público para simulação hidráulica, estática e dinâmica, de sistemas pressurizados de distribuição de água. O programa foi concebido para ser uma ferramenta de apoio à análise de SDA para abastecimento urbano, sistemas de irrigação, de combate a incêndios, etc; e permite obter valores de vazão, de pressão, do nível de água nos reservatórios e da concentração de elementos químicos ao longo da rede hidráulica, etc. O EPANET auxilia na análise de alternativas de gestão, de modo a melhorar a qualidade do sistema de abastecimento, em termos de quantidade e qualidade da água fornecida, assim como permite avaliar possíveis ações que possam diminuir o consumo de energia elétrica das estações de bombeamento.

Diversos trabalhos têm utilizado o EPANET concomitantemente com módulos de otimização para a determinação da operação ótima de sistemas de distribuição de água (SAKARYA e MAYS, 2000; OSTFELD e SALOMONS, 2003; GOLDMAN e MAYS, 2005; CARRIJO, 2004; PEDROSA FILHO *et al.*, 2007). ZAHED FILHO (1990) destacou que os modelos de simulação devem ser usados na operação em tempo real, de forma a verificar a resposta dos sistemas às alterações impostas, conforme se observou em trabalhos citados anteriormente.

BARBOSA *et al.* (2002) utilizaram parte do Sistema Adutor de Bodocongó, localizado em Campina Grande-PB (Brasil), para desenvolver um estudo de verificação do melhor desempenho energético das estações de bombeamento para várias condições iniciais de nível de água nos reservatórios. Os gastos com energia elétrica para cada cenário pesquisado e também para diferentes tarifas de energia elétrica mostraram que as diferentes estratégias operacionais resultaram numa discrepância de até 26% entre o melhor e o pior cenário pesquisado.

KAZANTZIS *et al.* (2002 *apud* CARRIJO, 2004) propuseram uma metodologia para a otimização da operação de uma estação elevatória considerando dois objetivos: maximização do bombeamento no período de tarifa mínima e minimização das cargas das bombas com a racionalização dos níveis dos reservatórios. Foi desenvolvida uma ferramenta de otimização utilizando Algoritmos Genéticos para encontrar os controles

⁵ A versão do EPANET 2.00.12 para o português falado e escrito no Brasil, e o seu correspondente manual, foram traduzidos pelo LENHS UFPB e podem ser importados do sítio www.lenhs.ct.ufpb.br.

ótimos para uma faixa de demandas diárias. A nova metodologia foi testada em parte do sistema de abastecimento de água de *Murray Bridge* na Austrália. Segundo os autores, os resultados apresentaram uma redução entre 15 e 20% nos custos relativos à energia elétrica do sistema em questão.

BISCOS *et al.* (2003) apresentaram um método de otimização, que utiliza Programação Mista-Inteira Não-Linear, para controlar o processo de distribuição de água potável. Foram considerados, prioritariamente, o regime operacional dos conjuntos motor-bomba e a manutenção do nível de concentração de cloro nos pontos mais desfavoráveis. O primeiro objetivo é considerado pela manutenção de volumes de emergência mínimos em todos os reservatórios, enquanto o segundo objetivo minimiza a dosagem de cloro e exigências de redosagem. A combinação de elementos dinâmicos (*e.g.* reservatórios) e elementos discretos (bombas, válvulas, etc) torna o processo de otimização complexo. Segundo os autores, os resultados experimentais foram bastante satisfatórios.

TRAUTWEIN JÚNIOR e VIEIRA (2005) apresentaram o resultado da avaliação da aplicação de redes neurais artificiais para previsão de consumo de água em intervalos menores que uma hora, como apoio ao planejamento da operação de sistemas de abastecimento de água. Os autores afirmam que os resultados foram satisfatórios e que apesar de não poderem ser generalizados, devido à dinâmica e a diversidade operacional dos SDA, eles mostram que a técnica deve ser explorada pelos pesquisadores do setor.

INGEDULD *et al.* (2006) desenvolveram um *EPANET modificado* para simulação de sistemas de distribuição de água rurais e/ou intermitentes. Estes sistemas não são bem modelados pelo EPANET porque estão sujeitos a pressões muito baixas e esvaziamento dos tubos, além de possuírem, geralmente, problemas estruturais graves que interferem nos parâmetros hidráulicos. O *EPANET modificado* foi ajustado para modelar corretamente sistemas com pressões baixas e tubulações “secas”. O modelo hidráulico proposto foi aplicado ao sistema de distribuição de água de *Shillong* na Índia e de *Dhaka* em Bangladesh.

BOUNDS *et al.* (2006) apresentaram um programa computacional chamado de FINESSE, desenvolvido para a gestão energética de um SDA de grande escala. O SDA gerido pelo FINESSE é responsável pelo fornecimento de água para diversas cidades, sendo formado por 35 bombas, 63 válvulas de controle e 16 reservatórios de nível variável. A aplicação do programa resultou em uma redução de 14% no consumo de energia elétrica.

PEDROSA FILHO *et al.* (2007) desenvolveram um sistema de apoio a decisão com vistas à definição da melhor estratégia diária dos estados das bombas e válvulas de um sistema adutor, de forma a resultar na minimização dos gastos com energia elétrica. A metodologia empregada na busca do ótimo operacional ao longo de 24 horas, fundamentou-se na técnica estocástica dos Algoritmos Genéticos acoplada ao simulador hidráulico EPANET 2. A minimização da função representada pelos custos de bombeamento é tratada pelo Método de Penalidades considerando as restrições inerentes ao sistema estudado. A aplicabilidade da metodologia proposta foi avaliada por meio de simulações realizadas no Sistema Adutor Marés, responsável pelo abastecimento de grande parte da cidade de João Pessoa - PB (Brasil). O trabalho apresentou resultados que comprovam a eficácia do modelo proposto em encontrar estratégias de operação viáveis de serem aplicadas a um sistema adutor real com múltiplas estações de bombeamento e reservatórios. A redução do consumo elétrico alcançada nas simulações evidencia a importância da aplicação de um modelo de otimização como instrumento para melhorar a eficiência energética do sistema.

FARMANI *et al.* (2007) apresentaram a experiência de desenvolver um sistema de apoio a decisão para o plano mestre de sudoeste de *Moravia* - República Tcheca. O sistema englobou a modelagem hidráulica, a qualidade da água e a programação ótima de bombas e válvulas. Um programa de modelagem *on-line* foi desenvolvido e instalado no centro de controle operacional, sendo calibrado para simulações estáticas e de períodos estendidos. O objetivo principal do modelo *on-line* proposto é a diminuição do custo operacional através da otimização da operação dos conjuntos motor-bomba.

2.2 CONVERSORES DE FREQUÊNCIA

O desenvolvimento de sistemas de controle para conversores de frequência e válvulas de controle automáticas para sistemas de distribuição de água é raro no meio científico, já que estes equipamentos operam sem um controle, relativamente, preciso das variáveis envolvidas. Na prática, a maioria dos controladores automáticos utiliza técnicas de controle “convencionais”, tipo PID, desenvolvidas e acopladas pelos vários fabricantes dos equipamentos.

Não obstante ser recente a comercialização em grande escala de conversores de frequência, o seu uso já possui décadas. Em 1989, DEWINTER e KEDROSKY (1989)

descreveram a expansão do sistema de bombeamento de petróleo de *Betume Blend Cold Lake Pipeline* (Canadá), que mudou a capacidade de uma estação elevatória de 130.000 para 185.000 barris por dia, através da instalação de um novo conjunto motor-bomba de 3.500 HP com velocidade de rotação variável através de um conversor de frequência. O conversor de frequência foi fornecido pela *General Eletrics* - GE, sendo a primeira aplicação do tipo no Canadá e o maior motor de indução da época operando com frequência de tensão variável em uma unidade de petróleo bruto na América do Norte. As principais preocupações dos engenheiros com relação ao uso do conversor de frequência foram: (a) custo de investimento versus a economia de energia, (b) aceitação prática industrial, (c) manutenção e (d) confiabilidade. O conversor, filtro harmônico, contactores, sistema de ar condicionado, peças sobressalentes, instalação e engenharia custou aproximadamente \$ 800.000 (Canadá). Apesar do preço da energia elétrica da época ser baixa no Canadá, a taxa interna de retorno descontada foi de 18%.

As pesquisas que abordam o uso de conversores de frequência estão relacionadas com a aplicação em sistemas de bombeamentos reais, pesquisas operacionais para otimização numérica da aplicação destes e na avaliação ou controle dos parâmetros elétricos de motores de indução acoplados a estes equipamentos. RODRIGUES (2007) ressaltou, ao dissertar sobre o estado da arte em sua tese de doutorado, a ausência de bibliografia disponível sobre o uso de conversores e optou por apresentar as experiências das empresas de saneamento SANASA e SABESP. A seguir, são apresentadas pesquisas recentes sobre o tema.

No que diz respeito às aplicações de conversores de frequência, destaca-se os trabalhos recentes de CARVALHO *et al.* (2000), ALVES *et al.* (2002), ARAÚJO (2003) STRUTHERS (2005), RODRIGUES (2007) e GURGEL e TSUTIYA (2007).

CARVALHO *et al.* (2000) estudaram o uso de um conversor de frequência no controle de vazão em sistemas de irrigação. A avaliação consistiu de uma análise de custos e benefícios, ambos anuais. Os custos foram calculados com base no fator de recuperação do capital, enquanto o benefício foi a economia de energia proporcionada em relação aos procedimentos usuais de controle da vazão. Observou-se que o conversor de frequência é viável economicamente, devendo-se avaliar a redução de potência advinda do seu uso e o tempo de funcionamento da irrigação.

ALVES *et al.* (2002) verificaram a veracidade das relações de *Rateaux* e a redução no consumo da potência consumida no bombeamento, quando se emprega conversores de

freqüência, em um sistema montado na microunidade da Escola de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Goiás. Eles obtiveram um erro entre 1 e 2% nos experimentos, concluindo que o emprego das relações para estimar a altura manométrica e a vazão a partir das equações é recomendado.

ARAÚJO (2003) verificou o comportamento elétrico e hidráulico de um conjunto motor-bomba em um sistema de irrigação por aspersão, com o motor sendo acionado com velocidade de rotação constante e através de um conversor de freqüência (velocidade de rotação variável). Com a implantação do conversor em um sistema real pode-se concluir a alta viabilidade técnica e econômica do equipamento nesta aplicação.

STRUTHERS (2005) desenvolveu um sistema de controle para manter a pressão constante em sistemas de bombeamento sem o uso de um transmissor de pressão. Primeiramente, realizaram-se diversos testes de maneira que os resultados foram utilizados para “alimentar” o sistema de controle. Uma comparação entre o sistema de controle de pressão convencional (com transmissor de pressão) e o sistema proposto apontou que foi possível “um certo” controle da pressão; porém, é necessário estudos mais aprofundados e um melhor aprimoramento do sistema de controle. *Struthers* sugere que trabalhos futuros sejam realizados na interface do sistema de controle e o desenvolvimento de um mecanismo de monitoramento capaz de atualizar os parâmetros em tempo real. Destarte, para que o sistema seja destinado para propósitos comerciais, vários refinamentos adicionais devem ser realizados, incluindo melhorias do algoritmo de controle e testes mais rigorosos com diversos conjuntos motor-bomba.

RODRIGUES (2007) estudou dois conjuntos motor-bomba (250 cv e 300 cv) da Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A - SANASA, dotados de conversores de freqüência, onde se observou as vantagens e desvantagens, possibilidades e limitações do uso destes equipamentos. Rodrigues também desenvolveu três modelos matemático-computacionais para a simulação, análise energética e otimização de cenários operacionais, buscando extrair a máxima eficiência dos sistemas de bombeamento. Ao dissertar sobre o estado da arte, citou a ausência de bibliografia disponível sobre o uso de conversores e optou por apresentar as experiências das empresas de saneamento SANASA e SABESP.

GURGEL e TSUTIYA (2007) estudaram as características técnicas de quatro sistemas de bombeamento que operam com velocidade variável na SABESP e propuseram uma metodologia para a seleção de conversores de freqüência com base em

procedimentos indicados pela EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004). Essa proposta de metodologia foi executada através da análise gráfica das informações históricas de vazão, pressão e velocidade de rotação dos sistemas, concluindo que as aplicações estavam adequadas.

Algumas investigações buscam a otimização numérica da operação de sistemas de distribuição de água que possuem conversores de frequência instalados (RIBEIRO, 2002; ALMEIDA e BARBOSA, 2002; RIBEIRO, 2007). RIBEIRO (2002) desenvolveu um modelo computacional para simulação de SDA contendo bombas com velocidade de rotação variável, visando o estabelecimento das velocidades ótimas de rotação que satisfaçam as pressões mínimas de serviço, a redução de consumo de energia elétrica e o retorno de nível dos reservatórios ao final do período de simulação. O modelo utiliza Algoritmos Genéticos como “gerador e controlador” das variáveis de decisão (método de otimização) em conjunto com um simulador hidráulico *Time Marching Approach*.

ALMEIDA e BARBOSA (2002) pesquisaram a influência de percentuais iniciais de reservação no consumo de energia de um conjunto motor-bomba com velocidade de rotação variável, instalada numa rede de distribuição alimentada por dois reservatórios de montante. Na busca da melhor configuração operacional trataram o problema como de otimização determinística restrita, buscando a solução do modelo hidráulico através do software GAMS (*General Algebraic Modeling System*) associado ao *solver* CONOPT (*Continuous Optimizer*). Chegaram à conclusão que, para o estudo de caso explorado, as condições iniciais dos níveis de água podem conduzir a economias da ordem de 35,4% a 36% com relação à potência de eixo de um dia normal de operação.

RIBEIRO (2007) desenvolveu um modelo híbrido multiobjetivo para obtenção de roteiros operacionais de bombas com velocidade de rotação variável. O modelo foi desenvolvido de forma a garantir condições operacionais, consumo demandado, manutenção dos níveis dos reservatórios e pressões adequadas. Ribeiro também investigou o emprego do modelo de simulação hidráulica *Time Marching Approach* conjuntamente com a técnica de otimização *Non Dominated Sorting Genetic Algorithm II*.

Os conversores de frequência apresentam algumas influências negativas na rede elétrica e no rendimento do motor. Inúmeros pesquisadores e técnicos se dedicaram nos últimos anos para a minimização destes problemas. Atualmente, o nível tecnológico já é considerado satisfatório, mas não ideal. MATIAS (2004) analisou em regime permanente, através de modelos matemáticos, os efeitos das componentes harmônicas geradas pelo

acionamento de motores de indução a longa distância usando conversores trifásicos. Os modelos empregados buscaram reproduzir os fenômenos que ocorrem no sistema, incluindo os efeitos peliculares e de proximidade, as múltiplas ressonâncias no cabo de transmissão, bem como as variações com a frequência dos parâmetros do rotor do motor de indução. A resposta do sistema foi observada nos elementos, bem como ao longo do cabo de transmissão, o que permitiu o estudo de técnicas de filtragem e de modulação que minimizem os efeitos das componentes harmônicas sobre o sistema. Foram estudados os acionamentos por conversores fonte de tensão e fonte de corrente, e analisadas diversas técnicas de modulação.

BURT *et al.* (2008) apresentaram um trabalho detalhado sobre o comportamento do rendimento em motores operando com conversor de frequência, a fim de fornecer informações aos projetistas para uma melhor estimativa da potência de conjuntos motor-bomba acionados por conversores. Eles encontraram uma redução média de 8% do rendimento do motor. Porém, enfatizaram que a queda no rendimento não é impactante, quando adotado corretamente, pois a economia global de energia que pode ser obtida com conversores é superior a queda de eficiência do sistema.

ARANTO (2008) examinou como quatro conversores de frequência, de fabricantes diferentes, estão funcionando como dispositivo de controle de sistemas de bombeamento. A idéia foi avaliar os conversores do ponto de vista de um usuário de conjuntos motor-bomba, observando principalmente o rendimento do conversor + motor. Os conversores foram o ACS800 (ABB), VLT AQUA Drive (Danfoss), NX-drive (Vacon) e o Micromaster 430 (Siemens). Os testes foram realizados no laboratório de eletrônica de potência da Lappeenranta University of Technology. A bancada experimental era formada por um conversor de frequência, um motor de indução, dois analisadores de energia e um transdutor de torque. Os rendimentos do conversor e do conversor + motor foram medidos para diversas frequências de alimentação e valores de torque. Os resultados apontaram para pequenas diferenças dos rendimentos do sistema, conversor + motor, em frequências de 35 a 60 Hz, que variaram aproximadamente de 0,82 a 0,76. Em frequências abaixo de 35 Hz o rendimento foi aproximadamente de 0,55 em dois fabricantes e 0,40 nos outros dois.

2.3 VÁLVULAS DE CONTROLE AUTOMÁTICAS

Os estudos de válvulas de controle automáticas para o setor de saneamento estão concentrados, em termos relativos, no desenvolvimento de modelos matemáticos para simulação estática e otimização da localização e grau de abertura daquelas. VAIRAVAMOORTHY e LUMBERS (1998) desenvolveram um modelo computacional de otimização para configurações de válvulas automáticas, a fim de minimizar as perdas de água em sistemas de distribuição de água. Segundo os autores, o método mostra uma vantagem significativa em comparação às técnicas previamente publicadas em termos de robustez e eficiência computacional.

O uso de válvulas no setor de saneamento apresenta-se como uma alternativa eficaz no controle de vazão e pressão. RODRIGUES (1998) apresentou as características técnicas e operacionais, obtidas através de ensaios experimentais, de 13 válvulas de controle automáticas de fabricantes diferentes, usualmente utilizadas no setor de saneamento. ANNECCHINI *et al.* (2007) avaliaram o comportamento do abastecimento de água em setores controlados por VRP instaladas nos municípios da Região Metropolitana da Grande Vitória-ES (Brasil), como ferramenta de combate às perdas reais de água da Companhia Espírito Santense de Saneamento - CESAN. A redução do consumo de água variou de 14 a 55% nos setores monitorados.

Na revisão do estado da arte, observa-se que os estudos começam a ser desenvolvidos para a simulação dinâmica de válvulas utilizadas em sistemas de abastecimento de água. PILLER e BREMOND (2001) desenvolveram um algoritmo que incorpora as configurações do dispositivo, dispensando a obrigatoriedade de posicionamento da válvula (aberta, fechada, etc) como dado de entrada para solução do problema. PRESCOTT e ULANICKI (2003) desenvolveram quatro modelos dinâmicos, com diversas técnicas, para representar o comportamento destas válvulas, comparando os resultados com dados experimentais.

ARAUJO *et al.* (2003, 2006) desenvolveram um modelo computacional com a capacidade de apoiar as decisões relativas à quantificação, localização e ângulo de abertura de válvulas em redes hidráulicas, com o objetivo de minimizar as pressões do sistema. O modelo é composto por um módulo de otimização (Algoritmos Genéticos) e o simulador hidráulico EPANET2 modificado.

Na área de dinâmica e controle foi encontrado apenas o trabalho de PRESCOTT e ULANICKI (2008), que estudaram experimentalmente o comportamento de transientes hidráulicos em redes hidráulicas controladas por VRP e demonstraram que, em certas condições, ocorrem oscilações indesejáveis e de grande pressão. Um controlador PID foi desenvolvido, em substituição ao convencional controlador hidráulico das VRP, como alternativa de minimização dos transientes.

2.4 SISTEMAS FUZZY

O controle de sistemas dinâmicos evoluiu de sistemas embasados nos antigos fundamentos da matemática, apresentados por *Aristóteles*, até os atuais, ditos “inteligentes”, que assim são classificados por imitarem a forma humana de tomar decisão.

Aristóteles, filósofo grego (384-322 a.C.), foi o fundador da ciência da lógica e estabeleceu um conjunto de regras rígidas, para que conclusões pudessem ser logicamente válidas e aceitas. Desde então, a lógica ocidental tem sido binária, ou seja, uma declaração é falsa ou verdadeira, não podendo ser empregadas situações intermediárias. Esta suposição e a lei da não contradição compõem a base do pensamento lógico.

Dentre os sistemas inteligentes podem-se destacar os sistemas fuzzy, desenvolvidos com base na Lógica Fuzzy. O sucesso deste tipo de sistema no controle de processos em diversas áreas da engenharia tem conduzido inúmeros pesquisadores a utilizar esta técnica no desenvolvimento de seus controladores. Não é raro, encontrarmos sistemas fuzzy desenvolvidos para processos que, até então, não tinham resultados satisfatórios.

Em 1965, *Lotfi Asker Zadeh* publicou uma pesquisa sobre as virtudes da imprecisão, lançando as bases da *Fuzzy Logic* (ZADEH, 1965), também chamada de Lógica Fuzzy, Lógica Nebulosa, Lógica Difusa e Lógica Borrosa (espanhol). Esta teoria apresentava a proposta do uso de funções que operassem dentro de um intervalo de números reais. O cientista mostrava que a vida está sujeita às imprecisões, e que o universo que nos envolve é complexo para as cartesianas conclusões. Por exemplo, no trânsito, cada motorista estipula a velocidade do automóvel de acordo com critérios que não podem ser expressos matematicamente.

A teoria da Lógica Fuzzy enfrentou forte resistência por parte da comunidade científica no seu início, principalmente por parte dos estatísticos norte-americanos.

Entretanto, a despeito de todo “preconceito” muitos pesquisadores vislumbraram as possibilidades que esta teoria oferecia e trabalhos surgiram em todo o mundo (ORTEGA, 2001). Segundo KOSKO (1995 *apud* MARTINS, 2004), *Zadeh* é personalidade marcante na ciência e tecnologia da nossa época, cujos trabalhos têm impacto em muitas áreas científicas, com uma forte influência nas áreas de controle de processos e tomada de decisão.

Em 1972 formou-se no Japão o primeiro grupo de pesquisas em Lógica Fuzzy, coordenado pelo professor *Toshiro Terano*. Em 1974, o professor *E. H. Mamdani*, do *Queen Mary College* - Universidade de Londres, aplicou pela primeira vez a Lógica Fuzzy no controle de sistemas (MAMDANI, 1993); segundo REYERO e NICOLÁS (1995 *apud* IVANQUI, 2005), após inúmeras tentativas frustradas em controlar uma máquina a vapor com diversos tipos de controladores, incluindo o controle *Proporcional - Integral - Derivativo* (PID). A partir daí, surgiram varias aplicações no controle de sistemas. A primeira aplicação industrial foi o controle de um forno para produção de cimento pela *F. L. Smidth* em 1976, na Dinamarca (HOLMBLAD e OSTERGAAD, 1982). Em 1977, *Didie Dubois*, na Alemanha, aplicou a Lógica Fuzzy em um estudo sobre condições de tráfego, surgindo o primeiro sistema especialista fuzzy (YEN e LANGARI, 1999 *apud* ORTEGA, 2001).

Em 1984, surgiu um controlador fuzzy para o tratamento de água no Japão. Em 1985 foi desenvolvido o primeiro chip fuzzy por *Masaki Togai* e *Hiroyuke Watanabe*, nos Estados Unidos da America (EUA). Em 1987 foi inaugurado com sucesso um trem controlado com Lógica Fuzzy (Japão) e um helicóptero não tripulado, totalmente controlado por um sistema fuzzy. Em 1988, começou a operar no *Yamaichi* um sistema de comércio financeiro fuzzy. Mas foi em 1990 que a teoria atingiu a popularidade com o lançamento no mercado da máquina de lavar roupas da *Matsushita*, da televisão da *Sony* e a câmera fotográfica da *Fujitsu* (ORTEGA, 2001).

Apesar do extenso uso da Lógica Fuzzy, ainda há alguns pesquisadores que questionam o uso desta técnica. ZADEH (2008) em resposta a estes pesquisadores⁶, respondeu em seu artigo “*Is there a need for Fuzzy Logic?*”: “*Fuzzy Logic is not fuzzy*” - a Lógica Fuzzy é uma lógica precisa de imprecisão e raciocínio aproximado. Mais especificamente, a lógica deve ser vista como a formalização de duas capacidades humanas notáveis. A primeira, a aptidão de tomar decisões racionais em um ambiente de imprecisão, incerteza e informação incompletas - em resumo, em um ambiente imperfeito.

⁶ E.g., *Susan Haack* escreveu no seu livro *Deviant Logic Fuzzy Logic*: “*Since neither of the main arguments that are offered in its favor is acceptable, I conclude that we do not need fuzzy logic*”.

E segundo, a habilidade para executar uma grande variedade de tarefas físicas e mentais sem qualquer cálculo matemático. Ainda segundo *Zadeh*, a maior e mais importante contribuição da lógica, que é extensamente não reconhecida, é seu alto poder de exatidão.

O grande alcance do impacto da Lógica Fuzzy no meio científico é comprovado quando se analisa o número de trabalhos na literatura que contêm a palavra fuzzy no título. Há mais de 53 mil documentos listados no banco de dados do *Database for Physics, Electronics and Computing - INSPEC* e mais de 15 mil no *Mathematical Reviews*. Atualmente, existem mais de 4800 patentes no Japão e mais de 1500 patentes nos EUA (ZADEH, 2008).

A Lógica Fuzzy é amplamente utilizada como sistema de apoio à decisão em todas as áreas da sociedade que corriqueiramente lidam com imprecisões, como na agricultura (MARKS *et al.*, 1995; MORENO *et al.*, 2006); na biomédica (SADEGH-ZADEH, 1999; BOSL, 2007); em diagnósticos médicos (AMENDOLA *et al.*, 2006; CARVALHO *et al.*, 2008); na informática (ALMEIDA, 2004; RESENDE, 2006); no meio ambiente (GRANDJEAN *et al.*, 2007; NEBOT *et al.*, 2008); na geofísica (SAINT-JOAN e DESACHY, 1995; MITRAKIS *et al.*, 2008); na previsão de cheias (ALVISI *et al.*, 2005); no setor de saneamento (MAMLOOK e AL-JAYYOUSI, 2003); no setor elétrico (MOTA, 2005); na engenharia de tráfego (MACHION, 1993; GHODS *et al.*, 2007); nos recursos hídricos (GALVÃO, 2000; LIMA, 2006); na química (SCHULZ, 1999; FONSECA e KNAPP, 2000); na ecologia (SALSKI, 1992; BARROS *et al.*, 2000); na economia (CAMPBELL e KELLY, 1996; TARRAZO e GUTIERREZ, 2000); na psicologia (SAITTA e TORASSO, 1981; AVERKIN e TARASOV, 1987); nas ciências sociais (SMITHSON, 1988), na educação (LAW, 1996); na tecnologia de naves espaciais (SHUAI *et al.*, 2006); no setor bibliotecário (VANDERLEI FILHO *et al.*, 2002); etc.

As teorias de controle “convencionais” se aplicam a uma grande variedade de sistemas onde o processo é bem definido. Várias técnicas de controle foram desenvolvidas e aplicadas com sucesso em diversos problemas. Entretanto, estas técnicas não são capazes de resolver problemas reais cuja modelagem matemática é impraticável (BORDON, 2004). Isto ocorre devido ao fato das expressões matemáticas (equações diferenciais, equações à diferença, funções de transferência) se tornarem muito complicadas de serem definidas, ou seja, as relações entre as variáveis do sistema são desconhecidas ou “inexatas”. Os sistemas fuzzy (SF) se apresentam como uma alternativa de controle bastante eficiente

para sistemas cujas plantas são de difícil modelagem, tempo morto elevado e/ou zona morta alta.

Nos casos de sistemas de distribuição de água, quando se deseja o controle de mais de uma variável (podendo ser a mesma grandeza, por exemplo, dois pontos de pressão), a modelagem matemática não é possível, já que para cada ponto de operação as equações mudam. Este fato indica fortemente para a utilização de técnicas de controle fuzzy e sistemas de controle adaptativos. Em alguns casos práticos, há aplicação de técnicas de controle PID, que são implementadas com procedimentos metodológicos simples, todavia o sistema não pode sofrer grandes alterações, com o risco de o controle ser instável.

Os sistemas de controle fuzzy possibilitam a automação de diversos processos, que vão de tarefas domésticas até o controle de sofisticados processos industriais. Têm-se sistemas fuzzy (SF) aplicados ao controle de sistemas, na agricultura (SHEN *et al.*, 2007; BURGOS-ARTIZZU *et al.*, 2007); na área biomédica (HELD e ROY, 2000; SKELLY e CHIZECK, 2001); na fisioterapia (KIRYU *et al.*, 2001); na robótica (SHHEIBIA, 2001; WAI *et al.*, 2003); em sistemas fotovoltaicos (SIMÕES e FRANCESCHETTI, 1999; WEISS e XIAO, 2003); etc.

Os SF podem ser utilizados conjuntamente com outras técnicas de controle, como Fuzzy + Algoritmos Genéticos (AG) (PARK *et al.*, 1995; GALDI *et al.*, 2008); Sistemas Neuro-Fuzzy (SNF) (PONCE *et al.*, 2004; LIN *et al.*, 2007b); Fuzzy PD (ZHANG *et al.*, 2008); Fuzzy PI (VIEIRA *et al.*, 2007; LIN *et al.*, 2007a); Fuzzy PID (PETROV *et al.*, 2003; QIANG *et al.*, 2008); Neuro-Fuzzy + AG (SENG *et al.*, 1999); Fuzzy PD + ACO (*Ant Colony Algorithm*) (SHUAI *et al.*, 2006); AG + Fuzzy PI/PD (KUO *et al.*, 1999); etc.

A seguir, são apresentadas algumas pesquisas que utilizaram sistemas fuzzy no controle da velocidade de rotação ou no controle de determinadas grandezas elétricas de motores de indução.

ANGEL *et al.* (1999) introduziram um modelo de Lógica Fuzzy para um SDA constituído de várias estações de bombeamento, tanques e reservatórios. O modelo considerava as condições operacionais e as contingências do sistema para realizar diagnósticos e previsões futuras. AWARE *et al.* (2000) controlaram a velocidade de rotação de motores de indução através de um controlador PID, um SF e um sistema de controle adaptativo neuro-fuzzy (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* - ANFIS). Os estudos apresentaram a superioridade do SF e neuro-fuzzy em relação ao controle PID, e uma melhor robustez da neuro-fuzzy em relação ao SF.

LUNA FILHO *et al.* (2002) controlaram o nível de um líquido de três tanques acoplados, com escoamento turbulento em sua saída, com técnicas de controle fuzzy e PI. SILVA (2003) utilizou sistemas de inferência fuzzy e neuro-fuzzy para identificar, em tempo real, vazamentos em dutos de transporte de petróleo. Os sistemas foram testados com novos dados coletados e foi constatado que as soluções são promissoras, obtendo-se bom desempenho na detecção de pequenos vazamentos com baixo custo computacional e confiabilidade.

BORDON (2004) desenvolveu um controlador digital simples e eficiente, utilizando conceitos de Lógica Fuzzy, para acionamento de motores de indução trifásico. Trata-se de um trabalho de engenharia aplicada, que apresenta o projeto de um SF que emprega uma estrutura padronizada para representação das funções de pertinência e permite efetuar a ponderação dos termos lingüísticos. Para avaliar o desempenho do controlador, foi implementado um sistema para acionamento do motor de indução, com frequência de operação controlada e limitação de corrente, capaz de gerar um perfil de frequência adequado, em tempo real, sempre que um novo valor para a frequência de operação fosse estabelecido.

DELIBAŞI *et al.* (2004) apresentam dois sistemas de controle (SF e PID), desenvolvidos no Labview™, de posição de motores de corrente alternada. Os resultados experimentais demonstraram um melhor desempenho do SF, que resultou em um tempo de assentamento (tempo para a resposta alcançar e permanecer dentro da faixa aceitável) menor e ausência de sobre-sinal (diferença entre o valor máximo atingido e o desejado).

Sistemas fuzzy são amplamente empregados em acionamentos de velocidade variável, particularmente em máquinas de indução (LIAW e WANG, 1991). IVANQUI (2005) desenvolveu um sistema fuzzy para controlar a velocidade de rotação de uma esteira ergométrica através de conversores de frequência, com a finalidade de minimizar os riscos da atividade cardíaca do usuário, permitindo ainda maximizar os benefícios que a atividade física pode proporcionar ao usuário deste equipamento. A contribuição técnica científica da pesquisa foi o desenvolvido de um controlador que se adapta ao perfil do usuário (idade, condicionamento físico, índice de massa corporal e zona de treinamento desejada). O SF desenvolvido é capaz de manter, indiretamente, a atividade cardíaca do usuário dentro da faixa de segurança indicada pela comunidade médica.

YATIM e UTOMO (2005) desenvolveram um sistema neuro-fuzzy para o controle de velocidade de rotação de compressores acionados por motores de indução. As

simulações e resultados experimentais demonstraram que o método proposto diminui o consumo de energia elétrica em relação ao controle escalar (U / f), para velocidades de rotação inferiores a cerca de 60% da velocidade de rotação nominal e para o sistema experimental estudado.

EL-BAROUDY e SIMONOVIC (2006) aplicaram a Lógica Fuzzy para avaliar medidas em sistemas de abastecimento de água complexos, considerando como critérios de decisão a confiabilidade-vulnerabilidade, a robustez e a resiliência. TUNYASRIRUT e WANGNIPPARNTO (2006) desenvolveram um sistema fuzzy para controlar o nível de água em um tanque horizontal de 33,9 litros. O controlador foi implementado em um microcontrolador MCS-51 usando linguagem C e foi comparado ao controlador PID, que apresentou resultados semelhantes.

LIMA (2007) desenvolveu um controlador fuzzy para o controle do potencial matricial da água no solo, visando à otimização de processos de irrigação, por meio da variação da velocidade de rotação do CMB. 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. A aplicação do controlador desenvolvido possibilita, na prática, maior desenvolvimento das culturas agrícolas, racionaliza o consumo de água e energia, e reduz os custos operacionais.

MO e WANG (2007) desenvolveram um controlador fuzzy PID para o controle de pressão na fabricação de diamante artificial, que é imprescindível para a qualidade do produto. Segundo os autores, este sistema é fortemente não-linear e possui um tempo morto muito elevado; fazendo com que o controlador PID tenha baixa eficiência e estabilidade, resultando também em um valor inaceitável de *sobre-sinal*. MO e WANG afirmaram que os resultados das simulações indicaram que o controlador fuzzy + PID tem uma excelente precisão, melhor comportamento dinâmico e estático, além de eliminar o *sobre-sinal*. Porém, ainda são necessárias aplicações práticas para complementar as simulações.

SOUZA *et al.* (2007) desenvolveram um sistema de controle fuzzy adaptativo para a otimização do rendimento de motores de indução. A técnica combina dois métodos distintos. O primeiro método trata de uma pesquisa *on-line* do ponto ideal de funcionamento baseado no método *Rosenbrock*, denominado de *Search Controller*, enquanto o segundo é o SF propriamente dito. Como a operação está sujeita a alterações constantemente, o *Search Controller* é mantido ativo para monitorar desvios do ponto

ótimo, garantindo, conforme os autores, uma eficiência ótima através da atualização das funções de pertinência do SF.

BEZERRA *et al.* (2008) e CAMBOIM (2008) apresentaram um SF, 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 SF baseados em regras estritamente lingüísticas.

Devido às questões ambientais estarem se sobressaindo fortemente no meio científico, há centenas de pesquisas publicadas que utilizam SF para aperfeiçoar a geração de energia renovável, *e.g.* WEISS e XIAO (2003) e YAOJIE *et al.* (2004). Os SF estão sendo amplamente utilizados no controle de velocidade de rotação de turbinas eólicas para geração de energia com conversores PWM, *e.g.* ABO-KHALIL *et al.* (2004), DAVIGNY e ROBYNS (2006) e VIEIRA *et al.*, 2007.

Apesar de inúmeras pesquisas aplicarem sistemas fuzzy para o controle de processos, e diversos trabalhos terem estudado o uso de conversores de frequência e válvulas de controle em distintas aplicações, não foi encontrado na literatura pesquisas similares à proposta nesta pesquisa, com exceção dos trabalhos apresentados por BEZERRA *et al.* (2008) e CAMBOIM (2008).

Vale destacar o trabalho apresentado por RIGHETTO (2002), o qual apresentou um modelo computacional para a otimização do sistema de distribuição de água que considera bombas e válvulas de controle. O modelo é baseado em AG para determinar regras operacionais otimizadas, de forma a satisfazer cinco índices de desempenho operacional ao longo de um ciclo de 24 horas de simulação: índice de consumo de energia elétrica; índice de nível de água em reservatório; índice de atendimento de demanda; índice de adequação da pressão média e índice de mudança operativa. As variáveis de decisão consideradas foram: o número de bombas em operação em cada elevatória; a velocidade rotacional das bombas e a condição de abertura das válvulas de controle de vazão. Para implementação do método foi utilizado um modelo hidráulico baseado no Método das Características para simular as potenciais soluções oferecidas pelo AG. O modelo foi aplicado a uma rede hipotética simples com resultados satisfatórios.

CAPÍTULO III

CONTROLE DE PRESSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

3.1 INTRODUÇÃO

O controle da pressão é fundamental para a redução de perdas reais (físicas) em sistemas urbanos de distribuição de água (SAVIC e WATERS, 1995; VITKOVSK'Y *et al.*, 2000; ALONSO *et al.*, 2000; THORNTON *et al.*, 2005; ISLAM *et al.*, 2005; ARAUJO *et al.*, 2006; PILCHER *et al.*, 2007). A influência da pressão nas perdas reais é conhecida há muito tempo pelos pesquisadores e técnicos das companhias de saneamento. No início dos anos 90 foi publicado no Reino Unido vários relatórios como resultado da *National Leakage Initiative*⁷, destacando o *Report G - Managing Water Pressure*, que se tornou uma referência tradicional da relação entre pressão e volume de vazamento. De modo geral, uma diminuição de 10% na pressão em grandes sistemas implica em uma redução aproximada de 11,5% no volume perdido por vazamentos.

Durante anos, utilizou-se no cálculo de estimativas de perdas de água o princípio baseado na raiz quadrada, onde a vazão perdida é proporcional a raiz quadrada da pressão na rede hidráulica. MAY (1994) apresentou a Teoria *Fixed and Variable Area Discharge paths* (FAVAD), onde a vazão perdida varia conforme a Eq. (3.1). A Teoria FAVAD também apontou que furos em tubulações flexíveis aumentam de diâmetro conforme a pressão aumenta, influenciando o valor de *NI* (AWWA, 2006).

⁷ Em 1989, a indústria da água do Reino Unido foi privatizada e regulamentada por um organismo governamental chamada OFWAT. Após a regulamentação do setor, maior ênfase foi dada a redução da perda de água, gerando pressão por medidas para o aumento da eficiência. Como resultado desta conjuntura, surgiu a *National Leakage Initiative*, que após extensas experiências em todo o Reino Unido, culminou em uma série de documentos técnicos (CHARALAMBOUS e SETFORD 2001).

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{NI} \quad (3.1)$$

onde:

Q - vazão do vazamento;

P - pressão no sistema; e

NI - expoente que depende do tipo de material.

Estudos realizados por LAMBERT (2001) recomendam os valores do expoente NI :

- ✓ 0,5 para tubos que não se deformam facilmente (tubos de materiais metálicos).
- ✓ 1,0 para casos de desconhecimento do sistema.
- ✓ 1,5 para orifícios com perdas de águas indetectáveis e que são sensíveis a variação de pressão, independem do material dos tubos.
- ✓ Entre 1,5 e 2,5 para orifícios com grandes perdas de água e em tubulações plásticas (PVC, PEAD).

Segundo análises realizadas por países como Inglaterra, Malásia, Canadá, Chipre, Brasil, EUA, Austrália e Nova Zelândia, os valores obtidos para o coeficiente NI oscilam entre 0,5 e 1,5, ocasionalmente alguns valores são acima de 1,5 (DELGADO *et al.*, 2008). Um modo prático de avaliar o volume de vazamentos em setores de abastecimento é assumir uma linearidade entre a pressão e a vazão, ou seja, $NI = 1$, geralmente, se obtém valores próximos aos reais. Todavia, sempre que possível o coeficiente deve ser determinado experimentalmente. A Figura 3.1 apresenta o gráfico da variação do volume perdido versus a variação da pressão para diversos valores do coeficiente NI .

Projetistas de sistemas de distribuição de água, geralmente, adotam, para o ponto crítico da rede hidráulica, o valor de 20 mca⁸. O ponto crítico é localizado na região mais desfavorável da rede hidráulica, onde a pressão é mínima, em geral é o ponto mais alto e/ou mais distante do(s) ponto(s) de alimentação do sistema. No Brasil a norma técnica ABNT (1994), preconiza que a pressão não deve ser inferior a 10 mca.

⁸ Metros de coluna de água (mH₂O). 1 mca = 0,1 kgf/cm² = 9,81 kPa.

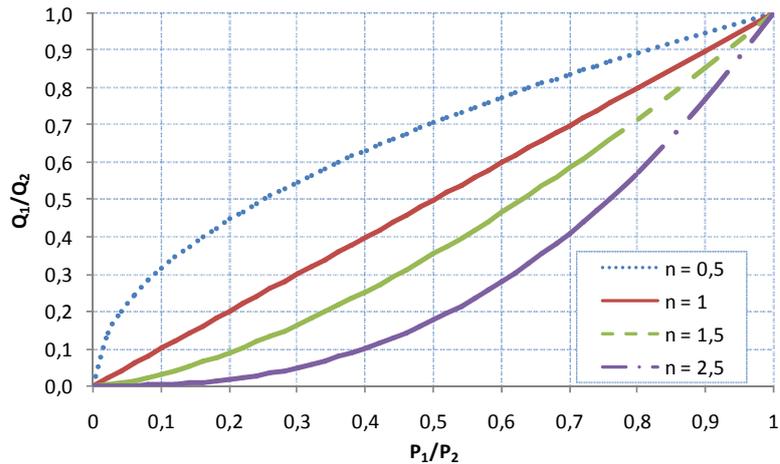


Figura 3.1 - Relação da variação da vazão perdida em função da pressão

PEARSON *et al.* (2005) afirmaram que uma das maiores vantagens da gestão da pressão é muitas vezes esquecido, que é a redução significativa da freqüência de novos arrebentamentos. BRAGALLI e SACCHI (2002 *apud* ALEGRE *et al.*, 2005) ressaltaram que a diminuição do número de novos rompimentos nas tubulações é, geralmente, o resultado mais impactante economicamente na gestão de pressões. LAMBERT (2001) apresentou dados de diferentes sistemas, no mundo, para demonstrar o impacto da pressão excessiva sobre a freqüência de rompimentos:

- ✓ Austrália: a redução em 40% na pressão do setor de uma cidade resultou na redução da freqüência de rompimentos em 55%.
- ✓ Auckland, Nova Zelândia: a redução na pressão média de 71 mca para 54 mca, num sistema de distribuição, resultou na redução da freqüência de rompimentos para o valor mais baixo observado em 8 anos.
- ✓ São Paulo, Brasil: a aplicação da gestão da pressão em 8 setores, com 140 km de tubulações, resultou numa redução da freqüência de rompimentos de 38,7%.

Dentre as ações de eficiência voltadas para a gestão eficiente de perdas, o controle da pressão apresenta-se como uma das alternativas mais eficientes para a diminuição do volume de água perdido em vazamentos nos sistemas de distribuição de água (GERMANOPOULOS e JOWITT, 1989; VITKOVSKY *et al.*, 2000; THORNTON, 2002; ARAUJO *et al.*, 2006; GARZÓN CONTRERAS e THORNTON, 2006; COVAS e RAMOS, 2007). As principais ações para o controle de pressão em sistemas de distribuição de água são:

- ✓ Setorização do sistema de distribuição de água.
- ✓ Instalação de válvulas redutoras de pressão.
- ✓ Utilização de bombas com velocidade de rotação variável.

Para a aplicação do sistema de controle desenvolvido nesta pesquisa é condição *sine qua non* que as três ações - setorização do sistema de distribuição de água, instalação de válvulas redutoras de pressão, utilização de bombas com velocidade de rotação variável - ocorram concomitantemente. A pesquisa englobou as três principais ações necessárias para o controle de pressão, que serão apresentadas detalhadamente a seguir.

3.2 SETORIZAÇÃO

Para o gerenciamento da pressão em sistemas de distribuição de água, primeiramente é necessário que a rede esteja dividida em setores e/ou sub-setores. O controle de pressões parte do zoneamento piezométrico, ou seja, da divisão do sistema em setores com comportamento piezométrico homogêneo, cada um com fronteiras conhecidas e bem delimitadas, onde se controlam todas as entradas de alimentação. Estes setores são chamados de *Zonas de Medição e Controle (ZMC)*. As ZMC podem ter dimensões muito variadas dependendo da topologia da rede, densidade populacional e densidade de ramais, podendo conter entre 500 a 5000 ligações (*Report J - WRC, 1994, apud COVAS e RAMOS, 2007*). A setorização possibilita a administração da pressão em cada distrito ou grupo de distritos de forma que a rede é operada no nível ótimo de pressão, além de facilitar o monitoramento das perdas de água. A Figura 3.2 apresenta um desenho esquemático mostrando a setorização, com a utilização de reservatórios, *booster* e válvulas.

Verifica-se que, na setorização clássica, o desnível geométrico máximo recomendado é 50 metros. Em regiões de topografia mais acidentada é necessária a utilização de um reservatório intermediário. Níveis piezométricos adequados, além de reduzir o volume perdido em vazamentos, possibilitam, de maneira geral, o aumento da vida útil da infra-estrutura do sistema; redução da frequência de novos rompimentos na rede de distribuição e conexões; redução de vazamentos em instalações privadas e transbordamentos de reservatórios domiciliares; redução do consumo relacionado com a pressão da rede, *e.g.* a rega de jardins (LAMBERT, 2002).

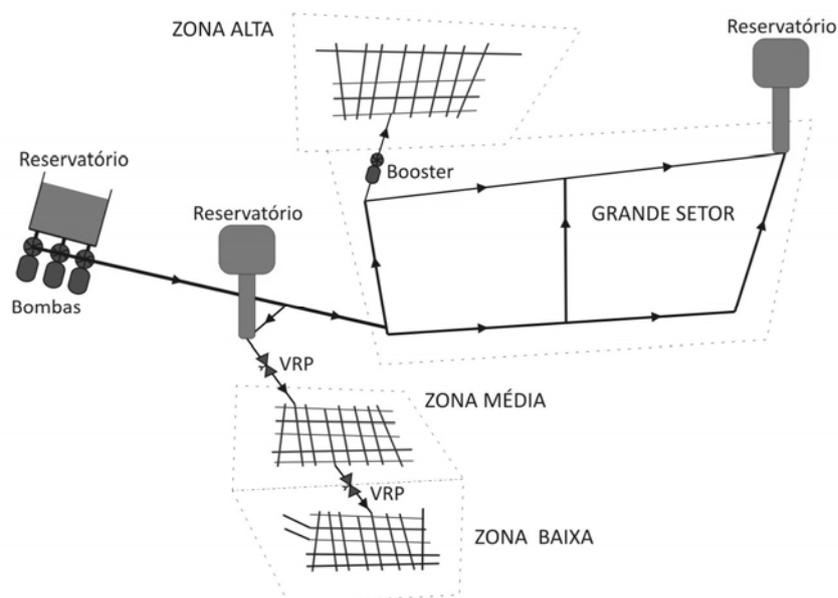


Figura 3.2 - Exemplo de um sistema de distribuição de água setorizado

A setorização é proveniente da escola de engenharia anglo-saxônica, e tem vindo progressivamente a ser preconizada internacionalmente. A dimensão das ZMC é muito variável, dependendo das condições locais, da topologia da rede, da densidade populacional e da densidade de ramais. Estes fatores também influenciam no número de pontos de entrada de alimentação, que por razões de economia e simplicidade de operação se procura uma configuração com um menor número possível (ALEGRE *et al.*, 2005). No Brasil, quando os sistemas são setorizados, é incomum a adoção de setores com mais de uma entrada de alimentação.

O uso da setorização visando o controle da pressão, de acordo com BRAGALLI e SACCHI (2002), deve avaliar os seguintes critérios:

- ✓ Definição de zonas homogêneas, do ponto de vista hidráulico, ou seja, estado de conservação da rede (incluindo os ramais) e tipologia dos padrões de consumo.
- ✓ Definição de zonas vulneráveis analisadas a partir de dados de arrebentamento de tubos.
- ✓ Minimização do uso de válvulas para isolamento do setor.
- ✓ Garantia dos níveis de serviço relacionados com o funcionamento hidráulico e a qualidade da água em cenários normais e de emergência.

3.3 VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO

Diversos autores (JOWITT e XU, 1990; KALANITHY e LUMBERT, 1998; VAIRAVAMOORTHY e LUMBERS, 1998; ALONSO *et al.*, 2000; ARAUJO *et al.*, 2002, 2003, 2006; RAMOS *et al.*, 2004) têm sugerido a alocação de válvulas como a principal alternativa para o controle de pressão em SDA.

As válvulas utilizadas em sistemas de distribuição de água são chamadas, nos países de língua portuguesa, de Válvulas Redutoras de Pressão, ou simplesmente, VRP. As VRP, como estruturas dissipadoras, são utilizadas nos sistemas hidráulicos como forma de uniformização e controle das pressões, dando origem a uma perda de carga localizada, mediante a dissipação de energia hidráulica, através do abaixamento dos valores de pressão a jusante.

A VRP é um dispositivo mecânico que permite reduzir, automaticamente, uma pressão variável de montante a uma determinada pressão a jusante. O mecanismo de controle de uma VRP pode ser mecânico ou eletrônico. No caso de controle mecânico da válvula, a regulagem previamente determinada é fixa, ou seja, garante uma pressão de jusante pré-estabelecida independentemente das condições de vazão e pressão de montante. Em se tratando de controle eletrônico, a atuação da VRP é feita através de programas pré-estabelecidos, que permitem monitorar e controlar as vazões e as pressões, garantindo condições adequadas de abastecimento ao longo das 24 horas do dia.

Atualmente, as VRP podem ser controladas não apenas para um único valor de pressão, mas para diversos patamares de pressão, permitindo, assim, uma gestão mais eficiente dos níveis de serviço e um melhor desempenho hidráulico do sistema. Os principais tipos de VRP utilizadas no setor de saneamento são:

- ✓ VRP com pressão de saída fixa (sem controlador eletrônico): é usada quando o sistema a ser controlado não tem mudanças significativas de demanda, bem como perdas de carga relativamente pequenas; os parâmetros de regulagem são fixados por um circuito de pilotagem⁹ (Figura 3.3);
- ✓ VRP com pressão proporcional (sem controlador eletrônico): a pressão de saída (a jusante da VRP) é proporcional a pressão de montante (Figura 3.4);
- ✓ VRP com modulação por tempo: é usada para controlar um sistema que apresenta grande perda de carga, porém de perfil regular de consumo. Assim, a VRP irá

⁹ O controle piloto é um acionamento direto, ajustável, projetado para permitir a variação do valor de referência da pressão a jusante da VRP.

trabalhar com patamares de pressão de saída ajustadas para um ciclo de 24 horas (Figura 3.5).

- ✓ VRP com modulação por vazão: é usada para controle em sistemas que apresentam grande perda de carga e mudanças no perfil de consumo, que podem ser no tipo de uso, na sazonalidade ou na população (Figura 3.6).

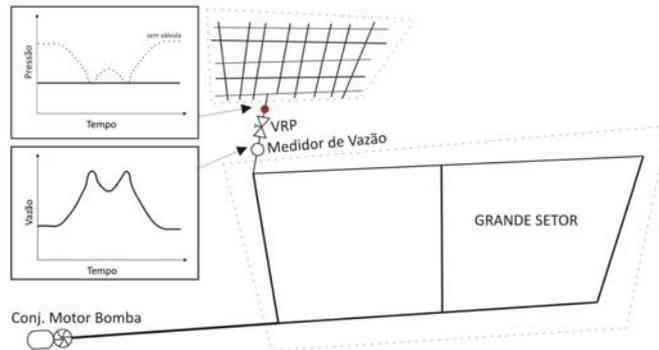


Figura 3.3 - Representação de operação de uma VRP com pressão de saída fixa

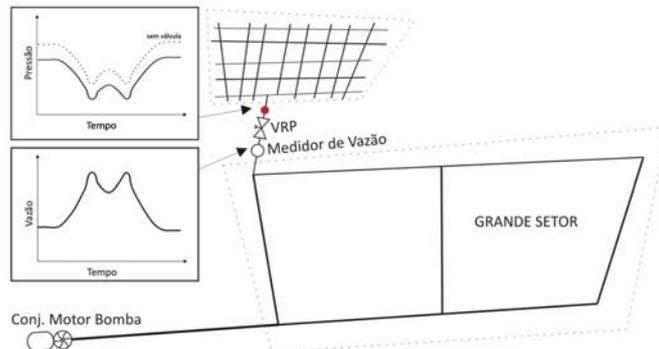


Figura 3.4 - Representação de operação de uma VRP com pressão de saída proporcional

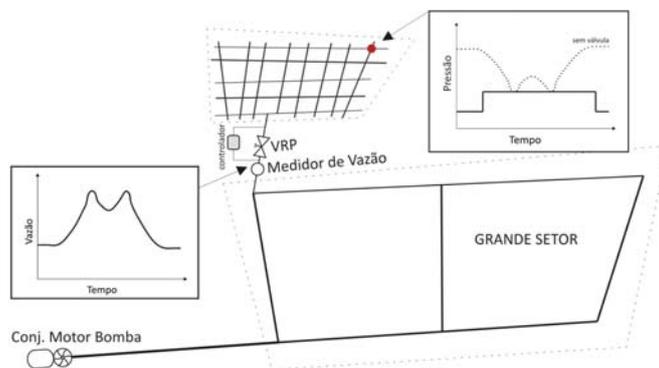


Figura 3.5 - Representação de operação de uma VRP com pressão de saída modulada por tempo com duas atribuições (4 horas e 22 horas), ciclo diário

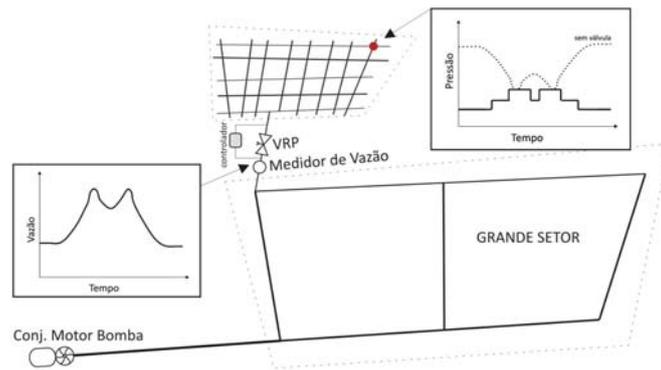


Figura 3.6 - Representação de operação de uma VPR com pressão de saída modulada pela vazão com três atribuições (vazão menor que 50% da máxima, vazão entre 50% e 80% da máxima, vazão acima de 80% da máxima), ciclo diário

Os dois últimos casos de modulação (controle eletrônico) podem ter como referência um transdutor localizado logo após a VPR ou em um ponto determinado conforme as características hidráulicas da rede (ponto crítico). O esquema de funcionamento de uma VPR com modulação por vazão é apresentado na Figura 3.7.

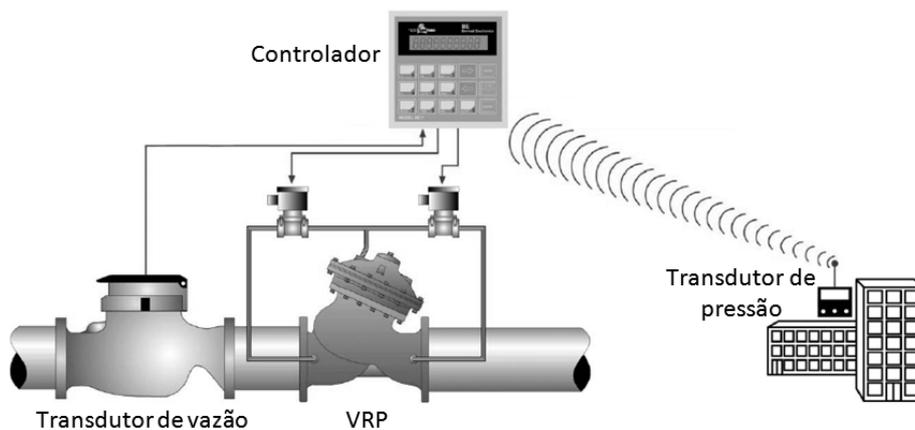


Figura 3.7 - Esquema de funcionamento de uma VPR com modulação por vazão¹⁰

CONEJO *et al.* (2004), STRIANI e LOPES (2004) e ANNECCHINI *et al.* (2007) apresentaram pesquisas que demonstraram o impacto do uso de VPR em sistemas da SABESP, DAE de São Caetano do Sul e CESAN, respectivamente.

No ano de 2001, a SABESP tinha cerca de 500 válvulas redutoras de pressão instaladas, com uma abrangência de 22% dos sistemas da companhia, que, segundo

¹⁰ Adaptada de <http://www.bermad.com>

avaliações internas, proporcionou a recuperação da vazão de 2900 L/s (CONEJO *et al.*, 2004), o que corresponde a mais do dobro do consumo da cidade de Campina Grande - PB (371 mil habitantes¹¹).

STRIANI e LOPES (2004) descreveram a utilização de 5 VRP como ferramentas de combate as perdas físicas de água no Município de São Caetano do Sul pelo Departamento de Água e Esgoto deste Município. Com as implantações das VRP no sistema de distribuição de água houve uma economia de mais de 125 mil metros cúbico de água por mês, com um tempo de retorno do investimento de 3 meses.

ANNECCHINI *et al.* (2007) publicaram um estudo da redução de vazão em 33 setores controlados por VRP na região metropolitana da grande Vitória - ES. Onde se verificou uma redução de vazão média de 28%, chegando até a 55% em alguns setores.

3.4 CMB OPERANDO COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO VARIÁVEL

A bomba centrífuga é o equipamento comumente utilizado para transportar líquidos no saneamento básico, na irrigação de lavouras, nos edifícios residenciais e na indústria, por operarem com sensível variação de vazão e pressão. A maioria dos SDA atuais possui vários CMB, seja para recalcar a água de mananciais de superfície ou de poços, seja para recalcar-las a pontos distantes ou elevados.

A bomba centrífuga funciona da seguinte maneira: uma fonte externa à bomba, geralmente um motor elétrico, gira um ou mais rotores dentro do corpo da bomba, movimentando o líquido e criando a força centrífuga que se transforma em energia de pressão e cinética. A diferença de pressão na sucção e no recalque da bomba é conhecida como altura manométrica total (AMT) e determina a capacidade da bomba em transferir líquido, em função das pressões que deverá vencer, expressa em energia de pressão.

A escolha de uma bomba centrífuga é feita essencialmente através da determinação da vazão e da AMT. As curvas características das bombas relacionam a vazão recalçada com a AMT, com a potência absorvida, com o rendimento e, às vezes, com a altura máxima de sucção. De modo geral, as curvas características têm o aspecto apresentado na Figura 3.8. O ponto de operação é determinado pelo cruzamento das curvas vazão versus altura manométrica total e do sistema.

¹¹ Fonte: <http://www.ibge.gov.br>

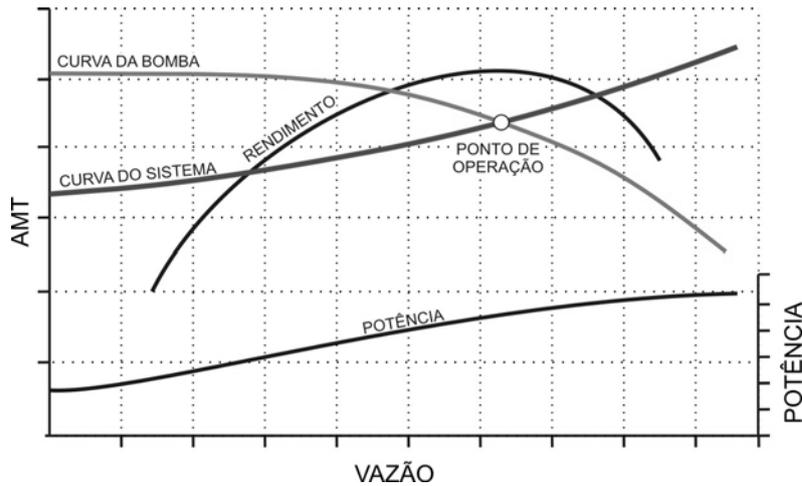


Figura 3.8 - Curvas característica de uma bomba centrífuga

A AMT corresponde ao desnível geométrico entre os níveis da água na tomada e na chegada acrescido das perdas de energia. A perda de energia, também denominada de perda de carga, é a energia dissipada devido ao efeito da viscosidade ou atrito interno, unido ao efeito da turbulência ou dos choques entre as partículas do fluido, mais as perdas localizadas (perdas nas conexões, peças, válvulas, etc).

A *velocidade de rotação* é caracterizada pela velocidade que a máquina de acionamento imprime à bomba. No caso de motor elétrico, essa velocidade é função direta da frequência e do número de pólos do motor. De acordo com a rotação, as bombas podem ser classificadas em:

- ✓ Bombas de baixa rotação menor ou igual a 1.200 rpm
- ✓ Bombas de média rotação 1.500 a 1.800 rpm
- ✓ Bombas de alta rotação maior que 3.000 rpm

A *eficiência* ou *rendimento* da bomba é a razão entre a potência útil (potência hidráulica) e a potência fornecida no eixo da bomba para realizar o trabalho. O rendimento é expresso pela Eq. (3.2) e a potência útil pela Eq. (3.3).

$$\eta_b = \frac{P}{P_{eixo}} \quad (3.2)$$

$$P_{ot} = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H}{\eta_b} \quad (3.3)$$

onde:

η_b - rendimento da bomba;

P_{ot} - potência, em kW;

P_{eixo} - é a potência fornecida pelo motor elétrico ao eixo da bomba, em kW;

Q - vazão, em m^3/s ;

ρ - densidade do líquido bombeado;

g - aceleração da gravidade, em m/s^2 ; e

H - altura manométrica total, em mca.

A Figura 3.9 uma instalação típica de bombeamento de água.

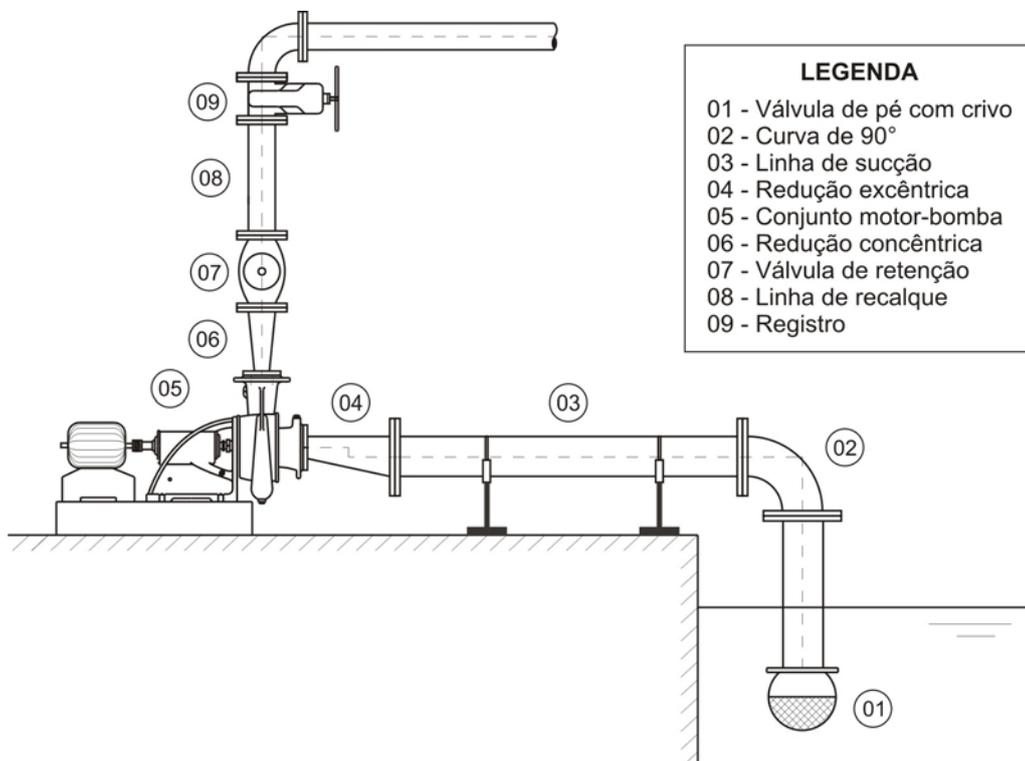


Figura 3.9 - Representação típica de um sistema de bombeamento de água

Determinados sistemas de bombeamento requerem algum tipo de controle de vazão e pressão, principalmente quando há variação da demanda no sistema de distribuição de água. O controle da vazão/pressão é necessário quando a carga requerida ao sistema de bombeamento varia ao longo do dia, o que ocorre, geralmente, quando há injeção direta no sistema, isto é, quando não existe reservatório de regularização. De acordo com a variação da curva de consumo ao longo do tempo, em redes hidráulicas, geralmente, a vazão atinge

um valor máximo entre às nove horas e às quinze horas e um valor mínimo durante a madrugada (pressões máximas). A Figura 3.10 exemplifica uma curva de perfil de consumo predominantemente residencial, que corresponde ao setor de Itaim Paulista, localizado na Região Metropolitana de São Paulo (TSUTIYA, 2004).

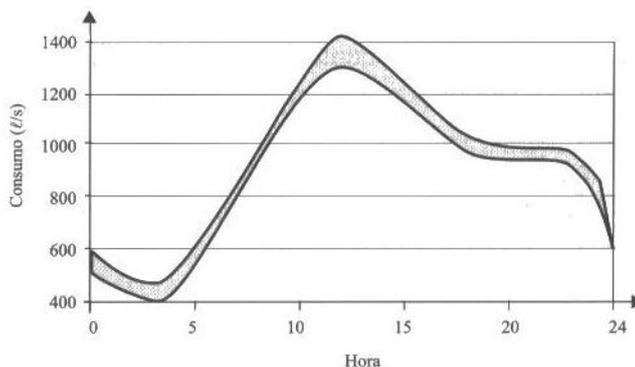


Figura 3.10 - Perfil de consumo do setor de Itaim Paulista, predominantemente residencial
(Fonte: TSUTIYA, 2004)

Os sistemas de bombeamento convencionais são operados usualmente através do controle da vazão obtido por válvulas tipo globo, gaveta ou borboleta, sendo manobradas de acordo com as necessidades operacionais de demanda (RODRIGUES, 2007). As alternativas mais usuais para a variação da vazão/pressão são o **by-pass**, **válvulas de manobras** ou **variadores de velocidade de rotação de bombas**.

O controle de vazão/pressão através de válvulas de manobras é feita por meio do acréscimo de perda de energia (carga), deslocando o ponto de operação do sistema (intersecção da curva vazão versus AMT com a curva do sistema) progressivamente sobre a curva da bomba. A Figura 3.11 apresenta as curvas típicas da operação com válvulas de manobras, onde se destaca a perda de energia. Além das perdas, destaca-se que a vida útil dos equipamentos é diminuída e a energia excedente pode gerar vibrações no conjunto motor-bomba, provocando danos aos elementos do sistema (PEMBERTON, 2005).

WOOD e REDDY (1994 *apud* RODRIGUES, 2007) definem muito bem o controle de vazão/pressão através de válvulas, afirmando ser o mesmo que “[...] *conduzir um carro com o freio de mão acionado: o resultado é o desperdício desnecessário de energia*”.

Outro método “convencional” e ainda comum em sistemas de bombeamento é o uso do *by-pass*. O *by-pass* é a instalação de uma tubulação que tem a função de transportar

parte da água bombeada (recalcada) ao reservatório de sucção (Figura 3.12). A Figura 3.13 apresenta as curvas características típicas do controle de vazão através de *by-pass*.

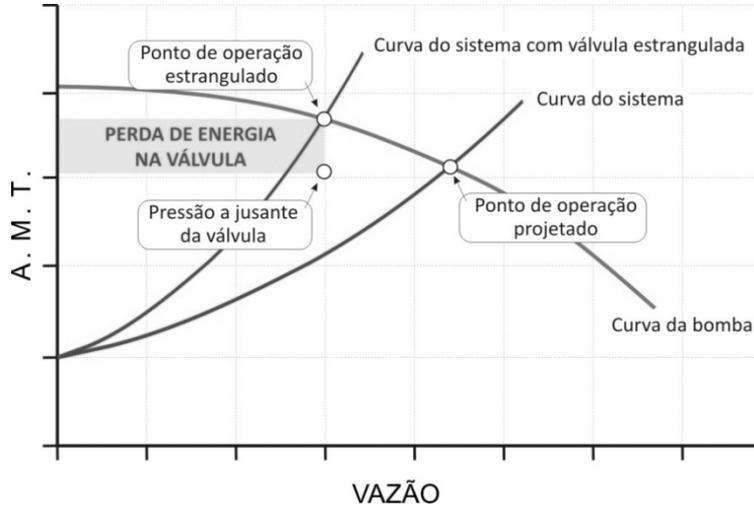


Figura 3.11 - Curvas características com controle de vazão e pressão através de válvulas

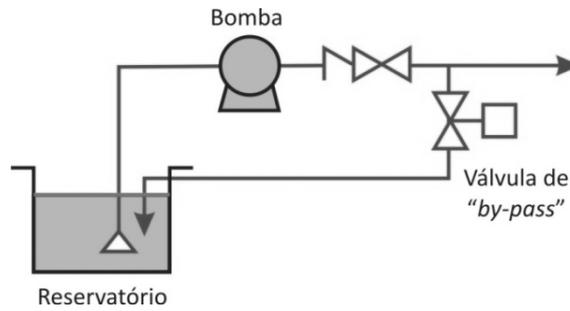


Figura 3.12 - Esquema do *by-pass* para controle de vazão

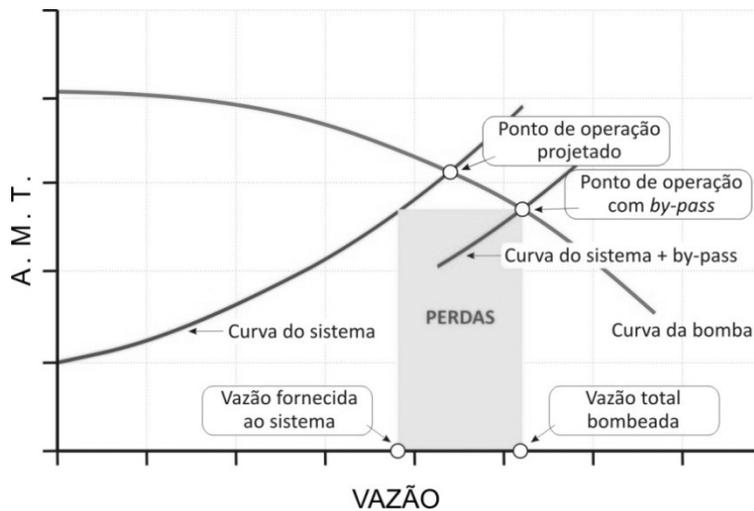


Figura 3.13 - Curvas características com controle de vazão e pressão através de *by-pass*

É fato que a alternativa mais eficiente para a variação da vazão e pressão é o controle de velocidade de rotação de bomba (EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE, 2004). À medida que a velocidade de rotação decresce, a energia consumida diminui gradativamente. Estudo de MENGARDA (2005) apresenta, na Figura 3.14, a comparação entre os consumos de bombas centrífugas “típicas” dos três métodos de controle de vazão/pressão mais utilizados. Pode se verificar nitidamente a economia do uso de conversores de frequência acoplados a CMB sobre os outros dois métodos.

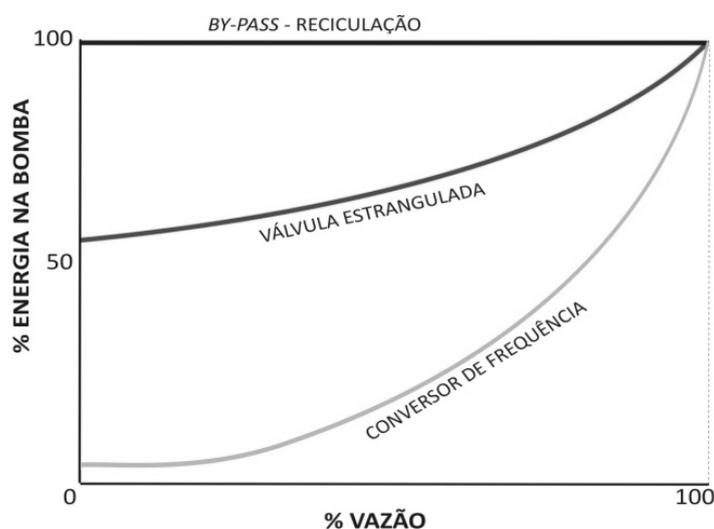


Figura 3.14 - Comparativo do consumo de energia para os métodos de controle de pressão/vazão: *by-pass*, válvula de manobra e conversor de frequência

(Fonte: adaptado de MENGARDA, 2005)

As equações que relacionam a vazão, altura manométrica total (AMT) e a potência com a velocidade de rotação são conhecidas como *Leis de Similaridade* (Eq. 3.4, Eq. 3.5 e Eq. 3.6) e são apresentadas por inúmeros autores (VIANA, 2001; ALVES *et al.*, 2002; IRVINE e GIBSON, 2002; EVERHART, 2004; STRUTHERS, 2005; THEISEN, 2005; GAMBICA, 2007; ARANTO, 2008; BEZERRA *et al.*, 2008).

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{Relação vazão } x \text{ rotação} \quad (3.4)$$

$$\frac{AMT_1}{AMT_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad \text{Relação AMT } x \text{ rotação} \quad (3.5)$$

$$\frac{Pot_1}{Pot_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad \text{Relação potência x rotação} \quad (3.6)$$

Em certos casos particulares, a aplicação de bombas operando com variação da velocidade de rotação oferecem grande potencial para a redução do consumo de energia. Os resultados vão freqüentemente bem além do ganho quantitativo de energia, e pode incluir aumento do desempenho e confiabilidade do sistema de distribuição de água, além de, na maioria dos casos, aumentar a vida útil das instalações.

Variar a velocidade de rotação tem efeito direto sobre o desempenho das bombas. VALLILO *et al.* (1981 *apud* RODRIGUES, 2007). CRESPO (2001). EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004) e GAMBICA (2007) sugerem, para o melhor aproveitamento do rendimento da bomba, que o ponto referente à demanda máxima esteja situado a direita da curva de melhor rendimento, com isso na maior parte do tempo o ponto de operação do sistema se mantém próximo do ótimo. A Figura 3.15 (adaptada de EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE, 2004) apresenta um exemplo onde se diminui a velocidade de rotação do conjunto motor-bomba e o ponto de operação permanece próximo à curva de rendimento máximo.

Nos sistemas onde o desnível geométrico é predominante na variação da altura manométrica, a curva do sistema começa a partir do valor da perda estática e, conseqüentemente, uma pequena redução na velocidade de rotação da bomba proporciona uma grande variação da vazão e na eficiência da bomba (Figura 3.16). Portanto, deve-se ter cautela na aplicação das *Leis de Similaridade* para dimensionamento de equipamentos.

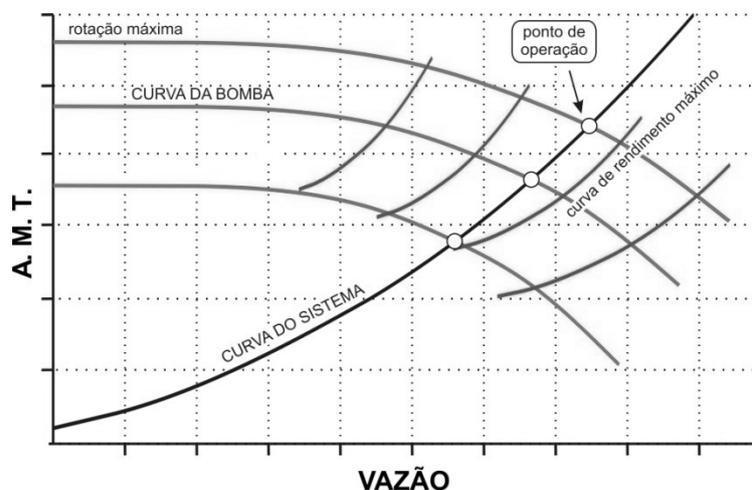


Figura 3.15 - Exemplo do comportamento das curvas características para um sistema com predominância de perda de carga na altura manométrica

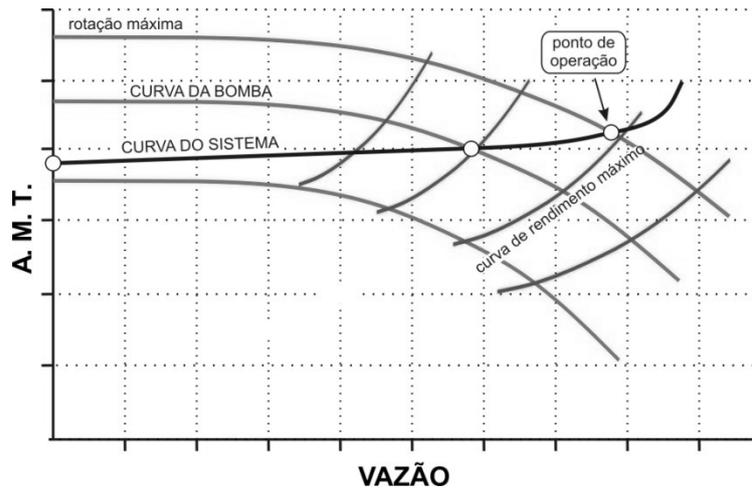


Figura 3.16 - Exemplo do comportamento das curvas características para um sistema com predominância do desnível geométrico na altura manométrica

Quando operada dentro de padrões admissíveis, o controle da velocidade de rotação ainda possibilita o aumento da vida útil da bomba, diminuição da vibração e do barulho.

3.5 CONVERSORES DE FREQUÊNCIA

Sendo o motor elétrico de indução o propulsor de quase todos os sistemas de bombeamento, faz-se necessário o seu conhecimento, mesmo que de forma primária, para melhor compreensão do funcionamento do sistema. O motor assíncrono ou de indução com rotor tipo gaiola de esquilo é o mais utilizado na indústria. De acordo com GARCIA (2003), esse tipo de motor é responsável por mais de 90% da energia motriz produzida através da eletricidade no país. Além do baixo custo, podem citar como características: a robustez, alta confiabilidade, simplicidade, boa eficiência e fácil manutenção.

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

Ao longo do estator têm-se grupos trifásicos de bobinas em cada pólo; esses grupos seguem uma ordem predeterminada e repetem-se tantas vezes quanto o número de

pares de pólos que houver. O campo eletromagnético atuante gira (campo girante) segundo a frequência da rede e o número de pares de pólos conforme a Eq. (3.7).

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (3.7)$$

onde:

n_s - velocidade de rotação síncrona, em rpm;

f - frequência da rede, em Hz; e

p - número de pólos do motor.

A Eq. (3.7) reflete o número de rotações efetuadas em um minuto pelo campo eletromagnético gerado nas bobinas existentes do primário (estator) do motor. Na verdade, para produzir um conjugado e este produzir velocidade de rotação no rotor, o campo eletromagnético do estator induz uma corrente nos condutores que formam as bobinas do rotor que será tanto maior quanto maior for o número desses condutores cortados pelo fluxo magnético originário do campo. No entanto, quanto mais próxima estiver a velocidade de rotação do rotor da velocidade de rotação do campo girante, menor será o número de condutores que o fluxo magnético cortará, diminuindo, conseqüentemente, o valor da corrente induzida e o conjugado produzido. Em decorrência, a velocidade de rotação do rotor nunca alcança a velocidade de rotação de sincronismo porque, neste caso, não haveria corrente induzida no rotor e o conjugado seria nulo. A Figura 3.17 apresenta o esquema de um estator de uma máquina de indução. A relação entre a velocidade de rotação do campo girante e a velocidade de rotação do rotor chama-se escorregamento e é dada pela Eq. (3.8).

$$s = \frac{n_s - n_R}{n_s} \quad (3.8)$$

onde:

s - escorregamento; e

n_R - velocidade de rotação do eixo do motor, em rpm.

Portanto, com base na Eq. (3.7) e Eq. (3.8), tem-se que a velocidade de rotação (n_R) do eixo de motores é calculada através da Eq. (3.9).

$$n_R = \frac{120 \times f}{p} (1 - s) \quad (3.9)$$

A Figura 3.17 descreve um estator de uma máquina de indução, enquanto a Figura 3.18 apresenta os componentes do motor de indução com rotor tipo gaiola de esquilo.

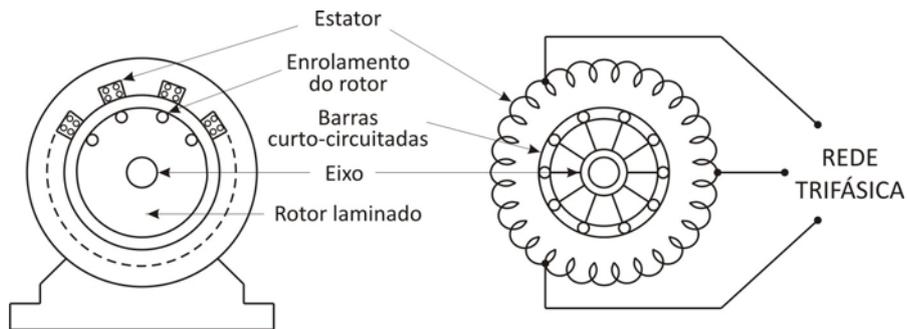


Figura 3.17 - Estator de uma máquina de indução

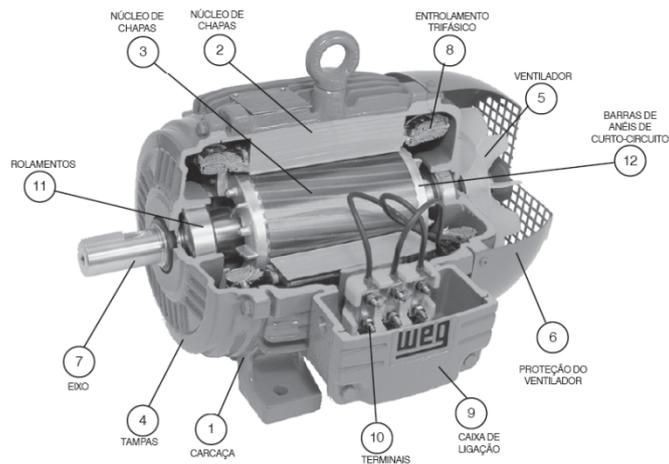


Figura 3.18 - Componentes do motor de indução com rotor tipo gaiola de esquilo¹²

A potência mede a rapidez com que a energia é aplicada ou consumida, ou seja, é a energia ou trabalho total dividido pelo tempo. Em sistemas elétricos, a potência instantânea desenvolvida por um dispositivo de dois terminais é o produto da diferença de potencial entre os terminais e a corrente que passa através do dispositivo, dada pela Eq. (3.10). A potência também pode ser expressa em função do conjugado - Eq. (3.11).

$$Pot = I * U \quad (3.10)$$

¹² Fonte: www.weg.com.br.

$$Pot = (2*\pi/60) * C * n \quad (3.11)$$

onde:

Pot - potência, em W;

I - corrente elétrica, em A;

U - tensão elétrica, em V;

π - constante pi ;

C - conjugado, em Nm; e

n - velocidade de rotação, em rpm.

A Figura 3.19 apresenta as curvas típicas de potência, corrente de estator e conjugado no eixo em função do escorregamento para motores de indução trifásicos.

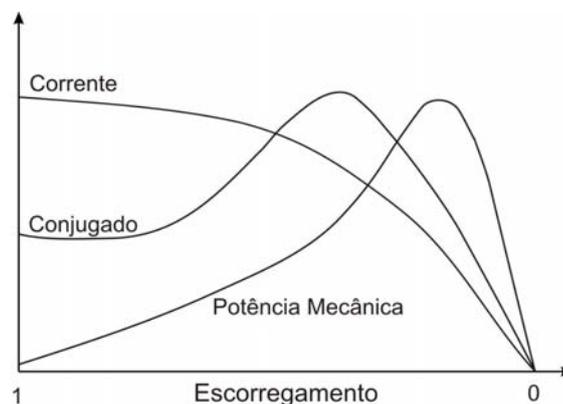


Figura 3.19 - Características eletromecânicas de um motor de indução típico.

O motor elétrico absorve energia elétrica da linha e a transforma em energia mecânica disponível no eixo. O rendimento define a eficiência com que é feita esta transformação, isto é, o rendimento do motor é a relação entre a potência útil (potência mecânica disponível no eixo) e a potência absorvida (potência elétrica que o motor retira da rede). É importante que o rendimento seja alto, basicamente por dois motivos, o primeiro, porque um rendimento alto significa perdas baixas e, portanto, um menor aquecimento do motor; e o segundo porque, obviamente, quanto maior o rendimento, menor o consumo de energia elétrica.

A Figura 3.20 mostra as curvas típicas de potência desenvolvida, corrente de estator e conjugado no eixo em função do escorregamento.

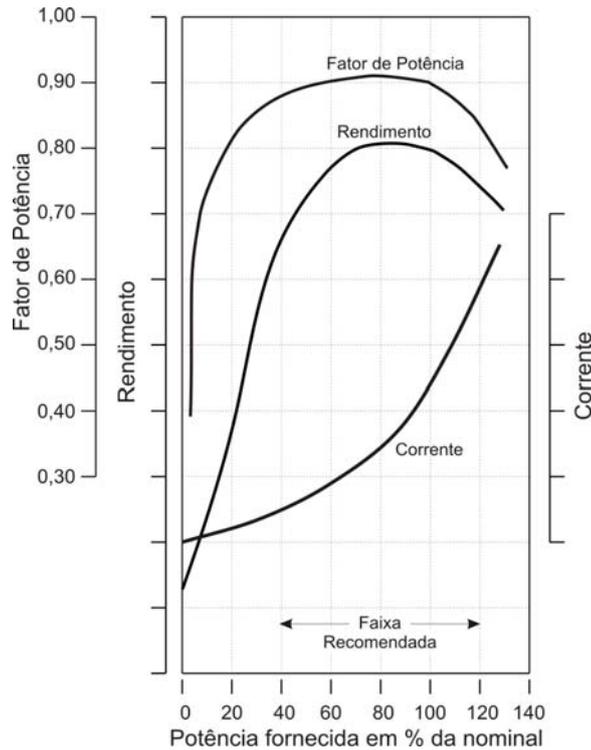


Figura 3.20 - Curvas características típicas de motores de indução trifásicos

Os conversores são compostos, em geral, por uma ponte retificadora (diodos), um circuito intermediário de barramento de corrente contínua (filtro capacitivo) e um bloco conversor constituído de transistores de potência. O diagrama esquemático do conversor é apresentado na Figura 3.21.

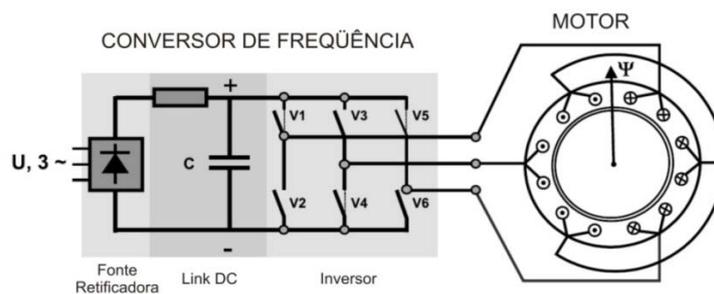


Figura 3.21 - Circuito esquemático de um conversor de frequência¹³

A ponte retificadora de diodos transforma a tensão alternada de entrada em uma tensão contínua que é filtrada por um banco de capacitores. A tensão contínua alimenta uma ponte conversora formada por transistores de potência (BJT, IGBT, ou MOSFET) e diodos. O controle das tensões de base dos transistores é feito pelo circuito de comando

¹³ Figura adaptada de <http://www.abb.com>.

(que possui um microcontrolador), que permite a geração do pulsos de tensão elétrica que alimenta o motor com tensão e frequência controladas (MASCHERONI *et al.*, 2005); esta técnica é conhecida como modulação por largura de pulso - PWM (*Pulse Width Modulation*). A estratégia PWM gera de ondas senoidais de frequência variável com resolução de até 0,01Hz. O conversor é composto de seis chaves eletrônicas implementadas numa configuração como mostrada na Figura 3.22. Dependendo da combinação de chaves abertas ou fechadas pode-se obter na saída do conversor formas de ondas diferentes. Estas chaves são implementadas no conversor de frequência com dispositivos semicondutores chamados de IGBT - *Transistor Bipolar com Porta Isolada* (*Insulated Gate Bipolar Transistor* em inglês).

A Figura 3.23 mostra o padrão de chaveamento da tensão e a corrente resultante numa fase do motor, quando utilizada a técnica PWM para comando dos transistores de potência tipo IGBT. O diagrama apresentado mostra as seis posições e a troca da direção do fluxo. Na prática, o controle não é tão simples, porque o fluxo magnético gera correntes no rotor, e as interferências externas, tais como a temperatura ou mudança da carga, podem comprometer o processo. No entanto, a tecnologia atual supera com eficácia estes problemas.

Os conversores devem ser dimensionados pela corrente do motor, porém é importante observar o tipo de conjugado (constante, linear, ou quadrático), precisão de controle, partidas e frenagens, regime de trabalho, e tipo de aplicação.

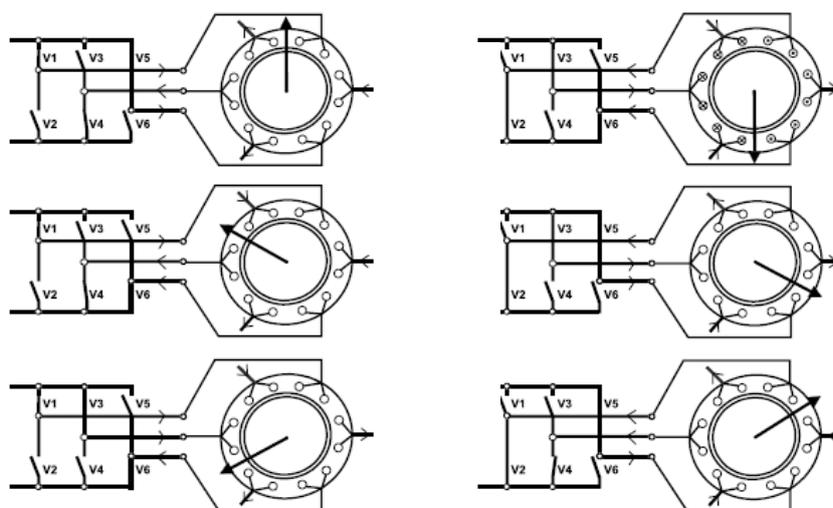


Figura 3.22 - Esquema de chaveamento do conversor de frequência¹⁴

¹⁴ Fonte: <http://www.abb.com>.

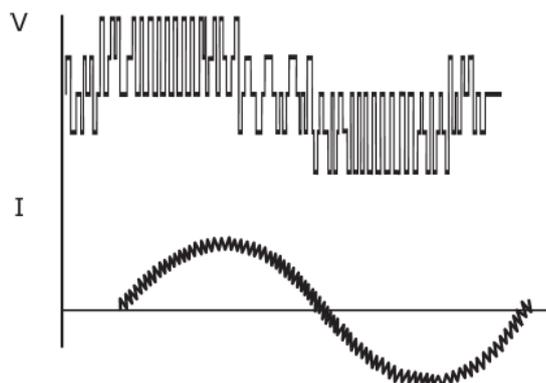


Figura 3.23 - Padrão de chaveamento da tensão e a corrente resultante numa fase do motor alimentado com conversor de frequência¹⁵

Existem dois tipos de conversores de frequência (CF) disponíveis no mercado: o escalar e o vetorial. A diferença entre o controle escalar e o vetorial consiste, basicamente, na relação entre o torque e a velocidade de rotação. O CF escalar opera baseado numa estratégia de comando “ U/f constante”, ou seja, a razão entre a tensão e a frequência é constante até a tensão atingir a tensão nominal. Quando a tensão atinge o valor nominal, esta permanece constante e há então apenas a variação da frequência que é aplicada ao enrolamento do estator. A Figura 3.24 apresenta a variável da tensão em função da frequência.

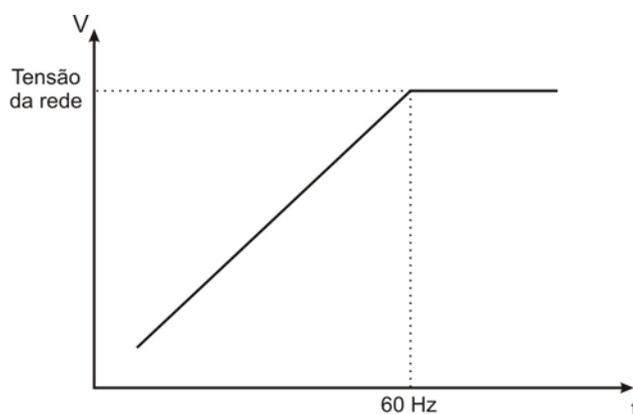


Figura 3.24- Curva representativa da variação da tensão em função da frequência

O conversor com controle vetorial possui uma maior precisão de regulação de velocidade de rotação; maior performance dinâmica; controle de torque linear para aplicações de posição ou de tração; operação suave em baixa velocidade de rotação e sem oscilações de torque, mesmo com variação de carga. Este tipo de controle é indicado para conversores que

¹⁵ Fonte: <http://www.weg.com.br>.

vão operar com torque elevado em baixa velocidade de rotação, controle preciso de velocidade e torque regulável. Com isto, determina-se uma área acima da frequência nominal que é conhecida como região de enfraquecimento de campo, onde o fluxo começa a decrescer e, portanto, o torque também começa a diminuir. Assim, a curva característica do conjugado versus velocidade de rotação do motor, acionado com conversor de frequência, pode ser colocada de acordo com a Figura 3.25.

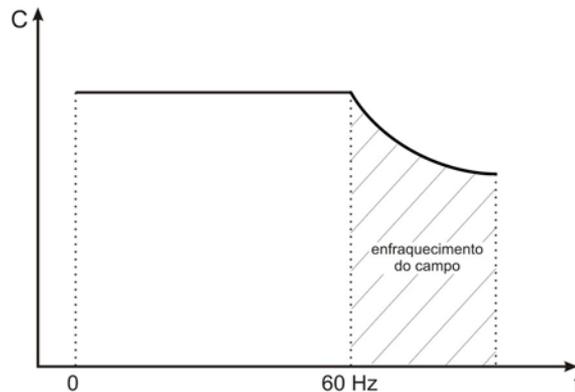


Figura 3.25 - Curva característica conjugado versus frequência de alimentação

Nota-se, na Figura 3.25, que o conjugado permanece constante até a frequência nominal e, acima desta, começa a decrescer. A potência de saída do conversor de frequência comporta-se da mesma forma que a variação U/f , ou seja, cresce linearmente até alcançar a frequência nominal e permanece constante acima desta (ver Figura 3.26). Com a variação da frequência obtém-se um deslocamento paralelo da característica conjugado versus velocidade de rotação em relação à curva característica para a frequência nominal como mostra a Figura 3.27.

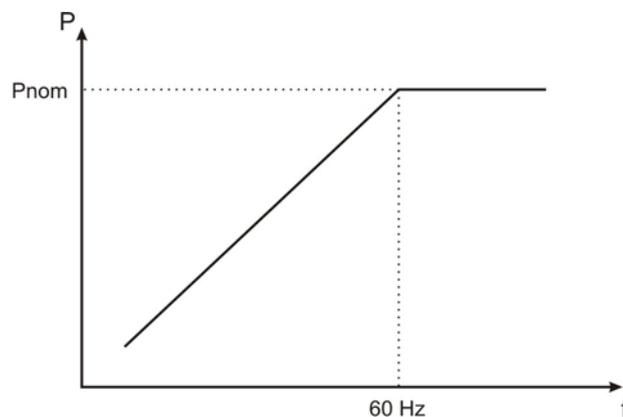


Figura 3.26 - Curva característica da potência em função da frequência

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

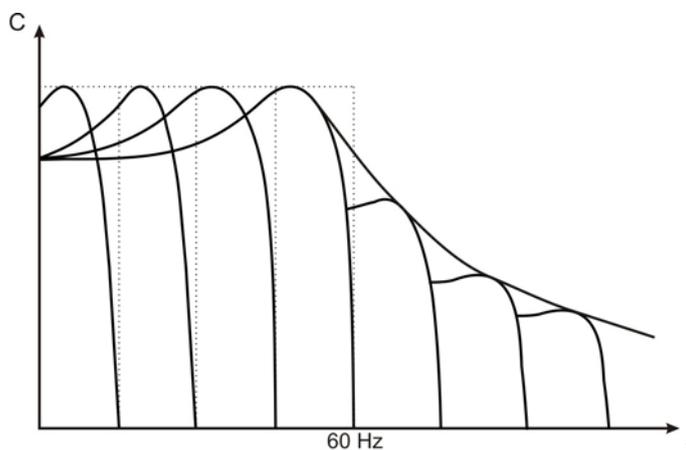


Figura 3.27 - Curva de conjugado com tensão proporcional e frequência

Entretanto, na realidade, para que essas duas faixas possam ser possíveis, há necessidade de se considerar os seguintes fatores: (a) como o motor autoventilado opera com velocidade de rotação menor do que a nominal, a sua capacidade de refrigeração será diminuída; (b) a corrente de saída dos conversores apresenta uma forma não perfeitamente senoidal, implicando na geração de harmônicas. Devido a estes fatores, é necessário reduzir o conjugado e a potência admissível para o motor.

No que diz respeito à faixa de rotação recomendada, para a operação de CMB, há muita controvérsia no meio científico e entre os técnicos. Há uma tendência entre os projetistas adotar a faixa de 50 a 100% da velocidade de rotação nominal, abalizados por algumas literaturas (EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE, 2004 e TSUTIYA, 2007), ver Figura 3.28. É certo que em baixas rotações existe uma queda substancial no rendimento do sistema de bombeamento, entretanto, o principal argumento utilizado pelos técnicos é o superaquecimento dos rolamentos do motor. Segundo documento da WEG (MASCHERONI *et al.*, 2005), em condições normais, não existem problemas com relação à operação em baixas frequências, uma vez que, com a diminuição da rotação da bomba, haverá também uma diminuição do conjugado resistente da carga (de forma quadrática), diminuindo-se, conseqüentemente, a corrente aplicada ao motor, não havendo, portanto, problemas de superaquecimento por redução de ventilação nem de sobrecarga no motor.

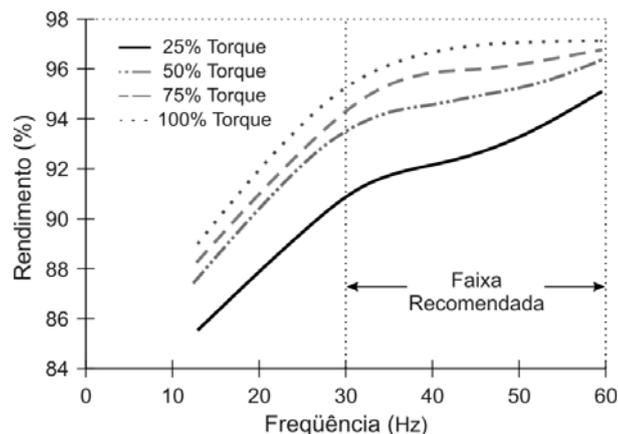


Figura 3.28 - Região de operação recomendada para o conversor de frequência (adaptado de EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE, 2001 *apud* TSUTIYA, 2007)

Na aplicação de conversores, de frequência em motores existentes, devem-se ter cuidados com as características elétricas reais do motor e do conversor, caso contrário, há um considerável risco de fracasso. Conversores de frequência geram picos de tensão e produzem harmônicos que causam aquecimento nos rolamentos do motor. Há fabricantes de motores que fornecem motores específicos para uso com conversores.

Na prática, no setor de saneamento, é necessária a análise cautelosa do uso de motores com a frequência da tensão de alimentação variando de 0 a 60 Hz, porque na maioria dos casos é mais viável, tecnicamente e economicamente, a instalação de conjuntos motor-bomba trabalhando em paralelo, com apenas um ou dois sendo acionados por conversores. O ideal é a avaliação técnica e econômica de cada caso.

As principais vantagens dos conversores de frequência em sistemas de bombeamento são:

- ✓ Aumento da confiabilidade do sistema.
- ✓ Aumento da vida útil da bomba, mancais e vedações.
- ✓ Controle da corrente do motor elétrico.
- ✓ Economia de energia.
- ✓ Aumento do fator de potência.
- ✓ Elimina a necessidade de válvulas para partir e parar o bombeamento.
- ✓ Melhor controle do processo.
- ✓ Minimiza a necessidade de paradas do sistema ou elimina os saltos de produção.
- ✓ Possibilita a automação do sistema.
- ✓ Diminuição do número de rompimentos nos tubos.

Esta última vantagem ainda não tinha sido levantada pela literatura como resultado direto da aplicação de conversores. COVAS (1998 *apud* COVAS e RAMOS, 2007) verificou que a probabilidade de ocorrência de rompimentos aumenta mais com a amplitude de oscilação de pressão do que com o seu valor médio e máximo. Portanto, como a oscilação de pressão na rede praticamente é eliminada com o uso de conversores de frequência em sistemas de distribuição de água, há a minimização da ocorrência de novas rupturas nas redes hidráulicas.

Como desvantagens da aplicação de conversores de frequência, têm-se:

- ✓ Alteração das condições de operação das bombas, tais como o rendimento, o *Net Positive Suction Head* (NPSH), a potência, etc.
- ✓ Custo inicial relativamente alto.
- ✓ Elevação da temperatura na superfície dos motores; em algumas aplicações, como na indústria petroquímica, é necessária a instalação de ventilação forçada, para que não haja risco de explosão.
- ✓ Geração de distorções harmônicas da tensão.
- ✓ Limitação da distância entre o conversor de frequência e o motor, contudo, há equipamentos adicionais para superar este problema, e.g. o filtro de interferência de frequência de rádio.
- ✓ Os componentes eletrônicos do conversor não são tolerantes a locais corrosivos e com grande umidade.
- ✓ Possibilidade, em alguns casos, de danos na isolação dos motores.
- ✓ Requer manutenção especializada em eletrônica.

Os conversores de frequência melhoraram muito desde que o primeiro foi lançado no mercado no fim da década de 60 (ERKINHEIMO *et al.*, 1997 *apud* ARANTO, 2008). Os conversores consomem, em geral, de 2 a 5% da potência do sistema, ou seja, possuem uma eficiência de cerca de 95 a 98% (ARANTO, 2008), todavia há uma redução da eficiência do motor elétrico.

É essencial, antes de qualquer aplicação, o correto dimensionamento dos componentes do sistema (bomba, motor e conversor de frequência). Ao selecionar uma bomba centrífuga, conjuntamente com um conversor de frequência para um sistema de bombeamento com desnível geométrico estático, a bomba deve ser escolhida tal que a vazão máxima esteja ao lado direito do ponto ótimo de operação (melhor ponto de

eficiência), porque à medida que a velocidade de rotação cai, o ponto de operação move-se em direção ao ponto ótimo de operação. A exceção é para aplicações onde a vazão é constante e só há mudanças na altura manométrica fornecida ao sistema, neste caso, é recomendado selecionar a bomba, com base na pressão máxima, e à esquerda do ponto ótimo de operação. A escolha do ponto de operação para escolha de bombas operando com velocidade de rotação variável é extremamente importante para aumentar a eficiência operacional do sistema.

A implantação de conversores de frequência em estações de bombeamento nem sempre é viável técnica e economicamente. Para se atestar a viabilidade técnica e econômica deve-se efetuar um estudo detalhado da hidráulica operacional do sistema de distribuição de água, complementado com estudos eletro-mecânico, além dos quantitativos de custos e da economia proporcionada de energia elétrica. Em alguns casos, o vendedor do equipamento alega vantagens da implantação do equipamento sem considerar as condições operacionais específicas do sistema de bombeamento em pauta. Finalmente, é fortemente recomendado o uso de conversores de frequência em sistemas de distribuição de água com variação significativa da vazão e injeção direta na rede hidráulica.

CAPÍTULO IV

SISTEMAS DE CONTROLE

4.1 INTRODUÇÃO

A indústria da água no Brasil vem tentando acompanhar o desenvolvimento tecnológico dos demais setores industriais, onde a presença da automação é uma realidade. A 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.

A automação de sistemas de distribuição de água tem como principal finalidade possibilitar a operação assistida e/ou controle automático de processos. Através 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 dos custos.

Os SDA, geralmente, são controlados por sistemas tipo SCADA. Um sistema SCADA geralmente é formado por quatro sub-sistemas - a instrumentação (sensores e atuadores), as estações remotas (aquisição e controle), a rede de comunicação, e um sistema de supervisão e controle (também chamado de supervisor ou sistema computacional SCADA). O sistema SCADA gerencia todos os pontos da automação, alarmes, relatórios e gráficos de acompanhamento, podendo ainda filtrar informações e fornecer subsídios para cada setor da empresa. A Figura 4.1 apresenta um exemplo genérico da topologia de um sistema SCADA para SDA.

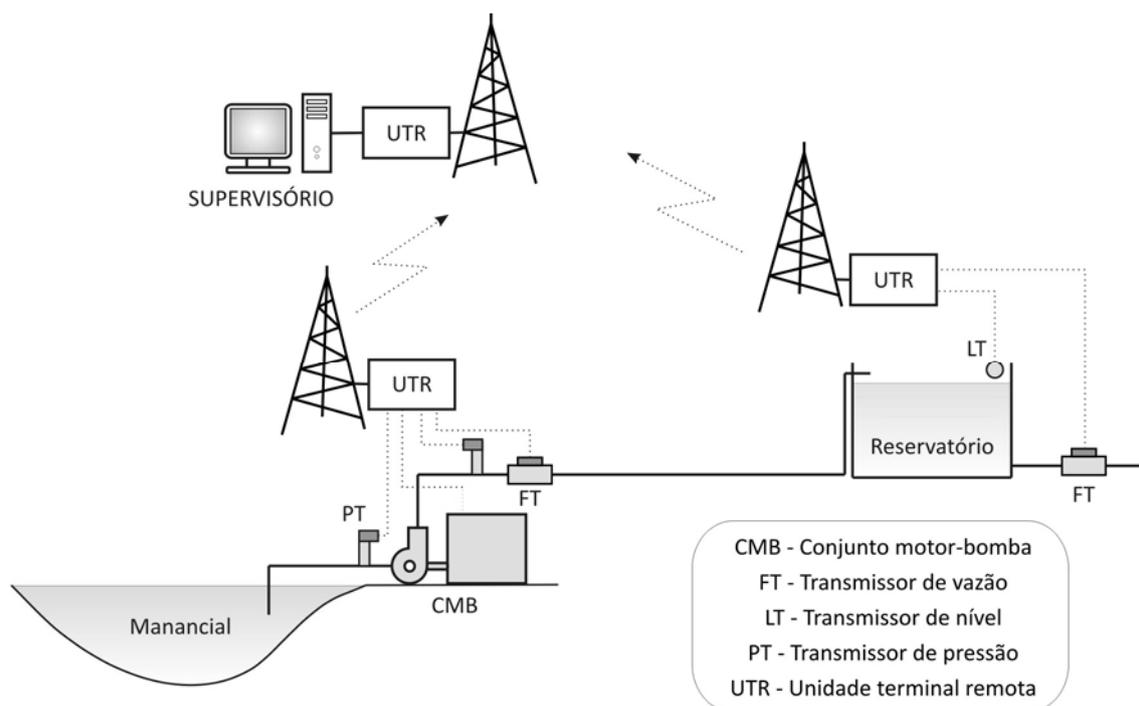


Figura 4.1 - Exemplo de um sistema SCADA de um sistema de distribuição de água

4.2 CONTROLE AUTOMÁTICO

Existem duas maneiras de controlar um determinado processo industrial, através de CLP ou SoftPLC. O Controlador Lógico Programável, comumente chamado de CLP é um tipo de computador especializado, baseado num microprocessador que desempenha funções de controle de diversos tipos e níveis de complexidade. Segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), é um equipamento eletrônico digital com *hardware* e *software* compatíveis com aplicações industriais. Segundo a NEMA (*National Electrical Manufactures Association*), é um aparelho eletrônico digital que utiliza uma memória programável para armazenar internamente instruções e para implementar funções específicas, tais como lógica, seqüenciamento, temporização, contagem e aritmética, controlando, por meio de módulos de entradas e saídas, vários tipos de máquinas ou processos.

O SoftPLC é um programa computacional que emula a CPU de um CLP, apresentando linguagem de programação semelhante a este. Funcionam em um computador *desktop* (de uso geral, “doméstico”, não-industrial), cujas entradas das variáveis de controle e saídas dos comandos elétricos dão-se através de um módulo de aquisição de dados conectado a uma determinada porta do computador (COM, LPT, USB, etc).

Os sistemas de controle baseados em PC (SoftPLC) ainda não são muito difundidos e normalmente os usuários não utilizam somente esta tecnologia para controle de plantas (TSUTIYA, 2004). Há as soluções híbridas, chamadas de Sistemas Mistos, que utilizam o conceito SoftPLC em CLP industriais. Estes sistemas suportam as condições críticas - poluição eletromagnética, sujeira, umidade, temperatura, vibrações, choques físicos, atmosferas agressivas, tempos de resposta, etc - e tem custos e qualidades intermediárias entre o SoftPLC e o CLP.

4.3 SISTEMAS DE CONTROLE

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

Um componente ou processo a ser controlado pode ser representado como um diagrama de blocos (Figura 4.2). A excitação aplicada a um sistema é conhecida como entrada - $U(s)$, enquanto a resposta obtida é chamada de saída - $C(s)$.



Figura 4.2 - Representação de um sistema ou processo a ser controlado

Os sistemas de controle podem ser de “malha aberta” e “malha fechada”. O sistema de controle em malha aberta utiliza um atuador para controlar o processo sem a utilização de realimentação (*feedback*). Um sistema com várias bombas em paralelo, onde se determina com base no horário e na experiência dos técnicos quantas bombas devem ser ligadas, sem nenhuma variável sendo medida, é um exemplo de controle em malha aberta tipo liga/desliga (*on/off*). Um diagrama de blocos representando um sistema de controle em malha aberta está ilustrado na Figura 4.3.

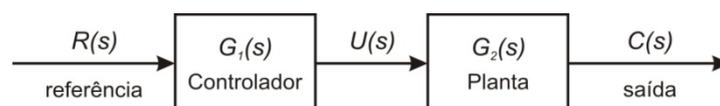


Figura 4.3 - Representação de um sistema de controle em malha aberta

Os sistemas em malha fechada, conhecidos também como sistemas retroalimentados, determinam a ação corretiva mais apropriada com base em variáveis medidas. Para tanto, são utilizados controladores que, por meio da execução algorítmica de um programa ou circuito eletrônico, comparam o valor atual com o *valor de referência*, efetuando o cálculo para ajuste e correção. O *valor de referência* também é conhecido como *valor desejado* e *set-point* (em inglês). Nos sistemas de malha fechada, a ação de controle depende, de alguma maneira, da variável controlada. Como exemplo, pode-se citar o controle da pressão através da variação da velocidade de rotação do conjunto motor-bomba; o sistema de controle do conversor de frequência verifica o valor da pressão e decide se aumenta ou diminui a frequência de acionamento do motor.

No sistema de malha fechada, a ação de controle depende, de alguma maneira, da saída. A diferença entre o *valor de referência* e o sinal da malha de realimentação é chamada de *erro* - $E(s)$. A saída do sistema de controle, geralmente, é definida como *variável de controle* - $U(s)$. A Figura 4.4 apresenta o *diagrama de blocos conceitual* para sistemas de malha fechada; este diagrama mostra a arquitetura geral do sistema e não tem significado matemático preciso. O *diagrama de blocos funcional* é mostrado na Figura 4.5.

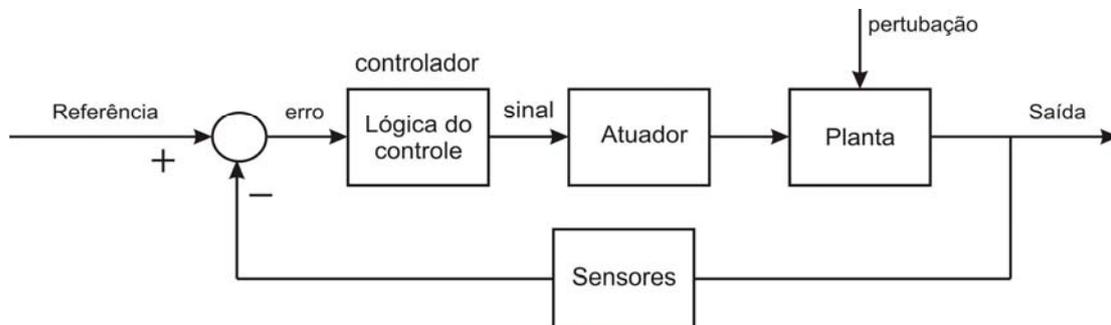


Figura 4.4 - Diagrama de blocos conceitual de um sistema de controle em malha fechada

De maneira geral, no controle clássico, a relação “entrada-saída” representa a relação “causa-efeito” do processo e pode ser descrita matematicamente através de equações diferenciais, equações de diferença, funções de transferência. Logo, para compreender e controlar sistemas deve-se determinar *modelos matemáticos* destes sistemas. Torna-se necessário, por conseguinte, analisar as relações entre as variáveis do sistema e obter um modelo matemático. Geralmente, os sistemas são dinâmicos e as equações que os descrevem são *equações diferenciais*. Além disso, se estas equações podem ser linearizadas, pode-se usar a *Transformada de Laplace*.

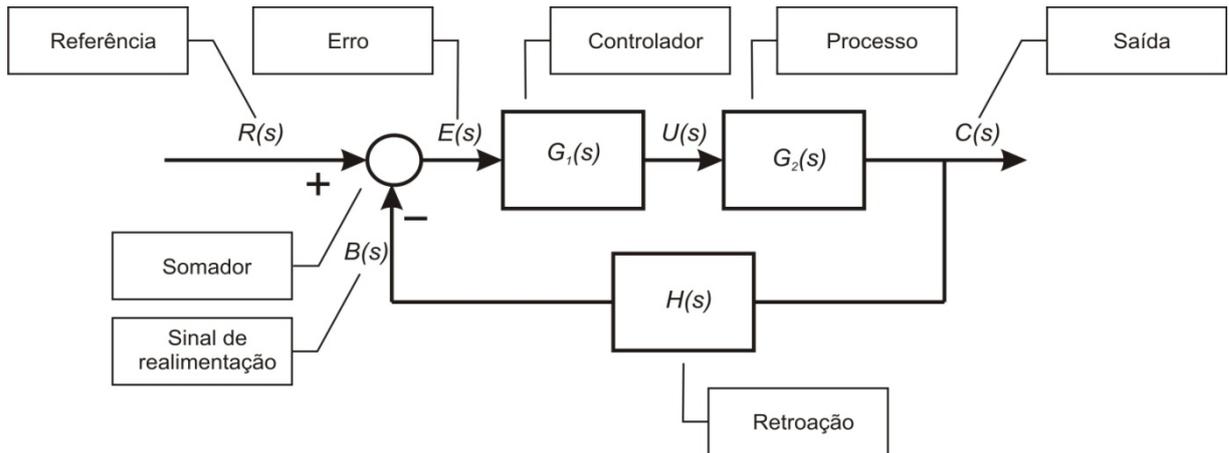


Figura 4.5 - Diagrama de blocos funcional de um sistema de controle em malha fechada

No estudo do controle “convencional” a abordagem aos problemas de sistemas dinâmicos pode ser resumida em:

- ✓ Definir os sistemas e seus componentes.
- ✓ Formular o modelo matemático e listar as hipóteses necessárias.
- ✓ Escrever as equações diferenciais que descrevem o modelo.
- ✓ Resolver as equações em função das variáveis de saída desejáveis.
- ✓ Examinar as soluções e as hipóteses.
- ✓ Se necessário, reanalisar ou reprojeter o sistema.

A função de transferência do diagrama de blocos mostrado na Figura 4.5 é expressa pela Eq. 4.1, enquanto a função de transferência da planta é dada pela Eq. 4.2.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1(s) \times G_2(s)}{1 + H(s) \times G(s)} \quad (4.1)$$

$$\frac{C(s)}{E(s)} = G(s) \quad (4.2)$$

Dentre os diversos tipos de controladores, os mais utilizados são o *Proporcional Integral Derivativo* (PID), *Regulador Linear Quadrático* (LQR), *Regulador Linear Gaussiano* (LQG), *Controle H Infinito* (H^∞), Fuzzy, etc.

O tipo de controlador mais utilizado em processos industriais é o chamado PID (*Proporcional Integral Derivativo*). A técnica de controle PID consiste em calcular um

valor de atuação sobre o processo a partir das informações do valor desejado e do valor atual da variável do processo.

De uma maneira bem simples, o PID é a composição de 3 ações. O “P” é a correção proporcional ao erro, “I” é a correção proporcional ao produto erro *versus* tempo e o “D” é a correção proporcional à taxa de variação do erro. A soma ponderada dessas três ações é utilizada para ajustar o processo de controle através de um elemento, e.g. a posição de uma válvula de controle e a velocidade de rotação de um motor.

Este controlador é indicado para sistemas onde a função entre variável de entrada e de saída pode ser linearizada. Os parâmetros do controlador PID são chamados K_p , K_i e K_d . O uso do controle PID não garante um controle otimizado ou a estabilidade do sistema.

O controlador PID é um controlador temporal cuja função contínua de entrada e saída para controle de posição é descrita pela Eq. 4.3. A literatura apresenta diversas técnicas para projeto e desenvolvimento destes controladores.

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt} \quad (4.3)$$

onde:

K_p - parâmetro relativo ao ganho proporcional. À medida que o K_p diminui, o tempo de resposta diminui, porém o sistema se torna mais instável, aumentando a oscilação e o sobre-sinal.

K_i - parâmetro relativo ao ganho integral. À medida que o K_i aumenta, o tempo de resposta diminui, mas o sistema se torna mais instável, aumentando a oscilação e o sobre-sinal.

K_d - parâmetro relativo ao ganho derivativo. À medida que o K_d diminui, o tempo de resposta diminui, entretanto o sistema se torna mais instável, aumentando o sobre-sinal.

A teoria de controle ótimo Regulador Linear Quadrático (LQR) supõe a adoção de um índice de desempenho através do qual é possível otimizar grandezas físicas. A separação das condições de contorno e a sofisticação dos índices de desempenho contribuem para o aparecimento das maiores dificuldades na determinação da solução do problema, principalmente na forma analítica. Entretanto, tal solução pode ser obtida e possui a vantagem de poder ser expressa em função do estado.

A metodologia do Linear Quadrático Gaussiano (LQG) habilita o projeto de um controlador combinando técnicas no domínio de frequência e no domínio do tempo para um sistema de mínima fase. O problema do LQG passou por uma importante evolução de interpretação. Os diversos parâmetros envolvidos, antes manipulados de modo a se obter uma minimização de erros quadráticos, passaram a ser interpretados como parâmetros “sintonizadores”, ou “dispositivos para moldar” as funções de transferências tomadas em determinadas pontos da malha visando obter as melhores características de sensibilidade e desempenho.

A Teoria de Controle H^∞ combina ambas as respostas do domínio do tempo e da frequência a fim de fornecer uma solução unificada. O H^∞ teve um impacto significativo no desenvolvimento de sistemas de controle durante as décadas de 1980 e 1990, atualmente a técnica tem amadurecido e suas aplicações em problemas industriais são cada vez maiores.

CUBILLOS (2008) apresenta um resumo sobre a teoria dos métodos de controle LQR, LQG e H^∞ .

Com o avanço tecnológico das últimas décadas, pode-se perceber que os sistemas de controle de processo estão mais confiáveis. Controladores mais modernos e eficientes estão sendo projetados para sistemas onde o controle do processo é complexo. Os sistemas fuzzy surgiram fortemente como alternativa para o controle automático de sistemas não-lineares e com várias entradas e saída. Em 1974, o professor *E. H. Mamdani* aplicou pela primeira vez um controlador fuzzy no controle de uma máquina a vapor, segundo REYERO e NICOLÁS (1995), após inúmeras tentativas frustradas com diversos tipos de controladores.

4.4 SISTEMAS FUZZY

A Lógica Fuzzy é baseada na teoria dos conjuntos fuzzy e difere da teoria clássica do filósofo grego *Aristóteles*. A BRAGA *et al.* (1995 *apud* SILVA, 2005) definiu a Lógica Fuzzy como uma tentativa de se aproximar a precisão característica da matemática à inerente imprecisão do mundo real, nascida no desejo profundo de se conhecer melhor os processos mentais do raciocínio.

Informações vagas, incertas, qualitativas, comunicações verbais, capacidade de aprendizado e de formulação de estratégias de tomadas de decisão são características humanas. Portanto, a teoria fuzzy é frequentemente referida como “inteligente”, devido ao fato de emular a inteligência humana. Os sistemas fuzzy são importantes componentes da área de inteligência computacional. Estes sistemas são paradigmas computacionais de processamento de informação que procuram executar tarefas que exijam alguma forma de inteligência similar à exibida por determinados sistemas humanos.

A *Teoria de Conjuntos Fuzzy* (ZADEH, 1965) e os *Conceitos de Lógica Fuzzy* (ZADEH, 1973) são uma alternativa para a solução de problemas de controle envolvendo não linearidades nas dinâmicas inerentes aos sistemas; possui uma alta habilidade em inferir conclusões e gerar respostas baseadas em informações vagas, ambíguas e qualitativamente incompletas e imprecisas. Seu comportamento é representado de maneira simples, levando à construção de sistemas acessíveis e de fácil conservação.

O conceito básico dos conjuntos fuzzy é relativamente fácil de ser assimilado, já que, no mundo real, as pessoas interpretam e utilizam instruções vagas e dados imprecisos todos os dias. A lógica tradicional, booleana (*crisp*), apresenta apenas valores “0” ou “1”, não há “meio termo”, a teoria fuzzy apresenta uma proposta do uso de funções que operem dentro de um intervalo de números reais [0,1]. A lógica trata com conceitos inexatos, sendo uma técnica de caracterização de classes que não define limites rígidos entre elas. A sua utilização é indicada sempre que se lida com ambigüidade, abstração e ambivalência em modelos matemáticos ou conceituais de fenômenos empíricos. Dadas suas características intrínsecas, a Lógica Fuzzy é capaz de incorporar tanto o conhecimento objetivo (de dados numéricos) quanto o conhecimento subjetivo (de informações lingüísticas).

Quando se raciocina com base na teoria clássica dos conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto fica bem definido. Os elementos x de um conjunto A em um determinado universo simplesmente pertencem ou não pertencem àquele conjunto. Isto pode ser expresso pela função característica μ_A :

$$\mu_A = 1 \text{ se e somente se } x \in A$$

$$\mu_A = 0 \text{ se e somente se } x \notin A$$

Para explicar o conceito de conjunto fuzzy e a abordagem booleana, a Figura 4.6 apresenta o exemplo clássico da idade de uma pessoa. Observa-se, na abordagem booleana, 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 e um dia, saí de uma categoria de “*jovem*” diretamente para “*adulto*”; essa abordagem é incompatível com a lógica de pensamento humano. Já na abordagem fuzzy, 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, 1].

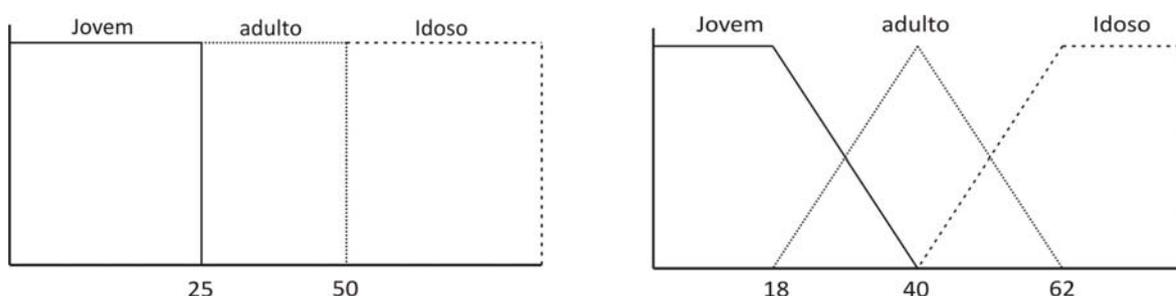


Figura 4.6 - Conjunto idade: (a) abordagem booleana (*crisp*) e (b) abordagem fuzzy

A Lógica Fuzzy provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em uma forma compreensível pelos computadores. Assim, a tecnologia possibilitada pelo “enfoque fuzzy” tem um imenso valor prático, na qual se torna possível a inclusão da experiência de operadores humanos, os quais controlam processos e plantas industriais, em controladores computadorizados, possibilitando estratégias de tomadas de decisão em problemas complexos (SHAW e SIMÕES, 1999).

O conceito de *fuzziness* é introduzido generalizando-se a função característica de modo que ela possa assumir um número infinito de valores diferentes no intervalo [0,1]. De maneira geral, um conjunto fuzzy A , definido no universo de discurso U , é representado por:

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) \mid x \in U \}$$

onde $\mu_A(x)$ é a função de pertinência de x em A e é definida como o mapeamento de U no intervalo fechado $[0,1]$:

$$\mu_A(x) : U \rightarrow [0,1]$$

O universo de discurso (U) de uma variável representa o intervalo numérico de todos os possíveis valores reais que esta pode assumir.

Uma *variável fuzzy* é uma variável cujos valores são rótulos (*labels*) de conjuntos fuzzy. Por exemplo, a *pressão do sistema* pode ser uma variável fuzzy assumindo valores *muito pequena, pequena, média, alta, muito alta*. Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos fuzzy. Nesse caso, pode-se dizer que a variável fuzzy *pressão do sistema* é uma *variável lingüística*. Considerando que u é a *pressão do sistema*, então seu conjunto de termos $T(u)$ poderia ser:

$$T(\textit{pressão do sistema}) = \{\textit{muito pequena, pequena, média, alta, muito alta}\}$$

A principal função das variáveis lingüísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Os valores assumidos pela variável lingüística são representados por conjuntos fuzzy definidos por funções de pertinência, que veremos mais detalhes a seguir.

A função de pertinência indica o quanto um elemento pertence a um dado conjunto. O conjunto fuzzy A é o conjunto de elementos no universo X para os quais $\mu_A(x) > 0$. Assim, um conjunto fuzzy também pode ser visto como o mapeamento do conjunto suporte no intervalo $[0,1]$, o que implica em expressar o conjunto fuzzy por sua função de pertinência. Por exemplo, para o conjunto fuzzy $A = \langle \textit{baixo} \rangle$, com universo de discurso (intervalo) de 0 a 10, alguns valores da função de pertinência poderiam ser:

$$\mu_A(0) = 1$$

$$\mu_A(0,1) = 1$$

$$\mu_A(0,5) = 0,9$$

$$\mu_A(4) = 0,1$$

$$\mu_A(7) = \dots = \mu_A(10) = 0$$

Nas teorias de controle clássica e moderna, o primeiro passo para implementar um controlador é a determinação do modelo matemático que descreve o processo. Este procedimento requer que se conheça detalhadamente o processo a ser controlado, o que nem sempre é factível em processos complexos (ZADEH, 1973). Ao contrário dos controladores convencionais, os SF não requerem a definição da função de transferência do sistema. Os controladores fuzzy são robustos, versáteis e de grande adaptabilidade. Se um operador humano for capaz de articular sua estratégia de ação através de um conjunto de regras da forma SE ENTÃO, então é possível a implementação de um algoritmo computacional fuzzy. Um SF é tipicamente composto dos seguintes blocos funcionais (Figura 4.7):

- ✓ Fuzzificação
- ✓ Inferência fuzzy
- ✓ Defuzzificação

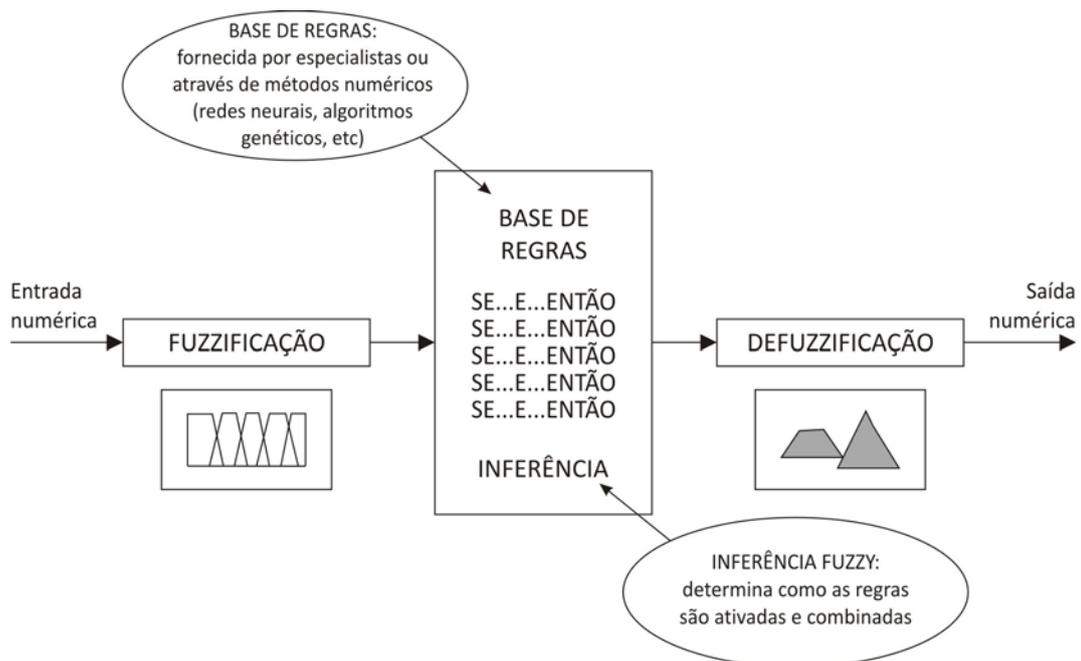


Figura 4.7 - Esquema de um controlador fuzzy

4.4.1 Fuzzificação

A fuzzificação é o processo de transformação da entrada em graus de pertinência ou de certeza no conceito, produzindo uma interpretação ou adjetivação da entrada. Ou seja, é a transformação de um número ou conjunto da lógica tradicional em um conjunto fuzzy.

As funções de pertinência fuzzy representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas dos sistemas fuzzy. Uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribuem valores de pertinência fuzzy para valores discretos de uma variável. (SHAW e SIMÕES, 1999).

Segundo TURKSEN (1984 *apud* SILVA, 2005), as funções de pertinência são definitivas com base nos seguintes métodos:

- ✓ Avaliação e dedução subjetivas: como os conjuntos fuzzy pretendem geralmente modelar a percepção e o conhecimento das pessoas, eles podem ser determinados por meio de procedimentos de cognição simples ou sofisticados. Num contexto simples, pessoas desenham ou especificam curvas de pertinência diferentes, apropriadas ao problema apresentado. Em casos mais complexos as pessoas podem ser submetidas a testes para fornecer dados para a determinação dos graus de pertinência.
- ✓ Formas *ad hoc*: enquanto existe uma infinidade de formas possíveis de funções de pertinência, as mais reais operações de controle fuzzy derivam de um pequeno conjunto de tipos de curvas, como, por exemplo, os conjuntos fuzzy triangulares. Isto simplifica o problema, já que neste caso basta escolher o valor central e a inclinação das retas de ambos os lados do conjunto fuzzy.
- ✓ Conversão de freqüências ou probabilidades: às vezes, as informações tomadas na forma de histogramas de freqüências ou mesmo outras curvas de probabilidade são usadas como base para a construção da função de pertinência. Cabe destacar que funções de pertinência não são necessariamente probabilidades.
- ✓ Mensuração física: muitas aplicações da Lógica Fuzzy são mensurações físicas, mas quase nenhuma mede diretamente os graus de pertinências.

A parte mais crítica da construção de um modelo fuzzy é justamente a escolha da forma de cada conjunto fuzzy, visto que esta determina a correspondência entre os dados de entrada e os seus conceitos lingüísticos correspondentes.

As funções de pertinência, também chamadas de termos, podem assumir diversos formatos, as principais funções matemáticas são: triangular, trapezoidal, gaussiana, Bell generalizada, sigmoidal, polinomial assimétrica, *S-shape*. Segundo SHAW e SIMÕES (1999) as funções mais utilizadas são as triangulares e trapezoidais,

por serem mais fácil de implementação. A Figura 4.8 apresenta um exemplo de funções de pertinência para uma variável chamada *erro*. É importante ressaltar que os termos complexos não, necessariamente, apresentam resultados melhores.

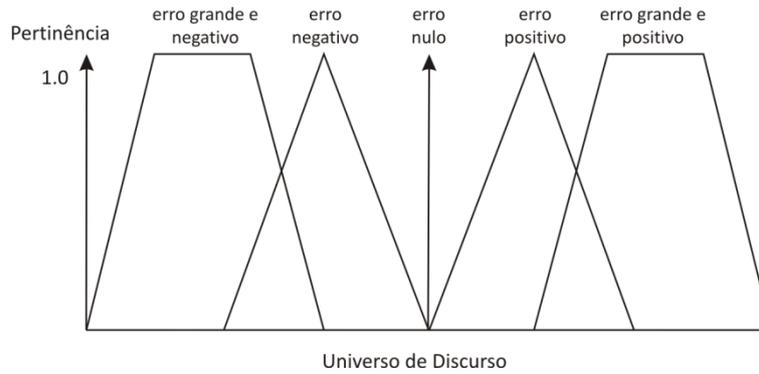


Figura 4.8 - Funções de pertinência

4.4.2 Defuzzificação

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 lingüística de saída inferida pelas regras fuzzy será traduzido em um valor discreto. Os métodos mais utilizados são Centro de Gravidade (*centro da área*, C-o-A, *Center of Gravity*), Centro do Máximo (*método de defuzzificação pelas alturas*, C-o-M, *Center of Maximum*) e Média do Máximo (M-o-M, *Mean of Maximum*).

O método C-o-A calcula a saída discreta y , como o próprio nome sugere, calculando o centróide da área composta que representa o termo (função de pertinência) de saída fuzzy (μ_{OUT}). O cálculo da saída é dada pela Eq. (4.4). A Figura 4.9 apresenta um exemplo de defuzzificação através do método C-o-A.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \mu_{OUT}(y_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_{OUT}(y_i)} \quad (4.4)$$

onde:

y_i - posição do centróide da função de pertinência individual.

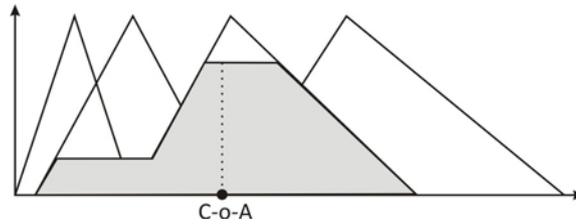


Figura 4.9 - Exemplo de defuzzificação através do método C-o-A

No método C-o-M, os picos das funções de pertinência representados no universo de discurso da variável de saída são utilizados na defuzzificação, enquanto as áreas das funções de pertinência são ignoradas. Este método é indicado para aplicações de controle em malha fechada, onde a continuidade da saída do controlador é importante para garantir a estabilidade do sistema e não ocorrer oscilações. A saída discreta é calculada como uma média ponderada dos máximos, cujos pesos são os resultados da inferência, conforme a Eq. (4.5).

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \sum_{K=1}^N \mu_{0,K}(y_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{K=1}^N \mu_{0,K}(y_i)} \quad (4.5)$$

onde:

$\mu_{0,K}(y_i)$ - pontos de máximo (alturas) das funções de pertinência de saída; e
 y_i - posição do máximo da função de pertinência individual.

O método M-o-M é indicado para reconhecimento de padrões, e calcula, como o nome sugere, a saída através da média dos máximos, conforme a Eq. (4.6).

$$y = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} \quad (4.6)$$

onde:

i - i -ésimo elemento do universo de discurso; e
 n - universo total desses elementos.

Em aplicações de malha fechada, é fundamental que a variável de saída seja contínua, para que não haja oscilações e instabilidade no processo, logo a literatura

recomenda o uso do método de defuzzificação C-o-A. Este método conduz a um sinal de saída contínuo e não varia significativamente para pequenas mudanças nas variáveis de entrada. Portanto, seguindo recomendações da literatura, optou-se pelo método de defuzzificação C-o-A.

As principais vantagens dos sistemas fuzzy são:

- ✓ A modelagem é tolerante com dados imprecisos, o que pode possibilitar o desenvolvimento do controlador sem dados experimentais;
- ✓ As equações envolvidas no processo de controle são não-lineares;
- ✓ As tarefas de processamento computacional não envolvem muitos cálculos.
- ✓ É um sistema flexível;
- ✓ Funciona com qualquer conjunto de entradas e de saídas de dados, possibilitando a modelagem de sistemas complexos;
- ✓ Os conceitos matemáticos da lógica são, relativamente, simples;
- ✓ Os SF são de fácil manutenção pelo pessoal de manutenção;
- ✓ Pode ser integrada, de maneira relativamente simples, a outras técnicas de controle.
- ✓ Possibilita a incorporação de conhecimento de especialistas;
- ✓ Possibilita lidar com dados inexatos;
- ✓ Regras individuais combinam-se formando uma estrutura que permitem controlar sistemas complexos.
- ✓ São inerentemente confiáveis e robustos, resistentes a perturbações externas e alterações na planta.
- ✓ Todas as funções de controle associadas com uma regra podem ser testadas individualmente.

4.4.3 Controlador Fuzzy Paramétrico

Outro tipo de estrutura baseada em Lógica Fuzzy para o controle de processo é o sistema fuzzy baseado em equações relacionais. Neste caso, os resultados são obtidos por duas operações: identificação de sistemas e estimação.

Identificação de sistemas é a definição da estrutura e dos parâmetros de um modelo fuzzy, de modo que o modelo se comporte como o sistema real. A identificação é realizada através de equações relacionais. O desenvolvimento de um controlador através de

equações relacionais elimina a necessidade de um operador com experiência, pois se baseia em medições cujos resultados são “aprendidos” pelo sistema. Podem-se utilizar redes neurais artificiais como “métodos de treinamento”. Segundo SHAW e SIMÕES (1999), o método de identificação de sistema que usa equações relacionadas oferece um procedimento de projeto sistemático para a construção do modelo, na medida em que evita os problemas associados com a formulação das regras de controle fuzzy baseadas em entrevistas com especialistas humanos.

Os coeficientes das equações lineares são determinados com base em dados de exemplos, através de análises de regressão linear e procedimentos estáticos; que posteriormente são ajustados por simulações. A principal desvantagem da abordagem por equações relacionais é que o método é aplicável em sistemas com apenas uma saída.

Na fase de estimação, que é posterior a fase de “treinamento”, o sistema estima, reconhece e classifica dados desconhecidos ou incompletos, inferindo soluções e capturando relações entre os dados.

Os modelos fuzzy *Takagi-Sugeno* (T-S) são baseados essencialmente numa combinação de conceitos fuzzy e “não-fuzzy”. Os modelos T-S são compostos por proposições condicionais cujos antecedentes são variáveis lingüísticas e cujos conseqüentes são funções. Também chamados de controladores fuzzy paramétricos, estes abordam os problemas combinando uma descrição global baseada em regras com aproximações lineares locais, conforme pode ser observado na Figura 4.10. A inferência fuzzy relaciona conjuntos fuzzy do seguinte modo:

$$\text{SE } \textit{press\~{a}o}(P) = \langle \textit{baixa} \rangle \text{ ENT\~{A}O } \textit{v\~{a}lvula} = x_1 + x_2 * P$$

$$\text{SE } \textit{press\~{a}o}(P) = \langle \textit{m\~{e}dia} \rangle \text{ ENT\~{A}O } \textit{v\~{a}lvula} = x_3 + x_4 * P$$

$$\text{SE } \textit{press\~{a}o}(P) = \langle \textit{alta} \rangle \text{ ENT\~{A}O } \textit{v\~{a}lvula} = x_5 + x_6 * P$$

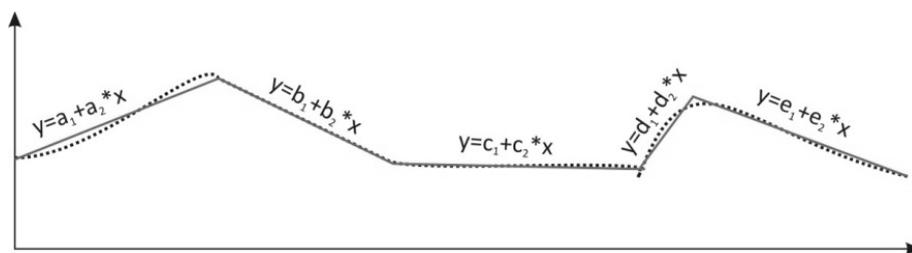


Figura 4.10 - Exemplo de aproximação local através de um modelo fuzzy paramétrico

4.4.4 Inferência Fuzzy

A inferência fuzzy é utilizada para se obter conclusões sobre um conjunto de leis **SE ENTÃO**. Existem duas importantes formas para regras de inferência: *Modus Ponens* e *Modus Tollens*, descritos na Tabela 4.1 e Tabela 4.2, respectivamente.

Tabela 4.1 - Regras de inferência *Modus Ponens*

Premissa 1 (fato):	x_1 é A
Premissa 2 (lei):	SE x_1 é A ENTÃO x_2 é B
Conseqüência (conclusão):	x_2 é B

Tabela 4.2 - Regras de inferência *Modus Tollens*

Premissa 1 (fato):	x_2 não é B
Premissa 2 (lei):	SE x_1 é A ENTÃO x_2 é B
Conseqüência (conclusão):	x_1 não é A

Além disso, em geral, os sistemas fuzzy podem ser agrupados em dois modelos de sistema de inferência fuzzy: Mamdani (MAMDANI e ASSILAN, 1974) e *Takagi-Sugeno* (TAKAGI e SUGENO, 1985), que diferem fundamentalmente em suas habilidades para representar diferentes tipos de informação. O primeiro grupo é constituído por modelos lingüísticos, ou seja, a base das regras é estritamente lingüística e baseia-se na utilização da linguagem natural para descrever o comportamento dos sistemas.

O modelo Mamdani apresenta como característica básica o fato de tanto os antecedentes como os conseqüentes serem mapeados por conjuntos lingüísticos. Para cada regra de inferência, caso tenhamos mais de uma variável de entrada, é necessário aplicar uma técnica de agregação dos conjuntos antecedentes, a fim de que seja gerado um conjunto conseqüente. No caso de existirem “n” regras, serão gerados “n” conjuntos conseqüentes, que são combinados.

Os controladores fuzzy baseados em regras relacionam os conjuntos fuzzy do seguinte modo:

SE <condições> **ENTÃO** <conclusão>

SE <antecedente> **ENTÃO** <conseqüente>

SE $x = \langle A \rangle$ **ENTÃO** $y = \langle B \rangle$

SE *pressão* = <baixa> **ENTÃO** *válvula* = <abrir um pouco>

A técnica mais comum na composição dos vários conjuntos fuzzy de entrada para cada regra é o método de inferência MAX-MIN. O “MIN” implica em um conectivo “E” e

o “MAX” em um conectivo “OU”. O conectivo “E”, chamado de operação de agregação, resulta na interseção fuzzy dos termos de entrada. O conectivo “OU”, chamado de operação de composição, resulta na união dos termos de saída. A Figura 4.11 apresenta um exemplo de cálculo, passo a passo, do valor discreto (*crisp*) da saída de um controlador fuzzy com cinco regras (MAX-MIN).

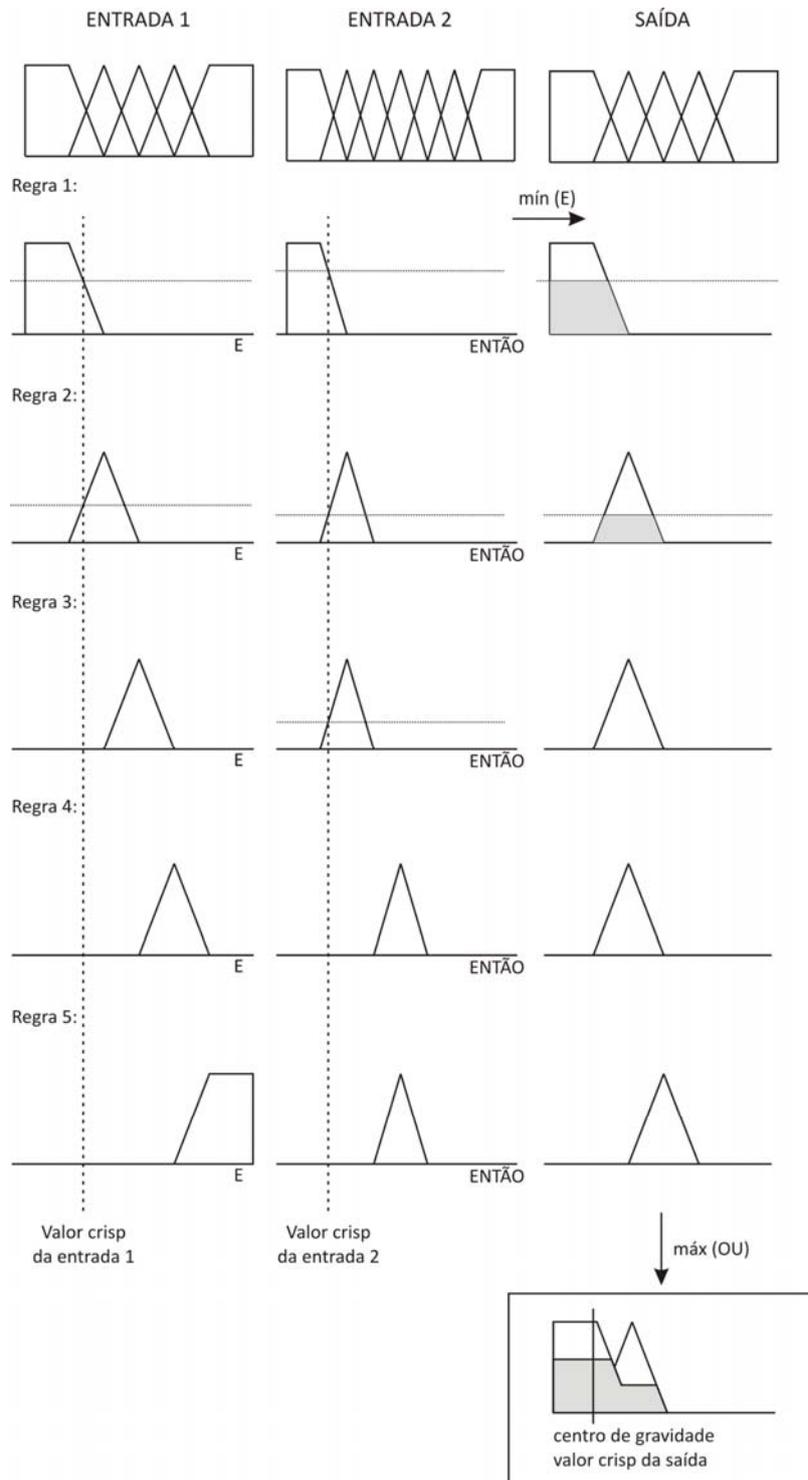


Figura 4.11 - Exemplo de cálculo da saída discreta (*crisp*) de um controlador fuzzy

CAPÍTULO V

MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema de controle automático foi desenvolvido para o controle piezométrico de sistemas de distribuição de água. A fim de testar o sistema de controle proposto, foi projetada e implantada, com exceção do reservatório circular, uma bancada experimental de distribuição de água (Figura 5.1 e Figura 5.2)¹⁶ no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba - LENHS UFPB. O processo computacional automatizará as ações referentes à velocidade de rotação (frequência do motor) do conjunto motor-bomba e de válvulas de controle¹⁷.

5.1 SISTEMA EXPERIMENTAL

A bancada experimental (Figura 5.1) é constituída de um reservatório circular de 7,64 m³, um CMB monobloco de 3 cv, um conversor de frequência, duas válvulas de controle (CVC e CVs), dois transdutores de pressão (PT1 e PT2), dois medidores de vazão (FT1 e FT2), duas fontes de alimentação, dois manômetros tipo *bourdon*, além das conexões e tubos de PVC (DN 50) da rede. Também foram utilizados nos experimentos: dois analisadores de energia, para medição e análise das grandezas elétricas envolvidas no processo; um computador portátil e um módulo de aquisição de dados (DAQ) da *National Instruments*.

¹⁶ Equipe responsável pelo projeto e implantação das instalações: Saulo de Tarso M. Bezerra, Wil L. L. Camboim, João S. O. P. da Silva e Magno J. G. da Silva (pós-graduandos do PPGEM/UFPB).

¹⁷ São válvulas para o controle de processos (temperatura, pressão, fluxo, nível, etc) em plantas industriais.

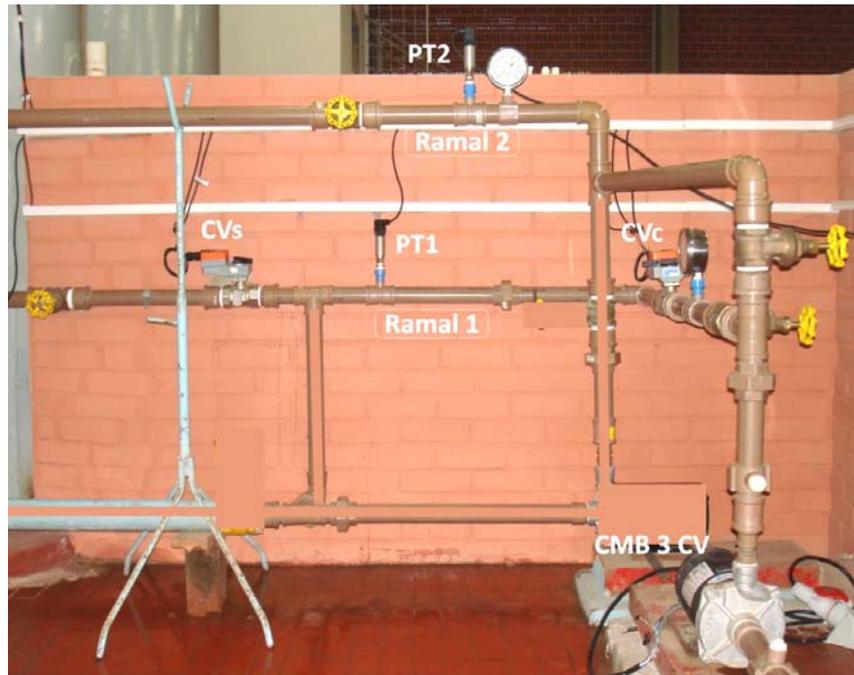


Figura 5.1 - Bancada experimental de distribuição de água

O conjunto motor-bomba é responsável pelo fornecimento de energia ao sistema de bombeamento de água na forma de vazão e pressão. A rede hidráulica contém dois ramais que simulam a alimentação de dois setores em SDA reais (ver Figura 3.2). A CVs, a jusante do PT1, tem a função de alterar as condições de operação do sistema, proporcionando a variação da vazão demandada. À medida que a CVs fecha, a vazão diminui e, conseqüentemente, a pressão a montante aumenta. Os PT1 e PT2 são responsáveis pelas medições das pressões.

O sinal de entrada/saída da DAQ é tensão elétrica e os medidores de vazão e pressão fornecem o sinal em corrente elétrica (4 a 20 mA) proporcional a grandeza medida. Logo, foi necessário converter o sinal de saída dos medidores (corrente elétrica) para uma tensão elétrica contínua que varia entre 0,85 Vcc (tensão mínima) e 4,25 Vcc (tensão máxima).

O conversor de frequência será responsável por manter a pressão no ponto mais desfavorável igual à pressão desejada (pressão de referência), enquanto a válvula CVc elimina o excesso de pressão no ponto de medição do ramal 1.

A Figura 5.2 descreve, por meio de um diagrama esquemático (diagrama de blocos), a configuração da bancada experimental.

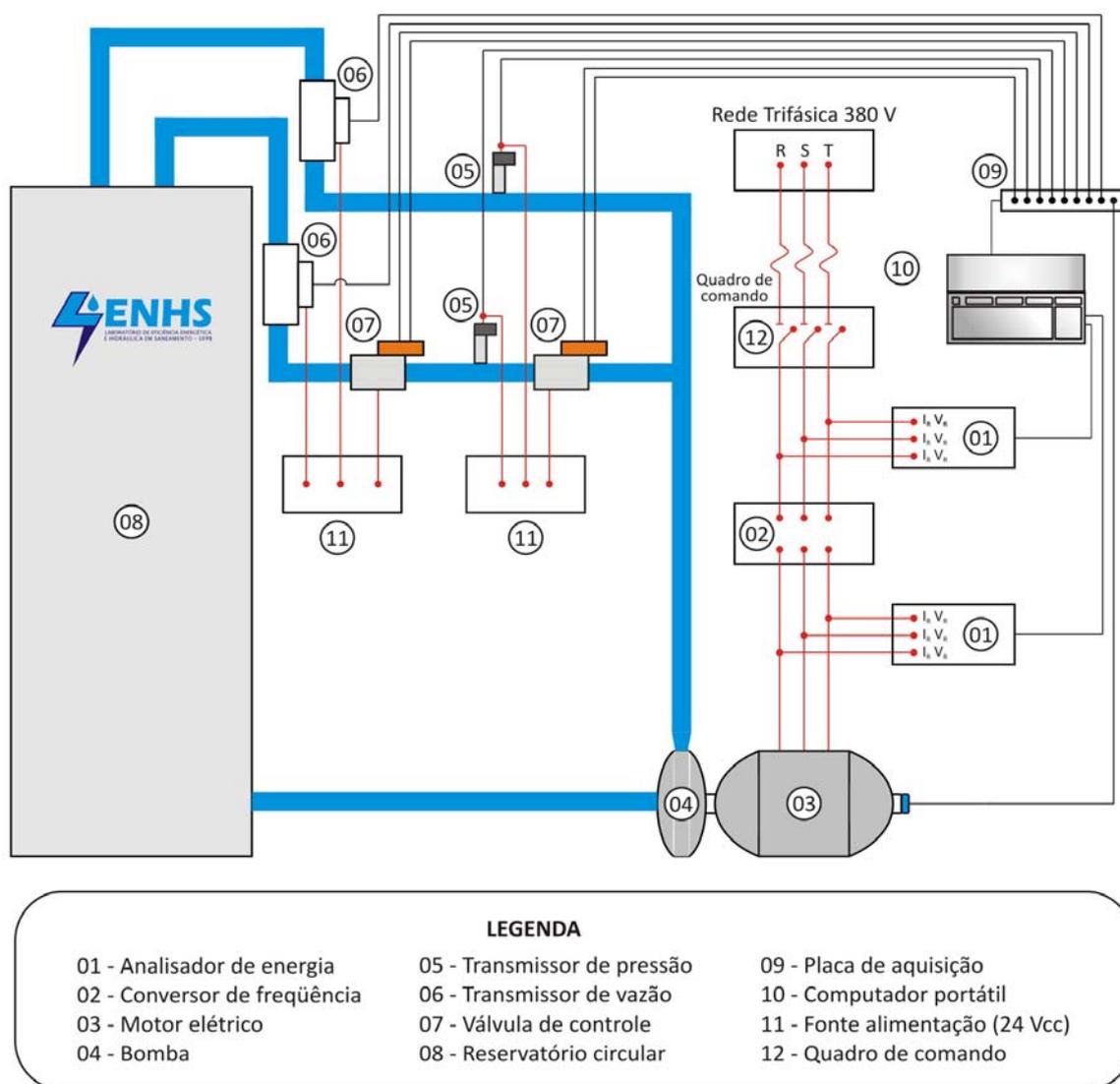


Figura 5.2 - Diagrama de blocos da bancada de teste

Os componentes que compõem a bancada de teste são os seguintes:

a) Conjunto motor-bomba

O CMB é monobloco, constituído de um motor de indução trifásico, 220/380 V, 60 Hz, 3 cv, isolamento classe B, proteção IP-21, categoria N; e 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, vazão máxima de 12 m³/h. (Figura 5.3). As curvas características da bomba centrífuga são mostradas na Figura 5.4.



Figura 5.3 - Conjunto motor-bomba

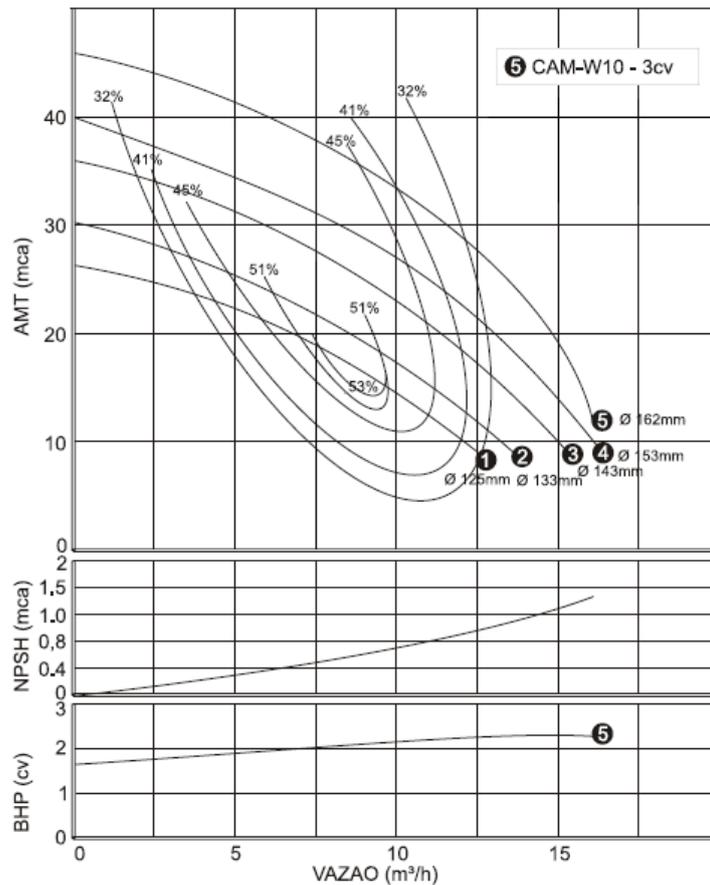


Figura 5.4 - Curvas características da bomba centrífuga.

b) Conversor de frequência

O conversor de frequência (CF), Figura 5.5, utiliza tecnologia PWM (*Pulse Width Modulation*), possui alimentação trifásica 380/480 Vca, corrente nominal 13 A, frequência da tensão de alimentação 50/60 Hz, e frequência de saída variável de 0 a 300 Hz. Os dispositivos semicondutores (transistores de potência) são do tipo IGBT.



Figura 5.5 - Conversor de frequência

c) Válvula de controle

São utilizadas duas válvulas proporcionais, do tipo esfera, acionadas por um motor elétrico com tensão de alimentação de $24\text{ Vca} \pm 20\%$ ou $24\text{ Vcc} \pm 10\%$ ¹⁸ e torque 20 Nm. O ângulo de abertura varia de 0° a 90° (podendo ser ajustado mecanicamente), pressão máxima de operação 140,62 mca (Figura 5.6).

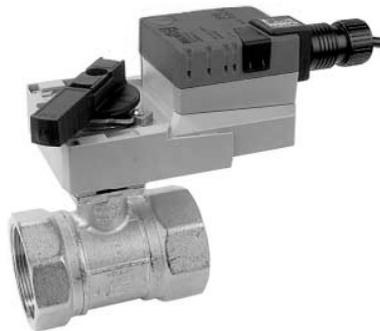


Figura 5.6 - Válvula de controle

A CVc é responsável pelo controle da pressão a jusante do PT1 , enquanto a CVs é utilizada para alterar as condições de operação do sistema (ver Figura 5.1) e tem a função de acrescentar perda de carga (perda de energia) no sistema, variando assim a vazão demandada. Quanto menor é a perda de carga, menor é a altura manométrica e, conseqüentemente, maior a vazão fornecida ao sistema.

d) Transdutor de pressão

Foram utilizados na pesquisa dois transdutores de pressão (Figura 5.7). O sensor utilizado no medidor é do tipo piezo-resistivo de silício e o sinal de saída é de 4 a 20 mA, com tempo de resposta de 1 milissegundo e precisão de $\pm 0,2\%$ (fundo de escala).

¹⁸ Para a tensão contínua é usada a sigla Vcc, enquanto que para a tensão alternada utiliza-se Vca ou Vac.



Figura 5.7 - Transdutor de pressão

e) Sistema de aquisição de dados

O Sistema de Aquisição de Dados é composto de um computador portátil equipado com um processador *Intel® Core™ Duo* de 1,60 GHz, com 1 GB de RAM, sistema operacional *Windows XP* e um DAQ (Figura 5.8). O DAQ possui 32 entradas analógicas e 4 saídas analógicas, com taxa de transferência de 1,25 MS/s¹⁹ para as entradas e de 2,86 MS/s para as saídas, as tensões elétricas variam entre -10 Vcc a 10 Vcc.

O programa computacional utilizado para o gerenciamento do sistema foi o *Labview™ - Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench*. O programa utiliza uma linguagem de programação desenvolvida pela *National Instruments*. O *Labview™* é diferente das usuais linguagens de programação porque utiliza linguagem gráfica conhecida como *Linguagem G* e tem um compilador gráfico aperfeiçoado para maximizar o desempenho do sistema, ao invés de utilizar linhas de código. O fato de ser totalmente compatível com a DAQ utilizada e a facilidade para processar, armazenar e analisar os dados foram imperativos para a sua escolha na pesquisa. Os programas gerados no *Labview™* são chamados de instrumentos virtuais, porque possuem a aparência e operações que simulam equipamentos reais.

f) Analisador de energia

Equipamento utilizado para medir e monitorar as grandezas elétricas de entrada e de saída do conjunto conversor + motor elétrico (correntes, tensões, potência, fator de potência e distorção harmônica) com precisão de 0,5%. Todas as grandezas fornecidas em “valor eficaz” (*TRUE RMS*) (Figura 5.9).

¹⁹ 1 milhão (mega) de amostras (*samples*, em inglês) por segundo.



Figura 5.8 - Módulo de aquisição de dados



Figura 5.9 - Analisador de energia elétrica

5.2 MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE

As técnicas especiais utilizadas nesta pesquisa permitem o desenvolvimento do controlador sem o conhecimento prévio do modelo matemático correspondente. O controlador atua na definição da altura manométrica de bombeamento e no ângulo de abertura da válvula de controle, controlando a pressão nos pontos de medição do sistema.

Para o controle do processo descrito, foi desenvolvido um sistema supervisor, cuja interface é apresentada na Figura 5.10. Montou-se um experimento constituído de sensores/transdutores, condicionadores de sinais, módulo de aquisição de dados (DAQ) e programa de gerenciamento. O programa de gerenciamento do processo foi desenvolvido no programa computacional Labview™, que utiliza o conceito de linguagem de programação gráfica, que foi denominada de linguagem G²⁰.

²⁰ A linguagem G surge como uma alternativa gráfica à linguagem C. Existem mais de 3000 opções e funções que podem ser usadas no Labview™, de modo a realizar as mais diversas ações de aquisição e tratamento de vários tipos de informação (Fonte: <http://www.cinelformacao.com/labview1/files/ud2/ud2intro.htm>).

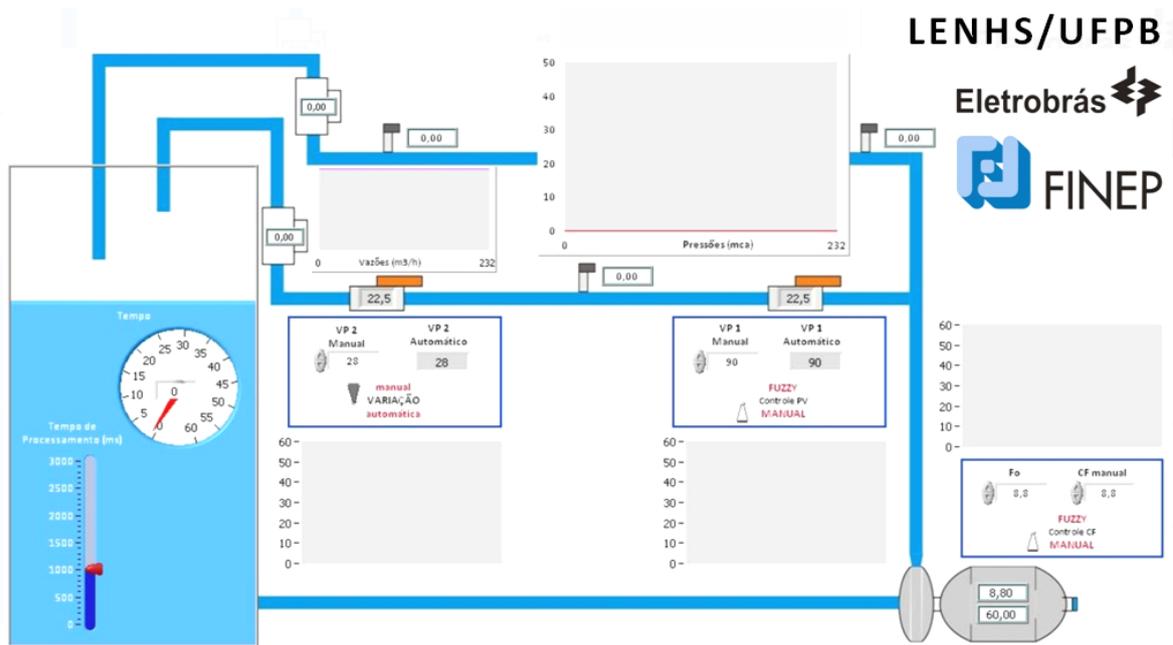


Figura 5.10 - Imagem do sistema de controle (supervisório)

O sistema supervisório utiliza quatro entradas e três saídas analógicas do DAQ. As entradas analógicas recebem o sinal dos transdutores de pressão PT1 e PT2, e os ângulos de abertura das válvulas CVC e CVs. As saídas analógicas são utilizadas para variar a posição/abertura das válvulas de controle e a frequência da tensão de alimentação do motor elétrico. As entradas e saídas do programa supervisório do sistema de controle são mostradas na Figura 5.11.



Figura 5.11 - Entradas e saídas do sistema supervisório desenvolvido

O código fonte (programação) principal do sistema de controle desenvolvido é apresentado na Figura 5.12.

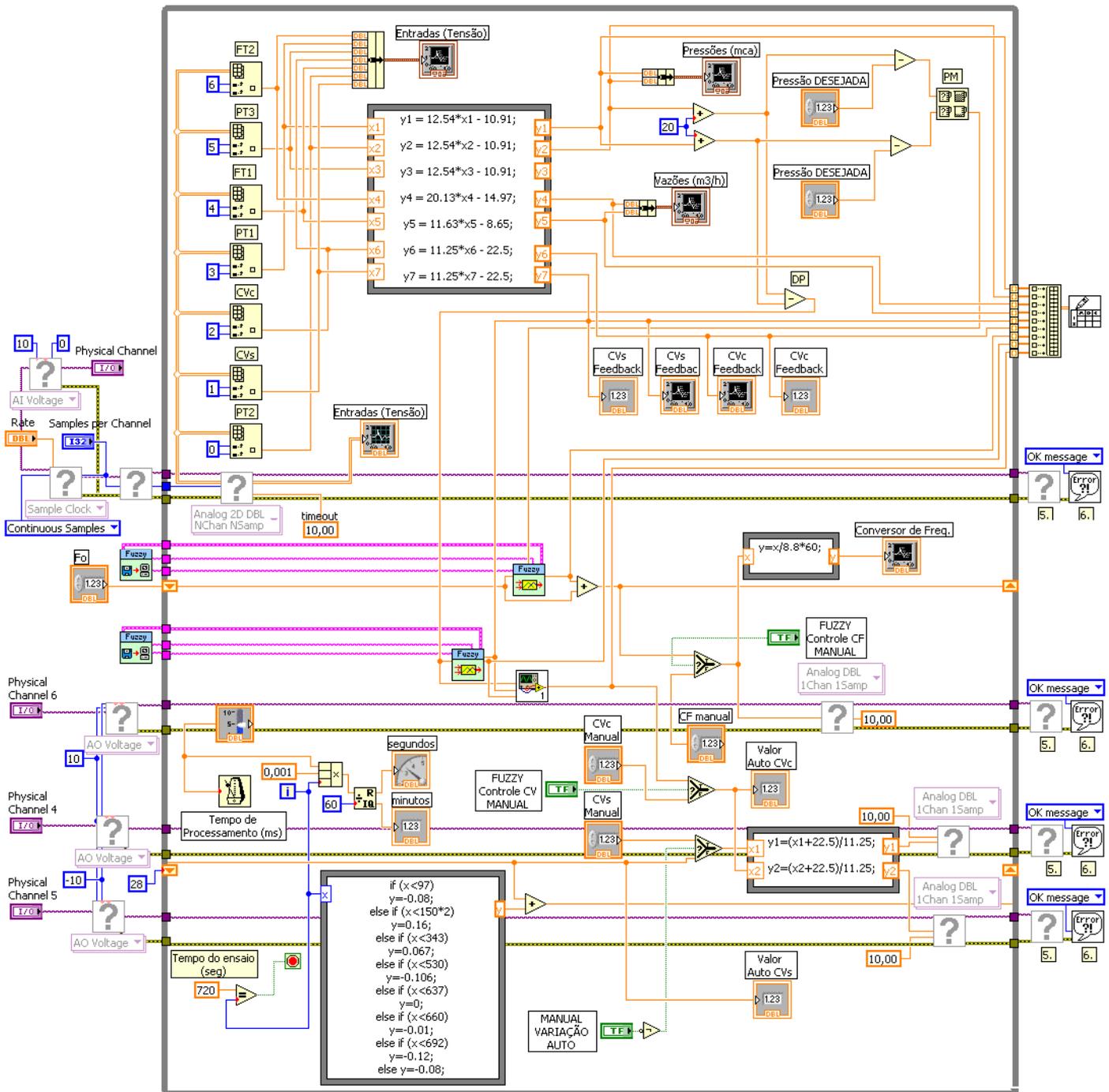


Figura 5.12 - Código fonte (programação) do sistema de controle desenvolvido

O sistema de controle desenvolvido é formado por dois controladores fuzzy - subVIs  do código principal - que trabalham simultaneamente; o primeiro é responsável pela determinação da frequência de acionamento do conjunto motor-bomba, enquanto que o segundo atua na válvula de controle CVC. Os controladores fuzzy foram implementados no *Toolkit Fuzzy Logic Controller Design* do programa Labview™. Vale

ressaltar que o conversor de frequência (CF) é responsável por manter a altura manométrica do sistema de bombeamento em um valor ótimo (mínimo possível), enquanto a válvula CVC tem a função de eliminar o excesso (sobra) de pressão no outro ponto da bancada.

As entradas lingüísticas dos controladores são diferentes das entradas do supervisor. As variáveis lingüísticas foram escolhidas de maneira a possibilitar o controle da pressão em dois pontos da bancada experimental. As variáveis lingüísticas de entrada dos controladores são:

- ✓ Pressão no ponto mais desfavorável do sistema (**PM**). Variável definida como a pressão no transdutor com maior déficit de pressão.
- ✓ Frequência de acionamento do conjunto motor-bomba (**FR**). A frequência da tensão de alimentação é proporcional à rotação do motor, considerando um escorregamento constante.
- ✓ Diferença de pressão (**DP**). Variável definida com base nas medições dos transdutores de pressão e representa o valor da diferença de pressão que definirá um novo ângulo de abertura da válvula de controle.
- ✓ Posição angular da válvula de controle acionada pelo sistema fuzzy (**AV**). Variável medida através do sinal de posição da válvula.

As variáveis lingüísticas de saída dos controladores fuzzy são:

- ✓ Acréscimo (valor positivo) ou decréscimo (valor negativo) no valor da frequência da tensão de alimentação do conjunto motor-bomba (**DF**). Variável denominada de *Delta de Frequência*.
- ✓ Acréscimo (valor positivo) ou decréscimo (valor negativo) no ângulo de abertura da válvula de controle acionada pelo SF (**DA**). Variável denominada de *Delta Angular*.

As variáveis lingüísticas de entrada e de saída do sistema fuzzy (SF), a quantidade e o formato das funções de pertinência e o universo de discurso foram escolhidos com base em recomendações da literatura, na natureza do processo a ser controlado, análises heurísticas e ensaios experimentais.

Na modelagem dos controladores foi utilizado o método de inferência MAX-MIN (MAMDANI e ASSILIAN, 1974). O método de defuzzificação foi o Centro de Gravidade (C-o-A).

5.3 MODELAGEM DO CONTROLADOR FUZZY DO CF

Através de uma análise qualitativa dos padrões de comportamento da pressão em função da variação da velocidade de rotação de CMB, determinaram-se duas entradas para o controlador fuzzy do conversor de frequência - PM e FR. A primeira representa o déficit ou excesso de pressão no ponto mais desfavorável do sistema, enquanto que a segunda indica o valor da frequência atual para o controlador. As variáveis de entrada, variável de saída e a base de regras são apresentadas a seguir. A Figura 5.13 mostra as variáveis lingüísticas de entrada e saída do controlador fuzzy do conversor de frequência.

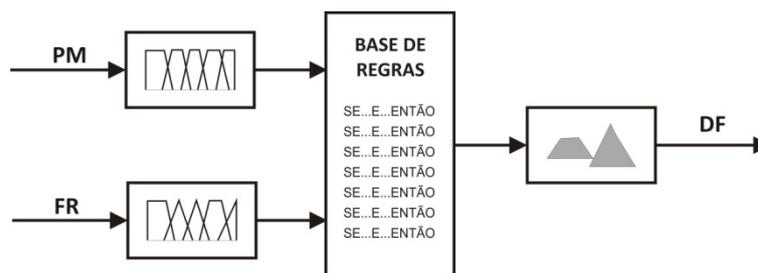


Figura 5.13 - Variáveis lingüísticas de entrada e saída do controlador fuzzy do CF

5.3.1 Variável Lingüística de Entrada PM

A variável de entrada PM é definida como a pressão no ponto mais desfavorável do sistema. Adotou-se 20 como valor de referência (*set-point*)²¹ padrão para a variável PM²², ou seja, o controlador foi desenvolvido considerando o valor de 20 como ótimo para a variável em questão (ver Figura 5.14). Para valores de pressão requerida (valor de referência) diferentes de 20 mca, é necessário que as medições de pressão tenham seus valores alterados para a compatibilização com o valor de referência padrão do controlador. Esta nova pressão foi denominada de pressão equivalente (*Pe*) e é a soma do valor medido mais a diferença entre 20 e a pressão requerida. Os valores das pressões equivalentes são determinados pela Eq. (5.1). A variável PM será igual à menor das pressões equivalentes.

²¹ Valor-alvo que um sistema de controle automático tenta alcançar em uma determinada variável.

²² Valor que corresponde à altura manométrica do ponto ótimo de operação do CMB.

$$Pe_i = Pmed_i + 20 - Preq_i \quad (5.1)$$

onde:

Pe_i - pressão no ponto de medição i ;

$Pmed_i$ - pressão medida no ponto de medição i ;

$Preq_i$ - pressão requerida no ponto de medição i .

Um número recomendado de conjuntos fuzzy lingüísticos (funções de pertinência ou termos) é algo entre 2 e 7. Quanto maior o número de conjuntos, maior a precisão, entretanto, segundo SHAW e SIMOES (1999), a partir de valores maiores que 7, não há melhorias significativas. Portanto, adotou-se o número de 7 conjuntos fuzzy para PM.

Os formatos das funções de pertinência mais freqüentemente encontrados são triangulares e trapezoidais, pois são geradas facilmente, segundo SHAW e SIMOES (1999), só é primordial o uso de outras funções quando o desempenho suave é de importância crítica. Logo, adotaram-se funções de pertinência com formatos triangulares e trapezoidais, simétricas em relação ao valor de referência. O universo de discurso (U) foi baseado na faixa de medição dos transdutores de pressão, em metros de coluna de água. As características das funções de pertinência de PM são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Características das funções de pertinência da variável de entrada PM

Função	Descrição	Forma	Parâmetros
MB	Muito Baixa	Trapezoidal	[0 0 5 10]
BA	Baixa	Triangular	[5 10 15]
PB	Pouco Baixa	Triangular	[10 15 19,8]
OT	Ótima	Trapezoidal	[19,5 19,5 20,5 20,5]
PA	Pouco Alta	Triangular	[20,2 25 30]
AL	Alta	Triangular	[25 30 35]
MA	Muito Alta	Trapezoidal	[30 35 60 60]

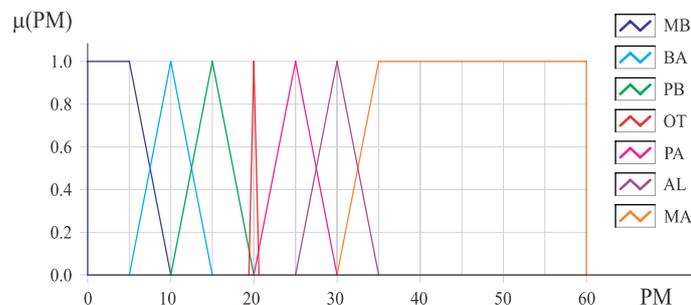


Figura 5.14 - Funções de pertinência da variável lingüística PM.

As funções de pertinência de FR foram determinadas através de recomendações da literatura e conhecimento heurístico extensivamente sintonizado através de simulações e ensaios experimentais. Este método de determinação das funções é amplamente recomendado pela literatura, sendo, inclusive, citado como uma das vantagens da Lógica Fuzzy em relação a outras metodologias de controle de sistemas. Quando não se obtém sucesso, recomenda-se a utilização do controle fuzzy associado a métodos matemáticos de busca, como Algoritmo Genético e Redes Neurais.

As funções foram determinadas, com exceção do intervalo [15, 25], de maneira que a soma das pertinências para cada ponto do universo de discurso seja igual a 1. Apesar de não ser uma regra ou imposição, alguns autores recomendam que, inicialmente (primeiras simulações e testes), o formato dos termos seja determinado de maneira que a soma das pertinências seja 1. Do mesmo modo é indicada uma superposição de 50%. Certamente, o nível final de superposição das funções surge como resultado da modelagem, não como parâmetro de entrada. O formato do conjunto de funções de pertinência, com exceção do termo OT, é “padrão” nos *toolkits* de Lógica Fuzzy.

Os intervalos [15, 19,5] e [20,5, 25] correspondem a apenas uma função de pertinência e estas decrescem o valor de pertinência à medida que se aproximam do valor desejado (20). Independente do valor assumido nestes intervalos, para um determinado valor da função da variável de entrada FR, o resultado será praticamente o mesmo, com uma variação inferior a um centésimo. Para exemplificar a particularidade dos conjuntos fuzzy PB e PA e mostrar a contribuição individual de cada conjunto fuzzy para a saída acionada pela operação MAX-MIN, as Figuras 5.15 a 5.18 apresentam o cálculo das variáveis de saída, respectivamente, para PM = 17 e FR = 4, PM = 19 e FR = 4, PM = 17 e FR = 4,5, PM = 19 e FR = 4,5.

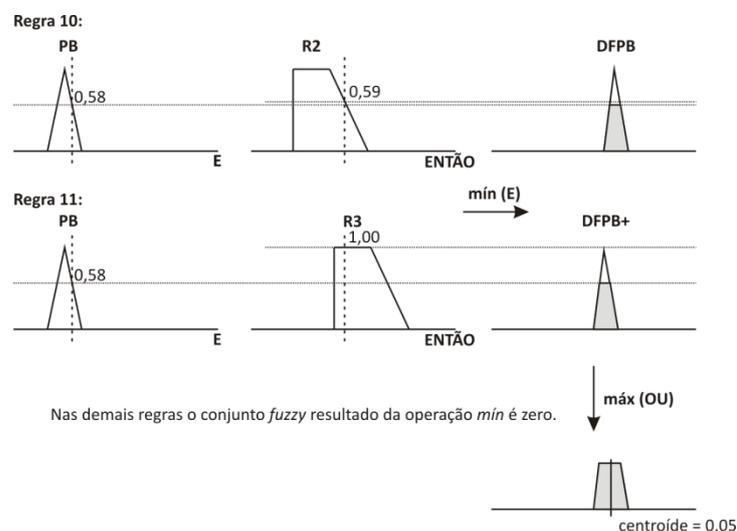


Figura 5.15 - Cálculo da variável de saída do controlador para PM = 17 e FR = 4

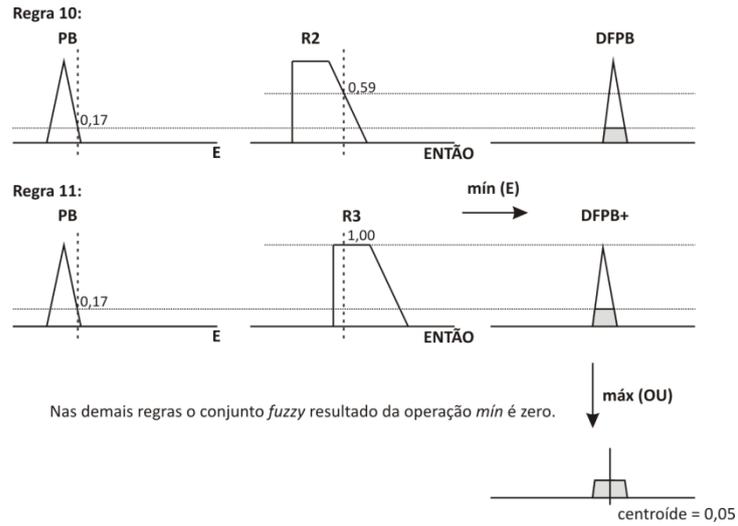


Figura 5.16 - Cálculo da variável de saída do controlador para PM = 19 e FR = 4

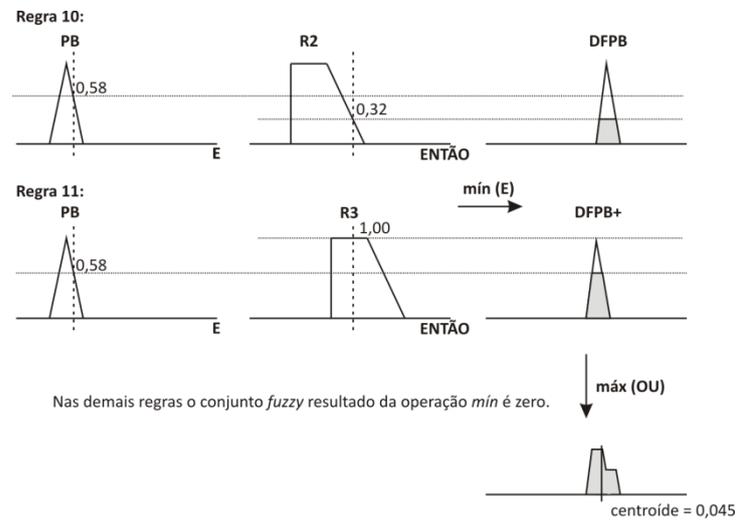


Figura 5.17 - Cálculo da variável de saída do controlador para PM = 17 e FR = 4,5

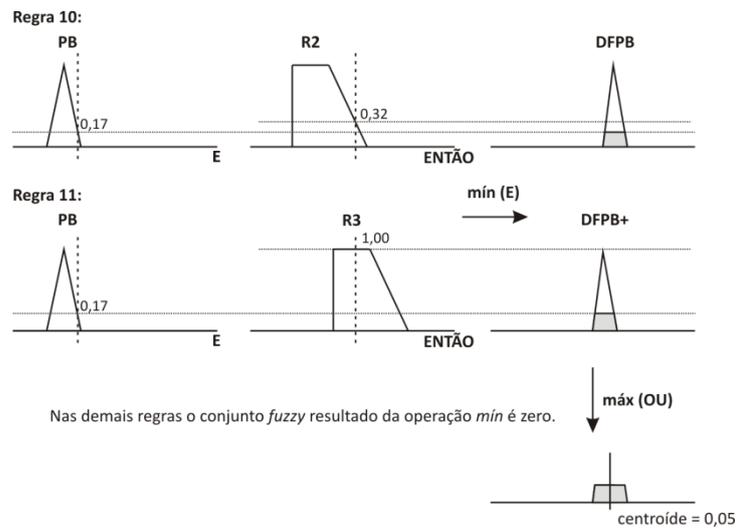


Figura 5.18 - Cálculo da variável de saída do controlador para PM = 19 e FR = 4,5

Quanto à função de pertinência OT, esta deveria ser do tipo *fuzzy-tom*, porque o valor desejado corresponde a um valor discreto (20), entretanto, como o sistema controlado possui uma oscilação natural, preferiu-se utilizar uma forma retangular, o que, na prática, transformou o valor desejado no intervalo [19,8, 20,2].

5.3.2 Variável Lingüística de Entrada FR

Como já foi citado, a variação da frequência de acionamento do conjunto motor-bomba é realizada através de um conversor de frequência, cujo controle é realizado por uma tensão elétrica contínua que varia de 0 a 8,8 Vcc. O gráfico que relaciona a frequência da tensão de alimentação do CMB, em função do sinal de controle enviado para o CF, é apresentado na Figura 5.19, onde pode ser verificado que a função é linear. Deste modo, foi escolhido o intervalo [0, 8,8] como universo de discurso para a variável FR.

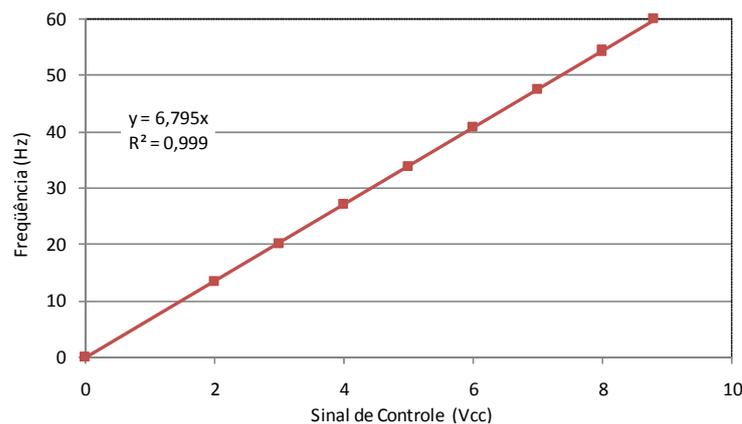


Figura 5.19 - Valores da frequência da tensão de alimentação em função do sinal de controle

Assim como a variável PM, as funções de pertinência de FR foram determinadas através de recomendações da literatura e conhecimento heurístico extensivamente sintonizado através de simulações e ensaios experimentais. Optou-se pela escolha de seis termos para caracterizar qualitativamente a variável, com formatos trapezoidais. À medida que a variável FR se aproxima do valor máximo, há um particionamento fuzzy mais refinado nessas regiões, isto é, as faixas são menores. As características das funções de pertinência de FR são apresentadas na Tabela 5.2. A representação gráfica da variável é mostrada na Figura 5.20.

variável de posição de um servo-sistema; destacando que perto do ponto central de equilíbrio os termos são mais densos, garantindo uma maior sensibilidade para um ajuste preciso de posição, enquanto um ajuste mais grosseiro é aceitável em regiões mais distantes do ponto de equilíbrio. Optou-se pela escolha de nove termos para caracterizar qualitativamente a variável de saída, a fim de suavizar o sinal de saída. Esta suavização é importante para evitar picos de correntes no motor elétrico. As características das funções de pertinência de DF são apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Características das funções de pertinência da variável de saída DF

Função	Descrição	Forma	Parâmetros
DFNA	Delta Negativo e Alto	Trapezoidal	[-0,3 -0,3 -0,2 -0,1]
DFNE	Delta Negativo e Médio	Triangular	[-0,2 -0,1 -0,05]
DFNB	Delta Negativo e Baixo	Triangular	[-0,1 -0,05 -0,03]
DFNB-	Delta Negativo e um Pouco Baixo	Triangular	[-0,05 -0,03 0]
DFZE	Delta Zero	Triangular	[-0,1 0 0,1]
DFPB+	Delta Positivo e um Pouco Baixo	Triangular	[0 0,03 0,05]
DFPB	Delta Positivo e Baixo	Triangular	[0,03 0,05 0,1]
DFPO	Delta Positivo e Médio	Triangular	[0,05 0,1 0,2]
DFPA	Delta Positivo e Alto	Trapezoidal	[0,1 0,2 0,3 0,3]

O universo de discurso da variável cobre valores negativos e positivos e está compreendido no intervalo [-0,30, 0,30], que corresponde a valores reais de tensão elétrica. A soma do valor de DF mais FR (varia entre 0 e 8,8) corresponderá ao valor da tensão enviada ao conversor através da DAQ. As funções de pertinência são indicadas na Figura 5.21.

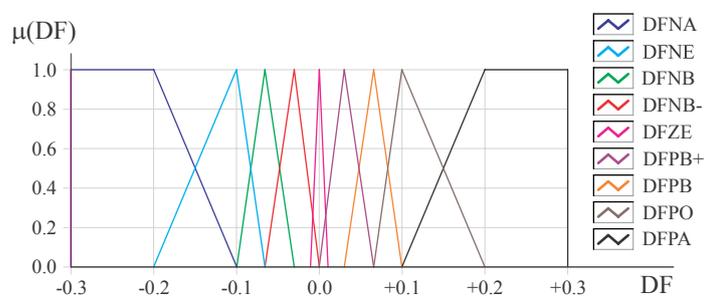


Figura 5.21 - Funções de pertinência da variável linguística DF

Tabela 5.5 - Base de regras do controlador fuzzy do CF

Nº Regra	Regra
01	SE PM é “MB” E FR é “R1” ENTÃO DF é positivo e alto “DFPA”
02	SE PM é “MB” E FR é “R2” ENTÃO DF é positivo e alto “DFPA”
03	SE PM é “MB” E FR é “R3” ENTÃO DF é positivo e alto “DFPA”
04	SE PM é “MB” E FR é “R4” ENTÃO DF é positivo e médio “DFPO”
05	SE PM é ”BA” E FR é “R1” ENTÃO DF é positivo e alto “DFPA”
06	SE PM é ”BA” E FR é “R2” ENTÃO DF é positivo e médio “DFPO”
07	SE PM é ”BA” E FR é “R3” ENTÃO DF é positivo e baixo “DFPB”
08	SE PM é ”BA” E FR é “R4” ENTÃO DF é positivo e baixo “DFPB”
09	SE PM é “PB” E FR é “R1” ENTÃO DF é positivo e baixo “DFPB”
10	SE PM é “PB” E FR é “R2” ENTÃO DF é positivo e baixo “DFPB”
11	SE PM é “PB” E FR é “R3” ENTÃO DF é positivo e pouco baixo “DFPB+”
12	SE PM é “PB” E FR é “R4” ENTÃO DF é positivo e pouco baixo “DFPB+”
13	SE PM é “PB” E FR é “R5” ENTÃO DF é positivo e pouco baixo “DFPB+”
14	SE PM é “PB” E FR é “R6” ENTÃO DF é zero “DFZE”
15	<i>SE PM é “OT” ENTÃO DF é zero “DFZE”</i>
16	SE PM é “PA” E FR é “R2” ENTÃO DF é negativo e pouco baixo “DFNB-”
17	SE PM é “PA” E FR é “R3” ENTÃO DF é negativo e pouco baixo “DFNB-”
18	SE PM é “PA” E FR é “R4” ENTÃO DF é negativo e pouco baixo “DFNB-”
19	SE PM é “PA” E FR é “R5” ENTÃO DF é negativo e baixo “DFNB”
20	SE PM é “PA” E FR é “R6” ENTÃO DF é negativo e baixo “DFNB”
21	SE PM é “AL” E FR é “R3” ENTÃO DF é negativo e baixo “DFNB”
22	SE PM é “AL” E FR é “R4” ENTÃO DF é negativo e médio “DFNE”
23	SE PM é “AL” E FR é “R5” ENTÃO DF é negativo e médio “DFNE”
24	SE PM é “AL” E FR é “R6” ENTÃO DF é negativo e alto “DFNA”
25	SE PM é “MA” E FR é “R3” ENTÃO DF é negativo e médio “DFNB”
26	SE PM é “MA” E FR é “R4” ENTÃO DF é negativo e médio “DFNE”
27	SE PM é “MA” E FR é “R5” ENTÃO DF é negativo e alto “DFNA”
28	SE PM é “MA” E FR é “R6” ENTÃO DF é negativo e alto “DFNA”

Tabela 5.6 - Características do controlador fuzzy do CF

Controlador:	Fuzzy
Método de inferência:	MAX-MIN
Ferramenta computacional:	<i>Fuzzy Logic Control</i> TM (Labview TM)
Número de entradas:	2
Número de saídas:	1
Variáveis de Entrada:	PM e FR
Variável de Saída:	DF
Número de regras:	28
Métodos de defuzzificação:	C-o-A

5.3.5 Resultado das Simulações do Controlador do CF

Na análise do comportamento da variável de saída do controlador fuzzy, para a velocidade de rotação da bomba, foram realizadas simulações mantendo uma das variáveis de entrada em valores fixos. As Figuras 5.22 e 5.23 apresentam o comportamento de DF *versus* PM (FR com valores fixos) e DF *versus* FR (PM com valores fixos), respectivamente.

É importante frisar que os gráficos demonstram a continuidade da tendência das curvas do sinal de saída do controlador, podendo ser observado, claramente, que todos os gráficos têm inclinação descendente, sem a ocorrência de picos (erro comum na modelagem de controladores fuzzy).

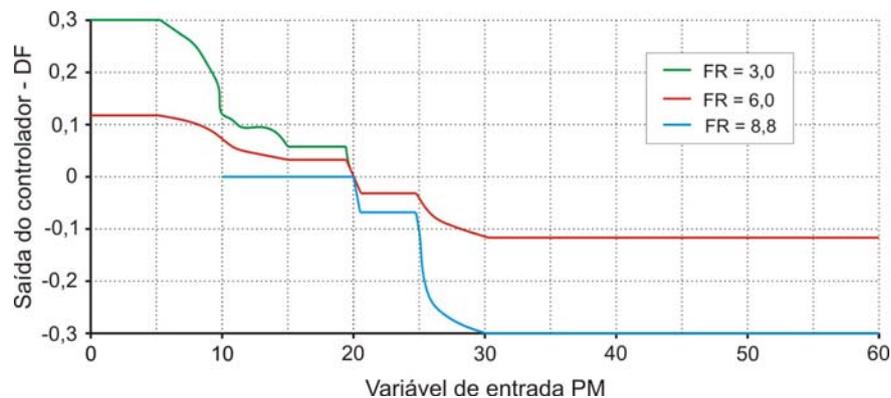


Figura 5.22 - Gráfico da variável DF *versus* PM

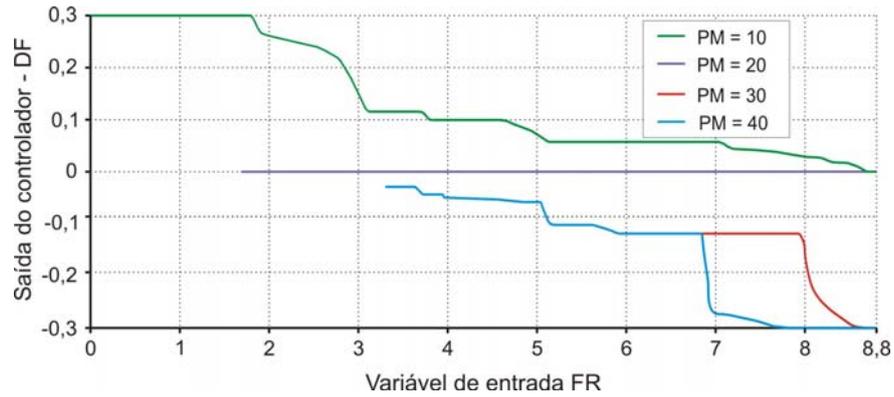


Figura 5.23 - Gráfico da variável DF versus FR

5.4 MODELAGEM DO CONTROLADOR FUZZY DA CVc

Para a modelagem do controlador fuzzy da CVc torna-se fundamental definir as variáveis de entrada e de saída. Através de uma análise qualitativa dos padrões de comportamento da pressão em função da abertura da válvula, determinaram-se duas entradas para o controlador fuzzy da válvula de controle - DP e AV. A Figura 5.24 apresenta as variáveis lingüísticas de entrada e de saída do controlador fuzzy da válvula de controle. As variáveis de entrada, variável de saída e a base de regras são apresentadas a seguir.

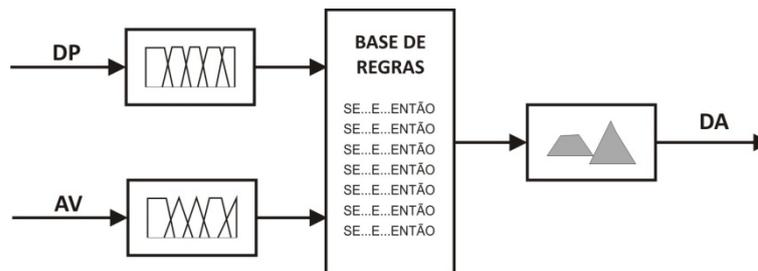


Figura 5.24 - Variáveis lingüísticas de entrada e saída do controlador fuzzy da CVc

5.4.1 Variável Lingüística de Entrada DP

A variável de entrada DP é definida com base nas medições dos transdutores de pressão e representa o valor da diferença de pressão que definirá um novo ângulo de abertura da válvula de controle. A variável DP é calculada através da Eq. (5.2) e corresponde ao excesso ou déficit de pressão a jusante da válvula CVc. A DP tem zero como valor desejado.

$$DP = (P_1 - P_{1req}) - (P_2 - P_{2req}) \quad (5.2)$$

onde:

P_1 - pressão medida no ponto de medição a jusante da CVc (PT1);

P_{1req} - valor de referência do ponto de medição a jusante da CVc (PT1);

P_2 - pressão medida no ramal 2 (PT2); e

P_{2req} - pressão mínima no ramal 2 (PT2).

As funções de pertinência foram determinadas através de recomendações da literatura e de conhecimento heurístico extensivamente sintonizado através de simulações e ensaios experimentais. O conjunto de funções de pertinência segue um formato típico apresentado na literatura, onde os termos fronteiros são trapezoidais e o restante dos termos é triangular e vão diminuindo a faixa de atuação à medida que se aproximam do valor zero. O valor desejado é zero, portanto, para o valor equivalente fuzzificado à função de pertinência ZE tem grau 1 (um) e 0 (zero) para as demais funções. As características das funções de pertinência de DF são apresentadas na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Características das funções de pertinência da variável de entrada DP

Função	Descrição	Forma	Parâmetros
NG	Valor Negativo e Grande	Trapezoidal	[-5 -5 -3 -2]
NE	Valor Negativo e Médio	Triangular	[-3 -2 -1]
NP	Valor Negativo e Pequeno	Triangular	[-2 -1 -0,1]
ZE	Zero	Triangular	[-1 0 1]
PP	Valor Positivo e Pequeno	Triangular	[0,1 1 2]
PO	Valor Positivo e Médio	Triangular	[1 2 3]
PG	Valor Positivo e Grande	Trapezoidal	[2 3 5 5]

A Figura 5.25 mostra as funções de pertinência da variável DP. O espaço ou universo de discurso, para estas funções de entrada, foi delimitado entre -5 e 5; que corresponde à faixa em valores reais medidos em metro de coluna d'água (mca).

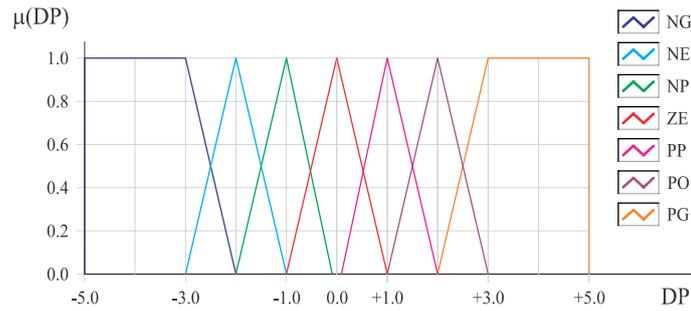


Figura 5.25 - Funções de pertinência da variável lingüística DP

5.4.2 Variável Lingüística de Entrada AV

A válvula de controle utilizada na pesquisa é do tipo proporcional e tem seu ângulo de abertura variando linearmente com a tensão elétrica de controle imposta a mesma, que varia de 2 a 10 Vcc. A abertura total da válvula corresponde a um ângulo de 90° para uma tensão de controle de 10 Vcc, e 0° para 2 Vcc.

O ângulo de abertura versus o sinal de controle foi examinado experimentalmente e resultou em uma relação linear, conforme mostrado na Figura 5.26. Porém, optou-se pela relação direta (Eq. 5.3) encontrada através dos pares 2 Vcc = 0° e 10 Vcc = 90°.

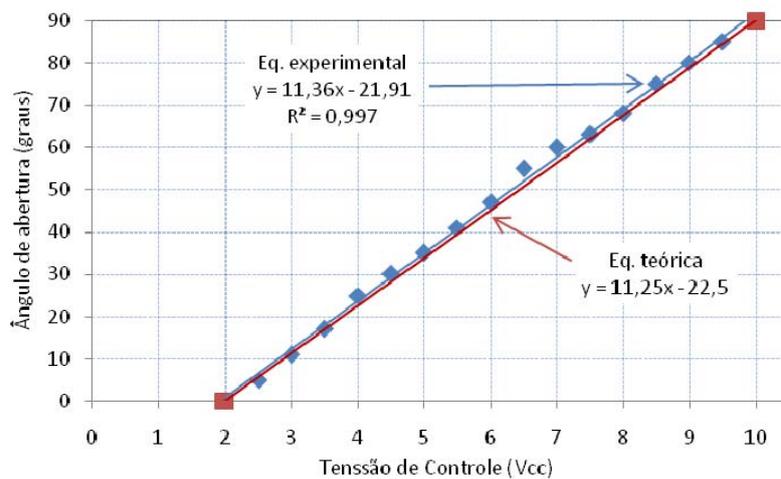


Figura 5.26 - Ângulo de abertura versus o sinal de controle da válvula de controle

$$y_{CVc} = 11,25 * x_{CVc} - 22,5 \quad (5.3)$$

onde:

x_{CVc} - ângulo de abertura da válvula de controle em graus; e

y_{CVc} - tensão de controle em Vcc.

A variável de entrada AV corresponde ao ângulo de abertura da válvula controlada pelo sistema fuzzy, denominada de CVc. Apesar de a CVc ser controlada por uma tensão 2 a 10 Vcc, observou-se, com base no levantamento experimental da variação angular de abertura versus à pressão a jusante, que só há variação de pressão no intervalo de 17° a 60°. Portanto, o intervalo do U é [17, 60].

As curvas de pressão versus ângulo de abertura da válvula são apresentadas na Figura 5.27. Foram avaliadas cinco condições de operação, que variam da situação de vazão máxima possível até uma vazão muito pequena. A variação da vazão foi possível através do acréscimo/decrécimo de perda de carga (perda de energia) no sistema; quanto menor a perda de carga da rede hidráulica, menor é a altura manométrica e conseqüentemente, maior a vazão fornecida ao sistema. A variação da perda de carga é feita através de uma válvula de controle instalada á jusante da medição analisada, chamada de CVs.

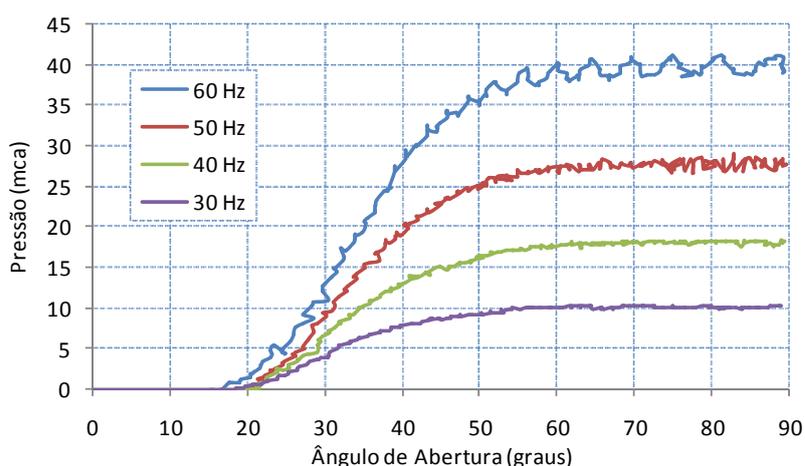


Figura 5.27 - Variação do ângulo de abertura da válvula versus a pressão

Avaliando a pressão a jusante da CVc, através do gráfico da Figura 5.27, observa-se que entre 0° e 17° a CVc está praticamente fechada. No intervalo de 60° a 90° a CVc está praticamente aberta e a perda de carga se aproxima de zero. Esta análise é imprescindível para a definição das funções de pertinência e do processo de decisão no controle do sistema. Com base nas informações acima, foram estipuladas sete funções de pertinência. As características das funções de pertinência da variável AV estão apresentadas na Tabela 5.8. A representação gráfica da variável é mostrada na Figura 5.28. As funções foram definidas com o formato trapezoidal, de modo que para cada função de

pertinência houvesse uma faixa central sem superposição. No caso desta variável, optou-se por uma variação mais sensível à medida que esta se aproxima das fronteiras.

Na região central dos termos não há sobreposição de funções, para que a variável de saída seja determinada apenas por uma regra da variável AV. Os termos foram assim determinados para facilitar a análise experimental de cada regra. A válvula utilizada possuía folga e zona morta considerável, requerendo diversos ajustes nos conjuntos fuzzy. Uma das vantagens do controlador fuzzy é permitir que o tamanho de passo de busca decresça adaptativamente, de forma que o rastreamento atinja uma rápida convergência. O controle fuzzy, devido a sua robustez, conseguiu superar limitações dos equipamentos com eficiência. Adotou-se o número de sete termos, que é recomendado pela literatura.

Tabela 5.8 - Características das funções de pertinência da variável de entrada AV

Função	Descrição	Forma	Parâmetros
A1	Faixa de Abertura 1	Retangular	[17 17 19,1 19,1]
A2	Faixa de Abertura 2	Trapezoidal	[19,1 23,3 25,4 29,6]
A3	Faixa de Abertura 3	Trapezoidal	[25,4 29,6 31,7 35,9]
A4	Faixa de Abertura 4	Trapezoidal	[31,7 35,9 41,1 45,3]
A5	Faixa de Abertura 5	Trapezoidal	[41,1 45,3 47,4 51,6]
A6	Faixa de Abertura 6	Trapezoidal	[47,4 51,6 53,7 57,9]
A7	Faixa de Abertura 7	Retangular	[57,9 57,9 60 60]

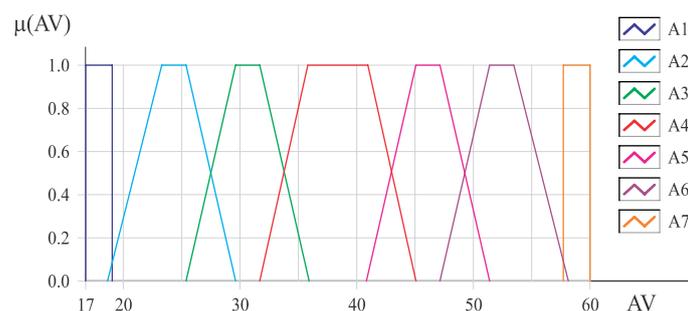


Figura 5.28 - Funções de pertinência da variável linguística AV

Foi estabelecido que as funções de pertinência fronteiriças do Universo de Discurso tivessem grau de pertinência 1 e não fossem sobrepostas pelas demais; isso porque, neste caso, é conveniente que a variável de entrada AV possua apenas um termo que interfira na variável de saída. Adotou-se um intervalo com tamanho de 2,1°, de

maneira que não haja como a variável de saída indicar uma posição inferior a 17° ou superior a 60° . Tem-se que a válvula, quando estiver com o grau de abertura pertencente ao termo A1, somente abrirá, ou seja, independentemente do valor da variável DP, a variável de saída DA sempre será maior ou igual a zero. No caso do termo A7, tem-se que a válvula somente fechará, ou seja, independentemente do valor da variável DP, a variável de saída DA sempre será menor ou igual a zero.

O conjunto de funções de pertinência estabelecido para a variável AV possui uma particularidade, o ponto de intersecção entre os termos A1 e A2, A6 e A7. Nestes casos o valor de $19,1^\circ$ assume o valor imediatamente sucessor (Figura 5.29a) e o valor $57,9^\circ$ assume o valor imediatamente antecessor (Figura 5.30a). Nestes casos, a passagem de um termo para outro resulta em alterações bruscas na variável de saída, conforme pode ser observado nas Figuras 5.29 e 5.30. A Figura 5.29b e a Figura 5.30b apresentam o gráfico de DA versus DP para $AV = 19,09^\circ$ e $57,91^\circ$, respectivamente. Embora não seja comum, diversos autores utilizaram conjuntos de funções de pertinência semelhantes para controle de processos, e.g., VANDERLEI FILHO *et al.* (2002), LUNA FILHO *et al.* (2002), AMENDOLA *et al.* (2006), KANG e KIM (2006), CHOI e CHANG-HUN KIM (2007).

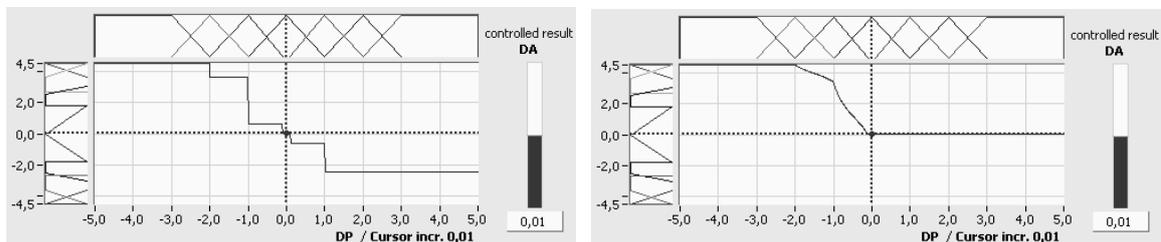


Figura 5.29 - Gráfico da variável DA versus DP para (a) $AV = 19,1^\circ$ e (b) $AV = 19,09^\circ$

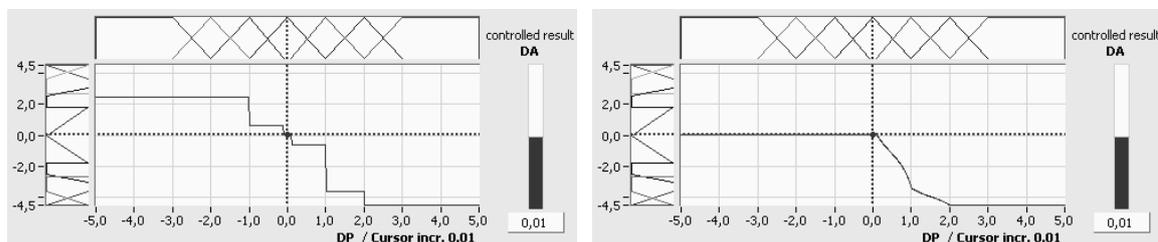


Figura 5.30 - Gráfico da variável DA versus DP para (a) $AV = 57,9^\circ$ e (b) $AV = 57,91^\circ$

O termo A4 possui uma faixa central mais larga, por representar a faixa de abertura útil central da válvula, logo o controlador possui mais flexibilidade para resultar em valores positivos e negativos.

5.4.3 Variável Lingüística de Saída DA

A saída, denominada de Delta Angular (DA), refere-se ao acréscimo/decréscimo do ângulo de abertura da válvula CVc instalada a montante do transdutor de pressão (PT1). A forma heurística de procura da variável de saída DA é baseada no seguinte conceito:

“Se há excesso de pressão a jusante da válvula de controle, esta deve diminuir o ângulo de abertura; se há déficit de pressão a jusante da válvula de controle, esta deve aumentar o ângulo de abertura.”.

A CVc é responsável por acrescentar perda de carga (perda de energia) ao ramal 1 (ver Figura 5.1), o que proporciona à redução de pressão a jusante da mesma, diminuindo a pressão ao longo da rede hidráulica. O acréscimo de perda de carga (energia) no sistema será analisado dando prioridade à diminuição da velocidade de rotação do conjunto motor-bomba.

Para a determinação dos conjuntos de funções de pertinência, realizou-se um ensaio onde foi enviado um sinal de tensão para a válvula variar a abertura de 0° para 90° e de 90° para 0°, que resultou em um tempo de abertura e fechamento total de 90 segundos. Com base na curva tempo *versus* ângulo de abertura da válvula, conclui-se que a variação é linear, e que cada segundo corresponde a 1° de abertura da válvula. Entretanto, através de avaliações experimentais, verificou-se que na prática a válvula se move na proporção de ¼ do sinal que é enviado para ela. Portanto, foi estipulado o intervalo [-4,5, 4,5] para o universo de discurso (U).

Os termos foram determinados com base em outros trabalhos e conhecimento heurístico extensivamente sintonizado através de ensaios experimentais. Como a válvula utilizada possui uma zona morta considerável, o intervalo [-1, 1] não implica em movimentos e o fato do termo A4 não haver superposição, melhorou os resultados.

A escolha das funções de pertinência para os termos lingüísticos desempenha um papel importante no sucesso da aplicação, porém são definidas subjetivamente, baseando-se na experiência e senso prático (LEE, 1990). Para esta aplicação foram analisadas diferentes funções de pertinência, sendo os melhores resultados obtidos para as funções apresentadas na Figura 5.31. As características das funções de pertinência da variável AV estão apresentadas na Tabela 5.10.

Tabela 5.9 - Características das funções de pertinência da variável de saída DA

Função	Descrição	Forma	Parâmetros
DANG	Delta Negativo e Grande	Triangular	[-4,5 -4,5 -3,6]
DANE	Delta Negativo e Médio	Trapezoidal	[-4,5 -3,6 -2,7 -2,7]
DANP	Delta Negativo e Pequeno	Trapezoidal	[-3 -2,5 -1,8 -1,8]
DAZE	Delta Zero	Triangular	[-1,8 0 1,8]
DAPP	Delta Positivo e Pequeno	Trapezoidal	[1,8 1,8 2,5 3]
DAPO	Delta Positivo e Médio	Trapezoidal	[2,7 2,7 3,6 4,5]
DAPG	Delta Positivo e Valor Grande	Triangular	[3,6 4,5 4,5]

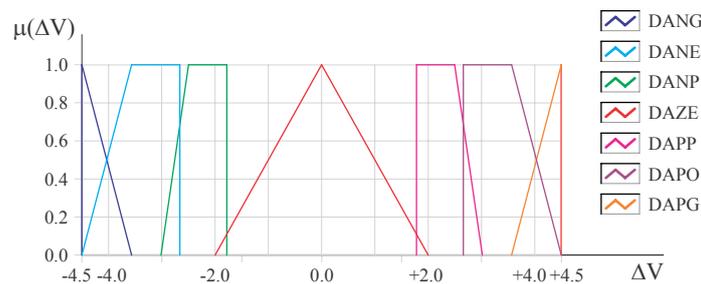


Figura 5.31 - Funções de pertinência da variável linguística DA

5.4.4 Sistema de Inferência Fuzzy do Controlador da CVc

Foram estabelecidas 37 regras de inferência fuzzy para determinação da variável de saída DA, que relacionam as 7 funções de pertinência da DP com as 7 funções da AV. A Tabela 5.10 apresenta a matriz associativa fuzzy, enquanto as regras são descritas na

Tabela 5.11. Nas lacunas em branco da matriz associativa fuzzy podem ser inserido alarmes, a fim de avisar o usuário sobre anormalidades no sistema. As regras foram adotadas buscando uma simetria na variável de saída do controlador.

Tabela 5.10 - Matriz associativa fuzzy do controlador da CVc

		Variável DP						
		NG	NE	NP	ZE	PP	PO	PG
Variável AV	A1	DAPG	DAPG	DAPO	DAZE	-	-	-
	A2	DAPG	DAPG	DAPP	DAZE	DANP	DANP	DANP
	A3	DAPG	DAPG	DAPP	DAZE	DANP	DANE	DANE
	A4	DAPG	DAPO	DAPP	DAZE	DANP	DANE	DANG
	A5	DAPO	DAPO	DAPP	DAZE	DANP	DANG	DANG
	A6	DAPP	DAPP	DAPP	DAZE	DANP	DANG	DANG
	A7	-	-	-	DAZE	DANE	DANG	DANG

Tabela 5.11 - Base de regras do controlador fuzzy do CF

Nº Regra	Regra
01	SE DP é “NG” E AV é “A1” ENTÃO DA é positivo e grande “DAPG”
02	SE DP é “NG” E AV é “A2” ENTÃO DA é positivo e grande “DAPG”
03	SE DP é “NG” E AV é “A3” ENTÃO DA é positivo e grande “DAPG”
04	SE DP é “NG” E AV é “A4” ENTÃO DA é positivo e grande “DAPG”
05	SE DP é “NG” E AV é “A5” ENTÃO DA é positivo e médio “DAPO”
06	SE DP é “NG” E AV é “A6” ENTÃO DA é positivo e pequeno “DAPP”
07	SE DP é “NE” E AV é “A1” ENTÃO DA é positivo e grande “DAPG”
08	SE DP é “NE” E AV é “A2” ENTÃO DA é positivo e grande “DAPG”
09	SE DP é “NE” E AV é “A3” ENTÃO DA é positivo e grande “DAPG”
10	SE DP é “NE” E AV é “A4” ENTÃO DA é positivo e médio “DAPO”
11	SE DP é “NE” E AV é “A5” ENTÃO DA é positivo e médio “DAPO”
12	SE DP é “NE” E AV é “A6” ENTÃO DA é positivo e pequeno “DAPP”
13	SE DP é “NP” E AV é “A1” ENTÃO DA é positivo e médio “DAPO”
14	SE DP é “NP” E AV é “A2” ENTÃO DA é positivo e pequeno “DAPP”
15	SE DP é “NP” E AV é “A3” ENTÃO DA é positivo e pequeno “DAPP”
16	SE DP é “NP” E AV é “A4” ENTÃO DA é positivo e pequeno “DAPP”
17	SE DP é “NP” E AV é “A5” ENTÃO DA é positivo e pequeno “DAPP”
18	SE DP é “NP” E AV é “A6” ENTÃO DA é positivo e pequeno “DAPP”
19	<i>SE DP é “ZE” ENTÃO DA é zero</i>
20	SE DP é “PP” E AV é “A2” ENTÃO DA é negativo e pequeno “DANP”
21	SE DP é “PP” E AV é “A3” ENTÃO DA é negativo e pequeno “DANP”
22	SE DP é “PP” E AV é “A4” ENTÃO DA é negativo e pequeno “DANP”
23	SE DP é “PP” E AV é “A5” ENTÃO DA é negativo e pequeno “DANP”
24	SE DP é “PP” E AV é “A6” ENTÃO DA é negativo e pequeno “DANP”
25	SE DP é “PP” E AV é “A7” ENTÃO DA é negativo e médio “DANE”
26	SE DP é “PO” E AV é “A2” ENTÃO DA é negativo e pequeno “DANP”
27	SE DP é “PO” E AV é “A3” ENTÃO DA é negativo e médio “DANE”
28	SE DP é “PO” E AV é “A4” ENTÃO DA é negativo e médio “DANE”
29	SE DP é “PO” E AV é “A5” ENTÃO DA é negativo e grande “DANG”
30	SE DP é “PO” E AV é “A6” ENTÃO DA é negativo e grande “DANG”
31	SE DP é “PO” E AV é “A7” ENTÃO DA é negativo e grande “DANG”
32	SE DP é “PG” E AV é “A2” ENTÃO DA é negativo e pequeno “DANP”
33	SE DP é “PG” E AV é “A3” ENTÃO DA é negativo e médio “DANE”
34	SE DP é “PG” E AV é “A4” ENTÃO DA é negativo e grande “DANG”
35	SE DP é “PG” E AV é “A5” ENTÃO DA é negativo e grande “DANG”
36	SE DP é “PG” E AV é “A6” ENTÃO DA é negativo e grande “DANG”
37	SE DP é “PG” E AV é “A7” ENTÃO DA é negativo e grande “DANG”

Em decorrência do controlador fuzzy da CVc atuar apenas quando o ângulo de abertura estiver entre 17° e 60° e a variável DP cobrir somente o intervalo [-5, 5], fez-se uma lógica de tomada de decisão para decidir os demais casos. Foi desenvolvido um sub-vi específico para a abertura da CVc, o código fonte (programação) é apresentado na Figura 5.32 (SubVI  do código de programação principal). As regras de decisão são apresentadas na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Regras de decisão da válvula CVc

Nº da regra	Regra
01	SE $AV_i < 17^\circ$ ENTÃO $AV_{i+1} = 18^\circ$
02	SE $AV_i > 17^\circ$ E $DP < -5$ mca ENTÃO $AV_{i+1} = AV_i + 2,25^\circ$
03	SE $AV_i > 60^\circ$ ENTÃO $AV_{i+1} = 59^\circ$
04	SE $AV_i < 60^\circ$ E $DP > 5$ mca ENTÃO $AV_{i+1} = AV_i - 2,25^\circ$
05	SE $-5 \leq DP \leq 5$ E $17^\circ \leq AV_i \leq 60^\circ$ ENTÃO AV será definida pelo SF

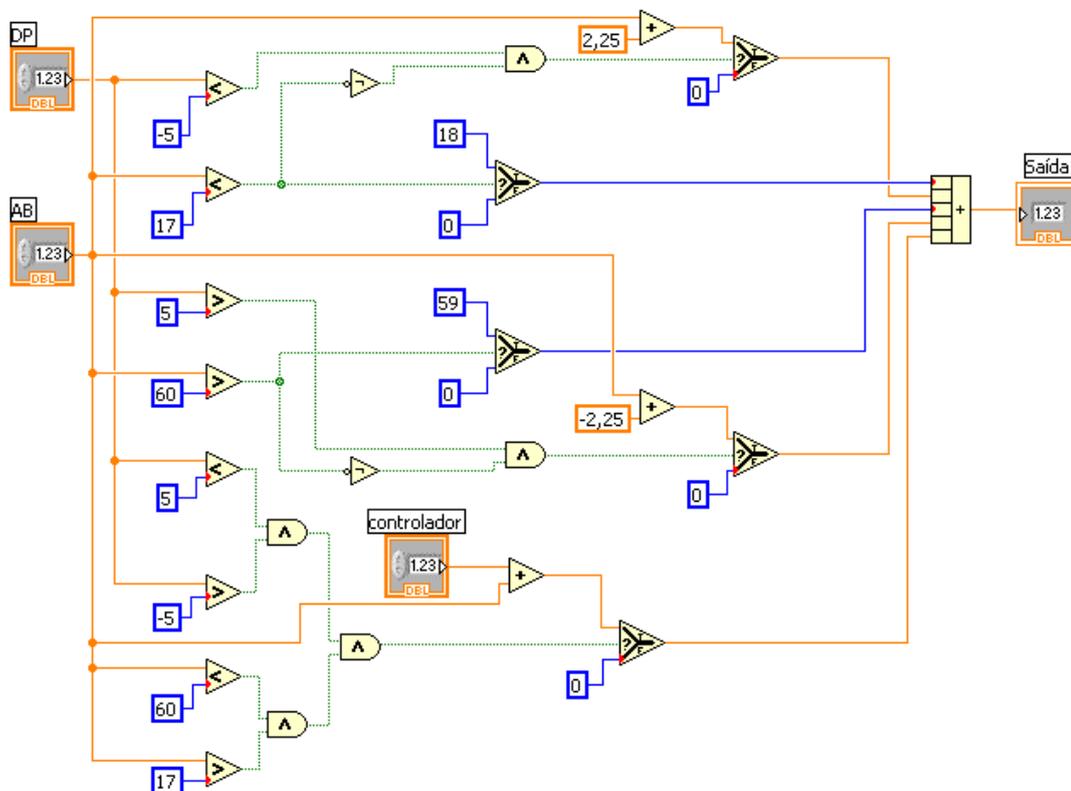


Figura 5.32 - Código fonte (programação) de abertura da válvula CVc

A Tabela 5.13 apresenta um resumo de todas as especificações do controlador fuzzy da válvula CVc.

Tabela 5.13 - Características do controlador fuzzy da válvula CVc

Controlador:	Fuzzy
Método de inferência:	MAX-MIN
Ferramenta computacional:	<i>Fuzzy Logic Control</i> TM (Labview TM)
Número de entradas:	2
Número de saídas:	1
Variáveis de Entrada:	AV e DP
Variável de Saída:	DA
Número de regras:	37
Métodos de defuzzificação:	C-o-A

5.4.5 Resultado das Simulações do Controlador da CVc

Na análise do comportamento da variável de saída do controlador fuzzy da CVc foram realizadas simulações mantendo uma das variáveis de entrada em valores fixos. As Figuras 5.33 e 5.34 apresentam o comportamento de DA *versus* DF (AV com valores fixos) e DF *versus* AV (DF com valores fixos), respectivamente.

É importante frisar que os gráficos demonstram a continuidade da tendência das curvas do sinal de saída do controlador, podendo ser observado, nitidamente, que todos os gráficos têm inclinação descendente, sem a ocorrência de picos (erro comum na modelagem de controladores fuzzy).

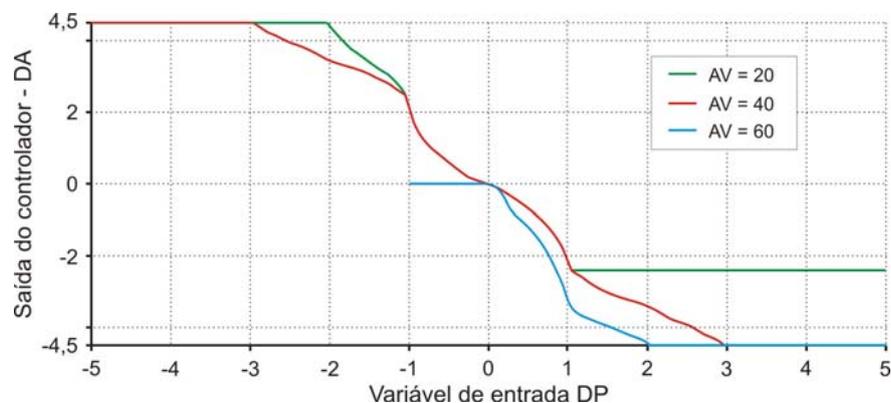


Figura 5.33 - Gráfico da variável DA *versus* DP

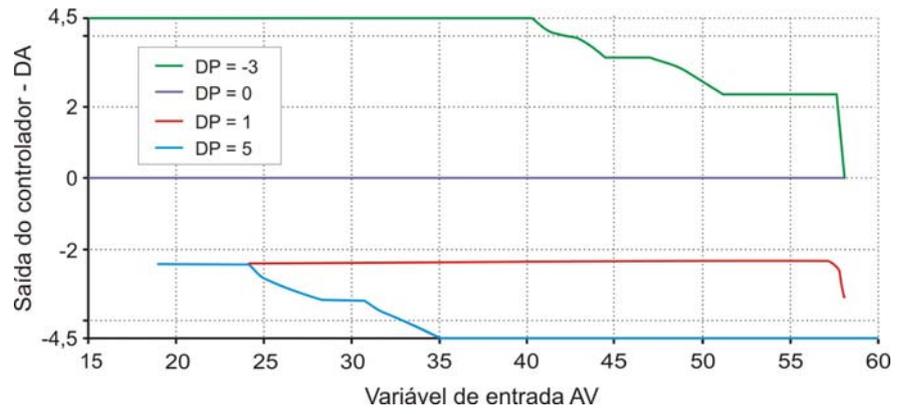


Figura 5.34 - Gráfico da variável DA *versus* AV

CAPÍTULO VI

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados, a fim de validar o sistema de controle proposto. São eles:

- ✓ Experimento 1 - Ensaio em malha fechada, com excitação do tipo degrau igual a 13,50 mca para a variável PM, apenas com o controlador fuzzy do conversor de frequência atuando.
- ✓ Experimento 2 - Ensaio em malha aberta (sem atuação do sistema de controle), com a válvula a jusante do PT1 (CVs) variando sua abertura de forma a simular a demanda de vazão de sistemas de abastecimento urbano de água.
- ✓ Experimento 3 - Ensaio em malha fechada, com uma entrada tipo degrau igual a 20 mca para a variável PM, apenas com o controlador fuzzy do conversor de frequência atuando. A válvula a jusante do PT1 (CVs) varia sua abertura de forma a simular a demanda de vazão de sistemas de abastecimento urbano de água.
- ✓ Experimento 4 - Ensaio em malha fechada para excitação tipo degrau, com valor igual a 20 mca para os dois transdutores de pressão.
- ✓ Experimento 5 - Ensaio em malha fechada para excitação tipo degrau, com valor igual a 15 mca para o transdutor PT1 e 20 mca para o transdutor PT2.

Foram realizados diversos testes, onde foi constatado que as respostas seguem, em cada experimento, um mesmo padrão.

6.1 EXPERIMENTO 1

Foi aplicada uma excitação, tipo degrau, igual a 13,5 mca para a variável PM, a fim de verificar a eficiência do controlador fuzzy do conversor de frequência, com o motor-bomba partindo do repouso (frequência igual a zero) e as válvulas totalmente abertas. Com este procedimento, foi possível obter os índices de desempenho do sistema de controle: tempo de assentamento, sobre-sinal e erro de regime permanente. 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 (*set-point*). 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. Geralmente, o erro de regime permanente é um parâmetro de entrada, enquanto o tempo de assentamento e o sobre-sinal são parâmetros de saída.

A Figura 6.1 mostra as curvas de resposta ao degrau nos dois pontos de medição de pressão, ou seja, o comportamento das pressões nos transmissores durante o experimento. Como as pressões mínimas estabelecidas para o PT1 e PT2 são iguais (13,5 mca) e o valor da pressão em PT2 é sempre menor que em PT1, a variável PM representa a medição do PT2.

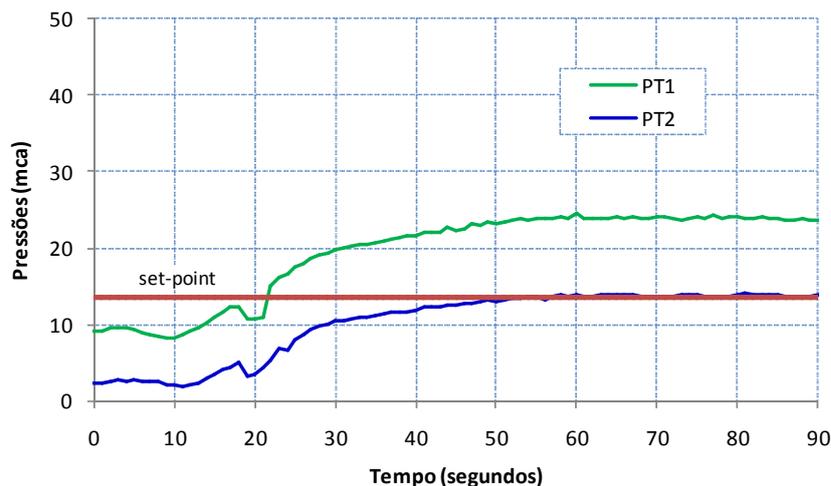


Figura 6.1 - Curvas de pressões resultantes do Experimento 1

Como se pode observar na Figura 6.1, o conversor de frequência, operando isoladamente, não tem a capacidade de controlar a pressão nos dois pontos de medição

simultaneamente, a atuação do conversor é apenas no ponto mais desfavorável do sistema (variável PM).

O erro de regime permanente foi de 3,47% (0,47 mca), tempo de assentamento de 48 segundos, e não houve sobre-sinal, conforme pode ser observado na Figura 6.1. Após a estabilização da pressão do sistema, fechou-se a CVs bruscamente, a fim de averiguar a resposta do controlador a perturbações²³; a Figura 6.2 apresenta os resultados. Após o fechamento brusco da CVs, a variável PM atingiu o valor de referência em 37 segundos. A Figura 6.3 mostra a curva de resposta da frequência (variável de controle).

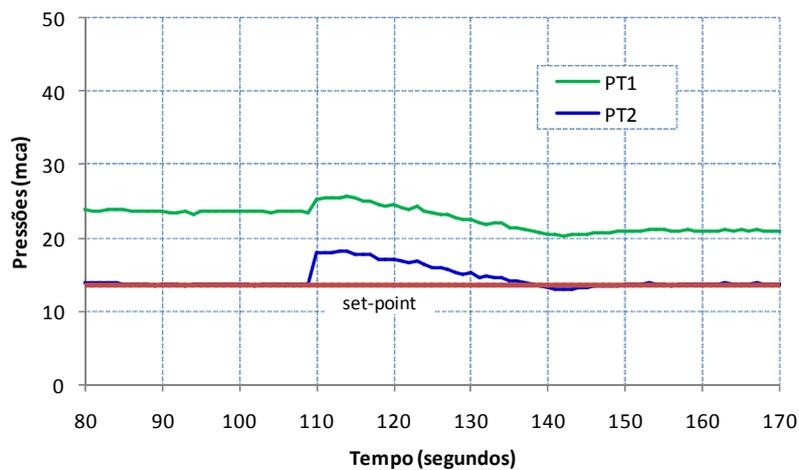


Figura 6.2 - Resposta do controlador fuzzy ao fechamento brusco da CVs - Experimento 1

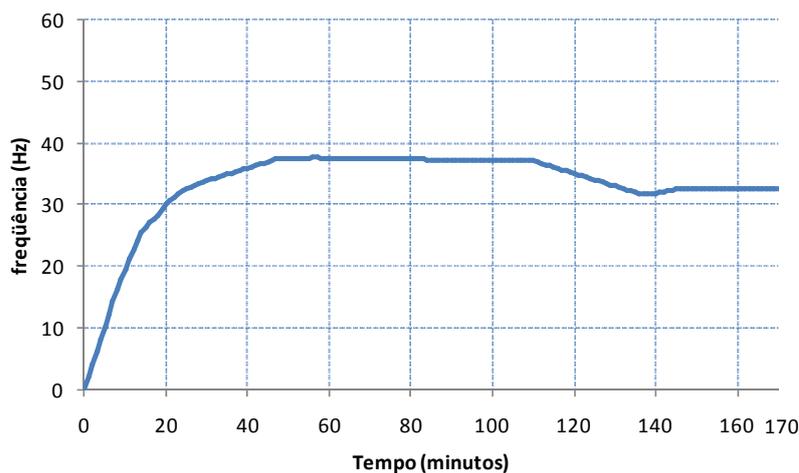


Figura 6.3 - Comportamento da variável de controle no Experimento 1

²³ Em sistemas de distribuição de água as perturbações são provenientes da demanda variável dos usuários, de vazamentos ou manobras na rede.

A Figura 6.4 mostra o comportamento da saída do controlador do conversor de frequência (variável DF) e a variável PM do Experimento 1. Observa-se que DF é positivo quando a variável PM é menor que 20 mca, DF é negativo quando a variável PM é maior que 20 mca, e a medida que o valor da variável se aproxima de 20 mca o valor, em módulo, de DF diminui.

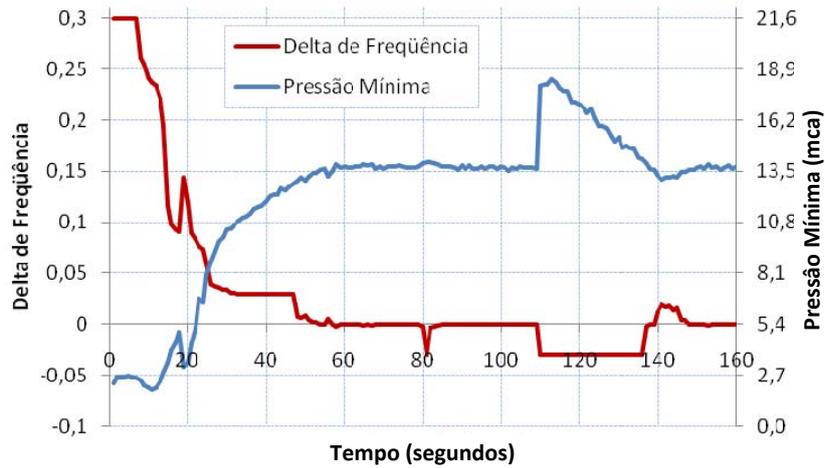


Figura 6.4 - Comportamento da saída do controlador do CF (variável DF) *versus* a pressão mínima do sistema - Experimento 1

A Figura 6.5 mostra a curva do erro de regime permanente do Experimento 1, que representa a diferença entre a variável PM medida e o *valor de referência* (13,5 mca). O intervalo de 109 a 138 segundos corresponde ao período do tempo de resposta ao fechamento brusco da CVs.



Figura 6.5 - Curva do erro de regime permanente do Experimento 1

6.2 EXPERIMENTO 2

O Experimento 2 foi realizado com o sistema em malha aberta, ou seja, sem nenhum tipo de controle atuando para posterior comparação com o Experimento 3. O experimento simula a operação diária de um sistema de abastecimento urbano de água. Destarte, foi desenvolvido no Labview™ um instrumento virtual para simular a demanda de um sistema real através da operação remota da CVs. A curva de abertura da CVs foi baseada no perfil da curva de consumo de água, de 24 horas, do setor de Itaim Paulista, Região Metropolitana de São Paulo (Figura 3.10) (TSUTIYA, 2004). O tempo do ensaio foi de 12 minutos (cada minuto corresponde a 2 horas). A Figura 6.6 mostra a curva teórica e a curva real de abertura da CVs do ensaio.

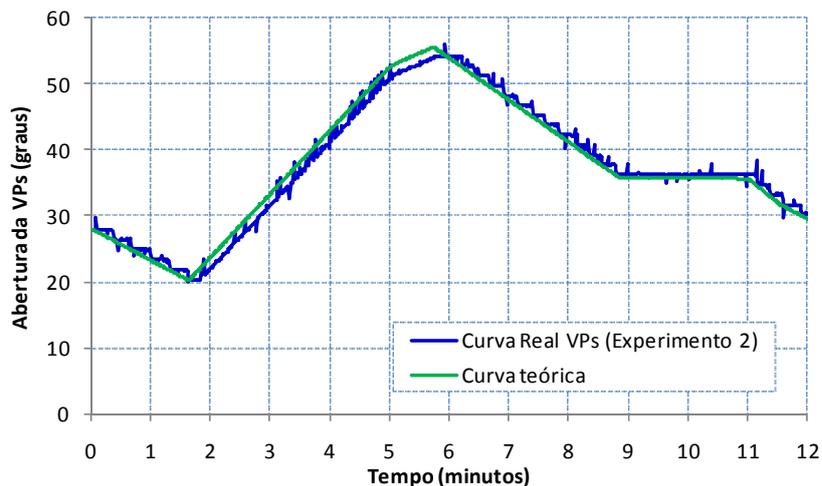


Figura 6.6 - Curva de abertura da válvula CVs do Experimento 2

As Figuras 6.7 e 6.8 apresentam, respectivamente, a pressão e a vazão nos ramais 1 e 2 do Experimento 2. Como se esperava, a vazão do ramal 1 segue o mesmo padrão da curva de abertura da CVs. A CVs tem a função de simular consumidores, logo a medida que a válvula abre, a vazão aumenta e a pressão diminui, e vice-versa.

A pressão no PT2 é sempre menor que no PT1 porque o registro a montante do PT2 está parcialmente fechado, provocando uma perda de energia localizada. Os experimentos foram assim realizados para que houvesse uma diferença de pressão nos dois pontos de medição. Obviamente, a carga hidráulica fornecida no início dos ramais é igual, por isso que apesar da pressão em PT1 ser sempre maior que PT2, a vazão em FT1

(ramal 1) pode ou não ser maior que em FT2 (ramal 2), dependendo da abertura da CVs, como se pode observar na Figura 6.8.

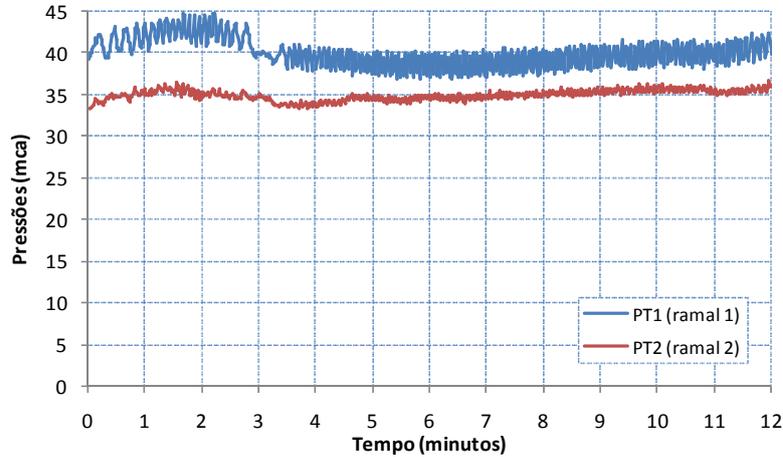


Figura 6.7 - Curvas de pressão do Experimento 2

Considerando a pressão de projeto de 20 mca²⁴, têm-se que as pressões médias em PT1 (40,02 mca²⁵) e PT2 (34,94 mca²⁵) são 100% e 75%, respectivamente, superiores à ideal.

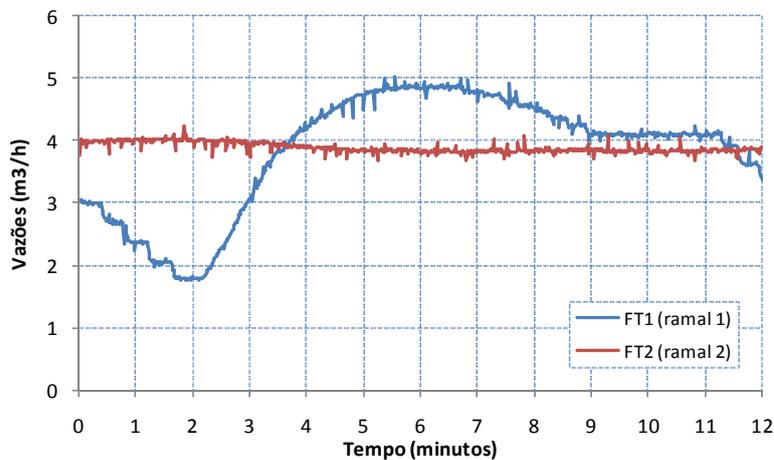


Figura 6.8 - Curvas de vazão do Experimento 2

A vazão média foi 3,84 m³/h²⁵ no ramal 1 e 3,89 m³/h²⁵ no ramal 2, perfazendo uma vazão média total de 7,73 m³/h.

²⁴ Valor utilizado como pressão mínima no Experimento 3 e ponto de operação ideal do conjunto motor-bomba da bancada experimental.

²⁵ Valores encontrados através das integrais das curvas no *software* MATLAB™.

6.3 EXPERIMENTO 3

O Experimento 3 foi realizado com as mesmas condições de operação do Experimento 2, porém com o controlador fuzzy do conversor de frequência atuando. Trata-se de um ensaio em malha fechada, com uma entrada tipo degrau igual a 20 mca para a variável PM. Inicialmente, a frequência da tensão de alimentação do motor foi 50 Hz e a CVc totalmente aberta. A variação do ângulo de abertura da CVs foi a mesma do Experimento 2, assim, pode-se analisar a resposta dos controladores a distúrbios (alterações no sistema) e a redução do consumo de energia elétrica. A Figura 6.9 mostra a curva teórica e a curva real de abertura da válvula CVs do Experimento 3.

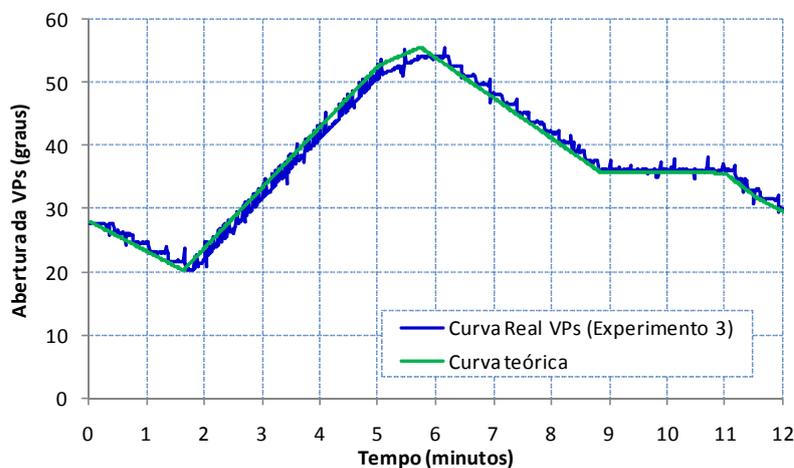


Figura 6.9 - Curvas de abertura da válvula CVs - Experimento 3

A Figura 6.10 e Figura 6.11 apresentam, respectivamente, a pressão e a vazão nos ramais 1 e 2 do Experimento 3. A variável PM é igual à pressão medida no PT2, porque as pressões mínimas determinadas para os pontos de medição (PT1 e PT2) são iguais e o valor da pressão em PT2 é sempre menor que em PT1. A curva de vazão do FT2 manteve o mesmo padrão da curva de abertura da CVc, pois o medidor FT2 está localizado no mesmo ramal da válvula. A vazão média foi $3,22 \text{ m}^3/\text{h}^{25}$ no ramal 1 e $3,71 \text{ m}^3/\text{h}^{25}$ no ramal 2, perfazendo uma vazão média total de $6,93 \text{ m}^3/\text{h}$. As pressões médias dos pontos de medição PT1 e PT2 foram, respectivamente, $27,04 \text{ mca}^{25}$ e $20,00 \text{ mca}$.

O sistema de controle apresentou uma excelente resposta, o erro de regime permanente foi de 3,11% (0,62 mca). A curva do erro de regime permanente do experimento é apresentada na Figura 6.12. O erro médio foi de 1,02%.

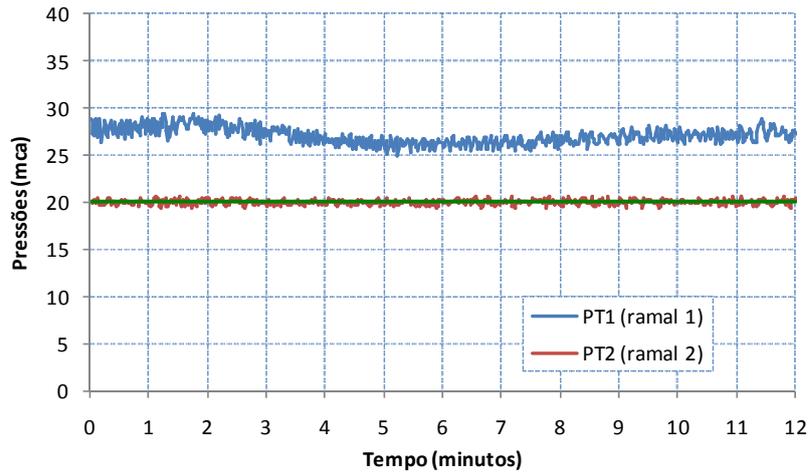


Figura 6.10 - Curvas de pressão do Experimento 3

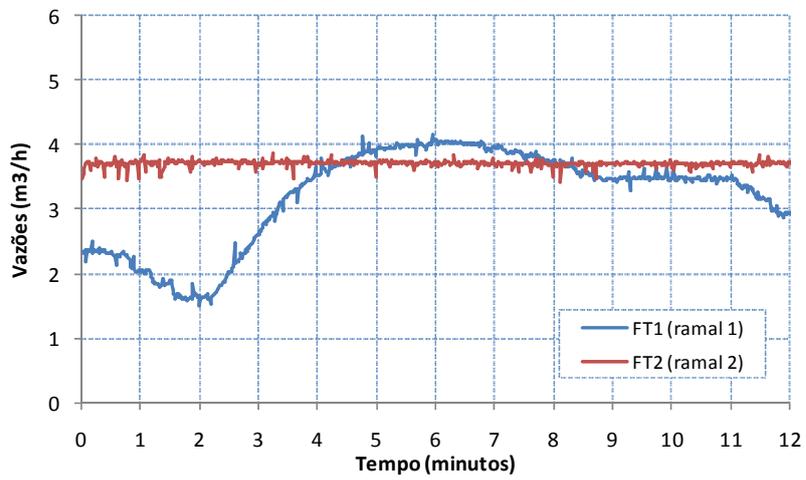


Figura 6.11 - Curvas de vazão do Experimento 3

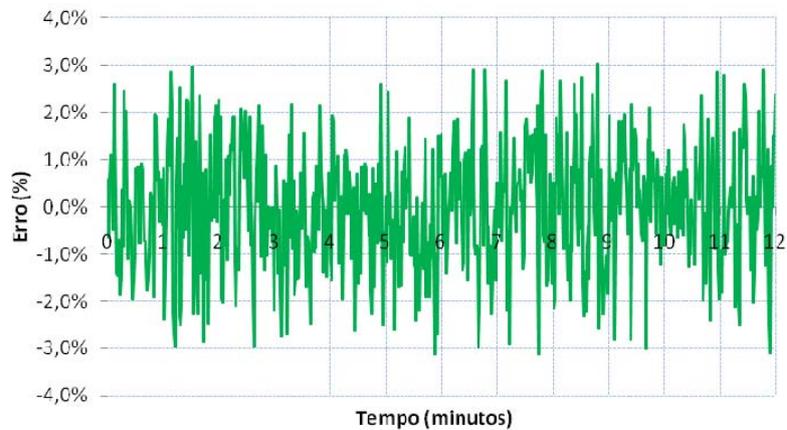


Figura 6.12 - Curva de erro de regime permanente do Experimento 3

6.3.1 Avaliação do Consumo de Água

O conversor de frequência, atuando de maneira isolado, não tem capacidade de otimizar a pressão em mais de um ponto de um sistema de distribuição de água, conforme se pôde observar na experiência apresentada (Figura 6.10). Os resultados da bancada experimental apresentaram um excesso de pressão de 35,2%²⁵ (7,04 mca) no PT1 (ramal 1).

Utilizando a equação sugerida por MAY (1994) (Eq. 3.1) e extrapolando os resultados para um SDA com vazamentos, com um valor de “N1” igual a dois (tubos de plástico), verifica-se que este acréscimo na pressão resultaria, potencialmente, em um aumento no volume de vazamento no ramal 1 de aproximadamente 83%, um valor bastante expressivo.

6.3.2 Avaliação do Consumo de Energia Elétrica

Para avaliar a eficiência energética do sistema experimental, com e sem o controlador do conversor de frequência (experimentos 2 e 3), foi medido *on-line* a potência consumida e calculado o índice de Consumo Específico de Energia Elétrica (kWh/m³).

O Consumo Específico de Energia Elétrica (CE) é largamente utilizado no setor de saneamento e é definido como a relação entre o consumo de energia (kWh) do sistema de bombeamento e o volume bombeado (m³), em um determinado tempo, e é expresso pela Eq. (5.4). Este indicador é bastante eficiente para acompanhamento de sistemas de bombeamento de água, porém é incorreto utilizá-lo para comparar a eficiência energética de sistemas de bombeamento diferentes. O CE compõe uma ferramenta importante na avaliação de projetos, permitindo ponderar o impacto de ações de eficiência na qualidade dos sistemas de bombeamentos.

$$CE = \frac{E}{V} \quad (5.4)$$

onde:

E - energia consumida no tempo t , em kWh; e

V - volume bombeado no tempo t , em m³.

Apesar do conversor de frequência consumir cerca de 5%²⁶ da energia total e ocasionar um decréscimo de rendimento do conjunto motor-bomba. Verificou-se que o controle de rotação proporcionou uma redução no consumo de energia elétrica de 19.312 kWh/ano para 12.547 kWh/ano, resultando numa economia de 35,03%, com uma diminuição de 27,91% no indicador CE. A Figura 6.13 mostra o comportamento das vazões bombeadas (ramal 1 + ramal 2), a Figura 6.14 apresenta as curvas de potência, e a Figura 6.15 exhibe a curva do CE. A Tabela 6.1 apresenta os valores dos parâmetros de avaliação energética dos experimentos 2 e 3. A redução no CE expressa à melhoria da eficiência do sistema. Como se trata de um sistema com uma demanda variável no tempo e o bombeamento direto na rede, a redução significativa no consumo energético era esperada, sendo esse estudo mais uma pesquisa que comprova a viabilidade do uso de conversores nestes casos.

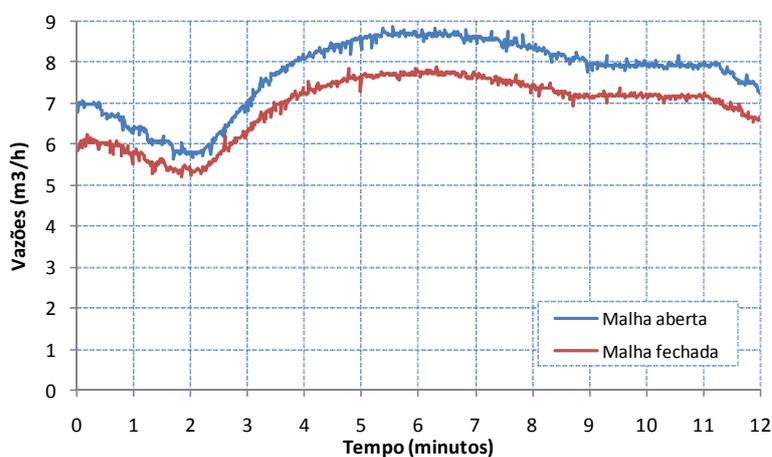


Figura 6.13 - Curvas de vazões totais dos experimentos 2 e 3

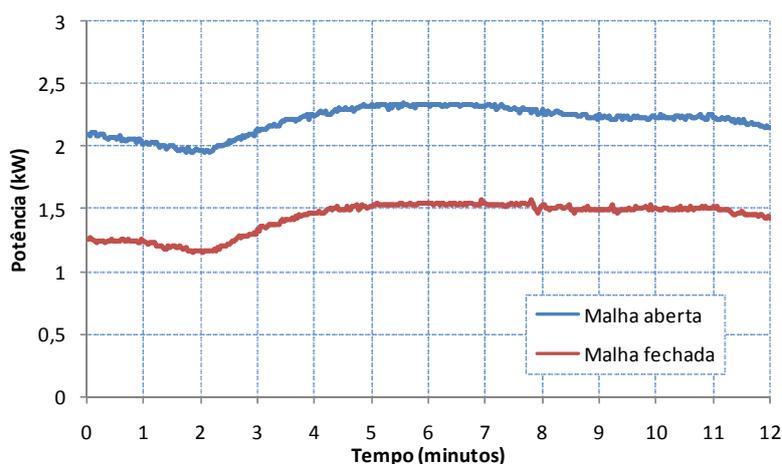


Figura 6.14 - Consumo energético do conjunto motor-bomba dos experimentos 2 e 3

²⁶ Os conversores consomem, em geral, de 2 a 5% da potência do sistema, ou seja, possuem uma eficiência de cerca de 95 a 98% (ARANTO, 2008).

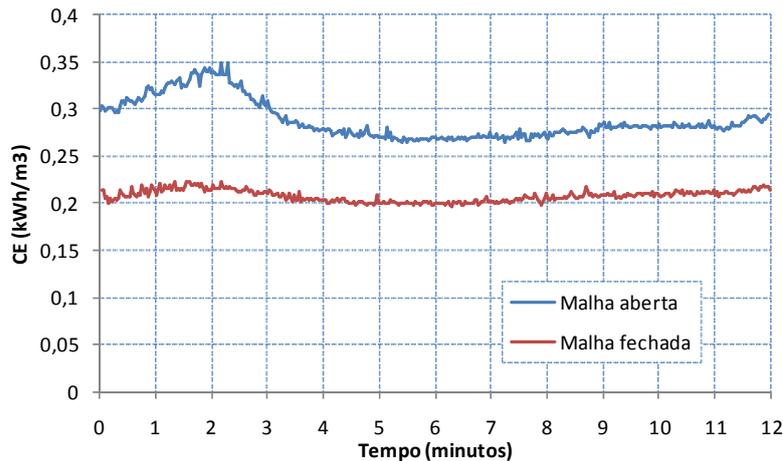


Figura 6.15 - Curvas do CE dos experimentos 2 e 3

Tabela 6.1 - Indicadores de consumo dos experimentos 2 e 3

	Sistema em malha aberta (Experimento 2)	Sistema em malha fechada (Experimento 3)	Diferença (%)
Vazão (m ³ /h)	7,7289	6,9268	10,38
Consumo de energia (kWh/ano)	19.312	12.547	35,03
CE (kWh/m ³)	0,2877	0,2074	27,91

6.4 EXPERIMENTO 4

Com o CMB partindo do repouso, a válvula de controle CVc fechada e a CVs com 45° de abertura, aplicou-se uma excitação do tipo degrau de 20 mca, para os dois pontos de medição da pressão. Com este procedimento, obtiveram-se os índices de desempenho do sistema de controle (sobre-sinal, tempo de assentamento e erro de regime permanente). A Figura 6.16 mostra as curvas de resposta ao degrau obtidas nos dois transdutores de pressão.

O tempo de assentamento foi de 90 segundos, o erro de regime permanente foi de 3,38% (0,68 mca) e 3,47% (0,70 mca), e o sobre-sinal de 16,80% (3,36 mca) e 33,91% (6,78 mca), ambos para os PT1 e PT2, respectivamente. Enquanto a pressão mínima do sistema é inferior a 20 mca (intervalo de 0 a 69), a velocidade de rotação da bomba segue em ascendência, e a CVc atua para zerar a diferença de pressão nos pontos de medição. O valor elevado do sobre-sinal no PT2 ocorre porque a elevação da pressão é drástica no intervalo de 33 a 37. Quando a pressão mínima atinge 19,98 mca (instantes 67 e 68), a

velocidade de rotação fica constante por 2 segundos, porém como a CVc continua abrindo, a pressão em PT1 ultrapassa o valor 20 no instante 69. No instante 69 a velocidade de rotação começa a diminuir para reduzir as pressões e a válvula continua abrindo para igualar as pressões. Quando as duas pressões se igualam (instante 80), a CVc pára de se mover e a freqüência continua diminuindo até as pressões alcançarem 19,83 mca e 20,23 mca em PT1 e PT2, respectivamente. Pode-se verificar o comportamento das respostas das variáveis de controle do sistema (freqüência e abertura da CVc) na Figura 6.17.

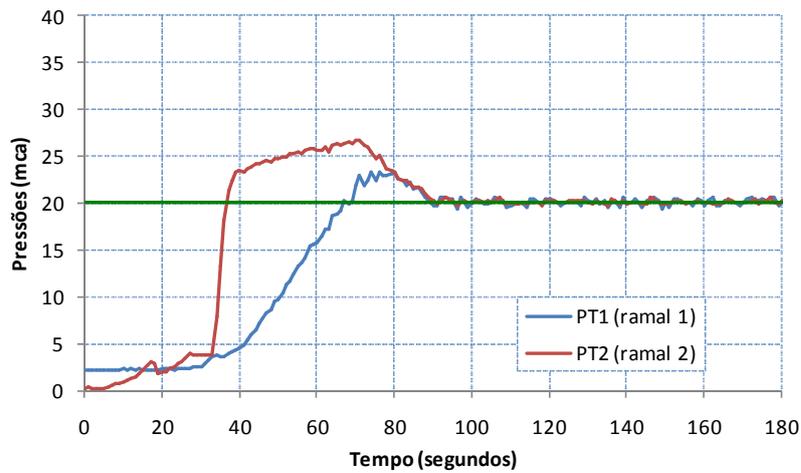


Figura 6.16 - Curvas de resposta do sistema de controle em malha fechada - Experimento 4

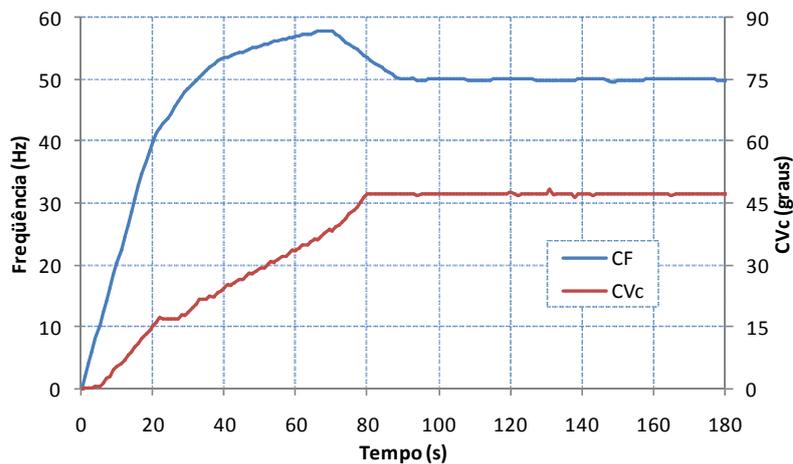


Figura 6.17 - Comportamento das variáveis de controle do sistema - Experimento 4

A partir do instante 89, onde o sistema de controle entra em regime permanente, as duas variáveis, velocidade de rotação da bomba e abertura da válvula, permanecem praticamente constantes, tendo em vista a não existência de perturbações no sistema de

bombeamento. As curvas de resposta do erro de regime permanente são apresentadas na Figura 6.18.

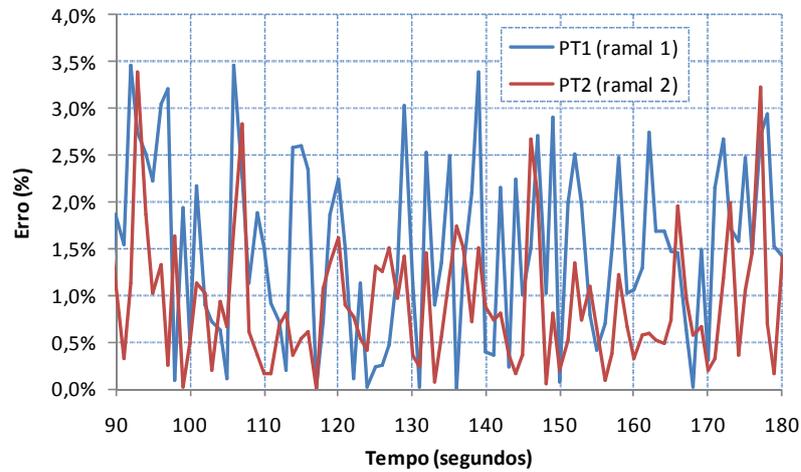


Figura 6.18- Curva de erro de regime permanente do Experimento 4

A Figura 6.19 apresenta a curva do sinal de controle enviado à válvula (variável de controle) e a resposta da válvula (posição real), ambos em tensão.

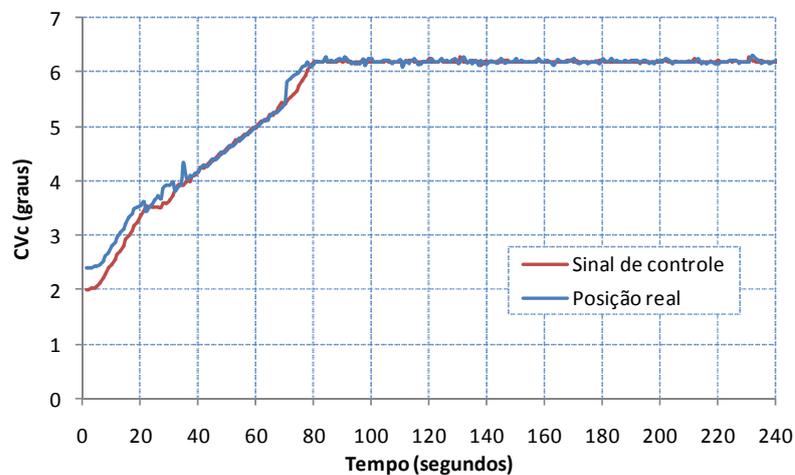


Figura 6.19 - Curvas da variável de controle (sinal de controle) e do grau de abertura real da CVC do Experimento 4

6.5 EXPERIMENTO 5

Para demonstrar experimentalmente que o controlador é eficiente, para valores distintos de pressão, utilizou-se um degrau de 20 mca para o PT1 e 15 mca para o PT2. O

ensaio foi realizado com o valor da frequência inicial zero, a válvula de controle CVC inicialmente fechada e a CVs com 45° de abertura. A Figura 6.20 mostra as curvas de resposta ao degrau obtidas nos dois transdutores de pressão.

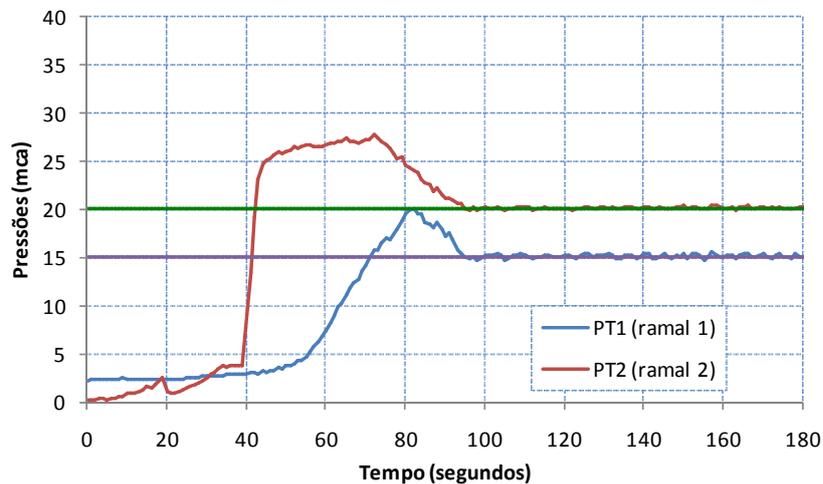


Figura 6.20 - Curvas de resposta do sistema de controle em malha fechada do Experimento 5

O tempo de assentamento foi de 92 segundos, o erro de regime permanente foi de 3,41% (0,68 mca) e 2,67% (0,53 mca), e o sobre-sinal de 33,26% (4,99 mca) e 28,46% (7,69 mca), ambos para os PT1 e PT2, respectivamente. Enquanto há um déficit de pressão em um dos pontos de medição ($PT1 < 20$ mca ou $PT2 < 15$ mca) (intervalo de 0 a 70), a velocidade de rotação da bomba segue em ascendência, e a CVC atua para zerar a variável DP (Eq. 5.2). O valor elevado do sobre-sinal no PT2 ocorre porque a elevação da pressão é drástica no intervalo de 39 a 42. Quando os dois pontos de medição, PT1 e PT2, ultrapassaram os valores de 20 (valor de referência de PT1) e 15 (valor de referência de PT2) simultaneamente (instante 71), a velocidade de rotação começa a diminuir para reduzir as pressões e a válvula continua abrindo para zerar a variável DP. Quando a variável DP (Eq. 5.2) atinge o valor de 0,02 (instante 92), a CVC pára de se mover e a frequência continua diminuindo até as pressões alcançarem os respectivos valor de referência. Pode-se verificar o comportamento das respostas das variáveis de controle do sistema (frequência de acionamento e abertura da CVC) na Figura 6.21.

A partir do instante 92, onde o sistema de controle entra em regime permanente, as duas variáveis, velocidade de rotação da bomba e abertura da válvula, permanecem praticamente constantes, tendo em vista a não existência de perturbações no sistema de

bombeamento. As curvas de resposta do erro de regime permanente são apresentadas na Figura 6.22.

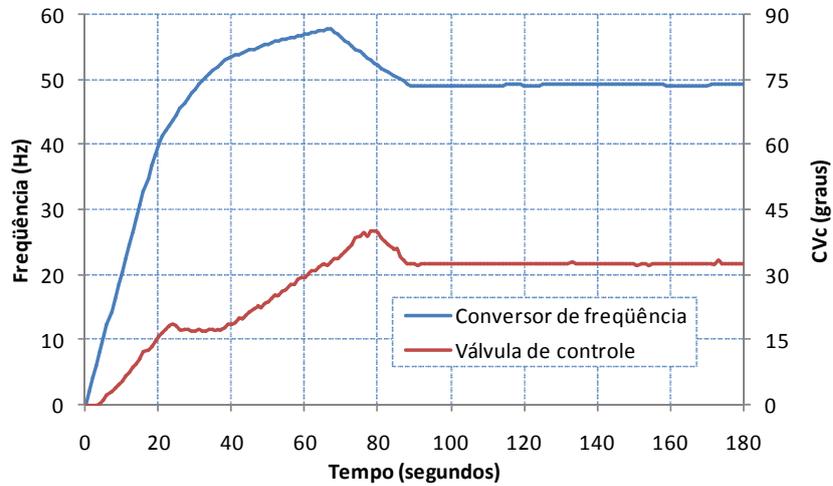


Figura 6.21 - Curvas de abertura da CVc e da frequência de acionamento do motor-bomba - Experimento 5

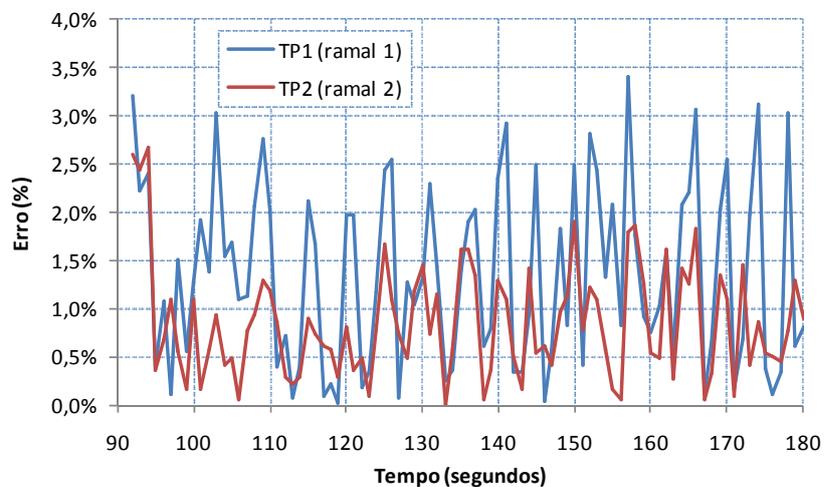


Figura 6.22 - Curvas de resposta do erro de regime permanente do Experimento 5

A Tabela 6.2 apresenta as médias das variáveis de controle dos experimentos 4 e 5 para o regime permanente. Pode-se observar, para o regime permanente, que o conversor de frequência, praticamente, não alterou a frequência de acionamento do Experimento 4 em relação ao Experimento 5 (diferença de 2,3%). O decréscimo da CVc (47,27° para 32,43°) do Experimento 5 em relação ao Experimento 4 ocasionou um acréscimo de perda de carga (energia) localizada de aproximadamente 5 mca, sendo responsável pela redução

da pressão no PT1 de 20 mca (valor de referência do Experimento 4) para 15 mca (valor de referência do Experimento 5).

Tabela 6.2 - Variáveis de controle dos experimentos 4 e 5 para o regime permanente

	Abertura da CVc	Frequência de acionamento
Experimento 4	47,27°	50,22 Hz
Experimento 5	32,43°	49,06 Hz

6.5.1 Avaliação do Consumo de Água

Como foi dito anteriormente, o controle de velocidade de rotação, atuando de maneira isolado, não tem capacidade de otimizar a pressão em mais de um ponto de um SDA. Utilizando a equação sugerida por MAY (1994) (Eq. 3.1) e extrapolando os resultados para um SDA com vazamentos, com um valor de “N1” igual a dois (tubos de plástico), tem-se que o sistema fuzzy desenvolvido para o controle simultâneo do CF e da CV proporcionaria uma redução potencial de 75% (ramal 1) e 67% (ramal 2) do volume de vazamentos quando comparado com o sistema sem nenhum controle de pressão, e de 45% (ramal 1) do volume de vazamentos comparando-o com o sistema com controle de pressão através do conversor de frequência. A Tabela 6.3 apresenta a sinopse do potencial de volume de vazamentos e as pressões da bancada experimental para as diversas condições consideradas.

Tabela 6.3 - Resumo das pressões e volume perdido por vazamentos (estimado)

SITUAÇÃO	Ramal 1		Ramal 2	
	Pressão média ²⁵ (mca)	Volume de vazamento potencial	Pressão média ²⁵ (mca)	Volume de vazamento potencial
Sistema de controle (CF+CVc) (Experimento 4)	20,00	x	20,00	y
Controlador fuzzy do CF (Experimento 3)	27,04	1,83*x	20,00	y
Sem controlador (Experimento 2)	40,02	4,00*x	34,94	3,05*y

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um sistema fuzzy para o controle piezométrico de sistemas de distribuição de água. A aplicação da Lógica Fuzzy nestes sistemas aponta para o desenvolvimento de um sistema de controle robusto, que atua 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 de controle apresentou uma excelente resposta, o erro de regime permanente máximo nos experimentos foi de 3,47% e em valores absolutos foi de 0,70 mca, ou seja, as pressões se mantiveram próximas aos valores estabelecidos. O controle da pressão mínima do sistema, que é prioritariamente realizado pelo conversor de frequência, tem uma resposta rápida. No entanto, devido ao elevado tempo de resposta da válvula de controle, a resposta global do sistema tornou-se, relativamente, lenta e com sobre-sinais elevados. O tempo de assentamento foi de aproximadamente 90 segundos - para o conjunto motor-bomba partindo do repouso, a CVc fechada e a CVs com 45° de abertura - sendo considerado muito pequeno para este tipo de aplicação. O sistema apresentou um sobre-sinal elevado, pois se priorizou a rapidez na elevação da pressão.

As variáveis de saída dos controladores mantiveram-se coerentes quando comparados os experimentos entre si, havendo uma perfeita sincronia entre os controladores fuzzy da válvula de controle e do conversor de frequência. Os resultados foram compatíveis com as simulações das modelagens realizadas.

Apesar do conversor de frequência consumir cerca de 5% da energia total e ocasionar um decréscimo de rendimento do conjunto motor-bomba, verificou-se que o controle da

velocidade de rotação proporcionou uma redução no consumo estimado de energia elétrica de 19.312 kWh/ano para 12.547 kWh/ano, resultando numa economia de 35,03%, com uma diminuição de 27,91% no Consumo Específico de Energia Elétrica (kWh/m³).

O sistema fuzzy desenvolvido para o controle piezométrico de sistemas de distribuição de água, através do uso simultâneo de CF e CV, proporcionaria uma redução potencial, extrapolando os resultados da bancada experimental para um sistema de distribuição com vazamentos, de 75% (ramal 1) e 67% (ramal 2) do volume de vazamentos quando comparado com o sistema sem nenhum controle de pressão, e de 45% (ramal 1) do volume de vazamentos comparando-o com o sistema com controle de pressão através do conversor de frequência.

O desempenho do sistema fuzzy para o controle piezométrico se mostrou satisfatório, podendo ser implementado facilmente a outros sistemas de distribuição de água similares, apresentando como principais vantagens: a não necessidade de modelagem do sistema a ser controlada, a possibilidade de poder incorporar conhecimentos heurísticos do operador humano e sua aplicabilidade em sistemas de dinâmica complicada.

Desta forma, concluímos pelo êxito da aplicabilidade dos sistemas fuzzy como ferramenta de otimização da operação de sistemas de distribuição de água, com vistas à redução do consumo de água e energia elétrica. A praticidade e a confiabilidade da metodologia abordada na investigação podem ser traduzidas como um avanço tecnológico. Dentre as vantagens da aplicação do sistema de controle desenvolvido, podem-se destacar:

- ✓ Otimização das pressões.
- ✓ Redução do consumo de água.
- ✓ Redução do consumo de energia.
- ✓ Modernização dos sistemas de distribuição de água.
- ✓ Aumento do grau de confiabilidade dos procedimentos.

7.2 RECOMENDAÇÕES

Em complemento a este trabalho, podem ser feitas as seguintes recomendações:

- ✓ Desenvolver um controlador fuzzy, com C++ ou outro tipo de programação, com apenas um controlador que contemple todas as entradas e saídas utilizadas por este trabalho. O *Toolkit Fuzzy Logic* do Labview™ pode ter até quatro entradas, porém só disponibiliza uma saída.

- ✓ Acrescentar como variável de controle o nível do reservatório a jusante do sistema. Um exemplo de aplicação seria uma adutora que fornece água para diversos subsistemas de distribuição de água e reservatórios simultaneamente.
- ✓ Utilizar sistemas de controle baseados em técnicas de controle adaptativas, a fim de comparar os resultados.

CAPÍTULO VIII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, NBR 12218 - *Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ABO-KHALIL, A.G., LEE, D.-C., SEOK, J.-K., 2004, “Variable speed wind power generation system based on Fuzzy Logic control for maximum output power tracking”. In: *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, v. 3, pp. 2039-2043, Jun.
- ALEGRE, H., COELHO, S.T., ALMEIDA, M.C., *et al.*, 2005, Controlo de perdas de água em sistemas públicos de adução e distribuição. *Série Guias Técnicos*. 3ª ed., Lisboa, IRAR.
- ALMEIDA, M.R.A., 2004, *Sistema híbrido Neuro-Fuzzy-Genético para mineração automática de dados*. Tese de D.Sc., DEE/PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ALMEIDA, R., BARBOSA, P. S. F., 2002, “Efeito da reservação inicial sobre o desempenho operacional de sistemas de abastecimento de água”. In: *Seminário Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Questões Avançadas*, João Pessoa.
- ALONSO, J.M., FERNANDO, A., GUERRERO, D., *et al.*, 2000, “Parallel computing in water network analysis and leakage minimization”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 126, n. 4, pp. 251-260.

- ALVES, A.J., OLIVEIRA, L.F.C., OLIVEIRA, A.M., 2002, “Verificação das Relações de Rateaux pelo emprego de um inversor de frequência”, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, n. 3, pp. 523-525.
- ALVISI, S., MASCELLANI, G., FRANCHINI, M., *et al.*, 2005, “Water level forecasting through Fuzzy Logic and Artificial Neural Network approaches”. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, v. 2, pp. 1107-1145.
- AMENDOLA, M., WATANABE, B.M.T., DUARTE, P.S., 2006, “Comparação de modelos matemáticos utilizando a teoria de conjuntos fuzzy para auxílio na tomada de decisão para a realização de cintilografia das paratireóides”. *Revista Biomatemática*, v. 16, pp. 23-30.
- ANGEL, P.L., HERNANDEZ, J.A., AGUDELO, J.J., 1999, “Fuzzy expert system model for the operation of an urban water supply system”. In: Savic, D.A., Walters, G.A. (eds), *Water industry systems: modelling and optimisation applications*, v. 1, Research Studies Press Ltd. Exeter, Inglaterra, pp. 449-457.
- ANNECCHINI, K.P.V., ABREU, P.P.C., LABEGALINI, M.S., 2007, “Comportamento de setores controlados por válvulas redutoras de pressão (VRP’s) na Região Metropolitana da Grande Vitória - ES”. In: *24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Belo Horizonte, MG, Brasil, Set.
- ARANTO, N., 2008, *Competitor Comparison: Variable Speed Drives in Pumping Applications*. M.Sc. Dissertation, Department Head of the Department of Energy and Environmental Technology/Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finlândia.
- ARAÚJO, J.A.B., 2003, *Aplicação de inversor 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.
- ARAUJO, L.S, RAMOS, H., COELHO, S.T., 2002, “Gestão integrada de sistemas de distribuição de água para um melhor controlo de perdas”. In: *6º Congresso da Água*, Porto, Portugal.
- ARAUJO, L.S, RAMOS, H., COELHO, S.T., 2003, “Optimisation of the use of valves in a network water distribution system for leakage minimisation”. *Computing and Control for the Water Industry*, Imperial College, UK.

- ARAUJO, L.S, RAMOS, H., COELHO, S.T., 2006, "Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management". *Water Resources Management*, v. 20, n. 1, pp. 133-149.
- AVERKIN, A.N., TARASOV, V.B., 1987, "The fuzzy modeling relation and its application in psychology and artificial intelligence". *Fuzzy Sets and Systems*. v. 22, n. 1-2, pp. 3-24.
- AWARE, M.V., KOTHARI, A.G., CHOUBE, S.O., 2008, "Application of adaptive neuro-fuzzy controller (ANFIS) for voltage source inverter fed induction motor drive". In: *Proceedings the Third International Power Electronics and Motion Control Conference*, v. 2, pp. 935-939, Beijing, China, Ago.
- AWWA - American Water Works Association, 2006, *Water Audits and Loss Control Programs*. Near Final Draft for Water Loss Control Committee Review, AWWA M36 Publication Rewrite, Philadelphia, USA.
- BARBOSA, J.M.S.G.; GALVÃO, C.O.; GOMES, H.P.; *et al.*, 2002, Operação otimizada de parte do sistema adutor de água de Campina Grande-PB. In: *Anais do Seminário Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Questões Avançadas*. João Pessoa, Brasil.
- BARROS, L.C., BASSANEZI R.C., TONELLI P.A., 2000, "Fuzzy modeling in population dynamics". *Ecological Modelling*, v. 128, pp. 27-33.
- BEZERRA, S.T.M., CAMBOIM, W.L.L., SILVA, S.A., *et al.*, 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*. 1ª ed., Lisboa, Portugal, João Pessoa, Brasil, IST - CEHIDRO.
- BISCOS, C., MULHOLLAND, M., LANN, M.V.LE., *et al.*, 2003, Optimal operation of water distribution networks by predictive control using MINLP. *Water SA* 29 (4).
- 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..

- BORGES, V.M.N.A., ZAHED FILHO, K., SOUZA, V.C., *et al.*, “Modelagem hidráulica de sistemas adutores para operação em tempo real”. In: *Anais do 8º SEREA - Seminário Ibero-Americano sobre Sistemas de Abastecimento e Drenagem*. Lisboa, Portugal, Jul.
- BOSL, W.J., 2007, “Systems biology by the rules: hybrid intelligent systems for pathway modeling and discovery”. *BMC Systems Biology*, pp. 1-13.
- BOUNDS, P., KAHLER, J., ULANICKI, B., 2006, “Efficient energy management of a large-scale water supply system”. *Civil Engineering and Environmental Systems*, v. 23, n. 3 (Set), pp. 209-220.
- BRAGA, M.J.F., BARRETO, J.M., MACHADO, M.A.S., 1995, *Conceitos da Matemática Nebulosa na Análise de Risco*. Rio de Janeiro, Artes & Rabiscus (*apud* SILVA, 2005).
- BRAGALLI, C., SACCHI, S., 2002, “Burst frequency and leakage related to pressure control in water distribution network”. In: *Lemosos 2002: Leakage Management - A Practical Approach*, Lemosos, Chipre (*apud* ALEGRE *et al.*, 2005).
- BRANDÃO JÚNIOR, M., 2004, “Tecnologia de automação para centro de controle operacional como resultado de gestão de projeto integrado de controle e redução de perdas”. In: *Anais do 4º SEREA - Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água*. João Pessoa, Brasil.
- BRITTO, D.A., ARAGÃO, H.G., SANTOS NETO, J.P., 2007, “Desenvolvimento de um sistema de informação geográfica para saneamento usando software livre”. In: *Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, XII-011, Belo Horizonte, Set.
- BUNN, S., 2006, “Pump Scheduling Optimization in Four US Cities: Case Studies”. In: *Proceedings of Annual Symposium on Water Distribution Systems Analysis*. Cincinnati, Ohio, USA, Ago.
- BURGOS-ARTIZZU, X.P., RIBEIRO, A. SANTOS, M., 2007, “Controlador borroso multivariable para el ajuste de tratamientos en agricultura de precisión”. *Revista iberoamericana de automática e informática industrial*, v. 4, n. 2 (Abr), pp. 64-71.

- BURT, C.M., PIAO, X., GAUDI, F., *et al.*, 2008, “Electric motor efficiency under variable frequencies and loads”. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 134, n. 2, pp. 129-136.
- 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.
- CAMPBELL D.E., KELLY J.S., 1996, “Social choice trade-offs for an arbitrary measure: with application to uncertain or fuzzy agenda”. *Economics Letters*, v. 50, n. 1 (Jan), pp. 99-104.
- CARRIJO, I., 2004, *Extração de Regras Operacionais Ótimas de Sistemas de Distribuição de Água Através de Algoritmos Genéticos Multiobjetivo e Aprendizado de Máquina*. Tese D.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP, São Carlos, SP.
- CARVALHO L.M., NASSAR S.M., AZEVEDO F.M., *et al.*, 2008, “A neuro-fuzzy system to support in the diagnostic of epileptic events and non-epileptic events using different fuzzy arithmetical operations”. *Arq Neuropsiquiatr*, 66, 2A (Jun), pp. 179-83.
- CARVALHO, J. A., MELLO, C. R., BRAGA JÚNIOR, R. A., *et al.*, 2000, “Utilização do inversor de frequência em sistemas de irrigação para controle de vazão”. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 4, n. 1, pp. 51-56.
- CEMBRANO, G., WELLS, G., QUEVEDO, J., *et al.*, 2000, “Optimal control of a water distribution network in a supervisory control system”. *Control Engineering Practice*, v. 8, n. 10 (Out), pp. 1177-1188.
- CHARALAMBOUS, C., SETFORD, M., 2001, “Maximising the benefits of desalination”. *Desalination*, v. 138, n. 1-3, pp. 41-46.
- CHOI, Y.C.; CHANG-HUN KIM, 2007, “CDP servo system control using fuzzy logic control”. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, v. 53, n. 4 (Nov), pp. 1314-1321.
- CONEJO, J.G.L., LOPES, A.R.G., MARCKA, E., 2004, DTA C2 - Panorama dos Sistemas Públicos de Abastecimento no País - Casos Selecionados de Estratégias de Combate ao Desperdício. *Documento Técnico do PNCDA*, Brasília, DF, Brasil.

- COULBECK, B., 1977, *Optimization and Modelling Techniques in Dynamic Control of Water Distribution Systems*. Ph.D. Thesis, University of Sheffield, Sheffield, Reino Unido.
- COVAS, D., 1998, *Detecção de Fugas em Redes de Distribuição de Água - Método de Análise Hidrodinâmica*. Dissertação de M.Sc., Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal (*apud* COVAS e RAMOS, 2007).
- COVAS, D., RAMOS, H., 2007, Minimização de Perdas de Água em Sistemas de Abastecimento. In: GOMES, H.P., GARCIA, R.P., REY, P.L.I. (eds), *Abastecimento de Água - O Estado da Arte e Técnicas Avançadas*, João Pessoa, PB, Brasil, pp. 47-66. Editora Universitária da UFPB.
- CRESPO, P.G., 2001, *Elevatórias nos Sistemas de Esgotos*. Editora UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- CUBILLOS, X.C.M., 2008, *Investigação de técnicas de controle multivariáveis no controle de atitude de um satélite rígido-flexível*. Dissertação de M.Sc., INPE/MCT, São José dos Campos, SP, Brasil.
- DAVIDSON, J., BOUCHART, F., CAVILL, S., *et al.*, 2005, Real-Time Connectivity Modeling of Water Distribution Networks to Predict Contamination Spread. *Journal Comp. in Civ. Engrg.* v. 19, n. 4 (Out), pp. 377-386.
- DAVIGNY, A., ROBYNS, B., 2006, “Fuzzy Logic based supervisor of a wind farm including storage system and able to work in islanding mode”. In: *Proceedings of 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronic*, pp. 4231-4236, Nov.
- DELGADO, X.V., PÉREZ G., R., MORA R., J.J., *et al.*, 2008, “Evaluación del coste del agua y la energía perdidas por causa de las fugas en tuberías”. In: *Anais do VIII SEREA - Seminário Ibero-Americano sobre Sistemas de Abastecimento e Drenagem*. Lisboa, Portugal, Jul.
- DELIBASI A.,TURKER T., CANSEVER G., 2004, ”Real-Time DC motor position control by Fuzzy Logic and PID controllers using Labview”. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Robotics*, v. 1, pp. 14-19, Aachen, Alemanha, Set.

- 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.
- EL-BAROUDY, I., SIMONOVIC, S.P., 2006, “Application of the fuzzy performance measures to the city of London water supply system”. *Canadian Journal of Civil Engineering*. v. 33, n. 3, pp. 255-265, Canadá.
- ELETROBRÁS, 2008, Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Home Page do PROCEL SANEAR. URL: <http://www.eletronbras.com/elb/procel>. Acesso em 28 de outubro de 2008.
- ERKINHEIMO, H., KÄYHKÖ, K., NIEMELÄ, H., *et al.*, 1997, Taajuusmuuttajat. Espoo: Suomen Sähkö- ja Teleurakoitsijaliitto Ry. 180 (*apud* ARANTO, 2008).
- ESMPU - ESCOLA SUPERIOR DO MINISTÉRIO PÚBLICO DA UNIÃO, 2005, *Boletim Científico*, ano 4, n. 16, jul./set., Brasília.
- EUROPUMP, HYDRAULIC INSTITUTE, 2004, *Variable Speed Pumping - A Guide to Successful Applications*. 1 ed, Bodmin, Cornwall, Mai, Elsevier.
- EVERHART, J., 2004, “Sensing significant savings with VFD systems”. *World Pumps Magazine*, pp. 18-21.
- FALLSIDE, F., PERRY, P.F., 1975, “Hierarchical optimization of a water supply network”. In: *Proc. IEE*, v. 122, n. 2 (Feb), pp. 202-208.
- FARMANI, R., INGEDULD, P., SAVIC, D., *et al.*, 2007, Real-time modeling of a major water supply system. *Water Management*. v. 160, n. 2 (Jun), pp. 103-108.
- FONSECA, D.J., KNAPP, G.M., 2000, “An expert system for reliability centered maintenance in the chemical industry”. *Expert Systems with Applications*, v. 19, n. 1 (Jul), pp. 45-57.
- FONTENOT, E., INGEDULD, P., WOOD, D., 2003, “Real time analysis of water supply and water distribution systems”. In: *Proceedings of World Water Congress*. Philadelphia, Pennsylvania, USA, Jun.
- FORMIGA, K.T., 2005, Otimização multiobjetivo de projetos de redes de distribuição de água. Tese D.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil.

- GALDI, V., PICCOLO, A., SIANO, P., 2008, “Designing an adaptive fuzzy controller for maximum wind energy extraction”. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, v. 23, n. 2, pp. 559-569, Jun.
- GALVÃO, C. O.; RÊGO, J. C.; RIBEIRO, M.M. R.; *et al.*, 2001, Sustainability characterization and modeling of water supply management practices. In: SCHUMANN, A. H. (ed). *Regional Management of Water Resources - 6th Scientific Assembly of the International Association of Hydrological Sciences*. Wallingford, IAHS.
- GAMBICA ASSOCIATION LTD. *Variable Speeds Driven Pumps - Best Practice Guide*. Londres, Inglaterra.
- GARCIA, A.G.P., 2003, *Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- GARZÓN CONTRERAS, F., THORNTON, J., 2006, “Influencia de la presión en las pérdidas de agua en sistemas de distribución”. In: *Anais do Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, Punta del Este, pp. 26-30.
- GERMANPOULOS, G., JOWITT, P.W., 1989, “Leakage reduction by excess pressure minimization in a water supply network”. In: *Proceedings Instn. Civ. Engrs*, Part 2, pp. 195-214, Jun.
- GHODS, A.H., KIAN, A.R., TABIBI, M., 2007, “A genetic-fuzzy control application to ramp metering and variable speed limit control”. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. pp. 1723-1728, Out.
- GIDDENS, A., 1999, *Introduction to sociology*. New York, W.W. Norton & Company.
- GOLDMAN, F.E., MAYS, L.W., 2005, Water distribution system operation: application of simulated annealing. In: MAYS, L.W (ed). *Water Resource Systems Management Tools*, McGraw Hill, New York, 2005.
- GOMES, H.P., 2005, *Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento: Análise Econômica de Projetos*. 1ª ed, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Editora da ABES Nacional.
- GOMES, H.P., BEZERRA, S.T.M., CARVALHO, P.S.O., *et al.*, 2008, Automação e controle do sistema piloto de distribuição de água do LENHS UFPB. 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.
1ª ed., Lisboa, Portugal, João Pessoa, Brasil, IST - CEHIDRO.

- GRANDJEAN, G., MALET, J.P., BITRI, A., 2007, “Geophysical tomographies fusion by Fuzzy Logic for imaging the geomechanical behaviour of mudslides”. *Geophysical Research Abstracts*, v. 9.
- GUERREROS SIANCAS, F., 2000, Sistema SCADA metropolitano de SEDAPAL. *Saneamiento y Medio Ambiente*, v. 5, n. 19 (Nov), pp. 7-9.
- GURGEL, B.B.F.A., TSUTIYA, M.T., 2007, “Proposição de uma metodologia para avaliação de inversores de frequência em estações elevatórias de água”. In: *Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, XI-054, Belo Horizonte, Brasil.
- HELD, C.M., ROY, R.J., 2000, “Hemodynamic management of congestive heart failure by means of a multiple mode rule-based control system using Fuzzy Logic”. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. 47, n. 1, pp. 115-123.
- HOLMBLAD, L.P., OSTERGAARD, J.J., 1982, “Control of a Cement Kiln by Fuzzy Logic”. In: GUPTA, M.M., SANCHEZ, E. (eds), *Fuzzy Information and Decision Processes*, Amsterdam, North-Holland, pp. 389-399 (*apud* COELHO *et al.*, 1999).
- HOVSTADIUS, G., 2007, “Tackling soaring energy costs in North America”. *World Pumps*, pp. 38-40, Set.
- INGEDULD, P., PRADHAN, A., SVITAK, Z., *et al.*, 2006, “Modelling intermittent water supply systems with EPANET”. In: *Proceedings of the 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium*, Cincinnati, Ohio, USA, Ago.
- INGEDULD, P., 2007, “Real-Time Forecasting with EPANET”. In: *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress*, Florida, USA, Mai.
- IRVINE, G., GIBSON, I. H., V.F., 2002, “Drives as final control elements in the petroleum industry”. *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 51-60.
- ISLAM, M.S., BABEL, M.S., DAS GUPTA, A., 2005, “Pressure management for leakage reduction in a water distribution network”. In: *Proceedings of the MTERM International Conference*, held at AIT, Thailand, pp. 587-594, Jun.

- IVANQUI, J., 2005, *Esteira Eletrônica com Velocidade Controlada por Lógica Fuzzy*.
Dissertação de M.Sc., Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba,
PR, 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.
- JOWITT, P.W., XU, C., 1990, "Optimal valve control in water distribution networks".
Journal of Water Resources Planning and Management, v. 116, n. 4, pp. 455-472.
- KALANITHY, V., LUMBERS, J., 1998, "Leakage reduction in water distribution
systems: optimal valve control". *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 124, n. 11
(Nov), pp. 1146-1154.
- KANG, H.-S.; Kim, Y.-S., 2006, "A sensorless speed control of an interior permanent
magnet synchronous motor based on an instantaneous reactive power and a fuzzy
logic controller". In: *37th IEEE Power Electronics Specialists Conference -
PESC '06*. pp. 1-7, Jun.
- KAZANTZIS, M.D. *et al.*, 2002, A new methodology for optimizing the daily operations
of a pumping plant. In: *Proceedings of Conference on Water Resources Planning
and Management*. Roanoke, VA, USA. Mai (*apud* CARRIJO, 2004).
- KIRYU, T., SASAKI, I, SHIBAI, K., *et al.*, 2001, "Providing Appropriate Exercise Levels
for the Elderly". *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, v. 20, n. 6, pp. 116-124.
- KOSKO, B., 1995, *Pensamiento Borroso - La Nueva Ciencia de la Lógica Borrosa*.
Grijalbo Mondadori, Barcelona, España (*apud* MARTINS, 2004).
- KUO, Y.P., LI, T.H.S., 1999, "GA-Based Fuzzy PI/PD controller for automotive active
suspension system". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 46, n. 6 (Dez).
- LAMBERT, A., 2001, "What do we know about pressure: leakage relationships in
distribution systems?". In: *Proceedings of IWA Specialised Conference on System
Approach To Leakage Control and Water Distribution Systems Management*. Brn.,
República Checa (*apud* DELGADO *et al.*, 2008).
- LAMBERT, A., 2002, "International Report on Water Loss Management and Techniques".
Water Supply, v. 2, n. 4, pp. 1-20.

- LAW, C., 1996, "Using fuzzy numbers in educational grading system". *Fuzzy Sets and Systems*, v. 83, pp. 311-323.
- LEE, C. C., 1990, "Fuzzy Logic in control systems: Fuzzy Logic controller". In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 20, n.2, pp. 404-434.
- LEÓN, C., MARTÍN, S., LUQUE, J., 2000, Explore - hybrid expert system for water networks management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 126, n. 2 (Mar/Abr), pp. 65-74.
- LIAW, C.M., WANG, J.B., 1991, "Design and implementation of a fuzzy controller for a high performance induction motor drive". *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v. 21, n. 4, pp. 921-929.
- 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.
- LIMA, H.V.C., 2006, *Análise da operação de sistemas de reservatórios utilizando Lógica Difusa, Redes Neurais Artificiais e Sistemas Neuro-Difusos*. Tese de D.Sc., IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.
- LIN, C.-T., HUNG, C.-W., LIU, C.-W., 2007a, "Fuzzy PI controller for BLDC motors considering variable sampling effect". In: *Proceedings of 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 1180-1185, Nov.
- LIN, F.-J., HUANG, P.-K., WANG, C.-C., *et al.*, 2007b, "An induction generator system using fuzzy modeling and recurrent fuzzy neural network". *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 22, n. 1 (Jan), pp. 260-271.
- LUNA FILHO, F.M., BAUCHSPIESS, A., GOSMANN, H.L., 2002, "Controle fuzzy para sistema de nível de líquidos". In: *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática*, Natal, RN, Brasil.
- MACHION, A.C.G., 1993, *Um Controle Adaptativo Baseado em Lógica Nebulosa para Tráfego Urbano*. Dissertação de M.Sc., FEE/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- MAHLER, R.P., ROLIM, R., VASCONCELOS, E., *et al.*, 2003, "Automação do macrossistema de distribuição de água da região metropolitana de Fortaleza - Best practice em conservação de energia elétrica no setor de saneamento básico".

In: *Anais do XII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, pp. 1-6, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

MAMDANI, E.H., 1993, “Fuzzy control in Japan-learning lessons”. In: *IEE Colloquium on Two Decades of Fuzzy Control*, Mai.

MAMDANI, E.H., ASSILIAN, S., 1974, “An experiment in linguistic synthesis with a Fuzzy Logic controller”. *International Journal of Man-Machine Studies*, v. 7, pp. 1-13, pp. 1-13.

MAMLOOK, R., AL-JAYYOUSI, O., 2003, “Fuzzy Sets analysis for leak detection in infrastructure systems: A proposed methodology”. *Clean Techn. Environ. Policy*, v. 6, pp. 26-31.

MARKS, L.A., DUNN, E.G., KELLER, J.M., *et al.*, 1995, Multiple criteria decision making (MCDM) using Fuzzy Logic - An innovative approach to sustainable agriculture. In: *Proceedings of ISUMA-NAFIPS '95 - 3rd International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis*, Washington, DC, USA.

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

MASCHERONI, J.M., LICHTBLAU, M., GERARDI, D., 2005, *Guia de Aplicação de Inversores de Frequência*. WEG, 3ª edição. Jaraguá do Sul, SC., Brasil.

MATIAS, L., 2004, *Acionamento de Motor de Indução a Longa Distância usando Inversores: Modelagem do Sistema e Estudo de Técnicas de Modulação*. Tese D.Sc., Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

MAY, J., 1994, “Pressure Dependent Leakage”. *World Water and Environmental Engineering*, Out.

MENGARDA, T., 2005, Classificação das cargas com relação ao conjugado. In: *Anais do I Workshop de Eficiência Energética e Uso Racional da Água*, ABAE, Aracaju, Sergipe, Set.

MITRAKIS, N.E., TOPALOGLOU, C.A., ALEXANDRIDIS, T.K., *et al.*, 2008, “Decision fusion of GA self-organizing neuro-fuzzy multilayered classifiers for land cover

- classification using textural and spectral features”. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 46, n. 7, pp. 2137-2152.
- MO, J., WANG, H., 2007, “Modeling and Fuzzy PID control of the VVVF based pressure control system of man-made diamond hydraulic force machine”. *Proceedings of International Conference on Mechatronics and Automation - ICMA*, pp. 3610-3615, Ago.
- MORENO, E., LÓPEZ, M., MERINO, G., 2006, “Perfeccionamiento del Modelo Adoma Mediante la Inclusión de la Ambigüedad en Alguno de sus Parámetros”. *Agricultura Técnica*, v. 66, n. 2, pp. 185-195, Chile.
- MOTA, L.T.M., 2005, *Métodos de Previsão do Comportamento da Carga na Recomposição de Sistemas de Energia Elétrica*. Tese de D.Sc., FEEC/UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil.
- NALESSO, M.T.R., OLIVEIRA, A.R., 2007, “Sistema de controle e análise de medições”. In: *Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, XI-006, Belo Horizonte, BH, Brasil.
- NEBOT, A., MUGICA, V., ESCOBET, A., 2008, “Ozone prediction based on meteorological variables - A fuzzy inductive reasoning approach”. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, v. 8, pp. 12343-12370, 2008.
- ORMSBEE, L.E., REDDY, S.L., 1995, “Nonlinear heuristic for pump operations”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 121, n. 4 (Jul), pp. 302-309.
- 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.
- OSTFELD, A., SALOMONS, E., 2003, “An Early Warning Detection System (EWDS) for Drinking Water Distribution Systems Security”. In: *World Water Congress 2003*, Philadelphia, Pennsylvania, USA, Jun.
- PARK, Y.J., CHO, H.S., CHA, D.H., 1995, “Genetic algorithm-based optimization of fuzzy logic controller using characteristic parameters”. In: *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, v. 2, pp. 831-836.

- PEARSON, D., FANTOZZI, M., SOARES, D., *et al.*, 2005, “Searching for N2: how does pressure reduction reduce burst frequency?”. In: *Leakage 2005 - Conference Proceedings*.
- PEDROSA FILHO, L.A., GOMES, H.P., REY, P.L.I., 2007, “Modelo de Otimização Operacional de Sistemas Adutores”. In: GOMES H., GARCIA R., REY (eds). *Abastecimento de Água - O Estado da Arte e Técnicas Avançadas*. 1ª ed., capítulo 9, João Pessoa, Brasil, Editora Universitária da UFPB.
- PELLI, T., HITZ, H.U., 2000, “Energy indicators and savings in water supply”. *Journal AWWA*, v. 92, n. 6, pp. 55-62 (*apud* RODRIGUES, 2007).
- PEMBERTON, M., 2005, “Variable Speed Pumping: Myths and Legends”. *World Pumps*, Jan, pp. 22-24.
- PETROV, M., GANCHEV, I., TANEVA, A., 2003, “Fuzzy PID control for nonlinear plant”. In: *Proceedings of the First Int. IEEE Symposium on Intelligent Systems*, v. 1, pp. 30-35.
- PILCHER, R., HAMILTON, S., CHAPMAN, H., *et al.*, 2007, *Leak Location and Repair - Guindace Notes*. IWA, Mar.
- PILLER, O., BREMOND, B., 2001, Modeling of Pressure Regulating Devices: A Problem Now Solved. In: *Congress World Water e Environmental Resources*. Florida, USA.
- PONCE, P., BLANCAS, R., TENA, C., *et al.*, 2004, “A novel DC drive based on Fuzzy Logic inverse plant model optimised by ANFIS”. In: *Proceedings IEEE International Conference on Industrial - IEEE ICIT '04*. v. 2, pp. 1127-1132, Dez.
- PRESCOTT, S.L., ULANICK, B., 2008, “Improved control of pressure reducing valves in water distribution networks”. *Journal Hydr. Engrg.*, v. 134, n. 1, pp. 56-65.
- PRESCOTT, S.L., ULANICKI, B., 2003, “Dynamic modeling of pressure reducing valves”. *Journal Hydr. Engrg.*, v. 129, n. 10, pp. 804-812.
- QIANG, G., RONGJIE, R., WEI, W., 2008, “Research on Fuzzy-PID controller in variable frequency air conditioner system”. In: *Proceedings of 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, pp. 3879-3882, Mai.
- RAMOS, H., COVAS, D., ARAÚJO, L., 2004, “Válvulas redutoras de pressão e produção de energia”, In: *Anais do 7º Congresso da Água*. LNEC, Lisboa, 2004.

- RESENDE, R.A., 2006, *Qualidade de Serviço em Rede IP Utilizando Lógica Fuzzy*. Tese de D.Sc., Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- REYERO, R., NICOLÁS, C.F., 1995, *Sistemas de Control Basados em Lógica Borrosa: Fuzzy Control*, Omron Eletronics S.A., España (apud IVANQUI, 2005).
- RIBEIRO, L.C.L.J., 2002, *Modelo Híbrido para o Estabelecimento de Rotações Ótimas de Bombas de Rotação Variável*. Dissertação de M.Sc., FECAU/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- RIBEIRO, L.C.L.J., 2007, “*Modelo Híbrido Multiobjetivo para Obtenção de Roteiros Operacionais de Bombas de Rotação Variável em Instalações Hidráulicas*”. FECAU/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- RIGHETTO, A.M., 2002, “Operação Ótima de Sistema Urbano de Distribuição de Água”. In: *Seminário Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Questões Avançadas*, João Pessoa.
- RODRIGUES, W., 1998, *Resposta Dinâmica de Válvula de Controle Automática em Redes Hidráulicas*. Dissertação de M.Sc., FEC/UNICAMP, /UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- RODRIGUES, W., 2007, *Crítérios para o uso Eficiente de Inversores de Freqüência em Sistemas de Abastecimento de Água*. Tese de D.Sc., FEC/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- ROSSMAN, L. A., 2008, EPANET 2.00.12. U. S. Environment Protection Agency, Cincinnati, USA.
- SADEGH-ZADEH, K, 1999, “Fundamentals of clinical methodology - Nosology”. *Artificial Intelligence in Medicine*, v. 17, pp. 87-108.
- SAINT-JOAN, D., DESACHY, J., 1995, “A fuzzy expert system for geographical problems - An agricultural application fuzzy systems”. In: *Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and the Second International Fuzzy Engineering Symposium*, v. 2, pp. 469-476.
- SAITTA L., TORASSO P., 1981, “Fuzzy characterization of coronary disease”. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 5, pp. 245-258.

- SAKARYA, A.B.A., MAYS, L.W., 2000, "Optimal Operation of Water Distribution Pumps considering Water Quality". *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 126, n. 4 (Jul/Ago), pp. 210-220.
- SALAMANCA, A.A.Z., MOSQUERA, R.O.O., 2005, "Sistemas de control y automatizacion del tipo scada para la red de suministro de agua de al ciudad universitaria". In: *Anais do V SEREA - Seminario Iberoamericano sobre Planificacion, Proyecto y Operacion de Sistemas de Abastecimiento de Agua*, pp. ST-143-148, Valencia, Espanha, Nov-Dez.
- SALSKI, A., 1992, "Fuzzy Knowledge-based models in ecological research". *Ecological Modelling*, v. 63, pp. 103-112.
- SAVIC, D.A., WALTERS, G.A, 1995. "An Evolution Program For Optimal Pressure Regulation in Water Distribution Networks". *Engineering Optimization*, v. 24, n. 3 (Jul), pp. 197-219.
- SCHULZ K., HUWE B., PEIFFER S., 1999, "Parameter uncertainty in chemical equilibrium calculations using fuzzy set theory". *Journal of Hydrology*, v. 217, n. 1-2, pp. 119-134.
- SENG, T.L., KHALID, B., YUSOF, R., 1999, "Tuning of a neuro-fuzzy controller by genetic algorithm". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 29, n. 2, pp. 226-236, Abr.
- SHAW, I.S., SIMÕES, M.G., 1999, *Controle e modelagem fuzzy*, 1ª ed., São Paulo, SP, Brasil, Editora Edgard Blücher Ltda.
- SHEN, Y., ZHONGXIANG, Z., ENRONG, M., 2007, "Double-Fuzzy Kalman Filter based on GPS/IMU/MV sensor fusion for tractor autonomous guidance". In: *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, pp. 61-65, Ago.
- SHHEIBIA, T.A.A.E., 2001, *Controle de um Braço Robótico Utilizando uma Abordagem de Agentes Inteligentes*. Dissertação de M.Sc., CCT/UFCG, Campina Grande, PB, Brasil.
- SHINOZUKA, M, LIANG, J, FENG, M.Q., 2005, "Use of supervisory control and data acquisition for damage location of water delivery systems". *Journal Engrg. Mech.*, v. 131, n. 3 (Mar), pp. 225-230.

- SHUAI, Q., ZHUO-YI, S., SHEN-MIN, S., 2006, “Design of two-level fuzzy controller in automatic hydraulic loading system”. In: *Proceedings of Chinese Control Conference - CCC 2006*. pp. 1228-1232, Ago.
- SILVA, H.V., 2003, *Utilização de Lógica Nebulosa na Detecção de Vazamentos em Dutos*. Dissertação de M.Sc., Faculdade de Engenharia Mecânica/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- SILVA, M.A.B., 2005, *Sistema de Classificação Fuzzy para Áreas Contaminadas*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SIMOES, M.G., FRANCESCETTI, N.N., 1999, “Fuzzy optimisation based control of a solar array system”. *IEEE Proceedings on Electric Power Applications*, v. 146, n. 5, pp. 552-558.
- SKELLY, M.M., CHIZECK, H.J., 2001, “Real-time gait event detection for paraplegic FES walking”. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, v. 9, n. 1, pp. 59-68.
- SMITHSON, M., 1988, “Fuzzy set theory and the social sciences: the scope for applications”. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 26, pp. 1-21.
- SOUZA, D.A., ARAGÃO 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.
- STRIANI, D., LOPES, A.F., 2004, “Redução e controle de perdas físicas de água através da implantação de válvulas redutoras de pressão, VRP, com controle inteligente, pesquisa e eliminação de vazamentos no município de São Caetano do Sul”. In: *Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento*. Rio Grande do Sul, Brasil.
- STRUTHERS, C., 2005, *Real-Time Monitoring and Control of a Pressure Control System*. M.Sc. Dissertation, Faculty of Engineering & Surveying/University of Southern Queensland.
- TAKAGI, T., SUGENO, M., 1985, “Fuzzy identification of systems and its application to modelling and control”. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v. SMC-15, n. 1, pp. 116-132.
- TARRAZO M., GUTIERREZ L., 2000, “Economic expectations, fuzzy sets and financial planning”. *European Journal of Operational Research*, v. 126, n. 1, pp. 89-105.

- THEISEN, J., 2005, “Upping the efficiency of pumps e fans”. *Machine Design Magazine*, v. 77, n. 19, pp. 86-90.
- THORNTON, J., 2002, *Water Loss Control Manual*. McGraw-Hill Professional, Jun.
- THORNTON, J., SHAW, M., AGUIAR, M., *et al.*, 2005, “How Low Can You Go? Practical Approach To Pressure Control in Low Pressure Systems”. In: *Proceedings of the IWA Specialized Conference Leakage 2005*, Halifax, Set.
- TRAUTWEIN JÚNIOR, B., VIEIRA, G.E., 2007, “Análise de modelos de ajuste exponencial para previsão de consumo de curtíssimo prazo como apoio no planejamento da operação de um sistema de distribuição de água”. In: *Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, I-032, Belo Horizonte, BH, Brasil.
- 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., 2007. “Uso de Inversores de Frequência para Diminuição do Consumo de Energia em Bombeamentos”. In: GOMES, H.P., GARCIA, R.P., REY, P.L.I. (eds), *Abastecimento de Água - O Estado da Arte e Técnicas Avançadas*, 1ª ed., capítulo 6, João Pessoa, PB, Brasil, Editora Universitária da UFPB
- TSUTIYA, M.T., 2008, *Abastecimento de Água: Gerenciamento de Perdas de Água e Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento*. In: *Guia do Profissional em Treinamento: Nível 2*. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (eds). RECESA, Salvador, BA, Brasil.
- TUNYASRIRUT, S., WANGNIPPARNTO, S., 2006, “Level control in horizontal tank by fuzzy logic controller”. In: *International Joint Conference*, pp. 2491-2494, Out.
- TURKSEN, I.B., 1984, “Measurement of Fuzziness: Interpretation of the Axioms of Measure”, Conference on Fuzzy Information and Knowledge Representation for Decision Analysis, IFAC, Oxford, pp. 97-102 (*apud* SILVA, 2005).
- VAIRAVAMOORTHY, K., LUMBERS, J., 1998, “Leakage Reduction in water distribution systems - optimal valve control”. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 124, n. 11, pp. 1146-1154.

- VALLILO, D. C., KUBOTA, H., TSUTIYA, M. T., *et al.*, 1981, “Utilização de Bombas de Rotação Variável em Obras Sanitárias”. *Revista DAE*, n. 126, pp. 266-274 (*apud* RODRIGUES, 2007).
- VANDERLEI FILHO, D., FERREIRA, T.A.E., LUDERMIR, T.B., *et al.*, 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.
- VIANA, A.N.C., 2001, *Bombas de Fluxo e Ventiladores, Conservação de Energia - Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos*, Escola Federal de Engenharia de Itajuba, pp. 213-244, 2 ed., Itajubá, MG, Brasil.
- VIEIRA, J.P.A., NUNES, M.V.A., BEZERRA, U.H., *et al.*, 2007, “New fuzzy control strategies applied to the DFIG converter in wind generation systems”. *Revista IEEE America Latina*, v. 5, n. 3, pp. 142-149, Jun.
- 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.
- WAI, R.J., DUAN, R.Y., WANG, W.H., *et al.*, 2003, “Implementation of artificial intelligent control in single-link flexible robot arm”. In: *Proceedings IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, v. 3, pp. 1270-1275, Jul.
- WEISS, H., XIAO, J., 2003, “Fuzzy system control for combined wind and solar power distributed generation unit”. In: *IEEE International Conference on Industrial Technology*, v. 2, pp. 1160-1165, Dez.
- WOOD, D. J., REDDY, L. S., 1994, “Control de bombas de velocidad variable y modelos en tiempo real para minimizar fugas y costes energéticos”. In: *Curso Dictado en la UIMP: Mejora del Rendimiento y de la Fiabilidad en Sistemas de Distribución de Agua*, pp. 173-207, Valencia, España (*apud* RODRIGUES, 2007).
- WRC, 1994, “Water Industry: Managing Leakage (Report G and J)”. In: *Engineering and Operations Committee*, Reino Unido (*apud* COVAS e RAMOS, 2007).

- WU, W.Y., GAO, J.L., ZHAO, M., *et al.*, 2007, “Assessing and optimizing online monitoring for securing the water distribution system”. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, pp. 350-355, Abr.
- XIAO, D.; LIANG, J.; ZHAO, X.; *et al.*, 2004, “Optimal monitoring of water distribution systems”. In: *Proceedings of SPIE - System ID and Health Monitoring of Structures*, v. 5391, 726, Set.
- YAOJIE, S., LONGYUN, K., WEIXIANG, S., *et al.*, 2004, “Robust sliding mode control of variable-speed wind power system”. In: *Proceedings of 4th International Power Electronics and Motion Control Conference*, v. 3, pp. 1712-1716, Ago.
- YATIM, A.H.B.M., UTOMO, W.M., 2005, “Neuro-fuzzy on-line optimal energy control for variable speed compressor motor drive system”. In: *International Conference on Power Electronics and Drives Systems*, v. 1, pp. 776-780, Jan.
- YEN, J., LANGARI, R., 1999, *Fuzzy Logic: Intelligence, Control, and Information*. Prentice Hall, USA (*apud* ORTEGA, 2001).
- ZADEH, L.A., 1965, “Fuzzy Sets”. *Information and Control*, v. 8, n. 3 (Jun), pp. 338-353.
- ZADEH, L.A., 1973, “Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes”. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, v. SMC-3, n. 1 (Jan), pp. 28-44.
- ZADEH, L.A., 2008, “Is there a need for Fuzzy Logic?”. *Information Sciences*, v. 178, pp. 2751-2779.
- ZAHED FILHO, K., 1990, *Previsão de Demanda de Consumo em Tempo Real no Desenvolvimento Operacional de Sistemas de Distribuição de Água*. Tese de D.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- ZHANG, L., LI, H., CHUNLIANG E., *et al.*, 2008, “Pitch control of large scale wind turbine based on Fuzzy-PD Method”. In: *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 2447-2452, Nanjing, China, Abr.