

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA
- MESTRADO - DOUTORADO -

USO DE VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO NA OTIMIZAÇÃO DE REDE SETORIZADA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

por

Renato de Sousa

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

João Pessoa - Paraíba

setembro - 2017

RENATO DE SOUSA

**USO DE VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO NA
OTIMIZAÇÃO DE REDE SETORIZADA DE DISTRIBUIÇÃO
DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica. Área de
concentração: Dinâmica e Controle
de Sistemas Mecânicos.

Orientador: Dr. Heber Pimentel Gomes

**João Pessoa
2017**

Catálogo na publicação
Setor de Catalogação e Classificação

S725u Sousa, Renato de.
 Uso de válvulas redutoras de pressão na otimiza-
 ção de rede setorizada de distribuição de água /
 Renato de Sousa. – João Pessoa, 2017.
 70 f. : il.

Orientadora: Heber Pimentel Gomes.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT/ PPGEM

1. Engenharia mecânica. 2. Sistemas de abasteci-
mento de água. 3. Válvulas redutoras de pressão.
4. Controle de Pressão. I. Título.

UFPB/BC

CDU – 621(043)

USO DE VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO NA OTIMIZAÇÃO DE REDE SETORIZADA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Por:

Renato de Sousa

Dissertação aprovada em 22 de setembro de 2017



Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes
Orientador – UFPB



Prof. Dr. Abel Cavalcante Lima Filho
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. José Kleber Costa de Oliveira
Examinador Externo – IFRN



Prof. Dr. JEAN PIERRE VERONESE
Examinador Externo - UFPB

João Pessoa - PB

2017

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha eterna
mãe VITÓRIA TARGINO DE
ARAÚJO que guiou cada um dos
meus passos para esta grande
jornada.*

AGRADECIMENTOS

(In memoriam) a minha mãe Vitória Targino de Araújo que me incentivou a todos os momentos de minha vida para chegar neste nível de conhecimento acadêmico e pessoal.

(In memoriam) ao meu pai Sebastião Ferreira de Sousa por ter me cedido toda a educação ao qual lhe foi confiada.

Agradeço aos meus pais, Lourival Targino de Araújo, Maria de Fátima da Silva que estão presentes em todos os momentos de minha vida.

Aos meus irmãos Leovegildo Targino, Roberto de Sousa, Laerson Targino, Lucíola Targino, Lícia Targino, Leonísia Targino, Roseane de Sousa, Rosileide de Sousa, Renata de Sousa, Rosemere de Sousa.

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

Aos amigos do Laboratório de eficiência energética e hidráulica em saneamento – LENHS Lais Salvino, Moises Salvino, Geraldo Moura Pedro Augusto Kamilla Henriques por todo o apoio.

A minha Noiva Rhayssa Lorena Silva Brazão por todo o apoio e amor por ela cedido bem como pela paciência em momentos difíceis.

Ao meu amigo Carlos Cássio de Alcântara, bem como aos seus pais Carlos Jorge de Alcântara e Maria Estela por ter ajudado em todos os momentos de minha vida acadêmica.

Ao meu amigo, Kenny Rogers Henriques, pela paciência nos momentos de estresse, pela serenidade e equilíbrio emocional que demonstrou nas nossas discussões acadêmicas.

Ao Meu amigo professor Dr. José Kleber Costa de Oliveira pelo incentivo ao término do trabalho e por todos os momentos de descontração.

Aos amigos Fábio Araujo, Diógenes Linard, Adonias Martins, Dáuberson Azevedo, Maria das Graças, pela paciência nos momentos de estresse e a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho mesmo aqueles cujos nomes não foram citados, mas que também foram importantes, meus sinceros agradecimentos.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) durante a vigência deste curso.

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância.”

(John F. Kennedy)

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo realizar uma análise energética e hidráulica de sistema de abastecimento de água setorizado. Foi utilizado um sistema de controle inteligente baseado na lógica *fuzzy*, o qual teve como função o controle de válvulas redutoras de pressão. Este sistema de controle visa controlar as pressões a jusante das válvulas para reduzir o excesso de pressão em tubulações, de forma a diminuir o volume perdido por vazamentos, perdas por consumo induzido ou até mesmo romper dutos. Deste modo, o controlador fará com que o sistema se adapte ao nível de máximo consumo do sistema, de forma a equilibrar as pressões em todos os pontos de consumo, evitando assim o abastecimento ineficiente a consumidores que se localizam em pontos mais afastados ou de topografias mais elevadas. A válvula redutora abre ou fecha de acordo com os níveis de pressão de cada setor, transferindo energia de pressão dos níveis de maiores pressões para os de menores. Todo o trabalho foi realizado em uma bancada experimental instrumentalizada e automatizada de forma a simular uma dinâmica de consumo no qual se utiliza dois setores consumindo diferentes volumes de água.

Palavras-Chaves: Otimização, Controle de pressão, Válvulas Redutoras de Pressão.

ABSTRACT

This research aimed to perform an energy and hydraulic analysis of a sectorized water supply system. An intelligent control system based on fuzzy logic was used, which has the function of controlling the pressure reducing valves. This control system aims to control the downstream pressures of the valves to reduce the high pressure of the pipes, in order to reduce volume lost by leaks, induced consumption or even ducts rupture. In this way, the controller will cause the system to adapt to the maximum consumption level, in order to balance the pressures in all consumption points, aiming to avoid the inefficient supply to consumers located in distant points or of higher topographies. The reduction valve opens or closes according to the pressure levels of each sector, transferring pressure energy from higher pressure levels to lower pressure levels. All the work was done in an instrumented and automated experimental bench intending to simulate a consumption dynamics in which two sectors consume different volumes of water.

Keywords: Optimization, Pressure control, Pressure reducing valves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de um sistema de abastecimento de água.....	23
Figura 2 - Representação espacial do índice de perdas no Brasil.....	26
Figura 3 - Setorização com dois setores com uso de VRP.....	29
Figura 4 - Vista Geral do LENHS	41
Figura 5 - Pontos de consumo da rede setorizada.....	42
Figura 6 - Diagrama esquemático das tubulações da rede LENHS.....	43
Figura 7 - Transdutor de pressão PTX 7217 (DRUCK).	45
Figura 8 - Medidores de vazão INCONTROL.....	46
Figura 9 - Válvula Proporcional (ARB24-3)	47
Figura 10 - Válvula solenoide utilizada.....	49
Figura 11 - Conjunto motobomba.....	50
Figura 12 - Representação em blocos dos componentes do inversor de frequência... 51	
Figura 13 - Foto do painel com inversor de frequência.	52
Figura 14 - Interface painel com detalhe de grandezas elétricas	53
Figura 15 - Sistema Supervisório	54
Figura 16 - Comportamento das variáveis hidráulicas sem controlador	56
Figura 17 - Variáveis hidráulicas com intervenção do controlador	57
Figura 18 - Diferenças de pressão entre o setor I e o II com relação a vazão	60
Figura 19 - Variação da posição da válvula com relação a pressão.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tubos utilizados na rede de distribuição	43
Tabela 2 - Faixa de Vazão do Transdutor Eletromagnético.....	46
Tabela 3 - Especificações técnicas.	47
Tabela 4 - Especificações da válvula solenoide utilizada na bancada.....	49
Tabela 5 - Especificações técnicas do conjunto motobomba.....	50
Tabela 6 - Parâmetros da planta com atuação do controlador	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CE	Consumo Específico de Energia
CLP	Controlador Lógico Programável
ETAs	Estações de Tratamento de Água
IHM	Interface Homem Máquina
LabVIEW™	Abreviação do inglês Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench.
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OMS	Organização Mundial de Saúde
<i>on/off</i>	Do Inglês [= ligar / desligar]
PA	Pressão Alta
PB	Pressão Baixa
PVC	Policloreto de Vinila
PWM	Abreviação do inglês Pulse-Width Modulation [= Modulação por largura de pulso]
RPDA	Rede Pressurizada de Distribuição de Água
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SCADA	Abreviação do inglês Supervisory Control and Data Acquisition System [= Sistema de Controle e Aquisição de Dados]
USB	Universal Serial Bus
VRPs	Válvulas Redutoras de Pressão
ZMC	Zonas de Medição e Controle

LISTA DE SÍMBOLOS

m	Metro
m^2	Área
m^3	Metro cúbico
mm	Milímetro
m^3/h	Metro cúbico por hora (vazão)
mca	Metro de coluna de água
ms	Milissegundo
mA	Miliampère
Nm	Newton-metro
H	Altura manométrica
Hz	Herz
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
cv	Cavalo Vapor
p	Número de polos do motor
rpm	rotações por minuto
$Shut-of$	Do inglês [=operação da bomba na pressão máxima e vazão zero]
Vca	Tensão alternada
Vcc	Tensão contínua
η	Rendimento do motor
η_b	Rendimento da bomba

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO I.....	17
1.0.	INTRODUÇÃO	17
1.1.	Objetivos.....	21
1.1.1.	Objetivo Geral.....	21
1.1.2.	Objetivos Específicos.....	21
1.2.	Organização do Trabalho	21
	CAPÍTULO II.....	23
2.0.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1.	Sistemas de Abastecimento de Água (SAA)	23
2.1.1.	Componentes Constituintes de um SAA	24
2.1.1.1.	Manancial e Captação.....	24
2.1.1.2.	Estação Elevatória	25
2.1.1.3.	Estação de Tratamento de Água (ETA).....	25
2.1.1.4.	Adução.....	25
2.2.	Perdas de Água em (SAA).....	25
2.3.	Custo de Energia de Bombeamento.....	26
2.4.	Controle de Pressão em SAA.....	27
2.4.1.	Setorização.....	28
2.4.2.	Válvulas Redutoras de Pressão	29
2.5.	Automação e Controle em SAA	30
2.5.1.	Sistema de Controle Fuzzy.....	32
2.6.	Estado de Arte.....	37
	CAPÍTULO III	40
3.0.	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1.	Bancada Experimental	40

3.2.	Rede de Distribuição.....	43
3.3.	Sensores e Atuadores Instalados na Rede.....	44
3.3.1.	Transdutores de Pressão.....	44
3.3.2.	Transdutores de Vazão.....	45
3.3.3.	Válvula Proporcional	46
3.3.4.	Válvula Solenoide.....	48
3.4.	Sistema de Bombeamento.....	49
3.5.	Painel Elétrico.....	50
3.6.	Sistema Supervisório	53
CAPÍTULO IV		55
4.0.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1.	Dinâmica do Sistema	55
4.2.	Operação com Aplicação da Ferramenta de Controle <i>Fuzzy</i>	56
4.3.	Sistema <i>Fuzzy</i> Aplicado nas Válvulas Redutoras de Pressão	57
4.4.	Avaliação Hidroenergética entre os Setores I e II	58
4.5.	Quantificação da redução do consumo de energia elétrica.....	63
CAPÍTULO V		65
5.0.	CONCLUSÕES	65
5.1.	Sugestões para Trabalhos Futuros	65
CAPÍTULO VI		67
6.0.	REFERÊNCIAS.....	67

CAPÍTULO I

1.0. INTRODUÇÃO

Uma das palavras mais usadas nos últimos anos, nos mais diferentes contextos e propósitos: é a sustentabilidade, os grandes líderes mundiais vêm se utilizando desta para discursos politicamente corretos.

Porém, sustentabilidade é um termo utilizado para definir ações e atividades humanas que visam suprir as necessidades atuais do homem, sem comprometer o futuro das próximas gerações. Ou seja, a sustentabilidade está diretamente relacionada ao desenvolvimento dos seres humanos sem agredir o meio ambiente, usando dos recursos naturais de forma inteligente para que eles se mantenham no futuro. Seguindo este parâmetro, a humanidade pode garantir o desenvolvimento sustentável.

Um dos temas mais tratados quando se fala em sustentabilidade é a problemática da água no planeta, a sociedade está cada vez mais consciente e preocupada com o andamento do consumo desenfreado deste recurso natural. O tema ganhou tamanha importância que levou a Organização das Nações Unidas (ONU) a patrocinar o Fórum Mundial da Água no ano de 2003 em Kyoto, no Japão.

A água está diversamente distribuída no planeta Terra: 97,5% está concentrada nos mares e os 2,5% restantes consiste em água doce (SHIKLOMANOV & RODDA, 2003). A parte majoritária da água doce (68,7%) está nas geleiras e, apenas, 30,9% se encontra em aquíferos e em solos congelados – permafrost. No que tange às águas superficiais (0,4% da totalidade de água doce), sua maior parte está concentrada nos lagos, seguida pela umidade dos solos e da atmosfera. No que se refere aos rios: carregam cerca de 1,6% do total da água doce disponível no planeta, no entanto, é válido ressaltar a dinamicidade dos rios e a parcela de água que carregam é somente um retrato efêmero do que se passa (PINTO-COELHO, 2015).

A história das relações traçadas entre a humanidade e suas cidades com a água, segue um rumo complexo e, sobretudo, dinâmico, tendo como base a sazonalidade natural no tocante à água, assim como as necessidades e expectativas humanas no decorrer do desenvolvimento das civilizações. A água é um bem imprescindível que serve não só para o consumo – sem o qual o ser humano está

fadado a poucos dias de vida, mas também a questões ligadas à higiene, ao desenvolvimento da agricultura, comércio e comunicações. Ademais, na antiguidade, as águas dos rios serviam, muitas vezes, como um coadjuvante na defesa de algumas cidades, tais como Paris – construída em ilhas, às margens do Rio Sena – e Budapeste, tendo como suporte o Rio Danúbio (BAPTISTA; CARDOSO, 2013).

Pelo fato de os recursos hídricos serem vitais para a sobrevivência e desenvolvimento humanos, o domínio desse elemento sempre foi um objetivo crucial e, com o passar dos séculos, foram adquiridas técnicas de irrigação, tubulação, construção de diques, entre outros. A gênese dos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) aconteceu há cerca de 4.500 anos, todavia, o homem já armazenava água em potes por volta de 9.000 a.C. e, com o aparecimento da cerâmica, os potes de cerâmica fomentaram o aumento do volume de água armazenada (PITERMAN; GRECO, 2005). Na época clássica, as aduções de água consistiam numa das principais preocupações do urbanismo das cidades gregas: a água, transportada por aquedutos subterrâneos, desaguava em fontes públicas, já os romanos aperfeiçoaram a construção dos reservatórios de água e aquedutos herdados da civilização grega (ARRUDA, 1993). No Rio de Janeiro, os Arcos da Lapa, atualmente, são ponto turístico da cidade, porém, outrora serviam de aquedutos que recolhiam água de várias nascentes do Rio Carioca e distribuíam pelas fontes públicas.

Evidentemente que os rios sofreriam as mazelas deferidas pela urbanização, visto que passaram a receber cada vez mais dejetos sanitários – decorrentes da população urbana – e resquícios de atividades comerciais, assim como ocupação indevida de suas margens. A salubridade dos rios ficou ainda mais afetada após a Revolução Industrial, no final do século XVIII, onde passaram a ser fonte de abastecimento das indústrias e, concomitantemente, destinatários de resíduos altamente contaminados (REYNOSO et al., 2010).

Dado o contexto da necessidade do homem no que se refere a água e a seu domínio, foi necessário o desenvolvimento de certos dispositivos a fim de facilitar sua obtenção – os denominados equipamentos de elevação de líquido – que surgiram há tempos remotos e, assim como os aquedutos, sofreram alterações constantes. Na antiguidade, os primeiros aparatos para obtenção e elevação de água consistiam em um balde preso a uma corda, tal sistema dispunha de energia humana para o processo e, subsequentemente, o homem introduziu outras energias no sistema, o que originou

as, de fato, bombas que apresentaram, principalmente, quatro ciclos de evolução: as bombas de roda d'água, as espirais, as de êmbolo e as centrífugas (NETTO, 1989). Atualmente, faz-se uso de energia elétrica para a nutrição dos SAA e, para que se alcance a máxima eficiência desse sistema, é imprescindível que ambos os recursos sejam analisados de forma integrada, visto que a quantidade de água que é bombeada tem um custo energético inerente, isto é, o desperdício de água acarreta o desperdício de energia (MOURA, 2010).

Após os supracitados ciclos retrospectivos da história, é pertinente uma análise atual: apesar da existência de uma nova fase de conscientização da população, dos empresários e do governo, no que tange às questões ambientais, os malefícios de origens naturais e socioeconômicas decorrentes do manuseio inapropriado dos recursos hidrológicos e energéticos ainda persiste, é a crise da água do século XXI que não é somente derivada da carência ou poluição da água, mas também de um mau gerenciamento, o que demanda novas estratégias tecnológicas arquitetadas por pesquisadores em conjunto com gestores, a fim de diminuir a vulnerabilidade da população em decorrência de racionamentos ou desabastecimentos, e também, prevenir a insalubridade e escassez dos recursos hídricos.

A implantação de SAA demanda estudos aprofundados concernentes à população que será abastecida, à taxa de crescimento da cidade suprida, assim como, de suas necessidades industriais, para que o sistema projetado possa ser eficiente. Os SAA são arquitetados tendo como pilar etapas heterogêneas, as quais são sujeitas a erros e, conseqüentemente, desperdícios que consistem no maior desafio das empresas de abastecimento. Ademais, é válido ressaltar que o suprimento de energia elétrica dos SAA corresponde a 7% do consumo energético em escala global, o que faz com que cerca de 80% das tarifas referentes à distribuição de água nas cidades corresponda à eletricidade, de modo que o desperdício de água é concomitante ao de energia (TRIPATHI, 2007).

Além disso, conforme afirmado pela Organização das Nações Unidas (ONU), a demanda mundial por água sofre influência, principalmente, do crescimento populacional, cuja proporção não é nem de longe linear: nos últimos anos, a taxa de demanda por água dobrou em comparação com o crescimento populacional mundial que sofre ampliação de cerca de 80 milhões de pessoas por ano (ONU, 2015). Dado

o exposto, é imprescindível o uso racional e, sobretudo, eficiente dos recursos hídricos, o que pode ser realizado através de análises recorrentes de todo o ciclo pertinente aos SAA, bem como mediante proposições de melhorias a fim de diminuir o desperdício, o que é de suma importância no atual contexto mundial, visto que a maioria das empresas de abastecimento fazem pouco caso da sustentabilidade tangente aos recursos hídricos (GUANAIS; COHIM; MEDEIROS, 2017).

Segundo Gomes (2012), parte significativa da energia gasta em sistemas de abastecimentos de água se deve a ineficiência destes sistemas. Atualmente, no mundo, em média 25% da energia gasta nestes sistemas se deve a ineficiência energética. Esta ineficiência é derivada do emprego de bombeamento de baixo rendimento – obsoletos, antigos ou mal dimensionados, do excesso de perda de carga hidráulica nas linhas adutoras e nas tubulações das redes de abastecimento, da ausência de manutenção, das perdas reais de água, dentre outros fatores.

Vale salientar que em decorrências de ações governamentais e problemas relacionados à ineficiência, no que se tange ao consumo de energia, as empresas prestadoras de serviços de saneamento passaram a adotar medidas para aumentar a eficiência energética e, conseqüentemente, reduzir os custos operacionais. O combate ao desperdício de energia, provocado pela ineficiência energética, sem que haja o comprometimento da qualidade do serviço de abastecimento, depende de um conjunto de ações de engenharia.

Em SAA, a aplicação de um sistema de controle em válvulas proporcionais que regule parâmetros hidráulicos, como vazão e pressão, em redes setorizadas de distribuição, favorece a economia através do controle da pressão a jusante de uma válvula redutora de pressão nos momentos de mínimo consumo, bem como fomenta um melhor rendimento do conjunto para níveis de máximo consumo, melhorando a qualidade do abastecimento para consumidores que se localizam em pontos mais distantes de uma rede, tendo assim um sistema de abastecimento de água otimizado do ponto de vista energético e hidráulico.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo a otimização hidroenergética de uma rede de abastecimento de água setorizada que é alimentada diretamente por um conjunto motor bomba por meio do controle de Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs) com a aplicação da ferramenta *fuzzy* de forma a minimizar as perdas reais em dutos e minimizar o desperdício de energia elétrica.

1.1.2. Objetivos Específicos

Estudo do comportamento hidráulico dos setores sob a ação das válvulas reguladoras de pressão.

Avaliação de parâmetros hidráulicos do sistema de abastecimento de forma a comparar a atuação da rede com e sem o sistema de controle.

Avaliação do ganho energético do sistema com a atuação da válvula proporcional de acordo com a dinâmica do sistema de abastecimento de água.

Quantificação do ganho energético do sistema por meio da otimização da rede de abastecimento.

1.2. Organização do Trabalho

O presente trabalho foi elaborado em cinco capítulos, os quais estão distribuídos da seguinte forma:

CAPÍTULO I – Neste temos a introdução do trabalho, na qual se faz um apanhado da problemática do tema de estudo e é neste onde traçam-se os objetivos gerais e específicos a serem abordados neste trabalho, não faltando sua descrição.

CAPÍTULO II – Este capítulo retrata a fundamentação teórica do trabalho: é onde faz-se um apanhado de todo o material a ser estudado que servirá de embasamento teórico, o qual será o alicerce para a discussão dos resultados pertinentes ao assunto abordado.

CAPÍTULO III – Aqui temos o capítulo referente aos materiais e métodos utilizados na pesquisa, neste que se dá a descrição acerca da bancada experimental

empregada para simular um sistema real de abastecimento de água, bem como a descrição do sistema supervisorio.

CAPÍTULO IV – É neste capítulo que há a apresentação de todos os resultados adquiridos no trabalho, abrindo espaço também para discussão a cerca do mesmo, justificando, com bases em trabalho já realizados, bem como oferecendo melhorias para a metodologia proposta.

CAPÍTULO V – neste capítulo retrataremos a conclusão do trabalho, na qual deu-se ênfase aos pontos de maior relevância da pesquisa, assim como trataremos de estudos futuros que possam ser fundamentados ou continuados tendo como pilar este trabalho.

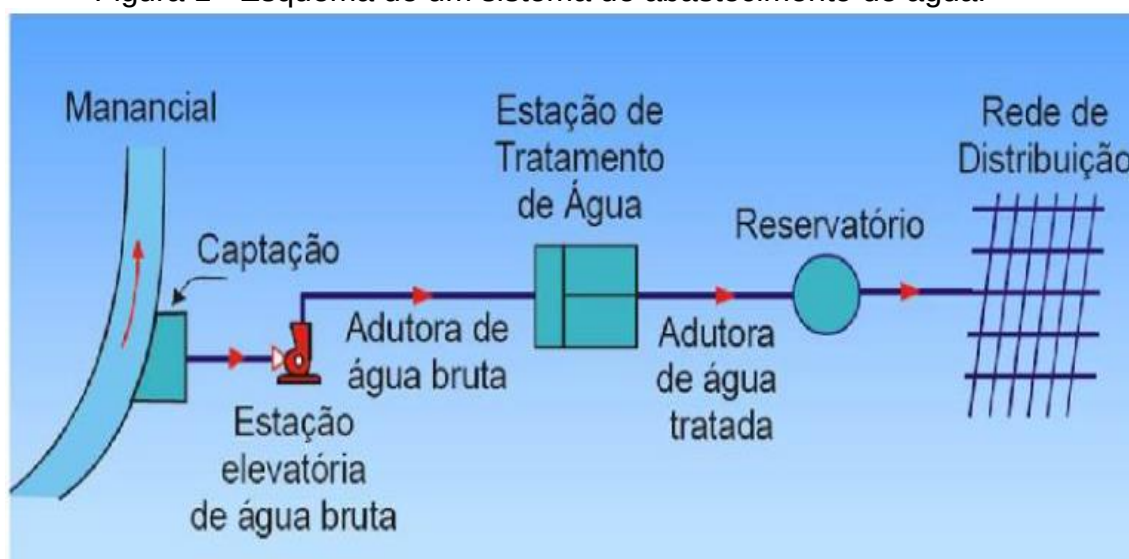
CAPÍTULO II

2.0. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Sistemas de Abastecimento de Água (SAA)

Segundo GOMES 2009, sistemas de abastecimento de água podem ser definidos como sendo um conjunto de equipamentos, obras e serviços voltados para o suprimento de água a comunidades, para fins de consumo doméstico, industrial e público. Os sistemas de abastecimento presentes no Brasil se caracterizam, basicamente, por possuir as seguintes estruturas funcionais: captação, estação de tratamento de água (ETA), reservatório, estação elevatória, adutora e a própria rede de distribuição.

Figura 1 - Esquema de um sistema de abastecimento de água.



Fonte: Rocha, 2013

Os sistemas de abastecimento são de suma importância no que se refere ao desenvolvimento e sustentabilidade de uma sociedade. Pode-se subdividir tal importância em duas classes:

Saúde pública: controla e previne a instalação de doenças de veiculação hídrica, proporciona o desenvolvimento de hábitos higiênicos na população, facilita a limpeza pública e manutenção de praças e jardins, permite as práticas desportivas e recreativas, além de contribuir para o conforto e a segurança da comunidade;

Desenvolvimento econômico: aumenta a vida média e a vida eficiente da população, facilita a implantação de indústrias e contribui para o desenvolvimento das atividades de turismo e lazer.

Segundo a Lei Federal N° 11.445/2007, regulamentada pelo Decreto N° 7.212, de 21 de junho de 2010, os serviços públicos de abastecimento devem ser prestados com eficiência e sustentabilidade econômica. O objetivo de qualquer entidade gestora no que tange à esfera SAA é pôr à disposição dos seus clientes a água da qual necessitam com:

- Quantidade suficiente
- Qualidade apropriada
- Pressão adequada
- Ininterruptamente
- Condições de eficiência elevada quanto ao uso dos recursos naturais, humanos, tecnológicos e financeiros

2.1.1. Componentes Constituintes de um SAA

Um sistema convencional de abastecimento é constituído pelas seguintes unidades: Captação, estação elevatória, estação de tratamento (ETA), adução de água bruta e tratada, reservação e rede de distribuição.

2.1.1.1. Manancial e Captação

É considerada uma das partes mais importantes dos sistemas de abastecimento, pois tem influência direta na qualidade do fornecimento de água aos consumidores. Ao se escolher um manancial deve-se considerar aspectos como a quantidade de água, localização, facilidade de adução e proteção da água e os custos de implantação.

A captação é o conjunto de estruturas e dispositivos constituídos ou montados juntos ao manancial, para a retirada de água destinada a um sistema de abastecimento. A captação em mananciais pode ser realizada de forma superficial, subterrâneas ou pluvial (ABNT,1992^a).

2.1.1.2. Estação Elevatória

Entende-se como sendo um conjunto de obras e equipamentos utilizados para recalcar água para a unidade seguinte. Embora a água seja a substância mais abundante na superfície terrestre, a sua distribuição por gravidade nem sempre é possível. É comum os SAA possuírem uma ou mais estações elevatórias responsáveis pelo fornecimento de energia necessária ao transporte da água.

2.1.1.3. Estação de Tratamento de Água (ETA)

É o conjunto de unidades destinadas a adequar as características da água aos padrões de potabilidade exigido pelos órgãos fiscalizadores. A principal função do tratamento é a redução de impurezas e a eliminação de substâncias que tornem a água inadequada para o consumo humano, tais como vírus e bactérias consideradas nocivas à saúde homem.

2.1.1.4. Adução

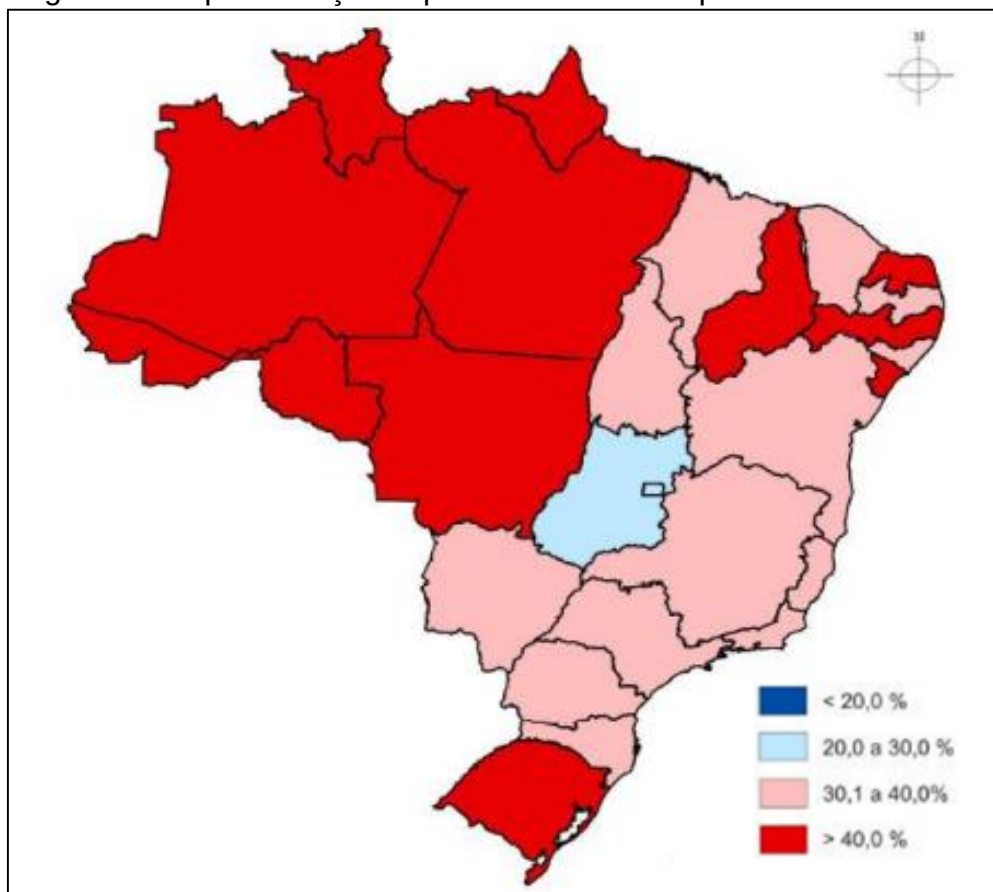
A canalização destinada a conduzir água do manancial até o(s) reservatório(s) que antecede(m) a rede de distribuição é denominada de adutora. Quando o sistema não tem reserva, como é o caso de poço que injeta direto na rede de distribuição, essa adutora deve ser considerada da saída do poço até a interligação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

2.2. Perdas de Água em (SAA)

Segundo Pereira e Condurú (2014), é preciso entender os problemas relacionados ao uso de água e energia, e encontrar soluções para as situações que possam prejudicar os setores de abastecimento de água e energia elétrica. Um dos maiores problemas dos sistemas de abastecimento de água são as perdas, que são representadas pelos volumes de água retirados dos mananciais subtraído dos volumes medidos nos hidrômetros. Um grande volume de água é perdido, gerando assim desperdício de energia elétrica principalmente nas etapas de bombeamento e tratamento da água.

O índice de perdas na distribuição de água no Brasil, considerando apenas os prestadores de serviços participantes do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS, 2014), ano de referência 2012, foi de 36,9%. As regiões Norte e Nordeste apresentaram os maiores índices e a região Centro-Oeste o menor índice. Dos estados participantes, o Amapá apresentou o maior índice de perdas, totalizando 71,9% e o Distrito Federal, o menor com 23,9%. Com base nos dados do SNIS (2014) e considerando uma relação direta entre as perdas de água e o consumo de energia, estima-se que o Brasil desperdice mais de 4 bilhões de kWh/ano no tratamento e transporte de água.

Figura 2 - Representação espacial do índice de perdas no Brasil



Fonte: SNIS, 2014.

2.3. Custo de Energia de Bombeamento

Em projetos de redução de perdas de energia e água em saneamento, atenção especial deve ser dada a estimativa do custo de energia consumida nos

sistemas de abastecimento e nas elevatórias de água e esgoto. Nos projetos de redução de perdas de energia, o custo relativo à energia de bombeamento será quantificado como benefício (GOMES, 2005).

O custo de bombeamento em função do tempo pode ser determinado em função da potência requerida pela elevatória, do número de horas contido em um intervalo de tempo considerado e do custo unitário da energia:

$$C_{energia} = P * N_b * p \quad (1)$$

Onde:

- $C_{energia}$ = Custo da energia, em unidades monetárias (\$)
- P = Potência requerida pela estação elevatória (kW)
- N_b = Tempo de bombeamento (s)
- p = Custo unitário da energia (\$)

A potência requerida por uma estação elevatória de água bruta, tratada ou de esgoto, em kW, pode ser obtida pela equação 2.

$$P = \frac{9,81 * Q * H}{\eta} \quad (2)$$

Onde:

- Q = Vazão requerida. (m³/h)
- H = Altura manométrica de bombeamento. (mca)

O custo da energia de bombeamento será dado pela equação 3:

$$C_{energia} = \frac{9,81 * Q * H}{\eta} * N_b p \quad (3)$$

2.4. Controle de Pressão em SAA

O controle da pressão é de fundamental importância para a redução de perdas reais (físicas) em sistemas urbanos de distribuição de água tratada (BEZERRA, 2009).

Não há solução padrão quando se trata da gestão da pressão. Cada sistema de abastecimento tem suas características próprias e deve ser analisado

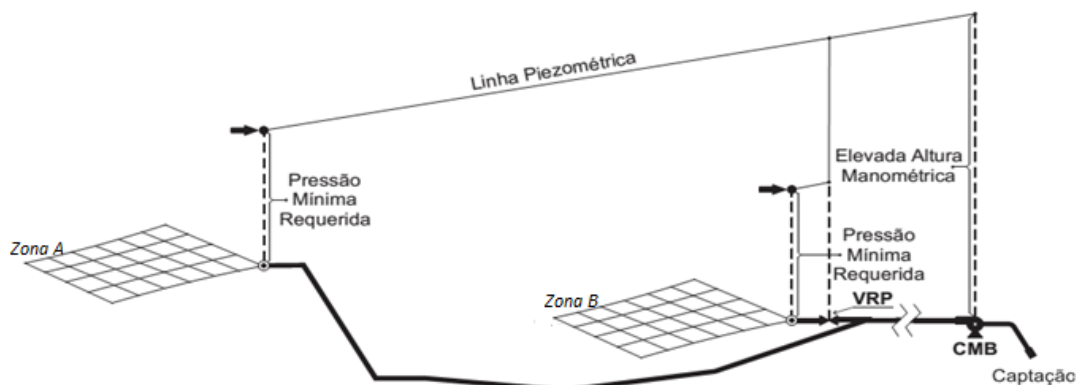
individualmente, de maneira que a solução ótima considere aspectos técnicos, financeiros, ambientais e sociais. Dentre as ações voltadas para a gestão eficiente de perdas, o controle da pressão apresenta-se como uma das alternativas mais eficientes para a diminuição do volume de água perdido por perdas reais. Há muito tempo se conhece a influência da pressão nas perdas reais: no início dos anos 90, já haviam conhecimentos de publicações, realizadas no Reino Unido acerca da influência do excesso de pressão no volume perdido por vazamentos.

O controle das pressões busca minimizar as pressões e, ao mesmo tempo, garantir o fornecimento aos consumidores. O controle da pressão refere-se aos valores mínimos, máximos e médios das pressões e suas variações temporal e espacial. Os sistemas devem operar acima dos níveis mínimos, porém os níveis máximos precisam ser estabelecidos e não excedidos. A pressão excessiva de água não só aumenta o volume perdido, como também influencia no aumento do número de rompimentos. No Brasil, a norma ABNT NBR 12218/1994 recomenda que a rede de distribuição de água seja dividida em zonas de pressão. Nestes setores as pressões estáticas nas tubulações adotam como valor máximo 50 mca e mínimo 10 mca para garantir que a carga hidráulica seja suficiente para vencer as perdas nas instalações residenciais.

2.4.1. Setorização

No que se refere a uma melhor gerência da pressão em sistemas de abastecimento de água, faz-se necessária uma subdivisão da rede em setores ou subsetores. O controle de pressões parte do zoneamento piezométrico, ou seja, da divisão do sistema em setores com comportamento piezométrico homogêneo, cada um com fronteiras conhecidas e bem delimitadas, onde se controlam todas as entradas de alimentação. Estes setores são chamados de Zonas de Medição e Controle (ZMC). As ZMC podem ter dimensões muito variadas dependendo da topologia da rede, densidade populacional e densidade de ramais, podendo conter entre 500 a 5000 ligações (BEZERRA, 2009). A setorização possibilita a administração da pressão em cada distrito ou grupo de distritos de forma que a rede é operada no nível ótimo de pressão, além de facilitar o monitoramento das perdas de água. A Figura 3 apresenta um desenho esquemático mostrando a setorização, com injeção direta, e válvulas controladoras de pressão.

Figura 3 - Setorização com dois setores com uso de VRP



Fonte: Carvalho (2012)

2.4.2. Válvulas Redutoras de Pressão

Segundo GOMES (2012), as válvulas são dispositivos imprescindíveis às instalações de transporte e distribuição de fluidos por meios mecânicos ou por gravidade, são usadas com o objetivo de proteger ou isolar bombas ou trechos de tubulações, aliviar e controlar as pressões, controlar vazões e níveis de reservatórios, direcionar o escoamento, drenar e ventilar.

Este elemento é um grande dissipador de energia, portanto só é recomendado o seu uso quando nenhum outro meio possa substituí-lo. No setor de saneamento, sua utilização está cada dia mais difundida objetivando reduzir as pressões a jusante, a fim de evitar um aumento de pressão em horas de menor demanda da rede de distribuição que tem como consequência o aumento de vazamento e o consumo induzido. Embora a redução dos vazamentos permita a diminuição de perdas volumétricas na rede, a eficiência do bombeamento é prejudicada pelo aumento das perdas impostas pela válvula. Portanto o número de válvulas no sistema deve ser o mínimo necessário para o equilíbrio energético e econômico do sistema.

Atualmente as VRPs podem ser controladas não apenas para um único valor de pressão, mas para diversos patamares de pressão, permitindo assim, uma gestão mais eficiente dos níveis de serviço e um melhor desempenho hidráulico do sistema (GOMES, 2012).

Os principais tipos de válvulas redutoras de pressão mais utilizadas no setor de saneamento básico são:

VRP com pressão de saída fixa (sem controlador eletrônico): é usada quando o sistema a ser controlado não tem mudanças significativas de demanda, bem como perdas de carga relativamente pequenas.

VRP com pressão proporcional (sem controlador eletrônico): a pressão de saída (a jusante da VRP) é proporcional a pressão de montante.

VRP com modulação por tempo: é usada para controlar um sistema que apresenta grande perda de carga, porém de perfil regular de consumo. Assim, a VRP irá trabalhar com patamares de pressão de saída ajustadas para um ciclo de 24 horas.

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

2.5. Automação e Controle em SAA

O combate ao desperdício de energia elétrica e água vem impulsionando uma mudança de paradigma comportamental demandado pela sociedade notadamente por meio de organismos governamentais, em função do esgotamento dos recursos naturais. A mudança de hábito e a eficiência energética são instrumentos que promovem a redução efetiva dos desperdícios. Neste sentido é necessário promover a mudança de hábitos e costumes da sociedade de forma a reduzir ao máximo esse desperdício (GOMES, 2005).

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

É notório também, o avanço tecnológico dos equipamentos hidráulicos, elétricos, mecânicos e de automação (aplicação de sistemas de controle), disponibilizados a um melhor projeto, monitoramento, controle e operação de sistemas de distribuição de água. A aplicação desses equipamentos e a criação de um supervisor de comando nas redes de abastecimento de água são medidas

comprovadamente viáveis e, se bem utilizadas, podem trazer grandes benefícios técnicos, econômicos e ambientais.

Na prática, vê-se algumas ações e implementações pontuais, porém, a utilização de tais técnicas implica, também, a adoção de uma série de decisões por parte das concessionárias/usuários que normalmente são implementadas de forma empírica, e visam, principalmente, a garantia da continuidade do abastecimento público, sem a preocupação de explorar o consumo energético e hidráulico.

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

A aplicação da automação em sistemas de distribuição de água (SDA) é uma prática consagrada, porém são escassos os trabalhos científicos de dinâmica e controle automático de sistemas voltados para o setor de saneamento, já que os processos não necessitam de um controle, em termos relativos, com boa exatidão das variáveis envolvidas. Na prática, os controladores automáticos utilizam técnicas de controle “convencionais”, tipo PID (Proporcional, Integral e Derivativo), desenvolvidas e acopladas pelos vários fabricantes dos equipamentos eletrônicos (BEZERRA, 2009).

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

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

2.5.1. Sistema de Controle Fuzzy

Em 1965, o professor Lotfi Askar Zadeh 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* (Nebulosa) para tratar de variáveis imprecisa 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.

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 (MANDANI, 1977) que implementou o controle de uma máquina a vapor, baseado em lógica *fuzzy*. Até então, não havia-se 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, investiu-se 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, dependendo de sua função.

As raízes do dilema de seleção de válvula encontram-se na extraordinária variedade de modelos de válvulas e suas funções multidisciplinares necessárias na

seleção adequadas para aplicações de controle. Devido à falta de informações completas do sistema, o que gera a incerteza e imprecisão na escolha de uma válvula, é apresentado neste trabalho uma técnica para executar cálculos em variáveis imprecisas de parâmetros (OSMANA, et. al., 2003).

Esta técnica é baseada na lógica *fuzzy*, usando conjuntos *fuzzy* como alternativa nas válvulas de controle direcional hidráulica, e é expressa em termos de ordens de magnitude do *fuzzy*. Cálculos baseados em média ponderada do *fuzzy* são realizadas 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.

Bezerra, Silva e Gomes (2012), constataram, em um estudo sobre Otimização operacional de redes de abastecimento de água usando um *Sistema Fuzzy* 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 é 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.

Os autores supracitados realizaram experimentos para demonstrar a eficiência do *Sistema Fuzzy*. Extrapolando os resultados alcançados na configuração experimental em uma rede hidráulica real com vazamentos e nenhum controle de pressão, as perdas volumétricas poderiam ser reduzidas em mais de 56%. As experiências 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 que iriam ajudar a reduzir o consumo de água e de energia elétrica, bem como para reduzir os custos de manutenção.

Destaca-se, ainda, que o Sistema *fuzzy*, não requer um profundo

conhecimento matemático, mas o projetista necessita de 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 e 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 este 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: fuzzificação, inferência, defuzzificação, a saber:

A Fuzzificação é a primeira etapa do tratamento *fuzzy*, é através da mesma que se efetua a transformação das variáveis encontradas na forma determinística ou Crisp (número) em forma *fuzzy* (pertinência), nesta etapa, segundo Simões e Shaw (2007), a interface de fuzzificação usa funções de pertinência contidas na base de conhecimento, convertendo os sinais de entrada em um intervalo $[0 \text{ a } 1]$ que pode ser associado a rótulos linguísticos.

Em um raciocínio, 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, estas 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, estas regras conduzem à conclusão.

As regras, juntamente com a base de dados, fazem parte da base de conhecimento que 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 é executada, então o valor da solução é determinado pela regra incondicional.

Ressalta-se, por conseguinte, que se nenhuma regra condicional possui 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*.

Esta inferência possui 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* e, segundo Mendel (2001), os mais utilizados são o Mamdani e o Takagi-Sugeno.

A Defuzzificação é, nesta perspectiva, a última etapa do tratamento *fuzzy*. Nesta etapa, ocorre a transformação das variáveis que se encontram na forma fuzzificada para forma determinística, gerando valores reais das saídas.

Para Simões e Shaw (2007), os principais métodos para efetuar a defuzzificação são: o Centro-de-Área (Centróide), 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 desta ferramenta. Dentre as características, pode-se salientar que a Lógica Nebulosa (SIMÕES e SHAW, 2007):

- ✓ Está baseada em palavras e não em números, ou seja, os valores verdades 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 interpretados como números nebulosos;

- ✓ Manuseia todos os valores entre 0 e 1, tomando estes, apenas como um limite.

A lógica nebulosa apresenta, por conseguinte, uma série de vantagens, dentre 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 desta lógica proporciona um rápido protótipo dos sistemas. Já as desvantagens existentes na utilização da Lógica Nebulosa são poucas e, dentre elas, podemos destacar a especificação das funções de pertinência que é trabalhosa, por isso há necessidade de muita simulação/teste para o ajuste fino destas funções.

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

2.6. Estado de Arte

A aplicação de sistemas de controle para automatizar os sistemas de abastecimento de água objetiva otimizar as redes, seja com o uso de válvulas redutoras de pressão ou até mesmo com utilização de inversores de frequência para controles de parâmetros hidráulicos. Entende-se por automático todo o processo que se desenvolve sem a necessidade da intervenção humana, seja uma simples medição ou complexas decisões.

A automação de sistemas de abastecimento tem como finalidade possibilitar a operação assistida ou controlada dos diversos processos envolvidos de forma automatizada. Por meio deste é possível monitorar, controlar e até mesmo interferir nas diversas unidades do processo em tempo real, de forma a possibilitar uma melhoria nas condições operacionais do sistema, mensurando todas as atividades e redução dos custos relacionados à energia elétrica (otimizando o processo) e custos de operação (processo totalmente controlado).

Para que se possam alcançar os processos automatizados em SAA, alguns trabalhos já vêm sendo desenvolvidos e algumas aplicações práticas pontuais, podem ser encontradas. Porém, percebe-se uma grande dificuldade em trabalhos ligados à automação e ao controle aplicado em sistemas de abastecimento, com o emprego de inteligência artificial como é o caso da lógica Fuzzy.

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

TROJAN e MARÇAL (2005) aplicaram conceitos de sistemas de automação na produção e distribuição de água no sistema de abastecimento de água do Paraná, mais precisamente na cidade de Ponta Grossa. Foi realizado um estudo de caso buscando resultados na redução nos índices de perdas de água e, conseqüentemente, outros benefícios importantes, como a redução da pressão média nas tubulações transportadoras, rapidez e qualidade nos reparos das tubulações e formação de uma espécie de banco de dados para criação de programas para novas instalações. Dessa forma, foram instaladas válvulas de controle automáticas, sensores de medição de vazão e pressão nos principais pontos do sistema e um

sistema de supervisão SCADA, onde são gerenciados todos os pontos da automação. Após a aplicação do sistema, os autores perceberam uma redução nos índices de perdas físicas e redução do consumo de energia no acionamento e operação dos motores. Os resultados encontrados demonstram que a automação de um sistema de abastecimento de água permite o controle e a atuação rápida para corrigir 11 distorções que ocorrem naturalmente, como as perdas no abastecimento e no consumo de energia.

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

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

OLIVEIRA (2017) apresentou soluções para a problemática do excesso de pressão em redes com injeção direta na rede de abastecimento com vistas a reduzir perdas de água e energia. O trabalho se deu pelo desenvolvimento de um sistema de

controle Fuzzy aplicado em um conjunto motor bomba e em válvulas proporcionais, com ambas interagindo independentemente com o sistema.

CAPÍTULO III

3.0. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo serão apresentados a metodologia e materiais utilizados a fim de empreender o procedimento experimental, assim como a aquisição de dados utilizados na elaboração deste. Para tal se fez necessária a utilização de bancada experimental totalmente instrumentalizada e automatizada, monitorada por um sistema supervisor de controle e aquisição de dados desenvolvido em plataforma LabVIEW que permite a modificação de parâmetros executada pelo operador, quando necessário.

3.1. Bancada Experimental

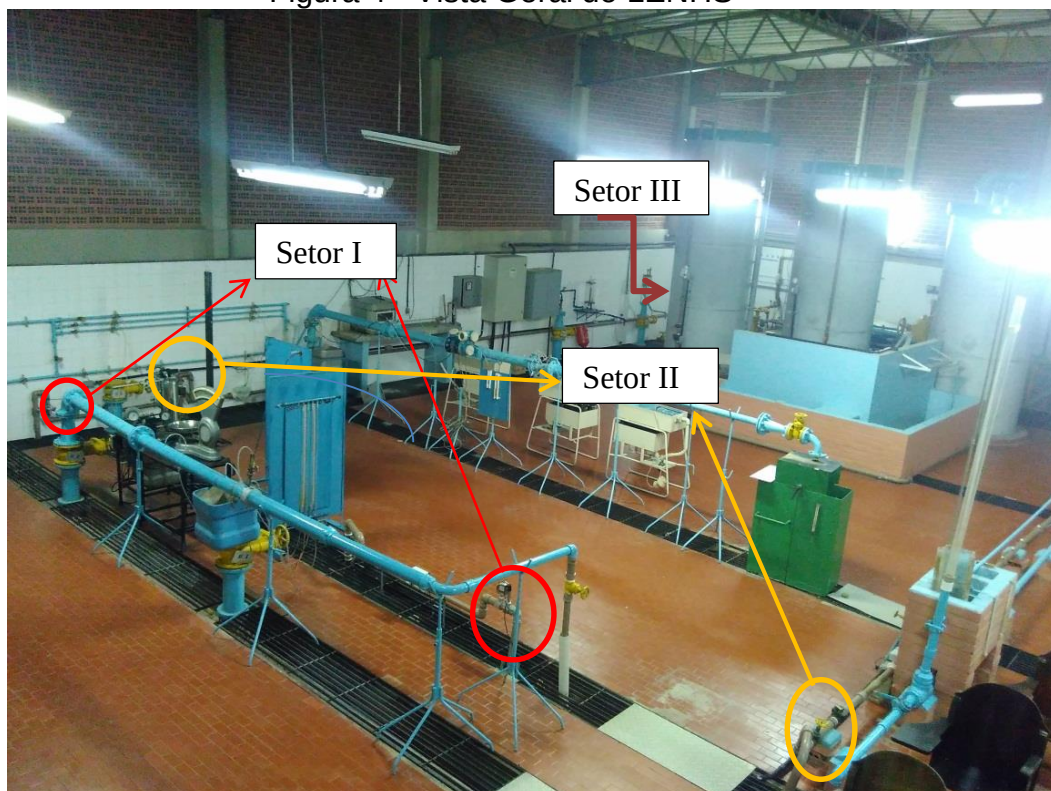
Todos os experimentos realizados neste trabalho sobrevieram de trabalhos experimentais no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento - LENHS da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, para os quais foi utilizada uma bancada ver Figura 4 com o conjunto motor-bomba injetando água diretamente na rede sem a necessidade de um reservatório elevado.

A bancada apresentada neste trabalho simula uma rede real capaz de suprir aproximadamente 15 mil habitantes. Vale salientar, também, que toda a água utilizada neste experimento é reutilizada, ou seja, retorna para o reservatório de sucção responsável pelo abastecimento da rede. A Figura 4 retrata uma vista real de todo o LENHS, nesta imagem panorâmica tem-se o caminho percorrido por toda a bancada experimental, bem como a localização de diversos sensores e atuadores utilizados na rede, além do Controlador Lógico Programável (CLP). Tal rede é setorizada, de forma a simplificar o entendimento da planta.

No que tange ao sistema automatizado, é válido ressaltar sua possibilidade de desenvolvimento de rotinas de controle, simulação e monitoração, em tempo real, produzindo, por conseguinte, uma massa de dados, em forma de relatórios, possibilitando sua interpretação e análise. Ademais, tal sistema caracteriza-se por sua autonomicidade, de maneira que possui capacidade de operar, controlar, monitorar e tomar decisões referentes à otimização de sua operação sem a necessidade da

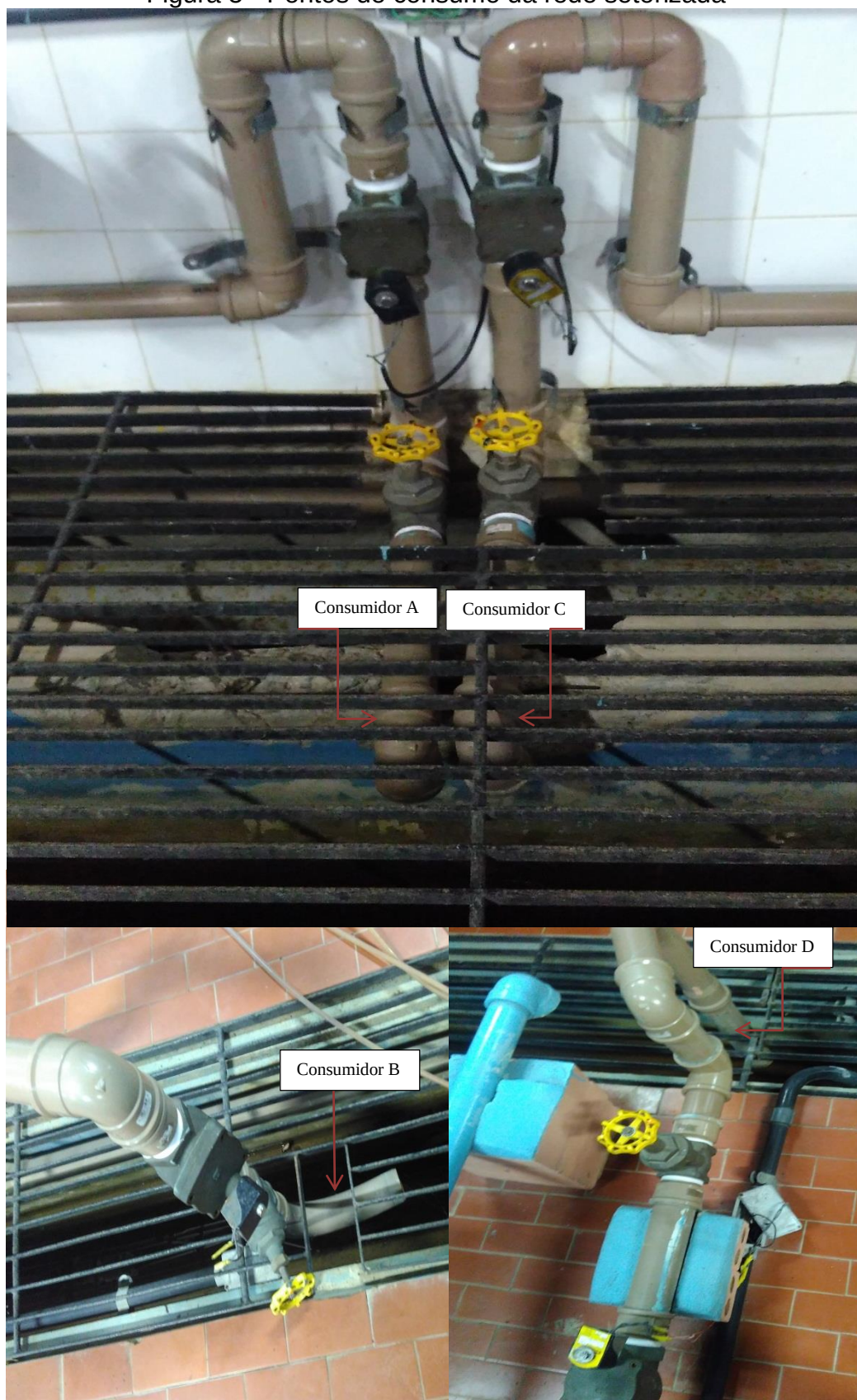
presença de um operador humano, podendo também gerar relatórios das grandezas monitoradas. Não obstante, este sistema de supervisão não foi projetado para identificar possíveis vazamentos na rede que porventura surjam, visto que não dispõe de sensores para esta aplicação.

Figura 4 - Vista Geral do LENHS



A bancada em questão foi dividida em três seções, dentre as quais temos o setor I, setor II e o setor III. Além disso, os setores I e II se subdividem em dois: o I em A e B e o II em C e D, como mostrado na Figura 5. O setor III simula um consumidor que se encontra a uma cota topográfica diferente das duas anteriores, visto que o mesmo encontra-se a 4,5 metros de altitude com relação aos outros dois setores. Com isso, há maior dificuldade no abastecimento do setor 3 da rede, muitas vezes até deixando locais de pontos mais afastados com o consumo ineficiente do ponto de vista hidráulico e energético.

Figura 5 - Pontos de consumo da rede setorizada



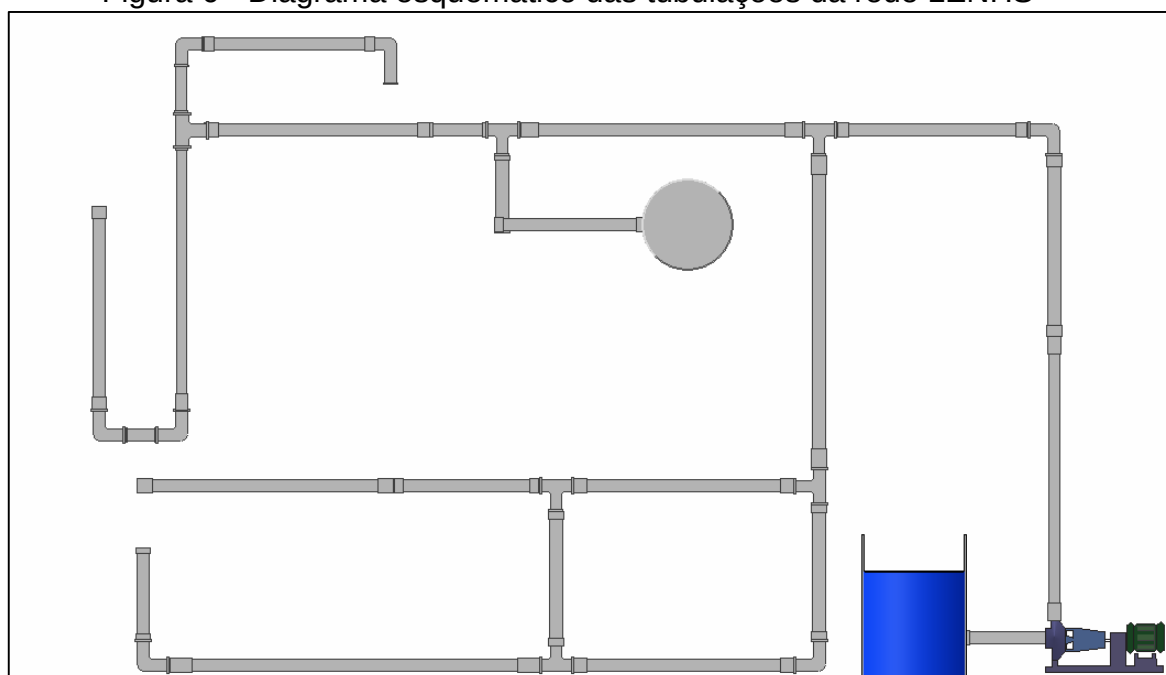
3.2. Rede de Distribuição

A rede de distribuição de água, como mostrada na Figura 6, emula um sistema real de abastecimento totalizando um comprimento de 155 metros de tubulação que estão distribuídos conforme a tabela 1. A tubulação em ferro dúctil está acoplada diretamente à bomba e segue ao encontro de outra em PVC de mesmo diâmetro nominal. O duto de PVC distribui água para todo o laboratório por tubos de diâmetros menores (DN = 50mm), estas tubulações estão presentes em canais de distribuição ao longo de todo o LENHS.

Tabela 1 - Tubos utilizados na rede de distribuição

Tipo	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)
PVC	50	140
PVC	100	5
Ferro Dúctil	100	10
TOTAL		155

Figura 6 - Diagrama esquemático das tubulações da rede LENHS



3.3. Sensores e Atuadores Instalados na Rede

A existência de um sistema de distribuição de água totalmente automatizado e responsável por suprir, diretamente, cinco pontos de consumo, implica a presença de sensores e atuadores instalados em pontos estratégicos com o propósito de fomentar um monitoramento preciso e eficiente concernente à rede de distribuição.

A supramencionada supervisão parte pontualmente do Centro de Controle Operacional – CCO do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento - LENHS da Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

3.3.1. Transdutores de Pressão

Os transdutores de pressão compreendem equipamentos aptos a medir a pressão efetiva em um ponto da rede e, também, são capazes de converter tal valor em sinal elétrico e transmiti-lo ao supervisor. Usualmente, é dotado de sensores do tipo piezo resistivo de silício e alimentado por uma tensão de alimentação de 24vcc e com sinal de saída que varia entre 4-20 mA para representar as pressões registradas de acordo com o fundo de escala do equipamento. No que concerne a transdutores concebidos, há a necessidade da adaptação dos mesmos à bancada experimental através de calibração e parametrização.

Neste trabalho foram utilizados cinco transdutores de pressão (PT-1; PT-3; PT-7; PT-8; PT-15) da marca DRUCK, modelo PTX 7217, com faixa de medição entre 0 e 30 psi (0 e 21,09 mca) como mostrado na Figura 7. O sensor é do tipo piezo resistivo de silício e o sinal de saída é de 4 a 20 mA, sendo 4 mA sua menor pressão registrada e 20 mA a maior. O tempo de resposta é 1 milissegundo, a precisão de $\pm 0,2\%$ e a tensão de alimentação de 24 Vcc.

Figura 7 - Transdutor de pressão PTX 7217 (DRUCK).



3.3.2. Transdutores de Vazão

O transdutor de vazão utilizado é do tipo eletromagnético e foi instalado com o objetivo de informar o comportamento da demanda hidráulica do sistema em detrimento da vazão. Ressalta-se que tal equipamento foi instalado na tubulação principal da rede de distribuição - cujo diâmetro, nesse trecho, é de 100mm - próximo à saída da bomba, ambicionando a obtenção da vazão total demandada pelos cinco pontos de consumo presentes na bancada. Outro também foi instalado no setor II com o objetivo de obter-se a vazão dos pontos de consumo C e D. O equipamento é da marca INCONTROL como mostrado na Figura 8. O transdutor é do modelo VMS 038 como apresentado na Tabela 2, sua alimentação se dá por meio de uma tensão de 24 Vcc, enquanto o sinal de saída é transmitido em corrente na faixa de 4 a 20mA, sendo 4 mA para o limite inferior da faixa de medição e 20mA para o limite superior da faixa de medição, o que corresponde a um intervalo de medição de vazão de 2,14 a 70,6 m³/h.

Tabela 2 - Faixa de Vazão do Transdutor Eletromagnético

Modelo	DN	Faixa de Medição	
(VMS)	(mm)	Litros/min	m ³ /h
VMS 012	12	2,0 a 67,8	0,12 a 4,07
VMS 019	19	5,17 a 170	0,31 a 10,2
VMS 025	25	8,83 a 293	0,53 a 17,6
VMS 038	38	20,7 a 680	1,24 a 40,8
VMS 050	50	35,7 a 1176	2,14 a 70,6

Figura 8 - Medidores de vazão INCONTROL.



3.3.3. Válvula Proporcional

As válvulas redutoras de pressão, Figura 9, também podem ser denominadas válvulas de controle ou proporcionais e dispõem de registros com abertura e fechamento reguláveis acionáveis por um motor elétrico (motor de passo) que recebe tensão de alimentação de 24V. Tais registros possuem uma faixa de variação desde a abertura até o fechamento total, o que corresponde a 0° e 90°, respectivamente, de maneira que a condição de totalmente aberta ou fechada pode

ter início a partir de quaisquer uma das posições devido à presença de uma chave no corpo. Demais especificações ver tabela - 3.

Tabela 3 - Especificações técnicas.	
Especificações	Válvula Proporcional
Fabricante	Bélímo
Modelo	ARB24-3
Tensão de trabalho	(2-10)Vcc
Tensão de alimentação	24V
Temperatura de trabalho	(-30 - 50)°C
Faixa de trabalho	(0-90)°

Figura 9 - Válvula Proporcional (ARB24-3)



O controle da válvula é feito através de um sinal de tensão que compreende de 2 a 10 Vcc, sendo 2 Vcc para válvula totalmente fechada e 10 Vcc para válvula totalmente aberta. No que diz respeito a valores intermediários, a válvula assume posições medianas.

Juntamente com a alimentação e os sinais de comando é transmitido um sinal indicador do estado atual de abertura da válvula (também na forma de tensão de 2 a 10 Vcc), visto que a válvula se movimenta de forma lenta (o ciclo completo de fechamento x abertura dura 90 segundos).

No experimento se utilizam duas válvulas redutoras de pressão, uma que controla o trecho equivalente ao setor I e III, a qual consegue controlar duas zonas com topografias diferenciadas. A VRP- 2 encontra-se instalada diretamente no setor encontra-se a cota equivalente ao setor I. Ambas as válvulas utilizam controladores individuais que permitem a atuação de forma independente uma da outra.

3.3.4. Válvula Solenoide

É equipamento composto pela associação de dois elementos básicos: Um solenoide com núcleo móvel (*plunger*) e seu obturador e corpo dotado de um orifício, no qual é posicionado o obturador que permite ou impede a passagem do fluxo em função da atração, ou não, do núcleo móvel quando a bobina é energizada.

Existem diversos tipos de válvulas solenoides, a utilizada no trabalho foi uma válvula de ação direta, na qual o núcleo é mecanicamente conectado com o obturador, portanto abre ou fecha diretamente o orifício principal de passagem, dependendo estar, ou não, energizado o solenoide. A operação não depende da pressão ou vazão da linha, logo, as válvulas abrem ou fecham com valores de pressão desde zero até o máximo permitido. As características da válvula utilizadas na bancada experimental estão disponíveis na tabela 4.

Figura 10 - Válvula solenoide utilizada.



No trabalho foi utilizada uma válvula solenoide, mostrada na Fig. 10, para cada ponto de consumo, totalizando cinco válvulas que objetivavam simular a variação de consumo. A supracitada variação foi realizada de forma que duas válvulas abriam ou fechavam ao mesmo tempo, de modo que a abertura ou o fechamento influenciavam no consumo de cada setor.

Tabela 4 - Especificações da válvula solenoide utilizada na bancada.

Especificações	Válvula Solenoide
Fabricante	Parker
Modelo	24HA275IF
Corpo	Latão
Tensão de alimentação	24Vcc
Faixa de trabalho	(0,5-8) bar / (5,1-81,58) mca°

3.4. Sistema de Bombeamento

O sistema de bombeamento é do tipo afogado e succiona água do reservatório e injeta diretamente na rede de abastecimento. O conjunto motor bomba,

possui um motor de indução trifásico, 220/380V de 5cv. Este é acionado por um inversor de frequência que o mantém em 60Hz. Na tabela 5.5 temos as especificações técnicas do conjunto moto bomba.

Figura 11 - Conjunto motorbomba



Fonte: Oliveira 2017

Tabela 5 - Especificações técnicas do conjunto motobomba

Especificações	Motor	Bomba
Fabricante	WEG	KSB
Potência	5 cv	---
Rotação	1720 pm	1720rpm
Rendimento	88%	69% (conjunto)
Corrente Nominal	8 Ampères	

3.5. Painel Elétrico

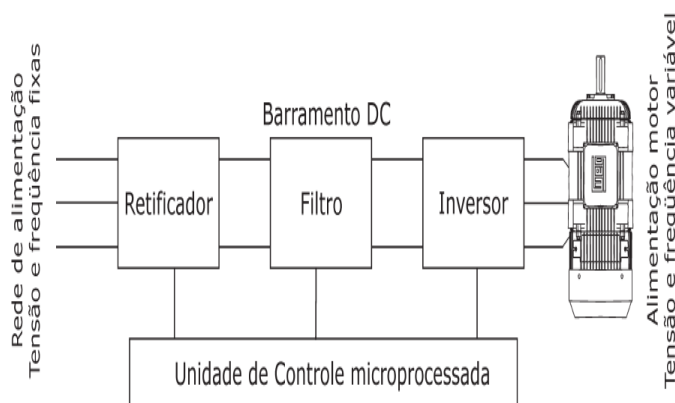
Ao que concerne ao painel elétrico, afirma-se que, neste procedimento, utilizou-se um que operava em conformidade com o sistema de automação implantado. Além disso, vale inferir que ele foi projetado para executar as seguintes funções:

- ✓ Servir de painel de interface entre os instrumentos da rede hidráulica e o supervisório e;
- ✓ Servir de painel de comando e proteção do motor e equipamentos

elétricos, eletrônicos, como o inversor de frequência.

Conforme manual do fabricante destaca-se que o inversor de frequência é composto de um retificador, um filtro e um inversor, como observado na Figura 3.9, 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 Bipolar com Porta Isolada (*Insulated Gate Bipolar Transistor- IGBT*).

Figura 12 - Representação em blocos dos componentes do inversor de frequência.



Fonte: WEG, 2003.

Tomando como base o que foi abordado até o momento, vale inferir que a 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.

Segundo Ralize e Marques (2006), por sua vez, 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 (sobre corrente, 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 13.

Figura 13 - Foto do painel com inversor de frequência.



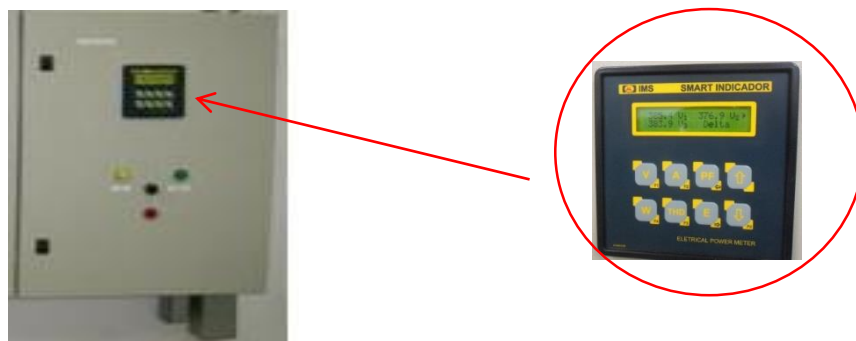
Fonte: OLIVEIRA (2017).

Destaca-se que o painel também é equipado com um multimedidor de grandezas elétricas - ver Figura 14 – que permite a medição das variáveis elétricas em tempo real, como por exemplo: potência elétrica ativa, reativa e aparente, corrente elétrica, tensão, fator de potência, harmônicas de ordem ímpares até a 31ª ordem, 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 supervisório desenvolvido para esta pesquisa.

Figura 14 - Interface painel com detalhe de grandezas elétricas

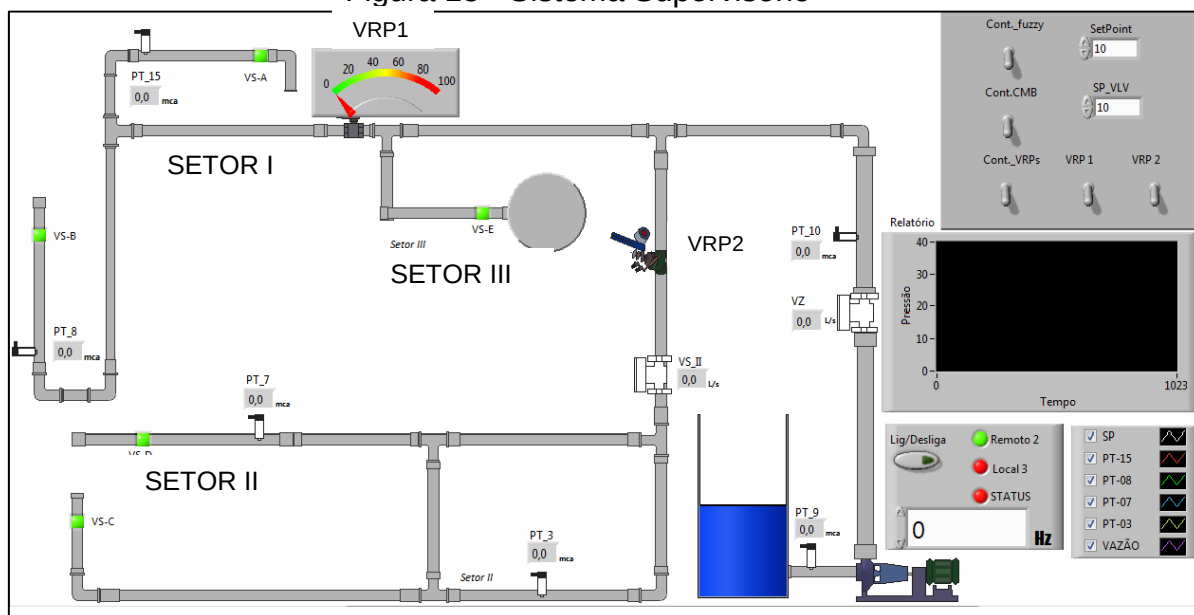


Fonte: OLIVEIRA (2017)

3.6. Sistema Supervisório

Sobre o desenvolvimento do supervisório, destaca-se que tal sistema permite que sejam monitoradas e rastreadas informações da rede de distribuição. Tais informações são coletadas, por conseguinte, através de sensores e/ou equipamentos e, em seguida, manipulados, analisados, armazenados e, posteriormente, apresentados ao usuário. Na figura 15 temos o sistema supervisório dotado de todos os sensores e atuadores da rede de abastecimento.

Figura 15 - Sistema Supervisório



Fonte: Oliveira 2017, Adaptado.

O supervisório provê o sistema de distribuição de água experimental, das informações necessárias ao gerenciamento de todo o processo hidráulico e elétrico e, 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.

Desta 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-se 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.

CAPÍTULO IV

4.0. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a finalização dos estudos e elaboração da bancada experimental, efetuou-se aquisição de dados do sistema em duas situações distintas: a primeira com atuação das válvulas redutoras de pressão e a segunda sem a operação destas, cuja função consiste no controle dos pontos de pressão em diferentes setores da rede de distribuição de água.

A metodologia utilizada definiu que a bomba trabalhasse com a máxima rotação admissível e ligada diretamente à rede elétrica com 60Hz, de maneira que ocorresse variação dinâmica do sistema de abastecimento, a fim de obterem-se resultados de uma rede que atua sem a ação de válvulas de controle que otimizam o sistema e, conseqüentemente, evitam perdas de água e energia elétrica.

4.1. Dinâmica do Sistema

Após a realização de ajuste e calibração da rede, executou-se a primeira coleta de dados, objetivando analisar o funcionamento do sistema sem a atuação de controladores, e fazer a veracidade dos dados coletados pelos sensores de pressão e vazão instalados em pontos considerados estratégicos. A vazão foi dada como verdade pela conferência com o um medidor de vazão ultrassônico e os transdutores de pressão tiveram seus valores conferidos com manômetros de pressão analógicos instalados próximos aos transdutores.

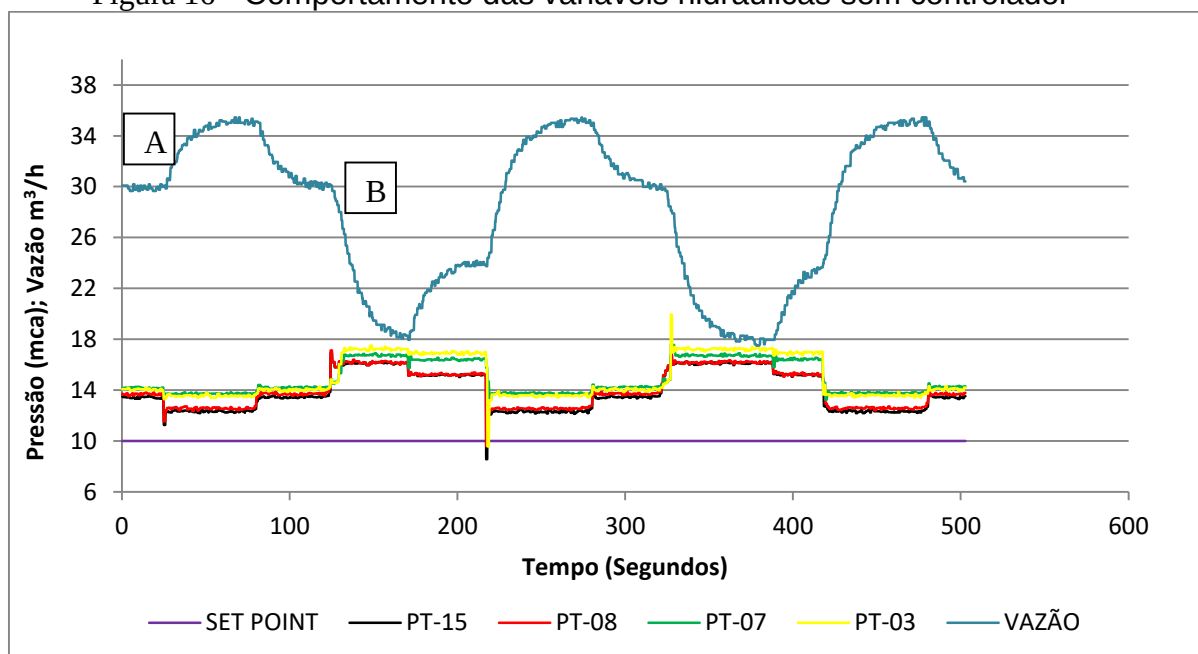
A coleta de dados foi efetuada com o sistema em pleno funcionamento para dois diferentes níveis de pressão: um com o sistema pressurizado a 13mca e outro com pressão de 16mca, cujos valores implicam numa situação de mínimo e máximo consumo, respectivamente. Na figura 16 é possível observar o gráfico do sistema em pleno funcionamento, com o motor ligado a 60Hz.

No gráfico há um ponto de pressão considerado ideal para manter a rede em perfeito estado de funcionamento, evitando a ruptura de tubulações por excesso de pressão, tal ponto recebe a denominação de “*set point*” que consiste na pressão mínima necessária para que a água alcance seus respectivos consumidores. Com o passar do tempo, no gráfico, utiliza-se o setor III como um perturbador da rede que

simula uma variação de consumo. O consumidor referente ao setor III foi controlado com abertura e fechamento de válvula solenoide VS-E instalada na saída no ramal, de onde a água sai em direção ao consumidor. Inicialmente a válvula encontra-se fechada com vazão próxima aos 30m³/h e os valores das pressões dos quatro pontos observados são por volta de 13 mca.

Ao realizar a abertura da válvula solenoide, observa-se que a vazão se eleva próximo aos 35 m³/h e que as pressões referentes aos pontos PT-08 e PT-15 sofrem redução, tal evento se justifica pelo fato de que os referidos pontos se encontram nas proximidades da saída do ponto de derivação que alimenta o setor III. Em um segundo momento, ocorreu a interrupção da passagem de água no setor III e em um dos consumidores do setor II, o que desencadeou redução da vazão e aumento das pressões em todos os pontos da rede, como mostrado no ponto B do gráfico. Após isso, outra vez há abertura das válvulas anteriormente fechadas de maneira que os pontos retornam para a posição mostrada em A.

Figura 16 - Comportamento das variáveis hidráulicas sem controlador



4.2. Operação com Aplicação da Ferramenta de Controle *Fuzzy*

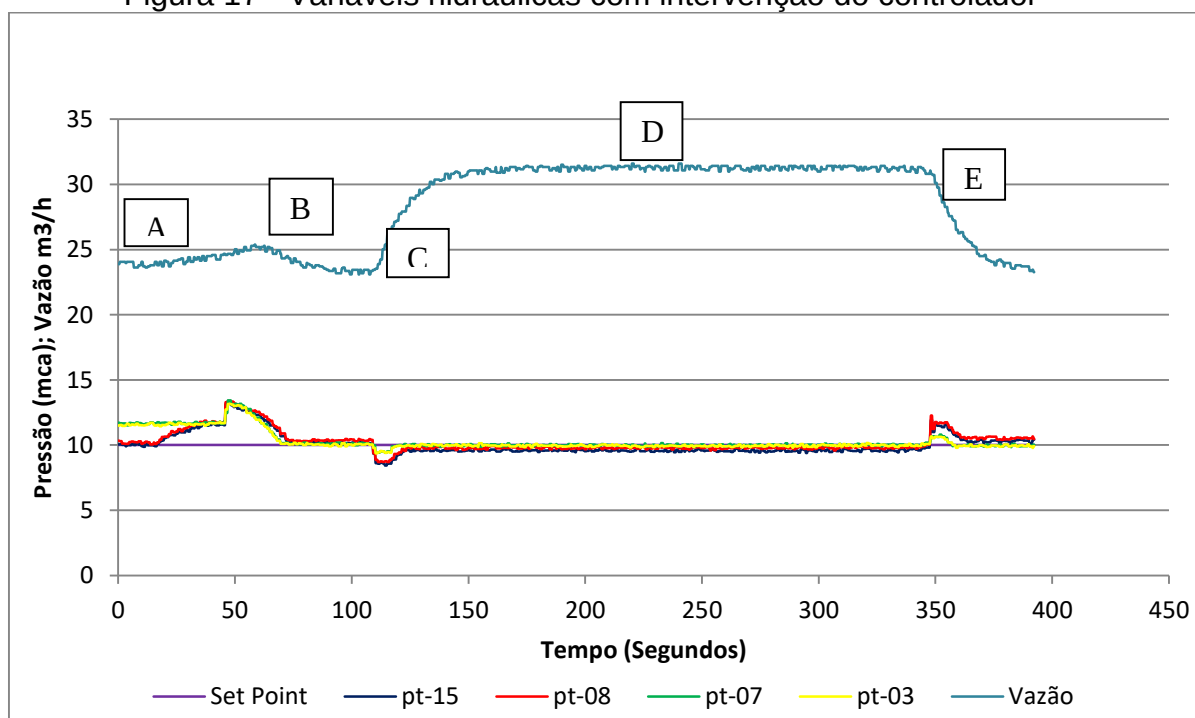
A seguir, explicita-se a aquisição de dados experimentais com auxílio de ferramenta de controle *fuzzy*, a qual foi aplicada nas válvulas reguladoras de pressão. O supramencionado controlador foi empregado a fim de fazer com que as válvulas

controlassem um sistema em um determinado ponto pré-definido, objetivando a obtenção de dados referentes a certos locais de consumo.

4.3. Sistema *Fuzzy* Aplicado nas Válvulas Redutoras de Pressão

O sistema de controle *fuzzy* desenvolvido foi aplicado para controlar válvulas redutoras de pressão aplicadas em uma rede de abastecimento, visando controlar a abertura e o fechamento das válvulas, de maneira a manter as pressões em valores predefinidos, conhecidos como “set point”. Este controlador foi capaz de gerir quatro pontos de pressões distintos da rede de abastecimento de água, como exemplificado pela figura 17, na qual é exibido o comportamento das variáveis hidráulicas desta operação.

Figura 17 - Variáveis hidráulicas com intervenção do controlador



Ressalta-se que, ao entrar em operação, nenhum sistema de controle estava em atuação, como evidenciado no ponto A do gráfico da Figura 17. Após um certo intervalo de tempo para estabilização da rede nos pontos de regime permanente – expresso entre os pontos A e B, provoca-se uma perturbação no sistema – exibida no ponto C – que ocasiona uma variação hidráulica na rede e, subsequentemente, aciona-se o controlador das válvulas redutoras de pressão com valores

preestabelecidos de pressões, isto é, o “*set point*”, de maneira que as válvulas atuam rapidamente em prol da conversão dos valores de pressão dos quatro pontos de medição para o valor estabelecido de antemão.

No tangente ao ponto B, as pressões se encontram acima do limite desejado e o controlador modulou a queda destes parâmetros hidráulicos por intermédio do fechamento das válvulas redutoras de pressão e através do controle das pressões dos setores I e II a valores próximos dos 10 mca. A queda no valor da vazão resultou de perturbações decorrentes do fechamento de outras válvulas solenoides, interrompendo assim as saídas de setores nos quais estão localizados certos pontos de consumo, como o consumidor B do setor I.

No que se refere ao ponto C, há o princípio do aumento da vazão, o que faz com que as pressões atinjam seus valores mínimos. Contudo, é válido salientar que os controladores ainda estão ativos e fazem com que as válvulas se abram e elevem as pressões a jusante das válvulas proporcionais e, novamente, em um curto intervalo de tempo, ocorre a estabilização das pressões no “*set point*” desejado. Doravante, pressão e vazão ficam em valores estáveis, até que há outra modificação contrária à anterior – no ponto E, de maneira que as pressões sofrem elevação que é contida através do controlador que envia sinal de fechamento para as VRPs, de maneira que os valores retornam para a posição de 10 mca, como mostrado no gráfico.

4.4. Avaliação Hidroenergética entre os Setores I e II

Este tópico trata exclusivamente de uma análise entre os setores I e II, com alteração de consumo entre os mesmos, visto que nem sempre todos os pontos têm a mesma taxa de consumo, que costuma variar a depender da hora do dia ou de períodos sazonais. Aqui apresentaremos a dinâmica referente a um sistema de abastecimento de água que passa a consumir mais ou menos água em determinada data ou horário, com o passar do tempo, para isso, fazem-se necessárias perturbações distintas das efetuadas anteriormente.

Considerando-se que toda rede é dotada de registros de gaveta e de válvulas solenoides nas saídas de todos os consumidores, obtiveram-se aqui, apenas 3 consumidores dos 4 referentes aos dois setores em questão. Ora temos os consumidores A e B ativos do setor I e C ativo e D inativo referentes ao setor II, ora

teremos os consumidores C e D ativos referentes ao setor II e C ativo e D inativo para o setor II.

É válido evidenciar que para maior precisão dos dados coletados fez-se necessária a pressurização da rede com a utilização dos registros de gaveta localizados nos consumidores A, B, C, e D.

Os consumidores A e C tiveram os registros de gaveta calibrados em 6 voltas de abertura, já os registros relativos aos pontos de consumo B e D foram calibrados com 2,5 voltas de abertura. Os solenoides responsáveis pela interrupção e liberação do volume de água consumidos serão ativados e desativados somente nos pontos relativos aos consumidores com 2,5 voltas de abertura, os demais não sofrerão interrupção. Contudo, foram feitas alterações no sistema, bem como incremento no sistema supervisorio para análise dos valores de abertura e fechamento da válvula redutora de pressão instalada no setor I do sistema de abastecimento, tal abertura foi dada em percentual de abertura ou fechamento.

Já a Figura 18 demonstra as variáveis hidráulicas do sistema no qual ocorre variação de consumo devido à abertura e ao fechamento de válvulas solenoides (VS-B e VS-D) instaladas em alguns pontos, elevando as pressões em algumas localidades e reduzindo em outras. A partir da supracitada variação, tem-se a atuação de uma válvula proporcional, controlada por um sistema fuzzy que busca transferir qualquer excesso de pressão presente em um setor para outro com níveis de pressão menores.

Estando o sistema em pleno funcionamento, é necessário esperar a estabilização da rede de abastecimento que expulsa – purga – todo o ar do sistema antes de começar, de fato, a aquisição dos dados requeridos pelo sistema supervisorio. Para a realização do procedimento de purga, deve-se abrir todos os registros de gaveta, assim como os solenoides (VS-A; VS-B; VS-C; VS-D; VS-E) dos cinco consumidores.

Depois de realizado o procedimento de purga do sistema e estabilização dos pontos de pressões desejadas, é preciso o ajuste da rede que ocorre da seguinte maneira:

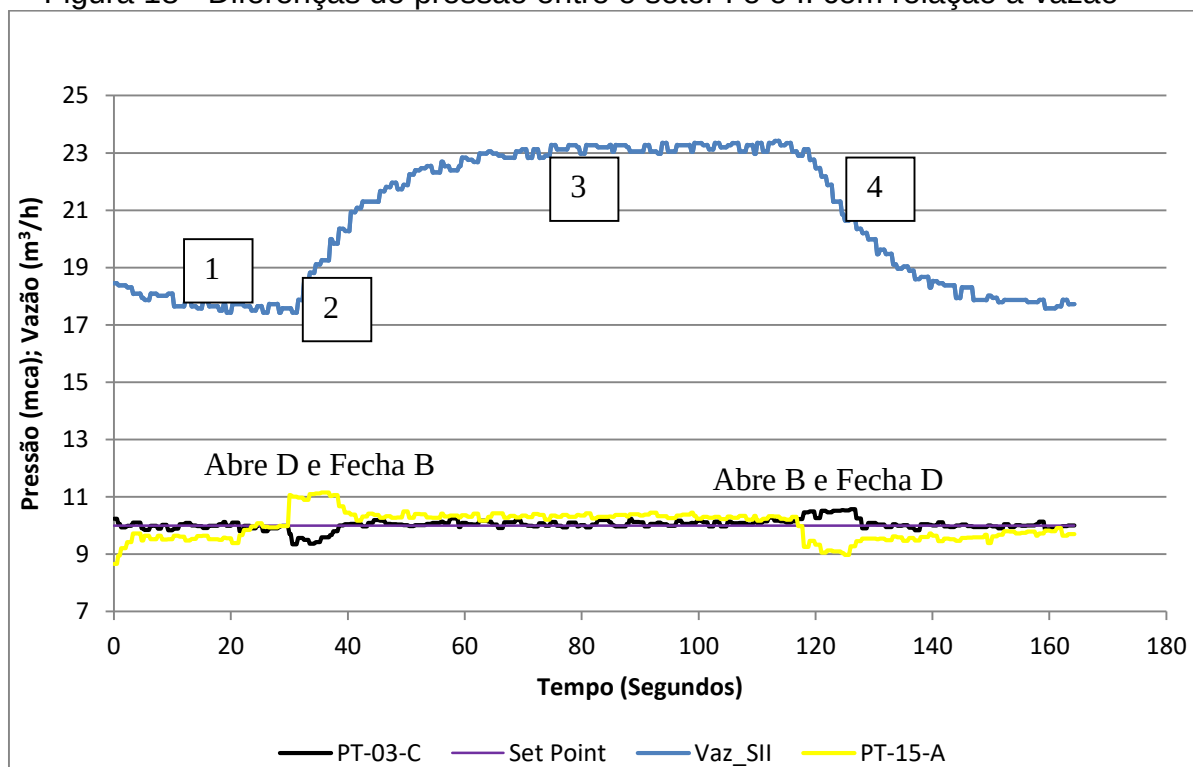
- Ajuste do consumidor A e C: este foi realizado pelo registro de gaveta que, inicialmente, foi completamente ocluído, em seguida,

abriu-se o registro exatamente seis voltas. Neste caso, não teremos mais as variações de abertura e fechamento das VS-A e VS-C.

- Ajuste dos consumidores B e D: após o ajuste dos consumidores A e C, houve o ajuste referente dos consumidores B e D que serão responsáveis pela mudança na dinâmica de consumo da rede experimental explicitada no gráfico da Figura 4.3. Analogamente ao ajuste dos consumidores A e C, efetuou-se o fechamento total dos dois registros de gaveta dos consumidores B e D e, posteriormente, empreendeu-se a abertura em exatamente duas voltas e meia dos dois pontos de consumo em questão.

Logo após a feitura do ajuste da rede, realiza-se a aquisição final dos dados: as variações dos parâmetros hidráulicos do sistema que são demonstradas no gráfico da Figura 18.

Figura 18 - Diferenças de pressão entre o setor I e o II com relação a vazão



É possível observar no gráfico as variações de vazão no setor II (Vaz_II) e alterações de pressão dos consumidores A (PT-15-A) e C (PT-03-C) que fazem referência aos setores I e II, respectivamente.

No que tange ao gráfico de vazão da Figura 18, observa-se que o mesmo possui grandeza com valor mínimo de aproximadamente $17\text{m}^3/\text{h}$ e máximo de $23\text{m}^3/\text{h}$, tais valores justificam-se pela abertura e fechamento das VS-B e VS-D, visto que a vazão atinge o valor máximo no momento em que a VS-D encontra-se na posição aberta e é reduzida ao valor mínimo na ocasião em que a VS-D acha-se na posição fechada.

Já no que se refere ao gráfico de pressão, há duas situações distintas para cada ponto de consumo: o setor I, representado por PT-15-A no gráfico, atinge três valores de pressão, sendo o máximo próximo a 11 mca e o mínimo por volta de 9 mca. Ademais, estipulou-se pressão mínima de consumo de 10 mca que precisa ser atingida sempre que houver variação no consumo; o setor II, representado por PT-03-C, também possui três valores de pressão, a pressão mínima de consumo de 10 mca, a mínima que é próxima a 9,18 mca e a máxima em torno de 10,8 mca. É válido salientar que o gráfico apresenta valores de pressão relativos à abertura e ao fechamento de válvulas solenoides presente na rede.

Inicialmente, temos um sistema estável, isto é, sem variação da dinâmica dos consumidores. Esta situação é representada na Figura 18 pelo ponto 1, onde a vazão encontra-se em valor mínimo e as pressões em PT-15-A e PT-03-C encontram-se próximas dos valores de referência, tal situação ocorre devido a existência de três pontos de consumo (A; B; C) ativos.

Em um segundo instante, temos a abertura do solenoide VS-D e interrupção da passagem para o consumidor B, o que acarreta elevação da vazão no trecho referente ao setor II e, conseqüentemente, redução da pressão no mesmo setor. Na análise do trecho no qual se encontra o setor II, observa-se elevação da pressão que ascende do ponto de referência a um valor próximo de 11 mca, devido à redução de consumo do setor em questão e este excesso de pressão não é desejado, pois o mesmo pode gerar perdas reais no sistema.

Observando-se o ponto 3, podemos perceber uma estabilização da vazão em um valor próximo aos $23\text{m}^3/\text{h}$. Com relação a pressão nesse ponto, percebe-se que a válvula atuou de forma a transmutar os valores referentes aos pontos PT-03-C e PT-15-A a grandezas próximas ao valor de referência, de maneira a tornar o abastecimento eficiente para os dois setores.

Em outro instante temos uma variação no consumo da rede, na qual acontece a abertura da válvula VS-B e fechamento da VS-D, como demonstrado no gráfico pelo ponto 4. Nesta situação, há, novamente, redução da vazão referente ao setor II e aumento com relação ao setor I, assim, há elevação da pressão para os consumidores que se encontram em C e D e redução para o setor I.

Por fim, há novamente atuação da válvula redutora de pressão que dispõe tais valores na referência desejada através da transferência de parte da pressão do setor com maior nível desta (setor II) para setor com níveis menores (setor I). Tal deslocamento de energia ocorreu de forma eficiente e em curto intervalo de tempo.

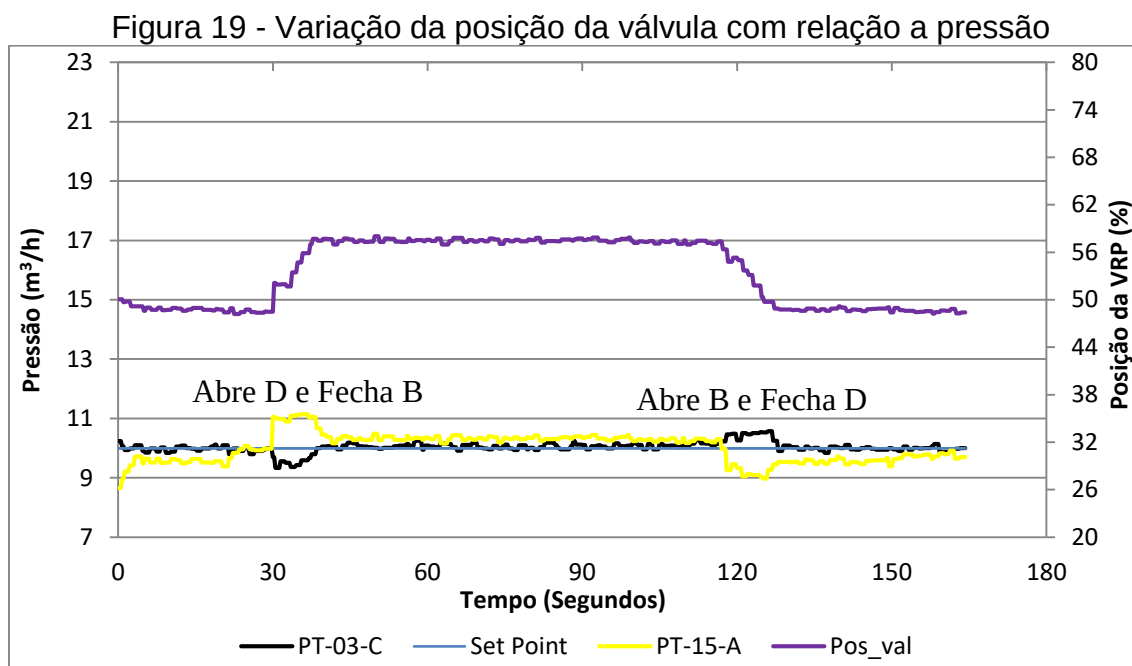
Na Figura 19 há um gráfico que relaciona a pressão da rede com a posição da válvula proporcional localizada no setor I, que foi instalada de forma estratégica para que houvesse maior precisão com relação aos trechos da rede de abastecimento.

O controle dos níveis de pressão é imprescindível em razão de que uma rede com pressão demasiadamente elevada fomenta vazamentos existentes e futuros, visto que a pressão excessiva de água não só aumenta o volume perdido através de vazamentos, como também influencia no aumento do número de roturas. Além disso, um sistema com altas pressões também ocasiona consumo induzido ao excesso de pressão localizado, onde consumidor dissipa mais água do que o necessário, como no caso da abertura de uma simples torneira, no qual devido a alta pressão teremos uma vazão acima do normal de consumo.

Ainda no que tange a escape de água, pelo gráfico do ponto de pressão PT-15-A, é possível perceber redução dos níveis de pressão partindo de 11,2 mca para, aproximadamente, 10,2 mca, ou seja, houve diminuição de cerca de 9%, o que resulta em atenuação de perda por vazamentos, visto que, segundo BEZERRA (2013), uma redução aproximada de 10% nos níveis de pressão dos grandes sistemas, implica em decréscimo de por volta de 12% do volume perdido através de vazamentos.

Com referência ao maior nível de consumo do setor II, podemos citar que a redução da pressão abaixo do valor de referência pode ocasionar ineficiência no abastecimento de pontos mais afastados, demandando acréscimo de energia para que se possa elevar à altura manométrica do referido setor. Este acréscimo derivou-se da transferência de parte da pressão localizada no setor I devido ao fechamento da válvula referente aos consumidores A e B. Pode-se observar no gráfico da Figura

19 a variação da posição da válvula de controle com relação às pressões. Analogamente, observou-se a transferência de energia do setor II para o I e houve facilitação do processo devido à proximidade dos consumidores A e B com relação à válvula redutora de pressão.



4.5. Quantificação da redução do consumo de energia elétrica

Em trabalhos que tratam apenas de conjunto motor-bomba acionados por conversores de frequência foi possível quantificar o ganho de energia em sistemas de abastecimento. Segundo OLIVEIRA (2017), quando a pressão sofre alterações de maneira que permanece em níveis abaixo do desejando, em 9,2 mca, só é possível retomar os valores de referência através da modificação da velocidade nominal do conjunto motor bomba, o qual teve seu valor aumentado de 50Hz para 52Hz, contabilizando um acréscimo de 2Hz ao motor, implicando maior consumo energético.

A Tabela 6 demonstra valores reais dos parâmetros da planta com a atuação do sistema de controle em decorrência da mudança dos consumidores da rede de abastecimento. Nesta tabela apresentaremos valores de máximas e mínimas pressões para o setor II.

Tabela 6 – Parâmetros da planta com atuação do controlador

	Pressão Min	Pressão ideal	Ganho de Pressão.	% Ganho
PT-03-C	9,18mca	10 mca	0,82 mca	8,93%

Pela Equação 2, pode-se deduzir a redução do consumo de energia pelo controle das pressões dos dois setores do sistema de abastecimento. Como a pressão é diretamente proporcional ao consumo de energia elétrica, conclui-se que houve ganho de energia elétrica de 8,93%. Este ganho se dá devido a energia que seria necessária para elevar a pressão do valor mínimo para o ideal de consumo apenas otimizando o sistema com o uso de uma VRP sem a necessidade de acrescentar mais energia externa.

CAPÍTULO V

5.0. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se uma aplicação de um sistema de controle Fuzzy para o gerenciamento de pressão de uma rede de abastecimento de água setorizada. O controle da pressão foi realizado por meio de acionamento de uma válvula redutora de pressão de modo a controlar as pressões a jusante.

O gerenciamento da rede foi possível somente por um sistema supervisório localizado em um centro de controle operacional, de onde se pôde monitorar, bem como controlar parâmetros hidráulicos do sistema de distribuição de água.

O controle das pressões foi satisfatório, de modo que houve otimização hidráulica do sistema de abastecimento, o que reduziu o volume de água perdido por vazamentos e por alto consumo induzido na população em consequência de uma rede com níveis de pressão acima do recomendado por norma.

Em sistemas com níveis de pressão controlados também há maior durabilidade de tubulações, assim como rompimentos esporádicos devido aos altos níveis de pressão.

A otimização da rede também trouxe ao sistema de abastecimento uma eficiência energética da rede, visto que, apenas controlando a pressão a jusante de uma válvula redutora de pressão localizada no setor I, foi possível transferir energia de pressão ao setor II. Com isso houve ganho de 8,93% de energia elétrica que seria necessária para que o setor II trabalhasse com a pressão recomendada por norma em níveis de máximo consumo.

5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Alguns trabalhos podem ser desenvolvidos a partir dessa pesquisa.

1- Aplicar um sistema de controle nos dois ramais, de forma a se obter um estudo da influência dado por uma válvula em decorrência da proximidade do ramal principal.

2- Trabalhar com duas válvulas redutoras de pressão, de forma que uma feche totalmente e a outra varie seu fechamento a cada dez por cento, de modo a se obter um estudo da transferência de pressão do setor I para o setor II, desde a válvula parcialmente aberta até o seu fechamento total.

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

CAPÍTULO VI

6.0. REFERÊNCIAS

ANDRADE FILHO, L. S.; Gomes, A. S.; Gomes, H. P.; Salvino, M. M.; Otero, O. L. C.; Carvalho, P. S. O.; Alencar, R. I. S.; Bezerra, S. T. M.; Coura, S. P.; Silva, S. A. **Sistema de bombeamento eficiência energética**, 2ª edição, editora Universitária /UFPB, João Pessoa – PB (2012).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12218**: Projeto de Rede de Distribuição de Água para Abastecimento Público. Rio de Janeiro, 1994.

BAPTISTA, M; CARDOSO, A. **Rios e Cidades: uma longa e sinuosa história**. Revista UFMG, Belo Horizonte, v. 20, n.2, 2013.

BEZERRA, S. T. M. **Sistema fuzzy para o 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. (2009) Automação e Controle. *In*: GOMES, H.P. (org.) **Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética**. João Pessoa: UFPB. p. 203-249.

BEZERRA, Saulo de Tarso Marques; SILVA, Simplício Arnaud da; GOMES, Heber Pimentel. **Otimização operacional de redes de abastecimento de água usando um sistema fuzzy**. *In*: **Water SA**. Vol. 38 No. 4 July 2012 ISSN 1816-7950 (On-line) = Water SA Vol. 38 No. 4 July 2012.

BEZERRA, S.T.M.; CHEUNG, P.B. **Perdas de Água –Tecnologias de Controle**. 1ed. João Pessoa: Editora Universitária da Universidade Federal, 220p. ISBN: 9788523707019, 2013

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, 2014.

CARIJO, I. B., REIS, L. R., CHEUNG, P. B., SOARES, A. K., & SILVA, F. d. (2003). **Otimização da Operação de Sistemas de Distribuição de Água Utilizando Algoritmos Genéticos Multiobjetivo**. Acesso em 20 de novembro de 2014, disponível em http://www.bwd.com.br/geasd/fotos/gea_publicacoes18.pdf.

CARVALHO, P. S. O. Dissertação de mestrado: “eficiente”- **Um método de dimensionamento econômico para redes de distribuição de água**, UFPB, 2007.

CARVALHO, P. S. O. **Controle para bombeamento distribuído com vistas à minimização dos custos energéticos aplicado a sistemas de abastecimento de água**. 2012. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPB, João Pessoa, PB, 2012.

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

FU, Guangtao; KAPELAN, Zoran. Concepção probabilística difusa de redes de distribuição de água *In: Water Resources Research*, vol. 47, w05538, doi:10.1029/2010WR009739, 2011.

GOMES, H.P. **Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento – Análise Econômica de Projetos**. 1 ed, Editora da ABES Nacional, Rio de Janeiro, 2005.

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

GOMES, H.P. **Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética**. 1º Ed. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2009.

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

GUANAIS, A. L. R.; COHIM, E. B.; MEDEIROS, D. L. **Avaliação energética de um sistema integrado de abastecimento de água**. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, 2017.

MAMDANI, E.H. **Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis**. IEEE Transactions on Computers. v. C-26, n. 12, 1977

MENDEL, J. M. **Uncertain rule-based fuzzy logic systems: introduction and new directions**. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall PTR, (2001).

MOURA, G. N. P.; **A relação entre água e energia: gestão energética nos sistemas de abastecimento de água das companhias de saneamento básico do Brasil.** 2010. 203 f. Dissertação de Mestrado – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro, 2010.

NETTO, J. M. A. Pequena história das bombas hidráulicas. **Revista DAE**, v. 49, n. 154, 1989.

OLIVEIRA, J. K. C. de. **Lógica Fuzzy aplicada na otimização operacional de rede setorizada de distribuição de água.** 2017. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPB, João Pessoa, PB, 2017.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **The United Nations World Water Development Report 2015: water for a sustainable world.** 2015

OSMANA, T.A.; EL-GIDDAWYA, BAKERYB, E., M.; SALAMAB, A. **Pesquisa com abordagem de lógica fuzzy para a seleção de válvulas hidráulica de controle direcional na fase de concepção preliminar.** *In: Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 35-44, 2003.

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

PEREIRA, J. A. R.; CONDURÚ, M. T. **Abastecimento De Água: Informação para Eficiência Hidroenergética.** João Pessoa: UFPB, 2014. 127 p

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

PINTO-COELHO, R. M. **Crise nas Águas. Educação, ciência e governança, juntas, evitando conflitos gerados por escassez e perda da qualidade das águas.** 1ª ed. Belo Horizonte: Recóleo, 2015. PITERMAN, A.; GRECO, R. M. A.

Água seus caminhos e descaminhos entre os povos. **Revista de APS**, v. 8, 2005.

REYNOSO, A. E. G. et al. **Rescate de ríos urbanos**: propuestas conceptuales y metodológicas para la restauración y rehabilitación de ríos. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.

SHIKLOMANOV, I.A.; RODDA, J.C. World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century. Cambridge, **UK: Cambridge University Press**, 2003.

SIMÕES, M. G. e Ian S. Shaw. **Controle e modelagem fuzzy**. 2ª Edição. São Paulo–SP. Editora Edigard Blucher, 2007.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2014. 164 p. **Ministério das Cidades - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental**, Brasília, 2014.

TRIPATHI, M. **Life-cycle energy and emissions for municipal water and wastewater services**: case-studies of treatment plants in U.S. 2010. 218f. Dissertação – University of Michigan, Ann Arbor, 2007.

TSUTIYA. M.T. **Abastecimento de Água**. 3ª Edição. São Paulo – SP. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2006.

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