



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**LÓGICA *FUZZY* APLICADA NA OTIMIZAÇÃO  
OPERACIONAL DE REDE SETORIZADA DE DISTRIBUIÇÃO  
DE ÁGUA**

**José Kleber Costa de Oliveira**

**João Pessoa  
2017**

**JOSÉ KLEBER COSTA DE OLIVEIRA**

**LÓGICA *FUZZY* APLICADA NA OTIMIZAÇÃO  
OPERACIONAL DE REDE SETORIZADA DE DISTRIBUIÇÃO  
DE ÁGUA**

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 em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Dinâmica e Controle de Sistemas Mecânicos.

Orientador: Prof. Dr. Heber Pimentel  
Gomes

**João Pessoa  
2017**

OxxxI

OLIVEIRA, José Kleber Costa de, 1963-

Lógica *fuzzy* aplicada na otimização operacional de rede setorizada de distribuição de água / José Kleber Costa de Oliveira. – João Pessoa, 2017.

147 f. : il.

Tese (Doutorado) – UFPB/CT

Orientador: Heber Pimentel Gomes

1. Rede setorizada. 2. Controle de pressão. 3. Lógica *fuzzy*. 4. Válvulas reguladoras de pressão. 5. Inversor de frequência.

UFPB/BC

CDU: XX(XXX)

# LÓGICA FUZZY APLICADA NA OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DE REDE SETORIZADA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

*por*

**JOSÉ KLEBER COSTA DE OLIVEIRA**

*Tese aprovada em 30 de janeiro de 2017*



Prof. Dr. HEBER PIMENTEL GOMES  
Orientador - UFPB



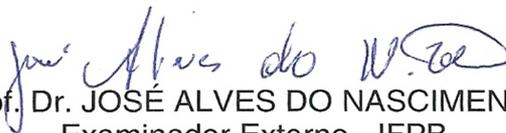
Prof. Dr. SIMPLÍCIO ARNAUD DA SILVA  
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO  
Examinador Interno - UFPB



Eng. Dr. SAULO DE TARSO MARQUES BEZERRA  
Examinador Externo - UFPE



Prof. Dr. JOSÉ ALVES DO NASCIMENTO  
Examinador Externo - IFPB

*Dedico este trabalho aos meus familiares,  
Mãe, filhos, noiva, amigos, professores e  
colegas do doutorado e da vida.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter-me guiado nesta árdua jornada para alcançar mais um nível na evolução da minha vida acadêmica.

A todas as pessoas que, de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a realização deste sonho.

À minha noiva, Sílvia Karla, em especial, pelo amor, pelo apoio, pela força, pelo incentivo e pela grande contribuição na construção desta tese.

Aos meus filhos, Kaio César, Katryne Raiane e Karolyne Vitória, pela paciência e pela compreensão por minha ausência no lazer dos fins de semana.

À minha mãe, Francisca Lúcia, e aos meus irmãos, José Etevaldo e Ana Karla, por terem contribuído para a minha formação educacional.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal da Paraíba, pela paciência, pela dedicação e pelo repasse dos conhecimentos.

Ao meu orientador, professor doutor Heber Pimentel Gomes, pelo apoio, pela paciência, pelo incentivo e pela ajuda nos momentos difíceis em que acreditou no nosso trabalho e serviu de referência para sua conclusão.

À direção do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, *campus* de Cajazeiras, e à direção do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), *campus* de Caicó, por terem facilitado a disponibilidade de horários para a realização deste doutorado.

Aos amigos do LENHS, Laís Pereira Régis, Renato de Sousa, Kamilla Henrique Mendonça, Geraldo de Araújo Moura, Emânuel Guerra de Barros Filho, Kenny Rogers da Silva Henriques e, especialmente, a Moisés Menezes Salvino, pelas profícuas discussões e pela desprendida ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu grande amigo e segundo pai Francisco Horácio Dantas (*in memoriam*), por ter sido o grande mentor e incentivador da minha vida acadêmica, e por ter sempre acreditado na minha vontade de crescimento pessoal e intelectual.

Ao meu amigo e professor do IFRN Arnóbio Bezerra da Silva (*in memoriam*), por ser um exemplo de profissional para minha vida acadêmica.

Ao meu amigo José Targino, por ter ajudado na manutenção dos equipamentos hidráulicos da bancada.

Ao funcionário José Daniel dos Santos Alves, pela atenção e pelo zelo com a limpeza e a higienização do nosso ambiente de trabalho.

Ao meu amigo/irmão Jean Pierre Veronese, ex-colega de trabalho do IFPB, pela paciência nos momentos de estresse, pela serenidade e pelo equilíbrio emocional que sempre demonstrou nas nossas discussões acadêmicas.

A Mayara Ferreira de Freitas, pela grande participação na construção desta tese.

Aos amigos Fábio Araújo de Lima e Andrécia Pereira da Costa, pela paciência nos momentos de estresse.

Ao professor doutor Wilson Guerreiro Pinheiro, pela esmerada revisão final desta tese.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, mesmo aqueles cujos nomes não foram citados, mas que também foram importantes.

## RESUMO

Este trabalho apresenta a solução para o problema do excesso de pressão em sistemas de abastecimento de água que têm injeção de água diretamente na rede ou com bombas instaladas em série na rede de modo que essas operações resultam no aumento do número de vazamentos, desperdício de água e de energia elétrica. Essa solução é de fundamental importância para a melhoria e continuidade do abastecimento de água nas comunidades afetadas pela escassez hídrica. Utilizou-se a técnica de controle *fuzzy* no conjunto motor-bomba e em válvulas reguladoras de pressão (VRPs), que se mostrou uma excelente solução para o controle da pressão em um valor constante, com redução do consumo de energia elétrica. A pesquisa foi desenvolvida em uma rede que simula um sistema real, sendo dividida em três setores, e nas entradas de dois deles foram instaladas as VRPs para auxiliar no controle, fazendo um ajuste fino quando o controlador da bomba não estivesse mais atuando. A arquitetura do sistema de controle foi projetada com dois controladores *fuzzy*, sendo um aplicado no conjunto motor-bomba modulando a velocidade do motor e um segundo controlador, denominado de *fuzzy* “eficiente”, atuando nas VRPs para controlar a abertura e o fechamento da passagem da água. O *fuzzy* “eficiente” teve como objetivo transferir o excesso da energia de pressão de um setor para o outro, por meio do fechamento da seção da válvula. A relevância do trabalho está também no benefício que tal estudo irá propiciar às empresas de saneamento, como a redução média de 19,46% no consumo de energia elétrica quando aplicado em sistemas semelhantes ao da pesquisa. Como resultado final no ganho energético, foi aplicado o Índice de Consumo Específico, apresentando uma redução de 23% entre a operação sem controle e sob a ação do controle *fuzzy*.

**Palavras-Chaves:** Rede Setorizada. Controle de pressão. Lógica *fuzzy*. Válvulas Reguladoras de Pressão. Inversor de Frequência.

## ABSTRACT

This work presents the solution to the problem of overpressure in water supply systems that have water injection directly in the network or with pumps installed in series in the network (booster) in which these operations result in the increase of the number of leaks, waste of water and electric power. The application of the fuzzy control technique to the motor-pump assembly, and to the pressure regulating valves (PRVs) when water demand changes, provoking an increase in pressure, proved to be an excellent solution to control pressure at a constant value and to reduce electric energy consumption. The research was developed on a network that simulates a real system, being divided into three sectors, and at the entrances of two of them PRVs were installed to assist in control, making a fine adjustment when the pump controller is no longer acting. The architecture of the control system is designed with two fuzzy controllers, one of them being applied in the motor-pump by modulating the motor speed, and a second controller, called "efficient" fuzzy, acting on PRVs to control the opening and closing of the water flow. The "efficient" fuzzy aimed to transfer excess pressure energy from one sector to another by closing the valve section. The relevance of the work is also in the benefit that such study will provide sanitation companies with the average reduction of 19.46% in the electric energy consumption when applied in systems similar to that of this research. As a final result in energy gain, the Specific Consumption index has been applied, showing a 23% reduction between the operation without control and under the action of the fuzzy control.

**Keywords:** Sectorized Network. Pressure Control. Fuzzy Logic. Pressure Regulating Valves. Frequency inverter.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> – Partes constituintes de um sistema de abastecimento de água .....	32
<b>Figura 3.1</b> – Vista geral da rede de distribuição com instrumentação .....	52
<b>Figura 3.2</b> – Foto panorâmica do laboratório .....	53
<b>Figura 3.3</b> – Válvula reguladora de pressão (VRP) .....	54
<b>Figura 3.4</b> – Transdutor de pressão .....	54
<b>Figura 3.5</b> – Medidor de vazão .....	55
<b>Figura 3.6</b> – Foto do conjunto motor-bomba .....	55
<b>Figura 3.7</b> – Representação em blocos dos componentes do inversor de frequência .....	56
<b>Figura 3.8</b> – Foto do painel com inversor de frequência.....	57
<b>Figura 3.9</b> – Parte frontal do painel com detalhe do multimedidor de grandezas elétricas .....	58
<b>Figura 3.10</b> – Fluxograma com síntese da ação do supervisor .....	61
<b>Figura 3.11</b> – Módulo conversor RS-232/485, da ATOS .....	61
<b>Figura 3.12</b> – CLP de fabricação da ATOS .....	62
<b>Figura 3.13</b> – Painel com CLP instalado .....	63
<b>Figura 3.14</b> – IHM do CLP parte frontal do Painel.....	64
<b>Figura 3.15</b> – Diagrama de blocos do controlador <i>fuzzy</i> incremental para o motor-bomba.....	65
<b>Figura 3.16</b> – Diagrama de blocos do controlador <i>fuzzy</i> incremental para as válvulas V1 e V2.....	65
<b>Figura 3.17</b> – Gráfico da entrada da pressão, controlador <i>fuzzy</i> para bomba .....	67
<b>Figura 3.18</b> – Gráfico da derivada das pressões, controlador <i>fuzzy</i> para bomba .....	68
<b>Figura 3.19</b> – Gráfico da saída, controle <i>fuzzy</i> para bomba .....	69
<b>Figura 3.20</b> – Gráfico do plano de controle <i>fuzzy</i> da saída da bomba .....	70

<b>Figura 3.21</b> – Gráfico da entrada “Erro”, controlador <i>fuzzy</i> das válvulas .....	71
<b>Figura 3.22</b> – Gráfico da entrada Pressão do controlador <i>fuzzy</i> das válvulas .....	71
<b>Figura 3.23</b> – Gráficos das variáveis linguísticas da saída do controle <i>fuzzy</i> para as válvulas V1 e V2 .....	72
<b>Figura 3.24</b> – Gráfico com plano de controle da saída do controlador <i>fuzzy</i> para as válvulas .....	73
<b>Figura 3.25</b> – Gráficos das variáveis de entrada do controlador <i>fuzzy</i> “eficiente” para as válvulas: (a) pressão; (b) frequência; (c) diferença de pressão nos setores .....	75
<b>Figura 3.26</b> – Gráfico da saída do <i>fuzzy</i> “eficiente” para as válvulas .....	76
<b>Figura 3.27</b> – Diagrama de blocos do controlador <i>fuzzy</i> mais PID para V2 .....	76
<b>Figura 3.28</b> – Diagrama de blocos do controlador PID para a válvula V1 .....	78
<b>Figura 3.29</b> – Comportamento da pressão do sistema para a vazão máxima .....	79
<b>Figura 4.1</b> – Gráfico com as curvas de rendimento da bomba .....	84
<b>Figura 5.1</b> – Gráfico das variáveis hidráulicas e elétricas para operação em malha aberta na configuração da vazão máxima .....	94
<b>Figura 5.2</b> – Gráfico das variáveis hidráulicas, sistema sem controle, vazão mínima.....	97
<b>Figura 5.3</b> – Gráfico das variáveis hidráulicas e elétricas na operação com vazão máxima e sob a ação do sistema <i>fuzzy</i> .....	100
<b>Figura 5.4</b> – Gráfico das variáveis hidráulicas e elétricas do sistema operando na vazão mínima sob a ação do sistema <i>fuzzy</i> .....	104
<b>Figura 5.5</b> – Gráfico das variáveis hidráulicas, sistema operando com <i>fuzzy</i> “eficiente” na vazão máxima .....	107
<b>Figura 5.6</b> – Gráfico das pressões no ponto 4 da Figura 5.5, operação com a vazão máxima e sob a ação do sistema <i>fuzzy</i> “eficiente” .....	109
<b>Figura 5.7</b> – Gráfico das pressões no ponto 6 da Figura 5.5, operação com vazão máxima sistema <i>fuzzy</i> “eficiente” .....	111
<b>Figura 5.8</b> – Gráfico das variáveis hidráulicas e elétrica, sistema operando com <i>fuzzy</i> “eficiente” para mínima vazão .....	112
<b>Figura 5.9</b> – Operação para vazão máxima, sistema <i>fuzzy</i> só nas VRPs .....	114

<b>Figura 5.10</b> – Gráfico da variação da pressão com <i>fuzzy</i> só nas VRPs para vazão máxima.....	116
<b>Figura 5.11</b> – Gráfico da operação com <i>fuzzy</i> “eficiente” só na bomba para vazão máxima.....	118
<b>Figura 5.12</b> – Gráfico da variação da pressão com atuação do controlador <i>fuzzy</i> só nas VRPs para máxima vazão.....	120
<b>Figura 5.13</b> – Gráfico comparativo das potências, sistema operando com variação do consumo.....	125
<b>Figura 5.14</b> – Gráfico das curvas características (a) da bomba e (b) do rendimento.....	127
<b>Figura A.1</b> – Balança de peso morto.....	138
<b>Figura A.2</b> – Detalhe da indicação do peso.....	139
<b>Figura A.3</b> – Fonte de tensão contínua.....	139
<b>Figura A.4</b> – Esquema elétrico do circuito de conversão da corrente elétrica em tensão.....	140
<b>Figura A.5</b> – Gráfico da Pressão (mca) <i>versus</i> Tensão Vcc para transdutores de 20 mca.....	141
<b>Figura A.6</b> – Gráfico da Pressão (mca) <i>versus</i> Tensão Vcc, transdutores de 30 mca.....	142
<b>Figura A.7</b> – Gráfico da Tensão Vcc x Pressão mca, transdutores de 40 mca.....	142
<b>Figura A.8</b> – Vista do medidor de vazão eletromagnético em PVC.....	143
<b>Figura A.9</b> – Desenho da placa de circuito eletrônico do medidor de vazão.....	145
<b>Figura A.10</b> – Posição do <i>jumper</i> JP1 para calibração de 4 mA.....	146
<b>Figura A.11</b> – Posição de operação normal do <i>jumper</i> JP1.....	147

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b> – Matriz de regras do sistema <i>fuzzy</i> para conjunto motor-bomba.....	66
<b>Tabela 3.2</b> – Matriz de regras do sistema <i>fuzzy</i> para as válvulas V1 e V2 .....	72
<b>Tabela 5.1</b> – Dados de pressão e do tempo no ponto 1 do gráfico da Figura 5.10 .....	116
<b>Tabela 5.2</b> – Dados de pressão e tempo do ponto 2 do gráfico da Figura 5.10 .....	117
<b>Tabela 5.3</b> – Pontos de pressão com o tempo de atuação sob a ação do controlador <i>fuzzy</i> (dados do gráfico da Figura 5.13) .....	120
<b>Tabela 5.4</b> – Pontos de pressão com o tempo de atuação sob a ação do controlador <i>fuzzy</i> , dados do gráfico da Figura 5.13 .....	120
<b>Tabela 5.5</b> – Dados hidráulicos e elétricos da operação na vazão máxima e sem variação do consumo .....	122
<b>Tabela 5.6</b> – Dados hidráulicos e elétricos da operação do sistema na vazão máxima e com perturbação hidráulica .....	123
<b>Tabela 5.7</b> – Dados hidráulicos e elétricos do sistema na vazão mínima sem variação do consumo de água .....	123
<b>Tabela 5.8</b> – Dados hidráulicos e elétricos da operação do sistema na vazão mínima com variação do consumo .....	124
<b>Tabela A.1</b> – Medição da tensão para transdutor PT-01 a PT-16.....	141

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>a.C.</b>	Antes de Cristo
<b>ADASA</b>	Agência Reguladora de Água, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal
<b>CAERN</b>	Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte
<b>CE</b>	Consumo específico de energia elétrica
<b>CLP</b>	Controlador Lógico Programável
<b>C-o-A</b>	Abreviação do inglês <i>Center of Area</i> [= Centro de Área]
<b>CPU</b>	Abreviação do inglês <i>Central Processing Unit</i> [= Unidade Central de Processamento]
<b>DERIV.</b>	Derivada
<b>Dif.</b>	Diferença
<b>DN</b>	Diâmetro Nominal
<b>ed.</b>	edição
<b>Ed.</b>	Editor(es)
<b>EESC</b>	Escola de Engenharia de São Carlos
<b>e.g.</b>	Abreviação da expressão latina <i>exempli gratia</i> [= por exemplo]
<b>ETA</b>	Estação de Tratamento de Água
<b>et al.</b>	Abreviação da locução latina <i>et alii</i> [= e outros]
<b>EUA</b>	Estados Unidos da América
<b>freq.</b>	frequência

<b>IEEE</b>	Abreviação do inglês <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> [= Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos]
<b>IFRN</b>	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
<b>IGBT</b>	Abreviação do inglês <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> [= Transistor bipolar de porta isolada]
<b>IHM</b>	Interface Homem Máquina
<b>ISBN</b>	Abreviação do inglês <i>International Standard Book Number</i> [= Número Padrão Internacional de Livro]
<b>ISSN</b>	Abreviação do inglês <i>International Standard Serial Number</i> [= Número Internacional Normalizado para Publicações Seriadas]
<b>LabVIEW®</b>	Abreviação do inglês <i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
<b>LENHS</b>	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
<b>loc. cit.</b>	Abreviação da locução latina <i>loco citatum</i> [= no lugar citado]
<b>MA</b>	Estado de <i>Massachusetts</i> (EUA)
<b>n.</b>	número(s); nascido em.
<b>N</b>	Negativo
<b>NA</b>	Negativo Alto
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>NE</b>	Neutro
<b>NEG</b>	Negativo
<b>NSGA-II</b>	Abreviação do inglês <i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i> [= Algoritmo Genético de Ordenação Não Dominante II]
<b>OMS</b>	Organização Mundial da Saúde

<b>PA</b>	Pressão Alta; Positivo Alto
<b>PB</b>	Pressão Baixa; Estado da Paraíba
<b>PID</b>	Proporcional-Integral-Derivativo [Diz-se de controlador.]
<b>PO</b>	Positivo
<b>pp.</b>	Abreviação do inglês <i>pages</i> [= páginas]
<b>PPGEM</b>	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
<b>Pres.</b>	Pressão
<b>PT</b>	Abreviação do inglês <i>Pressure Transducer</i> [= Transdutor de pressão]
<b>PVC</b>	Abreviação do inglês <i>Polyvinyl Chloride</i> [= Policloreto de vinila]
<b>PWM</b>	Abreviação do inglês <i>Pulse-Width Modulation</i> [= Modulação por largura de pulso]
<b>RESIST.</b>	Resistência (elétrica).
<b>RPDA</b>	Rede Pressurizada de Distribuição de Água; Rede Piloto de Distribuição de Água
<b>RTU</b>	Abreviação do inglês <i>Remote Terminal Unit</i> [= Unidade terminal remota]
<b>SAA</b>	Sistema de Abastecimento de Água
<b>SABESP</b>	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
<b>SCADA</b>	Abreviação do inglês <i>Supervisory Control and Data Acquisition System</i> [= Sistema de Controle Supervisório e Aquisição de Dados]
<b>s.l.</b>	Abreviação da expressão latina <i>sine loco</i> [= sem local (de publicação)]
<b>s.n.</b>	Abreviação da expressão latina <i>sine nomine</i> [= sem nome (do editor)]
<b>THD</b>	Abreviação do inglês <i>Total Harmonic Distortion</i> [= Distorção harmônica total]

<b>UCP</b>	Unidade Central de Processamento
<b>UENF</b>	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
<b>UFPB</b>	Universidade Federal da Paraíba
<b>UFRN</b>	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
<b>UK</b>	Abreviação do inglês <i>United Kingdom</i> [= Reino Unido]
<b>UNICAMP</b>	Universidade Estadual de Campinas
<b>USB</b>	Abreviação do inglês <i>Universal Serial Bus</i> [= Barramento serial universal]
<b>USP</b>	Universidade de São Paulo
<b>v.</b>	veja; volume
<b>V1, V2, V3, ...</b>	Válvulas reguladoras de pressão
<b>vol.</b>	volume
<b>VRP</b>	Válvula Redutora de Pressão
<b>VS-1, VS-2, VS-3</b>	Válvulas solenoides

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>A</b>	Ampère
<b>B</b>	Fluxo magnético
<b>cm</b>	centímetro
<b>cv</b>	Cavalo-vapor
<b>D</b>	Diâmetro da seção transversal do medidor de vazão; diâmetro da seção circular do campo magnético
<b>E</b>	Força eletromotriz induzida no interior do campo magnético
<b>E0 a E7</b>	Entradas digitais no CLP
<b>f</b>	Frequência de acionamento do motor
<b>FP</b>	Fator de potência
<b>h</b>	hora
<b>H</b>	Altura manométrica
<b>Hz</b>	Herz
<b>i</b>	Corrente elétrica
<b>kbit</b>	quilobit
<b>K<sub>d</sub></b>	Ganho derivativo
<b>K<sub>i</sub></b>	Ganho integrativo
<b>K<sub>p</sub></b>	Ganho proporcional
<b>kW</b>	Quilowatt
<b>kWh</b>	Quilowatt-hora
<b>m</b>	metro
<b>m<sup>3</sup></b>	metro cúbico
<b>m<sup>3</sup>/h</b>	metro cúbico por hora

<b>mA</b>	miliampère
<b>Mbit</b>	megabit
<b>mca</b>	metro de coluna de água
<b>mm</b>	milímetro
<b>ms</b>	milissegundo
<b>N</b>	Velocidade do eixo do motor assíncrono
<b>Nm</b>	Newton-metro
<b><i>p</i></b>	Número de polos do motor
<b><i>P<sub>e</sub></i></b>	Potência elétrica
<b><i>Ph</i></b>	Potência hidráulica
<b><i>P<sub>m</sub></i></b>	Potência mecânica
<b><i>Q</i></b>	Valor da vazão
<b>rpm</b>	rotações por minuto
<b><i>s</i></b>	Escorregamento do motor assíncrono; segundo
<b><i>S0 a S7</i></b>	Saída digital do CLP
<b><i>T</i></b>	Torque do motor
<b><i>v</i></b>	Tensão alternada
<b>V</b>	Volt
<b><i>V</i></b>	Velocidade do fluxo de água
<b>Vca</b>	Tensão alternada
<b>Vcc</b>	Tensão contínua
<b><i>η</i></b>	Rendimento do motor
<b><i>η<sub>b</sub></i></b>	Rendimento da bomba
<b>μS</b>	microsiemens

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>23</b>
1.1 Justificativa.....	28
1.2 Objetivos.....	31
1.2.1 Objetivo geral.....	31
1.2.2 Objetivos específicos.....	31
1.3 Organização do Trabalho.....	32
<b>CAPÍTULO 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>33</b>
2.1 Sistema de Abastecimento.....	33
2.1.1 Captação.....	34
2.2 Adução de Água Tratada.....	35
2.3 Reservatórios.....	35
2.4 Setor de Rede de Distribuição.....	36
2.4.1 Operação de sistemas com mudança de <i>layout</i> .....	37
2.4.2 Automação e controle em sistemas.....	39
2.4.3 Sistema de controle robusto (PID).....	41
2.4.4 Sistema de controle <i>fuzzy</i> .....	41
2.5 Estado da Arte.....	48
<b>CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>52</b>
3.1 Descrição da Bancada.....	52
3.1.1 Rede de distribuição.....	52
3.1.2 Sistema de bombeamento.....	55
3.1.3 Painel elétrico.....	57
3.2 Desenvolvimento Supervisório no Lab VIEW™.....	59
3.3 Desenvolvimento do Sistema <i>Fuzzy</i> .....	65
3.3.1 Controlador <i>fuzzy</i> para o conjunto motor-bomba.....	66

3.3.2 Sistema <i>fuzzy</i> para as válvulas V1 e V2 .....	71
3.4 Sistema <i>Fuzzy</i> “Eficiente” .....	74
3.4.1 Sistema <i>fuzzy</i> “eficiente” aplicado no conjunto motor-bomba .....	75
3.4.2 Sistema <i>fuzzy</i> “eficiente” para a válvula V1 .....	75
3.4.3 Controlador <i>fuzzy</i> “eficiente” para a válvula V2.....	77
<b>CAPÍTULO 4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>81</b>
4.1 Abordagem da Metodologia do Tipo (A), Sistema <i>Fuzzy</i> .....	82
4.1.1 Experimento (A), Controlador <i>Fuzzy</i> Aplicado só nas Válvulas .....	84
4.1.2 Experimento (A), Controlador <i>Fuzzy</i> no Conjunto Motor-Bomba .....	86
4.1.3 Experimento (A), Controlador <i>Fuzzy</i> na Bomba e nas Válvulas .....	87
4.2 Discussões do Experimento (B), Sistema <i>Fuzzy</i> “Eficiente” .....	88
4.2.1 Experimento (B), Sistema <i>fuzzy</i> “Eficiente” Aplicado só nas Válvulas .....	90
4.2.2 Experimento (B), Sistema <i>Fuzzy</i> “Eficiente” Aplicado no Conjunto Motor-Bomba.....	91
4.2.3 Experimento (B), Sistema <i>Fuzzy</i> “Eficiente” na Bomba e nas Válvulas.....	91
<b>CAPÍTULO 5 RESULTADOS .....</b>	<b>94</b>
5.1 Introdução .....	94
5.2 Operação em malha aberta para máxima vazão.....	94
5.3 Operação em malha aberta para vazão mínima .....	97
5.4 Operação com atuação do sistema <i>fuzzy</i> .....	99
5.5 Sistema <i>fuzzy</i> aplicado nas válvulas e bomba na máxima vazão .....	99
5.6 Sistema <i>fuzzy</i> nas válvulas e bomba para mínima vazão .....	104
5.7 Sistema <i>fuzzy</i> “eficiente” para válvulas e bomba na vazão máxima .....	107
5.8 Sistema <i>fuzzy</i> “eficiente” aplicado nas válvulas e bomba para Vazão mínima .....	112

5.9 Aplicação de sistema <i>fuzzy</i> “eficiente” nas válvulas para a vazão máxima .....	115
5.10 Aplicação do sistema <i>fuzzy</i> “eficiente” no conjunto motor-bomba para a vazão máxima.....	118
5.11 Síntese da Coleta de Dados.....	122
<b>CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>129</b>
6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros .....	131
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>132</b>
<b>APÊNDICE A – AJUSTE E VERIFICAÇÃO DOS SENSORES E TRANSDUTORES .....</b>	<b>136</b>
A.1 Sensores e Transdutores.....	137
A.2 Verificação dos Transdutores de Pressão .....	137
A.3 Ajustes da Corrente nos Medidores de Vazão.....	142

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A água potável<sup>1</sup>, por ser um recurso natural, hoje já limitado em algumas regiões do Brasil, deve ser explorada e distribuída de forma eficiente na quantidade e pressão adequadas para a população.

Nesse contexto, pode-se destacar que, segundo Segala (2012), 40% da população do planeta já sofre as consequências da falta de água. Além do aumento da sede no mundo, a falta de recursos hídricos tem graves implicações econômicas e políticas para as nações.

Atualmente, as companhias de saneamento têm-se preocupado com a distribuição de água e a conservação de energia elétrica, devido à sua ligação direta com questões econômicas e ambientais. São raros os sistemas de distribuição de água que operam exclusivamente por gravidade, sendo dotados, no mínimo, de um conjunto motor-bomba para recalcar água a diversos pontos, como reservatórios, rede hidráulica e adutoras. (BEZERRA, 2009).

Estima-se, por conseguinte, que cerca de 40% da população global viva hoje sob a situação de estresse hídrico. Essas pessoas habitam regiões onde a oferta anual é inferior a 1.700 m<sup>3</sup> de água por habitante — limite mínimo considerado seguro pela Organização das Nações Unidas. (ONU, 2012).

Nesse caso, a falta de água é frequente e, para tornar pior tal situação, a perspectiva para o futuro é que haverá uma maior escassez desses recursos. Assim, destaca-se que, “de acordo com estimativas do Instituto Internacional de Pesquisa de Política Alimentar, [...] até 2050 um total de 4,8 bilhões de pessoas estarão em situação de estresse hídrico.” (SEGALA, 2012),

Por outro lado, as empresas de saneamento do Brasil sofrem também com essa escassez e o estresse hídrico, porque elas devem atender, de forma eficiente em quantidade e pressão suficientes, às necessidades de consumo da população.

Parafraseando Fontana e Moraes (2013), de forma generalizada, dificuldades de abastecimento de água abarcam a sociedade como um todo, não só por se tratar

---

<sup>1</sup> Aquela “que pode ser consumida sem riscos à saúde e sem causar rejeições ao consumo.” (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2017).

de um recurso escasso, mas pelo grau de relevância que tem na vida dos seres humanos. Por esse motivo, decisões que englobam a rede de distribuição de água têm um caráter social.

Entretanto, essas companhias de abastecimento têm dificuldade de manter a qualidade do serviço, porque, além dos problemas já citados por Segala (2012), existem também o envelhecimento e o desgaste das estruturas, dos equipamentos e das tubulações que compõem o sistema de abastecimento, e o crescimento populacional no Brasil de 3%, em média, ao ano.

Contudo, essa taxa de crescimento não se tem mantido na média, que é o caso de alguns bairros nos grandes centros urbanos onde se observam valores bem acima do esperado, como, por exemplo, no bairro do Bessa, na cidade de João Pessoa-PB, que apresentou uma taxa de 8,5 ao ano, segundo dados do Censo do IBGE de 2000 a 2010.

Nesse contexto, uma saída encontrada por essas empresas para minimizar os efeitos negativos de tais adversidades — de falhas na distribuição de água provocadas pelo envelhecimento das estruturas, crescimento populacional fora da média, diminuição dos recursos financeiros para investir em novos sistemas, ou até para mantê-los, — está na utilização de ações para o controle operacional dos sistemas de distribuição de água.

Destaque-se também que essas ações passam normalmente pela divisão da rede de distribuição em setores. A *setorização*, como é mais conhecida na área de saneamento, permite o controle da pressão de forma eficaz, através da instalação de válvulas redutoras de pressão, ou da utilização de variadores de velocidade nas bombas quando a rede for alimentada diretamente pelo conjunto motor-bomba.

Lai, Wu e Wun (2015) apresentam uma estratégia de controle que equilibra a confiabilidade contra a eficiência do conjunto motor-bomba. O sistema de bomba e válvula é um sistema multilinear de entrada-saída, múltiplas entradas e múltiplas saídas, com atrasos de tempo que não podem ser medidos com precisão, mas podem ser modelados, aproximadamente, utilizando o Princípio de Bernoulli. Um controlador adaptável distorcido pode ser aplicado para aproximar os parâmetros do sistema e alcançar o controle de modelo livre de atraso, uma vez que o modelo de sistema é impreciso, e o método de retorno direto de linearização não pode ser aplicado. Assim, é introduzido esse controlador para compensar os atrasos do

sistema usando o modelo de sistema impreciso. O experimento é realizado para verificar a eficácia da estratégia de controle, cujos resultados mostram que os desempenhos do controle foram alcançados.

Brasil (1999), por conseguinte, pontua que a setorização é mencionada como requisito básico para o controle de sistemas de abastecimento de água. Já Tsutiya (2006), por sua vez, reafirma essa necessidade quando recomenda os distritos pitométricos<sup>2</sup> como unidades de controle operacional, ressaltando, entre outros, que é preciso um isolamento da rede.

Conforme Fontana e Morais (2013), o objetivo basal de todos os sistemas de distribuição de água é o fornecimento de água para atender à demanda. Entretanto, um dos desafios primordiais para os gestores de abastecimento de água é a minimização das perdas de água provocadas por vazamentos, sobretudo decorrentes de problemas de uma infraestrutura envelhecida e da sobrepessão na rede, quando esta é alimentada diretamente por bomba e ocorrer a diminuição da demanda.

Nessa ótica, o controle de perdas tem-se tornado de grande empenho mundial em decorrência da crescente disposição internacional para a sustentabilidade, eficiência econômica e proteção do ambiente.

De acordo com Ramos et al. (2001), a ocorrência de vazamentos na rede pode ocasionar a redução da água disponível e até a suspensão do abastecimento de água durante a reparação da infraestrutura, provocando a insatisfação dos seus diversos usuários.

Para Barreto et al. (2006), independentemente da setorização ou não, é imperativa a realização de estudos de desempenho hidráulico da rede de distribuição, visto que possibilita a previsão das alterações de vazão e pressão da água na área de abastecimento.

No contexto de setorização, portanto, uma vez criado o setor, haverá, por conseguinte, a possibilidade para se medir toda a água destinada àquela área, através do uso de um macromedidor<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> Distrito pitométrico: área perfeitamente delimitada que aplica técnica de medição da pressão e vazão de água em condutos forçados através de pressão diferencial.

<sup>3</sup> Medidor de vazão instalado na tubulação principal da saída da bomba, utilizado para medir o volume total injetado na rede de distribuição.

O volume macromedido será comparado com a soma dos volumes registrados nos hidrômetros residenciais durante o mesmo intervalo de tempo e, dessa forma, é possível quantificar o índice de perdas físicas do setor. Ainda como medida para obter um sistema de controle, tem-se a implantação de uma política que visa evitar perdas, e que tem como finalidade combater o desperdício de água distribuída com a utilização de técnicas de engenharia de controle.

No controle dessas perdas, é implantado um conjunto de ações para diminuir a demanda de água distribuída, como, por exemplo, a variação de velocidade do conjunto motor-bomba para manter a pressão de uma forma constante. Outras ações são: a instalação e manutenção de micromedições nos ramais, a diminuição da pressão distribuída com o objetivo de minimizar o volume de água desperdiçado e, por fim, a pesquisa de vazamentos invisíveis.

Segundo Bezerra e Silva (2009), a forma mais impactante para amortizar o volume de água fornecido, sem que haja racionamento e/ou “racionalização forçada”, é a diminuição das perdas de água através da redução da pressão dos sistemas.

Pereira (2014) enfatiza, nesse prisma, que os vazamentos reduzem os valores de pressão e de vazão da água disponibilizada para os consumidores, tendo maior impacto nos locais sem setorização da rede de distribuição de água.

Além disso, o autor supracitado infere que um grande período de tempo entre a identificação e a recuperação do vazamento aumenta o consumo de energia elétrica no Sistema de Abastecimento de Água (SAA) e reduz o volume a ser faturado na prestação do serviço de abastecimento de água.

Essas ações que levam a falta de controle da pressão culminam nos prováveis vazamentos que diminuem significativamente a quantidade de água necessária para atender a população. Nesse caso, é necessária uma demanda extra de água para manter o atendimento à população na quantidade necessária e com a pressão adequada.

Na busca de atender à população com um serviço eficiente de distribuição de água, as empresas do setor de saneamento passam por problemas de falta de recursos financeiros para investir nessas ações de setorização das redes como também na ampliação dos seus sistemas. Vale inferir que algumas empresas, mesmo diante da carência desses recursos financeiros, necessitam ampliar seus

sistemas e, para tal, projetam e constroem novos sistemas de abastecimento mais econômicos. Nesse sentido, para se alcançar essa economia, os projetistas suprimem os reservatórios de distribuição do novo *layout* do sistema e passam a alimentar a rede com água diretamente do sistema de bombeamento.

Outro problema recorrente em sistemas de distribuição diz respeito à diminuição ou até mesmo à falta da pressão na rede de distribuição nos horários de maior demanda em locais que apresentam uma topografia elevada. Esses pontos normalmente não apresentam pressões suficientes para atender o consumidor.

Então, uma das alternativas encontradas pelas empresas de saneamento para solucionar esse problema passa pela instalação de *booster* (um conjunto motor-bomba na rede que é utilizado para pressurizar os trechos a jusante de sua instalação).

Pode-se afirmar, por conseguinte, que, em quaisquer dessas situações, instalações de *boosters* ou em construções de sistemas sem reservatórios de distribuição, as pressões na rede irão variar em função da demanda, ou seja, quanto maior o consumo, menor a pressão, e vice-versa.

Essa operação, sem os devidos cuidados com a pressão, tem como consequência o surgimento de vazamentos, o desperdício de água e de produtos químicos, a inconstância no fornecimento de água provocada pelo tempo de paralisação para manutenção da rede e, por fim, o desperdício de energia elétrica, pois esse desperdício de água daria para suprir a demanda da população atendida num tempo menor de operação das bombas. É nessa linha de atuação que as empresas de saneamento encontram soluções, mesmo que precárias, para não trabalhar com o excesso de pressão na rede. Para isso, utilizam destas duas alternativas: o fechamento parcial de registros instalados à frente dos *boosters*, ou seu desligamento nos horários de menor consumo. Sabem elas, no entanto, que tais soluções não apresentam uma grande eficácia.

Segundo Carrijo (2004), a operação vem recebendo atenção especial por parte de pesquisadores e outros profissionais da área, devido à necessidade de garantir confiabilidade no atendimento dos serviços, economia de energia elétrica no uso dos equipamentos, atendimento das demandas com pressões desejadas e planejamento de investimento para a expansão futura de suas unidades.

De acordo com Carrijo et al. (2003), na busca de uma maior eficiência para os sistemas de abastecimento de água, novas técnicas hidráulicas associadas têm sido estudadas e desenvolvidas, no intuito de estabelecer maior confiabilidade no desenvolvimento de regras para a operação de sistemas de abastecimento de água.

Nessa perspectiva, elencou-se a seguinte questão-problema para o presente estudo: como se pode desenvolver um controle para a pressão em uma Rede Pressurizada de Distribuição de Água (RPDA) setorizada e alimentada com água diretamente por um conjunto motor-bomba mantendo a pressão controlada, mesmo na presença da variação do consumo?

### 1.1 Justificativa

O presente trabalho permeou por essas problemáticas operacionais, buscando encontrar soluções através da aplicação de um sistema de controle *fuzzy*<sup>4</sup> a uma rede de distribuição de água setorizada e pressurizada por um conjunto motor-bomba, com a finalidade de controlar os pontos de pressão no sistema quando ocorrer a variação do consumo, além de procurar minimizar os transientes provocados pelo acionamento da bomba ou por abertura e fechamento das válvulas.

Jang e Gulley (1995) afirmam que o sistema *fuzzy* é flexível: possibilita, facilmente, ajustes para pequenas alterações na planta; os conceitos matemáticos da lógica são simples; a modelagem é tolerante com dados imprecisos; é possível criar um sistema *fuzzy* para corresponder a qualquer conjunto de entradas e de saídas de dados, possibilitando a modelagem de sistemas complexos, com funções não lineares; pode ser construída com base na experiência de especialistas; pode ser integrada às técnicas convencionais de controle simplificando e/ou ampliando as possibilidades e recursos desses métodos, e é baseada na linguagem natural do ser humano.

Sobre o sucesso do sistema *fuzzy* no controle de processos nas mais diversas áreas relacionadas com a engenharia, afirma-se que isso tem influenciado numerosos pesquisadores a usar essa técnica no desenvolvimento de seus controladores, a ponto de, não raro, se encontrarem tais sistemas desenvolvidos

---

<sup>4</sup> Os sistemas de controle *fuzzy* possibilitam a automação de diversos processos, que vão de tarefas domésticas até o controle de sofisticados processos industriais. (BEZERRA, 2009).

para processos que não tinham resultados satisfatórios em momentos anteriores. (BEZERRA, 2009).

Uma rede de distribuição de água é, portanto, a parte do sistema de abastecimento formada por tubulações destinadas a disponibilizar água potável aos consumidores, de forma contínua, em quantidade, qualidade e pressão adequadas.

Segundo Carvalho (2007, p. 1): “Normalmente, a rede de distribuição de água representa a maior parcela de custo de um sistema de abastecimento, representando cerca de 50% a 75% do custo total de todas as obras do abastecimento.”

O reservatório de distribuição, que também faz parte do sistema de abastecimento, tem um custo estimado entre 20% e 40% do valor final de um sistema, e, dessa forma, as empresas que constroem novos sistemas sem reservatórios de distribuição passam a economizar esse valor, o que possibilita a execução de suas obras mais facilmente.

Mas essa modificação no *layout* muda também a maneira de alimentar a rede de distribuição, que passa a receber a água diretamente do bombeamento. Essa mudança provoca um grave problema para a operação do sistema, pois, nos horários onde ocorrer o menor consumo de água, a rede continuará sendo alimentada e, com isso, ficará com um excesso de pressão. Essa pressão excedente poderá ainda ocasionar, entre outros problemas, como já foi dito, o excesso de vazamentos, desgastes prematuros das tubulações e conexões, interrupções no fornecimento em virtude das paradas para manutenção, desperdícios de água, de produtos químicos e de energia elétrica.

Nesse contexto, vale inferir que as operações dessas redes alimentadas diretamente por bombeamento são mais complexas que as tradicionais por reservatórios. Por isso, as equipes de planejamento e de operações das atuais gestoras de abastecimento de água do Brasil, que, na sua grande maioria, dependem da experiência dos profissionais para definirem regras operacionais (fixas e variáveis) do sistema, que normalmente são concebidas com base em informações de campo capazes de proporcionar melhores resultados. Contudo, elas estão encontrando grandes dificuldades nessas operações.

Por esse motivo, a maior parte dos profissionais e pesquisadores se preocupa em analisar o comportamento real das redes de distribuição de água. Os números

de variáveis envolvidas no processo, somado com o comportamento não linear do fluxo no interior das tubulações, tornam as operações dessas redes bastante complexas.

Conforme Carrijo et al. (2003), a operação de um sistema urbano de abastecimento de água, em tempo real, é tarefa muito complexa que requer o uso de equipamentos com tecnologia de ponta, como os inversores de frequência, largamente empregados para solucionar os problemas de sobrepressão e reduzir o consumo energético em sistemas elevatórios. Exemplo disso é o trabalho de Tsutiya (2006) na SABESP com a instalação de inversores de frequência em *boosters* de forma pioneira, modulando a velocidade do conjunto motor-bomba em função da pressão por meio de um sinal analógico de corrente de 4 mA a 20 mA, gerado nos transdutores de pressão e que alimenta a porta analógica de entrada do inversor de frequência, fazendo o fechamento da malha de controle.

Diante das inovações tecnológicas, a sua utilização tem sido cada vez mais viável economicamente. Tsutiya (2006) aborda ainda que bombas centrífugas em operação com inversor de frequência possibilitam o controle da vazão ou da pressão com a modulação da velocidade do motor, além de diminuir o pico de corrente no acionamento.

Yang, Wu e Dong (2010) ratificam que os sistemas de abastecimento convencionais, que utilizam bombas cujas velocidades não se alteram, não são capazes de se ajustar à variação de consumo dos usuários. Dessa forma, além de não otimizarem o fornecimento de água, ainda são responsáveis pela aplicação de um excesso de carga no sistema, provocando desperdício de energia, além de causar danos às redes, às canalizações auxiliares e aos equipamentos nela instalados.

Assim, na tentativa de encontrar soluções para os problemas gerados pela falta de controle da pressão na rede de distribuição, e com a inovação na transferência da pressão excedente de um setor para outro que esteja com déficit de pressão, encontramos a motivação para desenvolver esta pesquisa.

No que concerne à relevância pessoal do presente trabalho, destaca-se o interesse direto do pesquisador em questões com a temática abordada, com ênfase na procura por implementar uma forma de controlar a pressão numa Rede Pressurizada de Distribuição de Água na procura de possibilitar minimizar as perdas

de água. Já como relevância social, enfatiza-se a questão do beneficiamento que tal estudo irá propiciar às empresas de saneamento que utilizem tal estudo para melhoria da qualidade de seus serviços com a minimização de gastos ocasionados pela perda de água no abastecimento. A relevância acadêmica se dará, por sua vez, através da disponibilização do estudo a acadêmicos que se interessem pela temática ou por alguma semelhante que trate da mesma perspectiva, sendo que tal estudo pode e deve ser ampliado e aplicado às mais diversas realidades de nosso País, de acordo com as especificidades de cada local e de cada empresa de abastecimento de água.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Desenvolver um sistema *fuzzy* para controlar a pressão em redes de distribuição de água setorizada que são alimentadas diretamente por conjunto motor-bomba, com válvulas reguladoras de pressão instaladas nas entradas de setores, e que apresentem variação do consumo de água nos seus ramais visando a uma otimização operacional e ganhos energéticos.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- ✓ Controlar a pressão nos ramais de saída da rede de distribuição na presença da variação do consumo;
- ✓ Diminuir a energia consumida na operação do sistema quando se encontra sob a ação do controle *fuzzy*;
- ✓ Identificar e estudar a influência dos elementos de controle na rede de distribuição;
- ✓ Fazer um estudo comparativo das pressões disponíveis do sistema em operação sem controle e sob a ação do controle *fuzzy*;
- ✓ Aplicação do indicador de eficiência energética — o Consumo Específico (CE) — na operação do sistema em malha aberta e sob a ação do sistema *fuzzy*;
- ✓ Finalmente, avaliar o ganho energético do sistema com a aplicação do sistema *fuzzy*.

### 1.3 Organização do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos, quais sejam:

– o Capítulo 1 trata da Introdução, que foi subdividida em problemática do estudo, justificativa e objetivos geral e específicos, seguida da organização do trabalho;

– o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, em que se abordam os conceitos básicos em redes de abastecimento de água, sistema de bombeamento e operações de válvulas controladoras de pressão. São abordados ainda os principais estudos e metodologias desenvolvidas ao longo dos anos sobre controladores *fuzzy* aplicados a sistemas de abastecimento de água, visando ao controle da pressão em redes de abastecimento;

– o Capítulo 3, por sua vez, é dedicado à apresentação da bancada experimental em que foi desenvolvida a pesquisa, e se descrevem a metodologia de cada experimento desenvolvido e a estratégia de ação do controlador *fuzzy* aplicado ao sistema, apresentando o seu algoritmo e as suas variáveis;

– no Capítulo 4, é mostrada a aplicação do sistema *fuzzy* da bomba e das duas válvulas frente à sua eficiência, e é apresentada uma comparação entre os métodos de controle *fuzzy* quando acrescido do PID aplicado na VRP 2;

– o Capítulo 5, por sua vez, sintetiza os resultados obtidos, abrindo espaço para propor discussões do presente estudo, e também apresenta as recomendações do Autor para implementações futuras utilizando a metodologia proposta;

– o Capítulo 6, por fim, apresenta as conclusões do estudo e as recomendações do Autor para futuros trabalhos utilizando a metodologia proposta.

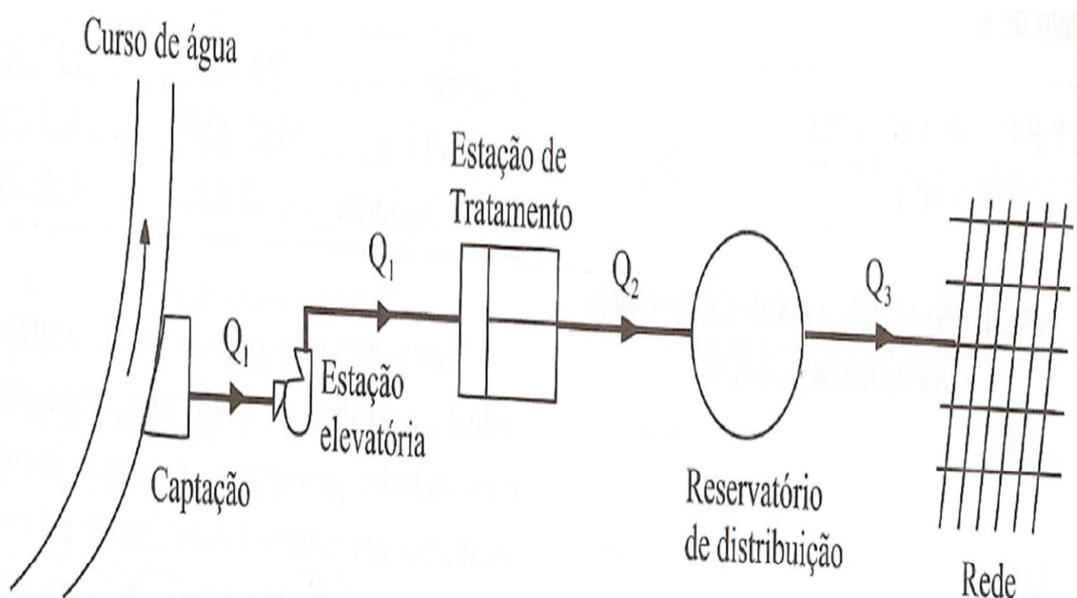
## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 Sistema de Abastecimento

Um Sistema de Abastecimento de Água, como mostrado na Figura 2.1, inicia-se pela captação<sup>5</sup> da água bruta do meio ambiente, depois há um tratamento apropriado para torná-la potável e, por último, há a distribuição até os consumidores, em quantidade satisfatória para suprir suas necessidades de consumo. (ADASA, 2016).

Esse sistema pode ser dimensionado para pequenas populações ou para grandes metrópoles, dependendo da necessidade da localidade. (ADASA, 2016).



**Figura 2.1** – Partes constituintes de um sistema de abastecimento de água.  
Fonte: Tsutiya (2004).

O Sistema de Abastecimento de Água está relacionado com o conjunto de obras, equipamentos e serviços destinados ao abastecimento de água potável de

<sup>5</sup> “Conjunto de equipamentos e instalações utilizado para a retirada de água do manancial. Compreende a primeira unidade do sistema de abastecimento, que se classifica em: superficial, subterrânea, poço profundo e poço raso.” (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2016).

uma comunidade para fins de consumo doméstico, serviços públicos, consumo industrial e outros usos, como pode ser visto na Figura 2.1. Tal sistema

[...] é composto por várias etapas até que a água chegue às torneiras dos consumidores. As etapas estão dispostas a seguir: 1) **Captação**: a água bruta é captada em mananciais superficiais (barragens, lagos) ou subterrâneos (poços); 2) **Adução**<sup>6</sup>: a água captada nos mananciais é bombeada até as ETAs (Estações de Tratamento de Água) para que possa ter tratamento adequado; 3) **Tratamento**: através de uma série de processos químicos e físicos, a água bruta é tornada potável para que possa ser distribuída à população; 4) **Reservação**<sup>7</sup>: depois de tratada, a água é bombeada até reservatórios para que fique à disposição da rede distribuidora; 5) **Distribuição**: a parte final do sistema, onde a água é efetivamente entregue ao consumidor, pronta para ser consumida. (ADASA, 2016, grifo nosso).

De acordo com Azevedo Neto e Alvarez (1977), um sistema composto de captação pode ser de água de superfície ou subterrânea, adução de água bruta e tratada, tratamento com Estação de Tratamento<sup>8</sup> de Água (ETA).

### 2.1.1 Captação

A captação consiste no conjunto de equipamentos e instalações usados para a retirada de água do manancial, independentemente do tipo de manancial, alguns cuidados são universais. Vale ressaltar, também, que a captação deve estar, inicialmente, em um ponto em que, mesmo nos períodos de maior estiagem, ainda seja possível a retirada de água em quantidade e qualidade satisfatórias (GOVERNO DO PARANÁ, 2016).

O Ministério da saúde (2016) infere que existem 4 tipos de captação:

1 – *Captação Superficial*: captação de água de diferentes cursos de água, como rio, córrego, ribeirão, lago, lagoa, açude, represa etc., que têm o espelho de água na superfície do terreno.

2 – *Captação Subterrânea*: basicamente faz uso de aquíferos confinados e não confinados, denominados, respectivamente, *artesianos* e *freáticos*.

<sup>6</sup> Adução é o “transporte de água do manancial ao tratamento ou da água tratada ao sistema de distribuição.” (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2016).

<sup>7</sup> Reservação é o “armazenamento da água entre o tratamento e o consumo com os objetivos de: suprir as variações horárias de consumo, garantir a adequada pressurização do sistema de distribuição e garantir reservas de emergência a enfermidade crônica resultante.” (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2016).

3 – *Captação de Poço Profundo*: captação de água de lençóis situados entre as camadas impermeáveis.

4 – *Captação de Poço Raso*: captação de água de lençol freático, ou seja, de água que se encontra acima da primeira camada impermeável do solo.

## **2.2 Adução de Água Tratada**

A canalização destinada a conduzir água do manancial até o(s) reservatório(s) que antecede(m) a rede de distribuição é denominada de *adutora*. Quando o sistema não tem reservação, como é o caso de poço que injeta direto na rede de distribuição, a adutora deve ser considerada da saída do poço até à interligação com a rede de distribuição.

## **2.3 Reservatórios**

Entendem-se como reservatórios as unidades destinadas a armazenar água bombeada do manancial, de forma a manter as pressões na rede de distribuição sempre constantes e a compensar as variações de consumo durante os horários de maior demanda de água.

A definição de sistemas construídos sem reservatórios de distribuição é compatível com as características de cada local. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas, na NBR 12211:1992, a concepção mais adequada é a que apresente a “melhor solução sob os pontos de vista técnico, econômico, financeiro e social.” (ABNT, 1992).

Os reservatórios são, em geral, a parte do sistema onde se aplicam boa parte dos recursos financeiros, por se tratar de uma estrutura de concreto armado.

Os valores gastos nesse tipo de edificação correspondem a uma faixa de 20% (vinte por cento) a 40% (quarenta por cento) dos gastos com a implantação do sistema de abastecimento de água, segundo dados extraídos nos orçamentos no setor de projetos da Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN) entre os anos de 2005 e 2008.

## 2.4 Setor de Rede de Distribuição

Entende-se como rede de distribuição a unidade do sistema encarregada de distribuir a água tratada, produzida nas estações de tratamento, para todos os pontos de consumo (prédios, indústrias, etc.).

Conforme Azevedo Neto e Alvarez (1977), a rede de distribuição é constituída por um conjunto de tubulações e peças especiais, dispostas convenientemente, a fim de garantir o abastecimento das unidades, com diâmetros variados, podendo ser classificada em *condutos principais* e *condutos secundários*. Os condutos principais são os de maiores diâmetros, responsáveis pela alimentação dos condutos secundários. Os secundários, por sua vez, alimentam os ramais dos prédios atendidos pelo sistema.

Nesse sentido, destaca-se que a unidade mínima de uma rede de distribuição é um setor. Ele é construído para ser atendido por águas oriundas de reservatórios de distribuição. Esses setores podem ser classificados por zona de pressão em *zona de baixa pressão* ou *zona de alta pressão*.

Os setores de alta pressão não apresentam problemas de abastecimento, pois sua topografia apresenta-se como uma zona baixa, o que deixa a pressão sempre positiva. Contudo, nos setores de baixa pressão, é muito comum haver problemas de abastecimento em virtude da falta de pressão, principalmente durante os horários de maior demanda de água, seja devido à superação dos dimensionamentos dos projetos, seja devido ao crescimento de novas áreas, o que normalmente requer a instalação de bombas elevadoras de pressão (*boosters*) na rede, ou até a interligação de setores vizinhos para solucionar o problema do desabastecimento de determinados locais dentro do setor.

Nesse prisma, vale destacar que uma nova metodologia foi desenvolvida por Lansey e Mays (1989):

[...] para determinar a concepção de sistemas de distribuição de água ideal (*custo mínimo*). Os componentes que podem ser dimensionados são as tubulações da rede de distribuição, as bombas, ou a estação de bombeamento, e os reservatórios. Além disso, as configurações ótimas para controle e válvulas redutoras de pressão podem ser determinadas. Essa metodologia combina técnicas de programação não lineares com modelos de simulação de distribuição de água existentes. Metodologias anteriores têm tipicamente simplificado a hidráulica do sistema de forma que ela seja capaz de resolver o problema de otimização. Essa nova metodologia retém a generalidade do modelo de simulação hidráulica para que o problema seja limitado apenas pela capacidade do modelo de simulação em vez do modelo de otimização. A metodologia utiliza um modelo de gradiente

reduzido generalizado para resolver um problema que é reduzido em tamanho e complexidade, resolvendo implicitamente a conservação das equações de massa e energia utilizando o simulador hidráulico e uma abordagem lagrangiana expandida para incorporar limites de pressão na função objetivo. Uma vez que as equações de rede são resolvidas implicitamente, qualquer número de padrões de demanda pode ser considerado, incluindo cargas de estado estacionário, simulações de período estendido, ou ambos. (LANSEY; MAYS, 1989, tradução nossa).

#### **2.4.1 Operação de sistemas com mudança de *layout***

Um sistema de distribuição de água é constituído por complexas partes que envolvem vários fatores que inter-relacionam e requerem cuidados especiais em sua operação.

A falta de pressão em determinados trechos da rede de distribuição está relacionada com a topografia do terreno, porque, em locais com elevações de níveis acentuados do terreno, é comum apresentar-se a diminuição da pressão nos horários de maior demanda. No entanto, há outras situações opostas à falta da pressão, como é o caso dos locais que apresentam uma topografia com baixos níveis. Nesses locais, ocorre o excesso de pressão na rede. Assim, essas áreas de sobrepressão são suscetíveis ao surgimento de vazamentos nas redes, o que leva a se contabilizarem grandes desperdícios de água e dos insumos que acompanham a sua produção.

Nas duas condições citadas, há uma influência negativa na operação de sistemas porque a população sofre com o desabastecimento de água, seja pela falta de pressão nos ramais — o que leva a não encher seus reservatórios domiciliares —, seja pela descontinuidade no abastecimento provocado pelas interrupções para manutenção da rede. Outro fator muito importante a ser destacado sobre essa operação relaciona o uso da energia de pressão, pois existe a possibilidade de aproveitamento desse excedente de pressão da parte baixa da rede para ser utilizada nas zonas altas onde as pressões são normalmente baixas.

Portanto, a operação de sistemas que apresentem essas duas características topográficas requer uma atenção especial por parte dos gestores e operadores do sistema para tentar minimizar seus efeitos negativos. De modo geral, os sistemas de abastecimento são construídos com a seguinte topologia: um manancial para captação da água bruta, estação elevatória de água bruta, a Estação de Tratamento

de Água (ETA), elevação de água tratada, o armazenamento em reservatórios e, finalmente, a distribuição da água nas redes de distribuição.

Esse *layout* contempla a grande maioria dos sistemas de abastecimento de água existentes no país. Contudo, algumas mudanças são necessárias em função de peculiaridades, como, por exemplo, a retirada dos reservatórios para o armazenamento, por questões econômicas na construção dos sistemas. Portanto, a retirada dos reservatórios de armazenamento gera uma economia financeira no ato de sua construção, como já foi dito, podendo, em alguns casos, economizar até 40% (quarenta por cento) do valor final da obra. A operação desses sistemas, porém, se torna complexa, porque ele irá receber a água a ser distribuída diretamente da estação elevatória, passando a ter o bombeamento diretamente na rede de distribuição, como é conhecido. Esse bombeamento dificulta, em muito, a operação do sistema, uma vez que a demanda de água não apresenta comportamento constante, pois, em alguns horários do dia, tem-se variação do consumo, o que implica variação na pressão. Logo, maiores consumos apresentam menores pressões, e, vice-versa, a diminuição do consumo gera elevadas pressões.

A consequência nessa variação da demanda de água, que provoca o aumento da pressão na rede, traz, como consequência, o desgaste prematuro das peças e tubulações da rede, diminuindo a vida útil dela. Então, para se operar sistema que faz esse bombeamento diretamente na rede, é necessário um controle mais eficaz da pressão a fim de minimizar os efeitos nocivos. Logo, a forma encontrada para manter o controle da pressão nesses sistemas passa pela redução da vazão bombeada para a rede.

Entre as maneiras para reduzir a vazão aduzida para a rede, têm-se: o fechamento de válvulas nas saídas das bombas, a derivação de tubulação principal levando água para outro setor, ou a instalação de inversores de frequência nos conjuntos motor-bomba.

O fechamento das válvulas nas saídas das bombas é uma prática de controle muito utilizada, pois é a mais fácil de ser executada, haja vista que os sistemas são construídos com esses registros nas tubulações de recalque.

É importante ressaltar ainda que essa alternativa cria uma perda de carga localizada e que, por isso, não é a mais viável economicamente, pois ela provoca grandes desperdícios de energia elétrica na sua operação com a perda de carga e

também por que ela requer a presença de um operador para monitorar constantemente a pressão para fazer o fechamento do registro.

A segunda alternativa sugerida para o controle da pressão passa pela derivação da vazão bombeada para outro setor, ou retornando para o tanque de reunião que alimenta a própria bomba. Essa alternativa, apesar de não criar uma perda de carga localizada como na anterior, e, assim, não gerar grandes desperdícios de energia elétrica, traz consigo algumas implicações, como o fato de ser necessária a presença de um operador para o monitoramento da pressão no setor.

Já a solução de retornar com o excedente de água da rede para o tanque de reunião que alimenta a bomba não é a mais eficaz, porque soluciona o problema da sobrepressão da rede, porém a recirculação da água implica um gasto de energia desnecessário com a água que já havia sido bombeada e retornou ao tanque.

A outra maneira de controle da pressão passa pela implantação de inversores de frequência no acionamento dos conjuntos motor-bomba. Ela se apresenta como sendo a melhor alternativa para o controle da pressão na rede de distribuição, haja vista não necessitar da presença de operadores para executar o controle da pressão. Outrossim, não perde energia como nas anteriores, pois, ao contrário, nesta é a velocidade da bomba que é reduzida em função da pressão da rede. Com a redução na velocidade, a vazão também varia. Logo, essa vazão ficará ajustada para a demanda de água necessária para atender o setor.

#### **2.4.2 Automação e controle em sistemas**

De acordo com Nise (2002), por volta de 300 a.C. os gregos começaram a engenharia de controle de sistemas com retroação com a invenção de um relógio de água. Essa invenção, atribuída a Ktesíbios, tinha um relógio que era operado por meio do gotejamento de água, a uma taxa constante, dentro de um reservatório medidor.

Para se obter o gotejamento constante, era necessário que o nível no reservatório que alimentava o sistema fosse constante também. O nível só foi mantido porque se usou uma boia, semelhante à do controle de nível das caixas de descargas dos vasos sanitários atuais.

Por volta de 1681, começou a regulação de pressão de vapor com a invenção da válvula de segurança pelo físico francês Denis Papin (1647-1712). Também no século XVII, Cornelius Drebbel (1572-1633), na Holanda, inventou um sistema de controle de temperatura exclusivamente mecânico para chocar ovos. Já em 1745, o controle de velocidade era aplicado a um moinho de vento pelo inventor britânico Edmund Lee. Ainda no século XVIII, o engenheiro e matemático escocês James Watt (1736-1819) inventou o regulador de velocidade de esferas para controlar a velocidade de máquinas a vapor.

Ainda segundo Nise (2002), o desenvolvimento de grande parte da teoria geral de controle usada nos dias de hoje para melhorar o desempenho de sistemas de controle automático é atribuído ao engenheiro russo Nicholai Minorsky (1885-1970). Foi o desenvolvimento teórico aplicado por ele na pilotagem automática de embarcações que resultou no que hoje chamamos de *controle proporcional, integral e derivativo* (PID).

No final dos anos 1920 e começo dos anos 1930, os norte-americanos Hendrik W. Bode (1905-1982) e Harry Nyquist (1889-1986) desenvolveram nos laboratórios da *Bell Telephone* a análise de amplificadores com retroação. Essa contribuição evoluiu para as técnicas de análise e projeto no domínio de frequência senoidal usadas atualmente para sistemas de controle com retroação.

De acordo com Ogata (2010), durante a década de 1940, métodos de resposta em frequência (especialmente os métodos com base nos diagramas de Bode) tornaram possível aos engenheiros projetar sistemas de controle linear de malha fechada que satisfizessem o desempenho requerido. Muitos sistemas de controle industrial das décadas de 1940 e 1950 usavam controladores PID no controle de pressão. Ainda segundo Ogata (2010), foi entre 1960 e 1980 que se modernizou o controle para sistemas complexos, passando a desenvolver o controle dos sistemas determinísticos e estocásticos, bem como o controle adaptativo e de aprendizagem. Foi a partir desse período que surgiu o controle inteligente.

De acordo com Simões e Shaw (2007), a inteligência artificial é uma disciplina que estuda como as pessoas resolvem problemas e como as máquinas podem emular esse comportamento humano de resolução de problemas. Em outras palavras, como fazer com que as máquinas sejam mais atribuídas de características da inteligência humana.

### 2.4.3 Sistema de controle robusto (PID)

Os controladores robustos podem ser classificados de duas formas distintas: de malha aberta e de malha fechada. Assim, sistemas de controle de malha aberta são aqueles cujo sinal de saída não retorna para a entrada, influenciando na ação do controle do sistema. Logo, o sinal de saída não será utilizado para ser comparado com o sinal de referência (*set point*). Já nos sistemas de malha fechada, também denominados *sistemas de controle com realimentação*, o sinal de saída é utilizado para realimentar a entrada do controlador e influencia diretamente na ação de controle do sistema. Ele é utilizado para ser comparado com a referência com o objetivo de diminuir o erro atuante entre o *set point* e o sinal de saída.

De acordo com Ogata (2010), a vantagem dos sistemas de controle de malha fechada é o fato de que o uso da realimentação faz com que a resposta do sistema seja relativamente insensível a distúrbios externos e a variações internas nos parâmetros do sistema. Do ponto de vista de estabilidade, o controle em malha aberta é mais fácil de construir devido ao fato de a estabilidade ser um problema menos significativo. Por outro lado, nos sistemas em malha fechada, a estabilidade é um problema importante, pois podem apresentar uma tendência de correção de erros além do necessário, causando oscilações de amplitudes constantes ou variáveis. Dessa forma, os controladores robustos proporcional-integral-derivativos (PIDs) são bastante utilizados para sistemas que apresentem linearidade.

### 2.4.4 Sistema de controle *fuzzy*

Em 1965, o professor Lotfi Askar-Zadeh (n. 1921), da Universidade Berkeley, na Califórnia, considerado um grande colaborador do controle moderno, criou uma teoria de conjuntos, publicada em seu trabalho *Fuzzy Sets* (ZADEH, 1965), em que não há descontinuidades, ou seja, não há uma distinção abrupta entre elementos pertencentes e não pertencentes a um conjunto — são os *conjuntos nebulosos*.

Começava, então, a se desenvolver a Teoria *Fuzzy* (Teoria Nebulosa) para tratar de variáveis imprecisas, ou definidas de forma vaga. Zadeh percebeu que a modelagem de muitas atividades relacionadas a problemas industriais, biológicos ou químicos seriam complexas demais se implementadas da forma convencional.

Segundo Kosko (1993), Zadeh é personalidade marcante na ciência e tecnologia da nossa época. Seus trabalhos têm impacto em muitas áreas científicas,

com uma forte influência nas áreas de controle e tomada de decisão.

Vale ressaltar ainda que os sistemas *fuzzy* foram utilizados, com sucesso, em algumas aplicações que se tornaram exemplos clássicos. Destaca-se a primeira aplicação com o professor Ebrahim H. Mamdani (1975), que implementou o controle de uma máquina a vapor, baseado em lógica *fuzzy*. Até então, não se tinha conseguido automatizar essas máquinas com outras técnicas de controle, nem mesmo com algoritmo PID.

Com o tempo, outras aplicações foram surgindo no Oriente, onde a cultura fez com que os conceitos da lógica nebulosa fossem aceitos com maior facilidade do que no mundo ocidental e se investiu muito em soluções baseadas em modelagem e controle *fuzzy*.

Segundo Pinto (2002), a lógica *fuzzy* é uma poderosa ferramenta que obtém soluções viáveis para problemas de difícil tratamento por técnicas convencionais, pois tem a capacidade de efetuar a análise de sistemas de extrema complexidade, cuja modelagem por ferramentas convencionais se mostra extremamente difícil, ou até impossível.

Em um estudo sobre abordagem de lógica *fuzzy* para a seleção de válvulas hidráulicas de controle direcional na fase de concepção preliminar, Osmana et al. (2003), constataram que a seleção inapropriada e o dimensionamento de válvulas de controle hidráulico na fase de concepção preliminar podem causar muitos problemas técnicos. As válvulas de controle hidráulico variam de acordo com a complexidade de sua função.

As raízes do dilema de seleção de válvulas encontram-se na sua extraordinária variedade de modelos e suas funções multidisciplinares necessárias na seleção adequada para aplicações de controle. Devido à falta de informações completas do sistema, o que gera incerteza e imprecisão na escolha de uma válvula, apresenta-se, neste trabalho, uma técnica para executar cálculos em variáveis imprecisas de parâmetros. (OSMANA et al., 2003).

Essa técnica é baseada na lógica *fuzzy* usando conjuntos *fuzzy*, como alternativa às válvulas hidráulicas de controle direcional são expressas em termos de ordens de magnitude do *fuzzy*. Cálculos baseados em média ponderada do *fuzzy* são realizados para produzir as classificações entre alternativas do projeto. As

funções de pertinência para a avaliação das alternativas são apresentadas para comparação. (OSMANA et al., 2003).

Essa técnica é, portanto, capaz de absorver informações vagas, normalmente descritas em uma linguagem natural, e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação computacional, procurando modelar o modo impreciso do raciocínio humano e auxiliar na habilidade humana de tomar decisões.

Em pesquisa realizada por Camboim, Silva e Gomes, evidenciou-se “o desenvolvimento de um sistema *Fuzzy* para o controle de pressão de redes de distribuição de água, por meio da utilização de conversores de frequência acoplados aos conjuntos motor-bomba.” (CAMBOIM; SILVA; GOMES, 2014, p. 67). Esse estudo foi inteiramente “desenvolvido em uma bancada experimental instrumentalizada, simulando um sistema de abastecimento real.” (Ibidem, loc. cit.).

Rodrigues (2007) afirma que conversores de frequência incrementados aos sistemas de bombeamento com a função de manter a operação em níveis necessários ao pleno atendimento das demandas podem evitar desperdícios de água e energia elétrica ao proporcionar um melhor controle operacional.

Ainda segundo o estudo de Camboim, Silva e Gomes:

A utilização de conjuntos motor-bomba em paralelo gerou ao sistema um grande número de possibilidades de combinação das variações de velocidade dos conjuntos motor-bomba, com velocidades de rotação diferentes. O controlador *Fuzzy* identifica a melhor opção, referente ao consumo energético do sistema, e toma a decisão alusiva ao estado dos motores (ligado, desligado ou com rotação parcial). Todo esse processo é realizado na condição de atender a demanda de vazão do sistema, além de manter a pressão constante com o menor consumo energético possível. (CAMBOIM; SILVA; GOMES, 2014, p. 67).

Guangtao Fu e Koran Kapelan (2011) realizaram

[...] uma abordagem probabilística *fuzzy* para o projeto ideal e reabilitação de sistemas de distribuição de água, combinando incertezas aleatórias e epistêmicas numa estrutura unificada. A aleatoriedade e a imprecisão no consumo de água futuro são caracterizadas utilizando variáveis aleatórias difusas cujas realizações não são números reais, mas difusos, e os requisitos de cabeça nodais são representados por conjuntos *fuzzy*, refletindo a imprecisão nas necessidades dos clientes. O projeto ideal é formulado como um problema de otimização de dois objetivos, a minimização do custo total do projeto e a maximização do desempenho do sistema. O desempenho do sistema é medido pela confiabilidade aleatória nebulosa, definida como a probabilidade de que os requisitos da cabeça difusa sejam satisfeitos em todos os nós da rede. O grau de satisfação é representado pela medida de necessidade ou pela medida de credibilidade no sentido da teoria da evidência de Dempster-Shafer. Um algoritmo eficiente é proposto, dentro de um procedimento de Monte Carlo, para calcular a confiabilidade do sistema aleatório difuso, e é efetivamente

combinado com o algoritmo genético de ordenação não dominante II (NSGA-II) para derivar as ótimas soluções de projeto de Pareto. A metodologia recentemente proposta é demonstrada com dois estudos de caso: a rede de túneis de Nova Iorque e a rede de Hanoi. Os resultados de ambos os casos indicam que a nova metodologia pode efetivamente acomodar e lidar com várias fontes de incerteza aleatórias e epistêmicas decorrentes do processo de projeto e podem fornecer soluções de projeto ideais que não são apenas rentáveis, mas também têm maior confiabilidade para lidar com graves incertezas futuras. (FU; KAPELAN, 2011, tradução nossa).

Bezerra, Silva e Gomes (2012) constataram, em um estudo sobre otimização operacional numa rede de abastecimento de água, que um sistema difuso para controlar a pressão na rede de distribuição de água, utilizando válvulas de controle e a velocidade do rotor dos sistemas de bombagem, se mostrou eficiente. O conversor de frequência foi usado para controlar a velocidade mínima do sistema de bombagem, enquanto que as válvulas de controle têm a função de eliminar o excesso de pressão em vários pontos da rede. O sistema de controle pode controlar qualquer valor de pressão de referência, e não existe limite para o número de pontos monitorados.

Segundo os supracitados autores:

Experimentos foram realizados para demonstrar a eficiência do sistema *fuzzy*. Por meio de extrapolação dos resultados alcançados na montagem experimental a uma rede hidráulica real com vazamentos e sem nenhum controle de pressão, as perdas volumétricas poderiam ser reduzidas em mais de 56%. Os experimentos mostraram que o sistema é suficientemente robusto para controlar a pressão de uma montagem experimental de distribuição de água. Além disso, o sistema proposto pode ser facilmente aplicado a sistemas de abastecimento de água semelhantes e ajudaria a reduzir o consumo de água e de energia elétrica, assim como os custos de manutenção. (BEZERRA; SILVA; GOMES, 2012, tradução nossa).

Bezerra et al. (2015) constataram “a influência do uso de inversores de frequência no consumo energético de sistemas de bombeamentos e o desempenho de um sistema de controle para atuar nesses equipamentos.” A pesquisa desses autores “indica que a adoção de inversores reduz o consumo de energia em determinadas aplicações, reduz a pressão nas redes hidráulicas e melhora a eficiência da bomba.”

Em seu trabalho, Bezerra et al. (2015) apresentam o “desenvolvimento e aplicação de um sistema de controle *Fuzzy* para conjuntos motor-bomba operando com velocidade de rotação variável” com o objetivo de “demonstrar a economia de energia resultado da adoção do inversor de frequência PWM em um sistema experimental.” Esses autores buscaram utilizar tal sistema “para condições de

operação que estão fora do domínio do controle tradicional”, quando o sistema de controle *fuzzy* pode proporcionar maior retorno. Segundo eles:

O controlador é responsável pela manutenção da altura manométrica da bomba em um valor ótimo, eliminando qualquer excesso de pressão no ponto crítico da rede de distribuição de água. Os resultados das experiências mostraram que o sistema *Fuzzy* foi eficiente e o controle de velocidade de rotação resultou numa redução de 35% no consumo de eletricidade. (BEZERRA et al., 2015, p. 71).

Celleste, Billib e Curi (2010) realizaram estudo em que descrevem:

[...] a aplicação de um modelo de otimização estocástica implícita combinado com uma abordagem adaptativa neurofuzzy para o desenvolvimento de regras mensais de operação de um reservatório no semiárido paraibano. A operação do sistema através das regras construídas obtém melhor desempenho do que as conduzidas por programação dinâmica estocástica e simulação padrão além de ser semelhante aos resultados operacionais de um modelo de otimização determinística sob previsão perfeita. (CELLESTE; BILLIB; CURI, 2010, p. 1).

Destaque-se ainda que o sistema *fuzzy* não requer um profundo conhecimento matemático, mas o projetista necessita ter uma grande compreensão das incertezas e imprecisões dos processos nas plantas, abordando as características de manuseio de informações imprecisas de forma muito distinta da teoria da probabilidade.

Assim, essa lógica prevê um método de tradução das expressões verbais vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana, em valores numéricos. Tal técnica incorpora a forma humana de pensar em um sistema de controle. Ela pode ser projetada para comportar-se como o raciocínio dedutivo, ou seja, inferir conclusões baseadas em informações já conhecidas.

De acordo com Simões e Shaw (2007), Inteligência Artificial é uma disciplina que estuda como as pessoas resolvem problemas e como as máquinas podem emular esse comportamento humano de solução de problemas. Em outras palavras, como fazer com que as máquinas sejam mais atribuídas de características da inteligência humana. Assim, um projeto de um controlador *fuzzy* possui as seguintes etapas típicas: fuzzyficação, inferência, defuzzyficação.

A fuzzyficação é a primeira etapa do tratamento *fuzzy*. É através dela que se efetua a transformação das variáveis encontradas na forma determinística ou *crisp* (número) em forma *fuzzy* (pertinência). Nessa etapa, segundo Simões e Shaw (2007), a interface de fuzzyficação usa funções de pertinência contidas na base de conhecimento, convertendo os sinais de entrada em um intervalo  $[0,1]$  que pode ser

associado a rótulos linguísticos.

Em um raciocínio *fuzzy*, o conhecimento é representado a partir de regras ou proposições (memória associativa *fuzzy*), as quais são declarações que relacionam as variáveis do modelo com os conjuntos *fuzzy*, ou seja, relacionam os antecedentes com os consequentes.

No caso de um sistema de controle, essas regras podem relacionar o estado atual do processo com a ação de controle adequada para levá-lo ao estado desejado. Já para um sistema de decisão, previsão ou diagnóstico, essas regras conduzem à conclusão.

As regras, juntamente com a base de dados, fazem parte da base de conhecimento. Este será utilizado para definir as estratégias de controle e suas metas. No caso de modelos com somente regras condicionais ou incondicionais, a ordem é irrelevante. Se o modelo contém ambos os tipos de regras, a ordem é importante.

As regras incondicionais devem ser executadas antes e são geralmente usadas como “*default*”, isto é, se nenhuma regra condicional for executada, então o valor da solução será determinado pela regra incondicional.

Ressalte-se que, se nenhuma regra condicional possuir um antecedente com força maior que a interseção máxima das regras incondicionais, as regras condicionais não contribuirão para a solução do modelo.

As seguintes propriedades são desejáveis para as regras:

- ✓ Qualquer combinação das variáveis de entrada deve ativar, pelo menos, uma regra;
- ✓ Duas ou mais regras com as mesmas entradas devem ter saídas mutuamente exclusivas; caso contrário, as regras são inconsistentes;
- ✓ Não deverão existir regras vizinhas com saídas cujas funções de pertinência não apresentem interseção.

A segunda etapa do projeto do controlador *fuzzy* consiste na inferência *fuzzy*, que resulta no procedimento de avaliação das regras que relacionam as variáveis e que levam à conclusão final do sistema.

O raciocínio é, então, efetuado por meio da inferência, que permite tirar conclusões (deduzir, concluir) partindo de fatos conhecidos, e as variáveis linguísticas, de entrada e saída, representam o conhecimento em inferência *fuzzy*.

Essa inferência possui, pois, duas fases distintas, a avaliação da implicação de cada regra e a composição das conclusões de todas as regras em um valor consolidado. Existem muitos procedimentos de inferência na lógica *fuzzy*, os mais utilizados dos quais, segundo Mendel (2001), são o Mamdani e o Takagi-Sugeno.

A defuzzyficação é, nessa perspectiva, a última etapa do tratamento *fuzzy*. Nessa etapa, ocorre a transformação das variáveis que se encontram na forma fuzzyficada para a forma determinística, gerando valores reais das saídas.

Para Simões e Shaw (2007), os principais métodos para efetuar a defuzzyficação são: o Centro de Área (Centroide), o Centro do Máximo, a Média do Máximo e a Média Ponderada.

Tendo em vista que a lógica *fuzzy* vem sendo estudada e aperfeiçoada desde a sua criação, a seguir serão apresentadas algumas características, vantagens e eventuais desvantagens da utilização dessa ferramenta. Entre as características, pode-se salientar que a Lógica Nebulosa (SIMÕES; SHAW, 2007):

- ✓ Está baseada em palavras, e não em números, ou seja, os valores verdadeiros são expressos linguisticamente (quente, muito frio, verdade, longe, perto, rápido, vagaroso, médio);
- ✓ Possui vários modificadores de predicado (muito, mais ou menos, pouco, bastante, médio);
- ✓ Possui um amplo conjunto de quantificadores (poucos, vários, em torno de, usualmente);
- ✓ Faz uso das probabilidades linguísticas (como, por exemplo, provável e improvável) que são interpretadas como números nebulosos;
- ✓ Manuseia todos os valores entre 0 e 1, tomando-os apenas como um limite.

A lógica nebulosa apresenta uma série de vantagens, entre as quais se citam:

- ✓ Possibilidade de captura do pensamento humano a partir da utilização de variáveis linguísticas;
- ✓ Necessidade de poucas regras, valores e decisões;
- ✓ Simplicidade de solução de problemas e de aquisição da base do conhecimento;

✓ Probabilidade de avaliar variáveis advindas de simples observações, tendo em vista que a Lógica Nebulosa pode absorver o conhecimento de especialistas.

Adicionalmente, sistemas baseados em lógica *fuzzy* são mais fáceis de entender, manter e testar, são robustos e operam com falta de regras ou com regras defeituosas. A utilização dessa lógica proporciona um rápido protótipo dos sistemas. Já as desvantagens existentes na utilização da Lógica Nebulosa são poucas e, entre elas, podemos destacar que a especificação das funções de pertinência é trabalhosa. Por isso, há a necessidade de muita simulação/teste para o ajuste fino dessas funções.

Outra desvantagem é a grande dificuldade do estabelecimento de regras consistentes, pois, para tal, há a necessidade da captura do conhecimento de um especialista e/ou de dados históricos.

## **2.5 Estado da Arte**

A maior parte dos profissionais e pesquisadores se preocupa em analisar o comportamento real das redes de distribuição de água. O número de variáveis envolvidas no processo somado com o comportamento não linear do fluxo no interior das tubulações torna a operação dessas redes bastante complexa.

As equipes de planejamento e de operação das atuais empresas de saneamento do Brasil, na sua grande maioria, dependem da experiência dos profissionais que, ao longo dos anos, definem regras operacionais (fixas ou variáveis) do sistema que, normalmente, são concebidas com base em informações de campo que proporcionaram melhores resultados ou menores erros.

A utilização de inversores de frequência para a redução do consumo energético em sistemas elevatórios tem sido cada vez mais pesquisada nas últimas décadas e, diante das inovações tecnológicas, é mais viável economicamente.

Segundo Tsutiya (2006), as bombas centrífugas que operam com inversor de frequência possibilitam o controle da vazão ou pressão com a modulação da velocidade do motor, além de diminuir o pico de corrente no acionamento, podem controlar também a vazão ou pressão na rede de distribuição e nos reservatórios de distribuição.

A semelhança do trabalho de Tsutiya (2006) com o apresentado nesta pesquisa está no uso de inversores de frequência para o acionamento de *boosters*. Em ambos os trabalhos, os resultados no aspecto da economia de energia elétrica e no controle da pressão da rede são bastante satisfatórios, sendo que as bancadas experimentais são diferentes em tamanho e nível de complexidade.

Antônio Sérgio Spolaor (2011) desenvolveu um sistema de controle para atuar na automação da distribuição de água entre reservatórios de forma a otimizar o atendimento das demandas diárias. Essa metodologia foi aplicada em um sistema real do Estado de São Paulo, pertencente à SABESP, na cidade de Santa Rosa de Viterbo, com programação em SCADA/CLPs. Esse sistema “contribuiu para uma melhoria significativa do sistema de armazenamento e distribuição.” (SPOLAOR, 2011, p. viii). Pode-se concluir, então, que o sistema de controle pode atuar não apenas no inversor de frequência, mas em todos os elementos que, de alguma forma, podem melhorar a operação, como, por exemplo, as válvulas redutoras de pressão (VRPs) e as válvulas para modificar o fluxo no interior da rede de distribuição.

Por sua vez, Creaco e Franchini (2013) desenvolveram um algoritmo para controlar as válvulas instaladas nas redes de distribuição, em tempo real, de forma a controlar a pressão nos diversos pontos do sistema. Esse trabalho foi aplicado em uma rede real que possuía uma válvula de controle na tubulação de saída do reservatório. Os resultados mostraram um excelente desempenho na regulação da pressão e uma redução nos vazamentos dentro de várias condições operacionais.

Nesta pesquisa, foram utilizadas válvulas no auxílio ao controle da pressão na entrada de cada setor. Essa aplicação tem em comum com a citada por Creaco e Franchini (2013) apenas o fato de que as válvulas atuaram controlando a pressão a jusante de sua instalação. O que difere entre as pesquisas é o fato de que, neste trabalho, a água que era distribuída pela rede é oriunda de um bombeamento onde há o gasto com energia elétrica, enquanto que, no controle de Creaco e Franchini (2013), a água era distribuída a partir de reservatórios, e não havia gasto diretamente de energia elétrica. Logo, os resultados possíveis de comparação são apenas hidráulicos.

Destaque-se ainda que Kang (2014) desenvolveu um controlador, em tempo real, para sistemas de distribuição de água. O controle é realizado através do

*software* SCADA, que tem a função de acionar as bombas conforme a demanda que, além da melhor combinação de funcionamento das bombas, leva em consideração o controle da pressão da rede, o melhor desempenho do reservatório e a regulação de válvulas para melhor ajuste do ponto de operação dos sistemas elevatórios.

Nesta pesquisa, foi desenvolvido um sistema supervisório capaz de monitorar, operar e controlar a pressão na rede. Em comum ao trabalho realizado por Kang (2014), as ações desenvolvidas pelo supervisório são feitas em tempo real e buscam controlar a pressão na rede, mas, para isso, fez uso da aplicação de uma técnica de controle inteligente que tinha a lógica *fuzzy* à frente das decisões de controle.

Nesta perspectiva, a lógica *fuzzy* tem sido utilizada em diversos trabalhos voltados para a eficiência hidroenergética em sistemas de distribuição de água. (CAMBOIM, 2008; BEZERRA; SILVA; GOMES, 2012; CARVALHO, 2012). Na metodologia desses trabalhos, foi possível incorporar as regras operacionais, ou seja, a experiência em campo para que o algoritmo escolha o melhor cenário de operação sem a intervenção do operador.

Já Camboim (2008) desenvolveu um sistema de controle da pressão para uma bancada experimental que simula um sistema de abastecimento de água. Os resultados referentes ao controle foram satisfatórios, pois a pressão se manteve constante, mesmo ao induzir perturbações no sistema. Quanto ao benefício energético, houve redução do consumo de energia elétrica de 27,4%.

A pesquisa de Camboim (2008) se assemelha com a presente pesquisa apenas na utilização da técnica de controle *fuzzy* para controlar a pressão na rede. Contudo, no desenvolvimento do seu trabalho, ele não utilizou uma rede setorizada e fez uso de apenas uma válvula reguladora de pressão. Com essa diferença no *layout*, não é possível comparar o ganho energético do sistema.

E Bezerra (2009) apresentou um sistema de controle *fuzzy* para atuar na pressão de serviço de uma rede de distribuição de água dividida em dois setores. A bancada experimental era composta de válvulas, uma das quais foi utilizada apenas com a função de variar o consumo, enquanto outra teve a função de controlar a pressão no setor 1. A bancada tinha um inversor de frequência que atuava no controle da velocidade de rotação do sistema de bombeamento. Além disso, diversas condições operacionais foram impostas ao sistema a fim de avaliar a sua

eficiência. Os resultados foram satisfatórios no controle da pressão, podendo ser aplicado em sistemas reais de distribuição de água e similares.

Por outro lado, a presente pesquisa foi realizada com características semelhantes às realizadas por Bezerra (2009) e Camboim (2014), mas com o diferencial de que foi o aumento no tamanho da rede de distribuição que, na prática, se assemelha a um sistema real. Outro fato importante a ser destacado nas mudanças entre as pesquisas foi que, nesta, o *layout* foi modificado com a divisão da rede em dois setores controlados simultaneamente pelo conjunto motor-bomba e pelas duas válvulas redutoras de pressão instaladas nas entradas desses setores, ambos com o objetivo de controlar a pressão nos ramais de saídas da rede.

Esse fato caracterizou uma inovação entre as pesquisas por ter desenvolvido um controle descentralizado entre os atuadores, que são: o conjunto motor-bomba e as válvulas, de forma que a ação de controle desenvolvida na bomba não era a mesma para as válvulas, e vice-versa. No entanto, existiu uma dependência entre a ação de controle das válvulas para com a bomba, de maneira que a atuação das válvulas era utilizada para transferir a pressão excedente ao outro setor, cuja pressão já se encontrava controlada apenas pela bomba. Essa atuação das válvulas para o sistema de controle foi vista como um ajuste fino do ponto de vista de consumo de energia elétrica e se mostrou uma inovação em relação aos trabalhos já citados porque, diferentemente deles, as válvulas só atuavam para otimizar o ganho energético do sistema.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados a descrição da bancada na qual foi desenvolvido o experimento e o desenvolvimento do supervisório feito no *software* LabVIEW™ com o intuito de gerenciar o controle da pressão na rede de distribuição, bem como será abordado o projeto do controlador que utilizou a lógica *fuzzy*, com os dois modelos de metodologia aplicados ao experimento.

#### 3.1 Descrição da Bancada

A bancada experimental consiste em uma Rede Piloto de Distribuição de Água (RPDA) pressurizada por um conjunto motor-bomba, totalmente instrumentalizada e automatizada mediante um Controlador Lógico Programável (CLP), supervisionado através de um Sistema Supervisório de Controle e Aquisição e de Dados (SCADA, sigla do inglês *Supervisory Control and Acquisition Data System*), que foi desenvolvido no *software* LabVIEW™.

Quanto ao sistema automatizado, vale inferir que ele admite o desenvolvimento de rotinas de controle, simulação e monitoração, em tempo real, produzindo, por conseguinte, uma massa de dados em forma de relatórios, possibilitando a sua interpretação e análise.

Além disso, pode-se afirmar que se trata de um sistema autônomo que tem a capacidade de operar, controlar, monitorar e tomar decisões referentes à otimização dessa operação sem a necessidade da presença de um operador humano, podendo também gerar relatórios das grandezas monitoradas. Não obstante, esse sistema de supervisão não foi projetado para identificar possíveis vazamentos na rede que, porventura, venham surgir, pois não há sensores instalados na rede para essa aplicação, assim como o supervisório não foi projetado para desenvolver essa aplicação.

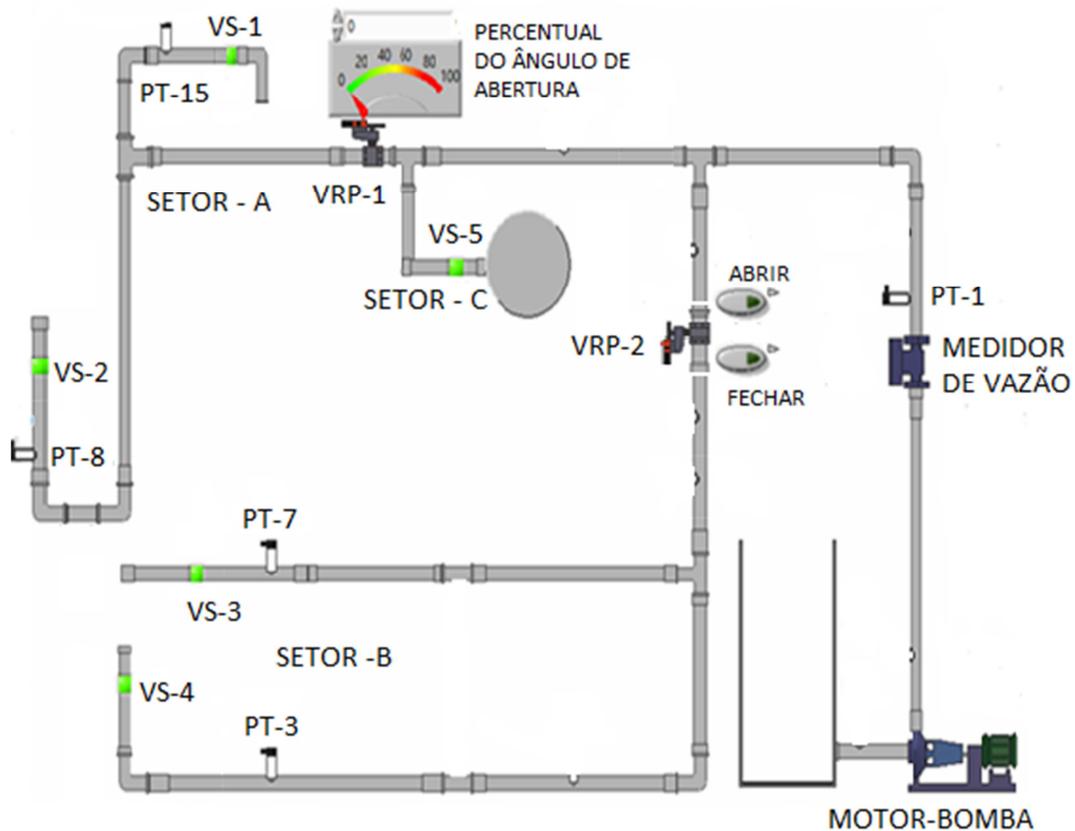
##### 3.1.1 Rede de distribuição

Destaca-se que a rede de distribuição emula um sistema real de abastecimento de água com 155 metros de comprimento, a qual está distribuída da

seguinte forma<sup>9</sup>: tubulações de PVC DN 50 mm — 140 m, DN 100 mm — 5 m e de ferro dúctil DN 100 mm — 10 m.

Vale destacar que essa rede foi dividida em três setores: A, B e C. Os setores A e B ficaram com duas saídas em cada; já o setor C ficou com apenas uma saída na cota do terreno mais elevada, com 06 metros acima das demais como forma de se aproximar de um sistema real.

Além disso, ressalte-se que essas saídas de água são controladas por registros (manuais) e/ou através de válvulas solenoides. Outrossim, a planta com a rede pode ser vista na Figura 3.1. A Figura 3.2 é uma foto panorâmica do Laboratório com a rede.



**Figura 3.2** – Vista geral da rede de distribuição com instrumentação.

<sup>9</sup> Todas as distâncias apresentam valores aproximados.

Ressalte-se que a V-1 controla o setor A e a V-2, o B. Já o setor C ficou sem válvula, pois ele é utilizado no experimento apenas como agente de perturbação na vazão da planta para se verificar a eficiência do controlador *fuzzy*. Além disso, destaca-se que as válvulas consistem em um dispositivo mecânico que permite reduzir a pressão a jusante de sua instalação pela ação mecânica de uma manopla, ou, de forma automática, com o uso de um motor elétrico



**Figura 3.2** – Foto panorâmica do laboratório.  
Fonte: Relatório de implantação do LENHS (2008).

No que se refere à válvula proporcional (v. Figura 3.3), o fechamento da seção ocorreu pela rotação de uma esfera no seu interior, sendo que esse mecanismo é acionado por um motor elétrico cuja tensão de alimentação é 24 Vcc. O ângulo de abertura da válvula varia de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , podendo ser ajustado de duas maneiras: pela ação do motor elétrico ou, de forma manual, girando a haste localizada na parte superior da válvula.

No que concerne aos setores, afirma-se que foram instalados transdutores de pressão (v. Figura 3.4). Além disso, pode-se destacar que o sensor utilizado no transdutor é do tipo piezorresistivo de silício, que sofre variação de uma resistência interna em função da pressão.



**Figura 3.3** – Válvula reguladora de pressão (VRP).



**Figura 3.4** – Transdutor de pressão.  
Fonte: QL Sensor Engineering System Co. (China).

Eles são alimentados por uma fonte de tensão contínua variando entre 9 Vcc e 30 Vcc e gera um sinal na saída de 4 mA a 20 mA, com tempo de resposta de 1 milissegundo e exatidão de  $\pm 0,2\%$  (fundo de escala).

Ressalte-se que, próximo à saída da bomba, na tubulação principal<sup>10</sup> da rede de distribuição, foi instalado um medidor de vazão eletromagnético que possui uma faixa de medição da vazão entre 0 e 200 m<sup>3</sup>/h, visto na Figura 3.5.

### 3.1.2 Sistema de bombeamento

Vale inferir que o sistema de bombeamento em questão é composto de um conjunto motor-bomba com as seguintes características: potência de 5 cv, motor de alto rendimento,  $\eta = 88\%$ , fabricado pela WEG, a rotação é 1720 rpm, tem o fator de serviço 1,15, a sua corrente nominal é 8 ampères. Além disso, enfatize-se que a

<sup>10</sup> A tubulação principal é de ferro fundido com diâmetro, nesse trecho, de 100 mm.

bomba, fabricada pela KSB, impulsiona a água diretamente para a rede de distribuição com uma vazão de 50 m<sup>3</sup>/h contra uma altura manométrica de 17 mca.



**Figura 3.5** – Medidor de vazão.

Na Figura 3.6, é mostrada uma foto do conjunto motor-bomba com o detalhe da sua interligação ao sistema.



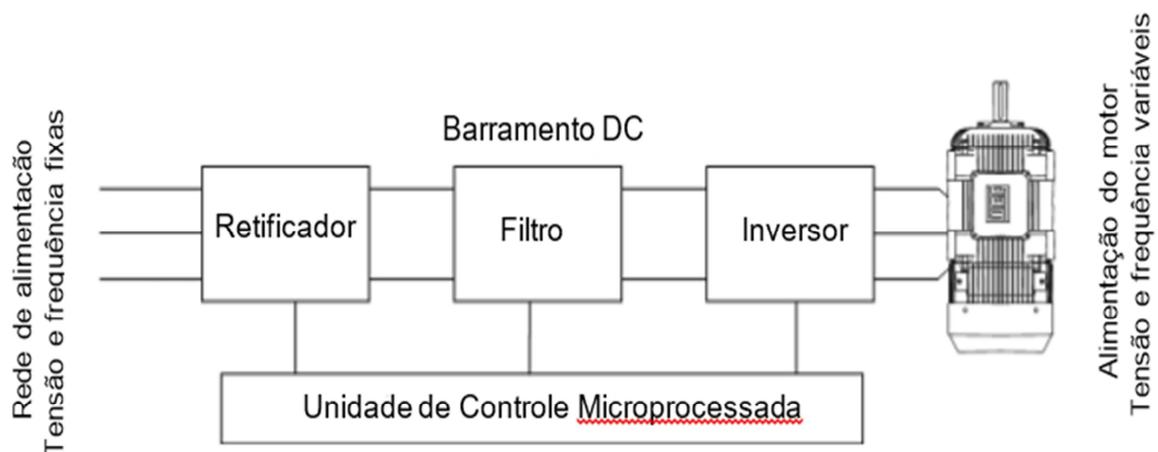
**Figura 3.6** – Foto do conjunto motor-bomba.  
Fonte: Relatório de implantação do LENHS (2008).

### 3.1.3 Painel elétrico

No que concerne ao painel elétrico, afirma-se que, neste procedimento, se utilizou um que operava em conformidade com o sistema de automação implantado. Além disso, vale inferir que ele foi projetado para executar as seguintes funções:

- ✓ Servir de painel de interface entre os instrumentos da rede hidráulica e o supervisor;
- ✓ Servir de painel de comando e proteção do motor e equipamentos elétricos, eletrônicos, como o inversor de frequência.

Conforme manual do fabricante, o inversor de frequência é composto de um retificador, um filtro e um inversor, como observado na Figura 3.7, sendo que o circuito retificador é responsável por transformar a tensão alternada de alimentação em tensão contínua, que, depois, passa pelo filtro no circuito intermediário. Por sua vez, essa tensão contínua alimenta o circuito do inversor que fará o chaveamento pelos Transistores Bipolares de Porta Isolada (*Insulated Gate Bipolar Transistors*).



**Figura 3.7** – Representação em blocos dos componentes do inversor de frequência.  
Fonte: MASCHERONI (S.d., p. 51).

Tomando como base o que foi abordado até o momento, vale inferir que essa tecnologia que possibilita o controle da rotação do motor aliada a sistemas de controle é uma ferramenta poderosa no combate ao desperdício de água e energia na operação dos sistemas de abastecimento.

Para Ralize e Marques (2006), as vantagens e desvantagens do uso dos inversores são:

– **Vantagens:**

- ✓ Montagem simplificada;
- ✓ Corrente do motor é controlada na partida de forma suave, sem picos;
- ✓ Permite variar a rotação do motor em função de um sinal externo de pressão ou vazão;
- ✓ Proteções elétricas (sobrecorrente, supervisão trifásica, etc.) são incorporadas no próprio equipamento, reduzindo o número de componentes e o tamanho do painel;
- ✓ Elimina o baixo fator de potência;
- ✓ Proporciona economia de energia elétrica.

– **Desvantagens:**

- ✓ Custo um pouco mais elevado frente aos sistemas tradicionais;
- ✓ Produz interferência na rede elétrica de alimentação (harmônicas).

O inversor de frequência encontra-se instalado dentro do painel, como pode ser visto na Figura 3.8.

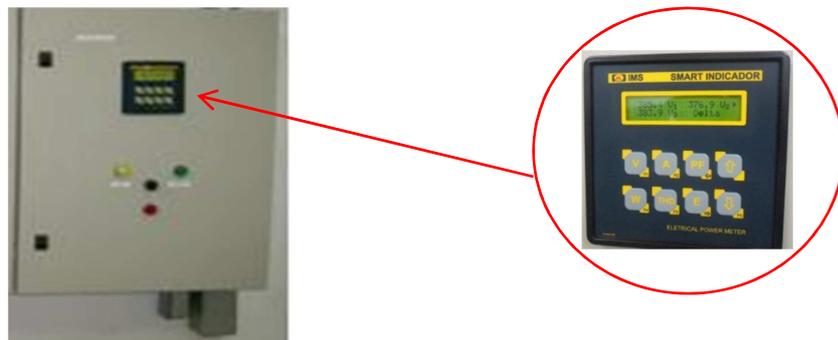


**Figura 3.8** – Foto do painel com inversor de frequência.

Destaque-se que o painel também é equipado com um multimedidor de grandezas elétricas (v. Figura 3.9) que permite a medição das variáveis elétricas em tempo real, como, por exemplo: potência elétrica ativa, potência elétrica reativa, potência elétrica aparente, corrente elétrica, tensão, fator de potência, harmônicas de ordem ímpares até a 31.<sup>a</sup> ordem, distorção harmônica total (THD) de tensão e de

corrente, entre outras, dispensando a instalação de chaves seletoras das fases, podendo ser programada pelo teclado ou via *software* através da porta de comunicação.

Esse equipamento é provido de uma porta de comunicação RS-232 que possibilita trafegar com os dados já citados. Essa comunicação utiliza o protocolo ModBus RTU que foi facilmente interligado ao supervisor desenvolvido para esta pesquisa.



**Figura 3.9** – Parte frontal do painel com detalhe do multimedidor de grandezas elétricas.

### 3.2 Desenvolvimento Supervisor no Lab VIEW™

Sobre o desenvolvimento do supervisor, destaque-se que o sistema supervisor permite que sejam monitoradas e rastreadas informações da rede de distribuição. Tais informações são coletadas por sensores e/ou equipamentos e, em seguida, manipulados, analisados, armazenados e, posteriormente, apresentados ao usuário.

O supervisor provê o sistema de distribuição de água experimental das informações necessárias ao gerenciamento de todo o processo hidráulico e elétrico. No programa, foram concentradas, para efeito de monitoramento do sistema, todas as informações sobre os componentes (válvulas, inversores de frequência, transdutores, etc.), em tempo real, tais como: pressão, vazão, corrente elétrica do motor, tensão elétrica e potência.

Dessa forma, a operação será simplificada de maneira a permitir o controle e também manipular, através de um *software*, um grande volume de informações de forma facilitada, utilizando ícones e telas gráficas para orientar o operador, enquanto

janelas (menus e instruções) permitirão a monitoração de uma ou várias situações de operação do sistema de forma simultânea.

O supervisor foi desenvolvido na plataforma do LabVIEW™ – *Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench* que utiliza a linguagem gráfica G, desenvolvida pela *National Instruments*, a fim de ampliar a versatilidade para o uso da técnica de controle e supervisão de sistemas de abastecimento de água, cuja interface gráfica pode ser vista na Figura 3.1.

O supervisor foi estruturado com nove sub-rotinas integradas para um único objetivo que é o controle da pressão do sistema nos quatro pontos de saídas da rede. Já a primeira sub-rotina desenvolvida serviu para operar o conjunto motor-bomba. Nela, foi programada a ação de ligar e desligar o conjunto motor-bomba, indicando o *status* da operação, bem como alterar a velocidade do motor, deixando-a entre os valores de 40 Hz e 60 Hz a partir do sinal de corrente dos transdutores de pressão.

A segunda sub-rotina estava associada ao acionamento das válvulas solenoides VS-2 e VS-3, instaladas nos pontos de saída da rede. Essa ação garante a abertura e o fechamento das válvulas, feita a partir de um comando disponível na tela do supervisor que tem o objetivo de alterar o consumo de água. Já a terceira sub-rotina foi projetada para operar a abertura e/ou fechamento das duas válvulas reguladoras de pressão V1 e V2. Note-se que V1 é uma válvula com característica diferente da segunda válvula, pois apresenta a informação de posição do seu ângulo de abertura, o que facilitou no controle da pressão, já que sua posição era sempre incrementada ou decrementada de um pequeno delta do ângulo de abertura. A V2 não apresenta a informação de sua posição; logo, o resultado da ação de fechar ou abrir foi feita sem o conhecimento da posição, o que podia levar a situações na qual o controlador mandava fechar e ela já se encontrava fechada ou vice-versa. Assim, a operação dessa válvula se tornou mais complexa que a da válvula V1.

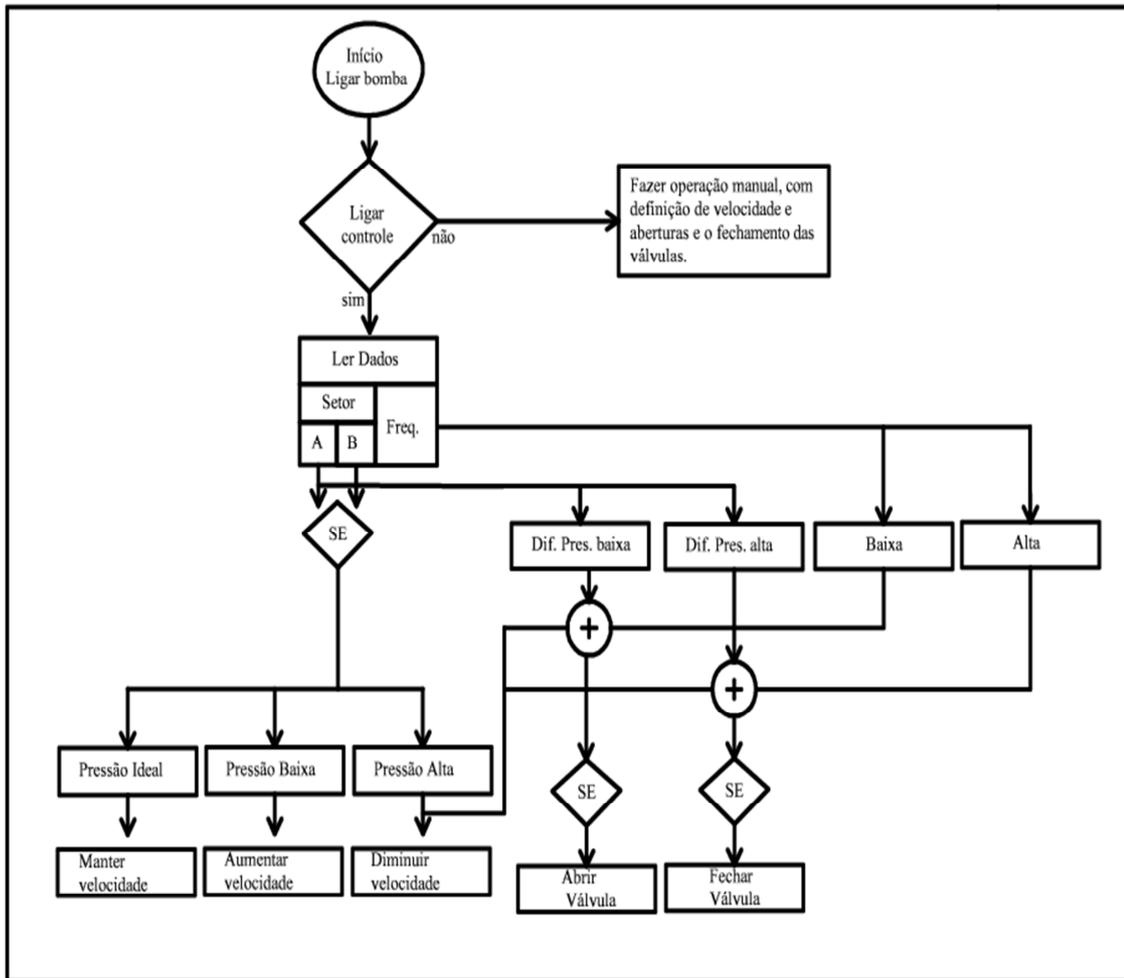
Na continuação, as duas sub-rotinas seguintes, a quarta e a quinta, foram desenvolvidas para os registros das vazões e pressões, respectivamente. Essas informações de leituras foram utilizadas na lógica dos controladores para serem tomadas decisões. Já a sexta sub-rotina foi projetada com o objetivo de modular a velocidade da bomba. Essa modulação ocorreu baseada na lógica *fuzzy* que teve como entradas os valores das leituras das pressões e da derivada das leituras das

pressões nos pontos PT-15, PT-08, PT-07 e PT-03. Essas entradas passaram pela etapa da fuzzyficação, depois pelas regras de inferência *fuzzy* e, finalmente, na etapa da defuzzyficação, onde foi gerada a saída com um delta de incremento ou decremento na frequência que alimenta o motor.

Já a sétima sub-rotina foi desenvolvida para poder controlar as ações de abertura ou de fechamento das válvulas V1 e V2. Essas válvulas foram operadas a partir do controlador *fuzzy* que teve como entradas: as pressões registradas na saída do setor A nos pontos dos transdutores, a frequência em Hz e a terceira entrada, a diferença das pressões entre os setores.

Vale afirmar que essas sub-rotinas estão integradas no sistema supervisorio em um único objetivo que é o de controlar e manter constante a pressão nos quatro pontos de saídas dos setores A e B, próximos de uma referência. Para facilitar o entendimento, foi desenvolvido um fluxograma com uma síntese das ações citadas anteriormente e que pode ser visto na Figura 3.11. Já o sistema supervisorio foi interconectado ao CLP (Controlador Lógico Programável) através de uma rede física que utiliza as interfaces RS-232/485 para fazer a comunicação entre os sensores e atuadores. Para isso, ele utilizou o protocolo de comunicação Modbus RTU, que, de acordo com a *National Instruments*, utiliza a interface serial RS-232, que é a mais comum e embarcada como componente padrão na maioria dos computadores de mesa compatíveis com *Windows*.

A RS-232 permite apenas um transmissor e um receptor em cada linha. Além disso, pode-se afirmar que a RS-232 também utilizou um método de transmissão *Full-Duplex*. Algumas placas RS-232 vendidas pela *National Instruments* suportam taxas de transmissão (*baud rates*) de até 1 Mbit/s, mas a maioria dos dispositivos é limitada em 115,2 kbits/s. Nesse sentido, notou-se que a interface RS-485 não está disponível na maioria dos PCs IBM. A RS-485 foi desenvolvida para permitir que até 32 dispositivos possam comunicar-se pela mesma linha de dados, sendo que qualquer dos dispositivos escravos num barramento RS-485 pode comunicar com qualquer outro dos 32 dispositivos escravos sem atravessar um dispositivo mestre. Entre o supervisorio instalado no computador portátil e o CLP, há um módulo conversor RS-232/485 (v. Figura 3.12) que, de um lado, se conecta ao *notebook* através da porta USB usando o sinal RS-232, e, do outro lado, se conecta ao CLP pela RS 485. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2013).



**Figura 3.10** – Fluxograma com síntese da ação do supervisorio.



**Figura 3.11** – Módulo conversor RS-232/485, da ATOS.

Destaque-se que, neste módulo, se tem, na parte superior, uma saída com terminal RJ-45, tendo sido utilizada a interface RS-232 para se interligar diretamente

à entrada USB do computador. Um pouco abaixo, tem-se a saída da rede física que usa a interface RS-485 para ligar o conversor ao CLP.

O CPL modelo MPC 4004, da ATOS, utilizou um microprocessador de última geração, compatível com os instrumentos de medição e controle monitorados e/ou controlados, destacando que ele apresenta os seguintes módulos: uma fonte de alimentação, uma Unidade Central de Processamento (UCP ou CPU<sup>11</sup>), três entradas digitais, cinco entradas analógicas e uma saída analógica e também um módulo de comunicação *Modbus*, conforme visto na Figura 3.12. Logo, afirma-se que a fiação dos sensores que chega, assim como as que saem do CLP estavam ligadas a conectores extraíveis. Vale destacar que esse tipo de conexão possibilita a retirada dos módulos, no caso de manutenção, pois não necessita de ferramentas para remoção da fiação.

Além disso, pode-se afirmar que a montagem do CLP num painel elétrico, como vista na Figura 3.13, foi executada para facilitar a proteção contra as condições adversas do ambiente, tais como poeiras, umidade, raios solares, etc., mas também para garantir que pessoas não autorizadas e animais não tivessem acesso à fiação dos sensores.



**Figura 3.12** – CLP de fabricação da ATOS.

---

<sup>11</sup> Sigla do inglês *Central Processing Unit*.



**Figura 3.13** – Painel com CLP instalado.

Destaque-se que, na parte superior desse painel, há duas fontes de tensão de 24 Vcc utilizadas para alimentar toda a rede de sensores e atuadores instalados ao longo da rede e que necessitem de uma alimentação externa de tensão. Ainda na parte superior, têm-se dois disjuntores de proteção dos circuitos de alimentação do CLP e das fontes.

Na parte central do painel, estava o CLP distribuído da seguinte forma:

- Da esquerda para direita, o primeiro módulo é a CPU, na qual está implantado o programa com suas rotinas de execução de tarefas a serem desenvolvidas. Esse módulo é composto de dois barramentos de conectores, sendo o primeiro de 8 entradas digitais (E0 a E7) e o outro, também com 8 conectores, mas são utilizados com saídas digitais (S0 a S7). Há também uma chave (*on/off*) para selecionar a função de Operação ou Programação (*Run/Prog*), uma saída de cabo *flat* para comunicar com a IHM, uma entrada RJ-45 para comunicação da interface RS-232 e um barramento da interface RS 485.

- Sequencialmente, há três módulos de saídas digitais, que podem ser chamados também de *cartões digitais*, cada um com 8 saídas digitais (S0 a S7) e mais 6 cartões de entradas analógicas. Ao lado dos cartões analógicos, há o conversor RS-232/485 e, finalmente, a fonte de alimentação do CLP de 24 Vcc.

Na parte inferior do painel do CLP, há duas réguas de conectores, onde foram instalados conectores para interligar a fiação dos sensores de campo com as entradas e saídas dos CLPs, sejam elas digitais, sejam elas analógicas.

O painel possui na parte frontal da porta uma IHM (Interface Homem Máquina), com as dimensões de 180 mm de largura por 180 mm de altura, além de 10 teclas numéricas e 12 de operação, um *display* com quatro linhas de 20 segmentos, como visto na Figura 3.14.

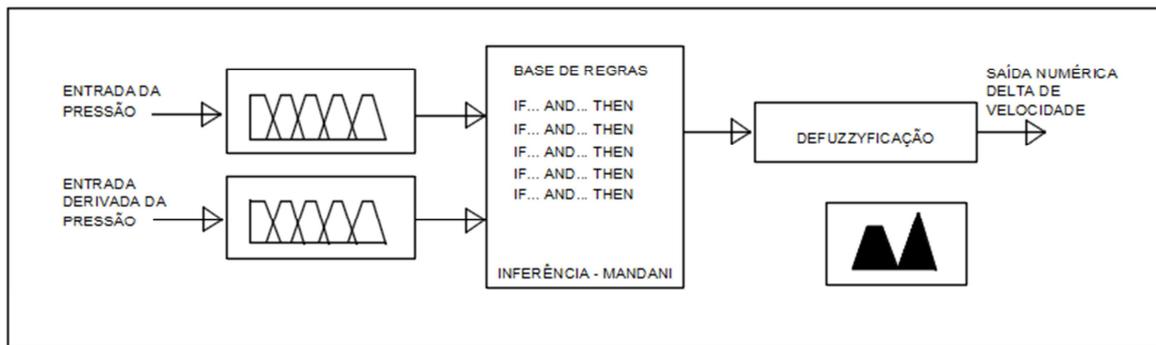


**Figura 3.14** – IHM do CLP parte frontal do Painel.

Além disso, essa IHM possibilitaria, aos usuários que não estejam em contato com o supervisor, visualização do monitoramento das grandezas hidráulicas, como a vazão e a pressão da rede nos seus diversos pontos de medição.

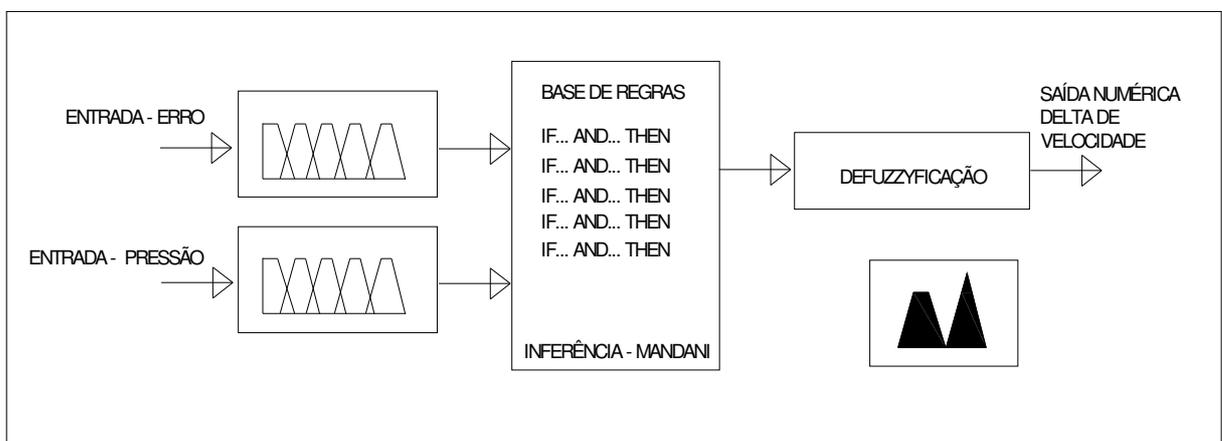
### 3.3 Desenvolvimento do Sistema *Fuzzy*

A técnica de controle *fuzzy* não trabalha com modelos matemáticos para controlar processos, mas, sim, utiliza um método de traduzir expressões verbais, vagas e imprecisas, comuns na comunicação humana, em forma compreensível pelos computadores. Dessa forma, os sistemas *fuzzy* são robustos, versáteis e de grande adaptabilidade. Se um operador de um processo for capaz de criar regras da forma “SE”, “ENTÃO” para poder controlar seu processo, logo será possível a implementação de um algoritmo computacional *fuzzy*. O sistema *fuzzy* projetado para esta pesquisa foi dividido em dois tipos. O primeiro, para o controle do conjunto motor-bomba, que pode ser representado pelo diagrama de blocos da Figura 3.15.



**Figura 3.15** – Diagrama de blocos do controlador *fuzzy* incremental para o motor-bomba.

O segundo tipo de controlador *fuzzy* foi desenvolvido para ser aplicado nas válvulas, sendo que cada válvula recebeu um controlador *fuzzy* para executar a ação de abertura e fechamento de sua seção através da modificação do seu ângulo de abertura e fechamento. Esse *fuzzy* para as válvulas está representado no diagrama de blocos da Figura 3.16.



**Figura 3.16** – Diagrama de blocos do controlador *fuzzy* incremental para as válvulas V1 e V2.

### 3.3.1 Controlador *fuzzy* para o conjunto motor-bomba

O sistema *fuzzy* desenvolvido para ser aplicado no controle da pressão da rede de distribuição utilizou a estrutura de regras baseada no modelo Mamdani com conectores “e” na fuzzyficação e “ou” (Máx-Min) na defuzzificação. Nesse controle, foi construído um sistema de regras de inferência *fuzzy* baseado em premissas e consequências, apresentado na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** – Matriz de regras do sistema *fuzzy* para conjunto motor-bomba.

Derivada da pressão Pressão						Saídas
	Negativo Alto	Negativo	Nulo	Positivo	Positivo Alto	
Muito Baixa	PA	PO	PO	PA	PA	Negativo Alto - NA
Baixa	PO	PO	PO	PO	PA	Negativo - N
Ótima	NE	NE	NE	NE	NE	Neutro - NE
Alta	NA	N	N	N	N	Positivo - PO
Muito Alta	NA	NA	N	N	NA	Positivo Alto - PA

Nessa perspectiva, o projeto do sistema *fuzzy*, para atender os objetivos dessa pesquisa, foi estruturado com os controladores trabalhando de forma autônoma entre os atuadores, sem interdependência entre si, ou seja, são descentralizados em suas ações e dessa forma a ação, por exemplo, do controlador da válvula V1 não dependeu da ação dos demais controladores.

Assim, se o controlador *fuzzy* de V1 necessitar atuar fechando, ou abrindo, a válvula os outros dois controladores, o da bomba e o de V2 estiverem desativados, mesmo assim, V1 irá operar sem nenhuma restrição. Esse mesmo comportamento de ação se estende aos demais controladores.

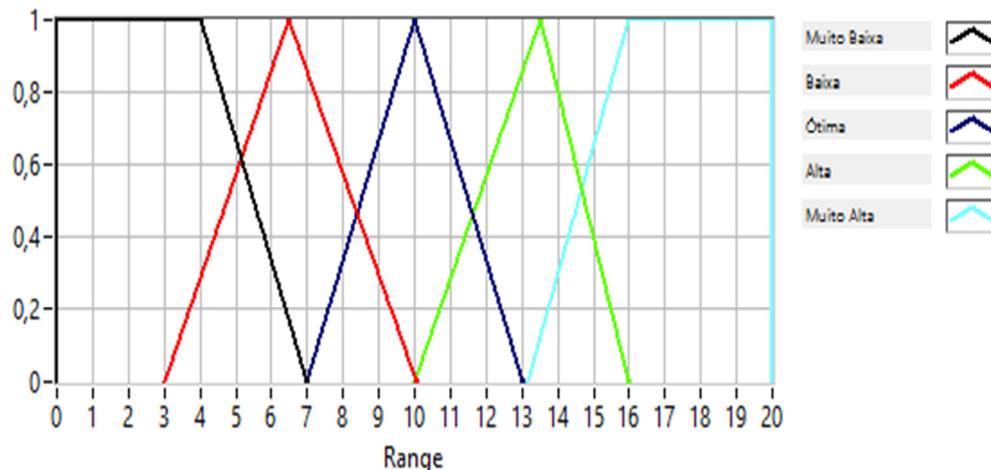
O projeto do sistema *fuzzy* para o controle do conjunto motor-bomba foi estruturado com base na regulação da rotação do motor. Ele foi desenvolvido para ter como entradas o valor da pressão nos quatro pontos de saídas dos dois setores e a derivada dessa pressão.

As pressões foram determinadas para os seguintes transdutores de pressão, do tipo apresentado na Figura 3.4, que são: PT-15, PT-08, PT-07 e PT-03.

A segunda entrada especificada no *fuzzy* utilizou também os mesmos transdutores da entrada anterior. Contudo, foram usadas as informações da derivada dessas pressões, calculadas a partir da variação entre a pressão atual menos a pressão no instante anterior desses mesmos pontos.

Para o sistema *fuzzy*, por sua vez, os valores numéricos das entradas da pressão e da derivada da pressão foram transformados em variáveis linguísticas, às quais se dá o nome de fuzzyficação. Na fuzzyficação, foram definidas as variáveis linguísticas considerando a sua faixa de utilização, que, no sistema *fuzzy*, é chamado de *universo de discurso*. No gráfico da Figura 3.17, mostrado a seguir,

pode ser observada a primeira variável de entrada, denominada de “PRESSÃO”, cujo universo de discurso variou de 0 a 20 mca, sendo este o valor máximo que a pressão poderia alcançar.

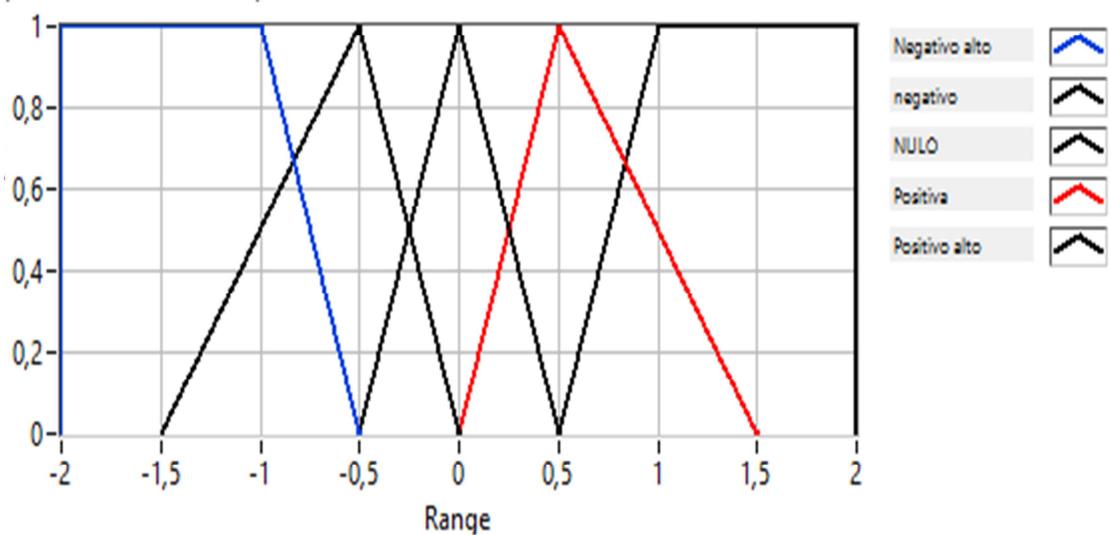


**Figura 3.17** – Gráfico da entrada da pressão, controlador *fuzzy* para bomba.

As variáveis linguísticas foram definidas em cinco conjuntos, sendo o primeiro o conjunto das pressões “Muito Baixas”, representados pela figura de um trapézio com os seguintes pontos (0; 0; 4; 7). Já o segundo conjunto representa, por conseguinte, as pressões “Baixas” que são mostradas na figura de um triângulo com os seguintes pontos (3; 7; 10). O terceiro conjunto é o das pressões “Ótimas”, representado por um triângulo com os seguintes pontos (7; 10; e 13).

O quarto conjunto representa os valores das pressões “Altas” e tem o triângulo com os seguintes pontos: (10; 13,5; 16). O último conjunto representado foi dos valores das pressões “Muito Altas”, representado por um trapézio com os seguintes pontos: (13; 16; 20; 20).

A segunda variável linguística definida para a entrada do controlador foi denominada de *derivada da pressão*, que pode ser observada no gráfico da Figura 3.18, cujo universo de discurso variou de -2 a 2 mca.

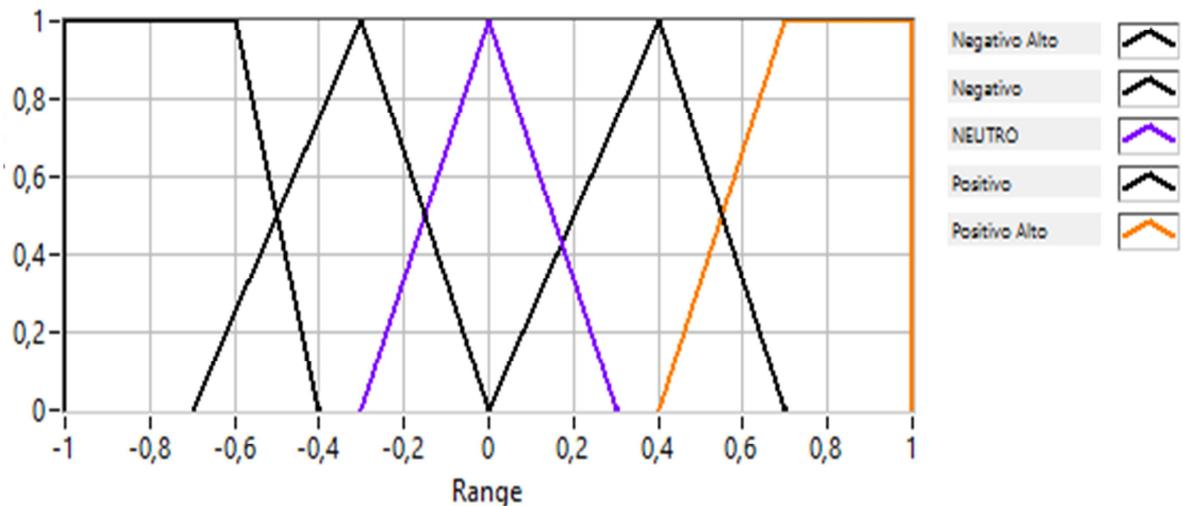


**Figura 3.18** – Gráfico da derivada das pressões, controlador *fuzzy* para bomba.

Sobre o primeiro conjunto a ser mostrado, pode-se inferir que se refere ao das derivadas “Negativas Altas”, ele é representado por um trapézio com os seguintes pontos: (-2; -2; -1 e -0,5), no conjunto seguinte é o das derivadas “Negativas” representado por um triângulo com os seguintes pontos: (-1,5; -0,5; 0).

O terceiro conjunto, por sua vez, é o das derivadas “Nulas”, que é representado por um triângulo com os pontos (-0,5; 0; 0,5). Já o quarto conjunto se refere ao das derivadas “Positivas”, representadas por um triângulo com os pontos: (0; 0,5; 1,5). Finalmente, o último conjunto a ser apresentado é o das derivadas “Positivas Altas”, representado por um trapézio com os pontos: (0,5; 1; 2; 2).

É válido destacar que as duas entradas, ao passarem pelo processo de inferência *fuzzy*, que utilizou o modelo de Mamdani na base das regras, sofreu o processo de defuzzyficação e geraram uma saída numérica que incrementou ou decrementou a frequência do motor. Essa saída é apresentada em forma de gráfico com as respectivas variáveis linguísticas na Figura 3.19.



**Figura 3.19** – Gráfico da saída, controle *fuzzy* para bomba.

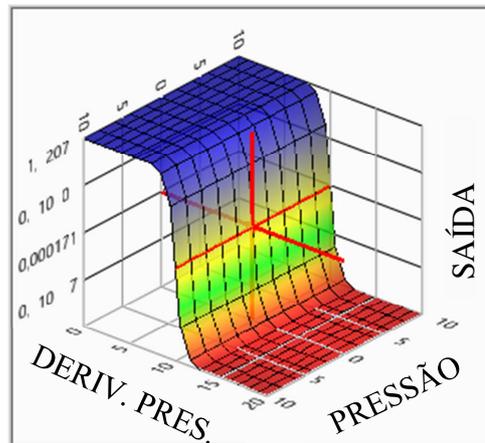
Ressalte-se que o processo de defuzzyficação, que é a última etapa do controlador *fuzzy*, foi apresentado no gráfico da figura 3.19, com universo do discurso variando de -1 a 1. Este valor quando aplicado no inversor fez a frequência variar.

Assim, nesse referido gráfico pode-se observar que o primeiro conjunto na figura de um trapézio cujos pontos são: (-1; -1; -0,6; -0,4) representou a variável linguística denominada de “Negativo Alto”.

O segundo conjunto que representou a variável denominada de “Negativo” é representada por um triângulo cujos pontos são: (-0,7; -0,3; 0). O terceiro conjunto representou a variável denotada de “Neutro” que é representada por um triângulo cujos pontos são (-0,3; 0; 0,3).

Do mesmo modo, o conjunto seguinte, também na figura de um triângulo, representa a variável denotada de “Positivo”, que tem os pontos de definição em (0; 0,4; 0,7) e, finalmente, o último conjunto que representa a variável “Positivo Alto”, mostrado na figura de um trapézio e limitado pelos pontos: (0,4; 0,7; 1; 1).

Para finalizar o projeto desse controlador para a bomba, foi apresentado na Figura 3.20 o gráfico do plano de controle *fuzzy* com a saída para a entrada do inversor de frequência para controlar a velocidade do motor.



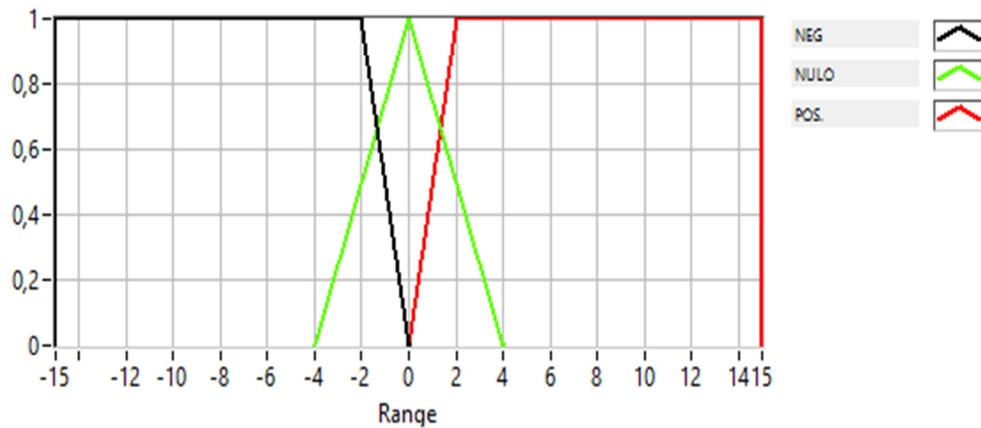
**Figura 3.20** – Gráfico do plano de controle *fuzzy* da saída da bomba.

### 3.3.2 Sistema *fuzzy* para as válvulas V1 e V2

O projeto do controlador *fuzzy* desenvolvido nesta pesquisa para ser aplicado nas válvulas serviu para operar a abertura e/ou fechamento de V1 e V2, sendo que essa operação é feita de forma individual. Neste controlador, foi utilizado o conector de entrada “e” na fuzzyficação; no processo das inferências, foi utilizado o modelo de Mamdani; e na defuzzyficação, o método do centro de área (C-o-A) com o operador “ou”, (Máx – Min). O número de entradas foi definido em duas, sendo denominadas de “Erro”, que é a diferença entre o valor da referência e o valor da pressão, e a segunda entrada como sendo os valores da “Pressão” registrados nos pontos dos transdutores PT-15, PT-08, PT-07 e PT-03.

Esse controlador aplicou lógica semelhante à do controlador da bomba no tocante à busca para manter as pressões constantes nas saídas dos setores A e B, próximas ao valor de 10 mca. Ressalte-se ainda que a primeira entrada desse controlador foi denominada de “Erro”. O gráfico dessa entrada do controlador pode ser visto na Figura 3.21.

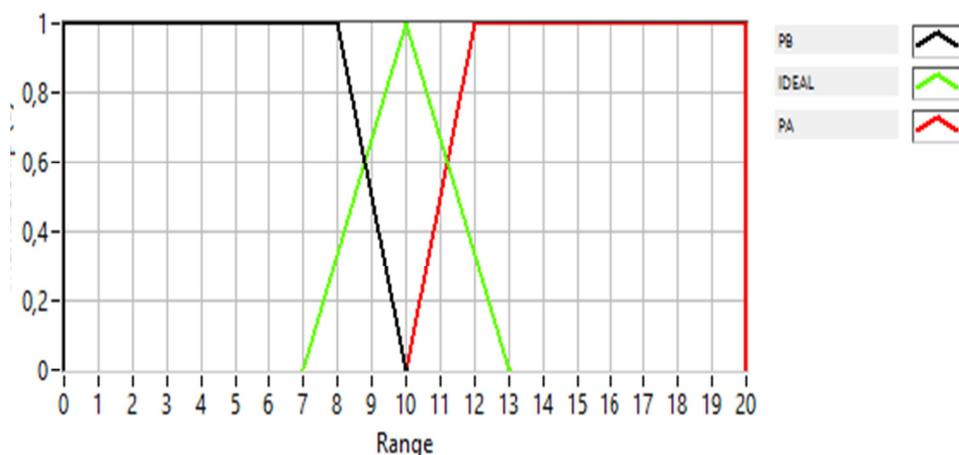
O primeiro conjunto de variável linguística da entrada “Erro” foi denominado de Negativo (NEG) e foi representado por um trapézio, cujos pontos foram (-15; -15; -2; 0).



**Figura 3.21** – Gráfico da entrada “Erro”, controlador *fuzzy* das válvulas.

O segundo conjunto de variável linguística, denominada de NULO, foi representado por um triângulo cujos pontos são (-4; 0; 4). E finalmente, o terceiro conjunto de variável foi denominado de Positivo (POS) e foi representado por um trapézio cujos pontos são (0; 2; 15; 15).

A segunda entrada projetada para esse controlador, denominada de “Pressão”, está associada ao universo de discurso, variando de 0 a 20 mca, que pode ser visto na Figura 3.22.



**Figura 3.22** – Gráfico da entrada Pressão do controlador *fuzzy* das válvulas.

Destaque-se que esse universo foi dividido em três conjuntos de pontos, o primeiro dos quais está representado pela figura de um trapézio a que foi atribuído o nome da variável linguística Pressão Baixa (PB), cujos pontos são: (0; 0; 8; 10). O segundo conjunto de pontos é representado pela figura de um triângulo, a que está

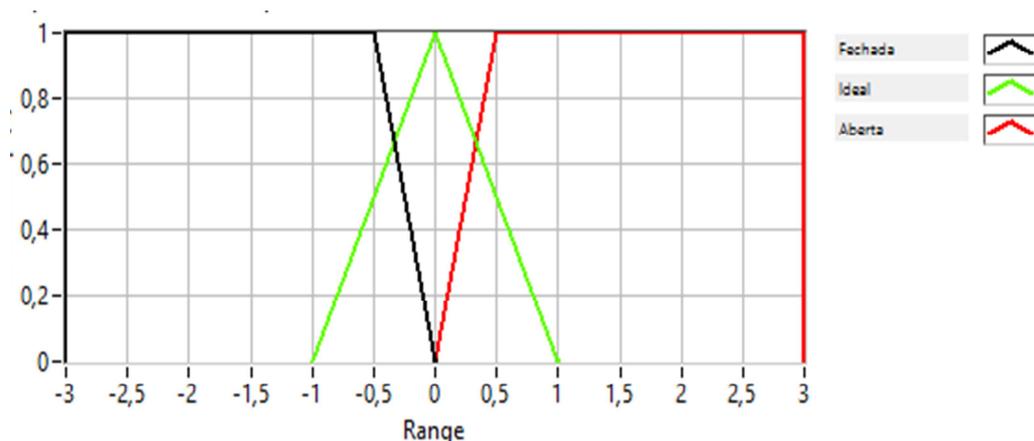
associada a variável Pressão Ideal (IDEAL), cujos pontos são: (7; 10; 13). Finalmente, o terceiro conjunto de pontos da variável Pressão Alta (PA), representado pela figura de um trapézio, tem os seguintes pontos: (10; 12; 20; 20).

Assim, essas duas entradas passaram pelo processo de inferência *fuzzy*, com regras que foram baseadas em premissas e consequências apresentadas na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2** – Matriz de regras do *fuzzy* para as válvulas V1 e V2.

ERRO \ PRESSÃO	Saídas		
	Negativo	Nulo	Positivo
Baixa	ABRIR	ABRIR	FEC
Ideal	IDEAL	IDEAL	IDEAL
Alta	FEC	FEC	FEC

Destaque-se que o processo de defuzzyficação que utilizou o método do cento de área (C-o-A) na última etapa do controlador *fuzzy*, com universo do discurso variando de -3% a +3 %, foi dividido em três conjuntos de pontos de saída, como pode ser visto na Figura 3.23.

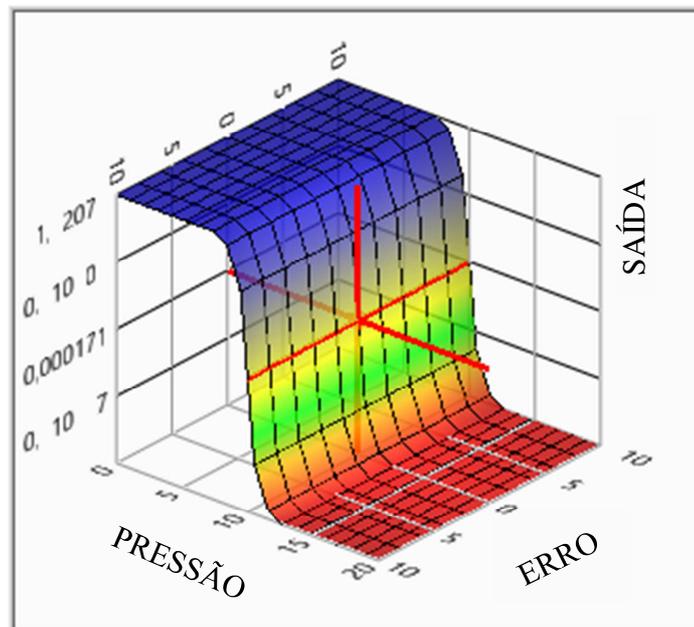


**Figura 3.23** – Gráficos das variáveis linguísticas da saída do controle *fuzzy* para as válvulas V1 e V2.

O primeiro conjunto a ser apresentado é o da variável linguística da válvula fechada, que foi denominada de “Fechada”, representada por um trapézio limitado pelos seguintes pontos: (-3; -3; -0,5; 0). Já o segundo conjunto de pontos pertence à variável de abertura das válvulas denominada de “IDEAL”, que é representada por

um triângulo que tem p limitados em: (-1; 0; 1). E o último conjunto de saída a ser apresentado é o da válvula aberta, que foi denominado de “Aberta”, e é representado pela figura de um trapézio, sendo limitado pelos pontos: (0; 0,5; 3; 3).

Para finalizar o projeto desse controlador *fuzzy* para as válvulas, apresenta-se na Figura 3.24 o plano de controle *fuzzy*.



**Figura 3.24** – Gráfico com plano de controle da saída do controlador *fuzzy* para as válvulas.

### 3.4 Sistema *Fuzzy* “Eficiente”

Esse sistema *fuzzy* acompanhado da palavra “eficiente”, entre aspas, foi desenvolvido para ser aplicado no conjunto motor-bomba e nas duas válvulas. O termo “eficiente” serviu apenas para diferenciar esse controlador *fuzzy* do anterior. Isso porque, neste último, se mantinham as válvulas controlando a pressão em toda a faixa de velocidade do motor, o que não garantiu o melhor desempenho energético. Assim, foi desenvolvido este novo controlador *fuzzy* com o objetivo de melhorar os ganhos energéticos, pois, nele, as válvulas só operam em apenas uma parte da faixa de velocidade, levando a uma melhoria significativa do ganho energético do sistema.

### 3.4.1 Sistema *fuzzy* “eficiente” aplicado no conjunto motor-bomba

O sistema *fuzzy* “eficiente” para o conjunto motor-bomba utilizou o mesmo controlador desenvolvido e aplicado na subseção 3.3.1, sem alterar as características das entradas e saídas, não sofrendo nenhuma alteração de suas variáveis linguísticas. Dessa forma, não houve nenhuma mudança no controlador do conjunto motor-bomba.

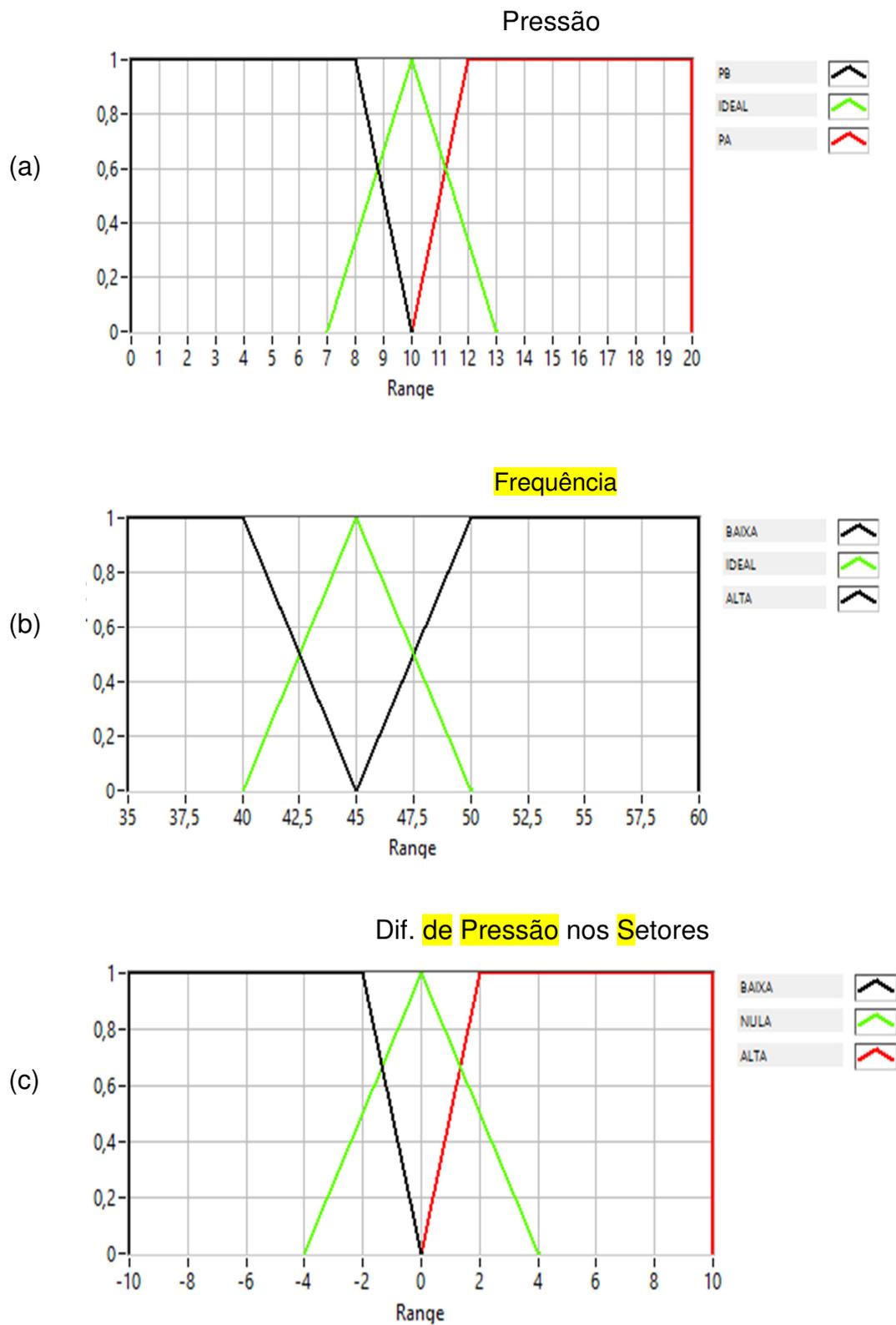
### 3.4.2 Sistema *fuzzy* “eficiente” para a válvula V1

O controlador *fuzzy* “eficiente” desenvolvido e implantado para as válvulas teve suas entradas modificadas quando comparado com o controlador anterior citado na subseção 3.3.2. Essa modificação se deu em virtude da necessidade de conseguir controlar a pressão e, ao mesmo tempo, obter o melhor desempenho energético para o sistema. Uma vez que ocorre perda de carga localizada com a válvula, essa operação deve ser minimizada sob pena de aumentar o desperdício de energia elétrica.

Os pontos de pressão a serem controlados foram os mesmos PT-15, PT-08, PT-07 e PT-03, assim como os atuadores. Então, nesse novo projeto do controlador *fuzzy* “eficiente” que foi aplicado nas duas válvulas de forma individualizada, houve as seguintes variáveis linguísticas de entrada: “PRESSÃO”, “FREQUÊNCIA” e a “DIFERENÇA DE PRESSÃO ENTRE OS SETORES”, como visto no gráfico da Figura 3.25.

Assim, essas três entradas passaram pelo processo de inferência *fuzzy*, com regras que foram baseadas no modelo de Mamdani do tipo “SE...ENTÃO”, apresentadas no Apêndice A.

O processo de defuzzyficação, que utilizou o método do cento de área (C-o-A), é a última etapa do controlador *fuzzy* “eficiente” com universo do discurso variando de -3% a +3 %, e que foi dividido em três conjuntos de pontos de saída, como pode ser visto na Figura 3.26.



**Figura 3.25** – Gráficos das variáveis de entrada do controlador *fuzzy* “eficiente” para as válvulas: (a) pressão; (b) frequência; (c) diferença de pressão nos setores.

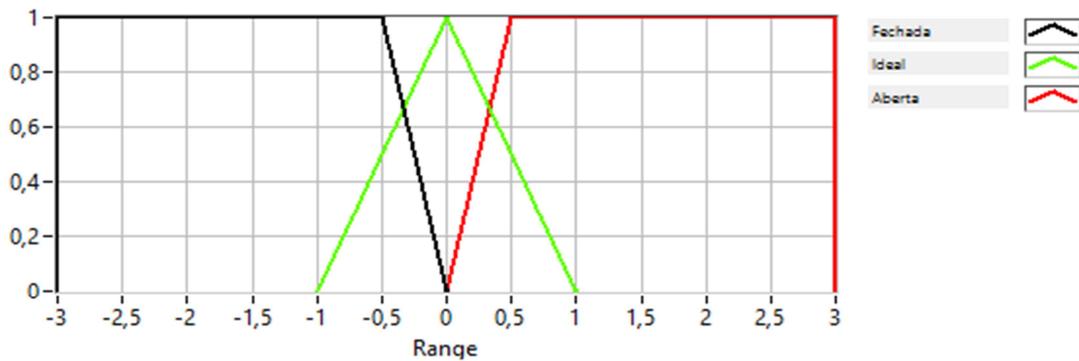


Figura 3.26 – Gráfico da saída do *fuzzy* “eficiente” para as válvulas.

### 3.4.3 Controlador *fuzzy* “eficiente” para a válvula V2

O controlador *fuzzy* aplicado à válvula V2 foi o mesmo que o utilizado em V1, porém sua resposta quanto à estabilidade da variável controlada, a pressão, não foi satisfatória, pois, durante a operação com o controlador *fuzzy* ativado, observaram-se oscilações no valor da pressão em relação à sua referência, o que não ocorreu na válvula V1, que manteve a pressão controlada e estável próximo da referência.

A solução para o problema da oscilação passava por mudanças no projeto do controlador *fuzzy* com aumento do número das variáveis linguísticas, mudanças na base de regras etc., ou, de uma forma mais simplória, com a implantação de um segundo controlador projetado para eliminar apenas a oscilação da pressão. Logo, foi instalado à frente do sinal de saída do *fuzzy* “eficiente” um controlador Proporcional Integral e Derivativo (PID) com esse objetivo. Dessa forma, o controle projetado para V2 ficou sendo uma associação em série de um controlador *fuzzy* mais um controle PID, como pode ser visto no diagrama de blocos da Figura 3.27.

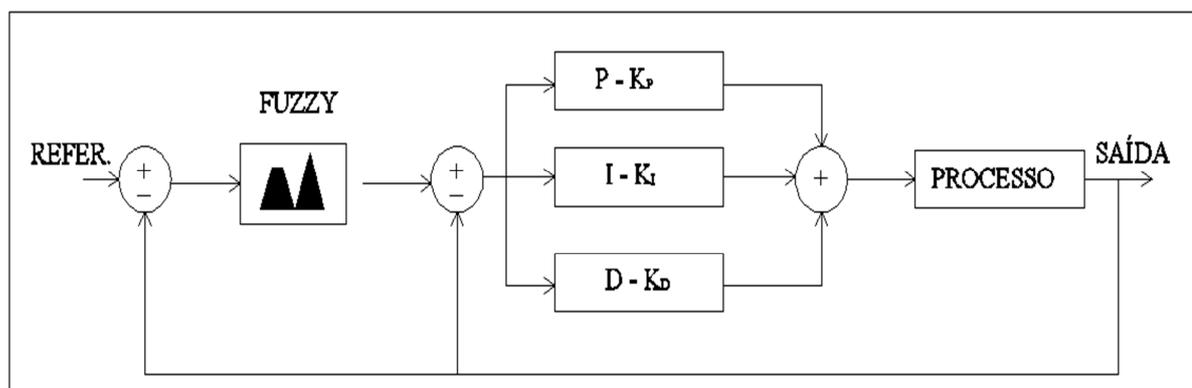


Figura 3.27 – Diagrama de blocos do controlador *fuzzy* mais PID para V2.

A utilização do sistema de controle PID aplicado à válvula V2 não era o objetivo desta pesquisa, e só foi usado em virtude de V2 não ter possibilidade de retornar com a informação de sua posição de abertura/fechamento e apresentar uma instabilidade na variável controlada.

Dessa forma, fez-se necessário aplicar o controle PID para eliminar a oscilação do valor da pressão controlada, como pode ser observado no gráfico da Figura 3.28. Para tal, foi preciso fazer a identificação da planta, onde foi utilizada uma ferramenta disponível na biblioteca *toolbox* do MATLAB<sup>TM</sup> denominada de **ident**.

A função **ident** necessitou das informações das pressões da entrada e saída da válvula para poder gerar uma função de transferência discreta de primeira ordem que representasse matematicamente a válvula (v. Equação 3.1).

$$G(z) = \frac{0,02532}{z-0,9706} \quad (0.1)$$

A transformação da Equação 3.1 em uma função contínua ocorreu aplicando o método de Euler e considerando que  $Z$  foi aproximado para  $1+Ts$ , onde  $T$  é o atraso de tempo da planta, adotado igual a 1. Obteve-se, então, a função de transferência contínua do sistema:

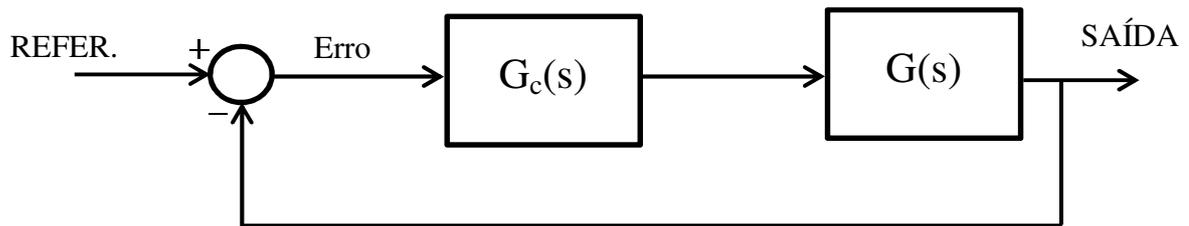
$$G(s) = \frac{0,02532}{s - 0,0394} \quad (0.2)$$

Assim, utilizando o método convencional do controlador PID, tem-se que:

$$G_c(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (0.3)$$

A função de transferência,  $T(s)$ , da planta que apresenta a realimentação vista no diagrama de blocos da Figura 3.28 é dada por:

$$T(s) = \frac{G_c(s).G(s)}{1+G_c(s).G(s)} \quad (0.4)$$



**Figura 3.28** – Diagrama de blocos do controlador PID para a válvula V1.

Substituindo as Equações (3.2) e (3.3) na Equação (3.4), obtém-se:

$$T(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{(1 + 0,02532K_d)s^2 + (0,02532K_p - 0,0394)s + 0,02532K_i} \quad (3.5)$$

O *software* Matlab foi utilizado para calcular os coeficientes do polinômio característico da função de transferência contínua, cujo resultado foi o seguinte:

$$1,005s^2 + 0,2138s + 0,00002632 = 0 \quad (0.6)$$

Verificando a estabilidade do sistema, vimos que os polos de  $T(s)$  estão situados em  $-1,8408 \cdot 10^{-4}$  e  $-0,2126$  do eixo Y. Como ambos apresentaram valores negativos, isso caracteriza que o sistema é estável.

Assim, tendo em vista a Equação 3.6, têm-se que:

$$1 + 0,02532K_d = 1,005$$

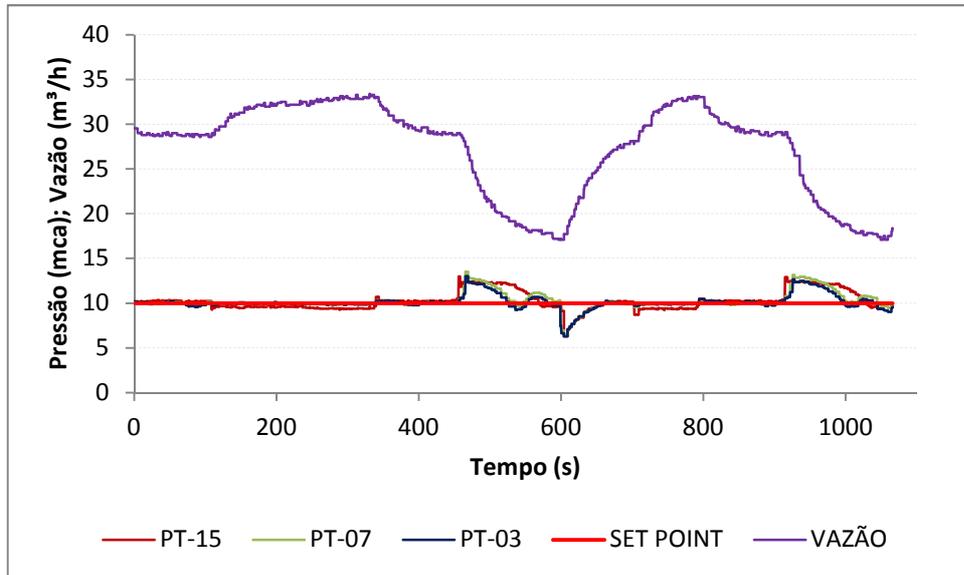
$$0,02532K_p - 0,0394 = 0,2138$$

$$0,02532K_i = 0,00002632$$

donde:

$$K_p = 10, K_i = 0,001 \text{ e } K_d = 0,2.$$

Esses valores de ganho, ao serem aplicados no controlador PID, levaram a válvula a apresentar uma resposta estável da variável controlada, como pode ser visto no gráfico da Figura 3.29.



**Figura 3.29** – Comportamento da pressão do sistema para a vazão máxima.

## CAPÍTULO 4

### METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O experimento, desenvolvido na bancada do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS), da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), apresentou o *layout* de um sistema de abastecimento de água sem a presença do reservatório de distribuição e com um conjunto motor-bomba injetando água diretamente na rede.

Afirma-se que essa bancada simula um sistema real de abastecimento com uma rede de distribuição setorizada, tendo sido dividida em três setores, quais sejam: o Setor A, Setor B e o Setor C, como pode ser visto na Figura 3.1. Os Setores A e B apresentaram duas saídas de água em cada um com uma válvula solenoide e um registro de gaveta instalado nas saídas.

Para o Setor C, por sua vez, só existe um ponto de saída de água que fica com 6 metros acima da cota do nível das demais saídas. Dessa forma, destaca-se que, nesta pesquisa, foi utilizado apenas como um agente de perturbação da estabilidade hidráulica do sistema. Ressalta-se, também, que essas saídas dos Setores A e B podem ser comparadas em um sistema real aos consumidores ligados a rede de distribuição através dos seus ramais.

Estes setores são alimentados com água por intermédio de uma bomba centrífuga que injeta a água diretamente na rede sem passar por reservatórios de distribuição. Ao ponto que esses reservatórios têm, entre outras funções, a de manter constante a altura manométrica da bomba. Na entrada de alimentação dos setores A e B foi instalada uma válvula reguladora de pressão (VRP) com o intuito de colaborar no controle da pressão das saídas dos referidos setores.

Afirma-se, por conseguinte, que esse controle da pressão foi projetado para que a ação de um controlador *fuzzy* desenvolvido fosse aplicado na atuação da regulação da frequência do motor e outro *fuzzy* aplicado nas duas válvulas, para atuar, portanto, controlando a ação de abertura e do fechamento da seção delas.

Sequencialmente, foram aplicados dois modelos de controladores *fuzzy* nessa planta, sendo o primeiro denominado apenas de **controlador *fuzzy***, o qual foi desenvolvido com o objetivo de manter as pressões nas saídas dos setores

próximas de um valor de referência. Contudo, apesar de ter atendido seus objetivos, ele não foi “eficiente” do ponto de vista do consumo de energia elétrica.

O segundo controlador — denominado de **controlador *fuzzy* “eficiente”** —, por sua vez, foi desenvolvido para, da mesma forma que o anterior, controlar as pressões nas saídas dos setores, mas procurando, dessa maneira, minimizar ao máximo o consumo de energia elétrica.

Assim, pode-se afirmar que o experimento foi dividido em dois modelos de metodologia, do tipo (A) e do tipo (B), sendo que o do tipo (A) foi utilizado para descrever a metodologia aplicada com o controlador *fuzzy* que não se preocupou em ser econômico do ponto de vista energético. Já o do tipo (B) descreveu a metodologia utilizada pelo controlador *fuzzy* “eficiente”, que buscou ter um menor consumo de energia elétrica. Ambos os experimentos serão detalhados nos tópicos futuros.

Entretanto, antes de realizar o detalhamento sobre as metodologias de cada controlador *fuzzy* aplicado na presente pesquisa, faz-se necessário descrever, mesmo com brevidade, sobre o comportamento da curva de resposta dos sensores que foram utilizados na planta com o objetivo de realizar o monitoramento das variáveis hidráulicas da pressão e da vazão, quais sejam: os transdutores de pressão e de vazão. Destaque-se que esses componentes necessitaram de uma verificação da curva de resposta para que fosse constatado desvio de suas leituras quando em execução. Esse procedimento foi adotado para todos os sensores de pressão e de vazão instalados na rede, e seus resultados foram apresentados no Apêndice A.

Na sequência, após o ajuste no sinal de saída dos medidores de vazão e da verificação dos desvios de leitura dos transdutores de pressão, passou-se a discutir sobre o procedimento metodológico aplicado no experimento pelos controladores *fuzzy* desenvolvidos para o controle da pressão através das válvulas e do conjunto motor-bomba.

#### **4.1 Abordagem da Metodologia do Tipo (A), Sistema *Fuzzy***

Na abordagem da metodologia tipo (A) para o experimento, foi relatado o uso do sistema *fuzzy* projetado para controlar as pressões nas saídas dos setores. Esse controlador foi dividido em três partes, ficando um controlador aplicado no conjunto

motor-bomba e os outros dois nas válvulas V1 e V2. Como já citado no Capítulo 3, esses controladores foram desenvolvidos com detalhes diferentes para cada válvula, de maneira a aproveitar as características e especificações diferentes de cada uma.

Nesse sentido, a forma como cada controlador atuou para manter a pressão próxima do referencial, bem como o tempo que cada um levou para implementar sua atuação e a sua resposta, serão assuntos tratados neste Capítulo. Outra abordagem foi a metodologia usada no experimento que seguiu o mesmo roteiro já citado nos outros experimentos. Assim, deu-se início à operação do sistema para a retirada do ar que estava acumulado no interior da tubulação. Essa operação se iniciou com o conjunto motor-bomba ligado na sua velocidade nominal. É imperativo relatar que todos os valores de velocidade apresentados neste trabalho são convertidos na frequência de alimentação, cujo valor é imposto pelo inversor de frequência ao motor, lembrando que a frequência da rede elétrica que alimentou o quadro de acionamento do motor não sofre alteração, permanecendo constante em 60 Hz.

Após a retirada do ar do interior da tubulação, foram ajustados os registros instalados nas saídas dos setores A e B, de forma a deixar a pressão calibrada na média de 13 mca em todas as quatro saídas desses setores. Na sequência da operação, foram ativados os controladores *fuzzy* das válvulas e do conjunto motor-bomba, sendo que essa ativação seguiu uma metodologia que teve a divisão do experimento em três partes, sendo que a primeira parte deixou ativado apenas o controlador *fuzzy* das duas válvulas, ficando inativo o da bomba.

No segundo momento, foi ativado o controlador *fuzzy* do conjunto motor-bomba e foram desativados os dois controladores das válvulas. Finalmente, no terceiro momento do experimento, foram ativados todos os controladores, das válvulas e da bomba, atuando simultaneamente no controle da pressão do sistema. Assim, o sistema iniciou a sua operação com a bomba na velocidade nominal, apresentando uma vazão de 33 m<sup>3</sup>/h e as pressões médias de 13 mca nos quatro pontos de saída, quando o sistema sofreu uma perturbação das variáveis hidráulicas com o fechamento das válvulas solenoides VS-2 e VS-3. Esse fechamento levou a uma modificação no valor da demanda de água, alteração do valor da pressão nas saídas da rede e no valor da potência elétrica registrada. Na continuação desse experimento, foram ativados os controladores, seguindo a metodologia já descrita anteriormente, a qual se iniciou pela ativação do controlador apenas nas válvulas.

#### 4.1.1 Experimento (A), Controlador *Fuzzy* Aplicado só nas Válvulas

A metodologia aplicada neste experimento utilizou o controlador *fuzzy* ativado apenas nas duas válvulas, já que o controlador da bomba estava desativado e ela ficou operando na velocidade nominal do motor. Nesse contexto, o trabalho se iniciou quando o sistema já se encontrava com a pressão estabilizada, próxima de 10,2 mca, controlada pela ação das duas válvulas, quando foi aberta a válvula solenoide VS-5 do setor C — v. Figura 3.1.

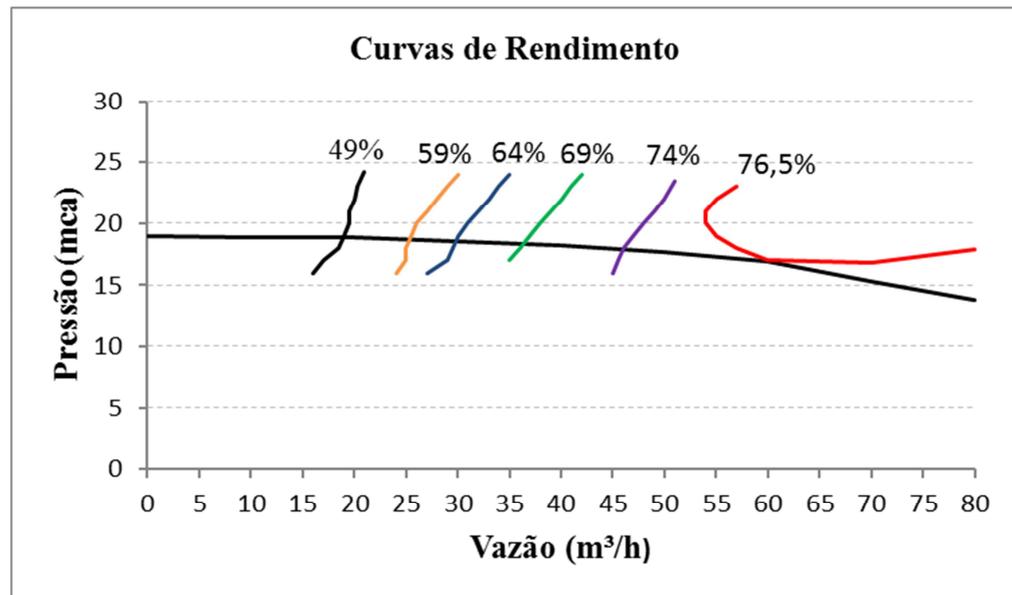
Essa abertura do setor C foi utilizada no experimento apenas como um agente perturbador da estabilidade hidráulica da planta, provocando o aumento da vazão e, conseqüentemente, a diminuição da pressão nos pontos medidos, principalmente nos pontos do setor A PT-15 e PT-8, isso porque a derivação da tubulação que alimenta o setor C é feita da mesma tubulação que alimenta o setor A e, por isso, há uma grande dependência hidráulica entre eles. A abertura do setor C levou a um aumento na demanda de água e na potência elétrica. Esses valores vão ser apresentados no capítulo dos resultados, onde serão mais detalhados.

Na seqüência do experimento com o controlador *fuzzy* aplicado só nas válvulas, não foi possível diminuir a velocidade nominal do motor, visto que a bomba operava na velocidade nominal. Assim, essa ação não se configurou em uma economia de energia, pois a potência ativa continuou praticamente constante nessa operação da bomba. Na seqüência, foi aplicada ao experimento outra intervenção com o fechamento das válvulas solenoides VS-2 e VS-3 e mantendo o setor C também fechado. Essa mudança no sistema deixou apenas duas saídas abertas, sendo uma para cada setor, e caracterizou como sendo a operação com a menor vazão consumida na rede.

A próxima perturbação na vazão consumida veio com a abertura das válvulas solenoides VS-2, VS-3 e VS-5. Essa abertura com as válvulas deixou o sistema operando com a mesma demanda do início do funcionamento, ou seja, a vazão máxima para atender a rede. Essa mesma seqüência operacional que se iniciou com o sistema operando nas vazões e pressões estabilizadas e controladas só pelas válvulas foi repetida, desta feita com o controlador *fuzzy* ativo apenas para o conjunto motor-bomba, mantendo o controlador *fuzzy* desativado nas válvulas.

É importante lembrar que os dados de potência elétrica foram registrados pelo multimedidor de grandezas elétricas e armazenada no banco de dados do

supervisório quando a bomba estava operando sob a ação desse controle. O valor da potência elétrica está relacionado indiretamente com o rendimento do conjunto motor-bomba, ou seja, quanto maior o rendimento, menor será a potência, e vice-versa. Esse rendimento é calculado pelo produto dos rendimentos do motor e da bomba. Na Figura 4.1, são apresentadas as curvas de rendimento do conjunto motor-bomba, que variaram entre 49 % e 76,5%.



**Figura 4.1** – Gráfico com as curvas de rendimento da bomba.

De acordo com as curvas de rendimento apresentadas na Figura 4.1, pode-se constatar que, para operações com valores das vazões menores do que 20 m³/h, implicam que o conjunto motor-bomba irá operar numa faixa de baixo rendimento quando comparada com o rendimento da bomba para vazões acima de 30 m³/h. É importante salientar que essa faixa de rendimento é válida somente para operações do conjunto motor-bomba na velocidade nominal do motor, mas, para valores diferentes, de acordo com Tsutiya (2004), o rendimento de um conjunto motor-bomba tende a decrescer com a diminuição da rotação, mas, na faixa de velocidade de  $\pm 20\%$ , a curva de rendimento do conjunto praticamente não varia.

Segundo Andrade Filho et al. (2012), por definição, o *rendimento da bomba* é dado pela relação entre a potência hidráulica e a potência mecânica fornecida pelo motor. Já a *potência motriz*, ou *potência mecânica*, é fornecida pelo eixo do motor à bomba, sendo sempre maior que a potência hidráulica. E, finalmente, a potência

elétrica que é fornecida ao motor e é convertida em potência mecânica é determinada por:

$$P_e = v \cdot i \cdot FP \cdot \eta \quad (0.1)$$

onde  $P_e$  é a potência elétrica em kW,  $v$  é o valor da tensão alternada em volts,  $i$  é a corrente elétrica em ampères,  $FP$  é o fator de potência, definido como o cosseno do ângulo formado entre a potência ativa e a potência aparente no triângulo retângulo das potências, e  $\eta$  é o rendimento do motor relacionando a potência mecânica com a elétrica. Normalmente, o valor de  $\eta$  é fornecido pelo fabricante do motor através de catálogo.

Neste experimento, não foi considerada a variação no rendimento do motor, pois o seu acionamento é feito a partir de um inversor de frequência. Segundo Mascheroni (S.d., p. 54):

O funcionamento dos inversores de frequência com controle escalar está baseado numa estratégia de comando chamada 'V/F constante', que mantém o torque do motor constante, igual ao nominal, para qualquer velocidade de funcionamento do motor.

#### 4.1.2 Experimento (A), controlador *fuzzy* no conjunto motor-bomba

O experimento realizado com o controlador *fuzzy* aplicado apenas no conjunto motor-bomba, mantendo as duas válvulas totalmente abertas sem influenciar na ação do controle da pressão, será mostrado a seguir.

Vale ressaltar que o sistema se encontrava operando com o controlador *fuzzy* ativado apenas no conjunto motor-bomba com o valor das pressões já controlado quando foram fechados os registros de saída dos setores A e B, sendo um registro em cada setor.

Com esse fechamento, alterou o equilíbrio hidráulico da planta, provocando a diminuição da potência elétrica e da vazão. Dessa forma, a variação da pressão foi corrigida para a referência, e o tempo de atuação para correção do erro da pressão para este controlador foi menor que o tempo apresentado para a mesma situação operacional quando foram ativados apenas os controladores das válvulas, e a bomba se encontrava ligada com a velocidade constante na frequência de 60 Hz.

A próxima perturbação ao sistema veio com a abertura das válvulas solenoides de todos os três setores A, B e do C. Essa perturbação provocou aumento na potência e na vazão. Já para a pressão, o efeito foi contrário, diminuiu.

A mesma sequência de abertura e de fechamento dos registros de saídas dos setores A, B e C, quando o sistema se encontrava operando apenas sob a ação do controlador do conjunto motor-bomba, será repetida no experimento seguinte, através dos controladores ativos na bomba e nas duas válvulas Simultaneamente.

#### **4.1.3 Experimento (A), controlador *fuzzy* na bomba e nas válvulas**

A metodologia empregada nessa etapa do experimento utilizou sistema *fuzzy* ativado nas válvulas e na bomba, sendo controlados simultaneamente os seus referidos atuadores na busca para manter constante a pressão na referência.

Neste contexto, o experimento se inicia com o sistema operando e as pressões nos quatro pontos de saídas da rede já controladas próximas da referência. Em seguida foi aberta a VS-5 na saída do setor C que provocou alteração nos valores hidráulicos e elétricos do sistema. Essa mudança foi corrigida pela ação dos controladores que retornaram com os valores das pressões para o valor de referência.

A próxima mudança a ser implantada ocorreu com o fechamento dos dois registros dos setores A e B, sendo um em cada setor, sendo que este fechamento provocou, por sua vez, a diminuição da vazão e o aumento das pressões. Em seguida as pressões retornaram para a referência novamente por intermédio do controlador.

A nova perturbação ocorreu com a abertura dos registros dos setores A e B simultaneamente. Afirma-se, por conseguinte, que essa abertura elevou os valores da vazão e da potência, já as pressões sofreram uma diminuição, mas retornaram para o valor de referência por intermédio da ação dos controladores *fuzzy*.

Afirma-se ainda que os controladores *fuzzy* desenvolvidos para atuar nas duas válvulas e na bomba controlando a pressão nos quatro pontos de saída dos setores A e B alcançaram um dos objetivos desta tese que foi o de manter a pressão controlada em 10 mca nos pontos de saída da rede de distribuição, mesmo que a demanda de água fosse alterada. É importante salientar também que esses controladores, quando aplicados individualmente, apresentaram um desempenho

com tempos diferentes de atuação. Por exemplo: o controlador *fuzzy* das válvulas levou um tempo maior do que o que foi gasto para a mesma correção feita pela ação do controlador *fuzzy* da bomba.

A justificativa para a atuação do controlador da válvula ser mais lenta que a do conjunto motor-bomba está, pois, no fato de o tempo de ação do controle da válvula fechando ou abrindo levar mais de 5 segundos para corrigir uma pequena variação da pressão, de apenas 0,5 mca, enquanto que, para o controlador da bomba, essa correção era feita em aproximadamente 0,5 segundo. Isso porque a resposta na frequência é implementada na ordem de 0,25 segundo — portanto, mais rápido que o tempo das válvulas.

Outro ponto a ser destacado é que, nas pressões monitoradas nos quatro pontos de saída dos setores, o controlador *fuzzy* da bomba teve sua atuação baseada no menor valor apresentado. Assim, se em apenas uma delas fosse alcançado o valor de referência e, nos outros três, não, o controlador definia aquele ponto de operação como sendo o ideal e o mantinha controlado mesmo que nos demais pontos a pressão se encontrasse acima do valor.

Esses controladores da bomba e das válvulas, quando aplicados em conjunto, não se mostraram econômicos, ao ponto que deixou a variável controlada da pressão oscilante em torno do valor de referência, uma vez que eles apresentaram o tempo de resposta diferente para cada atuador, repercutindo na eficiência do controle dessa variável.

Diante dessa ineficiência de ação, foi projetado um novo controlador para atuar na bomba e nas válvulas com o objetivo de controlar as pressões nos dois setores para próximo da referência e mantendo-as estáveis.

#### **4.2 Discussões do Experimento (B), Sistema *Fuzzy* “Eficiente”**

Na continuação do experimento, desta feita buscando operar o sistema com mais eficiência energética que no sistema *fuzzy* anterior, foi desenvolvido um novo controlador *fuzzy* “eficiente” para as duas válvulas e mantendo o mesmo controlador *fuzzy* projetado para a bomba. Isso porque esse controlador apresentou eficiência energética e estabilidade do valor de pressão controlado quando operou isoladamente sem as válvulas atuando.

Este controlador *fuzzy* “eficiente”, projetado para atuar nas válvulas, foi desenvolvido para minimizar o consumo de energia elétrica apresentado no experimento anterior. Assim, ele utilizou como parâmetro em uma de suas entradas o valor da frequência aplicada ao motor.

Essa frequência pode ser traduzida como a eficiência elétrica do motor nesse controlador, uma vez que o torque do motor é considerado constante quando o motor é acionado por inversor de frequência. Logo, adotou-se o valor do catálogo do fabricante WEG e a potência mecânica do motor,  $P_m$ , disponível na ponta do eixo, pode ser calculada como:

$$P_m = \frac{N.T}{9549,2965} \quad (0.2)$$

onde  $P_m$  é a potência mecânica do motor em kW,  $N$  é a velocidade do eixo do motor em rpm e  $T$  é o torque do motor em Nm.

Já a velocidade do motor pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$N = \frac{120f}{p} (1 - s) \quad (0.3)$$

onde  $N$  é a velocidade do eixo do motor assíncrono em rpm,  $f$  é a frequência de alimentação da rede elétrica em Hz,  $p$  é o número de polos do motor e  $s$  é o valor do escorregamento, que é a diferença percentual entre a rotação do rotor com a velocidade do campo girante em motor de indução.

Ressalte-se que essa análise será discutida mais à frente, no Capítulo 5, no qual será feita uma comparação entre os valores das potências elétricas registradas pelo multimedidor para os dois modelos de operação, sendo um com o conjunto motor-bomba funcionando na velocidade nominal constante de 1720 rpm e a segunda análise, com a velocidade variando entre 1.146 rpm e 1.720 rpm. De igual modo, essa velocidade será, doravante, apresentada em função da frequência com que o inversor alimenta o motor. Assim, vai ficar variando entre 40 Hz e 60 Hz.

É importante frisar também que serão utilizados no experimento com a velocidade variável os dois modelos de controladores *fuzzy* aplicados nas válvulas. Assim, a avaliação feita entre esses modelos de operação irá comparar os resultados dos valores da pressão, potências e tempo de correção das pressões

para a referência com o conjunto nas mesmas condições operacionais, na faixa de frequência entre 40 Hz e 60 Hz.

Além disso, como no experimento anterior, as saídas dos setores foram alteradas com o fechamento parcial das válvulas solenoides, levando a uma diminuição no valor da demanda de água e, conseqüentemente, a um aumento nos valores das pressões nas saídas da rede. Dessa forma, foi utilizada a mesma metodologia aplicada anteriormente com o sistema *fuzzy*, agora aplicada com o sistema *fuzzy* “eficiente”, que inicialmente foi aplicado só nas válvulas, na sequência só na bomba e mantendo os solenoides abertos, e, finalmente, foi aplicado simultaneamente nas válvulas e na bomba.

#### **4.2.1 Experimento (B), sistema *fuzzy* “eficiente” aplicado só nas válvulas**

Com o novo sistema *fuzzy* “eficiente” aplicado apenas nas duas válvulas e mantendo a bomba ligada na frequência constante de 60 Hz, não foi possível obter resultados satisfatórios. Isso porque, no projeto desse novo controlador, foram criadas regras que estão associadas à frequência do motor, de maneira que foi criada uma dependência de atuação das válvulas para valores de frequência do motor que estivessem abaixo de 50 Hz e, acima dessa frequência, as válvulas, como premissa, tinham de manter-se totalmente abertas.

Essas regras foram idealizadas partindo-se do conhecimento da operação da rede, com o qual se observou que as válvulas, quando estavam totalmente abertas e o controlador *fuzzy* da bomba estava atuando, registravam potências do motor menor do que o valor da potência para essa mesma operação quando o sistema era controlado simultaneamente pelas válvulas e pela bomba.

Esse aumento na potência se justificou porque as válvulas, quando estavam controlando na situação da frequência acima de 50 Hz, provocavam uma grande perda de carga localizada. Afirma-se, então, que essa perda de carga vai de encontro a um dos objetivos desta pesquisa que é o de ter o controle da pressão mantendo a eficiência energética do sistema.

Mas, como já foi mencionado, se a frequência se encontrasse acima dos 50 Hz, as duas válvulas não poderiam atuar no controle da pressão. Então, nessa aplicação, quando a bomba operou com a velocidade constante em 60 Hz, não foi possível fazer nenhum registro da atuação do controlador das válvulas.

Dessa forma, a pesquisa foi passada para a fase seguinte, na qual teve o controlador *fuzzy* “eficiente” aplicado apenas no controle de rotação do motor.

#### **4.2.2 Experimento (B), sistema *fuzzy* “eficiente” Aplicado no conjunto motor-bomba**

No experimento realizado com o controlador *fuzzy* “eficiente” aplicado apenas no conjunto motor-bomba, mantendo as duas válvulas V1 e V2 totalmente abertas, sem influenciar nesta ação, apresentou um comportamento dos seus valores de potência, vazão, pressão e tempo de correção da pressão, idênticos aos já citados na subseção 4.1.2 Experimento (A), porque o controlador *fuzzy* aplicado na modulação do conjunto motor-bomba tinha a mesma estrutura interna de entradas, base de regras e saídas que foram utilizadas no Experimento (A).

#### **4.2.3 Experimento (B), sistema *fuzzy* “eficiente” na bomba e nas válvulas**

A metodologia empregada neste experimento utilizou os controladores *fuzzy* “eficientes” aplicados nas válvulas e no conjunto motor-bomba, muito embora seja válido ressaltar que esse uso simultâneo dos controladores possibilitou que as válvulas só fossem utilizadas no processo de controle das pressões quando o controlador da bomba não estivesse mais condições de atuar — pois a pressão já tinha alcançado o valor de referência em qualquer um dos quatro pontos — e a frequência do motor se encontrasse com valores menores de 50 Hz. Essa condição ocorreria quando, por exemplo, a pressão atingisse o valor da referência em qualquer uma das quatro saídas da rede e nas demais estivessem com o valor de 1 mca acima da pressão de referência. Nesse contexto, será mostrado, a seguir, um exemplo de aplicação dessa lógica: o sistema estava operando na frequência de 60 Hz e as pressões nos setores estavam em 13 mca. Nesse instante, foram ativados simultaneamente os controladores das válvulas e da bomba, instante em que iniciaram a execução da lógica de controle para a velocidade e para as válvulas. De imediato, a frequência da bomba começou a diminuir e, conseqüentemente, também a vazão e as pressões das saídas, até que esses valores de pressão alcançaram o valor de referência.

Assim, quando a pressão atingiu o valor de referência num ponto de saída da rede, o controlador que estava aplicado na bomba passou a registrar esse valor de

velocidade como sendo o ponto de operação adequado, mantendo a velocidade constante nesse último valor registrado. No entanto, nessa mesma operação, ocorreu que, num setor, o valor da pressão ficou acima da referência e também a frequência do motor se encontrava controlada com valor menor ou igual a 50 Hz.

Logo, o controlador da válvula desse setor da pressão excedente atuou fechando sua seção, de forma que o excesso dessa pressão foi transferido para o outro setor. Essa transferência provocou ainda a elevação do valor da pressão no outro setor que já se encontrava controlado, fazendo-a aumentar. Nesse sentido, foi possível que o controlador da bomba diminuísse ainda mais a frequência do motor até corrigir totalmente as pressões nos dois setores.

A próxima mudança na estabilização dos dados hidráulicos da planta ocorreu com a abertura do registro de saída do setor C. Essa abertura provocou alteração no equilíbrio hidráulico, aumentando a vazão do sistema e diminuindo as pressões.

A próxima perturbação na planta ocorreu com o fechamento das duas válvulas solenoides dos setores A e B, sendo uma em cada setor. Esse fechamento provocou a diminuição da vazão e da potência. Já nas pressões, ocorreu o aumento dos valores, que foram corrigidos para a referência pela ação dos controles da bomba e das válvulas.

Na sequência das mudanças na estabilidade da planta, foi fechado novamente o solenoide do setor C, provocando ainda mais diminuição da vazão e da potência. Já nos valores das pressões, não foram observados aumentos significativos.

Com o sistema operando na vazão mínima e as pressões estabilizadas, foi provocada, na sequência, uma nova perturbação na vazão do sistema, desta feita com a abertura simultânea das válvulas solenoides VS-2 e VS-3. Logo, os controladores atuaram e corrigiram os valores das pressões para o valor de referência.

Afirma-se que esses controladores da bomba e das válvulas, quando aplicados em conjunto, se mostraram mais “eficientes” que os anteriores, pois deixaram a variável controlada da pressão em torno do valor de referência num tempo de resposta menor que no primeiro controlador *fuzzy* e com valores de potência sempre menores. Como já citado anteriormente, a diminuição dos valores de potência só ocorreu porque as válvulas só atuavam controlando a pressão a

jusante, quando a bomba já apresentava a menor velocidade para o sistema e não tinha mais como reduzir a pressão. Só assim era possível a atuação das válvulas, não provocando perda de carga localizada, apenas um ajuste fino no controle da pressão.

Um segundo ponto a ser destacado é que o valor da pressão em qualquer das quatro saídas não ficou acima da referência porque a ação do controlador da bomba e/ou do controlador das válvulas buscou sempre corrigir esse valor para a referência e deixar os quatro pontos equilibrados com o mesmo valor de pressão, o que não ocorreu na atuação com o controlador *fuzzy*.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS

#### 5.1 Introdução

Neste Capítulo, serão mostrados os resultados obtidos para operação do sistema em malha aberta e, depois, sob a ação do sistema *fuzzy*, que atuou nas duas válvulas e na bomba para controlar a pressão nos ramais de saída da rede de distribuição.

A metodologia utilizada no experimento definiu que a bomba operasse na faixa de vazão entre os valores de 13 m<sup>3</sup>/h, descrita aqui como a vazão mínima em que o sistema pode operar, e depois próxima de 35 m<sup>3</sup>/h, considerada como a maior vazão do sistema a ser distribuída.

Essa faixa de vazão de 13 m<sup>3</sup>/h a 35 m<sup>3</sup>/h possibilita que a bomba atenda a toda a faixa de demanda de água e de pressão do sistema sem comprometer a eficiência do controle. Assim, tem-se a descrição dos resultados dos seguintes experimentos:

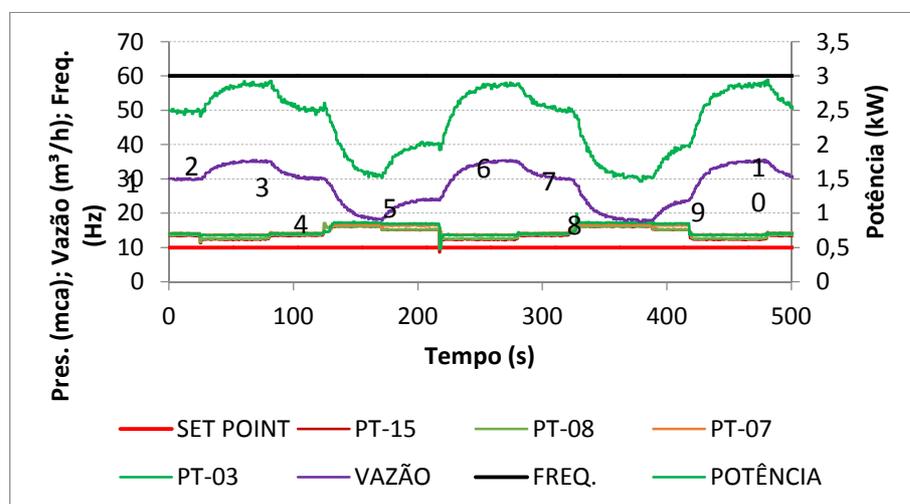
- ✓ Operação do sistema em malha aberta para a vazão máxima e mínima;
- ✓ Operação da rede sob a ação do controlador *fuzzy* atuando nas válvulas e na bomba simultaneamente para as vazões mínima e máxima;
- ✓ Finalmente, a operação da rede com o sistema *fuzzy* “eficiente” atuando nas vazões mínima e máxima.

#### 5.2 Operação em Malha Aberta para Máxima Vazão

O primeiro experimento foi executado na faixa de valor da máxima vazão de 35 m<sup>3</sup>/h e com o sistema em operação sem ação do controlador. Nesse teste, foi variado o valor da demanda do sistema com a abertura e o fechamento dos solenoides nas saídas individuais, nos dois setores A e B e também com a saída do setor C. Em seguida, foram feitos novos testes seguindo a mesma metodologia aplicada a esse experimento, desta feita para o menor valor da faixa de vazão.

Na sequência, foi repetido o mesmo procedimento dos experimentos anteriores, porém com o sistema em operação sob a ação dos controladores *fuzzy* aplicados nas VRPs e no conjunto motor-bomba.

Assim, iniciou-se o primeiro teste com a operação de bombeamento do sistema para a faixa de maior vazão e o conjunto motor-bomba funcionando na sua velocidade máxima, que é de 60 Hz. Essa operação demorou cerca de 5 minutos antes de iniciar a coleta dos dados. Isso porque foi necessário extrair o ar que fica armazenado no interior da tubulação da rede quando o sistema está parado e a canalização vazia. Assim, o sistema já se encontrava operando sem ar na rede, como pode ser observado no ponto 1 do gráfico da Figura 5.1, quando foi feita a primeira perturbação na planta. Essa perturbação alterou o valor da demanda de água nos setores provocada pela abertura do solenoide VS-5 localizado na saída do setor C. Com essa variação de demanda, ocorreu uma diminuição da pressão, o que pode ser observado no ponto 2 do gráfico da Figura 5.1. Já a demanda, que estava em 30 m<sup>3</sup>/h, passou para 35 m<sup>3</sup>/h. Essa mudança influenciou diretamente nos valores das pressões monitoradas nos quatro pontos dos setores A e B. As pressões, que eram aproximadamente 14 mca, mudaram, apenas no setor A, para próximo de 13 mca e, no setor B, se mantiveram na mesma média de 14 mca.



**Figura 5.1** – Gráfico das variáveis hidráulicas e elétricas para operação em malha aberta na configuração da vazão máxima.

A diminuição das pressões no setor A se deu em função de a proximidade do ponto de derivação que alimenta o setor C ser na mesma tubulação que atende ao setor A.

A frequência aplicada ao motor através do inversor de frequência, por sua vez, era constante em 60 Hz, uma vez que ela não podia variar, pois o sistema

operava em malha fechada — portanto, sem a ação do sistema *fuzzy*. Quanto à potência elétrica do motor, ressalte-se que, neste experimento, foi registrado um aumento de 0,4 kW, passando de 2,48 kW para 2,88 kW, ou seja, aumentou em 16% quando comparado aos valores da operação com o controlador *fuzzy* ativo.

O sistema estava estabilizado na demanda máxima de 35 m<sup>3</sup>/h quando foi fechada a VS-5, com a saída do setor C provocando a diminuição da vazão, que pode ser observada no ponto 3 do gráfico da Figura 5.1. Com esse fechamento, ocorreu a mudança na vazão, que diminuiu para 30 m<sup>3</sup>/h nas pressões do setor A, as quais voltaram para o valor médio de 14 mca e, finalmente, na potência que diminuiu para 2,48 kW, atingindo o valor inicial.

Na sequência do experimento, foi perturbada novamente a planta com o fechamento dos solenoides VS-2 e VS-3. Assim, o sistema ficou operando apenas com duas saídas abertas, uma em cada setor, o que provocou a alteração do valor da vazão, como pode ser observado no ponto 4 do gráfico da Figura 5.1. Essa alteração implicou uma diminuição da vazão de 12 m<sup>3</sup>/h, o equivalente a 40%, ficando estável em 18 m<sup>3</sup>/h, e as pressões nos quatro pontos de saída ficaram com o valor médio de 16,5 mca. Este valor de pressão é próximo ao valor máximo com que a bomba pode operar. E, finalmente, o valor da potência elétrica foi reduzido em 37,5%, ou seja, saiu de 2,48 kW para 1,55 kW.

Como já foi mencionado, a frequência, durante todo o experimento, se manteve constante no valor de 60 Hz, porque a bomba estava operando sem a ação do controlador *fuzzy*, fato que manteve o valor da frequência constante.

A próxima perturbação do experimento foi abrir novamente o setor C com a VS-5, mas mantendo as duas saídas VS-2 e VS-3 dos setores A e B fechadas. Essa modificação provocou o aumento de 5 m<sup>3</sup>/h no valor da vazão, passando de 18 m<sup>3</sup>/h para 23 m<sup>3</sup>/h. As pressões nos pontos de saída também foram alteradas, de forma que, no setor A, ficaram, em média, de 15,1 mca e no setor B, em média, de 16,4 mca.

Vale ressaltar que essa diferença entre os valores das pressões dos setores permaneceu em virtude da proximidade do ponto de derivação dos setores C e A, como já foi explicado. E o valor da potência aumentou em 0,45 kW, passando de 1,55 kW para 2,0 kW.

A próxima perturbação aplicada na planta foi a de abrir as duas saídas, uma em cada setor, de forma que culminou no aumento da vazão. Esse aumento pode ser observado no ponto 6 do gráfico da Figura 5.1. O valor da vazão aumentou em 12 m<sup>3</sup>/h, ou seja, mais de 52%, passando de 23 m<sup>3</sup>/h para 35 m<sup>3</sup>/h. Já as pressões também foram alteradas, ficando no setor A, em média, de 12,4 mca, e no setor B, em média, de 13,5 mca, permanecendo com a mesma diferença entre os setores, como já foi explicado, por motivo da abertura do setor C. E o valor da potência também aumentou em 0,88 kW, passando de 2,0 kW para 2,88 kW.

As perturbações na planta que se seguiram, as quais podem ser observadas nos pontos 7, 8, 9 e 10, do gráfico da Figura 5.1, podem ser relacionadas com outros pontos já comentados, de forma que o ponto 7 pode ser relacionado com os resultados obtidos no ponto 3, o ponto 8 idêntico ao 4, o ponto 9 idêntico ao 5 e, finalmente, o ponto 10 idêntico ao ponto 6 do mesmo gráfico.

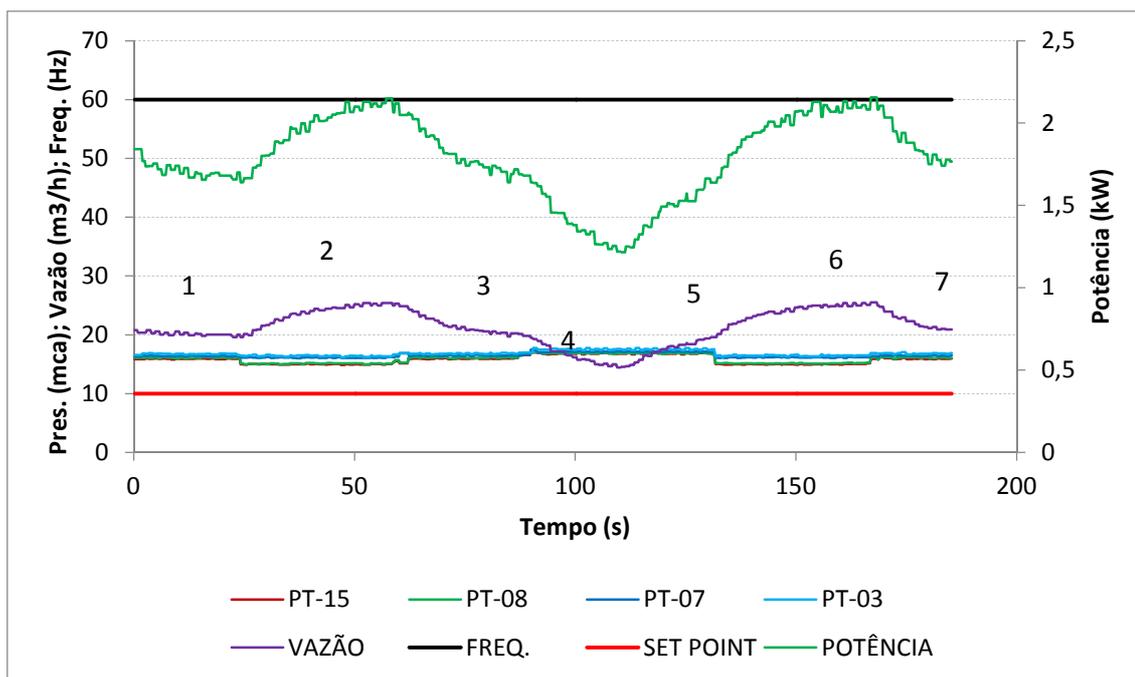
### **5.3 Operação em Malha Aberta para Vazão Mínima**

Na continuidade do experimento, tem-se a resposta do sistema à sua operação na condição de vazão mínima. As variáveis hidráulicas e elétricas que estão presentes no gráfico na Figura 5.2 serão analisadas através dos pontos 1 a 7.

No ponto 1, observa-se que o sistema estava operando sem a presença de ar na rede, pois não apresentava mais grandes oscilações na vazão. Esta, por sua vez, se encontrava com o valor de 20 m<sup>3</sup>/h quando foi aberto o solenoide VS-5 do setor C. Logo, a vazão aumentou de 20 m<sup>3</sup>/h para 25,3 m<sup>3</sup>/h.

Essa mudança na demanda influenciou, por conseguinte, nos valores das pressões monitoradas nos quatro pontos dos setores A e B, ao ponto que elas estavam em média de 16 mca e sofreram mudança no setor A para próximo de 15 mca, e no setor B permaneceu, em média, de 16 mca.

A diferença de 1 mca nas pressões do setor A para o setor B se deu em função da abertura do setor C. Já a frequência aplicada ao motor através do inversor de frequência era constante em 60 Hz, uma vez que ela não podia variar, porque o sistema operava sem a ação do controlador *fuzzy*. Já a potência elétrica do conjunto motor-bomba registrada para esse ponto de operação também sofreu alteração, pois aumentou em 0,43 kW, ou seja, passou de 1,69 kW para 2,12 kW.



**Figura 5.2** – Gráfico das variáveis hidráulicas, sistema sem controle, vazão mínima.

No ponto 3 do gráfico da Figura 5.2, observa-se que o sistema foi perturbado com o fechamento de VS-5, o que provocou a diminuição da vazão. Esse fechamento acarretou a mudança na vazão, que apresentou o valor de 25,3 m<sup>3</sup>/h e diminuiu para 20,3 m<sup>3</sup>/h, e nas pressões dos setores A e B, que voltaram para o valor médio de 16 mca. Já a potência diminuiu seu valor, retornando para 1,69 kW.

Na continuação do experimento, foram fechados os solenoides VS-2 e VS-3, permanecendo com a saída do setor C também fechada. O valor da vazão reduziu de 20,3 m<sup>3</sup>/h para 15 m<sup>3</sup>/h, como pode ser observado no ponto 4 do gráfico da Figura 5.2.

As pressões nos setores ficaram, em média, em 17,5 mca, e a potência ativa do conjunto motor-bomba reduziu de 1,69 kW para 1,25 kW.

A etapa seguinte do experimento iniciou com as aberturas individuais dos setores A e B, o que provocou mudanças no comportamento hidráulico do sistema. Essa mudança pode ser observada no ponto 5 do gráfico da Figura 5.2. Assim, o valor da vazão voltou a aumentar, saindo de 15 m<sup>3</sup>/h para 20,0 m<sup>3</sup>/h, e as pressões nos quatro pontos de saída dos setores também sofreram alterações, passando para 16,9 mca, em média, e, finalmente, a potência elétrica registrada voltou a aumentar, saindo de 1,25 kW para 1,70 kW.

Na sequência do experimento, foi aberta ainda VS-5, saída do setor C, e, assim, ficaram todas as saídas abertas. Essa nova configuração operacional pode ser identificada no ponto 6 do gráfico da Figura 5.2. Destaque-se, então, que, nesse momento, foi possível verificar que o valor da vazão aumentou, passando de 20 m<sup>3</sup>/h para 25,3 m<sup>3</sup>/h. Já os valores das pressões ficaram diferentes entre os setores A e B. Como já foi citado anteriormente, a saída do setor C influencia nessa variação da pressão. Dessa forma, os valores das pressões no setor A ficaram, em média, em 15,9 mca e no setor B, em 16,6 mca. Nesse prisma, constatou-se que o valor da potência elétrica registrada para o conjunto motor-bomba aumentou de 1,70 kW para 2,10 kW.

Na sequência, a perturbação na planta que se seguiu, a qual pode ser observada no ponto 7, foi relacionada com as mudanças apresentadas no ponto 3 do mesmo gráfico, e que já foram comentadas anteriormente.

#### **5.4 Operação com Atuação do Sistema *Fuzzy***

Os experimentos seguintes se referem ao sistema em operação sob a ação do sistema *fuzzy*, que foi aplicado nas duas válvulas (V1 e V2) e, também, no conjunto motor-bomba. Esse controlador foi eficaz para manter a pressão próxima à referência, mas, por outro lado, apresentou uma deficiência para com o valor da potência elétrica do conjunto motor-bomba, pois sua atuação não conseguiu diminuir a frequência imposta ao motor quando a vazão do sistema era diminuída. Isso porque as válvulas reguladoras apresentaram um tempo de resposta lento quando comparado ao tempo de resposta do inversor de frequência, que foi o elemento responsável pelo controle da velocidade do conjunto motor-bomba.

#### **5.5 Sistema *Fuzzy* Aplicado nas Válvulas e Bomba na Máxima Vazão**

O sistema *fuzzy* desenvolvido teve como objetivo controlar e manter constantes as pressões nas quatro saídas dos setores A e B, próximas de um valor de referência. Esse controlador apresentou um bom desempenho no controle da pressão, porém a ação dele, voltada para o desempenho energético, não se mostrou tão eficiente, uma vez que a frequência permanecia sempre no valor máximo de 60 Hz.

Os testes executados com o sistema *fuzzy* atuando no controle da pressão, para o sistema configurado para a maior vazão distribuída, podem ser apresentados

no gráfico da Figura 5.3, a seguir, no qual são exibidas as variáveis hidráulicas e elétricas dessa operação.

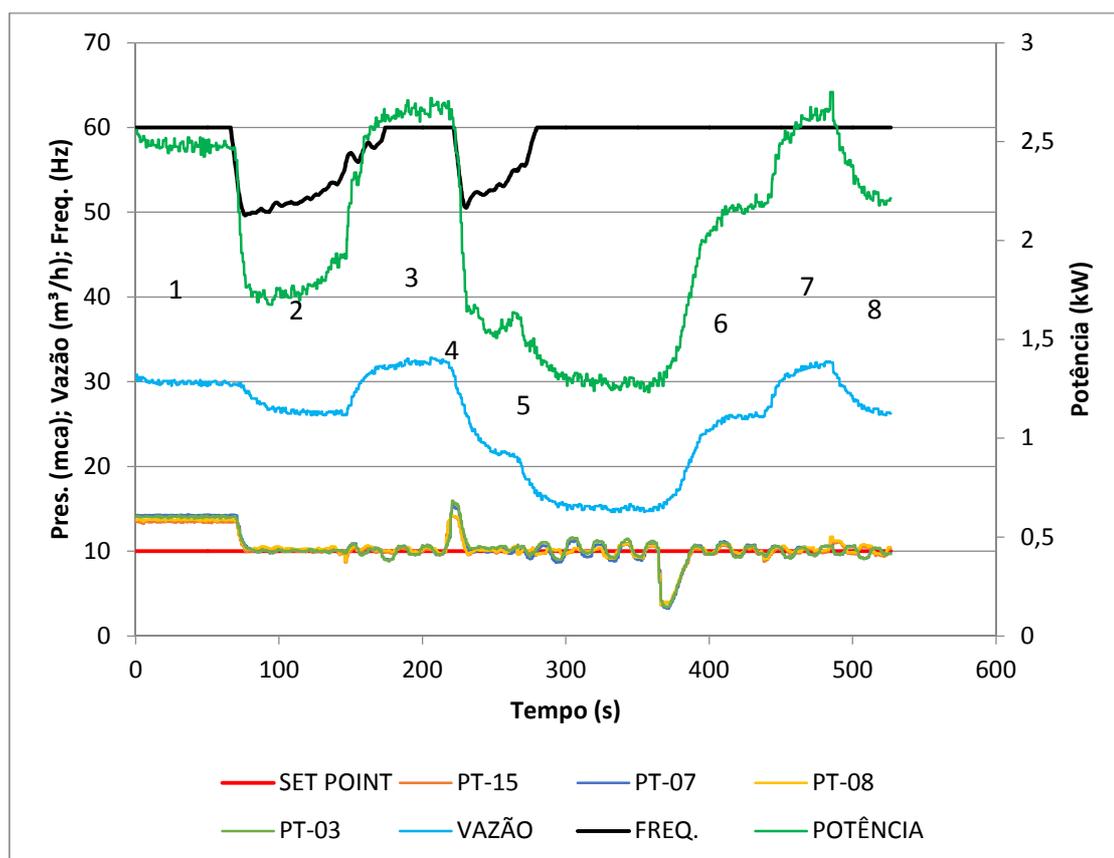
Após a bomba entrar em operação, foi ativado o sistema *fuzzy*. Este controlador iniciou a modulação do fechamento e de abertura das válvulas V1 e V2 e também da velocidade do motor. Na Figura 5.3, é possível observar o comportamento das variáveis hidráulicas e elétricas com essa operação. No ponto 1 do gráfico, podem ser observados os valores da vazão e das pressões quando o sistema operava sem que o controlador tivesse sido ativado.

É possível observar ainda que os valores da vazão, das pressões dos setores, da potência e da frequência nesse ponto são idênticos aos mesmos valores já apresentados no gráfico da vazão máxima do sistema sem controle. Assim, a vazão ficou em 30 m<sup>3</sup>/h, as pressões na média de 14 mca para os dois setores (A e B), a frequência em 60 Hz e a potência elétrica registrada em 2,48 kW.

A segunda análise dessa operação é referente ao ponto 2 do mesmo gráfico. Nesse ponto, caracterizado com a ativação dos controladores das válvulas e da bomba quando o sistema já se encontrava em operação. É possível observar também que os valores das pressões diminuíram em 4 mca, saindo de 14 mca para 10 mca. Este valor corresponde ao referencial e deve ser sempre perseguido pelos controladores como meta a ser alcançada. As variáveis que também diminuíram durante o experimento foram: a vazão — que passou de 30 m<sup>3</sup>/h para 26,46 m<sup>3</sup>/h —, a frequência — que saiu do valor de 60 para 52 Hz — e a potência elétrica, que apresentava o valor de 2,48 kW e passou para 1,8 kW.

Outro dado importante apresentado diz respeito à posição de abertura das VRPs, pois durante esse experimento elas ficaram abertas em apenas 52 %. Essa posição é apresentada em valor percentual do seu ângulo de abertura, ou seja, ela varia de 0% para zero grau, válvula totalmente aberta, e de 100% para 90° quando a válvula está totalmente fechada.

O valor da posição é citado, nesta análise, em virtude de sua importância no processo de avaliação do desempenho do controlador. Assim, quando o sistema é controlado com as válvulas se encontrando na posição próxima de fechada, aumenta a perda de carga localizada, o que provoca uma ineficiência energética para o sistema.



**Figura 5.3** – Gráfico das variáveis hidráulicas e elétricas na operação com vazão máxima e sob a ação do sistema *fuzzy*.

A próxima análise feita é a do ponto 3 no gráfico da Figura 5.3. Nesse ponto, pode-se constatar que a planta sofreu uma perturbação do valor da vazão com a abertura do solenoide VS-5. Assim, é possível observar no gráfico que a vazão aumentou em  $5,70 \text{ m}^3/\text{h}$ , passando de  $26,46 \text{ m}^3/\text{h}$  para  $32,16 \text{ m}^3/\text{h}$ . Já a frequência se encontrava no valor de  $60 \text{ Hz}$  e não sofreu mudanças do seu valor, enquanto que a potência elétrica aumentou em  $0,9 \text{ kW}$ , ou seja, saiu de  $1,8 \text{ kW}$  e passou para  $2,68 \text{ kW}$ .

Esses dados de potência, quando comparados com os valores apresentados no ponto 3 do gráfico da Figura 5.1, que operou nas mesmas características hidráulicas, mas com o sistema em malha aberta, mostraram-se menores, o que pode ser computado como ganhos energéticos, pois na Figura 5.1 observou-se uma potência de  $2,88 \text{ kW}$  e, nesse ponto do gráfico, ocorreu uma diminuição desse valor da potência em  $0,2 \text{ kW}$ , ficando em  $2,68 \text{ kW}$ .

Os valores das pressões, que estavam em torno de  $10 \text{ mca}$ , sofreram uma pequena diminuição de  $0,5 \text{ mca}$  no momento em que foi aberta a válvula solenoide

VS-5, mas foram corrigidas para o valor de referência pela ação do controlador. Essa perturbação foi percebida pelo controlador, que fez as válvulas e a bomba atuarem no controle da pressão no tempo de 6,5 segundos. Já a posição de abertura das válvulas ficou registrada em 53%. Esse valor justifica uma ineficiência do controlador, pois com essa vazão a válvula tem sua modulação na região que provoca perda de carga localizada.

O próximo estágio analisado é do ponto 4 no gráfico da Figura 5.3. Nesse ponto, a planta sofreu uma perturbação da vazão com o fechamento das saídas de VS-2 e VS-3. Esse procedimento provocou a diminuição da vazão de 10,06 m<sup>3</sup>/h, saindo de 32,16 m<sup>3</sup>/h para 22,1 m<sup>3</sup>/h, o equivalente a 31% de redução da vazão. Com essa perturbação, o valor da frequência diminuiu o valor em 9 Hz no tempo de 10,25 segundos, saindo de 60 para 51Hz. Entretanto, esse valor da frequência foi aumentando até atingir novamente os 60 Hz, uma vez que a ação do controlador da bomba atuava em um intervalo de tempo de 250 ms, enquanto que, nas válvulas, o tempo de resposta foi de 5 segundos.

Nesse ponto, a potência sofreu uma diminuição de 1,05 kW, saindo de 2,68 kW para 1,63 kW. Já a pressão também sofreu alteração com o fechamento dos solenoides, pois seus valores se elevaram atingindo a ordem de 14,1 mca. Depois da ação do controlador, as pressões retornaram para 10 mca. O tempo transcorrido entre a elevação da pressão e o retorno à referência foi de 12,25 segundos. E, finalmente, para esse ponto operacional, as válvulas ficaram mais fechadas, diminuíram o valor médio do percentual de abertura, saindo de 53% para 36%.

O próximo ponto analisado foi o de número 5 do mesmo gráfico da Figura 5.3. Neste, a mudança aplicada foi a de fechar VS-5 à saída do setor C e mantendo também os solenoides fechados dos setores A e B, o que provocou a diminuição da vazão em 7,1 m<sup>3</sup>/h, saindo de 22,1 m<sup>3</sup>/h para 15 m<sup>3</sup>/h. Já o valor da frequência permaneceu em 60 Hz, e as válvulas estavam com apenas 35% da abertura para manter o controle da pressão. Nesse ponto, a potência elétrica também variou, reduzindo de 1,63 kW para 1,36 kW. A permanência da pressão nas quatro saídas próxima de 10 mca implicou uma pequena mudança na posição do ângulo de abertura das válvulas, que diminuiu de 36% para 35%.

Sequencialmente, analisou-se o ponto de número 6 no gráfico da Figura 5.3. Nesse ponto, observou-se o início da abertura das saídas dos dois setores A e B.

Essa abertura aumentou a vazão em 11 m<sup>3</sup>/h, correspondendo a um acréscimo de 73% na demanda, saindo de 15 m<sup>3</sup>/h para 26 m<sup>3</sup>/h. A frequência, que já se encontrava em 60 Hz, assim permaneceu. Já a potência aumentou seu valor de 1,36 kW para 2,13 kW, e, com as pressões, ocorreu a maior variação registrada durante todos os experimentos. Elas variaram em 6,3 mca, ou seja, saíram de 10 mca, alcançando o menor valor, que foi de 3,7 mca, e retornou a 10 mca no tempo de 24 segundos.

Pode-se observar ainda que esse tempo foi o maior entre todos os já registrados das perturbações anteriormente citadas. Isso ocorreu devido à ação do controlador *fuzzy* da bomba de não poder influenciar na correção da pressão, porque, nesse ponto, a frequência já se encontrava em 60 Hz, e não tinha mais como aumentá-la para minimizar o erro entre ela e a referência. Assim, essa correção da pressão ficou na dependência apenas da ação do controlador das válvulas, o qual, por terem estas uma resposta lenta, não conseguiu alcançar o mesmo desempenho que o controlador da bomba.

Evidenciou-se também que as válvulas, quando estão abertas, demoram 1 minuto e 30 segundos para fechar totalmente, e vice-versa. Esse tempo é demasiadamente longo para uma resposta da correção da pressão no sistema, se comparado com o tempo de ação do controlador da bomba. Esse fato justifica a demora dos 24 segundos para o controle estabilizar a pressão controlada. As posições das válvulas, por sua vez, sofreram alteração e aumentaram o percentual do ângulo de abertura em 18%, ou seja, saíram de 35% para 53%.

A próxima análise realizada foi a do ponto 7 no gráfico da Figura 5.3. Neste, observou-se a semelhança do comportamento das variáveis hidráulicas com as mesmas apresentadas no ponto 3 do mesmo gráfico, pois a planta sofreu uma perturbação da vazão com a abertura de VS-5, percebendo-se no gráfico um aumento da vazão em 6,1 m<sup>3</sup>/h, passando de 26 m<sup>3</sup>/h para 32,1 m<sup>3</sup>/h. Além disso, destaca-se que a frequência já se encontrava no valor de 60 Hz e não sofreu mudanças do seu valor.

Para a potência elétrica, por sua vez, ocorreu um aumento de 0,53 kW, ou seja, um acréscimo de 24%, já que ela era de 2,13 kW e passou para 2,66 kW. A potência registrada para este ponto, quando comparada com a mesma apresentada no ponto 6 do gráfico da Figura 5.1 — que operou com as mesmas características

operacionais, porém com o sistema em malha aberta —, apresentou uma redução de 7%, ou seja, no ponto 7 do gráfico da Figura 5.3 tem-se uma potência elétrica registrada de 2,66 kW, e no ponto do outro gráfico da Figura 5.1, a potência foi de 2,88 kW. E, finalmente, para esse ponto operacional, as válvulas ficaram mais abertas, aumentando o valor médio do percentual de abertura em 13%, saindo de 53% para 66% e deixando o sistema com uma perda de carga localizada menor que a apresentada no ponto anterior desse mesmo gráfico.

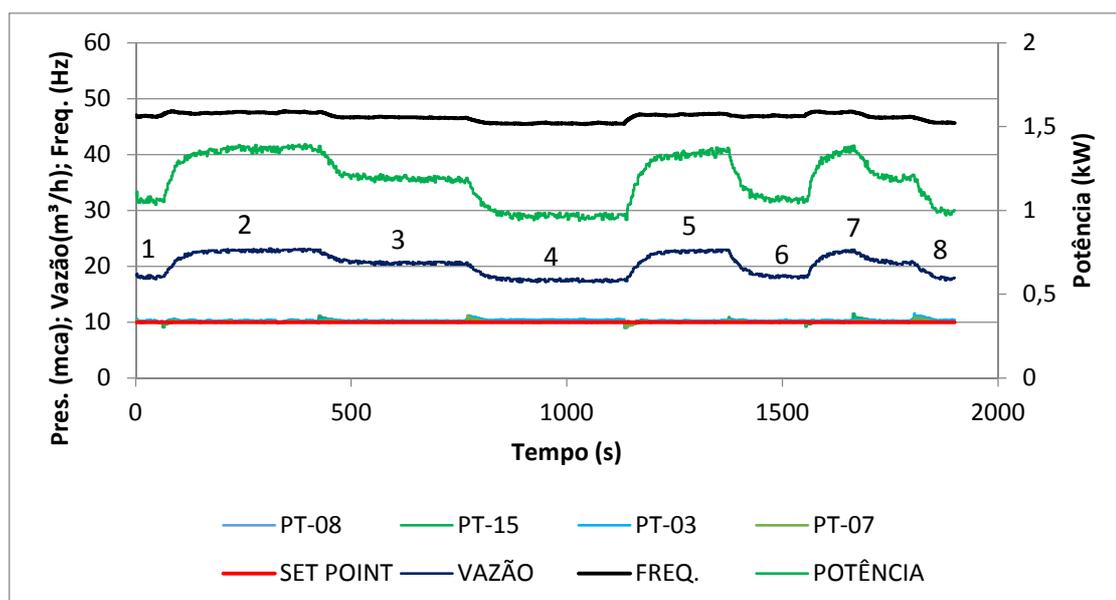
O último ponto analisado nesse gráfico foi o de número 8. Neste, pode-se observar que a vazão foi diminuída com o fechamento da saída do setor C. A vazão sofreu uma diminuição de 6 m<sup>3</sup>/h, saindo de 32 m<sup>3</sup>/h para 26 m<sup>3</sup>/h. A frequência já se encontrava no valor de 60 Hz e não sofreu mudanças do seu valor, e a potência, por sua vez, sofreu uma diminuição de 0,53 kW, o equivalente a 19%, pois era de 2,66 kW e passou para 2,13 kW. Já as pressões sofreram uma pequena variação, saindo de 10 mca, passando para 11 mca e retornando a 10 mca em 9,5 segundos.

Por fim, infere-se que as posições de abertura das válvulas ficaram em 53%, variando de 13%, ou seja, saíram de 66% para 53%, o que deixa a operação do sistema com uma perda de carga maior, caracterizando uma deficiência energética quando comparada com o ponto anterior.

## **5.6 Sistema *Fuzzy* nas Válvulas e Bomba para Mínima Vazão**

Nesta operação com a mínima vazão, foram ajustadas as saídas dos registros para uma abertura em que passou uma vazão mínima necessária para atender ao sistema, ressaltando que o experimento iniciou com a abertura total das válvulas V1 e V2 e o conjunto motor-bomba na frequência máxima de 60 Hz, mas, na sequência, após a retirada do ar do interior da tubulação, foram ativados os controladores das válvulas e da bomba com o objetivo de controlar a pressão para 10 mca.

O gráfico das variáveis hidráulicas e elétricas desse experimento foi apresentado na Figura 5.4. Nele, pode-se observar a atuação do sistema *fuzzy* para o ponto de operação da vazão mínima que possibilite atender ao sistema.



**Figura 5.4** – Gráfico das variáveis hidráulicas e elétricas do sistema operando na vazão mínima sob a ação do sistema *fuzzy*.

Ressalte-se que o sistema, ao entrar em operação, teve os seus controladores ativados para as válvulas e o conjunto motor-bomba, e eles iniciaram a modulação do fechamento e abertura das válvulas V1 e V2 e também da velocidade do motor com o objetivo de manter a pressão próxima à referência.

O primeiro ponto analisado foi o número 1 desse gráfico. Nele, pode-se observar que, quando o sistema operava sob a ação do controlador, a vazão registrou o valor de 18 m<sup>3</sup>/h, as pressões médias no setor A foram de 10,2 mca e no setor B de 10,4 mca, a frequência ficou em 46 Hz e a potência elétrica em 1,1 kW.

A segunda avaliação feita utilizando o gráfico é referente ao ponto de número 2, no qual se pode observar que o sistema já se encontrava em operação com as pressões e a vazão estáveis quando foram abertos os registros de saída do setor C e das saídas individuais de cada setor.

Essa abertura provocou o aumento na vazão em 5 m<sup>3</sup>/h, saindo de 18 m<sup>3</sup>/h para 23 m<sup>3</sup>/h. As pressões diminuíram para 9,12 mca e depois retornaram para 10 mca em um intervalo de tempo de 8,25 segundos. A frequência saiu de 46 Hz para 47 Hz, e a potência, que apresentava o valor de 1,1kW, aumentou para 1,3 kW. Outro dado importante apresentado diz respeito à posição de abertura das VRPs, que, durante esse experimento, ficaram posicionadas em 51%, pouco mais da metade de sua abertura.

A próxima análise é a do ponto de número 3 no gráfico da Figura 5.4. Nesse ponto, constatou-se que a rede sofreu uma perturbação na vazão com o fechamento dos solenoides VS-2 e VS-3, as saídas dos setores A e B.

Esse fechamento alterou a vazão na rede, diminuindo em 3 m<sup>3</sup>/h, passando de 23 m<sup>3</sup>/h para 20 m<sup>3</sup>/h. Nesse ponto, o valor da frequência, que se encontrava em 47 Hz, diminuiu para 46 Hz, e a potência reduziu seu valor em 0,12 kW, ou seja, saiu de 1,3 kW e passou para 1,18 kW. Esse valor de potência na operação sob a ação do fuzzy “eficiente”, que foi registrado no gráfico da Figura 5.4, ao ser comparado com os dados apresentados na operação do sistema em malha aberta, mostrou uma redução de 30%. De fato, o valor da potência em malha aberta foi de 1,69 kW e com o fuzzy “eficiente” apenas de 1,18 kW.

Para os valores das pressões, que estavam em torno de 10 mca, ocorreu uma pequena variação, aumentando para 11 mca no momento em que foi fechado o registro, porém essas pressões foram corrigidas para o valor da referência pela ação do controlador no tempo de 12 segundos.

A posição de abertura das válvulas, que estava em 51%, mudou para 45,6%. Esse valor justifica uma ineficiência do controlador, porque, para essa vazão, a válvula teve sua modulação na região que provocou perda de carga localizada.

O próximo estágio analisado é do ponto de número 4 no gráfico da Figura 5.4. Nesse ponto, a rede sofreu uma perturbação no equilíbrio da vazão com o fechamento de VS-5 e permanecendo com VS-2 e VS-3 fechados. Logo, esse procedimento provocou mais diminuição da vazão em 2,9 m<sup>3</sup>/h, saindo de 20 m<sup>3</sup>/h para 17,1 m<sup>3</sup>/h, o equivalente a uma redução de 14%. Com essa perturbação, o valor da frequência diminuiu em 2 Hz, no tempo de 8,5 segundos, saindo de 46 Hz para 45 Hz, e, nesse ponto, a potência também sofreu uma diminuição de 0,22 kW, saindo de 1,18 kW para 0,96 kW, o que corresponde a 18% de redução na potência.

É importante afirmar que a pressão também sofreu alteração com o fechamento dos registros: seu valor se elevou, atingindo 11,1 mca, mas, depois da ação do controlador, retornou para 10 mca. O tempo transcorrido entre a elevação e o retorno à referência foi de 20,75 segundos. E, finalmente, para esse ponto operacional, as válvulas ficaram mais abertas, aumentando o valor médio do percentual de abertura em 21,1%, pois saíram de 45,6% para 66,4%.

O próximo ponto analisado foi o de número 5 do gráfico da Figura 5.4. Nesse ponto, a ação do controlador aplicado à planta com a abertura de todos os registros nas saídas individuais de cada setor e a do setor C, provocando o aumento na vazão de 4,9 m<sup>3</sup>/h, saindo de 17,1 m<sup>3</sup>/h para 22 m<sup>3</sup>/h. O valor da frequência passou, então, de 45 Hz para 47 Hz, e a potência apresentou um aumento de 0,39 kW, correspondente a 40%, tendo saído de 0,96 kW para 1,35 kW.

Os valores das pressões se mantiveram próximos da referência nas quatro saídas. Já a posição das válvulas sofreu um aumento de 4,6%, saindo de 66,4% para 71% na posição de abertura, caracterizando que a perda de carga foi minimizada.

O próximo ponto analisado foi o de número 6 do gráfico. Nesse ponto, ocorreu o fechamento de todas as válvulas solenoides dos setores A, B e C. Esse fechamento provocou a diminuição da vazão de 4,3 m<sup>3</sup>/h, correspondendo a 18%, saindo de 22,3 m<sup>3</sup>/h para 18 m<sup>3</sup>/h. O valor da frequência, que se encontrava em 47 Hz, diminuiu para 46 Hz. A potência diminuiu seu valor em 0,35 kW, que corresponde a 26%, saindo de 1,35 kW para 1,0 kW. Já os valores das pressões registradas durante essa perturbação se mantiveram próximos a 10 mca, porém apresentaram um pequeno aumento de 0,8 mca, mas foram corrigidos pela ação dos controladores e retornaram a 10 mca num intervalo de tempo de 13 segundos. Já as posições de abertura das válvulas sofreram alteração, diminuindo o percentual do ângulo de abertura em 13%, ou seja, saiu de 71% para 58%.

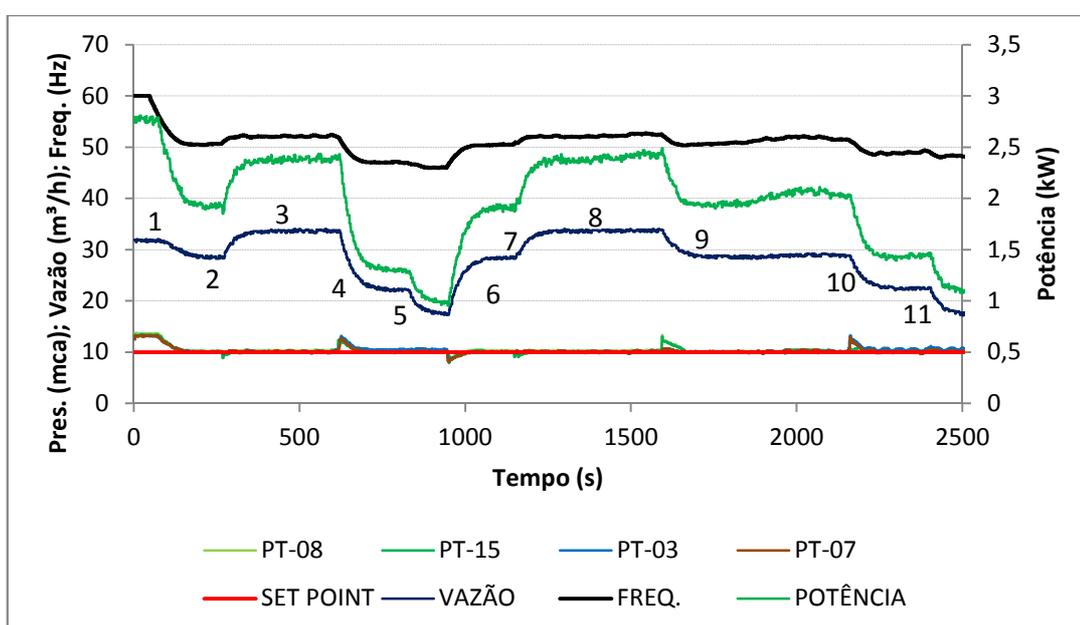
Nas próximas análises dos dados feitas nos pontos 7 e 8 desse gráfico, é possível observar a semelhança do comportamento das variáveis hidráulicas e elétricas com os valores já apresentados nos pontos 5 e 6 desse mesmo gráfico.

### **5.7 Sistema *Fuzzy* “Eficiente” para Válvulas e Bomba na Vazão Máxima**

A operação do sistema de distribuição de água quando tinha as válvulas e bomba operando sob a ação do controlador *fuzzy* “eficiente” apresentou melhores resultados nos dados hidráulicos e elétricos em comparação com os dados da mesma operação do sistema em malha aberta. Essa melhoria pode ser observada no gráfico da Figura 5.5, com uma diminuição da potência elétrica. Essa diminuição pode ser caracterizada em função da redução da velocidade do motor.

Ao novo controlador *fuzzy* foi acrescido o termo “eficiente”, pois teve modificadas suas entradas e estrutura de regras, de maneira que deixou esse controlador mais eficiente hidráulica e energeticamente quando comparado com o anterior.

Na Figura 5.5, é apresentado um gráfico com os resultados das variáveis hidráulicas e elétricas, no qual se pode observar a ação do controlador *fuzzy* “eficiente” nos atuadores, válvulas e bomba no controle da pressão nos ramais de saída da rede para a faixa da máxima vazão do sistema. As variáveis monitoradas da pressão, vazão, frequência e potência elétrica são apresentadas nesse gráfico de maneira que, ao serem comparadas com as mesmas variáveis já apresentadas no gráfico da operação do controlador *fuzzy*, se observou uma redução nos valores, principalmente porque a resposta para a velocidade da bomba, mostrada em função da frequência de alimentação do motor, apresentou uma redução, acompanhando o comportamento da vazão.



**Figura 5.5** – Gráfico das variáveis hidráulicas, sistema operando com *fuzzy* “eficiente” na vazão máxima.

O experimento iniciou com o motor ligado na velocidade máxima, que corresponde à frequência de alimentação do motor de 60 Hz. Após a estabilização das variáveis hidráulicas, os valores registrados ficaram: a vazão em 31,95 m<sup>3</sup>/h, as pressões nas saídas dos ramais próximas de 13 mca e a potência absorvida da rede

elétrica pelo motor em 2,79 kW e a posição de abertura das válvulas em 100%, o que significa que elas estavam totalmente abertas quando foram ativados os controladores *fuzzy* das válvulas e o do conjunto motor-bomba.

Ao ativar o controlador *fuzzy* “eficiente”, os atuadores iniciaram a modulação de abertura e do fechamento das válvulas V1 e V2 e também da velocidade do motor, que pode ser visto no ponto 2 do gráfico da Figura 5.5, no qual os atuadores buscaram acompanhar o valor da pressão de referência, que levou um tempo de 48,25 segundos para alcançar a estabilidade em torno da referência. Nessa ação, a pressão sofreu alteração, reduzindo de 13 mca para 10,1 mca, e a vazão também se modificou, diminuindo de 31,95 m<sup>3</sup>/h para 28,9 m<sup>3</sup>/h, reduzindo em aproximadamente 3,05 m<sup>3</sup>/h. A velocidade do motor foi outra variável que sofreu mudança e ficou próxima de 50 Hz. A potência elétrica do conjunto motor-bomba, que era de 2,79 kW, diminuiu para apenas 1,85 kW. Essa diminuição corresponde a 31% no valor da potência. E, finalmente, a posição de abertura das válvulas modificou o valor, saindo de 100% e ficou em 77%.

Vale ressaltar que o sistema já se tinha estabilizado em torno das pressões de referência medidas nos quatro pontos quando foi provocada a primeira perturbação na demanda da rede de distribuição, desta feita com a abertura do registro da saída do setor C. Essa abertura provocou o aumento na demanda de água, que pode ser visto no ponto 3 do gráfico da Figura 5.5. Assim, constatou-se que esse aumento na demanda pode ser comparado, em um caso real, com o consumo de uma indústria, ou com o rompimento de uma tubulação de grande diâmetro, como, por exemplo, o anel principal de uma rede de distribuição.

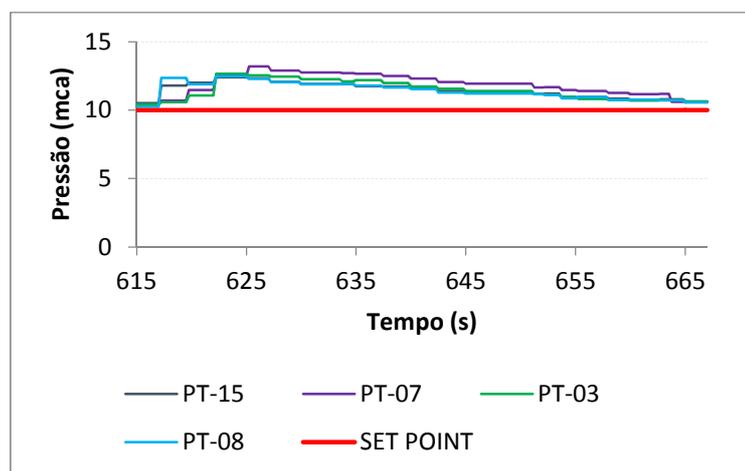
Logo, pode-se afirmar que a vazão sofreu alteração no valor e apresentou um incremento de 4,5 m<sup>3</sup>/h, passando de 28,9 para 33,4 m<sup>3</sup>/h, o que corresponde a 15,57 % de aumento. Já na pressão, ocorreu a diminuição de 1,16 mca, saindo de 10 mca para 8,84 mca e, depois, retornando novamente a 10 mca. Essa ação do controlador fez a pressão ser corrigida para próximo da referência no tempo de 22,5 segundos, influenciada pela frequência do motor que aumentou de 50 Hz para 52 Hz, o que fez refletir no aumento da potência elétrica, passando de 1,85 kW para 2,37 kW.

Evidenciou-se também que o valor da potência elétrica registrado nessa fase do experimento se mostrou menor do que o valor da potência apresentado no ponto

3 do gráfico da Figura 5.3, quando o sistema se encontrava operando sob a ação do outro controlador *fuzzy* com as mesmas condições operacionais, ou seja, nesta aplicação, temos uma potência registrada de 2,37 kW, e na aplicação anterior, com o *fuzzy*, vista no ponto 3 uma potência registrada de 2,68 kW, uma diferença menor, portanto, de 0,31 kW, o que corresponde a 11% a menos. E, finalmente, a posição de abertura das válvulas modificou, aumentou seu ângulo de abertura em percentual, saindo de 77% para 95%.

Na sequência do experimento, no ponto 4 do gráfico da Figura 5.5, foi alterada novamente a demanda da rede, desta feita foram fechadas VS-2 e VS-3, as saídas dos setores A e B, sendo uma em cada setor, o que provocou a diminuição da vazão de 33,4 m<sup>3</sup>/h para 22,3 m<sup>3</sup>/h. Essa diminuição de 11,1 m<sup>3</sup>/h correspondeu a 33% de diminuição na vazão.

Essa mudança na demanda de água alterou também o valor da pressão, que aumentou até 12,34 mca, porém retornou ao valor anterior de 10,5 mca, depois de transcorrido o tempo de 50 segundos, conforme se vê no gráfico da Figura 5.6, onde se pode observar o maior aumento nos valores das pressões com a diminuição na demanda de água.



**Figura 5.6** – Gráfico das pressões no ponto 4 da Figura 5.5, operação com a vazão máxima e sob a ação do sistema *fuzzy* “eficiente”.

A atuação do controlador *fuzzy* “eficiente” no ponto 4 alterou também o valor da frequência, que passou de 52 Hz para 47 Hz, e na potência, que diminuiu de 2,41 kW para 1,38 kW, apresentando uma redução de 42%. Com esse valor de potência elétrica apresentado nesse ponto do experimento, quando comparado com o

resultado já apresentado no gráfico da Figura 5.3, no qual o sistema operava nas mesmas condições hidráulicas de vazão e pressão e sob a ação do controlador *fuzzy*, constatou-se que, nessa ação, houve um ganho energético, haja vista o valor da potência apresentada na Figura 5.3 ter ficado em 1,8 kW e, nesta aplicação, ela foi de 1,64 kW, uma diminuição de 0,16 kW. E, finalmente, a posição de abertura nas válvulas que se modificaram, saindo de uma abertura de 95% para apenas 85%.

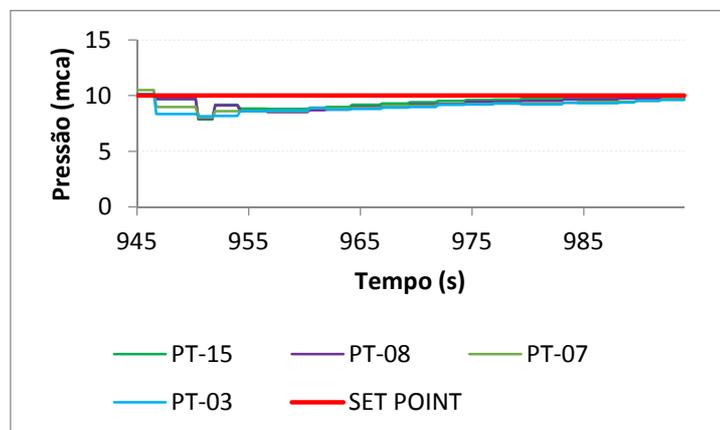
Após os valores das pressões se estabilizarem em torno da pressão de referência, foi fechada a válvula solenoide VS-5, a saída do setor C que pode ser visualizada com a mudanças nos valores apresentados no ponto 5 do gráfico da Figura 5.5. Assim, o valor da vazão continuou a diminuir, desta feita passando de 22,3 m<sup>3</sup>/h para 18,0 m<sup>3</sup>/h, uma diferença de 4,3 m<sup>3</sup>/h. Essa mudança na demanda de água não provocou, desta vez, alterações na pressão, pois a ação do controlador foi eficaz e corrigiu a pressão praticamente sem atraso de tempo. Já o valor da frequência, nesse instante da operação, passou de 47 Hz para 45 Hz, assim como no valor da potência, que se encontrava em 1,68 kW, passou para 1,3 kW, diminuindo em 0,38 kW.

A quarta perturbação na planta, observada no ponto 6 do gráfico, passou pelas aberturas de VS-2 e VS-3. O valor da vazão, que se encontrava em 18 m<sup>3</sup>/h, aumentou para 28,2 m<sup>3</sup>/h. Nessa perturbação, os valores das pressões se modificaram, diminuindo de 10,3 mca para 8,5 mca e, depois, retornando aos 10,2 mca, quando se estabilizou no tempo de 45,5 segundos. Esse ponto representou o menor valor da pressão com a variação da demanda e pode ser observado no gráfico da Figura 5.7.

Nesta ação do *fuzzy* “eficiente” no ponto 6 do gráfico, o valor da frequência, que estava em 45 Hz, passou para 50 Hz, e a potência elétrica aumentou de 1,03 kW para 1,86 kW. Além disso, afirma-se que a posição de abertura das válvulas, que estava em 85%, passou para 75%.

Na continuação do experimento, foi aberta a VS-5. Os comportamentos dos dados referentes a essa ação são apresentados no ponto 7 do gráfico da Figura 5.5. Nesse ponto, a vazão voltou a aumentar de 28,5 m<sup>3</sup>/h para 33,2 m<sup>3</sup>/h, um aumento de 4,7 m<sup>3</sup>/h. Na pressão, ocorreu uma redução, saindo de 10,2 mca para 9,2 mca e retornando a 10,1 mca no tempo de 23 segundos. Quanto à velocidade, ocorreu

aumento da frequência, que saiu de 50 Hz e passou para 52 Hz. E, finalmente, o valor da potência aumentou também de 1,86 kW para 2,37 kW.



**Figura 5.7** – Gráfico das pressões no ponto 6 da Figura 5.5, operação com vazão máxima, sistema *fuzzy* “eficiente”.

No ponto 8 do gráfico da Figura 5.5, observou-se uma semelhança nos dados apresentados no ponto 3 do mesmo gráfico para a pressão, vazão, frequência e potência.

Os pontos 9, 10 e 11 do gráfico da Figura 5.5 apresentaram semelhança com os dados hidráulicos e elétricos com os pontos 2, 4 e 5 do mesmo gráfico.

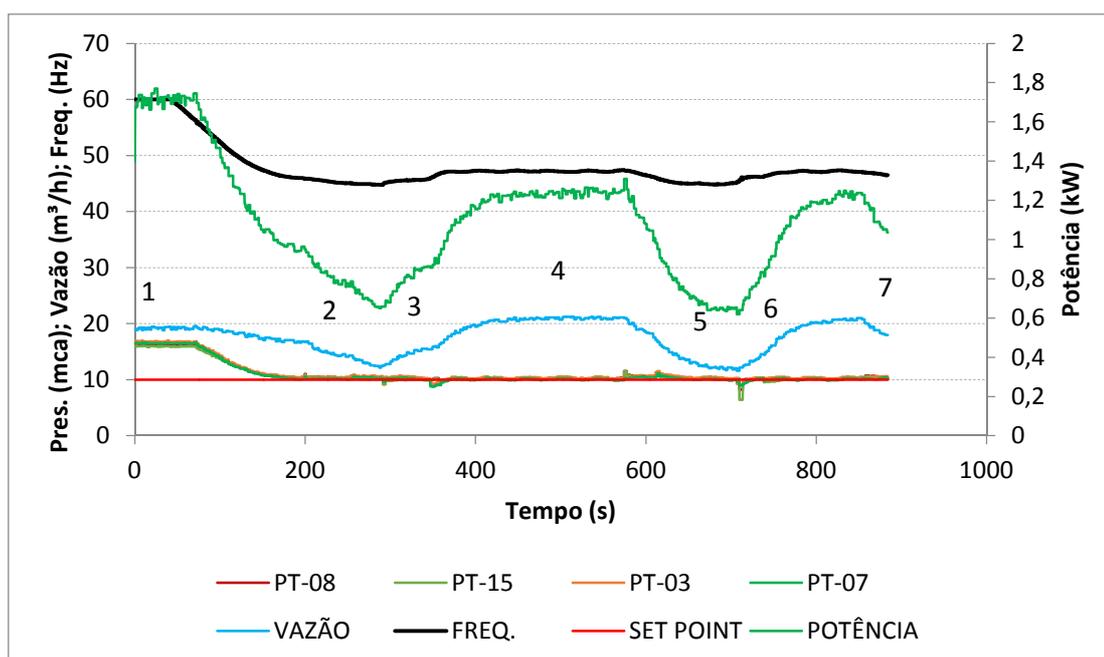
## 5.8 Sistema *Fuzzy* “Eficiente” Aplicado nas Válvulas e Bomba para Vazão Mínima

O projeto desse novo controlador *fuzzy* “eficiente” teve sua estrutura interna de regras modificadas, como também as entradas do controlador, para deixar este mais eficaz do ponto de vista energético. Assim, a operação do sistema de distribuição de água, quando se encontrava sob a ação desse controlador, apresentou melhores resultados hidráulicos e elétricos quando comparado com a operação do sistema em malha aberta, ou também com o outro sistema *fuzzy*.

O experimento iniciou com o motor ligado na frequência de 60 Hz. Após sua estabilização, as variáveis hidráulicas e elétricas apresentaram valores médios registrados no ponto 1: vazão de 19,16 m<sup>3</sup>/h, pressões nas saídas dos ramais próximas de 16,33 mca e potência elétrica em 1,71 kW. Além disso, destaque-se que a posição de abertura das válvulas se encontrava em 100%; assim, elas

estavam totalmente abertas. Nesse instante, os controladores *fuzzy* “eficientes” das válvulas e da bomba foram ativados e iniciaram a modulação de abertura e do fechamento das válvulas V1 e V2 e também a da velocidade do motor, como pode ser visto no ponto 2 do gráfico da Figura 5.9, no qual se pode observar a atuação do sistema *fuzzy* “eficiente” controlando as variáveis hidráulicas e elétricas da operação com a vazão mínima.

Na sequência, temos o ponto 2 do mesmo gráfico, onde é possível observar os valores da pressão do sistema após a ação do controlador *fuzzy* “eficiente”. Assim, evidenciou-se que o valor médio das pressões buscou acompanhar a referência, levando um tempo de 107 segundos para se estabilizar no valor da referência. Do mesmo modo que a pressão sofreu alteração, a vazão também se modificou, diminuindo de 19,16 m<sup>3</sup>/h para 12,54 m<sup>3</sup>/h, reduzindo, portanto, em aproximadamente 6,62 m<sup>3</sup>/h.



**Figura 5.8** – Gráfico das variáveis hidráulicas e elétrica, sistema operando com *fuzzy* “eficiente” para mínima vazão.

O valor da frequência de alimentação do motor foi outra variável que sofreu mudança, saindo de 60 Hz para 45 Hz, e a potência elétrica, que era de 1,71 kW, passou para apenas 0,66 kW. Essa diminuição de 1,05 kW corresponde a 61% no valor da potência. E, finalmente, a posição de abertura das válvulas modificou o valor, saindo de 100% para 82%.

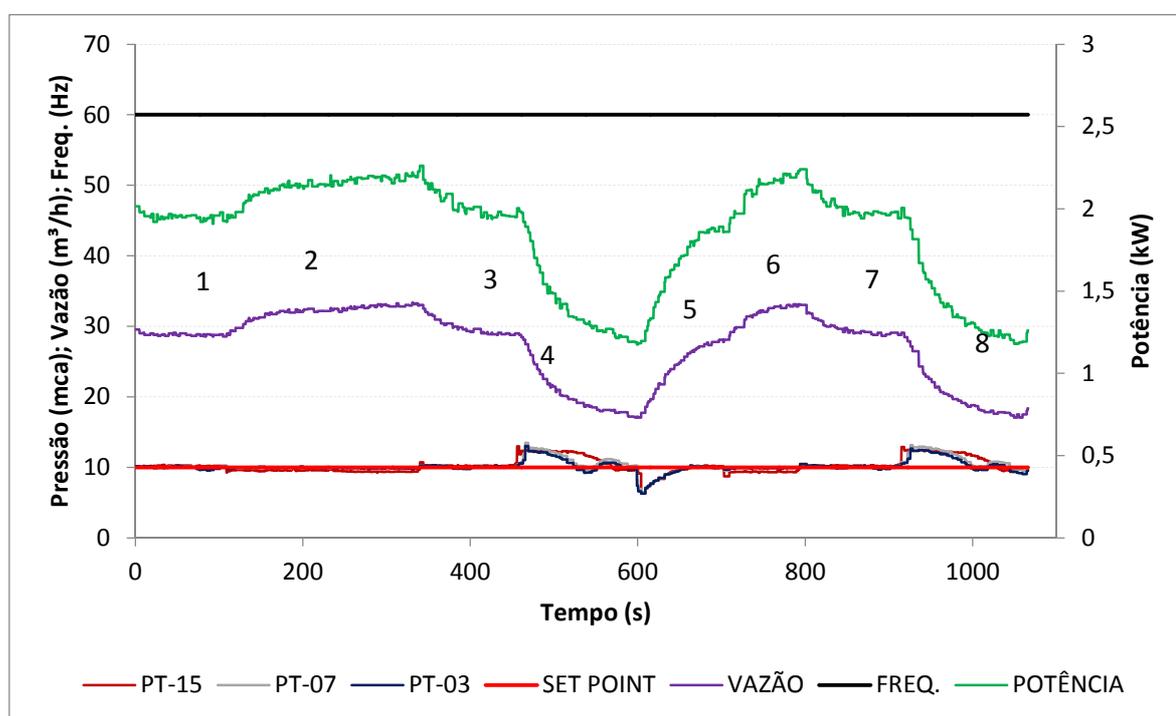
Constatou-se que o sistema já se tinha estabilizado em torno das pressões medidas nos quatro pontos quando foi provocada a primeira perturbação no equilíbrio da vazão, desta feita foi aberta a VS-5. Essa abertura provocou um aumento na demanda, que pode ser visto no ponto 3 do gráfico da Figura 5.9. Nesse ponto, a vazão sofreu um aumento no valor de 7,37 m<sup>3</sup>/h, passando de 12,5 m<sup>3</sup>/h para 19,9 m<sup>3</sup>/h, o que corresponde a 58%. Já a pressão apresentou uma oscilação de valor, saindo de 10,21 mca para 9,21 mca e, depois, retornando a 10,2 mca. Essa oscilação foi corrigida para próximo da pressão de referência no tempo de 17,7 segundos. Já a frequência de alimentação do motor aumentou de 45 Hz para 47,2 Hz, o que fez o valor da potência também aumentar, passando de 0,66 kW para 1,18 kW, um incremento de 78%. Contudo, esse valor da potência foi menor do que o valor apresentado no ponto 5, do gráfico da Figura 5.4, que se encontrava operando nas mesmas condições hidráulicas. Logo, no ponto 5, a potência elétrica foi de 1,7 kW e, nesse ponto, foi de 1,18 kW; portanto, uma diferença de 0,52 kW, que corresponde a 30% menor entre os modelos de operação, sem controle e com controle *fuzzy* “eficiente”. E, finalmente, a posição de abertura das válvulas modificou o valor, saindo de 82% e voltou para 100%.

Na sequência, temos o ponto 4, do gráfico da Figura 5.9, que não apresentou alteração no valor da vazão. Por isso, os valores da potência não sofreram mudanças em relação ao ponto anterior. Já no ponto 5, do gráfico da Figura 5.9, a demanda da rede foi alterada com o fechamento de VS-2 e VS-3, as saídas dos setores A e B. Esse fechamento provocou a diminuição da vazão em 8,76 m<sup>3</sup>/h, saindo de 20,8 m<sup>3</sup>/h para 12,1 m<sup>3</sup>/h, o que correspondeu a 42% de redução na vazão. Essa mudança na demanda alterou também a pressão, que chegou a atingir o valor de 11,5 mca, porém retornou ao valor anterior de 10,6 mca depois de 8,5 segundos. Já as válvulas apresentaram mudanças na posição de abertura, saindo de 100% para 77%. E a frequência ficou estável no valor de 45 Hz. Além disso, a potência elétrica foi outro valor que sofreu variação, saindo de 1,18 kW para 0,66 kW, diminuindo 0,52 kW.

Na sequência de análise dos pontos 6 e 7 desse gráfico, podem ser, então, associados aos pontos já apresentados 3 e 4, respectivamente, do mesmo gráfico, pois apresentaram semelhança nos valores de vazão, pressão, potência, frequência e posições de abertura das válvulas.

### 5.9 Aplicação de Sistema *Fuzzy* “Eficiente” nas Válvulas para a Vazão Máxima

A operação do sistema de distribuição de água, mantendo a pressão controlada no ponto de referência sob a ação do controlador *fuzzy* “eficiente” apenas nas válvulas (V1 e V2) e mantendo a velocidade nominal do motor constante na frequência de alimentação de 60 Hz, será apresentada no gráfico da Figura 5.9. Nesse gráfico, pode ser visualizado o comportamento das variáveis hidráulicas e elétricas, observando-se o desempenho delas durante a operação do sistema.



**Figura 5.9** – Operação para vazão máxima, sistema *fuzzy* só nas VRPs.

Constatou-se que o experimento com o controle *fuzzy* “eficiente” ativo apenas nas duas válvulas, para uma operação do sistema na vazão máxima, foi executado com o motor funcionando na frequência constante de 60 Hz e que, logo após a estabilização da variável da pressão, foram registrados valores médios para as pressões próximas de 10,1 mca, a potência elétrica em 1,98 kW e a posição de abertura das válvulas em 100%, o que significa que elas estavam totalmente abertas, sendo que esses valores são mostrados no ponto 1 do gráfico.

O controlador *fuzzy* “eficiente” foi ativado, e, assim, se iniciou a modulação de abertura e fechamento das válvulas V1 e V2 com o objetivo de ajustar a pressão para a referência. Essa ação pode ser identificada no ponto 2, do gráfico da Figura

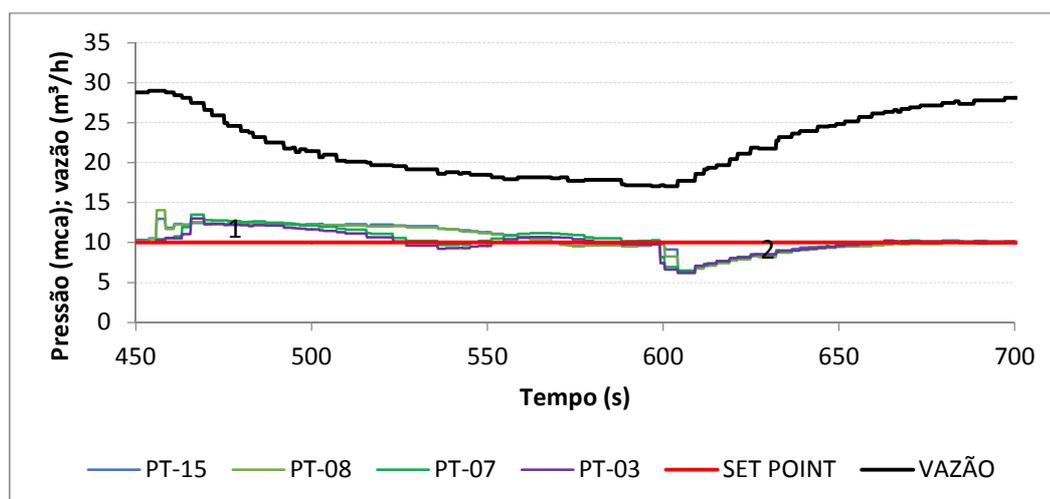
5.9. Nesse ponto, é possível observar os valores da pressão do sistema após a ação do controlador *fuzzy* “eficiente” ajustando as válvulas para a referência, demorando cerca de 231,25 segundos para finalizar o controle da pressão, estabilizando-a na referência.

Assim como a pressão nesse ponto sofreu uma pequena alteração, variando de 10,1 mca para 9,5 mca, a vazão, por outro lado, também se modificou, aumentando o valor em aproximadamente 4,24 m<sup>3</sup>/h, saindo de 28,16 m<sup>3</sup>/h para 32,4 m<sup>3</sup>/h.

No terceiro ponto do gráfico da Figura 5.10, foi registrado o fechamento de VS-5. Nessa ação, a vazão foi alterada, diminuindo de 32,4 m<sup>3</sup>/h para 28,8 m<sup>3</sup>/h. Já a pressão se elevou para 11 mca, mas a ação de modulação das válvulas corrigiu a pressão para 10,3 mca no tempo de 110,5 segundos. Esse tempo foi para as válvulas saírem da posição de totalmente aberta, 100%, para apenas 83,59% de sua abertura.

A próxima análise feita no sistema contemplou a ação do fechamento de VS-2 e VS-3. Essa mudança pode ser observada no ponto 4, do gráfico da Figura 5.9, no qual os valores da vazão apresentaram uma redução de 11,5 m<sup>3</sup>/h, saindo de 28,8 m<sup>3</sup>/h para apenas 17,3 m<sup>3</sup>/h, e a pressão sofreu uma ação contrária aos valores da vazão, pois aumentou de 10,3 mca para 12,4 mca e, depois, retornou a 10,2 mca em aproximadamente 106,75 segundos.

No ponto 5, do gráfico da Figura 5.9, é possível observar a mudança promovida na rede com a abertura de VS-2 e VS-3. Os valores hidráulicos do sistema operando quando foram abertas essas saídas são semelhantes aos valores apresentados no ponto de número 3, do mesmo gráfico. Já os pontos seguintes, 6, 7 e 8 apresentaram seus valores idênticos aos pontos 2, 3 e 4, do mesmo gráfico, respectivamente, sendo que, nos pontos 4 e 5 desse gráfico, foram os que apresentaram as maiores variações de pressão e levaram o maior tempo para ter esse valor corrigido para a referência. Assim, pode-se observar essa variação no gráfico da Figura 5.10, no qual há dois pontos identificados, o ponto 1 e o ponto 2, sendo que o ponto 1 representa o momento de fechamento das válvulas solenoides e o ponto 2, a abertura delas.



**Figura 5.10** – Gráfico da variação da pressão com *fuzzy* só nas VRPs para vazão máxima.

No ponto 1, ocorreu o fechamento das válvulas solenoides. Com isso, a vazão sofreu uma redução de 28,99 m<sup>3</sup>/h para 17,8 m<sup>3</sup>/h, e o valor da pressão aumentou em 3 mca, saindo da média de 10,4 mca para 13,4 mca e, depois, retornando a 10,4 mca. Essa oscilação na pressão foi corrigida no setor A no tempo de 106,75 segundos, enquanto que, para o setor B, a correção ocorreu em 60,5 segundos.

Na Tabela 5.1, observam-se os valores das pressões e do tempo do ponto 1 do gráfico da Figura 5.11. Nela, é possível observar a variação da pressão para cada setor com o respectivo tempo de atuação da válvula para o ajuste do valor da pressão à referência.

**Tabela 5.1** Dados de pressão e do tempo no ponto 1 do gráfico da Figura 5.10.

PONTO	LOCAL	PRESSÃO (mca)		TEMPO (s)
		MÁXIMA	MÍNIMA	
PT-15	12,99	10,49	106,75	106,75
PT-08	14,05	10,4	106,75	106,75
PT-07	13,50	10,65	60,50	60,50
PT-03	13,02	10,24	60,50	60,50

Na Tabela 5.2, observam-se os dados das pressões e do tempo que a válvula levou para corrigir a pressão no ponto 2 do gráfico da Figura 5.10. Nesse ponto, ocorreu a abertura das válvulas solenoides VS-2 e VS-3, provocando um aumento na vazão de 10 m<sup>3</sup>/h, saindo de 17,8 m<sup>3</sup>/h para 27,8 m<sup>3</sup>/h, e na pressão, uma diminuição de 10,4 mca para 6,3 mca, sendo que, depois da ação das válvulas, o valor retornou para 10,1 mca no tempo de 56,75 segundos.

**Tabela 5.2** – Dados de pressão e tempo do ponto 2 do gráfico da Figura 5.10.

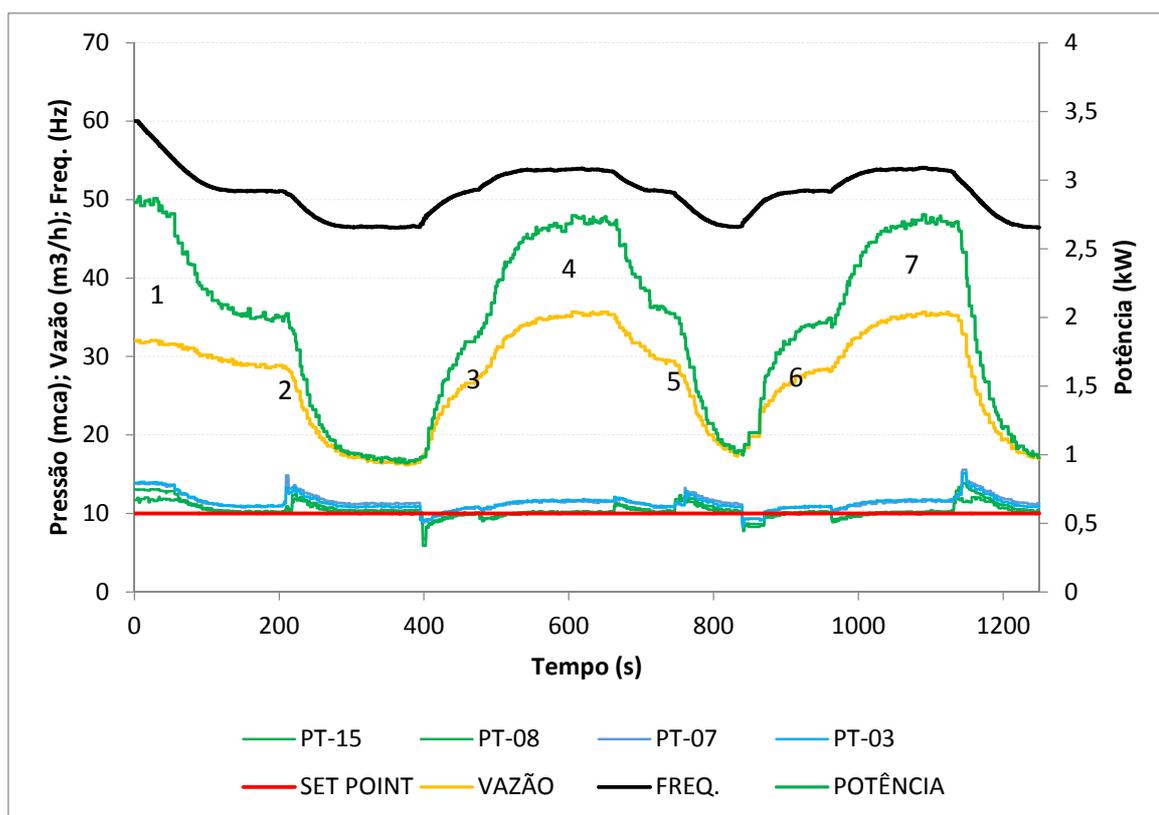
PONTO	LOCAL	PRESSÃO (mca)		TEMPO (s)
		MÍNIMA	MÁXIMA	
2	PT-15	6,31	10,07	56,75
	PT-08	6,15	10,01	56,75
	PT-07	6,50	10,25	56,75
	PT-03	6,27	10,13	56,75

### 5.10 Aplicação do Sistema *Fuzzy* “Eficiente” no Conjunto Motor-Bomba para a Vazão Máxima

A operação do sistema de distribuição de água mantendo a pressão controlada no ponto de referência sob a ação do sistema *fuzzy* “eficiente” apenas na bomba e mantendo a válvulas V1 e V2 totalmente abertas será apresentada no gráfico da Figura 5.11.

O experimento com o controle *fuzzy* “eficiente” ativo apenas no conjunto motor-bomba na operação com a vazão máxima se iniciou com as duas válvulas V1 e V2 totalmente abertas e a frequência de alimentação do motor em 60 Hz.

Após a estabilização da pressão, os valores médios registrados no ponto 1 do gráfico da Figura 5.11 ficaram próximos de 13,1 mca, e a potência elétrica que alimentou o motor ficou em 2,85 kW. Afirma-se que a posição de abertura das válvulas se encontrava em 100%, o que significa que elas estavam totalmente abertas.



**Figura 5.11** – Gráfico da operação com *fuzzy* “eficiente” só na bomba para vazão máxima.

O controlador *fuzzy* “eficiente” aplicado à bomba foi ativado e, assim, se iniciou a modulação da frequência de alimentação do motor com o objetivo de ajustar os valores das pressões à referência. Essa ação do ajuste pode ser vista no ponto 2 do mesmo gráfico. Nesse ponto, é possível observar os valores da pressão do sistema após a ação do controlador *fuzzy* “eficiente” ajustando a velocidade do motor na busca para acompanhar o valor de pressão de referência. Outrossim, o tempo que o controlador levou para executar essa ação foi de 102,75 segundos. E, finalmente, nesse ponto, a vazão sofreu uma alteração, variando em 12,27 m<sup>3</sup>/h, saindo de 28,77 m<sup>3</sup>/h para 16,50 m<sup>3</sup>/h.

No terceiro ponto do gráfico da Figura 5.11, foram abertas todas as saídas dos setores A, B e C. Nessa ação, a vazão aumentou em 18,5 m<sup>3</sup>/h e saiu de 16,5 para 35 m<sup>3</sup>/h, e a pressão diminuiu o valor, alcançando 7,64 mca, em seguida retornando a 10,02 mca no tempo de 32 segundos. Já a próxima análise feita ao sistema foi para a ação do fechamento de VS-2 e VS-3. Essa mudança pode ser observada no ponto 4 do gráfico da Figura 5.11, no qual os valores da vazão apresentam uma redução de 11,5 m<sup>3</sup>/h, saindo de 28,8 m<sup>3</sup>/h para apenas 17,3 m<sup>3</sup>/h,

enquanto a pressão sofreu uma ação contrária aos valores da vazão, passou a aumentar de 10,3 mca para 12,4 mca e, depois, retornou a 10,2 mca em aproximadamente 106,75 segundos.

O ponto 5 do gráfico da Figura 5.11 apresenta os valores hidráulicos do sistema em operação quando foram abertas apenas as saídas individuais dos setores A e B. Nesse ponto, observam-se os valores das variáveis hidráulicas e elétricas semelhantes aos valores apresentados no ponto de número 2 do mesmo gráfico. E, nos pontos seguintes, 6 e 7, apresentaram seus valores idênticos aos pontos 2 e 4, respectivamente, do mesmo gráfico.

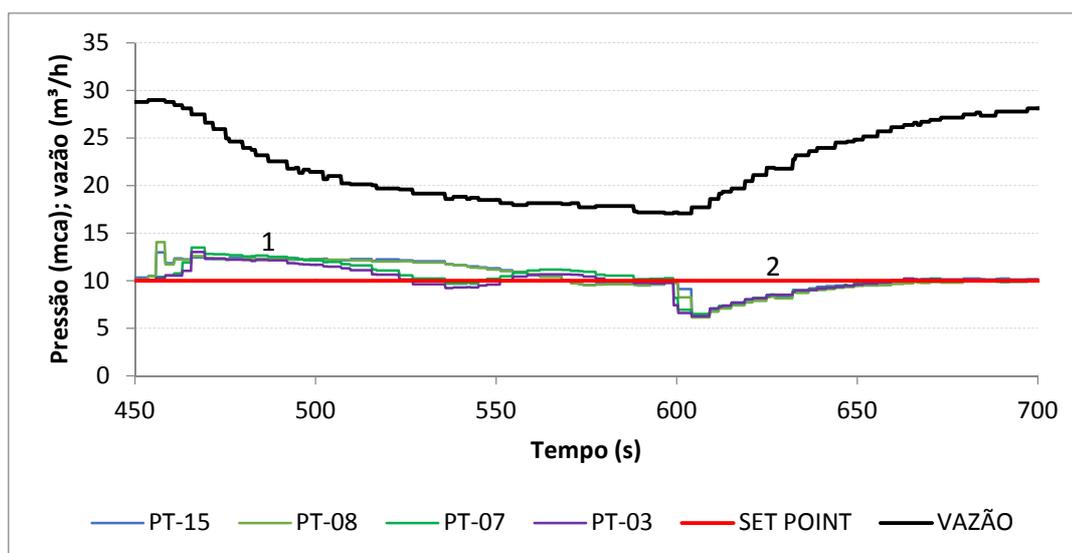
Os pontos 4 e 5 desse gráfico foram os que apresentaram as maiores variações de pressão e levaram o maior tempo para ser corrigido o valor da pressão à referência. Assim, se fez necessário apresentar essa variação, de forma mais detalhada, através de outro gráfico vista na Figura 5.12, no qual foram definidos em dois pontos distintos, o 1 e o 2 essa variação da pressão.

O ponto 1 apresenta o registro do fechamento das válvulas solenoides de saída, provocando a redução na vazão, que saiu de 28,99 m<sup>3</sup>/h para 17,8 m<sup>3</sup>/h.

Nessa ação, os valores da pressão aumentaram em 3 mca, saindo de 10,4 mca para 13,4 mca e, depois, retornaram a 10,4 mca no tempo de 106,75 segundos, para os pontos de pressão do setor A, e de 60,5 segundos, para os pontos do setor B.

Os valores das pressões e os respectivos tempos de atuação da correção da pressão mostrados na Figura 5.12 foram sintetizados em duas tabelas, sendo que a Tabela 5.3 apresenta os valores referentes ao ponto 1 do gráfico, no qual se observa a elevação do valor da pressão para cada transdutor com seu respectivo tempo de atuação.

Na Tabela 5,4, são apresentados os dados referentes ao ponto 2 do gráfico da Figura 5.12. Nesse ponto, registrou os valores da vazão e pressão com a abertura dos solenoides das saídas dos setores A e B. As pressões variaram para menor, ou seja, saíram de 10,4 mca para 6,3 mca, e, depois, voltaram aos 10,1 mca no tempo de 56,75 segundos, como pode ser observado na Tabela 6.



**Figura 5.12** – Gráfico da variação da pressão com atuação do controlador *fuzzy* só nas VRPs para máxima vazão.

**Tabela 5.3** – Pontos de pressão com o tempo de atuação sob a ação do controlador *fuzzy* (dados do gráfico da Figura 5.13).

PONTO	LOCAL	PRESSÃO (mca)		TEMPO (s)
		MÁXIMA	MÍNIMA	
1	PT-15	12,99	10,49	106,75
	PT-08	14,05	10,4	106,75
	PT-07	13,5	10,65	60,5
	PT-03	13,02	10,24	60,5

**Tabela 5.4** – Pontos de pressão com o tempo de atuação sob a ação do controlador *fuzzy*, dados do gráfico da Figura 5.13.

PONTO	LOCAL	PRESSÃO (mca)		TEMPO (s)
		MÍNIMA	MÁXIMA	
2	PT-15	6,31	10,07	56,75
	PT-08	6,15	10,01	56,75
	PT-07	6,5	10,25	56,75
	PT-03	6,27	10,13	56,75

### 5.11 Síntese da Coleta de Dados

Os dados apresentados neste capítulo de resultados são relativos ao momento em que o sistema operou em malha aberta e sob a ação do sistema *fuzzy* e do sistema *fuzzy* “eficiente”. Esses dados relativos à operação com os dois modelos de controladores *fuzzy* e *fuzzy* “eficiente” foram sintetizados em tabelas para facilitar sua interpretação e análise.

A primeira análise feita foi relativa à operação do sistema quando ele estava operando para uma vazão máxima de 35 m<sup>3</sup>/h. Essa análise foi apresentada em forma de tabelas, cujos dados da potência elétrica, pressões, vazões e frequência de alimentação do motor são relativos às três condições de operação. Na primeira, sem estar submetido à ação de controle *fuzzy*, portanto, em malha aberta, no qual manteve a frequência constante no valor de 60 Hz e as válvulas se encontravam totalmente abertas. Na segunda condição, o sistema estava submetido à ação do controle *fuzzy*, no qual apresentou uma variação nos valores da frequência de alimentação do motor e no ângulo de abertura e fechamento das duas válvulas. E, finalmente, a terceira condição foi com o sistema submetido à ação do controlador *fuzzy* “eficiente”.

Na aplicação desse *fuzzy* “eficiente” no conjunto motor-bomba, observou-se um comportamento semelhante dos resultados do controle da velocidade do motor na comparação com a operação sob a ação do controlador *fuzzy*. Isso porque o controlador *fuzzy* desenvolvido para o conjunto motor-bomba foi o mesmo para os dois modelos de controladores, e só para as válvulas é que foram projetados novos controladores *fuzzy* com mudanças na estrutura interna, alcançando uma maior eficiência energética nessa operação. Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos com a aplicação desses modelos de controladores, foram sintetizados, em forma de tabelas, os dados hidráulicos e elétricos.

Essas tabelas foram divididas em duas categorias de valores de vazão, sendo uma para as máximas vazões e a outra para as mínimas vazões de operação. A primeira coluna da tabela relaciona a variação do consumo com o tipo de controle aplicado nos atuadores. Na segunda coluna, foram expressos os valores das potências elétricas registradas para cada modelo de operação. Na sequência, têm-se as colunas da pressão, vazão, frequência e, finalmente, a última coluna com os valores do Consumo Específico, CE.

Assim, na Tabela 5.5, podem ser observados os dados hidráulicos e elétricos do sistema quando se encontrava operando na máxima vazão de 35 m<sup>3</sup>/h sem sofrer alteração dessa demanda. São mostrados os valores para cada modelo de controle da operação, iniciando pela operação sem nenhuma ação de controle, ou em malha aberta, na sequência sob a ação do controlador *fuzzy* e, finalmente, sob a ação do *fuzzy* “eficiente” que atuaram simultaneamente nos dois atuadores, a bomba e as válvulas.

**Tabela 5.5** – Dados hidráulicos e elétricos da operação na vazão máxima e sem variação do consumo.

<b>Rede SEM perturbação</b>	<b>Potência (kW)</b>	<b>Pressão (mca)</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Freq. (Hz)</b>	<b>CE (kWh/m<sup>3</sup>)</b>
Sem controle	2,88	14,00	35,00	60,00	0,082
Controle <i>fuzzy</i>	2,68	10,10	32,16	60,00	0,083
Controle <i>fuzzy</i> “eficiente”	2,37	10,10	33,40	52,00	0,071

Os valores das potências foram registrados no multimedidor de grandezas elétricas. Esses valores foram comparados entre os modelos de operações, sendo que a operação com o controlador *fuzzy* “eficiente”, por ter apresentado menor valor de potência, foi utilizado como referência na comparação entre os outros modelos. Assim, o controlador *fuzzy* “eficiente” apresentou uma redução na potência de 18% quando comparado com o sistema operando em malha aberta, e de 11% com o outro controlador *fuzzy*. Essa redução na potência refletiu na diminuição do consumo específico, que apresentou uma redução de 13% entre a operação com o *fuzzy* “eficiente” e em malha aberta.

Na Tabela 5.6, observam-se os dados hidráulicos e elétricos do sistema operando com a vazão máxima e na presença da variação da demanda de água distribuída feita através do fechamento das válvulas solenoides VS-2 e VS-3.

Os valores da potência elétrica registrados para os três modelos de operação são apresentados nessa tabela, confirmando também que o controlador *fuzzy* “eficiente” foi o que apresentou o melhor resultado energético quando o sistema operava na presença da variação do consumo.

**Tabela 5.6** – Dados hidráulicos e elétricos da operação do sistema na vazão máxima e com perturbação hidráulica.

<b>Rede COM perturbação</b>	<b>Potência (kW)</b>	<b>Pressão (mca)</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Freq. (Hz)</b>	<b>CE (kWh/m<sup>3</sup>)</b>
Sem controle	1,55	16,50	18,00	60,00	0,086
Controle <i>fuzzy</i>	1,36	10,10	19,00	60,00	0,072
Controle <i>fuzzy</i> “eficiente”	1,30	10,10	19,00	45,00	0,068

Assim, na comparação dos valores de potência elétrica entre a operação do sistema em malha aberta com a operação do controlador *fuzzy* “eficiente”, foi registrada uma economia de 16%. Com a mesma comparação feita entre os dois modelos de controlador *fuzzy*, foi possível verificar uma diminuição de 4% da potência em favor do *fuzzy* “eficiente”. E no valor do CE foi registrada uma redução de 20 %.

Na Tabela 5.7, observam-se os dados do sistema que operou na vazão mínima e sem sofrer variação do consumo de água. Assim, ela sintetiza os valores dos dados hidráulicos e elétricos do sistema atuando sem controlador, depois sob a ação dos dois modelos de controlador *fuzzy*.

**Tabela 5.7** – Dados hidráulicos e elétricos do sistema na vazão mínima sem variação do consumo de água.

<b>Rede SEM perturbação</b>	<b>Potência (kW)</b>	<b>Pressão (mca)</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Freq. (Hz)</b>	<b>CE (kWh/m<sup>3</sup>)</b>
Sem controle	2,12	16,00	25,30	60,00	0,084
Controle <i>fuzzy</i>	1,30	10,10	21,00	47,00	0,062
Controle <i>fuzzy</i> “eficiente”	1,18	10,10	19,90	47,20	0,059

Os valores apresentados na Tabela 5.7, referentes às potências elétricas registradas nos três modos de operação, na qual não ocorreu a variação da demanda de água,, confirmam que o controlador *fuzzy* “eficiente” também se mostrou ser o de menor potência elétrica entre todos os tipos de operação. A comparação feita entre esses valores apresenta uma redução do valor entre a operação com controlador *fuzzy* “eficiente” e em malha aberta de 44%. Já entre os dois modelos de controladores *fuzzy*, foi de 9% em favor do *fuzzy* “eficiente”. Já

entre os indicadores de consumo específico, CE, o que apresentou melhor resultado foi a operação com o *fuzzy* “eficiente”, que teve uma redução de 29 % quando comparado com o valor do indicador em malha aberta.

A próxima tabela sintetiza, portanto, os dados do sistema operando na mínima vazão e sofrendo alteração na sua demanda de água. Nessa operação, foram registrados valores de potência elétrica para os três tipos de funcionamento do sistema. Esses valores, ao serem comparados entre si, apresentam uma diminuição de 47% entre a operação com controle *fuzzy* “eficiente” e de malha aberta. Já entre os dois modelos de controle *fuzzy*, foi de apenas 31% em prol do *fuzzy* “eficiente”. Na comparação entre os valores dos CEs da operação sob a ação do *fuzzy* “eficiente” com a de malha aberta, foi de 33 %, como pode ser visto na Tabela 5.8.

**Tabela 5.8** – Dados hidráulicos e elétricos da operação do sistema na vazão mínima com variação do consumo.

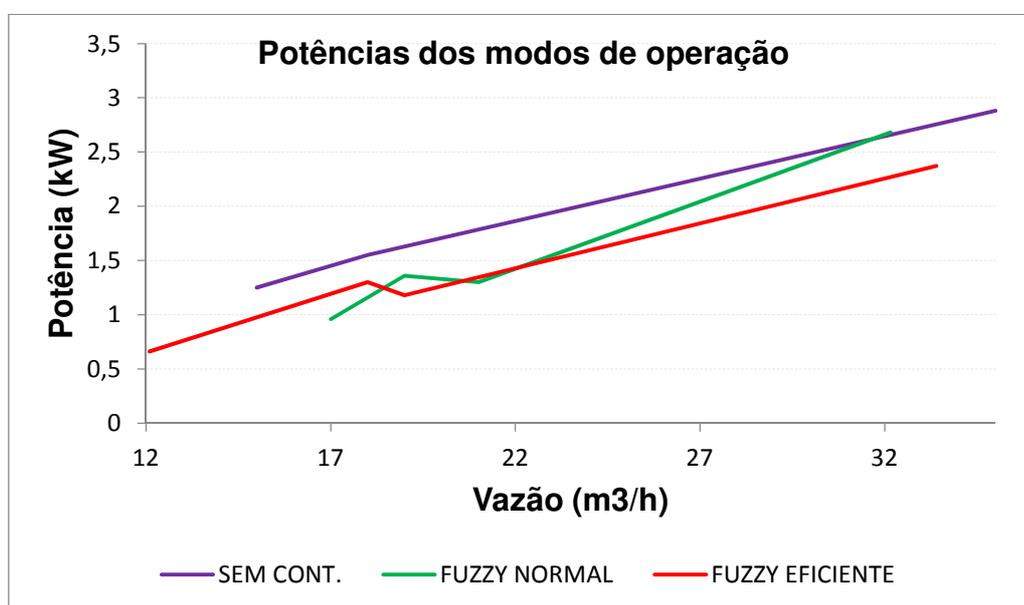
<b>Rede COM perturbação</b>	<b>Potência (kW)</b>	<b>Pressão (mca)</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Frequência (Hz)</b>	<b>CE (kWh/m<sup>3</sup>)</b>
Sem controle	1,25	17,50	15,00	60,00	0,083
Controle <i>fuzzy</i>	0,96	10,10	17,00	45,00	0,056
Controle <i>fuzzy</i> “eficiente”	0,66	10,10	12,10	45,00	0,055

Logo, como foi visto anteriormente, os valores registrados para as potências elétricas com a operação sob a ação do controlador *fuzzy* “eficiente” atenderam aos objetivos da pesquisa para toda a faixa de vazão entre a mínima de 13 m<sup>3</sup>/h e a máxima de 35 m<sup>3</sup>/h e mantendo as pressões nos pontos de saídas constantes próximas da referência. Quanto à pressão na saída dos ramais para os dois setores com o menor consumo de energia elétrica, só foi possível conseguir com a utilização do controlador *fuzzy* “eficiente” nas válvulas, pois ele manteve essas pressões nos dois setores próximas da referência e apresentando o menor consumo de energia elétrica para o sistema.

Essa redução do consumo de energia elétrica pode ser observada com a aplicação do indicador do Consumo Específico, CE, que apresentou uma redução média de 23,75 % na comparação entre o controlador *fuzzy* “eficiente” e a operação em malha aberta. Já a operação com o controlador *fuzzy* aplicado ao sistema não apresentou uma melhor redução do consumo de energia elétrica porque deixou as

válvulas oscilantes nas suas ações de controle e, quando uma das quatro saídas monitoradas alcançava o valor da referência, o controlador *fuzzy*, que é baseado nas regras, considerava que tinha sido atingido seu objetivo e, assim, mantinha constante aquela situação operacional. Outro ponto negativo para esse controlador *fuzzy* foi que as potências elétricas registradas também não foram satisfatórias, uma vez que a bomba ficava operando na máxima frequência de alimentação e as válvulas atuando constantemente, provocando, por sua vez, perda de carga.

Logo, foi adotado o segundo controlador *fuzzy*, denominado de *fuzzy* “*eficiente*”, que foi desenvolvido para corrigir essas divergências no objetivo da pesquisa, de maneira que as pressões nos setores passaram a ser controladas pela ação da bomba e só eram corrigidas pelas válvulas quando a bomba não estivesse mais atuando e as pressões no setor ao lado estivessem com uma diferença de, no mínimo, um metro de coluna de água entre eles. Esses valores das potências elétricas registrados para cada tipo de operação com o sistema operando na presença da variação do consumo foram plotados em um gráfico (v. Figura 5.13).



**Figura 5.13** – Gráfico comparativo das potências, sistema operando com variação do consumo.

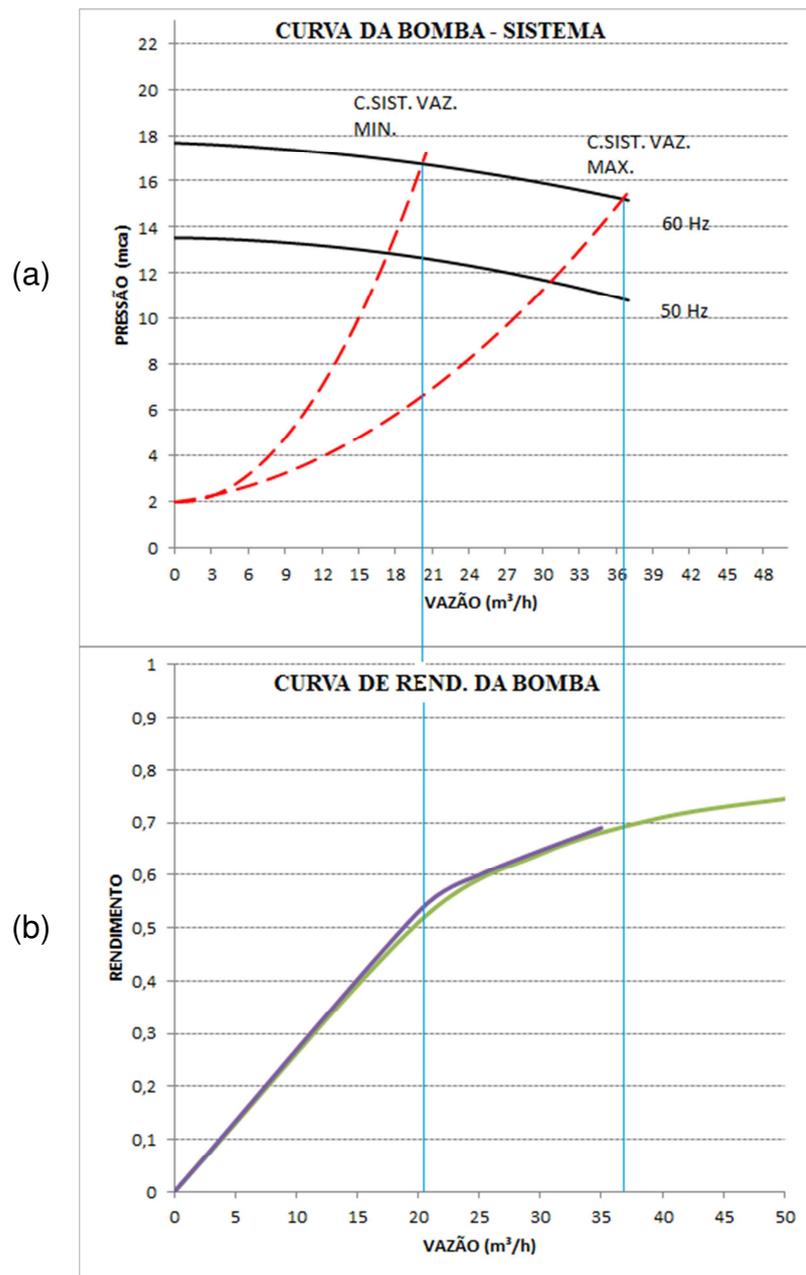
Então, como pode ser visto no gráfico da Figura 5.13, a operação sob a ação do controlador *fuzzy* “*eficiente*” foi a que apresentou o menor valor de potência elétrica registrada para toda a faixa de vazão do sistema. A minimização desses

valores foi possível porque o acionamento do motor era feito através de um inversor de frequência, razão pela qual o rendimento do motor não se alterou para nenhum valor de frequência.

O rendimento do conjunto motor-bomba, por sua vez, também não sofreu grandes variações, uma vez que as curvas características das bombas de vazão *versus* altura manométrica são análogas para velocidades diferentes da nominal, como já foi citado por Tsutiya (2004).

No gráfico da Figura 5.14a, é possível constatar que as diferenças entre as curvas de rendimento do conjunto motor-bomba para valores de velocidades diferentes da velocidade nominal são praticamente idênticas quando essas diferenças estão na faixa de  $\pm 20\%$  da velocidade nominal do conjunto.

No gráfico da Figura 5.14b, é possível observar que o rendimento do conjunto motor-bomba, no ponto da vazão máxima e mínima, é praticamente o mesmo para as duas faixas de velocidades, muito embora seja imperativo observar que, entre os dois pontos das vazões mínima e máxima, existe uma diferença nos valores do rendimento, ou seja, na faixa das vazões máximas, o valor do rendimento ficou em 69%, enquanto que, para a faixa de vazões mínimas, esse valor de rendimento ficou em 56%.



**Figura 5.14** – Gráfico das curvas características (a) da bomba e (b) do rendimento.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

Os objetivos centrais desta pesquisa foram propostos para controlar e manter constante, num valor de referência, a pressão nas saídas dos ramais de uma rede de distribuição de água setorizada que operava na presença da variação do consumo. Essas ações visaram à economia de energia elétrica e à otimização operacional do sistema. Para isso, foi utilizado um sistema de controle inteligente que teve a lógica *fuzzy* como ferramenta das ações de controle na sua operação.

A pesquisa foi realizada em uma bancada experimental do LENHS-UFPB que se assemelha a um sistema real de abastecimento de água. Ela é composta de uma bomba que injeta água diretamente na rede, que foi dividida em três setores, sendo que, em dois desses setores, foram instaladas válvulas reguladoras de pressão para auxiliar no controle, atuando de forma individualizada, para transferir o excesso de pressão de um setor para o outro.

Como foi evidenciado no capítulo de resultados, a operação sob a ação do controlador *fuzzy* manteve controlada a pressão nos ramais, sem oscilações e próxima de 10 mca, que foi o valor de referência proposto. Já na operação em malha aberta, a pressão variou dos 13 mca aos 17,5 mca. Assim, esse objetivo da pesquisa foi logrado com êxito.

No desenvolvimento da tese, fez-se necessário projetar um sistema de supervisão na plataforma LabVIEW<sup>TM</sup> com um controlador *fuzzy* incorporado para supervisionar, controlar e operar a rede de distribuição de água coletando os dados hidráulicos e elétricos, ali produzidos, para serem utilizados no processo de decisão do controlador.

De posse desses dados, foi feito um estudo para identificar a influência dos atuadores, a bomba e as válvulas, quando submetidos à ação do *fuzzy* no controle da pressão da rede. Verificou-se que o tempo de reposta dessa ação era diferente para cada atuador, ou seja, a bomba levou cerca de 0,5 segundo de atraso para implementar mudanças na pressão, enquanto que, nas válvulas, esse tempo foi cerca de 5 segundos. A conclusão do estudo das influências dos atuadores foi que

as válvulas se mostraram muito lentas quando comparadas à ação do inversor de frequência, como também suas ações de controle, quando agiram isoladamente, não se mostraram mais econômicas em termos energéticos.

Quanto ao aspecto do consumo de energia elétrica, foram observadas mudanças entre os valores da potência ativa registrados para todos os três modelos de operação, em malha aberta, sob a ação dos controladores *fuzzy* e do *fuzzy* “eficiente”, para toda a faixa de vazão, que variou dos 17 m<sup>3</sup>/h aos 34 m<sup>3</sup>/h. Na comparação entre os dados da operação do sistema em malha aberta com os dados sob a ação do controlador *fuzzy*, ocorreu uma diminuição média de 13%. Já na outra comparação feita entre os valores das potências ativas da operação em malha aberta com o sistema *fuzzy* “eficiente”, ocorreu também uma diminuição de 19,46%. Esses valores demonstram a eficácia do controlador *fuzzy* “eficiente” em termos de economia de energia elétrica, que, de fato, se mostrou a operação mais eficaz.

Com a atuação desse controlador *fuzzy* “eficiente”, foi possível verificar o valor do indicador de eficiência energética, denominado de Consumo Específico de Energia Elétrica (CE). Esse indicador relaciona a energia elétrica, em kWh, necessária para elevar um volume bombeado de 1 m<sup>3</sup> da referida unidade de bombeamento. Assim, tem-se um CE de 0,08 kWh/m<sup>3</sup> para toda a faixa de vazão do sistema — dos 17 m<sup>3</sup>/h aos 34 m<sup>3</sup>/h —, e para o *fuzzy* “eficiente” um CE de apenas 0,06 kWh/m<sup>3</sup>. Portanto, esse indicador foi menor em 0,02 kWh/m<sup>3</sup>, ou seja, mais econômico que a operação em malha aberta. Dessa forma, corroborou-se que a aplicação desse controlador *fuzzy* “eficiente”, em um sistema que apresente semelhança operacional com o utilizado nesta pesquisa, trará uma economia de energia elétrica próximo de 20%.

Evidenciou-se também que, além da economia de energia elétrica, o sistema *fuzzy* “eficiente”, ao ser aplicado no controle da pressão em sistemas semelhantes ao pesquisado, poderá proporcionar uma melhoria no serviço de abastecimento de água com a redução do desperdício, em virtude da minimização de vazamentos. Esses vazamentos, provocados pelo excesso de pressão, trazem, além do evidente desperdício de água e de produtos químicos jogados ao solo, outro agravante que é o tempo de paralisação para a manutenção da rede quando ocorrer os vazamentos.

Outro detalhe a ser destacado com relação à redução da pressão, é o

prolongamento da vida útil da rede de distribuição e dos acessórios nela instalados, visto que, ao ser aplicado, esse tipo de controle em sistemas reais irá possibilitar a operação da rede com valores menores de pressão.

### **6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Sugerem-se, a seguir, alguns trabalhos que poderão ser desenvolvidos a partir desta pesquisa.

1- Estudo para constatar que o motor acoplado a uma bomba e variando sua velocidade em torno de 20% não perde rendimento quando acionado por um inversor de frequência.

2- Estudo sobre possíveis falhas que, porventura, esse sistema venha a apresentar, suas consequências e prováveis soluções.

3- Estudo do tempo de paralisação para manutenção da rede de distribuição no processo de retirada de vazamentos.

4- Estudos sobre o prolongamento da vida útil da tubulação da rede de distribuição de água em sistemas que operem sobre a influência de controladores de pressão.

5- Desenvolvimento de uma pesquisa com o objetivo de quantificar o valor para reservatórios de distribuição em sistemas de abastecimento de água.

## REFERÊNCIAS

ABNT – **NBR 12211** – Estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água. Abr. 1992. 14 p.

ADASA - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. **Abastecimento de água** - Conceito. Disponível em: <[http://www.adasa.df.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=838%3Aabastecimento-de-agua&catid=74&Itemid=316](http://www.adasa.df.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=838%3Aabastecimento-de-agua&catid=74&Itemid=316)>. Acesso em: ago. 2016.

ANDRADE FILHO, L. S. et al. **Sistema de bombeamento** – Eficiência energética. 2. ed. João Pessoa: Editora Universitária /UFPB, 2012.

AZEVEDO NETO, J. M. de; ALVAREZ, G. A. **Manual de hidráulica**, 6. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

BARRETO, Gilberto Caldeira; GOMES, Daniel Mescoito; GUTIERREZ, Lucy Anne Cardoso Lobão; PEREIRA, José Almir Rodrigues. **Impacto da setorização no abastecimento de água em áreas urbanas**. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA, 6., 5 a 7 jun., 2006. João Pessoa (Brasil),

BEZERRA, S. T. M. **Sistema fuzzy para controle piezométrico de sistemas de distribuição de água visando à economia de água e energia**. 2009. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), UFPB, João Pessoa, PB, 2009.

BEZERRA, S. T. M.; SILVA, S. A. **Automação e Controle**. In: GOMES, H. P. (Org.) **Sistemas de Bombeamento** – Eficiência Energética. João Pessoa: UFPB, p. 203-249, 2009.

BEZERRA, S; T. M.; SILVA, S. A. da; GOMES, H. P. **Operational optimisation of water supply networks using a fuzzy system**. In: *Water SA*, vol. 38, n. 4, July 2012. ISSN 0378-4738.

BEZERRA, S. T. M.; SILVA, S. A.; GOMES, H. P.; SALVINO, M. M. **Economia de energia em sistemas de bombeamento**: aplicação de um sistema fuzzy. *Ciência & Engenharia*, v. 24, n. 1, p. 71-78, jan.-jun. 2015.

BRASIL. Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano/Secretaria de Política Urbana. **Programa nacional de combate ao desperdício de água**: DTA-C3 medidas de redução de perdas elementos para planejamento. Brasília, 1999.

CAMBOIM, W. L. L. **Aplicações de Técnicas de Controle Fuzzy para Sistemas de Abastecimento de Água**. 2008. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), UFPB, João Pessoa, PB, 2008.

CAMBOIM, W. L. L.; SILVA, S. A.; GOMES, H. P. **Aplicação de técnicas fuzzy no controle de pressão em sistemas de abastecimento de água.** *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 19, n. 1, p. 67-77, jan./mar. 2014.

CARRIJO, I. B. **Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multiobjetivo e aprendizado de máquina.** 2004. 217 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), 2004.

CARRIJO, I. B. et al. **Otimização da Operação de Sistemas de Distribuição de Água Utilizando Algoritmos Genéticos Multiobjetivo.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., 23-17 nov. 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: [s.n.], 2003. CD ROM 12 p.

CARVALHO, P. S. O. **“EficientE”** – Um método de dimensionamento econômico para redes de distribuição de água. 2007. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), 2007.

\_\_\_\_\_. **Controle para bombeamento distribuído com vistas à minimização dos custos energéticos aplicados a sistemas de abastecimento de água.** 2012. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, PB, 2012.

CELESTE, Alcigeimes B.; BILLIB, Max; CURI, Wilson F. **Regras operacionais de reservatório derivadas por um sistema de inferência neuro-fuzzy adaptativo.** In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 10., 16 a 19 nov. 2010, Fortaleza, Ceará. **Anais...** Fortaleza: [s.n.], 2010.

CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento. **Etapas do tratamento.** Disponível em: <[http://www3.corsan.com.br/sistemas/trat\\_agua\\_etapas.htm](http://www3.corsan.com.br/sistemas/trat_agua_etapas.htm)>. Acesso em: ago.2016.

CREACO, E.; FRANCHINI, M. **A new algorithm for real-time pressure control in water distribution networks.** *Water Science & Technology Water Supply*, vol.13, n. 4, pp. 875-882, August 2013.

FONTANA, Marcele Elisa; MORAIS, Danielle Costa. **Modelo para setorizar redes de distribuição de água baseado nas características das unidades consumidoras.** 2013. Disponível em: <[www.scielo.br/pdf/prod/2013nahead/aop\\_prod0665-12.pdf](http://www.scielo.br/pdf/prod/2013nahead/aop_prod0665-12.pdf)>. Acesso em: ago. 2016.

FREITAS, E. **Água potável.** Brasil Escola. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/geografia/agua-potavel.htm>>. Acesso em: ago. 2016.

FU, Guangtao; KAPELAN, Zoran. **Fuzzy probabilistic design of water distribution networks.** *Water Resources Research*, vol. 47, n. 5, May 2011.

GOVERNO DO PARANÁ. **Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário** - Parte 1 - Maringá. Disponível em: <[www.maringa.pr.gov.br/saneamento/pmsb1.pdf](http://www.maringa.pr.gov.br/saneamento/pmsb1.pdf)>. Acesso em: ago. 2016.

GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S. O. **Manual de Sistema de Bombeamento – Eficiência Energética**. João Pessoa: Editora da UFPB. 2012.

GUIMARÃES, A. J. A.; CARVALHO, D. F. N.; SILVA, L. D. B. **Saneamento Básico**. Ago. 2007. Disponível em: <<http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/Apostila%20IT%20179/Cap%201.pdf>>. Acesso em: ago. 2016.

JANG, J.-S. R.; GULLEY, N. **Fuzzy Logic Toolbox User's Guide**. Natick, MA: MathWorks, 1995.

KANG, D. **Real-Time Optimal Control of Water Distribution Systems**. *Procedia Engineering*, vol. 70, pp. 917-923, 2014.

KOSKO, B. **Pensamiento Borroso: La Nueva Ciencia de la Lógica Borrosa**. Barcelona: Crítica, 1993. ISBN: 84-7423-698-3 330605.

LAI, Zhounian; WU, Peng; WUN, Dazhuan. **Application of fuzzy adaptive control to a MIMO nonlinear time-delay pump-valve system**. *ISA Transactions*, vol. 57, pp. 254-261, July 2015.

LANSEY, Kevin E.; MAYS, Larry W. **Optimization Model for Water Distribution System Design**. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 115, n. 10, pp. 1401-1418, 1989.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. **An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller**. *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, n. 1, pp. 1-13, 1975.

MASCHERONI, J. M. (Coord.). **Guia de Aplicação de Inversores de Frequência**. 3. ed. [S.l.]: [s.d.].

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Glossário Saneamento e Meio Ambiente**. 2016. Disponível em: <<http://www.aguabrasil.icict.fiocruz.br/index.php?pag=sane>>. Acesso em: ago. 2016.

MENDEL, J. M. **Uncertain rule-based fuzzy logic systems: introduction and new directions**. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2001. ISBN-13: 978-0130409690. ISBN-10: 0130409693.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Uma rápida comparação das Interfaces de Comunicação Serial RS-232, RS-422, e RS-485**. 2013. Disponível em: <<http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/DE153F74C4BF3AD8862576AB006C1AAF>>. Acesso em: ago. 2016.

NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 3. ed. Rio de Janeiro: LCT, 2002.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

OSMANA, T. A.; EL-GIDDAWYA, BAKERYB, E., M.; SALAMAB, A. **Pesquisa com abordagem de lógica fuzzy para a seleção de válvulas hidráulicas de controle direcional na fase de concepção preliminar**. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 13, n. 1, pp. 35-44, 2003.

PEREIRA, J. A. R.; CONDURU, M. T. **Abastecimento de água**: informações para eficiência hidroenergética. João Pessoa: Editora UFPB, 2014. 127p.

PINTO, W. D. **Avaliação da Susceptibilidade a Escorregamentos em Solo: Uma Abordagem Fuzzy**. 2002. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Estadual Norte Fluminense, UENF, Rio de Janeiro, 2002.

RAMOS, H. et al. **Leakage control policy within operating management tools**. *Computer and Control for Water Industry*, pp. 61-73, 2001.

RALIZE, C. H. C.; MARQUES, R. S. **Elementos de automação**. Módulo I – Conceitos. Departamento de Engenharia de Manutenção. São Paulo-SP: SABESP, 2006.

RODRIGUES, W. **Critérios para o uso eficiente de conversores de frequência em sistemas de bombeamento de água**. 2007. 237 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2007.

SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Mateus. **Tratamento de água**. Disponível em: <<http://www.saaesma.com.br/tratamento>>. Acesso em: ago. 2016.

SEGALA, Mariana. **Água**: a escassez na abundância. 2012. Disponível em: <<http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/ambiente/populacao-falta-agua-recursos-hidricos-graves-problemas-economicos-politicos-723513.shtml>>. Acesso em: maio 2016.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem fuzzy**. 2. ed. São Paulo-SP: Blucher, 2007.

SPOLAOR, A. S. **Automação nos sistemas de abastecimento de água** – Caso do controle da reservação de distribuição. 2011. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, Campinas, SP, 2011.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 1. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

\_\_\_\_\_. **Abastecimento de Água**. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

YANG, Z.; WU, L.; DONG, X. **Control System Desing for Constant Pressure Water Supply**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIMEDIA AND INFORMATION TECHNOLOGY AND ITS APPLICATIONS, 2., 23-25 Aug. 2010, Kathmandu, Nepal. **Proceedings...** [s.l.]: IEEE, 2010.

ZADEH, L. A. **Fuzzy Sets**. *Information and Control*, v. 8, n. 3, pp. 338-353, Jun. 1965.

## **APÊNDICE A**

### **AJUSTE E VERIFICAÇÃO DOS SENSORES E TRANSDUTORES**

## A.1 Sensores e Transdutores

Neste experimento, foram utilizados vários transdutores de pressão, com gama de pressão variando de 0 a 20 mca, 0 a 30 mca e de 0 a 40 mca, instalados nos pontos de saída dos setores e ao longo da rede.

Vale afirmar, neste contexto, que, para realizar a medição da vazão, foi instalado um medidor eletromagnético na saída da tubulação de recalque da bomba. Todos esses transdutores de pressão e de vazão foram utilizados no monitoramento das variáveis hidráulicas.

Além disso, esses sensores, quando produzidos, são aferidos em bancadas pelo fabricante. No entanto, depois de instalados e em operação, poderão ocorrer pequenos desvios nas leituras em virtude de algumas variáveis externas, como a temperatura, fluidos com características físico-químicas diferentes das especificadas pelo fabricante, perturbações elétricas oriundas das fontes elétricas, entre outras.

## A.2 Verificação dos Transdutores de Pressão

Ressalte-se que, neste experimento, se fez necessário executar uma verificação da curva de resposta dos transdutores de pressão, com a finalidade de se ter a garantia do grau de exatidão desses componentes, de maneira que não houvesse influência na eficiência do controlador, levando-o a erros de leituras ou de estabilidades das medidas. Cabe ressaltar também que a execução do procedimento para a verificação nos transdutores se iniciou com a identificação do local de sua instalação, momento em que eles receberam uma identificação com o prefixo PT, sigla do inglês *Pressure Transducer*, que significa transdutor de pressão, e as letras XX) representando números que variaram de 01 a 16. Logo, infere-se que esses transdutores foram identificados por PT-XX.

O passo seguinte, nesse processo de verificação, foi registrar a leitura de cada transdutor com o sistema ligado na velocidade máxima do motor em 60 Hz e todas as saídas fechadas. Dessa forma, o líquido não escoava no interior da tubulação e apenas o que ocorria era a pressurização desse líquido no interior da rede. Essa operação do sistema, denominada de *shut-off*, possibilitou que as pressões fossem elevadas ao máximo que a bomba conseguiu atingir.

Depois de registradas as pressões máximas a que os transdutores poderiam ser submetidos nesse sistema, a bomba foi desligada, a rede esvaziada e os transdutores removidos para serem submetidos agora a uma pressão conhecida que foi aplicada por uma balança de precisão, denominada de Balança de Peso Morto (v. Figura A.1).

A balança é composta, pois, de pesos de referência, variando de 0,5 kg e de 1 kg, ou aproximadamente 5 a 10 mca. Entretanto, neste experimento, foi usado apenas o peso de 1 kg ou 10 mca.

Esse peso foi utilizado para servir de referência na comparação entre a pressão aplicada pelo cilindro na tubulação da balança que alimenta, de um lado, a saída do local onde está o peso e, do outro lado, a saída onde é fixado o transdutor.



**Figura A.1** – Balança de peso morto.

Destaque-se também que a pressão aplicada pelo cilindro na tubulação ocorreu até o momento em que o peso alcançou a posição indicada por um ponto referencial, conforme pode ser visto na Figura A.2. Nesse instante, a pressão nas duas saídas é igual, e o transdutor está submetido à pressão do peso.

Os transdutores, para serem ativados e iniciarem seu processo de medição da pressão, necessitam de uma alimentação que pode variar de 9 Vcc a 30 Vcc,

como já foi dito anteriormente. Assim, eles foram ligados através dos seus pinos 1 (+) e 2 (-) a uma fonte com a tensão ajustada em 24 Vcc, como visto na Figura A.3.



**Figura A.2** – Detalhe da indicação do peso.



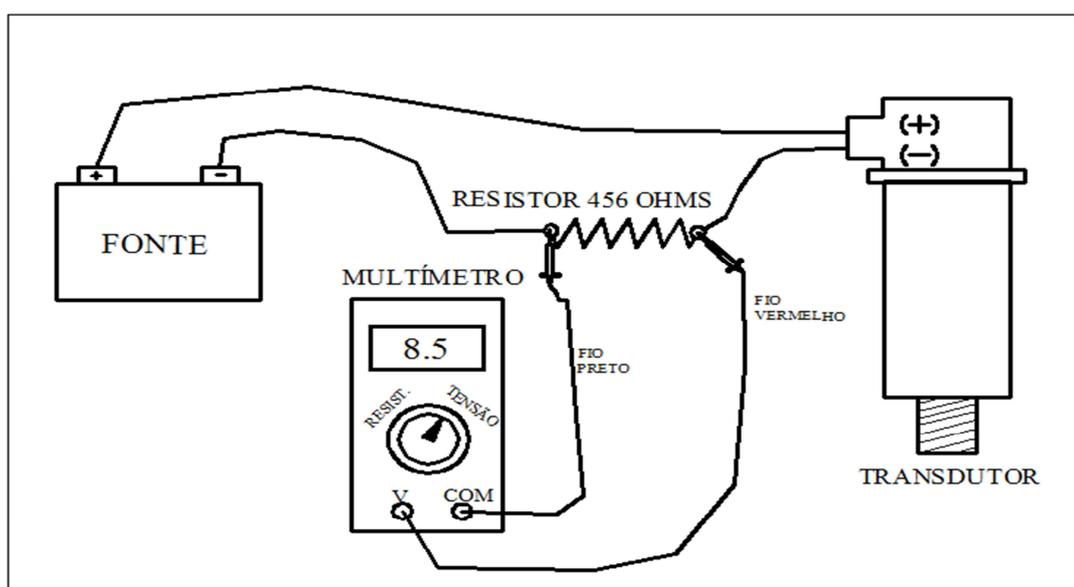
**Figura A.3** – Fonte de tensão contínua.

O procedimento de verificação adotado para todos os transdutores de pressão, que foram testados aqui neste experimento, foi representado por apenas um, o qual foi tomado como exemplo para ser explicada a metodologia.

Afirma-se ainda que esses transdutores medem a pressão e a convertem em uma saída de corrente em mA, como já foi mencionado.

Contudo, para minimizar possíveis erros de paralaxe nessa medição, em virtude de o instrumento utilizado ser um multímetro analógico, foi projetado um

circuito eletrônico capaz de converter essa corrente em mA em tensão elétrica contínua  $V_{cc}$ . Então, o circuito desenvolvido para essa conversão da corrente mA em tensão  $V_{cc}$  (v. Figura A.4) é bastante simples e foi adicionado ao circuito de medição da corrente uma resistência elétrica no valor de  $456 \Omega$ , com o objetivo de provocar uma queda de tensão no resistor e, assim, possibilitar fazer as medições em tensão  $V_{cc}$ . Nesse contexto, resalte-se que os valores da medição de tensão variaram na faixa de  $1,85 V_{cc}$  a  $9,25 V_{cc}$ , de modo que o valor de  $1,85 V_{cc}$  está para  $4 \text{ mA}$ , que representa a condição do transdutor de estar sem pressão, e para a maior tensão,  $9,25 V_{cc}$ , a relação está para  $20 \text{ mA}$ , que é o valor do fundo de escala do transdutor e representa a maior pressão para o sistema em operação.



**Figura A.4** – Esquema elétrico do circuito de conversão da corrente elétrica em tensão.

Esses valores de tensão foram obtidos, então, a partir do resultado do produto da resistência ôhmica pela corrente contínua:

$$U = R.I \quad (\text{A.1})$$

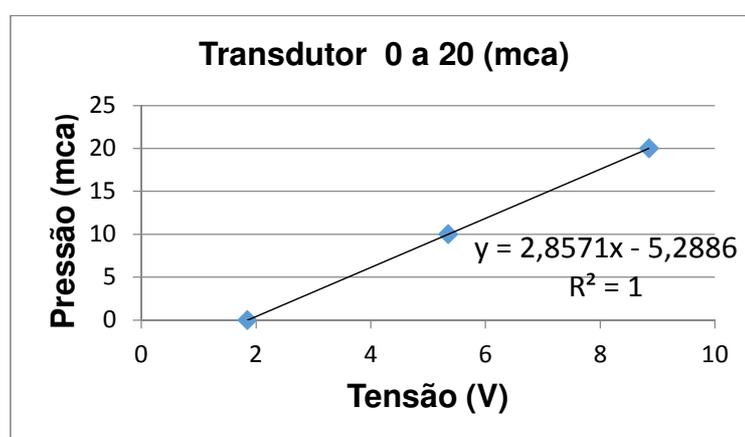
onde  $U$  é o valor da tensão contínua, em volts,  $R$  é o valor da resistência elétrica, em ohms, e  $I$  é o valor da corrente em Ampère.

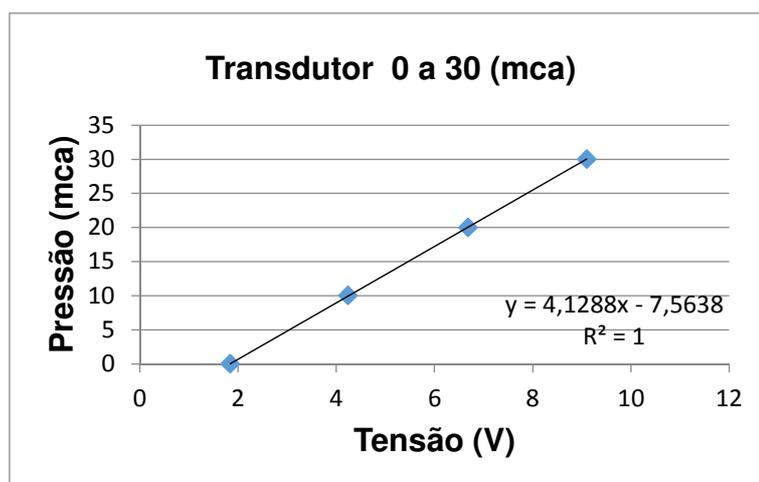
Nessa rede, foram utilizados transdutores com pressões máximas de 20, 30 e de 40 mca. Logo, as informações quanto às medições das tensões realizadas, para cada transdutor nos diversos pontos de pressão, quando foram aplicados pesos na balança, estão reunidas na Tabela A.1.

**Tabela A.1** – Medição da tensão para transdutor PT-01 a PT-16.

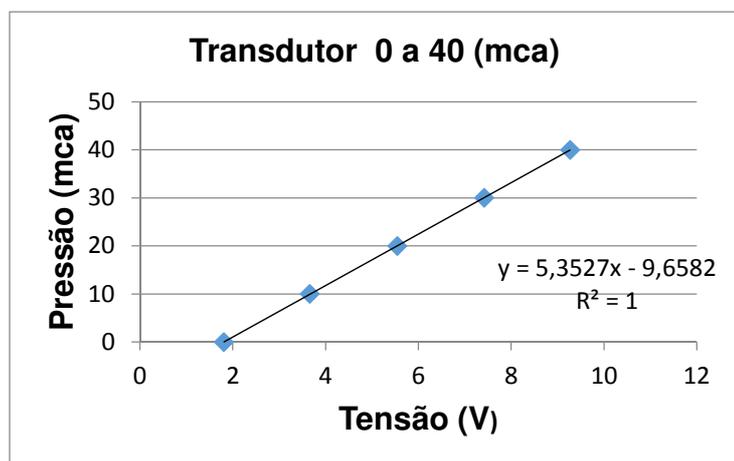
<b>PLANILHA COM VALORES DE TENSÃO Vcc</b>					
<b>IDENT.</b>	<b>PRESSÃO mca</b>				
	0	10	20	30	40
PT-01	1,840	4,213	6,720	9,100	–
PT-02	1,840	4,240	6,680	9,100	–
PT-03	1,809	3,660	5,545	7,420	9,270
PT-04	1,926	3,806	5,680	7,590	9,510
PT-05	1,831	3,750	5,620	7,460	9,260
PT-06	1,823	3,735	5,600	7,440	9,230
PT-07	1,850	5,353	8,850	–	–
PT-08	1,851	5,354	8,870	–	–
PT-15	1,835	3,751	5,670	7,450	9,260
PT-16	1,706	3,608	5,457	7,320	9,170

Esses valores das tensões medidas relacionadas com as respectivas pressões, aplicadas na balança, foram plotados em gráficos, como pode ser observado nas Figuras A.5, A.6 e A.7, os quais representam todos os transdutores das escalas de 0 a 20, 0 a 30 e 0 a 40 mca, respectivamente.

**Figura A.5** – Gráfico da Pressão (mca) versus Tensão Vcc para transdutores de 20 mca.



**Figura A.6** – Gráfico da Pressão (mca) *versus* Tensão Vcc, transdutores de 30 mca.



**Figura A.7** – Gráfico da Tensão Vcc x Pressão mca, transdutores de 40 mca.

Assim, é possível observar que os valores medidos da tensão durante os testes geraram pontos que, unidos, representam uma reta, e não apresentaram desvio de leituras.

### A.3 Ajustes da Corrente nos Medidores de Vazão

Os medidores de vazão eletromagnéticos são fabricados com a estrutura em PVC (v. Figura A.8) e se apresentam com excelente precisão, não têm perda de carga por não terem partes móveis no seu interior e não sofrem alteração do processo de medição em função do aumento da temperatura, da pressão ou da densidade.



**Figura A.8** – Vista do medidor de vazão eletromagnético em PVC.  
Fonte: CATÁLOGO INCONTROL (2016).

Esse modelo do medidor de vazão instalado na bancada tem o diâmetro nominal de 38 mm com uma faixa de medição que varia de 1,24 m<sup>3</sup>/h a 40,8 m<sup>3</sup>/h, seguiu rigorosamente as recomendações do fabricante quanto a ser evitada incidência dos raios solares, vibrações mecânicas, locais com presença de bolsões de ar no seu interior, entre outras.

O princípio de funcionamento dele é baseado na lei de Faraday, que estabelece que um condutor em movimento dentro de um campo magnético faz surgir nesse condutor uma força eletromotriz induzida,  $E$ .

Além disso, para o processo de medição da vazão, o líquido foi considerado como um condutor. Por isso, ele deverá ter uma condutividade elétrica mínima de 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  deslocando-se no interior de um campo magnético formado pela bobina de excitação. Ressalte-se também que, no lado oposto à bobina, existem eletrodos utilizados para receber essa tensão induzida e enviá-la para uma central de conversão da tensão em sinal de corrente de 4 mA a 20 mA.

De acordo com o fabricante, a taxa de fluxo magnético,  $B$ , é calculada a partir da seguinte equação:

$$E = D.B.V \quad (\text{A.2})$$

onde  $E$  é a tensão contínua, em volts, induzida no interior do campo magnético,  $D$  é o diâmetro, em metros, da seção circular do campo magnético e  $B$  é o fluxo magnético dado em weber.

O cálculo da vazão é realizado utilizando a equação da continuidade, que relaciona o produto da velocidade de escoamento do fluido com a área da seção transversal da tubulação por onde passa o escoamento:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} V \quad (\text{A.3})$$

onde  $Q$  é o valor da vazão em metros cúbicos por segundo,  $D$  é o diâmetro em metros da seção transversal do medidor e  $V$  é a velocidade do fluxo de água em metros por segundo.

No processo de simplificação das duas equações, restou a Equação A.4 que calcula o valor da vazão em função da tensão induzida no interior do medidor.

$$Q = \frac{\pi D}{4B} E \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{A.4})$$

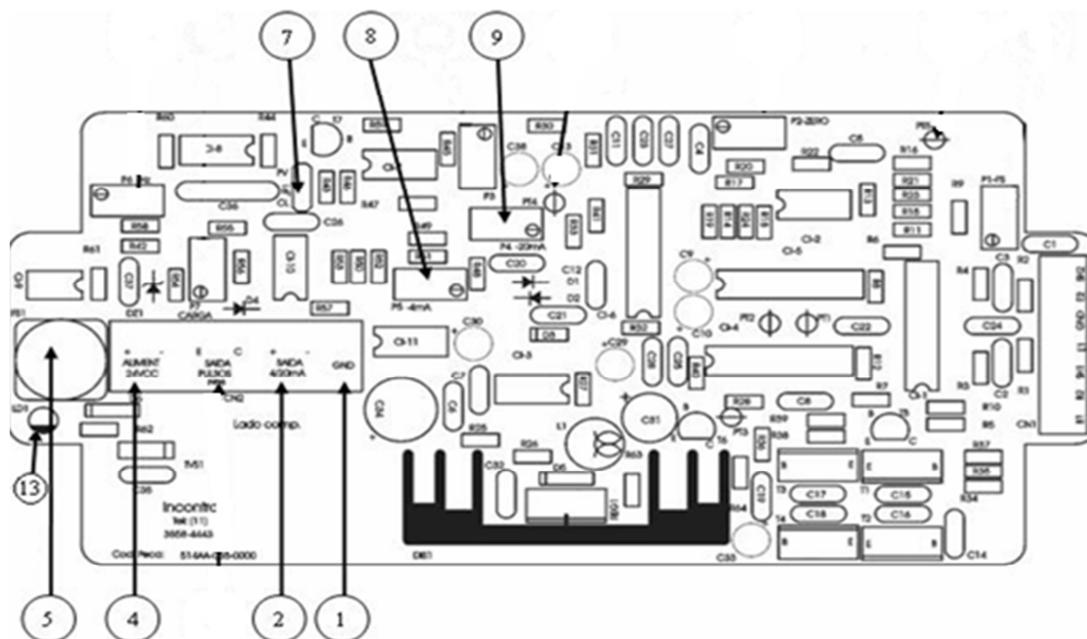
E, finalmente, para o cálculo da tensão induzida (v. Equação A.5), ficou apenas a vazão como valor variável, uma vez que o diâmetro e o fluxo magnético são valores definidos e constantes:

$$E = \frac{4B}{\pi D} Q \text{ V} \quad (\text{A.5})$$

Assim, a vazão medida no interior do hidrômetro ficou dependente apenas da tensão induzida. Essa tensão é ampliada e convertida em um sinal de corrente de 4 mA a 20 mA pela placa eletrônica do medidor.

A instalação do medidor foi feita seguindo as orientações do fabricante quanto às distâncias recomendadas, no sentido do fluxo, com valores maiores de 10 vezes o diâmetro, entre as conexões que o antecedem e o medidor, a instalação em locais fora do alcance de raios solares e o uso de um condutor de proteção (aterramento) ligado ao aparelho. Todas essas recomendações foram seguidas.

A seguir, será apresentado um desenho da placa do circuito eletrônico do medidor, no qual se identificaram os pontos utilizados no processo de instalação e de ajustes dos valores da corrente dele (v. Figura A.9).



**Figura A.9** – Desenho da placa de circuito eletrônico do medidor de vazão.  
Fonte: CATÁLOGO INCONTROL (2006).

Os bornes no barramento representado pelos pontos de 1 a 4, mostrados acima, foram utilizados para proteção e alimentação da placa de circuitos eletrônicos e também para conectar as saídas dos sinais de saída analógicos de corrente e de pulsos com o CLP, que são utilizadas para medição da vazão.

A placa do medidor foi alimentada por tensão de 24 Vcc através do ponto 4. No ponto 2, foram ligados os dois condutores (+) e (-) do sinal da saída analógica de corrente 4 mA a 20 mA para o borne de entrada do CLP.

No ponto 5, por sua vez, existe um fusível para proteção da placa eletrônica contra curtos-circuitos.

O ponto 7 apresenta o *jumper* JP1 utilizado no processo de calibração do sinal de saída da corrente de 4 mA e de 20 mA.

Para se ajustar o valor do sinal de corrente de 4 mA, foi necessário colocar o *jumper* na posição em que todos os pinos de JP1 ficassem desconectados, conforme visto na Figura A.10.



**Figura A.10** – Posição do *jumper* JP1 para calibração de 4 mA.  
Fonte: CATÁLOGO INCONTROL (2016).

Após colocado o *jumper* nessa posição da Figura A.10, o próximo passo foi instalar um amperímetro nos bornes de saída do sinal de corrente, ponto 2, para medir o valor da corrente gerada no medidor.

A seguir, foi realizado o procedimento de ajuste do *trimpot* até que o valor da corrente ficasse igual a 4 mA. Vale ressaltar que esse *trimpot* foi identificado no desenho da Figura A.9 através do ponto 8.

O procedimento de ajuste para o valor da corrente de 20 mA foi executado após ter sido colocado o *jumper* na posição de ligar dois pinos, conforme pode ser visto na Figura A.11.



**Figura A.6** – Posição do *jumper* JP1 para calibração de 20 mA.  
Fonte: CATÁLOGO INCONTROL (2016).

Com JP1 nessa posição, apresentando os dois pinos ligados, foi executado o ajuste do valor da corrente até que o valor registrado no multímetro ficasse em 20 mA. Esse ajuste se deu através do *trimpot*, apresentado pelo ponto 7, na Figura A.9.

Para finalização do procedimento de ajuste de calibração do sinal de saída, é necessário que os valores das correntes registrados no multímetro não fiquem oscilando. Em seguida, foi colocado o JP1 na sua posição de operação normal, mostrada na Figura A.12.



**Figura A.7** – Posição de operação normal do *jumper* JP1.  
Fonte: CATÁLOGO INCONTROL (2016).