



Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais

Área de Concentração: Engenharia de Recursos Naturais
Linha de Pesquisa: Saneamento Ambiental

LUÍSA EDUARDA LUCENA DE MEDEIROS

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE BAIXO CUSTO PARA
MEDIÇÃO INTELIGENTE DE VAZÃO EM REDES DE ABASTECIMENTO**

Campina Grande-PB

2022

LUÍSA EDUARDA LUCENA DE MEDEIROS

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE BAIXO CUSTO PARA
MEDIÇÃO INTELIGENTE DE VAZÃO EM REDES DE ABASTECIMENTO**

Tese apresentada ao Programa Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, pertencente à linha de pesquisa Saneamento Ambiental e área de concentração Engenharia de Recursos Naturais como requisito para obtenção do Título de Doutora em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientadora: Prof.^a Dra. Dayse Luna Barbosa

Coorientadora: Prof.^a Dra. Andréa Carla Lima Rodrigues

Campina Grande-PB

2022

M488d

Medeiros, Luísa Eduarda Lucena de.

Desenvolvimento de sistema automatizado de baixo custo para medição inteligente de vazão em redes de abastecimento / Luísa Eduarda Lucena de Medeiros. – Campina Grande, 2022.

116 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022.

"Orientação: Profa. Dra. Dayse Luna Barbosa, Profa. Dra. Andrea Carla Lima Rodrigues".

Referências.

1. Gestão de Água. 2. Monitoramento de Redes. 3. Medição Inteligente. 4. Automação. 5. Macromedidores. I. Barbosa, Dayse Luna. II. Rodrigues, Andrea Carla Lima. III. Título.

CDU 556.18:004(043)

LUÍSA EDUARDA LUCENA DE MEDEIROS

**“DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE BAIXO CUSTO PARA
MEDIÇÃO INTELIGENTE DE VAZÃO EM REDES DE ABASTECIMENTO”**

Aprovado em: 21/06/2022

BANCA EXAMINADORA

Profª. Dra. DAYSE LUNA BARBOSA

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Profª Dra. ANDRÉA CARLA LIMA RODRIGUES

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Profª Dra. PATRÍCIA HERMÍNIO CUNHA

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Profª Dra. VERA LÚCIA ANTUNES DE LIMA

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Profª Dra. MARIA ADRIANA DE FREITAS MÁGERO RIBEIRO

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Prof Dr. VALTERLIN DA SILVA SANTOS

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM RECURSOS NATURAIS
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO/TESE

Ata da nona sessão pública de Defesa de **Tese** do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais – PPGEGRN do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais – CTRN da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Ao 21 dia do mês de Junho de 2022, às 14:00 horas, **por meio presencial** reuniu-se na forma e Termos do Art. 62 do Regulamento Geral dos Cursos e Programas de Pós-Graduação “Stricto Sensu” da UFCG e do Regulamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, Resolução 02/2019 do Colegiado Pleno do Conselho Superior de Ensino, Pesquisa e Extensão – CONSEPE/UFCG, a Banca Examinadora composta pelos professores/pesquisadores Prof.(a) Dr.(a) **DAYSE LUNA BARBOSA**, como orientador(a) principal; Prof. (a.) Dr.(a.) **ANDRÉA CARLA LIMA RODRIGUES**, como coorientador; Prof.(a.) Dr.(a.) **PATRÍCIA HERMÍNIO CUNHA/UFCG** como membro interno; Prof.(a.) Dr.(a.) **VERA LÚCIA ANTUNES DE LIMA/UFCG** como membro interno; Prof.(a.) Dr.(a) **MARIA ADRIANA DE FREITAS MÁGERO RIBEIRO/UEPB**, como membro externo; Prof.(a.) Dr.(a) **VALTERLIN DA SILVA SANTOS/UFCG**, como membro externo; a qual foi constituída pela Portaria **PPGEGRN 21/2022** da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, juntamente com **Sr(a) Luísa Eduarda Lucena de Medeiros** candidato(a) ao Grau de **Doutora** em Recursos Naturais. Abertos os trabalhos, o(a) Senhor (a) Presidente da Banca Prof.(a.) Dr(a) **DAYSE LUNA BARBOSA**, anunciou que a sessão tinha a finalidade de julgamento da apresentação e de defesa da **Tese** sob o título: **“DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO INTELIGENTE DE ÁGUA EM REDES DE ABASTECIMENTO”**, realizada de forma presencial, com Área de Concentração: **Engenharia de Recursos Naturais**, orientada pelo(a) Professor(a) Dr(a.) **DAYSE LUNA BARBOSA**. O(A) presidente concedeu à palavra o(a) candidato(a) para, no prazo de tempo estipulado, efetuar a apresentação de seu trabalho. Concluída a exposição do(a) candidato(a), o(a) Presidente iniciou a segunda etapa do processo de defesa passando a palavra a cada membro da Banca Examinadora para as devidas considerações, correções e arguição do(a) candidato(a). Em seguida, a Banca Examinadora solicitou a saída dos presentes para, em sessão secreta, avaliar a apresentação e defesa. Após chegar a uma decisão final, a Banca Examinadora solicitou o retorno da Assembléia e anunciou, de conformidade com o que estabelece o Art. 57 do Regulamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, o Conceito **APROVADO**, o qual será atribuído após O(a) candidato(a), no prazo máximo de **30 (trinta)** dias, efetuar as correções e modificações sugeridas e aprovadas pela Banca Examinadora. Nada mais havendo a tratar pelo Coordenador, pelo candidato e pelos membros da Banca Examinadora.

Campina Grande, 21 de Junho de 2022.

Assinaturas:

Coordenadora do PPGEGRN _____

Candidato(a) _____

Presidente _____

Coorientador _____

Examinador _____

Examinador _____

Examinador _____

Examinador _____



Documento assinado eletronicamente por **DAYSE LUNA BARBOSA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/06/2022, às 20:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **VERA LUCIA ANTUNES DE LIMA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/06/2022, às 20:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARIA DE FATIMA MARTINS, COORDENADORA DE PÓS GRADUAÇÃO**, em 22/06/2022, às 19:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **VALTERLIN DA SILVA SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/06/2022, às 20:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro, Usuário Externo**, em 23/06/2022, às 08:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luisa Eduarda Lucena de Medeiros, Usuário Externo**, em 23/06/2022, às 09:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANDREA CARLA LIMA RODRIGUES, COORDENADOR(A) ADMINISTRATIVO(A)**, em 23/06/2022, às 10:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **PATRICIA HERMINIO CUNHA FEITOSA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 25/06/2022, às 16:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **2477243** e o código CRC **89399F54**.

Dedico

Ao meu avô, Severino Emídio de Medeiros (in memoriam), por todo amor, carinho, dedicação e cuidado.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por possibilitar que todos os sonhos e planos que confia a mim para que possa concretizar.

À minha amada mãe, Vera Lúcia de Medeiros, pelo apoio, carinho e confiança. Por ser a melhor pessoa do mundo e me fazer querer ser um pouco melhor a cada dia. Toda a minha gratidão é pouco diante do que a senhora fez e faz por mim todos os dias.

Ao meu pai, por ser uma fonte de inspiração, por me incentivar nos estudos mesmo não dizendo uma só palavra. O exemplo multiplica.

Às minhas tias e tios queridos, pelo incentivo e por todo empenho dedicado para que eu concretizasse cada escolha profissional e pessoal.

Aos meus avós, Severino Emídio (*in memoriam*) e Alice, por todo suporte oferecido fisicamente e espiritualmente desde menina, pelos ensinamentos e lições diárias de humildade e amor ao próximo. Por sempre estarem presentes, mesmo que ainda distantes.

A Paulo Eduardo Júnior, pela compreensão e apoio prestados em todos os momentos ao longo dessa jornada.

Às professoras e orientadoras, Dayse Luna Barbosa e Andréa Carla Lima Rodrigues, por toda dedicação, compreensão, pela confiança no desenvolvimento deste trabalho e por todo os ensinamentos durante a minha formação profissional.

Aos amigos que estiveram junto a mim nesse período do Doutorado, por toda força e companheirismo dedicados para o desenvolvimento desta pesquisa. Em especial a Igor Antônio Brandão, por acreditar nesta pesquisa e por todo o suporte no desenvolvimento do trabalho e à Priscila, Larissa, Vanessa e Yuri, que além de colegas de trabalho tornaram-se grandes amigos, por todo apoio na concretização deste trabalho.

A todos os professores e funcionários dos laboratórios de hidráulica e saneamento, que contribuíram de forma positiva nesse período da minha vida.

À CAPES, pelo fomento da bolsa de estudo que auxiliou no desenvolvimento desta tese.

A todos que, de alguma forma, ajudaram na construção e concretização desse sonho, o meu muito obrigada!

RESUMO

Os sistemas de abastecimento de água (SAA) brasileiros ainda apresentam baixos índices de macromedição e níveis de perdas significantes. O aumento das demandas por água associado a estes altos índices de perdas gera um cenário preocupante quanto à oferta de água, sendo necessária uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos. A automação é uma tecnologia que pode auxiliar a medição inteligente de água e o monitoramento de SAA minimizando problemas recorrentes em redes de distribuição. A pesquisa teve como objetivo desenvolver um sistema de medição inteligente de água a partir de protótipos automatizados de baixo custo para auxílio a gestão de água em redes de distribuição. Utilizou-se como área experimental a rede de abastecimento da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) campus de Campina Grande-PB. As etapas metodológicas da pesquisa foram: desenvolvimento do protótipo macromedidor, calibração e validação em bancada hidráulica experimental e aplicação na rede da UFCG para supervisão dos dados em campo sob condições não controladas. O dispositivo desenvolvido mostrou-se satisfatório para medição de vazão em tubulações com razão de diâmetro $\beta=0,5$, obtendo erros inferiores a 2,5% para vazões superiores a 3 m³/hora, conforme calibração realizada a partir de dois medidores de referência, o rotâmetro e o manômetro Gull Press-1000. A instalação do protótipo inteligente na rede para medição de vazão apresentou algumas dificuldades, principalmente devido à interrupção intermitente no abastecimento, o que comprometeu as leituras, uma vez que a medição via protótipo é prevista para abastecimento ininterrupto na rede. Quando estabelecido o fluxo na tubulação, o protótipo apresentou sensibilidade suficiente para identificar mudanças de pressão e vazão na rede em trecho experimental estudado. Os dados coletados pelo dispositivo na rede foram enviados para um sistema supervisorio, no qual foi possível o acompanhamento de pressão e vazão coletadas em tempo real e a verificação de anomalias mediante o conhecimento da curva de consumo característica da rede no qual este foi instalado. O custo total do protótipo inteligente desenvolvido e instalado foi de R\$453,80, valor inferior aos macromedidores comumente empregados nos sistemas de abastecimento brasileiros, com custo até 33 vezes maior que o desenvolvido e sem a funcionalidade de medição remota digital. O protótipo foi validado e pode ser utilizado para medição inteligente de vazão em sistemas no qual o diâmetro da tubulação atenda aos critérios de relação com orifício proposto na pesquisa, sendo uma ferramenta aplicável para a operação de sistemas e auxílio na gestão de perdas de água. A aplicação na rede estudada permitiu obter curvas características de vazão em diferentes recortes temporais durante o período de observação para os protótipos 1 e 2 instalados, que apresentam o comportamento do consumo de água na rede estudada. Desse modo o sistema de medição inteligente estudado mostrou ser um instrumento válido para medição de vazão em tubulações de água, sendo uma ferramenta que auxilia no planejamento, operação e gestão de perdas de água em redes com características semelhantes.

Palavras-chave: Monitoramento de redes; Automação; Medição inteligente; Gestão de água; macromedidores.

ABSTRACT

The Brazilian water supply systems (WSS) still have low levels of macro measurement and species of significant species. The increase in demands for water resources associated with these high levels of water generates a worrying scenario regarding the supply of water, with a more efficient management of water resources. Automation is a technology that can assist intelligent water monitoring and WSS by minimizing recurring problems in distribution networks. It aimed to develop an intelligent water survey system from low-cost automated devices to help manage water in distribution networks. The supply network of the Federal University of Campina Grande (UFCG) Campina Grande-PB was used as an experimental area. The methodological steps were: the development of the operation and the validation of the UFCG to supervise the data under uncontrolled conditions. The device was developed to be satisfactory for use in pipes with a performance ratio of $\beta=0.5$, obtaining errors of less than 2.5% for flows greater than 3 m³/hour, as performed from two reference gauges, the rotameter and the Gull Press-1000 manometer. The installation of the intelligent problem in the network for the presentation of some difficulties, mainly due to the interruption without interruption, which compromised as a network, since the configuration through the configuration is provided for uninterrupted supply. When the flow in the pipeline is established, sufficient sensitivity is presented to identify the pressure and circulation in the network in a defined experimental section. The collection data, by the temperature measurement system in the network, was sent for pressure monitoring and real monitoring flow and the verification of consumption anomalies of the characteristic was installed. The total cost of the highly intelligent developed and installed was R\$453.80, lower than the natural resources of macro supply, with a cost up to 33 times higher than the one developed and without the digital remote functionality. The designed solution was used for the operation of intelligent solution and can be used in a list of models with solution designed for the operation of systems and can be used for the management of designed solutions valid for the operation of systems and can be used in the management of solutions. The application on the network of optimized behavior to obtain the consumption characteristics in time optimizations during the observation period for resources and observation period for resources 1 and 2 tuning, which present the network time. This operating mode influenced an intelligence system shown to be an instrument of intelligence studied in pipes, being a tool that is not specific for water, operation and management of water losses in networks with characteristics.

Keywords: Water Network monitoring; Automation; Smart water meters; water management; macrometers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Partes constituintes de um SAA.....	27
Figura 2 - Esquema de uma rede ramificada	30
Figura 3 - Esquema de uma rede malhada com quatro anéis	30
Figura 4 - Esquema de uma rede mista	31
Figura 5 - Sistema de telemetria	49
Figura 6 - Representação de uma rede de abastecimento no EPANET 2.0	51
Figura 7 - Componentes físicos de uma rede de distribuição de água	52
Figura 8 - Classificação da pesquisa científica.....	53
Figura 9 - Fluxograma para desenvolvimento do sistema de medição	55
Figura 10 - Croqui dos pontos 1 e 2 em trecho retilíneo estudado para definição de medidor.....	56
Figura 11 - Detalhes do sensor MPX 5700-DP.....	63
Figura 12 - Curva característica do sensor para tensão de saída em função do diferencial de pressão	64
Figura 13 – Interface Arduino.....	65
Figura 14 - Sequência de funcionamento do software.....	65
Figura 15 – Bancada hidráulica experimental (a), Placa de orifício (b) e Manômetro GullPress 1000 (c)	66
Figura 16 - Rede de distribuição de água da UFCG.....	71
Figura 17 - Posicionamento dos reservatórios do sistema (a) e o conjunto motobomba (b)	72
Figura 18 - Posicionamento do protótipo dentro da rede de distribuição de água da UFCG.....	73
Figura 19 - Esquema dos dois pontos monitorados para estimativa de vazão e pressão	73
Figura 20 - Instalação do protótipo macromedidor na rede de distribuição estudada	74
Figura 21 - (a) Caixa protetora (b) Sistema de macromedição instalado	74
Figura 22 - Planilha supervisória Protótipo 1	75
Figura 23 - Componentes do Circuito 1 para o protótipo macromedidor.....	77
Figura 24 - Componentes do Circuito 2 para o protótipo macromedidor.....	78
Figura 25 – Planta baixa e cortes do projeto para a placa de orifício	82

Figura 26 - Perspectiva do protótipo macromedidor	83
Figura 27 - Protótipo macromedidor - projeto final renderizado	83
Figura 28 – Placa de orifício com $D_0=50\text{mm}$ (a), Instalação das tomadas de pressão (b) e macromedidor com tomadas de canto	84
Figura 30 - Curva vazão do rotâmetro vs. vazão do manômetro Gull Press-1000....	86
Figura 31 – Curva da Vazão do rotâmetro vs. Vazão do sensor MPX 5700-DP	86
Figura 32 – Curva da vazão a partir do manômetro vs. Vazão do sensor MPX 5700-DP.....	87
Figura 33 - Dados obtidos para os três medidores comparados e a vazão de referência (m^3/s)	88
Figura 33 - Croqui do sistema de medição inteligente de vazão em funcionamento	93
Figura 34 - Vazão característica por dia da semana (m^3/dia) para o Protótipo 1	94
Figura 35 - Vazão diária média para o Protótipo 1	96
Figura 36 - Curva característica da vazão média, máxima e mínima horária para o Protótipo 1	97
Figura 37 - Vazão característica por dia da semana (m^3/dia) para o Protótipo 2	98
Figura 38 - Vazão diária média para o Protótipo 2	100
Figura 39 - Curva característica da vazão média, máxima e mínima horária para o Protótipo 2	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de medidores de vazão	33
Quadro 2 - Classificação dos volumes de água em SAA	37
Quadro 3 - Comparativo entre os principais meios de transmissão.....	50
Quadro 4 - Partes constituintes do protótipo macromedidor.....	61
Quadro 5 - Especificações do Sistema de reservatórios da UFCG	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferença de pressão esperada: Placa de orifício com tomadas de canto	58
Tabela 2 - Diferença de pressão esperada: Placa de orifício com tomadas D e $\frac{1}{2}D$	58
Tabela 3 - Diferença de pressão esperada: Bocal.....	58
Tabela 4 - Características do sensor MPX 5700- DP	64
Tabela 5 - Componentes e preços utilizados no macromedidor com circuito 1	79
Tabela 6 - Componentes e preços utilizados no macromedidor com circuito 2	79
Tabela 7 - Comparativo de custo dos macromedidores de vazão	80
Tabela 8 - Resultados obtidos através da calibração - bancada hidráulica	85
Tabela 9 - Erro percentual das vazões médias no sensor MPX 5700-DP em relação aos medidores de referência.....	89
Tabela 10 - Testes estatísticos dos pressupostos iniciais	91
Tabela 11 - Resultados obtidos para ANOVA de uma via	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

AESBE - ASSOCIAÇÃO DE EMPRESAS DE SANEAMENTO BÁSICO ESTADUAIS

ANOVA – ANÁLISE DE VARIÂNCIA

AWWA –American Water Works Association

DMC - DISTRITO DE MEDIÇÃO E CONTROLE

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA

EMR - ELEMENTO DE MEDIÇÃO REMOTA

GDA – GESTÃO DE DEMANDA DE ÁGUA

IWA - INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION

NBR - NORMAS BRASILEIRAS REGULAMENTADORAS

NEB – REGIÃO NORDESTE BRASILEIRA

OMS- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE

OECD- ORGANIZAÇÃO PARA COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO
ECONÔMICO

PBA – PONTA BOLSA ANEL

PVC – POLÍMERO DE ADIÇÃO POLICLORETO DE VINILA

RNF - RESERVATÓRIOS DE NÍVEL FIXO

RNV - RESERVATÓRIOS DE NÍVEL VARIÁVEL

SIG - SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO

SSA - SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÀGUA

UFCG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 JUSTIFICATIVA.....	22
1.2 HIPÓTESES.....	22
1.3 OBJETIVOS.....	23
1.3.1 Objetivo Geral	23
1.3.2 Objetivos Específicos	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	24
2.2 GESTÃO DA DEMANDA DE ÁGUA	25
2.3 SISTEMAS URBANOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	27
2.3.1 Composição	27
2.3.2 Redes de distribuição de água e setorização	29
2.3.3 Medição de vazão e controle de pressão em redes	32
2.4 PERDAS DE ÁGUA EM REDES DE ABASTECIMENTO.....	35
2.4.1 Classificação e causas das perdas	35
2.4.2 Avaliação das perdas	38
2.5 MODELOS PARA REDUÇÃO E CONTROLE DAS PERDAS DE ÁGUA.....	39
2.5.1 Modelo do Balanço hídrico – IWA	39
2.5.2 Modelo de vazões mínimas noturnas	40
2.5.3 Modelo de setorização de redes	40
2.6 SISTEMA DE AUTOMAÇÃO EM REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	42
2.6.1 Medição inteligente de água	43
2.7 SUPORTE À AUTOMAÇÃO	47
2.7.1 Sistemas de informações geográficas.....	47
2.7.2 Sistemas de telemetria.....	48

2.7.3 Simulação de sistemas hidráulicos.....	50
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
3.1 NATUREZA E COLETA DOS DADOS.....	53
3.2 ETAPA 1 - DESENVOLVIMENTO DO PROÓTIPO INTELIGENTE DE MEDIÇÃO DE CONSUMO	54
3.2.1 Escolha do medidor de vazão	56
3.2.2 Hardware	60
3.2.2.1 Sensor de pressão – MPX5700DP.....	63
3.2.3 Software.....	65
3.3 ETAPA II: CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SENSOR EM BANCADA	66
3.3.1 Calibração e validação do sensor MPX 5700-DP	66
3.3.2 Análises estatísticas do funcionamento dos sensores.....	69
3.4 ETAPA III: INSTALAÇÃO DO PROTÓTIPO E MONITORAMENTO DE VAZÃO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO	69
3.4.1 Caracterização da área de estudo e do sistema de distribuição utilizado .	69
3.4.2 Instalação e monitoramento do protótipo	72
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
4.1 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA INTELIGENTE PARA MEDIÇÃO DE CONSUMO.....	76
4.1.1 Projeto, construção e montagem do macromedidor de vazão.....	82
4.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MACROMEDIDOR INTELIGENTE EM BANCADA HIDRÁULICA.....	84
4.2.1 Análise estatística dos dados obtidos na calibração e validação do sistema macromedidor inteligente de vazão.....	90
4.3 RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DA LEITURA DOS PROTÓTIPOS INSTALADOS NA REDE	93
4.3.1 Análise de vazão - Protótipo 1.....	94
4.3.2 Análise de vazão - Protótipo 2.....	98

5 CONCLUSÕES.....	105
6 RECOMENDAÇÕES	107
REFERÊNCIAS	108

1 INTRODUÇÃO

O incremento às demandas de água ocasionado pelo crescimento populacional e os recorrentes cenários de escassez hídrica tornam a disponibilidade de água doce cada vez mais limitada. Diante desse cenário, descortina-se a preocupação com os programas de gestão de água que, muitas vezes, não atendem aos índices mínimos de desempenho e agravam ainda mais os problemas de acessibilidade ao recurso (LI *et al.*, 2020; BROWN, MAHAT, RAMIREZ, 2019; World Meteorological Organization - WMO, 2017).

Um programa de gestão de água eficiente deve reduzir consumo, implantar práticas de reutilização de água para fins não potáveis, monitorar os volumes de água disponibilizados e consumidos na rede, controlar efetivamente perdas nos sistemas de abastecimento de água (SAA), entre outras medidas que possam minimizar o desperdício de água potável (ABIQUIM, 2016; OECD, 2012).

Dentre as ações citadas, uma em especial, demanda maior atenção por parte do gestor devido à alta complexidade e difícil resolução. Trata-se do controle de perdas nos sistemas de abastecimento de água. Altos índices de perdas de água podem comprometer o desempenho econômico-financeiro das concessionárias e a qualidade dos serviços ofertados (MEDEIROS, 2017).

Na região Nordeste, onde há disponibilidade limitada de água, é um paradoxo considerar que a maioria dos municípios possuem sistemas de abastecimento com altos índices de perdas na distribuição de água (média de 46,3%), que podem estar associados a falhas de gestão, inexistência ou ineficiência na medição (índice de macromedição de 49,42%), entre outros fatores que refletem tanto em perdas físicas quanto de faturamento (SNIS, 2021).

Na Paraíba, o panorama de perdas mostra que as perdas na distribuição são de 38,5% para o ano de 2020, valor inferior às médias regionais e nacionais, porém distante do valor orientado pela *American Water Works Association (AWWA)*, no qual o percentual de perdas deve atingir valores inferiores aos 10% (SNIS, 2022).

Diante disso, a Portaria nº 490/2021 do Ministério do Desenvolvimento Regional estabelece critérios para redução de perdas de água baseados em índices disponibilizados pelo SNIS, de modo que os municípios que não atingirem determinados percentuais mínimos fixados devem adotar medidas de reduções até o

ano 2034 para o índice de perdas na distribuição (IN049) e índice de perdas por ligação (IN051).

A redução ocorrerá de forma progressiva e espera-se que até 2034 atinja-se 65% do valor dos índices médios nacionais, limitando-se a 25% para as perdas na distribuição e 216 litros/ligação/dia para as perdas médias por ligação.

Dentre as técnicas de intervenções sugeridas na Portaria nº 490/2021, estão a ampliação da macromedição e pitometria nos sistemas de distribuição de água, uma vez que no Brasil estes mecanismos são pouco difundidos como ferramenta de gestão de perdas de água.

As respostas dos investimentos no setor de perdas mostram uma redução significativa do desperdício de água a partir de uma maior fiscalização e controle dos volumes consumidos nos sistemas de abastecimento, sendo possível poupar água, a partir de boas práticas de gestão, para utilização durante um tempo maior (LI *et. al.*, 2020; ANDRADE SOBRINHO; BORJA, 2016).

O combate às perdas físicas inclui gerenciamento de pressões, controle ativo de vazamentos não-visíveis, agilidade e qualidade nos reparos de vazamentos e melhoria de infraestrutura, com troca de ramais e trechos mais vulneráveis de redes. Além disso, há ainda a identificação de fraudes por meio de vistorias frequentes nos ramais (TARDELLI FILHO, 2016).

Entretanto, as práticas de combate às perdas ainda são onerosas e de difícil execução. É necessário rever conceitos e desenvolver novos modelos que sejam capazes de reduzir efetivamente as perdas em sistemas de abastecimento a fim de garantir um uso racional da água e auxiliar a gestão financeira das concessionárias.

Nesse contexto, o desenvolvimento de dispositivos automatizados de monitoramento e controle de volume em redes de abastecimento de água pode auxiliar o processo de gestão das empresas e dos usuários, uma vez que permite ganhos econômicos, sociais e ambientais, principalmente em áreas vulneráveis nas quais a disponibilidade de água é limitada qualitativa e quantitativamente.

Os dispositivos automatizados possibilitam o acompanhamento do consumo de água em tempo real e identificam mudanças nos perfis de consumo que possam indicar a presença de vazamentos ou outro tipo de perda física nas redes, o que permite a medição inteligente como uma ferramenta de gestão de perdas em redes de distribuição de água (FONTANA *et al.*, 2018; LIU; MUKHEIBIR, 2018. CREACO *et al.*, 2019).

A adoção de sistemas automatizados reduz a necessidade de monitoramento presencial, permitindo uma maior agilidade na tomada de decisão pelo gestor, uma menor complexidade das ações propostas e, conseqüentemente, menor custo de implantação.

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver um dispositivo de medição inteligente de vazão e pressão que propicie o monitoramento contínuo e remoto das redes de abastecimento de água e contribua para a redução de perdas na distribuição com baixo custo e alta eficiência de medição, o que contribui para gestão e operação efetiva do SAA.

Diante disso, foi utilizado um trecho da rede de distribuição de água do campus sede da UFCG, localizado cidade de Campina Grande, para aplicação do protótipo desenvolvido como ferramenta para contribuir na operação e gestão de água local a partir da adoção de novas tecnologias de medição inteligente de água.

1.1 JUSTIFICATIVA

A série histórica de baixos índices pluviométricos registrada nos últimos anos (2012-2018) na Região Nordeste Brasileira (NEB) e em outras regiões do país, associada à precariedade ainda existente no setor de saneamento tornam primordial o desenvolvimento de novas metodologias e mecanismos que permitam otimizar o uso dos recursos hídricos, principalmente em regiões áridas e semiáridas.

Em relação aos SAA's, a ampliação do monitoramento de vazão nas redes de distribuição, bem como o desenvolvimento de ferramentas efetivas que auxiliem à redução de perdas de água com vista a sustentabilidade ambiental e a viabilidade socioeconômica dos sistemas são fundamentais na gestão e operação de redes de distribuição de água.

A Portaria nº 490/2021 reafirma a necessidade de adoção de técnicas para reduzir perdas, como a medição de água, ainda muito deficiente no Brasil. As tecnologias que possibilitem melhorar a eficiência dos SAAs são ferramentas que contribuem para a operação dos sistemas, permitindo um monitoramento e controle efetivo de água.

Assim, existe a necessidade da adoção de soluções com a finalidade de reduzir as crises hídricas que culminam no desabastecimento das comunidades. As instituições governamentais e a sociedade em geral têm buscado desenvolver tecnologias e ideias inovadoras como possíveis soluções que visem otimizar o uso da água

1.2 HIPÓTESES

A partir da problemática contextualizada nesta pesquisa, três hipóteses são levantadas:

- 1) O uso de protótipos inteligentes para medição de vazão em tempo real contribui a operação de sistemas de abastecimento de água, identificando consumos característicos e possíveis anormalidades na rede.
- 2) O monitoramento automatizado de vazão permite um controle efetivo de perdas de água auxiliando o processo de gestão realizado pelos usuários e pelas concessionárias.
- 3) A criação de um sistema de monitoramento de água conduz a eficiência dos recursos disponíveis, sejam eles naturais ou humanos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um protótipo automatizado de baixo custo utilizando tecnologia remota para o monitoramento de vazão e gestão de perdas em redes de abastecimento.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver circuitos inteligentes utilizando sensores para medição de pressão e vazão em redes de abastecimento de água;
- Validar o protótipo em escala reduzida a partir da calibração para aplicação em redes de distribuição de água;
- Criar um modelo de monitoramento de vazão que auxilie a gestão em SAA;
- Realizar o monitoramento e controle de vazões e pressões na rede de distribuição de água da UFCG – Campus;
- Propor a aplicação de medidores inteligentes em sistemas de abastecimento de água com a finalidade de otimizar a operação de água.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O consumo de água é uma variável influenciada por diferentes fatores e reflete diretamente a economia e a gestão da água em um determinado local. A região onde está localizada uma população, os diferentes usos de água, a disponibilidade hídrica e a existência da medição de água são alguns dos fatores intervenientes que influenciam na variabilidade do consumo.

No que tange à disponibilidade limitada de água em algumas regiões, há uma necessidade especial para a adoção de técnicas para quantificar e monitorar o consumo de água de modo a garantir este recurso em quantidade e qualidade adequada nos períodos futuros.

A medição contínua de água é um instrumento eficaz para o controle e gestão em sistemas de distribuição de água que contribuem significativamente para o gerenciamento de perdas (SNIS, 2021).

As perdas de água representam um indicador relevante para medir a eficiência dos sistemas de abastecimento. A redução das perdas de água nos sistemas de distribuição para níveis suficientemente econômicos está se tornando essencial quando considerados problemas relacionados ao aumento das tensões nos recursos hídricos. Nos países em desenvolvimento, as altas perdas de água apresentam-se como um fator limitante para atender às crescentes demandas (ZYOULD *et al.*, 2016; KADU; DIGHADE, 2015).

Segundo Loureiro *et al.* (2014), globalmente, uma quantidade anual superior a 48 bilhões de metros cúbicos é desperdiçada como perdas reais ou águas não faturadas em redes de distribuição de água. Assim, melhorias no gerenciamento de perdas de água que estão ligadas ao monitoramento inexistente ou ineficiente de água contribuem para aliviar a escassez deste recurso natural.

A redução de perdas em sistemas de abastecimento de água tem sido um dos principais desafios para os gestores. O monitoramento e controle de perdas tornou-se um tema de interesse mundial, tendo em vista a tendência internacional para a sustentabilidade dos recursos naturais e para a eficiência econômica dos serviços. As

ferramentas tecnológicas aliadas ao monitoramento de sistemas são fundamentais para auxiliar neste processo (FARIAS; FONTANA; MORAIS, 2013; CHRISTODOULOU; DELIGIANNI, 2010; DELGADO-GALVÁN *et al.*, 2010; TROJAN; MORAIS, 2012).

A automação em SAA é um importante mecanismo para a implementação de um monitoramento eficiente dos volumes distribuídos na rede e no combate às perdas, com o desenvolvimento de soluções que permitem a redução de custos e o aumento da eficiência a partir do uso de tecnologias inovadoras que auxiliem as concessionárias na efetivação da gestão de água (ASSIS, 2012).

2.2 GESTÃO DA DEMANDA DE ÁGUA

O conceito de gestão relaciona-se diretamente com o desenvolvimento sustentável, que busca o crescimento econômico aliado à equidade social e à manutenção da capacidade de suporte dos sistemas ambientais, com o objetivo de garantir a utilização dos recursos naturais pelas sociedades atuais e futuras (MUÑOZ, 2000; SILVA; PORTO, 2003).

Uma preocupação recorrente é melhorar a gestão dos recursos hídricos. Nos países desenvolvidos, embora o acesso à água seja quase universal (OMS, 2017), existem cuidados maiores, tais como a eficiência na gestão da água, incluindo qualidade da água, substituição e atualização da infraestrutura, impactos das mudanças climáticas e interesse pela água. Já nos países em desenvolvimento, os problemas com acesso à água, com qualidade e quantidade adequada, encontra-se em um cenário ainda precário, sendo a busca pela universalização do acesso priorizada enquanto a qualidade dos serviços prestados é muitas vezes insatisfatória. Este problema agrava-se em áreas nas quais o recurso é limitado (OECD, 2018; TORTAJADA *et al.*, 2019).

A disponibilidade hídrica irregular ao longo do território brasileiro, associada à escassez deste recurso natural em algumas regiões geram diferentes conflitos pelo uso da água, sendo fundamental a utilização de práticas de gestão de recursos hídricos, como por exemplo a gestão de demanda de água (GDA), como ferramenta para controle e uso sustentável de água, principalmente com o objetivo de garantir os usos prioritários (consumo humano e dessedentação animal) previstos na Lei nº 9.433/1997.

A GDA possui como objetivos o uso eficiente e a economia de água, a partir da inclusão de avaliações periódicas e alimentação do sistema como ferramenta de planejamento. Além disso, está inserida em programas de uso racional e conservação de água visando a redução de consumo com garantia das atividades desenvolvidas (SILVA, 2004; CARLI *et al.*, 2013).

Xiao *et al.* (2018) consideram a GDA sob diferentes perspectivas, seja da engenharia ou do direito, e em diversas escalas: local, regional ou nacional. A utilização de tecnologias nesse ramo já está bem desenvolvida, porém as aplicações precisam ser estimuladas por parte dos governantes, de forma a incentivar a adoção de práticas que minimizem o desperdício de água nos diferentes usuários de água, principalmente em países em desenvolvimento, nos quais ainda há carência de tecnologias e pequenos avanços nesta área trazem retornos positivos consideráveis.

As estratégias de GDA que monitorem o consumo de água e busquem reduzi-lo, implantem práticas de reutilização de água para fins que não exijam água potável, entre outras ações que possam minimizar o desperdício de água são imprescindíveis para garantir o uso sustentável de água.

Nas últimas décadas, a gestão de demanda surgiu com uma abordagem chave para complementar as operações tradicionais de abastecimento de água (EGGIMANN *et al.*, 2017). Diferentes estratégias de gestão da demanda de água têm sido propostas na literatura para promover a conservação da água e demandas de água mais eficientes (MAGGIONI, 2015; STAVENHAGEN *et al.*, 2018), como a inclusão de intervenções tecnológicas, financeiras, legislativas, de manutenção e educacionais. A ascensão da gestão da água pelo lado da demanda tem motivado o desenvolvimento de tecnologias cada vez mais sofisticadas e modelos matemáticos para monitorar, caracterizar e prever as demandas de água em diferentes escalas espaciais e temporais (DI MAURO *et al.*, 2020).

Em ambientes urbanos, gerir recursos hídricos já escassos de forma eficiente, efetiva e sustentável é um desafio para o serviço público. Stavenhagen *et al.* (2018) afirmam que as cidades são vulneráveis à escassez de água devido à incompatibilidade espacial existente entre a disposição de recursos hídricos e a concentração pontual de população, sendo assim a gestão é parte intrínseca do processo de operação destes sistemas. Entretanto, para gestão eficiente de água em redes de abastecimento, é imprescindível o conhecimento dos componentes e setores dos sistemas de abastecimento de água em toda a sua extensão.

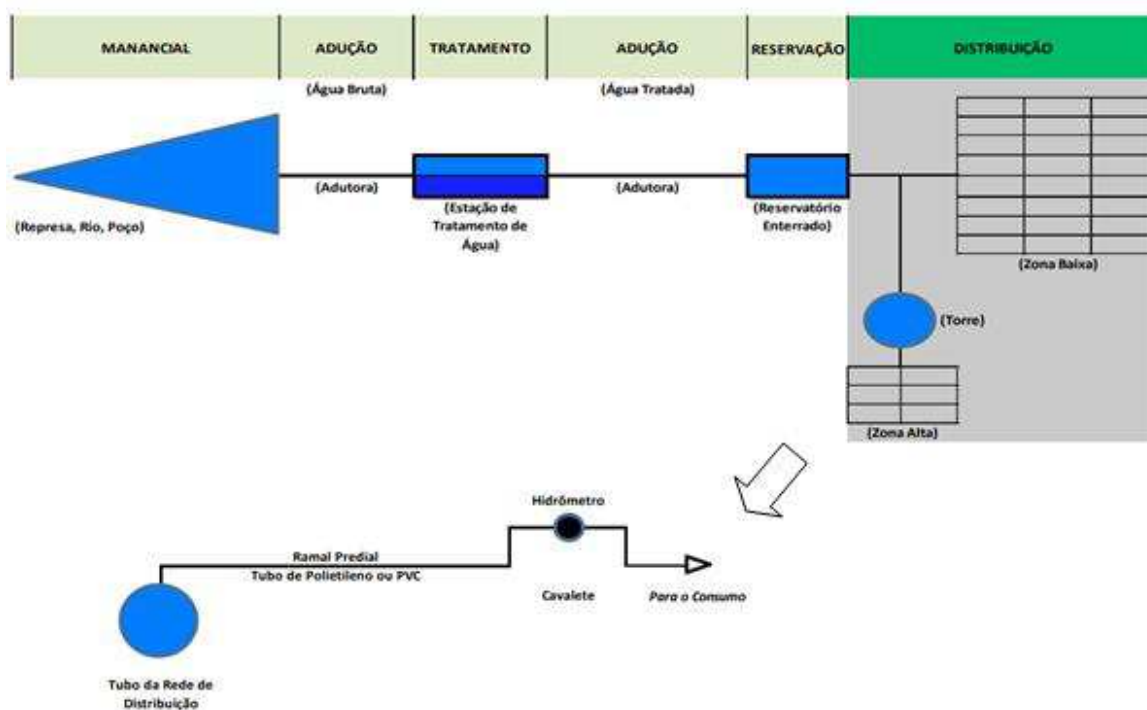
2.3 SISTEMAS URBANOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

2.3.1 Composição

O serviço de abastecimento de água potável é definido como o conjunto de infraestruturas, instalações e atividades necessárias ao abastecimento público da população, desde a captação até as ligações prediais e respectivos instrumentos de medição (BRASIL, 2007).

De acordo com Heller e Pádua (2006), um sistema de abastecimento de água é formado por captação, adução de água bruta, estação de tratamento, adução de água tratada, estações elevatórias, reservação, rede de distribuição e ramais prediais externos. A Figura 1 esquematiza as principais partes constituintes de um SAA.

Figura 1 - Partes constituintes de um SAA



Fonte: Adaptado de Tardelli Filho (2016).

O conjunto de todas as partes constituintes do SAA deve ser bem dimensionado para permitir o adequado funcionamento das instalações dentro do tempo de projeto definido. Além disso, a operação e a manutenção também são

processos fundamentais para que os sistemas correspondam ao esperado na prestação dos serviços de água.

No Brasil, ainda é um procedimento comum entre os gestores investir, prioritariamente, na ampliação da infraestrutura dos sistemas de abastecimento com a finalidade de alcançar a universalização do serviço e, em segundo plano, nas atividades de operação e manutenção, principalmente quando a disponibilidade dos recursos é limitada. Além da falta de investimento, a dinâmica de crescimento dos centros urbanos é outro aspecto que prejudica a operação, tendo em vista a dificuldade por parte do gestor de acompanhar as novas demandas do sistema. O interesse em melhorar o gerenciamento da água e alcançar um uso mais eficiente nos diversos setores aumentou nas áreas geográficas onde o estresse hídrico é mais frequente (LUO; YOUNG; REIG, 2015).

Dessa forma, tem-se uma alta cobertura de rede, porém um desempenho ineficiente no que diz respeito à operação e manutenção do sistema, favorecendo assim, os altos índices de perdas.

A detecção e localização de vazamentos constituem uma prioridade no gerenciamento de sistemas de água potável, pois interferem diretamente nos custos energéticos do sistema (FARAH; SHAHROUR, 2017). Todavia, Tardelli Filho (2016) afirma que operar um sistema de abastecimento de água é um dos trabalhos mais complexos sendo necessários cadastros técnicos e comerciais atualizados e confiáveis, além da medição de vazões em pontos estratégicos.

Existem diferentes opções para a gestão e redução de perdas de água. Essas variam em termos de eficiência, complexidade, custo e impacto. De acordo com Zyoud *et al.* (2016), existem as opções de rotina, como controle passivo de vazamentos e substituição de linhas de serviço e medidores de água com defeito; as flexíveis como campanhas de conscientização e educação do público e outras mais sofisticadas, que empregam técnicas avançadas para monitoramento on-line, sensores com medições multiparâmetros e controle de pressão. A seleção da opção mais conveniente é um processo composto. Deve-se levar em consideração uma ampla gama de fatores, incluindo questões técnicas, ambientais, econômicas e socioeconômicas (XIN *et al.*, 2015).

A maior incidência de perdas ocorre nas redes de distribuição de água, seja por falta de manutenção adequada da infraestrutura ou pela proximidade do usuário final, que pode se beneficiar do abastecimento por meios ilícitos - ligações clandestinas

(GÜNGÖR; YARAR; FIRAT, 2017). Portanto, a eficiência da operação de um SAA também está diretamente ligada a um bom funcionamento da rede de distribuição.

2.3.2 Redes de distribuição de água e setorização

Bezerra e Cheung (2013) conceituam rede de distribuição como "a unidade do SAA constituída de um conjunto de conexões, peças especiais e condutos assentados nas vias públicas ou nos passeios, aos quais se conectam os ramais domiciliares".

Para Heller e Pádua (2010) essa unidade do SAA é denominada rede devido a forma que os condutos são instalados, com inúmeras interligações e derivações que geram complexos traçados para distribuir a água tratada aos diversos logradouros atendidos.

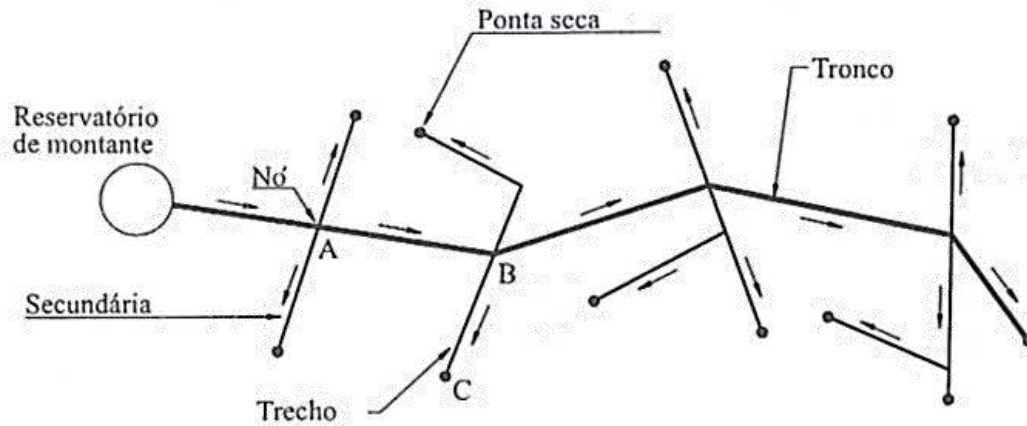
Portanto, a função da rede de distribuição é conduzir a água aos pontos de consumo, seja para o uso doméstico, industrial e/ou público, sem interrupções, em qualidade, quantidade e pressão recomendadas (BEZERRA; CHEUNG, 2013).

Segundo Tsutiya (2006) uma rede de distribuição é composta normalmente por dois tipos de condutos: os principais e os secundários. Os principais, ou tronco, são as tubulações de maior diâmetro que possuem a função de abastecer os condutos secundários. Por sua vez os condutos secundários, são tubulações de menor diâmetro que possuem o objetivo de abastecer diretamente os consumidores atendidos pelo SAA.

De acordo com a disposição dos condutos principais e o sentido de escoamento nas tubulações secundárias, as redes de distribuição podem ser classificadas em ramificadas, malhadas ou mistas (TSUTIYA, 2006).

As redes ramificadas (Figura 2) apresentam um único sentido para o escoamento, possibilitando uma instalação e uma operação mais simples, e gerando redução de custos quando comparada a uma rede malhada de porte similar.

Figura 2 - Esquema de uma rede ramificada

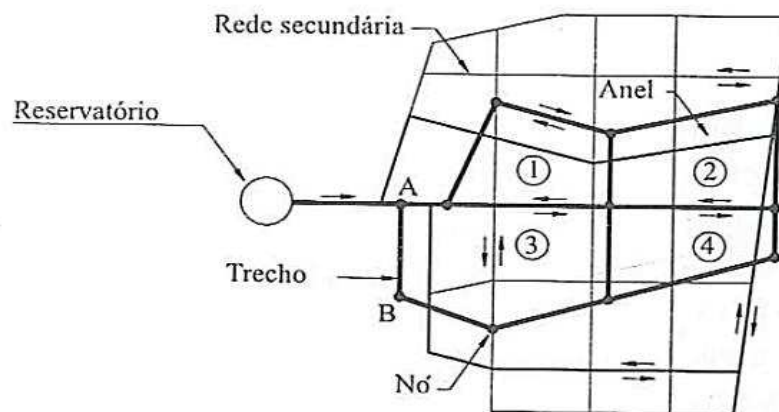


Fonte: Porto (2006).

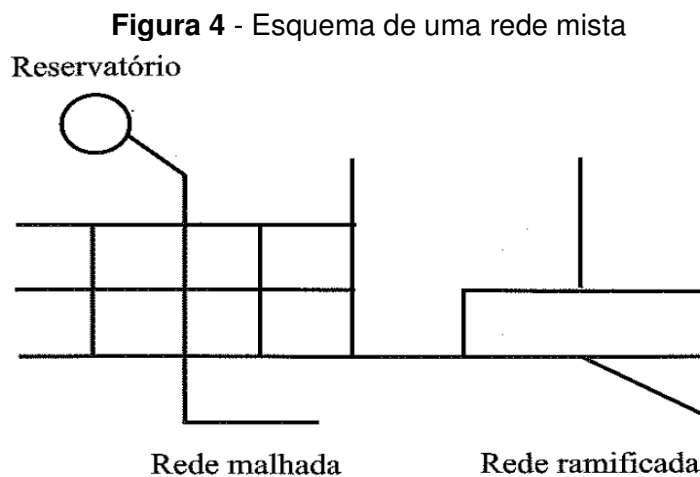
Entretanto, as redes ramificadas apresentam alguns inconvenientes. Um deles ocorre quando é necessária a realização de alguma manutenção, uma vez que ao interromper o fluxo de água em um trecho, todos os trechos a jusante ficarão sem água. Outro complicador dessa disposição são as pontas secas, que resultam em sedimentação e deterioração da qualidade da água. Desta forma, o emprego de redes ramificadas não é indicado para locais que não possam sofrer paralizações no abastecimento, como os centros urbanos de grande e médio porte (BEZERRA; CHEUNG, 2013).

As redes malhadas (Figura 3) possuem as tubulações tronco em formatos de anéis ou malhas nas quais o sentido da vazão pode ser revertido de acordo com as necessidades (PORTO, 2006). Por sua vez, a rede mista (Figura 4) é aquela que consiste na associação das redes malhadas com as ramificadas (TSUTIYA, 2006).

Figura 3 - Esquema de uma rede malhada com quatro anéis



Fonte: Porto (2006).



Fonte: Tsutiya (2006).

Para o funcionamento ideal, a rede deve ser mantida dentro de uma faixa de pressão. A pressão mínima é capaz de vencer os desníveis topográficos, as perdas de carga nas tubulações internas dos prédios e no ramal predial, garantindo o abastecimento do reservatório predial padrão, já a pressão máxima não pode ser ultrapassada, vista que seu valor garante a integridade dos tubos, conexões e válvulas, evitando também a perda de água devido a danos nas tubulações (HELLER; PÁDUA, 2010).

Para facilitar a operação dos SAA, as redes de distribuição de água normalmente são setorizadas, ou seja, divididas de acordo com determinados critérios que qualificam uma área como setor.

Motta (2010) define o setor de abastecimento como unidade básica operacional de um sistema distribuidor de água que corresponde às linhas primárias e secundárias de uma determinada área. A definição de um setor de abastecimento deve considerar as condições topográficas e o perfil dos consumidores na área a ser atendida. Fixados tais parâmetros, será possível alocar os reservatórios, dimensionar as linhas de distribuição e definir todos os acessórios necessários ao abastecimento, de forma a garantir pressões e velocidades dentro do estabelecido pelas normas da ABNT de dimensionamento de redes de abastecimento.

A setorização em redes é fundamental na etapa de planejamento das áreas de ampliação do sistema, sendo possível, a partir dos limites máximo e mínimo de pressão estática (40 mca) e dinâmica (10 mca) na rede, delimitar cada setor e identificar, com maior eficiência, os pontos da rede sujeitos a maior incidência de vazamentos (NBR nº 12218, 2017).

Segundo Gomes (2009) um maior controle de pressões e vazões em redes permite a identificação mais rápida de falhas e, conseqüentemente, economia de água e energia.

2.3.3 Medição de vazão e controle de pressão em redes

A medição de fluxo de água em sistemas de abastecimento é imprescindível para uma gestão eficiente uma vez que mensurar consumo de água é, de forma indireta, medir lucro ou perda de faturamento. Além disso, devido a disponibilidade limitada, a água tem se tornado um fluido caro, sendo necessário minimizar as perdas, sejam elas reais ou de faturamento.

Em redes de abastecimento de água duas medições são fundamentais para o sistema: a macromedição e a micromedição.

A micromedição ou hidrometração é aquela realizada no ponto de entrada de abastecimento de um usuário. Normalmente, é feita por meio de hidrômetros instalados nos ramais de entrada das edificações. Já a macromedição compreende a correta avaliação dos volumes produzidos e dos volumes entregues aos setores de abastecimento ou subsetores, quando se trata de sistemas de maior porte. Dessa forma, com uma macro e micromedição eficientes, é possível avaliar o consumo efetivo pela população e investigar a possibilidade de furtos de água, submedições ou vazamentos no sistema (FUNASA, 2006).

A medição de fluxo pode ser realizada de diferentes formas, sendo a volumétrica comum na indústria de petróleo e derivados, normalmente por meio de pistões recíprocos ou rotativos, diafragmas, discos nutantes, palhetas e multirotores. Já para indústrias de água e empresas de saneamento, usam-se os medidores de vazão instantânea através de diferença de pressão ou por cálculo de velocidade, tais como: resistência linear, tubo Pitot, placa de orifício, bocais, tubo Venturi, multifuros, turbina, ultrassônico, dentre outros (TAIRA; PRADO, 2003).

Os medidores de água em SAA são padronizados a partir de suas características técnicas, metrológicas e dos métodos de ensaios estabelecidos pela ABNT através das normas NBR NM 212/1999 para vazões até 15m³/h e NBR 12218/2017 para vazões entre 15 m³/hora a 1500 m³/h.

A medição de água pode ser realizada por diversos aparatos desenvolvidos e disponíveis no mercado, sendo os principais tipos: volumétricos, velocimétricos, turbina de hélice tipo Woltmann e medidores compostos.

De acordo com a faixa de vazão a ser medida e o diâmetro das tubulações, é possível escolher o medidor mais adequado para o sistema em estudo.

O Quadro 1 apresenta as principais vantagens e limitações para cada tipo de medidor citado.

Quadro 1 - Tipos de medidores de vazão

Tipos	Vantagens	Desvantagens
Volumétrico	Maior exatidão, vida útil longa, funcionamento em qualquer posição.	Maior sensibilidade a sólidos em suspensão na água, sensibilidade ao golpe de aríete, maior preço, perda de carga elevada e ruidoso em altas vazões.
Velocimétrico	Menor preço, menor sensibilidade ao golpe de aríete e a sólidos em suspensão, baixa perda de carga.	Menor vida útil, necessidade de posicionamento perfeito, risco de sub medição ou sobre medição.
Turbina de Hélice – WOLTMANN	Apresentam baixa perda de carga, boa precisão e rangeabilidade razoável.	Sensíveis à presença de sólidos, devem operar sempre cheios, necessitam instalação de filtros à montante e de boas condições de instalação, trechos retos antes e depois do medidor.
Placas de orifício	Possuem baixo custo, fácil instalação, alta resistência e baixa manutenção.	Apresentam altas perdas de carga, baixa rangeabilidade. São sensíveis ao perfil de escoamento e dependem da qualidade na medição de pressão.

Fonte: Adaptado de Alves (2020) e Nielsen *et al.* (2003).

De acordo com Nielsen *et al.* (2003) os medidores velocimétricos dividem-se em unijatos e multijatos. Os unijatos recebem o fluxo de um conduto injetor que incide tangencialmente nas palhetas de uma turbina sob a forma de um único jato. Estes medidores devem ser instalados horizontalmente, necessitando de boas condições de instalação, trechos retos das tubulações a montante e a jusante do ponto de medição de fluxo de água para serem utilizados na melhor condição.

Os medidores de fluxo do tipo multijatos possuem a divisão da corrente de água por meio de uma caixa injetora de distribuição de fluxo que divide os jatos e os transportam para incidir axialmente sob as hélices da turbina. Este modelo possui menor sensibilidade quando comparado aos unijatos para passagem de impurezas e sólidos em suspensão (NIELSEN *et al.*, 2003).

As placas de orifício costumam ser os medidores mais utilizados em aplicações laboratoriais e escalas de pequeno porte, uma vez que possuem baixo custo, fácil instalação, alta resistência e baixa manutenção. Em contrapartida, estes precisam ser aplicados em sistemas no qual a energia seja suficiente e que tenha folga para atender os pontos mais desfavoráveis, já que as perdas de carga localizadas geram variação de pressão significativa nos orifícios usados na medição. Além disso, são sensíveis ao perfil de escoamento e dependem da qualidade na medição de pressão, o que configura fundamental a calibração prévia dos sensores de pressão para garantir leituras adequadas. Seu princípio de funcionamento consiste em obter vazão a partir da diferença de pressão gerada por uma obstrução do fluxo pela placa com orifício, sendo também conhecido como medidores deprimogênios (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011).

Além dos dispositivos citados, há também os medidores compostos, que associam dois medidores diferentes a fim de obter uma medição mais exata, útil também na calibração de novos medidores.

A escolha do medidor de vazão para um sistema depende de diversos fatores como, as exigências e necessidades de medição, condições externas e internas dos condutos, calibração, acessórios e instalação, aspectos econômicos e limitação orçamentária.

Além da medição de vazão, o controle de pressão possui também importante papel na operação de SAA, uma vez que propicia um bom desempenho técnico-operacional-econômico, principalmente com relação a redução na frequência de rupturas e perdas de água na rede (VOTRE, 2014; COVAS e RAMOS, 2010).

O controle de pressões gera benefícios que vão além da redução da pressão a níveis aceitáveis, diminui o volume perdido com a minimização dos rompimentos na rede e amplia a oferta de água para áreas com intermitência, trazendo mais qualidade na prestação do serviço de abastecimento das empresas concessionárias (SANTOS; MONTENEGRO, 2014).

Um bom medidor de fluxo aliado a um medidor de pressão eficiente permite melhorar o monitoramento na rede de distribuição, além de identificar consumos anômalos e perdas associadas a vazamentos nas tubulações ou furtos de água.

2.4 PERDAS DE ÁGUA EM REDES DE ABASTECIMENTO

2.4.1 Classificação e causas das perdas

Kusterko *et al.* (2018) conceituam perdas como a diferença do volume de água produzido por aquele micromedido nos pontos de consumo, que podem ocorrer em qualquer etapa de um sistema de abastecimento de água, desde a captação até o ponto de consumo.

As perdas de água estão entre os fatores que mais contribuem para os baixos desempenhos nos sistemas de abastecimento (TSUTIYA, 2006). No Brasil, segundo o SNIS (2021), o índice de perdas médio na distribuição de água é de 40,1%, valor ainda muito alto, quando comparado aos obtidos em outros sistemas de abastecimento mundiais, como por exemplo a Dinamarca, Países Baixos, Austrália, Nova Zelândia e Sudão, como valores inferiores a 10% (SNIS, 2021; LIEMBERGER; WYATT, 2019).

Redes antigas, falta de manutenção adequada, investimento limitados e quadro pessoal reduzido são alguns dos fatores que contribuem para taxas de perdas ainda tão elevadas. Quando avaliado regionalmente, o problema no Brasil torna-se mais crítico.

A região Nordeste apesar de apresentar grandes problemas com disponibilidade hídrica, possui o segundo maior índice de perdas regional (46,3%), ficando atrás apenas da região Norte (51,2%), na qual os altos índices pluviométricos não comprometem significativamente o abastecimento de água local. Já no Centro-Oeste os índices de perdas são os menores registrados entre as regiões brasileiras (34,2%) (SNIS, 2021).

Estes dados preocupam os pesquisadores e são um incentivo para o surgimento de novas pesquisas no setor, com o objetivo de gerenciar e reduzir as perdas de água, visando garantir o abastecimento aos diferentes usuários que necessitam do recurso para desenvolvimento de suas atividades.

A Portaria nº 490/2021 (Ministério do Desenvolvimento Regional) estabelece os procedimentos gerais para o cumprimento do disposto no inciso IV da Lei nº 11.445/2007, alterada pelo Decreto nº 10.588/2020, que trata sobre as metas para redução de perdas em sistemas de abastecimento de água.

De acordo com a Portaria nº 490/2021, os municípios devem adotar práticas de redução dos índices de perdas na distribuição (IN049) e perdas por ligação (IN051), ambos calculados pelo SNIS.

A redução é progressiva e espera-se que até 2034 seja de até 65% do valor dos índices médios nacionais, limitando-se a 25% para as perdas na distribuição e 216 litros/ligação/dia para as perdas médias por ligação. Caso estas metas não sejam atingidas ano a ano, os municípios devem incluir propostas para redução nos índices locais, apresentados nos incisos I a IV do art 4º:

- “I - setorização e zonas de medição e controle;
- II - macromedição e pitometria no sistema distribuidor;
- III - micromedição; e
- IV - implantação, ampliação ou melhoria do controle operacional.”

Portanto, a Portaria nº 490/2021 enfatiza a necessidade de adoção de técnicas para reduzir perdas, como a medição de água, ainda deficiente no país.

O volume de água disponibilizado pelas concessionárias pode ser decorrente tanto dos consumos autorizados, faturados ou não, quanto dos volumes não autorizados ou perdidos, caracterizados como perdas aparentes e físicas (TARDELLI FILHO, 2016; CHEUNG; REIS, 2007).

O Quadro 2 descreve a classificação quanto aos volumes autorizados e às perdas em SAA, tipificando o que são consideradas águas faturadas ou não e o que são definidos como perdas para entendimento aos diferentes tipos e em quais partes do sistema estas podem ocorrer.

Quadro 2 - Classificação dos volumes de água em SAA

VOLUME PRODUZIDO OU DISPONIBILIZADO	CONSUMOS AUTORIZADOS	Consumos autorizados faturados	Consumos medidor faturados (inclui água exportada)	ÁGUAS FATURADAS	
			Consumo não medidos faturados (estimados)		
		Consumos autorizados não faturados	Consumidos medidos não faturado (usos próprios, caminhões-pipa)		ÁGUAS NÃO FATURADAS
			Consumos não medidos não faturado (combate a incêndios, suprimento de água em áreas irregulares)		
	Perdas aparentes (comerciais)	Consumos não autorizado (fraudes)			
		Falhas do sistema comercial			
		Submedição de hidrômetros			
	Perdas reais (físicas)	Vazamentos nas adutoras e redes de distribuição			
		Vazamentos nos ramais prediais			
		Vazamentos e extravasamentos nos reservatórios setoriais			

Fonte: Adaptado de IWA (2000).

De acordo com o Quadro 2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, as perdas são divididas em dois grupos. O primeiro refere-se às perdas aparentes ou comerciais, resultantes de consumos não autorizados (fraudes) na rede, da submedição de hidrômetros ou de falhas no próprio sistema comercial que cobrem valores inferiores aos tabelados. Já o segundo está associado às perdas físicas resultantes de vazamentos nas adutoras, nas redes de distribuição, nos ramais prediais ou decorrentes de extravasamentos de reservatórios.

No contexto da economia se diferem, pois as perdas reais incidem sobre os custos de produção e distribuição da água, enquanto as aparentes atingem os custos de faturamento da água.

É pertinente lembrar que, apesar de alguns consumos autorizados não serem medidos, estes não são definidos como perdas, mas como água não faturada. É o que acontece, muitas vezes, em áreas irregulares ou municípios de pequeno porte, nos quais as concessionárias fornecem água para atender à população, porém não tem controle efetivo sobre o volume disponibilizado e consumido, sendo cobrado um valor simbólico aos consumidores. Ações desse tipo podem comprometer o faturamento

das empresas de saneamento e tornar pouco viável, financeiramente, a operação de sistemas de menores dimensões.

As perdas de água ocorrem desde a captação até a chegada ao consumidor final e são, em grande parte, causadas pela operação e manutenção deficientes das tubulações e pela inadequada gestão comercial dos prestadores de serviço público de abastecimento de água (ANDRADE SOBRINHO *et al.*, 2016).

A *International Water Association - IWA* destaca que existe um valor mínimo de perda que não pode ser evitado, seja por aspectos técnicos - no caso de vazamentos indetectáveis ou extravasamentos não previstos - ou econômicos, no qual o custo para redução das perdas é superior ao valor dos volumes recuperados. Lambert (2002) considera aceitável perdas de até 10% de água em sistemas de abastecimento.

As perdas na distribuição são as mais impactantes do ponto de vista social, pois envolvem a interrupção do abastecimento e a redução da água disponível durante a realização dos reparos (FONTANA, 2012).

À medida que os sistemas de distribuição envelhecem, novos vazamentos podem ocorrer e devem ser detectados e reparados. Assim, o gerenciamento de perdas deve ser um trabalho contínuo durante toda a vida útil dos sistemas.

2.4.2 Avaliação das perdas

Medidas técnicas para combater perdas de água incluem a setorização do sistema de abastecimento em zonas de pressão, o monitoramento para detecção, localização e reparação de vazamentos ou perdas na rede, e o controle de pressões no sistema afim de evitar picos, e conseqüentemente, danos às tubulações.

Diversos modelos de gestão de perdas estudados nacional e internacionalmente permitem o controle de pressões e vazões na rede em tempo real e utilizam a setorização (DINIZ, 2012).

Porém, um dos principais desafios para implantação desses modelos de gestão no Brasil é o custo dos equipamentos medidores e dos sistemas de automação disponíveis no mercado, uma vez que na maioria das concessionárias do país trabalham com recursos insuficientes ou limitados.

Andrade Sobrinho *et al.* (2016) propôs um modelo de gestão que atuasse juntamente com o setor operacional para o combate às perdas em SAA utilizando

metodologia Multicritério de Apoio à Decisão - Construtivista (MCDA-C), a partir da simulação de cenários com valores já existentes em bancos de dados.

A dificuldade maior para efetivação desse tipo de metodologia é a inexistência de sistemas que tenham automação integrada à medição de vazão e mecanismos que armazenem dados para possibilitar que a análise seja realizada.

Pust *et al.* (2010) afirmam que ainda há muito a ser feito utilizando métodos diferentes que permitam uma gestão efetiva de perdas a partir do controle em tempo real de vazão em redes de abastecimento.

2.5 MODELOS PARA REDUÇÃO E CONTROLE DAS PERDAS DE ÁGUA

Os principais modelos usados no controle e gestão de perdas são baseados em conceitos estabelecidos pela IWA sobre balanço hídrico, na análise de vazões mínimas noturnas e na setorização de redes de abastecimento, ou na combinação destas (SILVA JÚNIOR, 2017; EPAL, 2017). Estes modelos buscam identificar comportamentos anômalos nas redes de distribuição, que possam ser indicativos de perdas, para análise e posterior tomada de decisão quanto às ações de manutenção na rede.

2.5.1 Modelo do Balanço hídrico – IWA

O método do balanço hídrico proposto pela IWA foi criado com o objetivo de avaliar perdas em sistemas de abastecimento e, assim, permitir a comparação entre diferentes sistemas em nível mundial. A metodologia de cálculo estabelecida ajuda a subdividir o volume de água que entra no sistema em componentes que podem ser individualmente medidos ou estimados para completar o quadro do balanço hídrico, conforme já ilustrado na seção 2.4.1, Quadro 2.

Esse método, apesar de simples, é amplamente utilizado, uma vez que traz resultados significativos, estimando o volume de água perdido em determinado sistema a partir da análise dos volumes de entrada e saída. Também conhecido na literatura como "*top-down*", nesse método são criadas hipóteses para determinar as perdas aparentes e, secundariamente, as perdas reais em redes de abastecimento a partir do conhecimento dos volumes disponibilizados no sistema e os consumos

autorizados, sejam eles faturados ou não (ABES, 2014; EUROPEAN UNION, 2015; EPAL, 2017, LEE *et al.*, 2011).

2.5.2 Modelo de vazões mínimas noturnas

O modelo de vazões mínimas noturnas ou '*bottom-up*' permite identificar perdas a partir de variações nos consumos de água de um determinado SAA ao longo de um dia (SILVA JÚNIOR, 2017; AESBE, 2015; EUROPEAN UNION, 2015). A intenção é perceber, a partir da análise da série histórica de dados, a curva característica de consumo, com seus picos e sua vazão mínima que acontece nos horários de menor ou nenhum consumo efetivo.

De acordo com a AESBE (2015) este método gera bons resultados quando o sistema em análise possui medição contínua (macro e micromedição) e rede setorizada, na qual é possível calcular as perdas reais a partir das vazões mínimas noturnas.

Esse método apresenta desvantagens, tais como ser viável para áreas pequenas e delimitadas da rede, não sendo possível generalizar os valores para o sistema por completo e envolver custos com equipe técnica e instrumentos específicos para determinação das vazões mínimas (TSUTIYA, 2006).

As informações obtidas com o método do balanço hídrico, juntamente com as vazões mínimas noturnas são fundamentais para a mensuração de perdas em redes de abastecimento.

2.5.3 Modelo de setorização de redes

A divisão da rede em setores e subsetores permite uma visualização mais clara das áreas de abastecimento e suas peculiaridades, sendo uma ferramenta importante na gestão de perdas em redes de abastecimento.

Com a setorização é possível estabelecer distritos de medição e controle (DMC's), que são áreas menores para realização do monitoramento de pressões e vazões, na busca pela redução de perdas de água que ocorrem nos SAA (SOUZA JÚNIOR, 2014).

Os principais benefícios da técnica da setorização na gestão de perdas são a rapidez na detecção de rompimento e obstruções nas redes e a economia de recursos

financeiros com a minimização de perdas hídricas nas zonas de pressão (FONSECA, 2011; LAMBERT, 2002).

A setorização é uma técnica que tem sido utilizada por várias empresas de saneamento e em estudos técnicos, tanto para redução de perdas de água quanto para minimização do consumo energético, uma vez que a separação correta dos setores permite estabelecer as reais necessidades de bombeamento na rede para atingir pressões mínimas admitidas por norma.

Andrade (2016) utilizou a técnica para avaliar o balanço hidroenergético em um setor do município de Cambuí-MG, com o objetivo de otimizar o sistema e minimizar o consumo energético. Os resultados obtidos na pesquisa permitiram uma avaliação da realidade do sistema, no qual o setor estudado apresentou 28,42% de perdas totais e um consumo de energia de 0,6481kWh/m³ no período avaliado.

Gouveia (2012) desenvolveu um modelo de dimensionamento otimizado de redes usando setorização para simulação em três áreas com alta, média e baixa pressão, com a finalidade de minimizar o consumo energético, o que possibilitou um dimensionamento adequado com a utilização de bombas secundárias na operação do sistema.

Ramos (2011) também utilizou a setorização para dividir o SAA da cidade de São Vicente-SP em nove DMC's de pressões e vazões dessas áreas, sendo determinante na redução de perdas, com o aumento da eficiência na identificação de vazamentos.

Li *et al.* (2011) utilizaram Sistemas de Informações Geográficas na setorização da rede de abastecimento da cidade de Pequim, no Japão, para detectar e controlar vazamentos de água na rede. O sistema detectou 102 vazamentos não visíveis na área estudada, o correspondente a uma economia de 2.385.000 m³ de água. Esses resultados corroboram para a viabilidade e eficiência destas técnicas, possibilitando uma maior aplicabilidade em redes de distribuição de água.

Motta (2010) preconizou a importância da setorização na redução e controle de perdas reais de água nas cidades de São Paulo e Araraquara, ambas localizadas no estado de São Paulo, com a implantação de subsectores de medição para adequar o sistema com o objetivo de reduzir perdas.

A setorização adequada de redes de abastecimento quando aliada às tecnologias que permitem o controle de pressão e vazão em tempo real nos SAA

apresenta-se como ferramenta eficiente na gestão de perdas em redes de distribuição de água.

2.6 SISTEMA DE AUTOMAÇÃO EM REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

A automação é uma tecnologia relativamente recente que possui uma diversidade de aplicações em todos os ramos da Engenharia. No setor do saneamento básico, as aplicações ainda são discretas, porém o uso deste recurso facilita a coleta de dados em grande escala dispensando, muitas vezes, a presença do operário no local e minimizando a ocorrência de erros nas medições (ROMERO *et al.* (2020); LU; XU; WANG (2020); JAN *et al.* (2022).

Sirkiä *et al.* (2017) afirmam que o uso de medidores inteligentes através da automação nos sistemas de água permite ganhos consideráveis para as concessionárias dos serviços e seus usuários, permitindo a identificação dos padrões de consumo e um maior monitoramento de água no sistema.

Nos últimos anos, houve uma ênfase maior no uso deste mecanismo para melhorar a capacidade dos sistemas existentes em lidar com o aumento da carga causada pelo aumento da população e pela expansão urbana.

A automação em sistemas de distribuição de água tem sido uma importante ferramenta no combate às perdas para as concessionárias responsáveis pela prestação dos serviços de água. Essas empresas buscam soluções que permitam a redução de custos e o aumento da eficiência (ASSIS, 2012), uma vez que, como já comentado anteriormente, o índice de perdas nesse tipo de indústria é bastante elevado.

Lima *et al.* (2012) afirmam que a automação propicia reduzir falhas, melhorar o sistema de controle a partir do banco de informações disponibilizadas por equipamentos digitais, reduzir os custos com mão de obra operacional, entre outros.

No Brasil, a utilização de automação em redes ainda é limitada, pois os sistemas com medidores automáticos possuem custo elevado, sendo difícil para as concessionárias atualizarem os equipamentos de controle e operação, principalmente nos municípios de menor porte, nos quais as receitas, muitas vezes, são inferiores às despesas totais.

O investimento em automação propicia às empresas concessionárias uma maior eficiência nos SAA, tanto de energia elétrica quanto de água, a partir da

identificação mais rápida de vazamentos na rede, a centralização de informações em um único banco de dados para gerar curvas comportamentais de consumo nos sistemas, além de facilitar a operação a partir do controle efetivo de pressão, níveis de reservatórios e vazão (EUROPEAN UNION, 2015).

A automação já é amplamente utilizada para controle predial, no qual o usuário consegue monitorar seu consumo de água em tempo real, identificando qualquer divergência no consumo em todas as horas do dia e permitindo uma gestão mais eficiente nestes ambientes.

Com os avanços tecnológicos proporcionados pela automação, as empresas concessionárias de saneamento têm utilizado esta ferramenta na busca pela excelência no atendimento dos serviços e pela redução de custos tanto para os sistemas de abastecimento de água quanto de coleta e tratamento de esgotos. Chimelli (2016) afirma que, apesar do alto custo dos aparelhamentos, estas empresas têm investido na aquisição, pois os retornos econômicos-operacionais mostram satisfatória redução no consumo de energia e produtos químicos, redução de perdas físicas de água, diminuição dos custos com pessoal e aumento na eficiência dos processos.

Considerando que a falta de recursos ainda é um dos grandes problemas das companhias de saneamento brasileiras, majoritariamente estatais, construir um protótipo de baixo custo que permita realizar o monitoramento automatizado de pressão e vazão em redes de abastecimento de água é, no mínimo, promissor pois todas as vantagens da automação seriam associadas à redução dos investimentos iniciais.

2.6.1 Medição inteligente de água

O gerenciamento eficaz dos recursos hídricos requer medições e monitoramento precisos, adequados e confiáveis das práticas de consumo de água. Portanto, na atualidade, uma tecnologia em desenvolvimento conhecida como medição inteligente de água está sendo amplamente utilizada em muitos países.

Esta ferramenta permite integração e comunicação remota de informações por meio da utilização de tecnologias facilitadoras, como: sensores, medidores e controles automatizados que monitoram de forma contínua sistemas de distribuição de água. A chegada dessa tecnologia inovadora amplia a capacidade de monitoramento das

redes, inclusive de diferentes parâmetros. Com relação à distribuição de água, é possível aferir pressão, qualidade, vazão, temperatura e possíveis perdas por vazamentos (DEPURU *et al.*, 2011; RHODES *et al.*, 2014; NGUYEN *et al.*, 2018; STEWART *et al.*, 2018).

A medição inteligente tem sido utilizada nos diferentes setores, como água, energia e gás. Porém, não existe uma única definição ou consenso sobre o que significa para um medidor ou sistema de medição ser classificado como “inteligente”. O princípio de funcionamento do medidor é simples, no qual este realiza a medição, armazena e transmite os dados para um sistema em intervalos predefinidos, sendo importante tanto para a detecção de vazamentos quanto para o controle do consumo em economias de água (BRITTON *et al.*, 2013; COMINOLA *et al.*, 2015; GURUNG *et al.*, 2016; KULKARNI; FARNHAM, 2016; BRAGALLI *et al.*, 2019).

Nessa linha, várias pesquisas já foram desenvolvidas em diferentes países. Na Espanha, Rizzoli *et al.* (2014) desenvolveram modelos comportamentais de consumo para promover economia de água, buscando a conscientização dos usuários. Como resultados, houve economias substanciais de água no grupo de usuários que adotaram uma plataforma digital do monitoramento contínuo do consumo, em comparação com aqueles que não a adotaram.

Já na região do Texas nos Estados Unidos, Rhodes *et al.* (2014) criaram controladores integrados para implantação de redes inteligentes em grande escala, contemplando sistemas de medição de água, gás e eletricidade para controle de consumo em residências, sendo uma ferramenta que contribui no uso consciente dos recursos disponibilizados para consumo.

Ainda nesta temática, Gurung *et al.* (2016) implantaram medidores inteligentes na região de Queensland, Austrália, para facilitar o aprimoramento do planejamento de infraestrutura dos sistemas de distribuição de água, que permitiu informatizar o planejamento de redes de água de modo eficiente, a partir do uso de modelagem e dados empíricos do consumo de água na região, gerando economias significativas.

Na Austrália, Koech *et al.* (2018) realizaram uma pesquisa sobre a evolução da medição e conservação de água no país nos últimos 30 anos e analisaram as mudanças proporcionadas com a medição inteligente na gestão de águas urbanas. O avanço no uso da tecnologia em gestão de sistemas permite que as concessionárias de água obtenham leituras dos hidrômetros remotamente e com maior frequência,

podendo ser utilizado para diversos fins, incluindo gerenciamento de demanda, detecção de vazamentos e conservação de água.

A medição de água tem sido tradicionalmente vista como um meio de faturamento da água consumida para as concessionárias do serviço. Porém, com a inserção no mercado de medidores inteligentes de água, a medição passa a ser uma ferramenta da gestão integrada da água, tanto no controle de vazamentos quanto no consumo racional.

Um estudo de caso realizado por Koech, Gyasi-Agyei e Randall (2018) na cidade de Port Macquarie, localizada em Nova Gales do Sul - Austrália, mostrou que os medidores inteligentes podem ser usados para detecção de vazamentos. O monitoramento foi feito durante seis meses no distrito central de negócios da cidade, com 158 medidores de água inteligentes instalados em residências, estabelecimentos comerciais e instalações públicas com leituras horárias de vazão consumida. Da área monitorada, dados de 21 medidores revelaram a presença de vazamentos. A vazão média horária mínima de cada um dos 21 medidores foi usada para determinar a perda de água, que foi de 1,56% do consumo total de água durante o período analisado.

A discussão sobre vazamentos, até o momento, tem se concentrado em como a medição de água pode ser usada para identificar perdas e, portanto, determinar a potencial economia se ações corretivas forem tomadas, como realização de reparos em tempo hábil e substituição de tubulações comprometidas.

Além de ser uma ferramenta importante para a detecção e combate a vazamentos em redes, os medidores inteligentes permitem ainda que o consumidor acompanhe em tempo real a medição de água e a possível economia gerada com a redução do consumo, sendo um incentivo a mudança comportamental na busca pela economia financeira e para a conservação deste recurso.

Bragalli *et al.* (2019) propuseram medidores inteligentes capazes de coletar leituras simultâneas e sincronizadas para o monitoramento dinâmico de perdas de água em redes. Essa abordagem foi aplicada em um distrito da cidade de Fano, na Itália, onde uma rede de leitura automática de medidores funciona continuamente desde 2006. Os resultados obtidos sugerem que a disponibilidade de medidas de consumo síncrono de água em tempo quase real pode melhorar consideravelmente a avaliação das perdas de água em comparação com as abordagens tradicionais com medições mensais ou trimestrais, como acontece em alguns sistemas de abastecimento.

De fato, os estudos de caso, dos quais esses modelos são derivados, são distinguidos pela precisão do medidor inteligente de água, a frequência de aquisição, o tempo de sincronização na medição e o modo de transmissão de dados (KIM *et al.*, 2014; KONDRATJEVS *et al.*, 2014; DEPARI *et al.*, 2016). O conhecimento avançado e a compreensão sobre tecnologias de medição inteligente permitem o desenvolvimento de metodologias e ferramentas inovadoras, robustas, práticas e econômicas para gerenciar a demanda de água urbana em residências (HAROU *et al.*, 2014; SAVIC; FERRARI, 2014).

Poucos estudos concentram-se em abordagens sistemáticas para processar e analisar dados de consumo de água coletados de sistemas de telemetria com o objetivo de melhorar a operação e a manutenção da rede (MOUNCE; BOXALL; MACHELL *et al.*, 2010; LOUREIRO *et al.*, 2014).

A instalação de medidores inteligentes (disponibilizou dados de consumo de água de alta resolução ao nível do consumidor. Além disso, o binômio (i) segmentação em Áreas de Medidores Distritais e (ii) leituras síncronas (todos os medidores inteligentes lidos ao mesmo tempo), introduz novas perspectivas na abordagem proativa para o monitoramento de perdas de água COMINOLA *et al.*, 2015; CARDELL-OLIVER *et al.*, 2016).

Ainda com relação à frequência de medições, a escolha do intervalo de leitura de medidores inteligentes é outra decisão importante para a coleta de dados em processos dependentes do tempo, conforme afirmam Kulkarni e Farnham (2016). De fato, uma boa resolução temporal da aquisição de dados é desejável para obter informações de consumo detalhadas; em contrapartida, uma alta frequência de medição pode aumentar o custo do sistema desenvolvido, bem como a necessidade de uma robustez maior que garanta uma vida útil adequada, coleta, armazenamento e transmissão de dados precisos ao longo do período de monitoramento.

Além da implantação de medidores inteligentes na rede, percebe-se ainda a necessidade de diálogo e conscientização da população no que se refere ao uso racional e conservação da água. Britton *et al.* (2013) testaram a eficácia das intervenções de comunicação nas economias de água resultantes do reparo de vazamentos domésticos. A estratégia de comunicação resultou em uma redução de 89% nos fluxos mínimos noturnos durante a duração do estudo, enquanto o grupo de controle que não recebeu comunicação aumentou o consumo em 52%, reafirmando a importância da comunicação no processo de conservação de água.

Cominola *et al.* (2015) produziram o estado da arte de pesquisas relacionadas ao tema e perceberam que ainda é necessário o desenvolvimento de estudos com metodologias especializadas com abordagens integradas. Além disso, foi observado que os locais dos estudos de caso não estão homoganeamente distribuídos, sendo 79% dos trabalhos revisados aplicados nos Estados Unidos (36%) ou na Austrália (43%), enquanto os demais estudos foram desenvolvidos na Europa (13%) ou Ásia (6%) e uma única aplicação encontrada na América do Sul e nenhuma na África, inferindo na necessidade de uma discussão mais ampla sobre o tema e o desenvolvimento de pesquisas nesta linha, principalmente em áreas com disponibilidade hídrica limitada.

2.7 SUPORTE À AUTOMAÇÃO

A automação juntamente com outras ferramentas tecnológicas de suporte permite uma gestão integrada dos sistemas, mais rapidez na transmissão de dados, localização precisa a partir do georreferenciamento dos medidores e da rede de distribuição, além da simulação do comportamento da rede em situações específicas. Todas essas ações são fundamentais para gestão de perdas em SAA.

2.7.1 Sistemas de informações geográficas

O geoprocessamento é um instrumento computacional que possibilita a associação de diferentes bancos de dados, imagens e mapas; sobrepondo informações que se integram a partir de análise matemática e estatística dos dados espaciais ou não espaciais (EMBRAPA, 2007). É um mecanismo poderoso que é útil e amplamente aplicado nas diversas áreas do conhecimento.

Na gestão de sistemas de informações são utilizados bancos para armazenamento e organização dos dados. No entanto, muitos *softwares* de bancos de dados realizam apenas a organização das informações, não possibilitando a visualização cartográfica e georreferenciada. Com o advento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), foi possível aliar o armazenamento de dados tabulados com as informações espaciais (FITZ, 2018; CAILLOT, 2019).

Em relação aos SAA's, as possibilidades de armazenamento e gestão da informação em SIG são inúmeras, como visualização dos diversos componentes do

sistema e suas peculiaridades, avaliação dos dados armazenados e realização de aplicações estatísticas com a finalidade de visualizar o funcionamento do sistema em determinadas situações, entre outros propósitos (SILVA; PÁDUA; BORGES, 2016).

Existem diversos SIGs disponíveis no mercado, inclusive versões gratuitas como o Q-GIS, gvSIG, Grass GIS, SPRING, e outros que possibilitam utilizar o suporte à automação em redes de abastecimento como ferramenta de gestão.

2.7.2 Sistemas de telemetria

A telemetria é uma tecnologia amplamente aplicada nos diversos ramos da indústria e serviços possibilitando a comunicação entre dois ou mais equipamentos com a finalidade de repasse/troca de informações remotamente (ASSIS, 2012). Normalmente, estes sistemas são utilizados em áreas de difícil acesso ou nas quais não é viável a coleta de dados manualmente.

Souza Júnior (2014) afirma que os sistemas de telemetria permitem acompanhar medições de vazão e pressão nas redes, níveis de reservatórios, e parâmetros de qualidade da água de acordo com as necessidades e equipamentos disponíveis, sendo possível um efetivo gerenciamento nos SAA.

A partir da facilidade e rapidez na transmissão de dados, é possível identificar variações de vazão e pressão com relação aos valores médios diários (ou horários), prováveis falhas no funcionamento de equipamentos e acessórios - como “*booster*”, válvulas para controle de vazão e pressão-, baixo nível ou extravasamentos de reservatórios, entre outros (SOUZA JÚNIOR, 2014).

A arquitetura de telemetria é composta por quatro subsistemas (Figura 5): Elemento de Medição Remota (EMR), que engloba os medidores e os componentes de transmissão; o servidor que recebe os dados a partir de uma rede de telecomunicações utilizada; o software no qual estes são disponibilizados e o sistema de monitoramento e gerenciamento, onde são analisadas todas as informações obtidas remotamente (UZCATEGUI, 2017).

Figura 5 - Sistema de telemetria



Fonte: UZCATEGUI (2017).

O EMR faz a medição dos dados desejados para que sejam enviados ao servidor. Esse elemento é instalado no equipamento a ser supervisionado ou próximo a ele, e as informações são enviadas por meio de uma rede de transmissão, possibilitando a obtenção de dados em locais distantes, otimizando recursos e racionalizando custos.

A rede de telecomunicação é o meio físico ou lógico pelo qual as informações trafegam, possibilitando a obtenção de uma solução de rede de dados mais acessível. Ela permite ao Sistema de Monitoramento receber e enviar os dados capturados e resultantes do processamento, interferindo no objeto monitorado, controlando e configurando o Sistema de Telemetria.

Os dados transmitidos são geralmente oriundos de sensores ou comandos inseridos pelo operador em sistemas integrados com telemetria, que pode ser realizada por diversos meios de transmissão, sejam eles físicos, com a utilização de cabos, ou *wireless* através de ondas eletromagnéticas, como por exemplo via telefonia móvel, rádio, *wi-fi* ou *bluetooth* (SICHONANY *et al.*, 2012).

Assis (2012) afirma que a definição para o meio de transmissão a ser utilizado em determinado sistema depende de fatores como quantidade de pontos monitorados/controlados, distância entre as estações monitoradas, disponibilidade de serviços de telefonia fixa móvel na área de estudo e relevo onde se encontram as estações.

O Quadro 3 descreve as vantagens e desvantagens dos principais meios de transmissão de informações à distância utilizados.

Quadro 3 - Comparativo entre os principais meios de transmissão

Transmissão	Vantagens	Desvantagens
Rádio	Longas distâncias para comunicação	Alto custo de implantação
	Pouco retardo de sinal	Baixas taxas de transmissão
	Baixo custo de manutenção	Necessidade de licença (400MHz)
	Baixa incidência de manutenção	Técnicas de transmissão limitadas
Telefonia móvel	Não necessita de hardware especial	Necessidade de um servidor de aplicação
	Conexões de alta performance	Condição do sinal
	Nível alto de segurança de dados	Serviço pago
	Conectividade com a internet	Suscetível a congestionamento
Bluetooth	Baixo consumo de energia e bateria em dispositivos	Limitação no número de dispositivos conectados e de transmissão dos dados
	Baixo custo de implantação e manutenção	Taxa de transferência de dados baixa
	Tecnologia facilmente integrada outros protocolos de comunicação	Incompatibilidade de protocolo entre diferentes dispositivos
	Baixa latência	O registro de dados locais é necessário para garantir a disponibilidade ininterrupta de dados
Wi-fi	Permite a conexão de múltiplos dispositivos, inclusive móveis	Pode sofrer interferências de sinais de rádio ou outro dispositivo eletrônico que opere na mesma frequência
	Baixo custo de instalação e manutenção	Taxa de transferência de dados baixa
	Relação custo <i>versus</i> benefício adequada	Limitação da velocidade de conexão
	Maior mobilidade e flexibilidade no local de instalação	Segurança limitada

Fonte: Adaptado de Spolaor (2011).

A escolha pelo tipo de transmissão depende das peculiaridades de cada sistema, sendo necessária uma análise prévia para posterior definição do método mais adequado a partir das limitações existentes nas áreas de aplicação previstas.

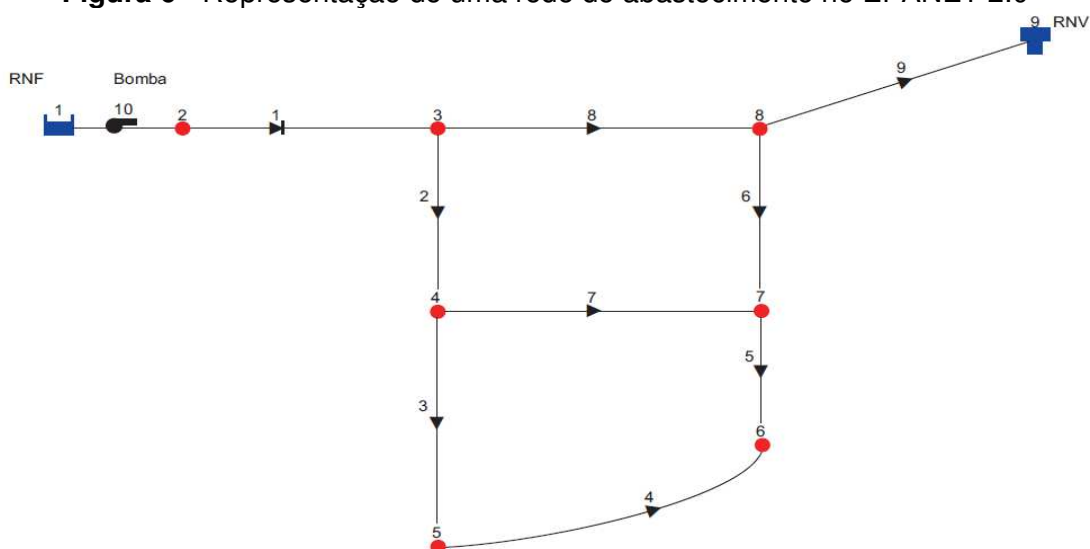
2.7.3 Simulação de sistemas hidráulicos

Nas redes de distribuição de água mais complexas, é aconselhável a utilização de um modelo matemático de redes hidráulicas, para permitir que sejam realizadas análises integradas do sistema (SOUZA JÚNIOR, 2014; MORRISON *et al.*, 2007).

Para Meneses (2011) uma simulação é o uso de um modelo para a avaliação de respostas de determinado sistema submetido a eventos sob muitas condições e restrições. Neste contexto, um modelo pode ser compreendido como a representação de um sistema real, sendo uma forma de converter todos os processos de uma determinada realidade, de modo a extrair informações e alterá-la posteriormente.

Dentre as principais ferramentas de modelagem hidráulica, o EPANET 2.0 é um software amplamente utilizado para realizar simulações do comportamento hidráulico e da qualidade de água em redes de abastecimento pressurizadas. Nas simulações realizadas por este *software*, a rede de abastecimento é composta basicamente de condutos, nós, bombas, válvulas e reservatórios, onde é possível obter diversos parâmetros inerentes ao SAA, tais como: a vazão transportada, pressão nos nós e o nível dos reservatórios durante o período de simulação (ODAN, 2013). Um modelo simplificado de uma rede de abastecimento de água pode ser visualizado Figura 6.

Figura 6 - Representação de uma rede de abastecimento no EPANET 2.0



Fonte: Rossman (2000).

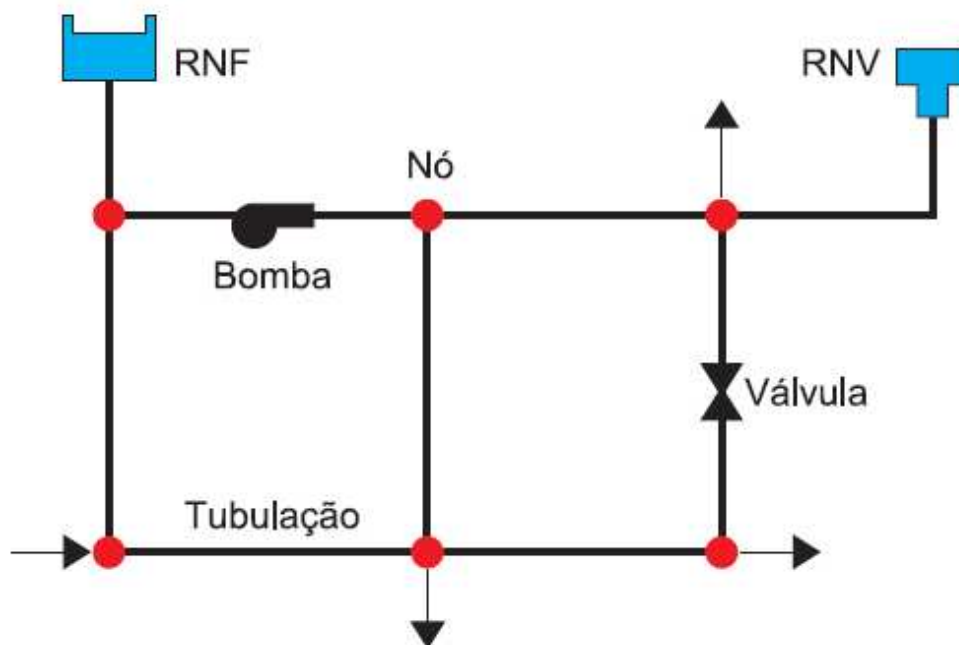
No que se refere ao abastecimento de água, a modelagem “[...] é uma ferramenta que tem evoluído ao longo do tempo para ajudar os projetistas, operadores e gestores na tarefa de oferecer água com mais qualidade, confiabilidade e baixo custo operacional” (MENESES, 2011).

Martins (2014) afirma que o EPANET é um dos programas mais eficazes no que se refere à simulação de um sistema de distribuição de água. Este possibilita a obtenção da vazão nos tubos, nível dos reservatórios e pressão dos nós, através de interfaces gráficas, podendo ser observada sua extração de resultados por gráficos e tabelas.

A modelagem de um sistema de distribuição de água com uso do EPANET 2.0 consiste em um conjunto de trechos ligados a nós. Os trechos são as tubulações, bombas e válvulas de controle, enquanto que os nós representam conexões, reservatórios de nível fixo (RNF) e reservatórios de nível variável (RNV) (ROSSMAN, 2000).

A Figura 7 ilustra o modo como os componentes podem ser unidos entre si, para constituir uma rede. Cada um desses componentes apresenta características específicas na simulação realizada pelo EPANET 2.0.

Figura 7 - Componentes físicos de uma rede de distribuição de água



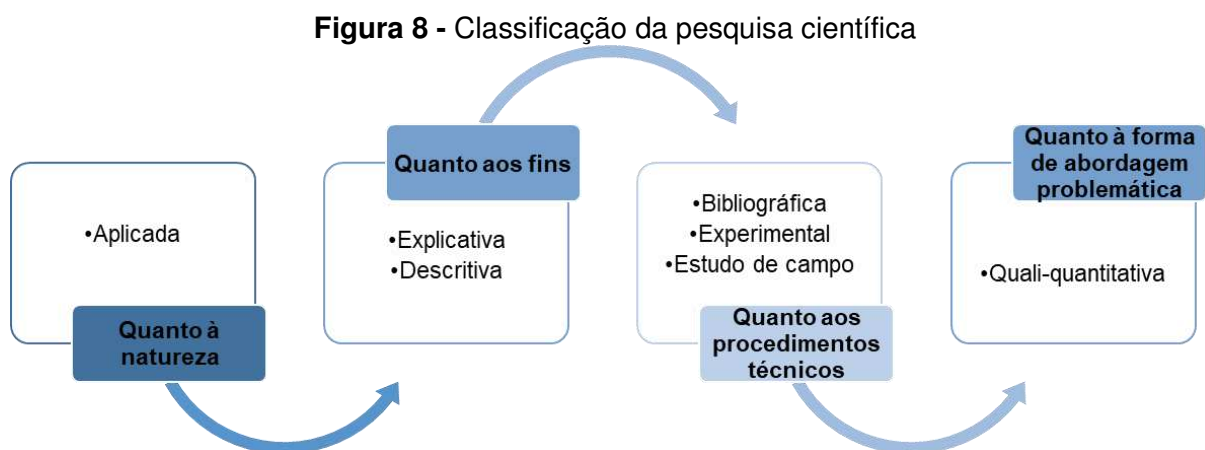
Fonte: Rossman (2000).

Ademais, os programas de modelagem hidráulica permitem o desenvolvimento de sistemas mais robustos, em que, a partir de diferentes simulações na rede, sejam obtidos resultados próximos a realidade, no caso de sistemas já existentes, ou previstos resultados confiáveis, tanto para ampliações de sistemas, quanto para novos projetos de abastecimento de água.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 NATUREZA E COLETA DOS DADOS

A classificação da pesquisa quanto à natureza, aos fins, procedimentos técnicos e à forma de abordagem problemática está ilustrada na Figura 8.



Fonte: Autora (2022).

A presente pesquisa é de natureza aplicada, assim classificada por desenvolver um protótipo de baixo custo a partir de componentes existentes. Possui fins explicativos, uma vez que analisa fatores determinantes para a ocorrência de perdas de água e seleciona variáveis para explicação dos fenômenos da pesquisa. Também é descritiva já que foi realizada a identificação das características da rede de distribuição de água, bem como o estudo e análise do monitoramento inteligente de vazão em tubulações (PRODANOV, 2014; GIL, 2019).

Com relação aos procedimentos técnicos, classifica-se como bibliográfica, experimental e estudo de campo, pois parte de trabalhos semelhantes disponíveis na literatura para o desenvolvimento do protótipo macromedidor em laboratório (experimental) e realiza a caracterização de dados de uma área para posterior instalação do sistema desenvolvido.

Quanto à abordagem problemática, é classificada como quali-quantitativa, pois articula as dimensões subjetivas nas práticas de gestão e planejamento pelo conhecimento do comportamento característico do sistema e realiza a quantificação

de dados de vazão e pressão nas redes como ferramentas efetivas no combate às perdas de água (PRODANOV, 2014).

Os dados foram obtidos a partir de medição em campo de vazões e pressões para que o protótipo desenvolvido contemple as faixas de valores pré-estabelecidos da rede.

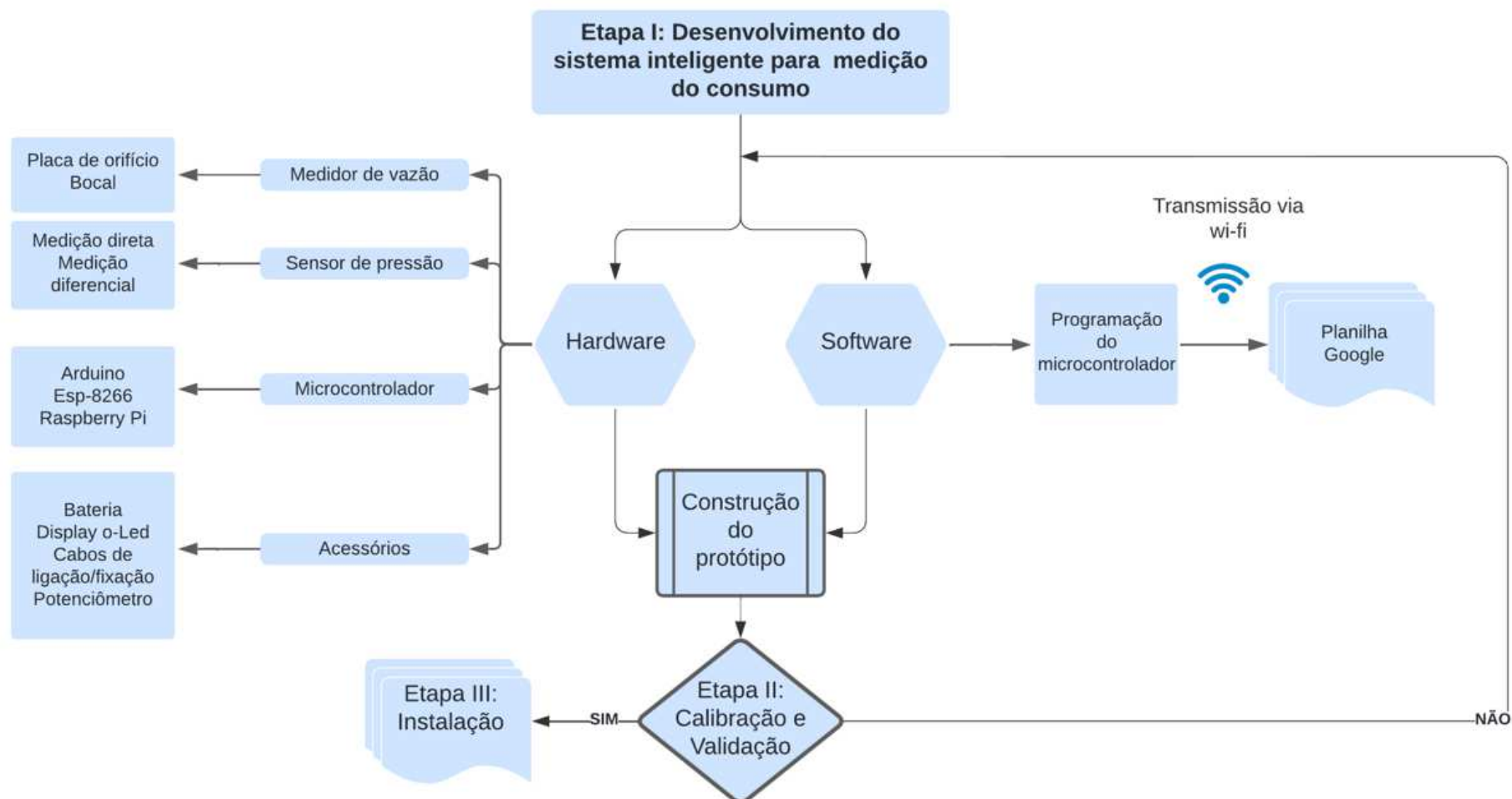
A metodologia da pesquisa está dividida em três etapas fundamentais I, II e III. A Etapa I consiste no desenvolvimento e construção do sistema inteligente para medição de pressões e vazões da rede. A Etapa II compreende a calibração e validação do sensor e macromedidor em bancada hidráulica experimental sob condições controladas. A Etapa III consiste na instalação do protótipo e monitoramento de vazão na rede de distribuição, localizada no Campus Central da UFCG, em Campina Grande-PB. A Figura 9 traz um fluxograma com a sequência das etapas para o desenvolvimento da pesquisa e a descrição de cada uma das etapas encontra-se nos itens a seguir.

3.2 ETAPA 1 - DESENVOLVIMENTO DO PROÓTIPO INTELIGENTE DE MEDIÇÃO DE CONSUMO

O sistema é composto por um macromedidor estruturado a partir de dois componentes básicos: hardware e software (Figura 9). O hardware é constituído por um medidor de vazão, um sensor de pressão, um controlador lógico programável (microcontrolador), uma bateria e acessórios necessários para montagem, como cabos, placa de fixação dos componentes, entre outros. O software consiste na programação do microcontrolador para automação da medição feita pelo sensor. A programação foi realizada em linguagem Arduino própria do microcontrolador em Ambiente de Desenvolvimento Integrado.

O microcontrolador é o computador responsável por armazenar os dados medidos e enviá-los para um sistema, no qual o administrador/usuário tem acesso às informações coletadas em tempo real.

Figura 9 - Fluxograma para desenvolvimento do sistema de medição



Fonte: Autora (2022).

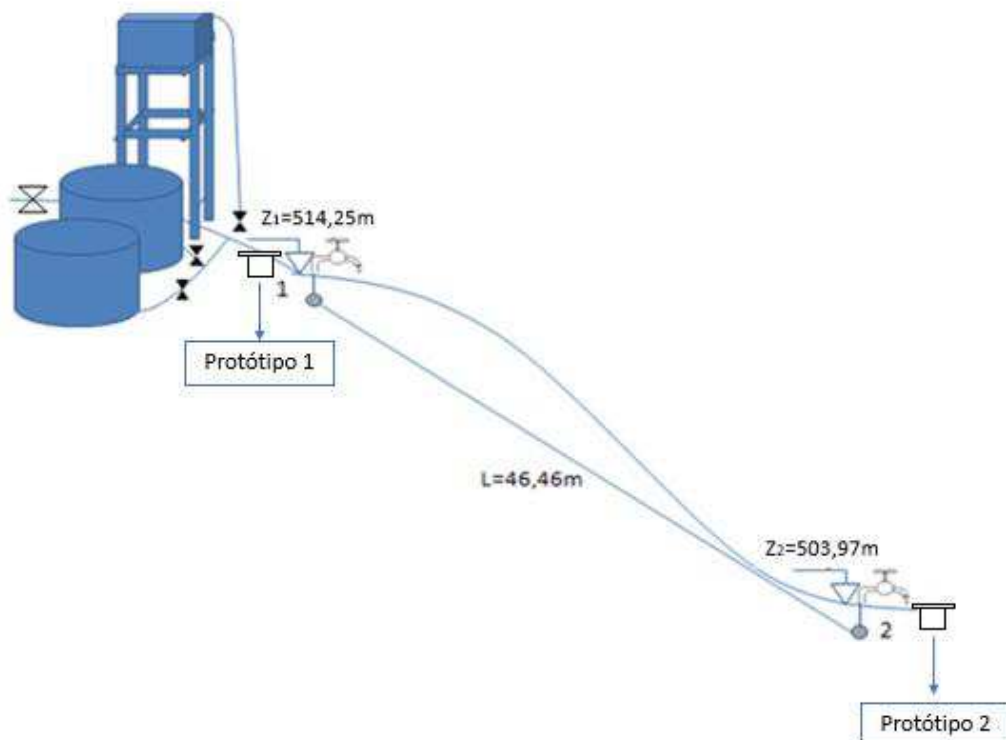
A transmissão dos dados escolhida foi tipo *wireless*, via wi-fi, em razão da disponibilidade de acesso à internet no local, porém também é possível a adoção de outros métodos de transmissão, de acordo com o local de instalação, a disponibilidade de redes e os custos associados. Os dados coletados eram transmitidos para um banco supervisorio online, onde ficaram armazenados e disponíveis para acesso pelos administradores/usuários que realizam o monitoramento da rede e do consumo.

A função do protótipo desenvolvido é realizar a medição de vazão e pressão em tempo real a partir de um sistema inteligente de baixo custo, contribuindo para a ampliação do uso desta tecnologia na macromedição de SAA.

3.2.1 Escolha do medidor de vazão

Para obtenção dos dados iniciais de vazão e pressão foi utilizado um trecho retilíneo da tubulação localizado na área à jusante de reservatórios de distribuição (Figura 10). Nesse trecho foram instalados dois pontos de acesso (a instalação do sistema e todas as partes componentes serão descritos mais detalhadamente na Etapa III, item 3.4.2).

Figura 10 - Croqui dos pontos 1 e 2 em trecho retilíneo estudado para definição de medidor



Fonte: Autora (2022).

A equação de Bernoulli em fluidos reais (Equação 1) e a equação de perda de carga de Darcy-Weisbach (Equação 2) foram aplicadas entre os pontos para obter-se a estimativa da vazão que abastece o trecho. A aferição de pressão foi feita a partir de um manômetro (geofone) acoplados a torneira. Além disso, o estudo prévio de vazão e pressão à jusante dos reservatórios da rede auxiliaram a decisão quanto ao tipo de medidor de vazão para compor o protótipo.

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h \quad (1)$$

Onde:

Z: Carga de posição (m);

$\frac{p}{\gamma}$: Carga de pressão (m);

$\frac{v^2}{2g}$: Carga cinética (m);

Δh : perda de carga (m).

$$\Delta h = \frac{0,0827xfxLxQ^2}{D^5} \quad (2)$$

Onde:

f: fator de atrito;

L: comprimento (m);

Q: vazão (m³/s);

D: diâmetro (m).

A escolha do macromedidor de vazão partiu da predefinição do uso de medidores deprimogênios, que utilizam a diferença de pressão gerada na peça a partir das relações de diâmetro pré-estabelecidas para o cálculo da vazão, conforme ilustrado na seção 2.3.3.

Nas Tabelas 1, 2, e 3 estão calculadas a diferença de pressão esperada para os medidores deprimogênios tipo placa de orifício, com tomadas de pressão de canto (Tabela 1) e com distância D e ½D do furo à montante e jusante (Tabela 2), e Bocal (Tabela 3), considerando as relações dos diâmetros (β) previstos na NBR nº 5167-1/1994 e na literatura conforme preconiza White (2011) e Fox, McDonald e Pritchard (2014). A escolha destes medidores diferenciais para o pré-teste deve-se a sua simplicidade, fácil construção, baixo custo e confiabilidade de medições, podendo ser facilmente aplicada para medição de vazão em tubulações

Tabela 1 - Diferença de pressão esperada: Placa de orifício com tomadas de canto

$\beta=Dg/D1$	Dg (m)	Ag (m ²)	C para Qmax	C para Qmin	ΔP para Qmax (Pa)	ΔP para Qmin (Pa)
0,2	0,02	0,00031416	0,59706673	0,59735511	10689074,2	313824,67
0,3	0,03	0,00070686	0,59866602	0,5994607	2086483,28	61154,5957
0,4	0,04	0,00125664	0,60092679	0,60255811	643658,393	18813,3917
0,5	0,05	0,0019635	0,60349388	0,60634369	251505,084	7321,85621
0,6	0,06	0,00282744	0,60511477	0,60961017	112005,573	3243,2254
0,7	0,07	0,00384846	0,6024453	0,60905431	53251,3095	1531,15766
0,75	0,075	0,00441788	0,59738359	0,60523674	36969,8518	1058,44946

β : Relação entre o diâmetro da tubulação e do medidor;

Dg: Diâmetro da contração (m);

Ag: Área da seção contraída (m²);

C: Coeficiente de descarga;

ΔP : Variação de pressão esperada no medidor.

Fonte: Autora (2022).

Tabela 2 - Diferença de pressão esperada: Placa de orifício com tomadas D e ½D

$\beta=Dg/D1$	Dg (m)	Ag (m ²)	C para Qmax	C para Qmin	ΔP para Qmax (Pa)	ΔP para Qmin (Pa)
0,2	0,02	0,00031416	0,59700247	0,59729085	10691375,4	313892,2
0,3	0,03	0,00070686	0,5985566	0,59935128	2087246,18	61176,9266
0,4	0,04	0,00125664	0,60093693	0,60256826	643636,658	18812,7582
0,5	0,05	0,0019635	0,60411201	0,60696182	250990,669	7306,95077
0,6	0,06	0,00282744	0,60749606	0,61199147	111129,204	3218,03535
0,7	0,07	0,00384846	0,60932559	0,61593459	52055,5096	1497,14118

Fonte: Autora (2022).

Tabela 3 - Diferença de pressão esperada: Bocal

$\beta=Dg/D1$	Dg (m)	Ag (m ²)	C para Qmax	C para Qmin	ΔP para Qmax (Pa)	ΔP para Qmin (Pa)
0,25	0,025	0,00049088	0,99128475	0,98390398	1584690,96	47271,8292
0,35	0,035	0,00096212	0,99032924	0,98159619	408698,786	12225,4044
0,45	0,045	0,00159044	0,98950301	0,97960067	145858,832	4373,56152
0,55	0,055	0,00237584	0,98876454	0,97781709	62013,5613	1863,47515
0,65	0,065	0,00331832	0,98809067	0,97618953	28784,487	866,662907
0,75	0,075	0,00441788	0,98746693	0,97468306	13530,3541	408,125622

Fonte: Autora (2022).

A análise dos valores obtidos para cada medidor conforme as Tabelas 1, 2 e 3 mostrou que as relações de diâmetros β de 0,4 e 0,5 são adequadas, haja vista que estas geraram diferenciais de pressão esperados e condizentes com os sensores disponíveis no mercado com custo acessível para esta finalidade. Além disso, também foi avaliada a perda de energia (pressão) gerada nos medidores estudados, de modo que a diferença prevista no protótipo não comprometesse o abastecimento dos pontos mais elevados e/ou mais distantes dos reservatórios de distribuição de água.

Após uma análise comparativa, considerando os aspectos construtivos e o custo dos medidores, optou-se por utilizar medidores do tipo Placa de orifício, com tomadas de pressão D e ½D descritas nas Tabela 1 e 2, passando a avaliar qual possuía maior precisão e confiabilidade dos dados coletados. A construção desse tipo de medidor é normatizada pela NBR nº 5167-1, “*Medição de vazão de fluidos por dispositivos de pressão diferencial, inserido em condutos forçados de seção transversal circular - Parte 1: Princípios e requisitos gerais*” (2008) e depende de algumas especificidades, como diâmetro da tubulação, vazão transportada, tipo de tomadas de pressão, entre outros.

Ligado ao medidor de vazão, também foi adicionado um sensor de pressão diferencial (ΔP), que transforma a pressão registrada em voltagem para posterior leitura no microcontrolador a partir de uma programação prévia, o que irá permitir a realização do monitoramento de pressão e vazão na rede em tempo real.

Após definida a faixa diferencial de pressão esperada foi utilizada a Equação 3 para o cálculo de vazão na placa de orifício, conforme prevê a NBR nº 5167-1/2008, inserida na programação do protótipo macromedidor.

$$Q = Cx A_0 x \sqrt{2x g x \frac{\Delta P}{\gamma}} \quad (3)$$

Onde:

Q: vazão (m³/s);

A₀: Área do orifício (m²);

g: aceleração da gravidade (m/s²);

ΔP : Diferencial de pressão gerado na placa (Pa);

γ : Peso específico do fluido transportado (N/m³).

Assim, a partir da Equação 4 foi possível determinar o valor de vazão transportada conhecendo-se a diferença de pressão (ΔP) gerada no medidor durante intervalos de tempo pré-estabelecidos. Após a escolha do medidor de vazão, foi confeccionado o tubo com placa de orifício conforme preconiza a NBR nº 5167-1/2008 e considerando as análises realizadas nas Tabelas 2 e 3.

O valor do coeficiente de descarga C para correção de vazão da placa de orifício foi obtido experimentalmente pela Equação 2.

$$C = 0,5959 + 0,0312x \left(\frac{D_0}{D_1}\right)^{2,1} - 0,184x \left(\frac{D_0}{D_1}\right)^8 + \frac{91,71}{Re_{D_1}^{0,75}} x \left(\frac{D_0}{D_1}\right)^{2,5} \quad (4)$$

Onde:

D_0 : diâmetro da seção mínima da placa de orifício (m);

D_1 : diâmetro da seção à montante da placa de orifício (m);

Re: número de Reynolds na seção com diâmetro D_1 (adimensional).

3.2.2 Hardware

O hardware foi desenvolvido utilizando os componentes descritos no Quadro 4. O medidor de vazão escolhido (do tipo placa de orifício), sensor de pressão diferencial MPX 5700-DP (detalhado no item 3.2.2.1), microcontrolador NodeMCU ESP-8266, display Oled, mini painel solar, bateria com módulo carregador e uma caixa de proteção para abrigo dos componentes.

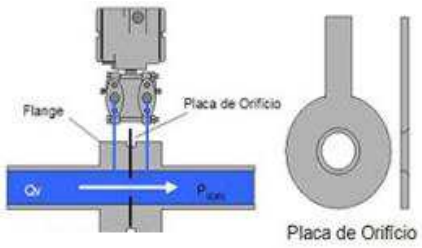
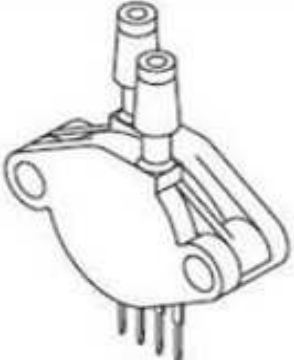
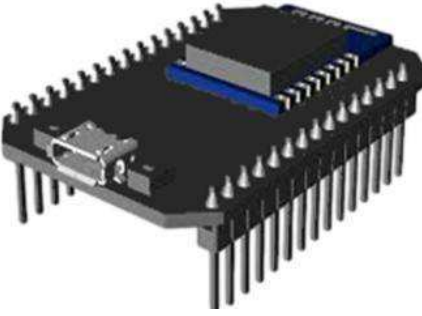
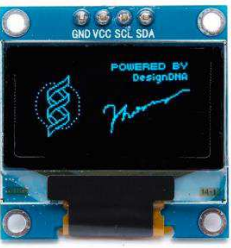
Além dos elementos principais mostrados no Quadro 4, também foram usados alguns acessórios para garantir o funcionamento do sistema, como potenciômetro, fios para ligação dos componentes, entre outros.




Inicialmente, o protótipo foi desenvolvido com o Arduino e transmissão de dados via rádio, mas por simplificação e economia mudou-se para o NodeMCU que já possui dispositivo de conexão wi-fi integrado, o que facilita a transmissão de dados e acompanhamento destes em tempo real.

Foram utilizados acessórios que permitem o melhor funcionamento e independência do protótipo, sendo adicionados uma bateria recarregável e seu módulo carregador, um painel solar para garantir a independência energética do medidor e uma caixa protetora que protege a parte elétrica de intempéries, como chuva e sol excessivos.

Para que o hardware funcionasse de maneira adequada, também foi necessária uma programação que garantisse o processamento e o envio adequados dos dados.

Quadro 4 - Partes constituintes do protótipo macromedidor

COMPONENTE	IMAGEM	DESCRIÇÃO
Placa de orifício		<p>Consiste num disco dotado de orifício central com saída em ângulo que deve ser montado concêntrico ao eixo do conduto cilíndrico, provido de duas tomadas de pressão, uma a jusante e outra a montante do disco.</p>
Sensor de pressão MPX-5700DP		<p>O transdutor piezoresistivo da série MPX5700 é um sensor de pressão diferencial de silício monolítico projetado para uma ampla gama de aplicações, mas particularmente aqueles que utilizam um microcontrolador com entradas analógicas e digitais.</p>
Microcontrolador NodeMCU Esp-8266		<p>Dispositivo eletrônico programável, que permite a obtenção, tratamento e disponibilização de dados ou ações de acordo com a programação desenvolvida e sensores utilizados. Possui placa ESP-8266 integrada que permite a conexão com a internet via Wi-fi, utilizando a mesma linguagem e ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) do Arduino.</p>
Display Oled		<p>Visor com tecnologia OLED, tela de 0,96 polegadas. Conecta-se com o microcontrolador por meio do protocolo I2C. Sua função é apresentar o que está acontecendo instantaneamente no sistema instalado, auxiliando na calibração, verificação dos dados e manutenção dos medidores.</p>

COMPONENTE	IMAGEM	DESCRIÇÃO
Bateria		Bateria de lítio com tensão de 3,7 volts, utilizada para alimentar o sistema e recarregada com energia solar.
Mini painel solar fotovoltaico		Mini painel fotovoltaico que consegue gerar uma tensão de 6 volts. Pode ser exposto à chuva e umidade sem ser danificado. Seu objetivo é recarregar as baterias de lítio que alimentam dispositivos que sejam instalados em locais no qual não seja possível o uso de energia elétrica.
Módulo carregador de bateria de lítio 1A – TP 4056		Tem a função de regular a tensão gerada na placa solar e assim recarregar a bateria para alimentar o sistema quando conectado ao painel fotovoltaico.
Caixa para proteção do medidor		Caixa utilizada para envelopar e proteger o sistema de qualquer interferência externa, além de proteger os usuários por não deixar nenhuma tomada de alta tensão exposta.

Fonte: Pesquisa de mercado feita pela Autora (2022).

Inicialmente, o protótipo foi desenvolvido com o Arduino e transmissão de dados via rádio, mas por simplificação e economia mudou-se para o NodeMCU que já possui dispositivo de conexão wi-fi integrado, o que facilita a transmissão de dados e acompanhamento destes em tempo real. Ainda com relação aos itens descritos no Quadro 4, foram utilizados acessórios que permitem o melhor funcionamento e independência do protótipo, sendo adicionados uma bateria recarregável e seu módulo carregador, um painel solar para garantir a autonomia energética do medidor, além da caixa protetora que protege a parte elétrica de intempéries, como chuva e sol

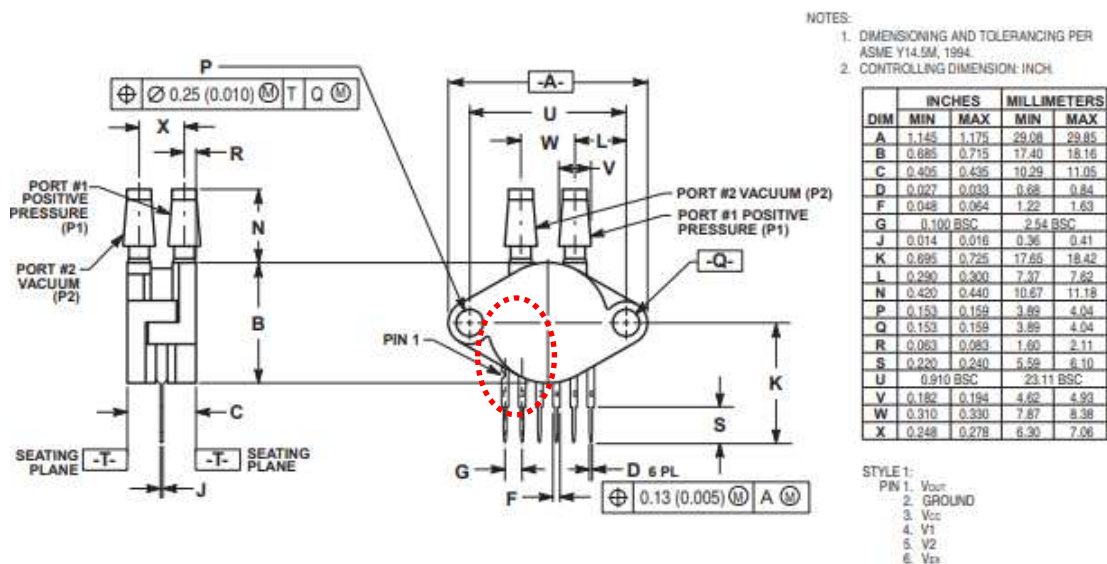
excessivos. Para que o hardware funcione de maneira adequada, é necessário ainda uma boa programação que garanta o processamento e envio adequado dos dados.

3.2.2.1 Sensor de pressão – MPX5700DP

O transdutor piezoresistivo da série MPX5700 é um sensor de pressão de silício monolítico projetado para uma ampla gama de aplicações, mas particularmente àquelas que utilizam um microcontrolador com entradas analógicas e digitais. Este transdutor patenteado de elemento único combina técnicas de micro-usinagem, metalização de filmes finos e processamento bipolar que fornece um sinal de saída analógico preciso e de alto nível que seja proporcional à pressão aplicada (FREESCALE, 2012).

O sensor de pressão MPX5700-DP é do tipo diferencial, que permite a medição de pressão entre dois pontos de entrada em um determinado sistema sob pressão. Esses sensores medem a pressão de qualquer fluido (água, óleo, ar, entre outros), sendo comumente utilizado em aplicações de medição de nível em reservatórios, máquinas de lavar, entre outros. Na Figura 11 é mostrado o esquema detalhado do sensor de pressão utilizado e suas características fornecidas pelo fabricante estão apresentadas na Tabela 4.

Figura 11 - Detalhes do sensor MPX 5700-DP



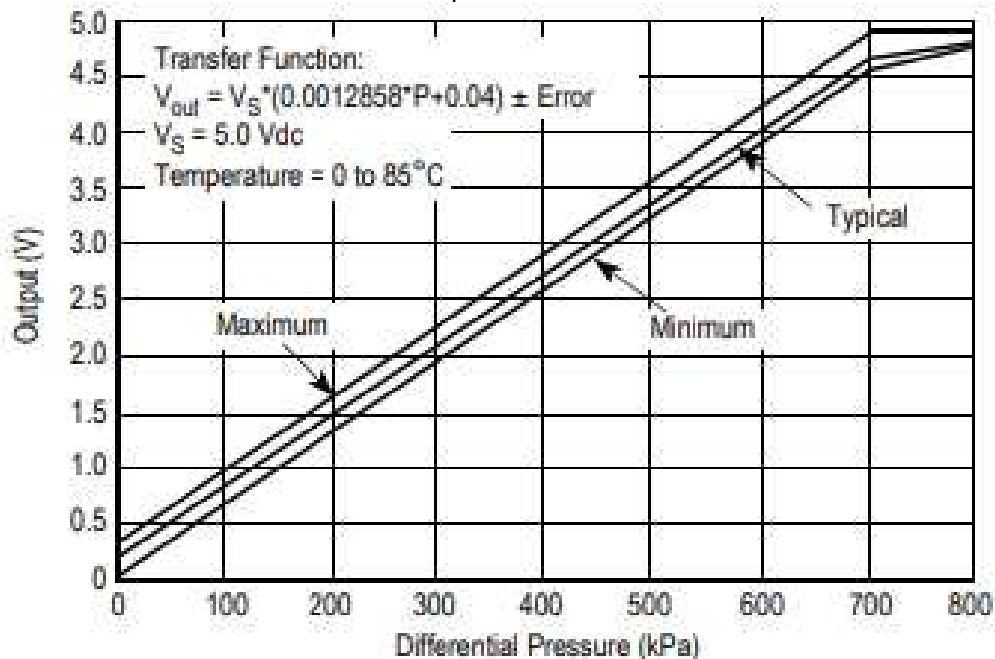
Fonte: Datasheet Freescale – MPX5700 Series (2012).

Tabela 4 - Características do sensor MPX 5700- DP

Characteristic		Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range ⁽¹⁾	Gauge, Differential: MPX5700D Absolute: MPX5700A	P _{OP}	0 15	—	700 700	kPa
Supply Voltage ⁽²⁾		V _S	4.75	5.0	5.25	Vdc
Supply Current		I _O	—	7.0	10	mAdc
Zero Pressure Offset ⁽³⁾	Gauge, Differential (0 to 85°C) Absolute (0 to 85°C)	V _{off}	0.088 0.184	0.2 —	0.313 0.409	Vdc
Full Scale Output ⁽⁴⁾	(0 to 85°C)	V _{FSSO}	4.587	4.7	4.813	Vdc
Full Scale Span ⁽⁵⁾	(0 to 85°C)	V _{FSS}	—	4.5	—	Vdc
Accuracy ⁽⁶⁾	(0 to 85°C)	—	—	—	±2.5	%V _{FSS}
Sensitivity		V/P	—	6.4	—	mV/kPa
Response Time ⁽⁷⁾		t _R	—	1.0	—	ms
Output Source Current at Full Scale Output		I _{O+}	—	0.1	—	mAdc
Warm-Up Time ⁽⁸⁾		—	—	20	—	ms

Fonte: Datasheet Freescale – MPX5700 Series (2012).

A Figura 12 mostra o sinal de saída do sensor relativo à entrada de pressão, além das curvas de saídas típica, mínima e máxima que operam na faixa de temperatura de 0°C a 85°C, com erro máximo de 2,5%, conforme informado pelo fabricante (FREESCALE, 2012).

Figura 12 - Curva característica do sensor para tensão de saída em função do diferencial de pressão

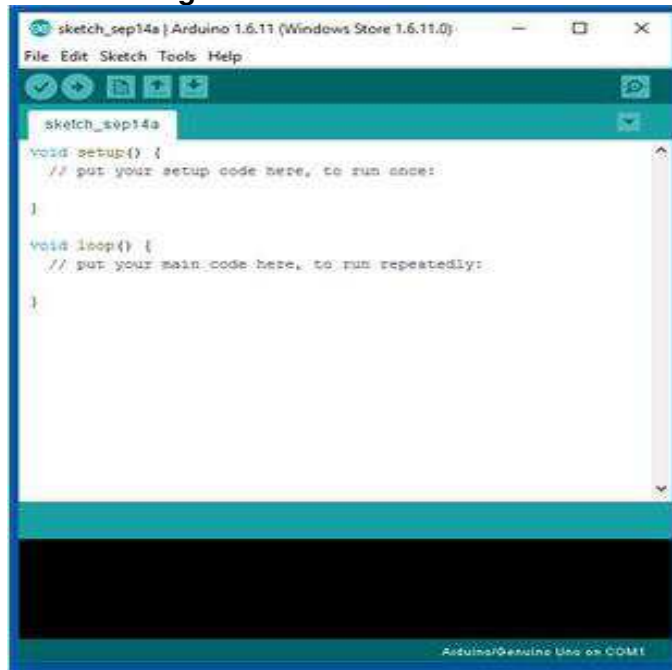
Fonte: Datasheet Freescale – MPX5700 Series (2012).

As informações contidas na Figura 12 foram importantes para a programação do microcontrolador, o NodeMCU, e para obtenção das pressões e posterior vazão transportada no sistema analisado.

3.2.3 Software

O software foi construído utilizando linguagem de programação e ambiente de desenvolvimento próprios do Arduino (Figura 13). Essa linguagem é semelhante a linguagem C, mas possui bibliotecas e funções próprias.

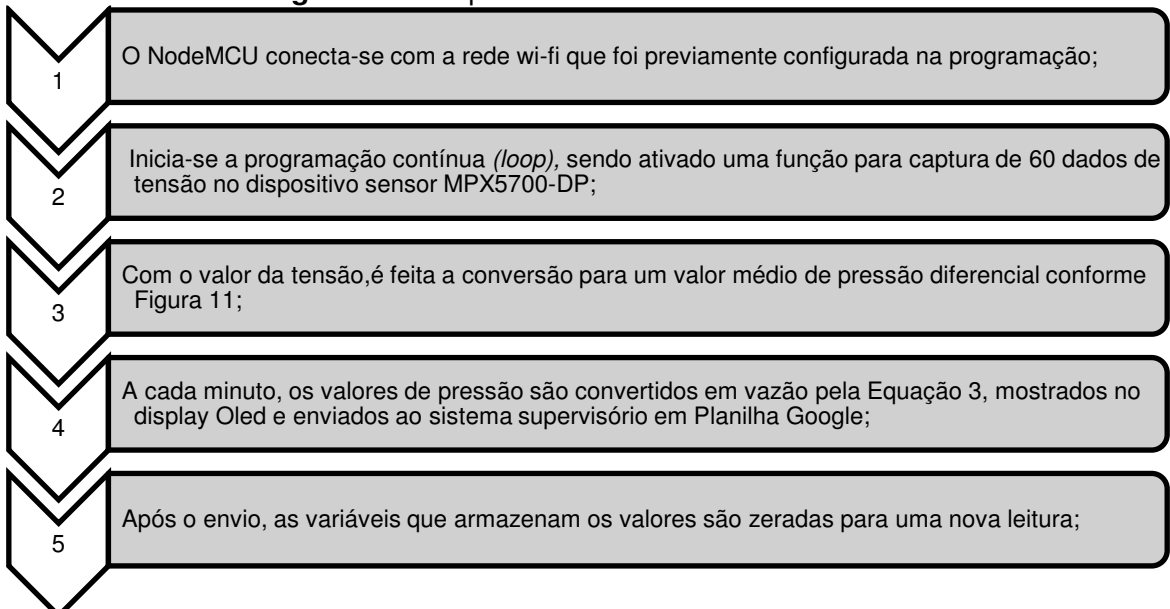
Figura 13 – Interface Arduino



Fonte: Autora (2022).

A programação desenvolvida para o funcionamento do software presente no protótipo macromedidor segue o roteiro descrito na Figura 14.

Figura 14 - Sequência de funcionamento do software



Fonte: Autora (2022).

O programa é dotado de rotinas que tratam problemas de conexão com a internet caso ocorra algum interveniente.

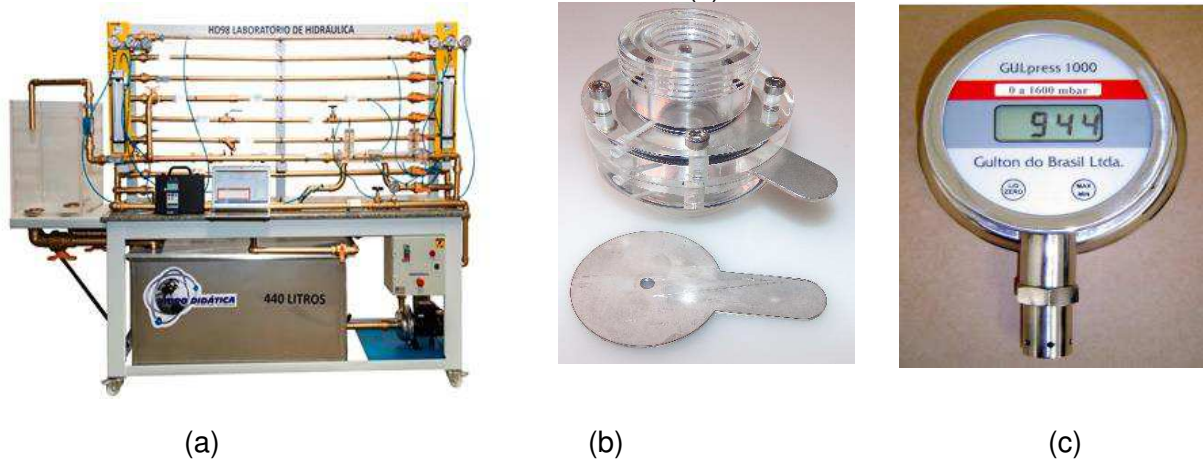
3.3 ETAPA II: CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SENSOR EM BANCADA

3.3.1 Calibração e validação do sensor MPX 5700-DP

A bancada hidráulica experimental utilizada para realização dos testes de calibração do sensor MPX 5700-DP foi a HD-98 Hidrodidática (Figura 15a), composta por nove tubulações, com diferentes materiais e diâmetros, que permitiam a análise experimental de perda de carga em diferentes situações práticas, medição de vazão e pressão a partir de equipamentos instalados no sistema.

A Figura 15b apresenta a placa de orifício usada na calibração do protótipo e na Figura 15c é ilustrado o manômetro GullPress1000 usado para aferição de pressão.

Figura 15 – Bancada hidráulica experimental (a), Placa de orifício (b) e Manômetro GullPress 1000 (c)



Fonte: Manual HD-98, Hidrodidática (2014), GULTON (2010).

A tubulação usada para o experimento foi a que possuía uma placa de orifício, um medidor de vazão do tipo deprimogênio ou de energia, que obtém a perda de carga e a vazão escoada a partir da diferença de pressão gerada entre dois pontos

localizados antes e depois do medidor, como o escolhido para compor o protótipo inteligente da pesquisa.

A placa de orifício, Figura 15b, era constituída de material inox com orifício concêntrico de diâmetro 12 mm instalado em uma tubulação com 25mm de diâmetro, com a mesma razão $\beta=0,5$ usada para os protótipos desenvolvidos posteriormente para instalação na rede. O suporte para fixação era feito em acrílico e a placa era presa à tubulação a partir do uso de flanges.

Na Figura 15c é ilustrado o manômetro GullPress 1000, usado para medir os valores de pressão gerados na placa de orifício. Esse instrumento de alta precisão é indicado tanto para uso como padrão em laboratórios, como para monitoramento em campo. Desenvolvido com técnica de condicionamento de sinais, utiliza sensores piezo-resistivos. Cada leitura indicada no instrumento é o resultado de sucessivos cálculos de média, eliminando efeitos de instabilidades causadas por ruídos e variações no processo.

A calibração do protótipo foi realizada em escala reduzida considerando-se os parâmetros de razão de semelhança para escoamento em condutos forçados. O arranjo formado por placa de orifício, sensor de pressão MPX 5700-DP e microcontrolador NodeMCU Esp-66 partiu da análise experimental, medindo vazão através dos dois mecanismos disponíveis no laboratório: o rotâmetro existente na bancada e o manômetro GullPress 1000.

O rotâmetro realiza a medição de vazão direta na bancada, enquanto o manômetro GullPress 1000 afere pressão para posterior obtenção da vazão de forma indireta a partir do diferencial de pressão (ΔP) gerado na placa de orifício. Estes medidores, previamente calibrados, foram respectivamente utilizados para Calibração e Validação do macromedidor inteligente em laboratório sob condições controladas.

É importante destacar que a rotação utilizada na bomba durante o experimento foi constante (30Hz) e as dez vazões de referência estudadas foram fixadas com o auxílio de um registro de controle de fluxo instalado à montante do rotâmetro.

Enquanto eram realizadas as aferições de pressão nos pontos 1 e 2, localizados à montante e jusante do orifício, e a leitura direta de vazão no rotâmetro, somente a tubulação que continha a placa em escala reduzida estava com o registro aberto, permanecendo fechados os demais registros de modo que toda a vazão lida no rotâmetro fosse a mesmo que passava na tubulação estudada.

Os dados coletados para a calibração do sensor foram usados no desenvolvimento do protótipo inteligente de medição de vazão, feitos em triplicata para dez vazões de referência pré-estabelecidas em função das limitações da bancada hidráulica experimental HD-98.

Para tal, foi controlada a quantidade de vazão transportada a partir de um registro e realizado o acompanhamento dos valores com auxílio de outro medidor de vazão instalado na bancada, o rotâmetro. Foram aferidos os valores de pressão na placa de orifício para 10 vazões de referência, sendo elas: 2,25 m³/hora, 2,5 m³/hora, 2,75 m³/hora, 3 m³/hora, 3,25 m³/hora, 3,5 m³/hora, 3,75 m³/hora, 4 m³/hora, 4,25 m³/hora e 4,5 m³/hora.

A escolha por esta faixa de vazão deve-se a limitação da bomba para recirculação de água na bancada experimental, bem como das tubulações contidas no sistema, de modo a não comprometer o funcionamento da bomba com aumento da rotação ou causar pressões e velocidades superiores aos limites estabelecidos pela NBR nº 5.626/2020 – Instalação Predial de Água Fria, respectivamente de 40 m.c.a e 5 m/s.

As leituras de pressão obtidas pelo manômetro GullPress 1000 foram feitas em triplicatas para cada vazão de referência, totalizando 30 medições de pressão para o cálculo da vazão a partir desse medidor. Já para o sensor MPX5700-DP, foi definido na programação para uma leitura de pressão a cada um segundo, o que totalizam 60 leituras por minuto. A vazão no rotâmetro era lida diretamente, mantendo o padrão de leituras em triplicata, como feito no manômetro GullPress 1000.

Após a obtenção dos dados, realizou-se o cálculo da vazão transportada tanto para o Manômetro GullPress-1000 quanto para o sensor MPX 5700-DP com base nas Equações 3 e 4, uma vez que ambos os medidores foram conectados à montante e jusante do protótipo para aferição de pressão para medição indireta de vazão com base no mesmo princípio. Já para o rotâmetro, os valores foram lidos diretamente e anotados para análise estatística posterior com a finalidade de verificar a precisão do sensor de pressão escolhido para compor o protótipo, bem como validar o seu uso para esta finalidade.

Após a obtenção dos dados, foi realizado o cálculo da vazão transportada tanto para o manômetro quanto para o sensor MPX 5700-DP em todos os pontos de análise e comparados com aqueles valores registrados pelo rotâmetro instalada na bancada HD-98.

Os valores obtidos para cada um dos três medidores estudados foram comparados entre si e avaliados estatisticamente para verificar a normalidade e confiabilidade dos dados obtidos pelo sensor MPX 5700-DP quando comparado par a par aos demais medidores.

Os dados obtidos foram tabulados e tratados estatisticamente com auxílio do software Microsoft Excel e as ferramentas estatísticas disponíveis.

3.3.2 Análises estatísticas do funcionamento dos sensores

Foram avaliados três pressupostos iniciais para verificar a parametrização e homogeneidade dos dados obtidos com a calibração e validação: teste de Shapiro-Wilk, teste de Levene e a presença de outliers na análise das médias pelos três métodos de medição. O software usado para as análises estatísticas citadas foi o XLSTAT v. 2019.3.1.

Foi aplicado ainda a ANOVA de uma via com teste de Tukey e pos hoc (Q test) para verificar se a hipótese de que não há diferença significativa entre as médias dos valores obtidos pelos diferentes métodos de medição foi verdadeira.

Por fim, foi calculado o erro percentual médio entre as leituras obtidas no protótipo inteligente a partir do Sensor MPX 5700-DP e os medidores de referência calibrados: rotâmetro presente na bancada HD-98 e manômetro GullPress-1000. Esta etapa foi realizada com a finalidade de comparar os valores obtidos com àqueles previstos no manual técnico do sensor estudado e quando alcançados valores aceitáveis de medição, realizada a instalação de dois protótipos em um setor de DMC específico na rede avaliada na pesquisa.

3.4 ETAPA III: INSTALAÇÃO DO PROTÓTIPO E MONITORAMENTO DE VAZÃO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

A terceira e última etapa da pesquisa foi a instalação de dois protótipos em escala real em uma rede de distribuição e o monitoramento das vazões obtidas durante o período de estudo.

3.4.1 Caracterização da área de estudo e do sistema de distribuição utilizado

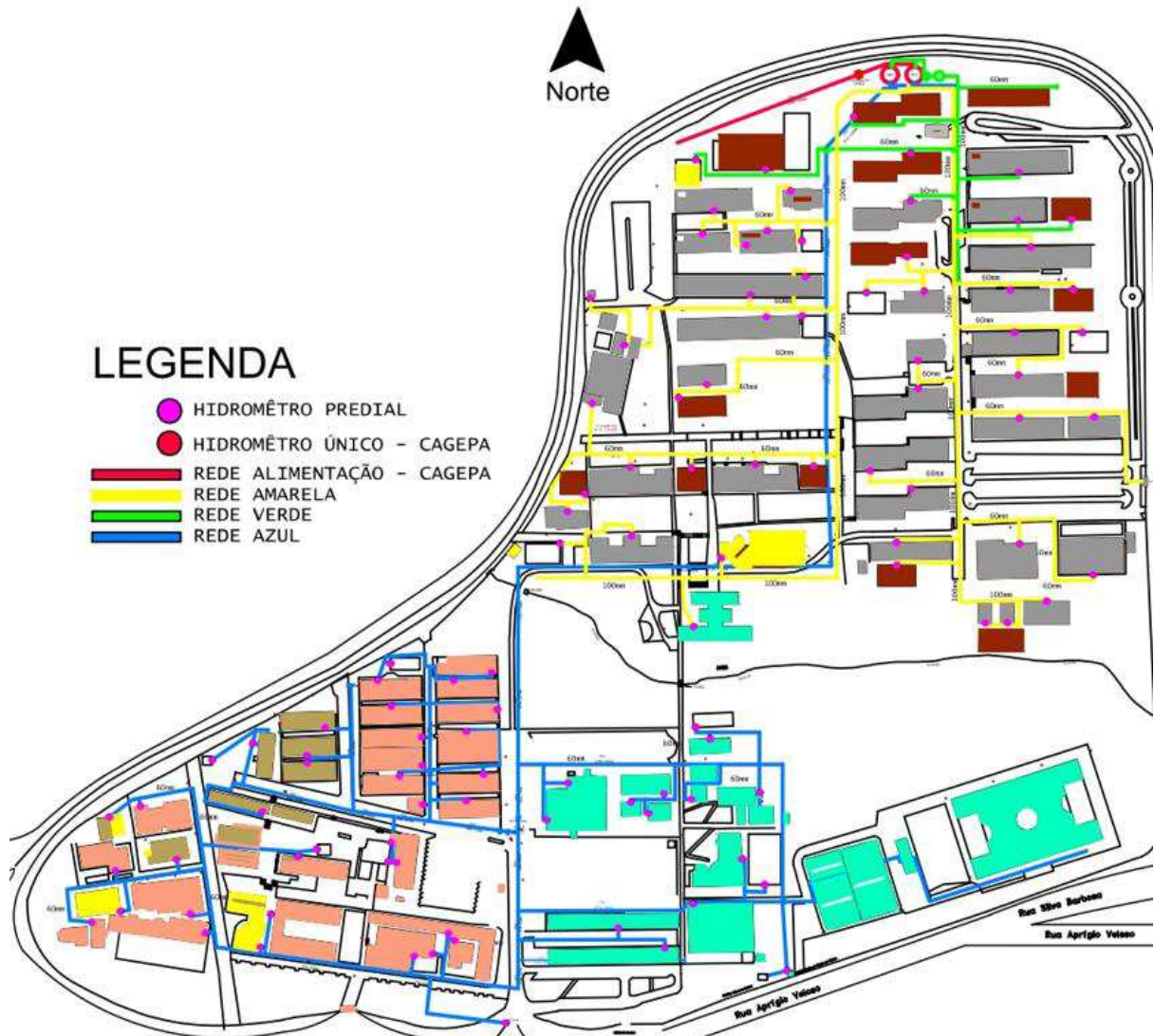
O trecho do sistema de abastecimento utilizado para a instalação do protótipo está localizado no interior do Campus sede da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande-PB.

O Campus ocupa uma área de aproximadamente 31 hectares, subdivididos em três Setores: A, B e C. Possui uma infraestrutura com centro esportivo equipado com quadra poliesportiva, campos de areia e gramado, academia, um restaurante universitário, uma biblioteca central, laboratórios, centrais de aulas e auditórios que totalizam uma área construída de 78.536,79 m², de acordo com dados da Prefeitura Universitária da UFCG. Além dos três setores, ainda existe o setor D, localizado no bairro Novo Bodocongó, externo a área delimitada, que não compõe o estudo.

A rede de abastecimento da instituição está dividida em três zonas representadas na Figura 16 pelas cores azul, verde e amarela. A zona azul é caracterizada por conter a rede de distribuição mais antiga da instituição, abastecendo os prédios localizados nos setores A e B por gravidade, localizados em cotas mais baixas e locais mais distantes dos reservatórios. A zona amarela abastece os blocos situados no setor C, também por gravidade, e alguns blocos do setor A. Por fim, a zona verde abastece as áreas mais elevadas da UFCG, localizadas predominantemente no setor C.

A água da CAGEPA (Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba) chega à instituição a partir de um ramal predial de PVC, com diâmetro de 160 mm e 120 m de comprimento, que transporta a água até três reservatórios principais de armazenamento, sendo dois deles semienterrados e um elevado.

Figura 16 - Rede de distribuição de água da UFCG



Fonte: Autora (2022).

A tubulação principal parte dos dois reservatórios semienterrados para o reservatório elevado com o auxílio de conjuntos motobombas. A partir do reservatório elevado, os blocos são abastecidos por gravidade. A Figura 17 ilustra o posicionamento dos reservatórios do sistema (a) e o conjunto motobomba (b) e o Quadro 5 apresenta algumas especificações dos reservatórios existentes.

As tubulações principais das três zonas possuem diâmetro de 160 mm (azul) e 100 mm (verde e amarela). O sistema de abastecimento da universidade conta também com 110 hidrômetros para o controle eficiente da micromedição da rede.

Figura 17 - Posicionamento dos reservatórios do sistema (a) e o conjunto motobomba (b)



Fonte: Autora (2022).

Quadro 5 - Especificações do Sistema de reservatórios da UFCG

Tipo de reservatório	Características
Reservatórios semienterrados	Instalados em concreto armado na cota mais elevada do Campus (543,50 m) com dimensões de 5,0 m de altura de lâmina d'água por 9,50 m de diâmetro e capacidade de armazenamento de 350 m ³ de água.
Reservatório elevado	Construção em concreto armado, na mesma cota, com capacidade de 100 m ³ , com altura de 9m.

Fonte: Autora (2022).

Os reservatórios são responsáveis por controlar o consumo de água no sistema, garantindo água com quantidade e pressão adequada nos pontos de utilização do Campus central da UFCG.

3.4.2 Instalação e monitoramento do protótipo

Para instalação do protótipo em escala real escolheu-se um trecho retilíneo e sem derivação da tubulação da rede de abastecimento da UFCG localizado no setor C (zona amarela) à jusante dos reservatórios de distribuição, indicado na Figura 18. Nesse trecho foram instalados dois pontos de acesso (1 e 2) com torneiras conforme croqui esquematizado na Figura 19. A escolha do local para o posicionamento dos pontos foi feita após um levantamento topográfico das cotas do terreno.

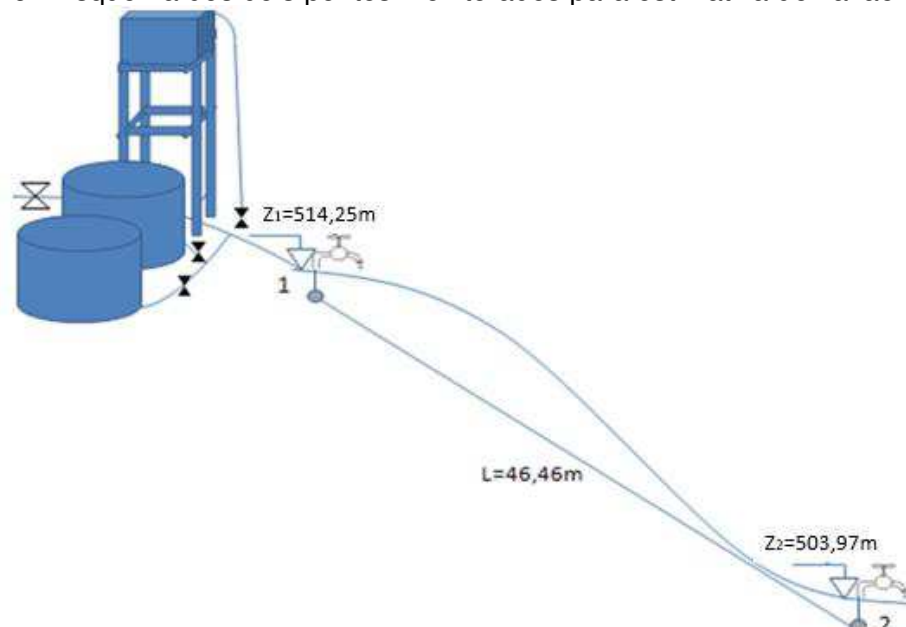
Figura 18 - Posicionamento do protótipo dentro da rede de distribuição de água da UFCG



Fonte: Autora (2022).

O ponto 1, situado em uma cota mais alta (514,25m) que o ponto 2 (503,97m), encontra-se mais próximo ao sistema de reservatório de distribuição, esses dois pontos estavam distanciados aproximadamente 47 metros entre si. A instalação das torneiras nos pontos permitiu a aferição das pressões a partir de um manômetro com engate rápido que era conectado as saídas de água no momento da leitura. Os protótipos foram instalados a montante do ponto 1 e a jusante do ponto 2.

Figura 19 - Esquema dos dois pontos monitorados para estimativa de vazão e pressão



Fonte: Autora (2022).

Para fixação dos protótipos ao sistema foram utilizadas duas luvas de correr com DN 110mm em PBA e no local de instalação construiu-se um abrigo contra intempéries para garantir o perfeito funcionamento das peças principalmente em relação à parte elétrica.

A Figura 20 traz registros fotográficos do procedimento de instalação do protótipo na rede de distribuição estudada.

Figura 20 - Instalação do protótipo macromedidor na rede de distribuição estudada



Fonte: Autora (2022).

No dia anterior à instalação foi realizado o esvaziamento da rede. Com auxílio de uma máquina de corte, retirou-se parte do tubo existente e adicionou-se o protótipo a partir da conexão de duas luvas de correr do mesmo material e diâmetro da rede (PBA – DN:110 mm). A Figura 21 ilustra a caixa de proteção do sistema (21a) e o macromedidor instalado, bem como a conexão dos componentes (21b).

Figura 21 - (a) Caixa protetora (b) Sistema de macromedição instalado



(a)

(b)

Fonte: Autora (2022).

Após a instalação, o registro de manobra à montante do sistema foi aberto novamente, iniciando o preenchimento da rede com água até que toda esta estivesse completamente preenchida. No dia seguinte, realizou-se a instalação dos demais itens nos protótipos, a partir da conexão das extremidades das mangueiras nas tomadas de pressão e no sensor MPX 5700-DP.

A Figura 22 ilustra o modelo de planilha supervisória desenvolvida para aquisição dos dados enviados pelo Protótipo 1.

Figura 22 - Planilha supervisória Protótipo 1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	DATA	PRESSAO	VAZAO								
2	2022/03/14	9.856	0.000107832								
3	2022/03/14	12.175	0.000119846								
4	2022/03/14	152.883	0.000424686								
5	2022/03/14	0.323	0.000019517								
6	2022/03/14	0.293	0.000018607								
7	2022/03/14	0.613	0.000026898								
8	2022/03/14	0.599	0.000026574								
9	2022/03/14	0.801	0.000030746								
10	2022/03/14	0.567	0.000025855								
11	2022/03/14	0.545	0.000025365								
12	2022/03/14	0.529	0.000024973								
13	2022/03/14	0.643	0.000027545								
14	2022/03/14	0.471	0.000023581								
15	2022/03/14	0.613	0.000026898								
16	2022/03/14	0.459	0.000023262								
17	2022/03/14	0.367	0.000020807								
18	2022/03/14	0.473	0.000023632								
19	2022/03/14	0.433	0.000022597								
20	2022/03/14	0.454	0.000023146								
21	2022/03/14	0.357	0.000020517								

Fonte: Autora (2022).

Os dados coletados pelos sensores eram enviados para uma planilha do Google Drive a cada minuto para monitoramento de pressão diferencial e vazão na rede. O microcontrolador NodeMCU enviava os dados de pressão para a Sistema supervisorio, no qual foi adicionada à equação característica da placa de orifício descrita no item 3.2.1 para o cálculo de vazão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados aqui apresentados estão discutidos em três seções: i) desenvolvimento do sistema inteligente para medição de consumo que inclui o projeto, construção e montagem do protótipo macromedidor; ii) processo de calibração e validação em bancada hidráulica e, iii) a instalação na rede de distribuição para monitoramento de vazão.

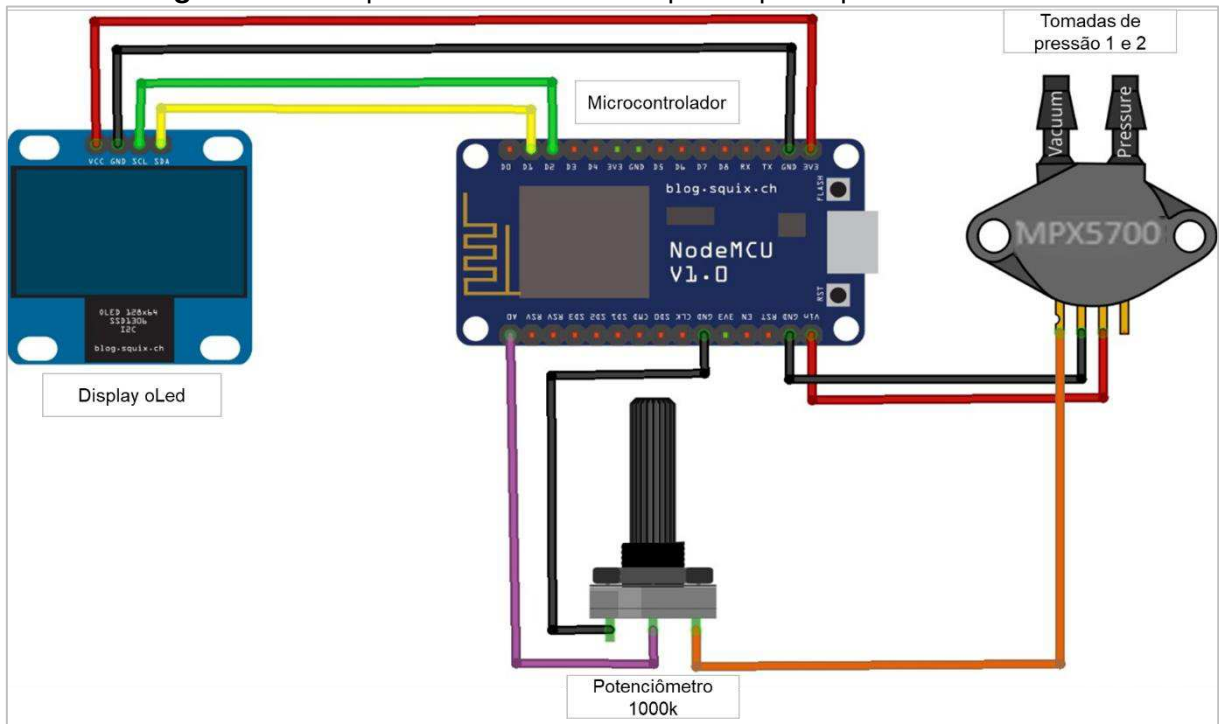
4.1 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA INTELIGENTE PARA MEDIÇÃO DE CONSUMO

O desenvolvimento do sistema inteligente para a medição de consumo de água é uma das contribuições dessa pesquisa. Foram propostos dois tipos de circuitos de placa, 1 e 2, para compor o sistema macromedição, diferenciados pela fonte de energia utilizada. As Figuras 23 e 24 ilustram, respectivamente, a estrutura física dos dois protótipos construídos.

A placa de orifício foi confeccionada para gerar um diferencial de pressão entre as tomadas que estão localizadas à montante e jusante desta. Os dados são coletados e acumulados a cada 1 minuto para a realização da média e, por fim, enviados a um sistema central de monitoramento da rede (Planilhas Google) através de uma conexão wireless.

O protótipo desenvolvido com o Circuito 1 (Figura 23) foi alimentado diretamente da rede de energia elétrica através da instalação de uma tomada localizada próxima aos reservatórios de distribuição de água.

Figura 23 - Componentes do Circuito 1 para o protótipo macromedidor



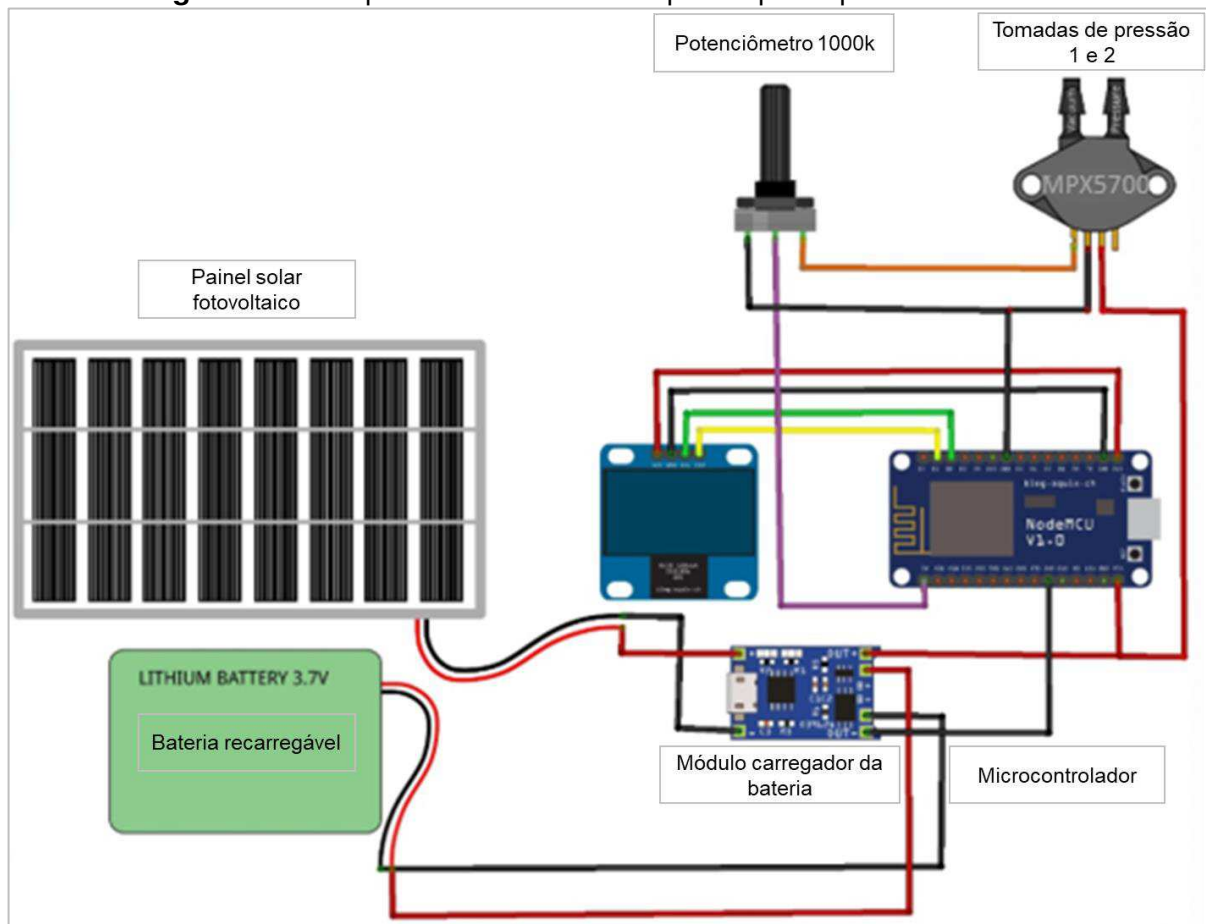
Fonte: Autora (2022).

A voltagem registrada pelo sensor MPX5700-DP é transformada em diferencial de pressão conforme o Manual do fabricante. Na programação, foram inseridas as Equações 3 e 4 que transformam a leitura de pressão em vazão e realiza a correção dos valores encontrados, respectivamente. Estes dados são enviados para a central virtual de monitoramento.

O potenciômetro foi inserido ao circuito com a finalidade de estabilizar a tensão lida. Na extremidade esquerda deste componente foi feita a ligação com o sensor de pressão, o pino central foi ligado a porta analógica A₀ do NodeMCU e a extremidade direita foi conectada ao pino negativo GND do NodeMCU.

O Circuito 2, ilustrado na Figura 24, possui além dos itens contidos no protótipo desenvolvido com o Circuito 1, uma fonte de alimentação mista composta por energia elétrica e solar e feita a partir de um conjunto minipainel fotovoltaico e bateria recarregável integrados que permitem o seu funcionamento com independência média de 24h.

Figura 24 - Componentes do Circuito 2 para o protótipo macromedidor



Fonte: Autora (2022).

Neste caso, além do desenvolvimento de um macromedidor automatizado de baixo custo, também há adoção de um sistema com utilização de energia renovável para alimentação. A ligação adicional representada na Figura 24 possui um mini painel solar, capaz de gerar até 6 volts de tensão com seus conectores ligados às entradas positiva e negativa do módulo carregador de bateria de lítio, recarregada com a energia fotovoltaica.

A Tabela 5 lista os componentes utilizados no desenvolvimento do protótipo com o Circuito 1, bem como os custos unitários e o valor final obtido.

Tabela 5 - Componentes e preços utilizados no macromedidor com circuito 1

COMPONENTE	VALOR (R\$)
Placa de orifício	20,00
Sensor de pressão diferencial MPX5700DP - 700kPa	299,90
Registros para tomada de pressão	26,00
Placa NodeMCU	32,00
Display Oled	29,00
Caixa Protetora	21,90
Acessórios	25,00
TOTAL	R\$ 453,80

Fonte: Autora (2022).

O custo total obtido para o protótipo com circuito 1 foi de R\$ 453,80, valor acessível diante das funcionalidades disponíveis.

Na Tabela 6 estão listados os componentes e valores para o Circuito 2, com valor final de R\$ 499,70, 10,11% superior ao custo do Circuito 1.

Tabela 6 - Componentes e preços utilizados no macromedidor com circuito 2

COMPONENTE	VALOR (R\$)
Placa de orifício	20,00
Sensor de pressão diferencial MPX5700DP - 700kPa	299,90
Registros para tomada de pressão	26,00
Placa NodeMCU	32,00
Placa fotovoltaica	26,00
Bateria recarregável	13,00
Módulo carregador para bateria	6,90
Display Oled	29,00
Caixa Protetora	21,90
Acessórios	25,00
TOTAL	R\$ 499,70

Fonte: Autora (2022).

A alimentação fotovoltaica proposta na composição do Circuito 2 é uma opção sustentável que traz, além da redução dos custos com energia elétrica a longo prazo, um ganho ambiental, pois adota uma energia renovável não poluente.

Dos protótipos macromedidores desenvolvidos, o desenvolvido com Circuito 1 possui menor custo, porém o fornecimento de energia, sendo alimentado apenas por ligação da rede elétrica, não garante a medição em casos eventuais de desligamento da fonte.

Ambos os circuitos propostos nesta pesquisa possuem armazenamento interno e sistemas de recuperação automática integrados para que, no caso de falhas na fonte

de alimentação ou conexão, os dados possam ser enviados posteriormente com a normalização.

A Tabela 7 apresenta o comparativo de custo e descrição do funcionamento dos medidores convencionais mais utilizados para macromedição em redes de distribuição de água e os desenvolvidos na pesquisa.

Tabela 7 - Comparativo de custo dos macromedidores de vazão

Medidor	Custo/Valor de mercado	Descrição
Protótipo macromedidor inteligente – circuito 1	R\$ 453,80	Macromedidor de vazão contínua com DN 100mm o orifício de 50mm. Medição baseada na diferença de pressão gerada pela placa de orifício. Aplicável para vazões superiores a 3m ³ /h e alimentação por rede elétrica
Protótipo macromedidor inteligente – circuito 2	R\$ 499,70	Macromedidor de vazão contínua com DN 100mm o orifício de 50mm. Medição baseada na diferença de pressão gerada pela placa de orifício e lida pelo sensor conectado ao microcontrolador responsável por enviar os dados para planilha supervisória. Aplicável para vazões superiores a 3m ³ /h e alimentação por painel fotovoltaico.
Medidor De Fluxo Vazão Ultrassônico Digital 15 - 100Mm + acessórios	R\$ 3.414,78	Vazão Nominal 60m ³ /h Vazão Máxima 120m ³ /h com Kit de Instalação.
Medidor de Vazão de Líquidos Ultrassônico Digital 50-700 mm + acessórios	R\$ 12.689,00	O método de medição é baseado em sensores ultrassônicos de tempo de trânsito de feixe duplo que determinam o tempo que uma onda sonora ultrassônica leva para percorrer a distância entre os dois sensores localizados no corpo do medidor.
Medidor de vazão ultrassônico CLAMP ON por tempo de trânsito fixo	R\$ 3.134,90	O VUS118 Ultra é um medidor de vazão e de energia ultrassônico que utiliza o princípio de medição por tempo de trânsito e é montado externamente e de maneira rápida e prática à tubulação, dispensando furo ou corte no tubo. O medidor ultrassônico VUS118 tem saída 4-20 mA, protocolo de comunicação Modbus RTU
Hidrômetro Medidor de Água Woltmann Axial DN 100mm (4")	R\$ 3.490,00	A linha de medidores tipo Woltmann com eixo da turbina na posição Horizontal, é ideal para medir grandes volumes de água fria potável, para cobrança, em aplicações comerciais ou industriais e para monitoramento de sistemas de distribuição de água.
Medidor de vazão ultrassônico tipo carretel a bateria	R\$ 15.370,00	Para aplicações em água limpa e líquidos de baixa condutividade. Princípio de funcionamento baseado na medição do tempo de trânsito. Fixo na tubulação e disponível de 50-200 mm.
Medidor de vazão fluxo eletromagnético	R\$ 5.300,00	O princípio de funcionamento de um medidor de vazão eletromagnético é baseado na lei de faraday de indução eletromagnética, que diz que «uma tensão será induzida quando um condutor se move em um campo magnético

Fonte: Pesquisa de mercado feito pela Autora (2022).

Em relação aos custos, conforme apresentado nas Tabelas 5, 6 e 7, os protótipos propostos tanto a partir do circuito 1 quanto do circuito 2 apresentam valores inferiores aos medidores atualmente disponíveis no mercado brasileiro, tendo, portanto, potencial para ser utilizado em larga escala. Obviamente que, além dos custos, outros aspectos relevantes devem ser estudados para conclusões mais definitivas.

Os sistemas propostos permitem a medição *in loco* ou remota, a possibilidade do monitoramento contínuo à distância, fonte de alimentação sustentável e, devido ao baixo custo, possibilitam ampliar a macromedição em sistemas de abastecimento.

Por permitirem o monitoramento contínuo, geram dados que auxiliam a obtenção de curvas de consumo na rede ou setor instalado. Essas curvas são fundamentais para a tomada de decisão em função dos horários de picos e mínimos, tais como o acionamento de uma bomba, uma manobra em uma válvula localizada no sistema, entre outras.

A partir do comparativo apresentado na Tabela 7, é possível observar que os medidores utilizados atualmente no mercado possuem um custo de aquisição significativo, algo que pode influenciar na aquisição destes equipamentos para instalação em sistemas de distribuição de água com pequeno porte. Apesar do comparativo considerar apenas os custos de construção do protótipo macromedidor proposto na pesquisa, os valores são significativamente inferiores aos praticados no mercado com os atuais medidores usados para a mesma finalidade.

Ainda em relação aos dispositivos indicados na Tabela 7, destaca-se o fato de nenhum destes apresentar a funcionalidade de envio dos dados para sistema supervisorio que permita o acompanhamento em tempo real das vazões médias registradas nos macromedidores a partir de tempos previamente estabelecidos na programação. A exceção acontece em casos nos quais é pago um sistema supervisorio a parte, não sendo integrados na venda do equipamento individualmente.

Quanto aos aspectos técnicos e funcionais, um medidor de vazão é considerado preciso quando é testado a partir de três critérios fundamentais: repetitividade, reprodutibilidade e linearidade. Delgado *et al.* (2018) define repetitividade como “a variação dentro do sistema, reproduzida por ensaios que são realizados sob as mesmas condições, sendo correspondente à variabilidade inerente ao equipamento de medição”. Já a reprodutibilidade pode ser entendida como a variação esperada em medições realizadas sob diferentes condições como, por

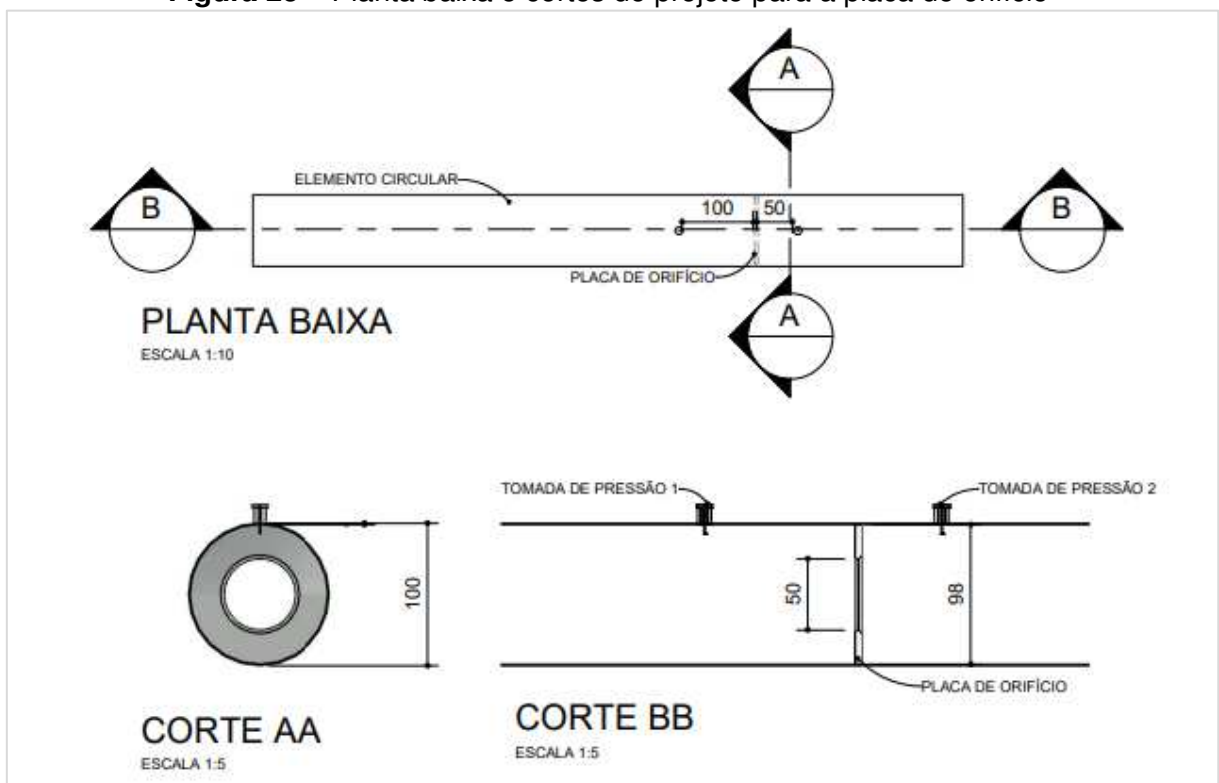
exemplo, a partir da modificação do local ou operador que realiza a leitura. A linearidade diz respeito ao quão próximo de uma reta os dados estão, comportamento observado na etapa de calibração.

Assim, o protótipo desenvolvido, quando avaliado em condições controladas, mostrou-se satisfatório e aplicável quanto a estes aspectos, melhor detalhados na seção 4.2 de calibração e validação do sistema.

4.1.1 Projeto, construção e montagem do macromedidor de vazão

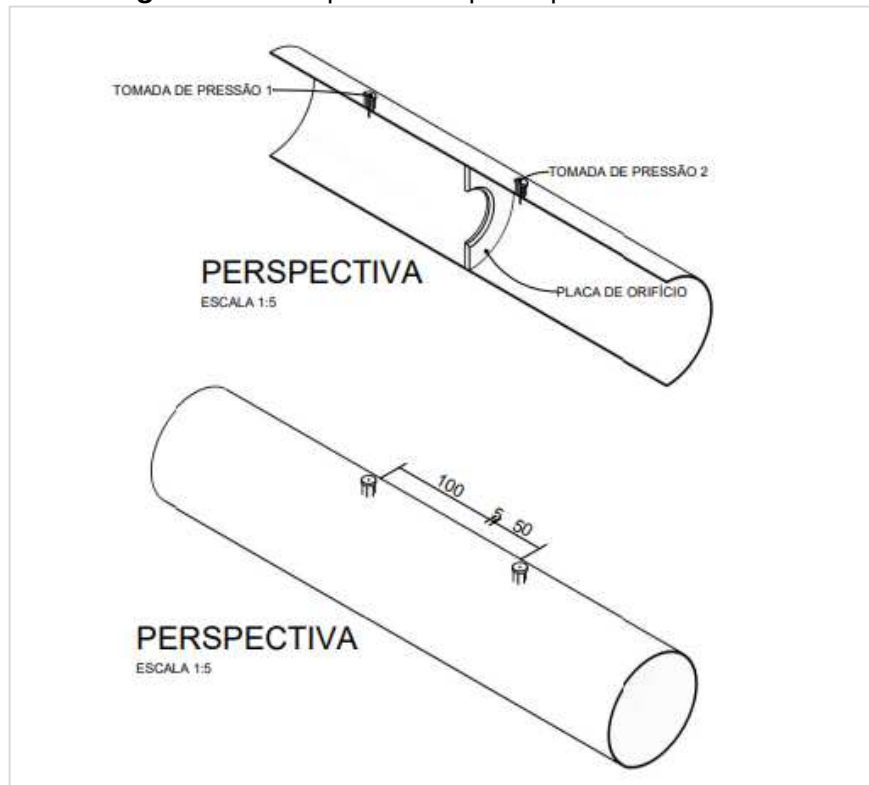
O medidor de vazão escolhido para compor o sistema macromedidor inteligente foi do tipo placa de orifício, com diâmetro de furo de 50 mm, espessura 2 mm e chanfro de 45° na face posterior, tomadas de pressão localizadas a uma distância D (montante) e $\frac{1}{2}D$ (jusante) do orifício, com 1 mm de diâmetro cada. As Figuras 25 e 26 ilustram os detalhes do projeto da placa de orifício, com planta baixa, cortes longitudinal e transversal e perspectiva 3D do protótipo desenvolvido.

Figura 25 – Planta baixa e cortes do projeto para a placa de orifício



Fonte: Autora (2022).

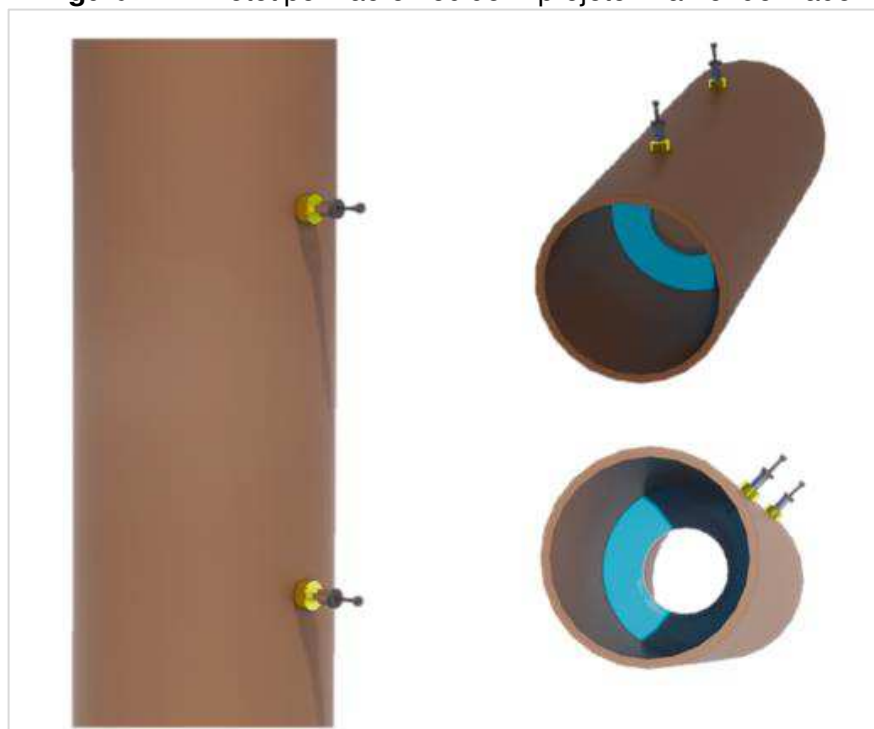
Figura 26 - Perspectiva do protótipo macromedidor



Fonte: Autora (2022).

Após finalizado o projeto, este foi renderizado para tornar a visualização do macromedidor inteligente mais real, conforme mostra a Figura 27.

Figura 27 - Protótipo macromedidor - projeto final renderizado

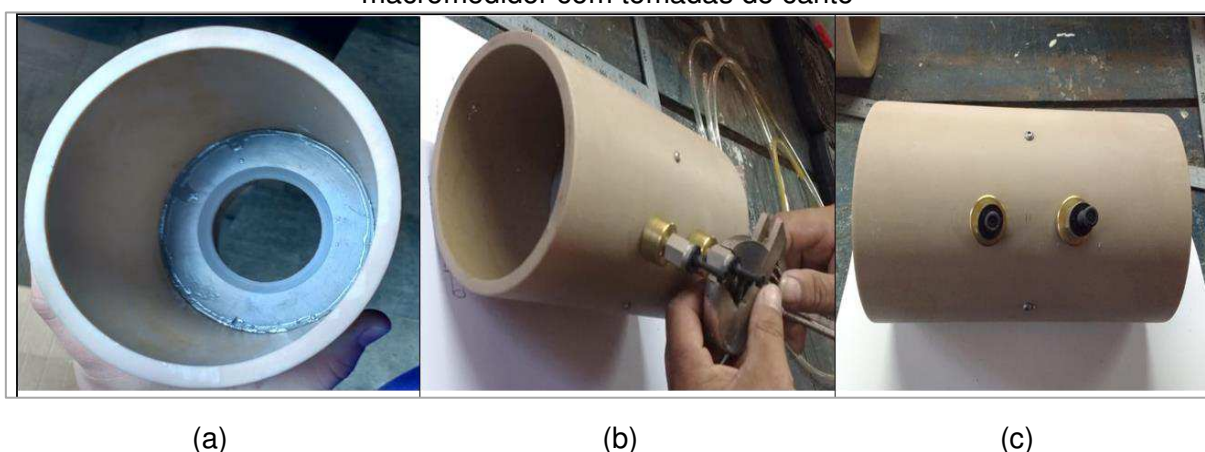


Fonte: Autora (2022).

Finalizada a idealização do projeto e verificação de todos os parâmetros relacionados ao desenvolvimento do macromedidor e instalação das tomadas de pressão, foi realizada a construção do protótipo macromedidor no laboratório de Hidráulica da UFCG. Para tal, utilizou-se uma placa de PVC rígido com 5 mm de espessura, fixada ao tubo de diâmetro 110 mm de PBA (diâmetro externo) com as mesmas características da tubulação presente na rede no qual fora posteriormente instalado. Todos os procedimentos seguiram o normatizado pela NBR nº 5167-1/2008 que trata sobre o desenvolvimento destes dispositivos.

Os detalhes construtivos dos componentes do sistema macromedidor com a placa de orifício e tomadas de pressões são ilustrados na Figura 28a, 28b e 28c.

Figura 28 – Placa de orifício com $D_0=50\text{mm}$ (a), Instalação das tomadas de pressão (b) e macromedidor com tomadas de canto



(a)

(b)

(c)

Fonte: Autora (2022).

Após a construção foram realizadas a calibração e validação em escala reduzida a partir da análise de semelhança para condutos forçados com características similares ao protótipo desenvolvido, conforme apresentado na seção 4.2 a seguir.

4.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MACROMEDIDOR INTELIGENTE EM BANCADA HIDRÁULICA

Os valores de vazão pré-estabelecidos na bancada (rotâmetro) e os valores médios obtidos a partir da Equação 3 para o manômetro GullPress 1000 e o sensor MPX5700-DP estão dispostos na Tabela 8. A escolha das vazões foi realizada em função da capacidade de bombeamento da bancada hidráulica.

Tabela 8 - Resultados obtidos através da calibração - bancada hidráulica

Rotâmetro		Manômetro GullPress 1000			Sensor MPX 5700-DP				
Q rot ¹ (m ³ /h)	V ² (m/s)	Reynolds	Cd ³	P1 (Pa)	P2 (Pa)	ΔP ⁴ (Pa)	Qman ⁵ (m ³ /h)	ΔP (Pa)	Qsensor ⁶ (m ³ /h)
2.25	0,22	13262,88	0,598	47200	21150	26050	1.76	32000	1.95
2.5	0,24	14736,53	0,598	63000	8400	54600	2.54	66000	2.80
2.75	0,27	16210,18	0,598	74950	6830	68120	2.84	73000	2.94
3	0,29	17683,84	0,598	89000	12500	76500	3.42	88000	3.23
3.25	0,31	19157,49	0,598	102200	21000	81200	3.10	84000	3.15
3.5	0,34	20631,14	0,598	117400	15800	101600	3.81	107000	3.56
3.75	0,36	22104,80	0,598	135800	29500	106300	3.55	104000	3.51
4	0,39	23578,45	0,598	150400	19900	130500	4.21	134000	3.98
4.25	0,41	25052,10	0,598	178250	32600	145650	4.15	146000	4.16
4.5	0,44	26525,76	0,598	189350	25250	164100	4.41	163000	4.39

¹ Q rot: Vazão do rotâmetro

² v: velocidade média

³ Cd: Coeficiente de descarga

⁴ ΔP : Diferença de pressão (P1 – P2)

⁵ Qman: Vazão a partir do manômetro

⁶ Q sensor: Vazão a partir do sensor MPX 5700-DP

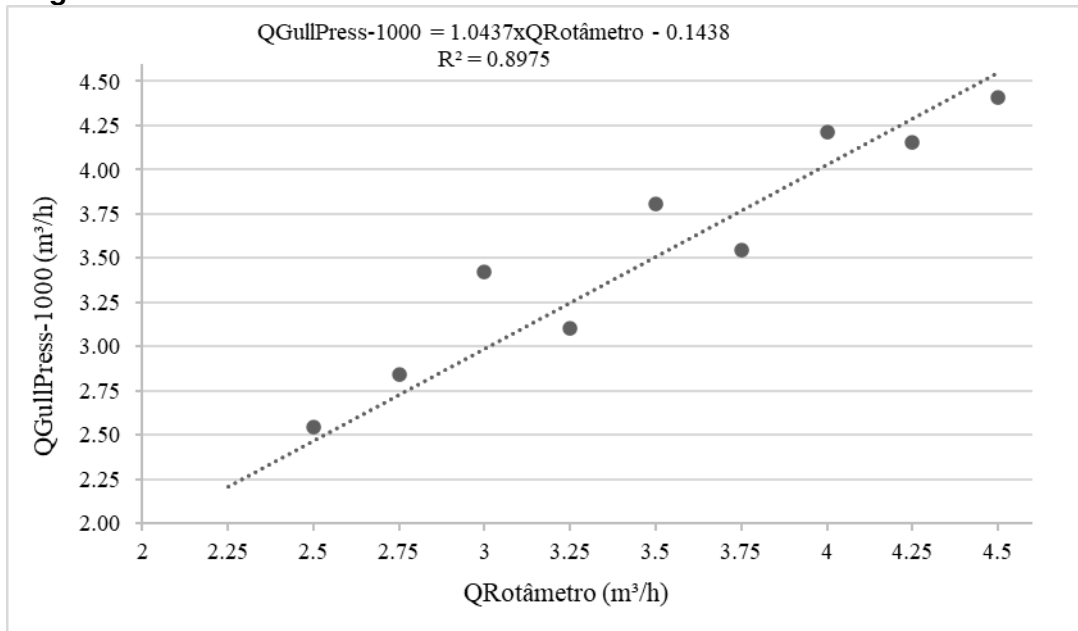
Fonte: Autora (2022).

Curvas de calibração e validação foram geradas com os valores obtidos pelo sensor de pressão MPX 5700-DP e as leituras pelos medidores de referência, rotâmetro e manômetro Gull Press 1000. Realizaram-se comparações par a par entre os medidores conforme ilustradas nas Figuras 29 a 31.

Os dados médios de vazão foram avaliados estatisticamente, sendo ilustrados a seguir os resultados obtidos e as considerações referentes ao uso destes medidores em sistemas de transporte de água.

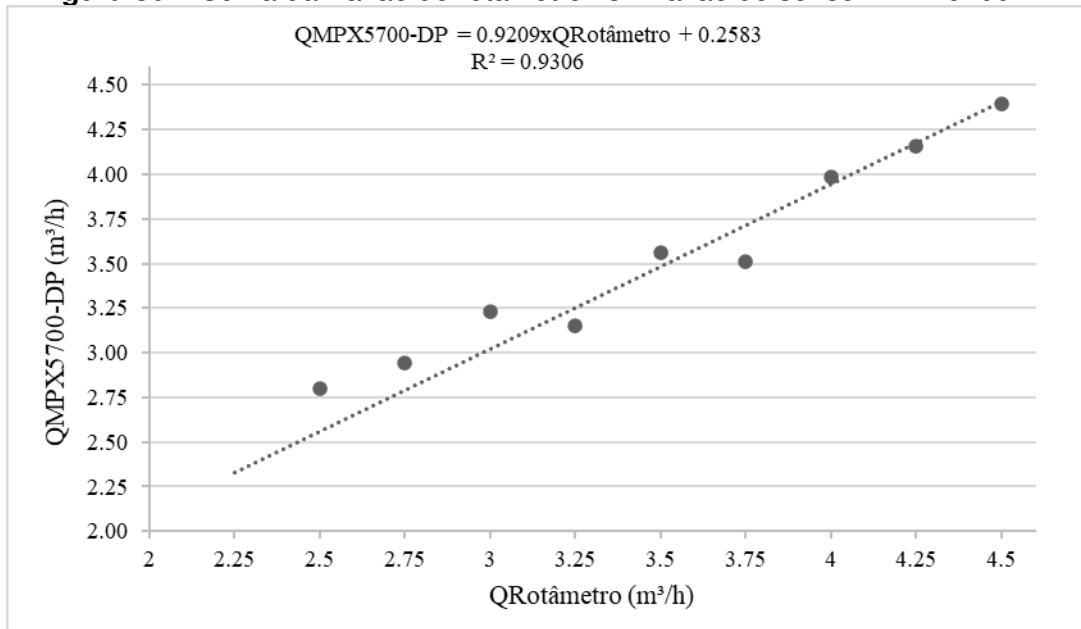
A Figura 29 apresenta o traçado da curva de vazão do manômetro em função da vazão lida no rotâmetro.

A correlação das vazões entre estes medidores é considerada alta, com coeficiente de determinação $R^2=0,8975$. Além da correlação, foi possível obter também a equação da linha de tendência a partir da comparação entre os resultados obtidos em ambos os medidores, sendo o coeficiente angular da reta ($\alpha=1,0437$) e o coeficiente linear de 0,1438. O valor encontrado para a correlação é considerado satisfatório, uma vez que os mecanismos de medição são diferentes, enquanto o Rotâmetro realiza leituras diretas de vazão, o manômetro GullPress 1000 o faz a partir do diferencial de pressão gerado na placa e a medida indireta de vazão a partir da Equação 3.

Figura 29 - Curva vazão do rotâmetro vs. vazão do manômetro Gull Press-1000

Fonte: Autora (2022).

O comparativo dos dados obtidos para o rotâmetro e o sensor de pressão MPX5700-DP está ilustrado na Figura 30.

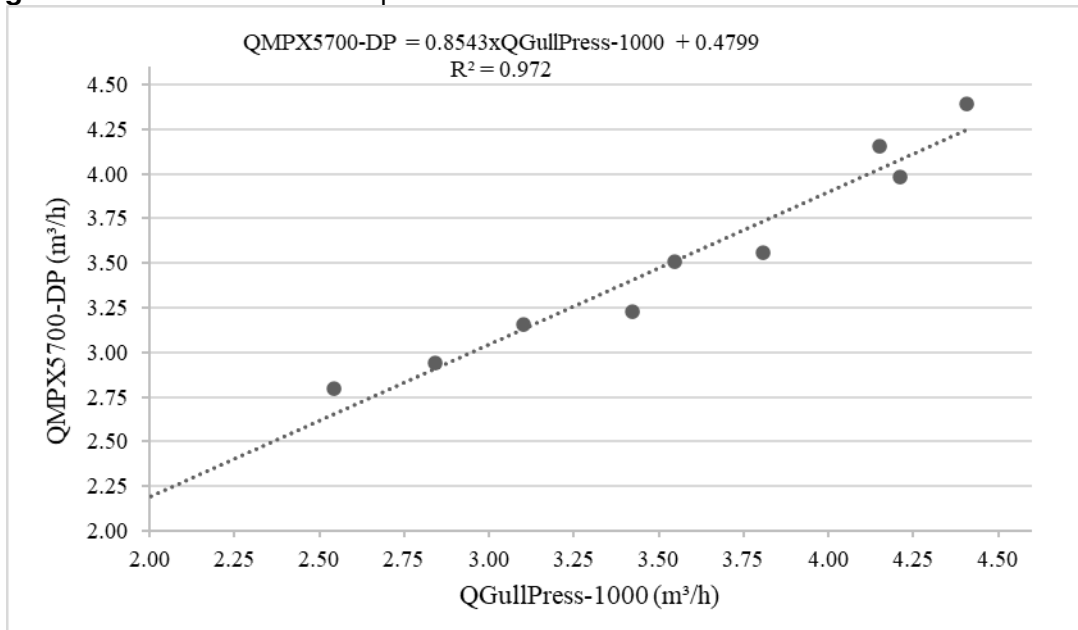
Figura 30 – Curva da Vazão do rotâmetro vs. Vazão do sensor MPX 5700-DP

Fonte: Autora (2022).

O valor da correlação obtido entre o rotâmetro e o sensor MPX 5700-DP foi classificada como alta, R²=0,9306, sendo possível utilizá-lo com precisão para medição de vazão a partir de medidores deprimogênios.

Por fim, é apresentado na Figura 31 o gráfico com os dados de vazões obtidos a partir do manômetro GullPress 1000 (eixo x) e do sensor MPX 5700-DP (eixo y). Esta comparação é importante, uma vez que as vazões em ambos os medidores são obtidas a partir do diferencial de pressão na placa de orifício.

Figura 31 – Curva da vazão a partir do manômetro vs. Vazão do sensor MPX 5700-DP



Fonte: Autora (2022).

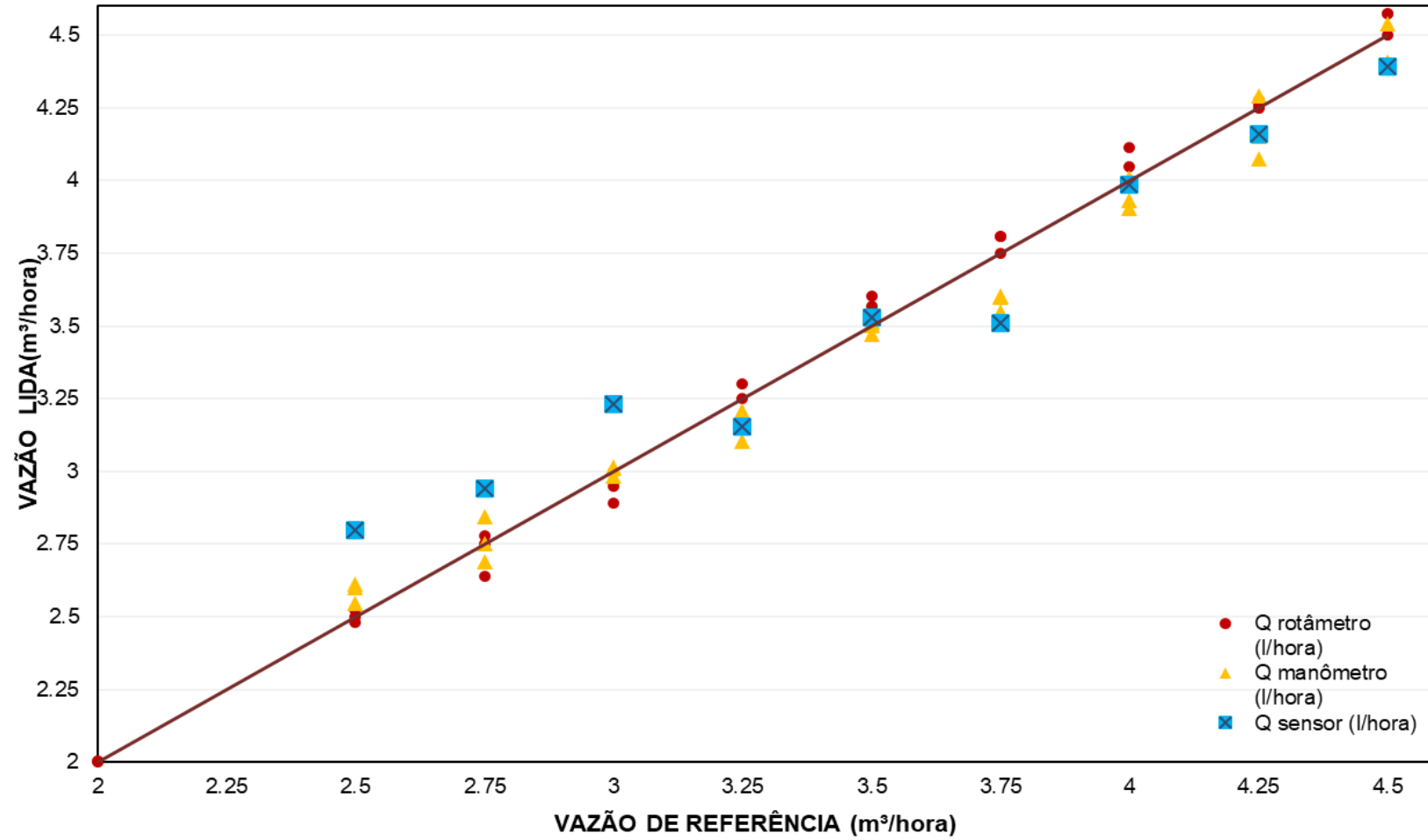
A correlação obtida neste caso ($R^2=0,972$) entre os dois medidores foi maior que a obtida na comparação entre o rotâmetro e o sensor MPX 5700-DP ($R^2=0,9306$), sendo classificada como muito forte.

Os resultados observados a partir das curvas de calibração com inserção de linha de tendência linear mostraram que tanto a calibração do sensor realizada com o rotâmetro quanto com o manômetro e placa de orifício obtiveram resultados satisfatórios, o que apontam que o sensor MPX5700-DP pode ser usado para medir vazões precisamente em tubulações de abastecimento de água, associado a medidores deprimogênios, neste caso a placa de orifício.

A análise a partir da regressão linear apresentou um ótimo ajuste dos dados aos modelos de referência, sendo possível utilizar o sensor MPX 5700-DP com precisão satisfatória para medição de vazão associada a medidores deprimogênios.

A Figura 32 apresenta os valores obtidos para os 3 medidores (rotâmetro, manômetro GullPress-1000 e sensor MPX5700-DP) juntos, plotados em relação à reta de vazão de referência usada na pesquisa.

Figura 32 - Dados obtidos para os três medidores comparados e a vazão de referência (m³/s)



Fonte: Autora (2022).

É possível observar a variação das leituras realizadas nos três medidores com relação aos valores esperados (vazão de referência). Para o sensor MPX 5700-DP, os desvios são menores para vazões superiores a 3 m³/hora, aproximando-se significativamente dos valores de referência. Para a vazão 3,75 m³/hora, as leituras obtidas no sensor MPX 5700-DP e no manômetro GullPress 1000 variaram em relação ao esperado, afastando da reta. Já para as vazões maiores que 3,75 m³/hora, os resultados convergem para o valor de referência novamente.

Quando comparadas apenas as leituras do sensor MPX 5700-DP e do manômetro GullPress 1000 na Figura 32, percebe-se que estes valores são mais próximos, o que pode ser justificado pelos mecanismos de leitura que é diferente do existente no rotâmetro.

Na Tabela 9 são listados os erros calculados entre as médias de vazões dos medidores de referência e o sensor MPX 5700-DP para as vazões estudadas.

Tabela 9 - Erro percentual das vazões médias no sensor MPX 5700-DP em relação aos medidores de referência

Q (m ³ /hora)	Erro percentual - Q _{MPX 5700-DP} em relação a Q _{rotameter}	Erro percentual - Q _{MPX 5700-DP} em relação a Q _{GullPress- 1000}
2.25	2,56%	10,83%
2.5	11,93%	9,95%
2.75	7,00%	3,52%
3	7,68%	7,25%
3.25	2,90%	1,71%
3.5	1,75%	1,66%
3.75	6,38%	1,09%
4	0,38%	1,33%
4.25	2,14%	0,12%
4.5	2,35%	0,34%

Fonte: Autora (2022).

É possível inferir da Tabela 9 que, para vazões inferiores a 3 m³/hora, os erros percentuais foram elevados em relação aos medidores de referência, apresentando resultados superiores a 2,5%, erro previsto pelo fabricante do sensor componente do protótipo inteligente de macromedição. Assim, entende-se que sua aplicação não é adequada para medições de vazão inferiores a essa.

Em contrapartida, para valores superiores a 3 m³/hora, os erros das leituras do sensor MPX5700-DP em relação ao manômetro GullPress-1000 mostraram-se

inferiores ao previsto no manual de fabricação, sendo possível validar o sistema medidor desenvolvido, uma vez que a finalidade da pesquisa é a aplicação em redes de abastecimento de água, onde as vazões são maiores que o valor indicado.

Como os erros percentuais das leituras realizadas pelo rotâmetro apresentaram alguns valores divergentes do valor de referência esperado, conforme observado na Tabela 9, mesmo quando consideradas somente as vazões superiores a 3 m³/hora, optou-se por escolher o manômetro GullPress-1000 como medidor para calibração do protótipo inteligente. Esta escolha deve-se aos resultados obtidos tanto pela análise de regressão linear quanto pela comparação a partir dos erros percentuais, o que refletiu em valores mais confiáveis para o protótipo desenvolvido.

Como uma das finalidades do estudo foi desenvolver um protótipo inteligente de macromedição de água em redes de distribuição, o sensor MPX5700-DP mostrou-se útil para esta finalidade, uma vez que pela análise de calibração em bancada experimental, para vazões maiores os valores obtidos por ele se aproximaram consideravelmente dos reais, com erros inferiores a 2,5%.

A média da macromedição de vazão em sistemas de abastecimento de água na Paraíba é de 49,42%, valor baixo em relação às médias da região Nordeste (69%) e do Brasil (81,6%) segundo dados do SNIS (2021). Desse modo, o protótipo apresenta-se como uma solução viável para instalação em sistemas de água, o que permite a medição em redes de maneira prática e com baixo custo quando comparado aos demais medidores disponíveis no mercado, como os ultrassônicos que possuem valores muito elevados para a realidade das concessionárias do serviço no país.

Ao mesmo tempo, as perdas na distribuição de água estão ligadas à falta de medição, no qual os índices atingiram percentuais de 38,2% na Paraíba, 46,3% no Nordeste e de 40,1% no Brasil (SNIS, 2021). Assim, o protótipo inteligente é uma alternativa viável para aplicação de medições em redes como também para a identificação de perfis de consumos de água e pressões atípicas em sistemas que podem indicar perdas de água, sejam elas físicas ou de faturamento.

4.2.1 Análise estatística dos dados obtidos na calibração e validação do sistema macromedidor inteligente de vazão

Os dados obtidos com os três medidores foram analisados a partir da aplicação dos testes estatísticos, com intuito de avaliar a parametrização e homogeneidade.

4.2.1.1 Teste de normalidade

O teste de normalidade parte do atendimento de três pressupostos: a verificação de distribuição normal, a homogeneidade da variância e a presença de outliers. Os resultados obtidos para esta análise estão contidos na Tabela 10.

Tabela 10 - Testes estatísticos dos pressupostos iniciais

Shapiro-Wilk Test			
	Vazão Rotâmetro (m ³ /h)	Vazão a partir do manômetro (m ³ /h)	Vazão a partir do sensor (m ³ /h)
W-stat	0,9705782	0,975897299	0,968282826
p-value	0,8961537	0,939505813	0,874483247
Alpha	0,05	0,05	0,05
Normal	yes	yes	Yes
H0: Os dados seguem uma distribuição normal.			
H1: Os dados não seguem uma distribuição normal.			
Levene's Tests			
Type	p-value		
means	0,919044508		
medians	0,919072711		
trimmed	0,919044508		
H0: As variâncias são homogêneas.			
H1: As variâncias não são homogêneas			
Outliers Test			
	Vazão Rotâmetro (m ³ /h)	Vazão a partir do manômetro (m ³ /h)	Vazão a partir do sensor (m ³ /h)
Outliers	None	None	None

Fonte: Autora (2022).

O teste de Shapiro-Wilk apresentou p-valor (*p-value*) superior a 0,05 para todos os medidores, o que indica que os dados possuem uma distribuição normal. Portanto, aceita-se a hipótese nula no teste. Isto significa que não há diferença significativa entre as médias para a faixa de vazão estabelecida na pesquisa, sendo todos estes métodos adequados para esta medição.

O teste de Levene foi aplicado para avaliar a homogeneidade de variância. A análise com as médias apresentou um p-valor=0,919, superior a 0,05. Assim, confirmou-se o obtido pelo teste de Shapiro-Wilk, no qual as variâncias são homogêneas a partir da inferência do teste aplicado.

Além disto, o teste para verificar a presença de Outliers realizado pelo programa aferiu a ausência destes para os três métodos de medição avaliados.

4.2.1.2 Análise de Variância de fator único – ANOVA

Os resultados obtidos para a análise de variância de uma via, o teste de Tukey e o Q teste estão descritos na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados obtidos para ANOVA de uma via

ANOVA									
Sources	SS	df	MS	F	P value	Eta-sq	RMSSE	Omega Sq	
Between Groups	4,97E-09	2	2,49 E- 09	0,05597 49	0,94567 23	0,00412 92	0,07481 64	- 0,06716 18	
Within Groups	1,20E-06	27	4,44 E- 08						
Total	1,20E-06	29	4,15 E- 08						
Teste de Tukey									
TUKEY HSD/KRAM ER			alpha	0,05					
<i>group</i>	<i>mean</i>	<i>n</i>	<i>ss</i>	<i>df</i>	<i>q-crit</i>				
Vazão Rotâmetro (m ³ /h)	0,000937 1	10	3,97 E- 07						
Vazão a partir do manômetro (m ³ /h)	0,000909 4	10	4,36 E- 07						
Vazão a partir do sensor (m ³ /h)	0,000936 3	10	3,66 E- 07						
		30	1,20 E- 06	27	3,506				
Q Test									
group 1	group 2	mean	std err	q-stat	lower	upper	p-value	mean- crit	Cohen d
Vazão Rotâmetro (m ³ /h)	Vazão a partir do manômet ro (m ³ /h)	2,77E -05	6,66 E- 05	0,41565 7	-0,00021	0,00026 1	0,95357 8	0,00023 4	0,1314 42
Vazão Rotâmetro (m ³ /h)	Vazão a partir do sensor (m ³ /h)	8,00E -07	6,66 E- 05	0,01200 5	-0,00023	0,00023 4	0,99996	0,00023 4	0,0037 96
Vazão a partir do manômetro (m ³ /h)	Vazão a partir do sensor (m ³ /h)	2,69E -05	6,66 E- 05	0,40365 2	-0,00021	0,00026 1	0,95615 8	0,00023 4	0,1276 46

H0: As médias dos grupos são iguais

H1: As médias dos grupos são diferentes

Fonte: Autora (2022).

A Anova de fator único mostrou que não existe diferença entre as médias, com o p -valor (p -value) obtido de 0,9456. O *post-hoc* de Tukey também confirmou que não há diferença entre as médias apresentadas. Portanto, aceita-se a hipótese nula, no qual as médias dos grupos são iguais.

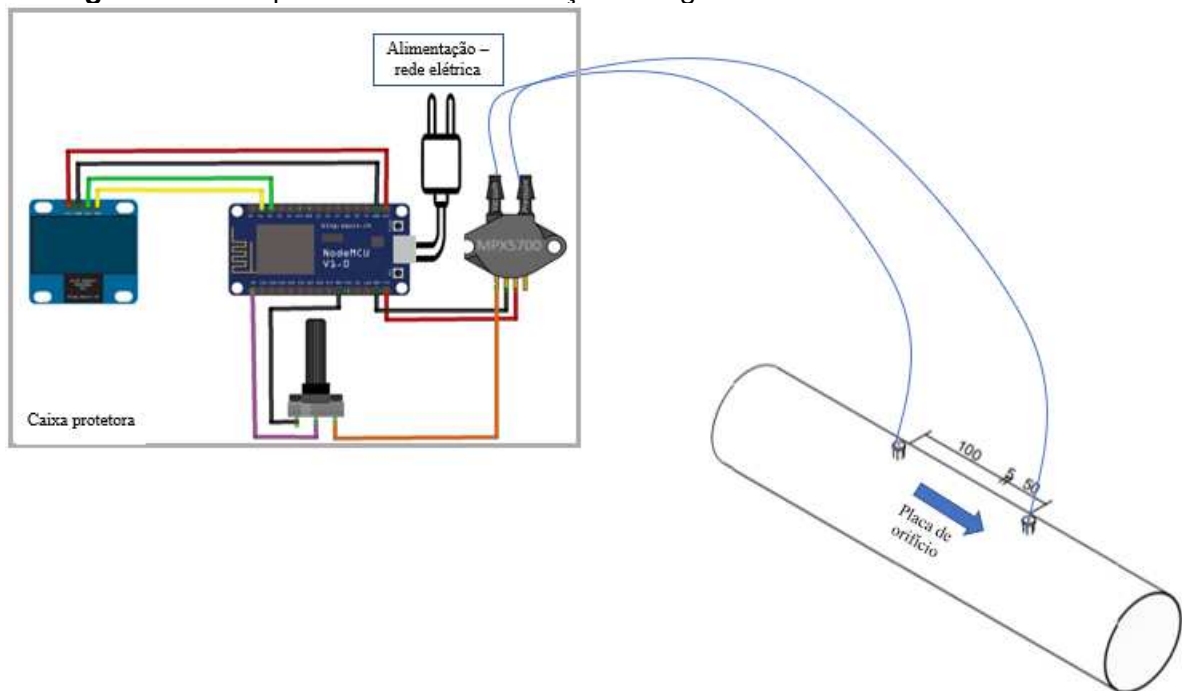
É possível afirmar que a medição realizada pelo sensor MPX 5700-DP, assim como as obtidas pelos outros medidores de referência calibrados, apresenta valores adequados e pode ser usado para medição de vazão nas faixas avaliadas.

Após validação em bancada hidráulica, o protótipo foi instalado em um sistema de abastecimento de pequeno porte para monitoramento e análise da sua eficiência.

4.3 RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DA LEITURA DOS PROTÓTIPOS INSTALADOS NA REDE

A Figura 33 mostra o croqui esquemático com o protótipo executado e seus componentes em funcionamento instalados na rede.

Figura 33 - Croqui do sistema de medição inteligente de vazão em funcionamento



Fonte: Autora (2022).

O protótipo mostrou-se eficiente e adequado para a função de medição de vazão proposta, podendo ser amplamente aplicado em sistemas de distribuição de água com baixo custo.

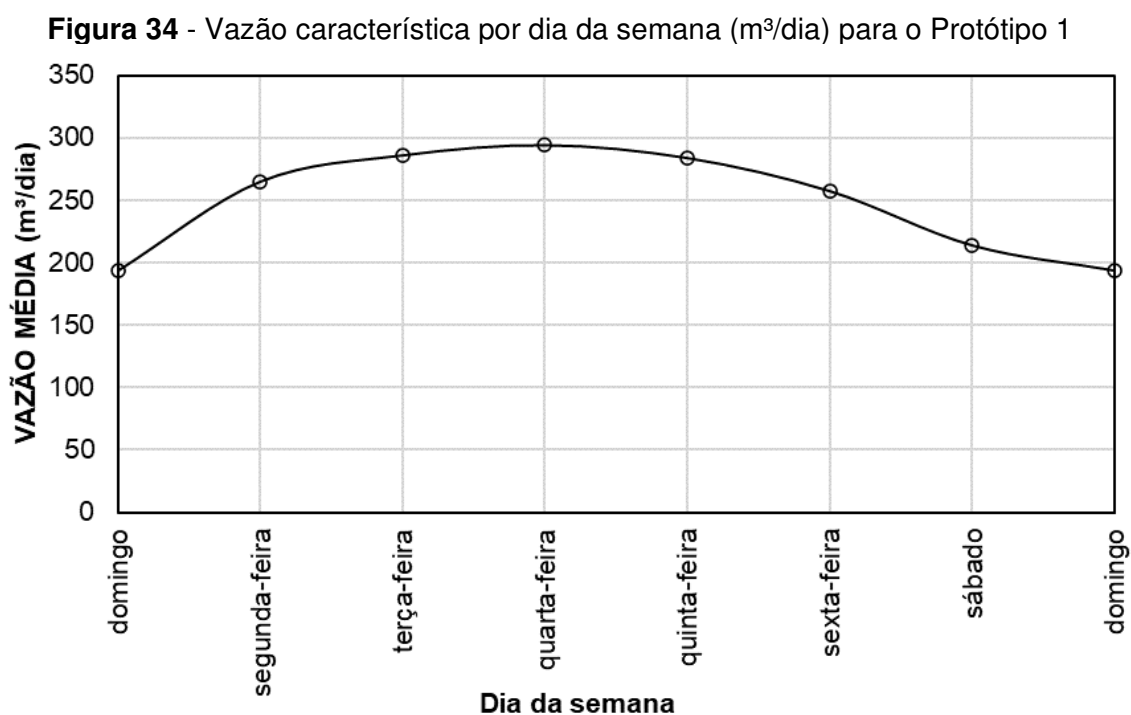
As curvas ilustradas nas Figuras 34 a 36 foram geradas com os valores obtidos nos dois sensores considerando os seguintes períodos de medição e análise de

dados: 29/11/2021 a 05/01/2022 para o protótipo 1 e 29/11/2021 a 15/01/2022 para o protótipo 2.

4.3.1 Análise de vazão - Protótipo 1

A curva característica gerada para vazão média por dia da semana é ilustrada na Figura 34.

Foi possível observar que a vazão registrada durante a semana atinge valores mínimos aos sábados (213,62 m³/dia) e domingos (193,42 m³/dia). Este resultado já era esperado, uma vez que, durante os finais de semana, as atividades administrativas, ensino e pesquisa são reduzidas significativamente. Boa parte deste consumo é referente à área esportiva da UFCG, na qual são realizados jogos em diferentes modalidades e horários que geram um consumo de água maior nos banheiros e bebedouros e que justificam esse consumo médio diário.



Fonte: Autora (2022).

Ainda em relação a Figura 34, observa-se que os valores máximos de vazão registradas foram as quartas-feiras (293,85 m³/dia). A análise de vazão característica por dia da semana é uma informação fundamental para a operação de reservatórios, pois permite ao gestor entender as demandas a partir do consumo médio e avaliar os possíveis incrementos de vazão a curto, médio e longo prazo na rede de distribuição.

Na Figura 35 é apresentado o gráfico obtido para a vazão média, com dados de consumo médio diário de 29/11/2021 a 05/01/2022. A partir da curva do consumo diário, são observados dois períodos no qual a vazão diária foi menor: durante os dias 24 a 26 de dezembro de 2021 e de 30 de dezembro de 2021 a 05 de janeiro de 2022. Estes períodos representam o recesso e paralização das atividades na instituição de ensino, justificando a coerência das leituras informadas.

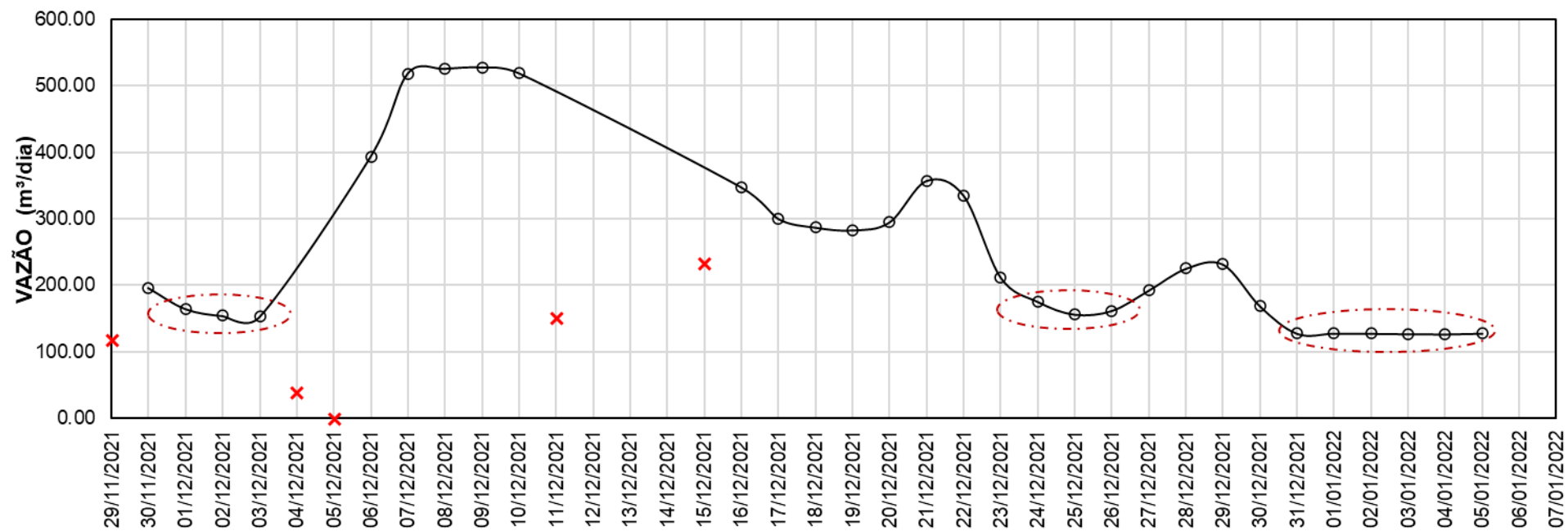
Já durante os dias 29 de novembro 2021 e 03 de dezembro de 2021, no qual o consumo diário também foi inferior a 200m³/dia, não há justificativas significativas para os baixos valores, necessitando de estudos mais aprofundados. Entretanto, é importante ressaltar que no intervalo avaliado a maioria das atividades ainda estavam sendo realizadas de maneira remota, com redução de alunos e servidores nos laboratórios e outras áreas, o que poderia justificar o baixo consumo registrado.

Os valores máximos de consumo foram observados durante os dias 07 a 10 de dezembro de 2021, superando os 500 m³/dia. Em alguns dias do período estudado o os dados de consumo registrados foram desconsiderados devido a inconsistências geradas pela paralisação do protótipo por algumas horas, o que gerou falhas nas informações enviadas.

A partir da Figura 36, é possível destacar que a hora de maior consumo na rede de distribuição estudada é às 09:00h, com vazão média de 11,90m³/hora. Já a hora que apresentou o menor consumo médio na rede foi às 08:00h, com vazão de 10,23 m³/hora. Este valor obtido para às 08:00h é questionável, uma vez que é a hora na qual as atividades se intensificam na instituição estudada. Observando a série de dados, foi possível perceber que essa é a hora em que o sensor apresenta mais falhas no envio de dados. Dos 34 dias monitorados, 5 dias há falta de dados neste horário, o que pode corroborar para o valor observado abaixo do esperado, sendo importante a partir de dados pré-existentes ou novas observações realizar um preenchimento de falhas neste intervalo. Com relação à vazão média horária no sistema, obteve-se um valor de 10,91 m³/hora.

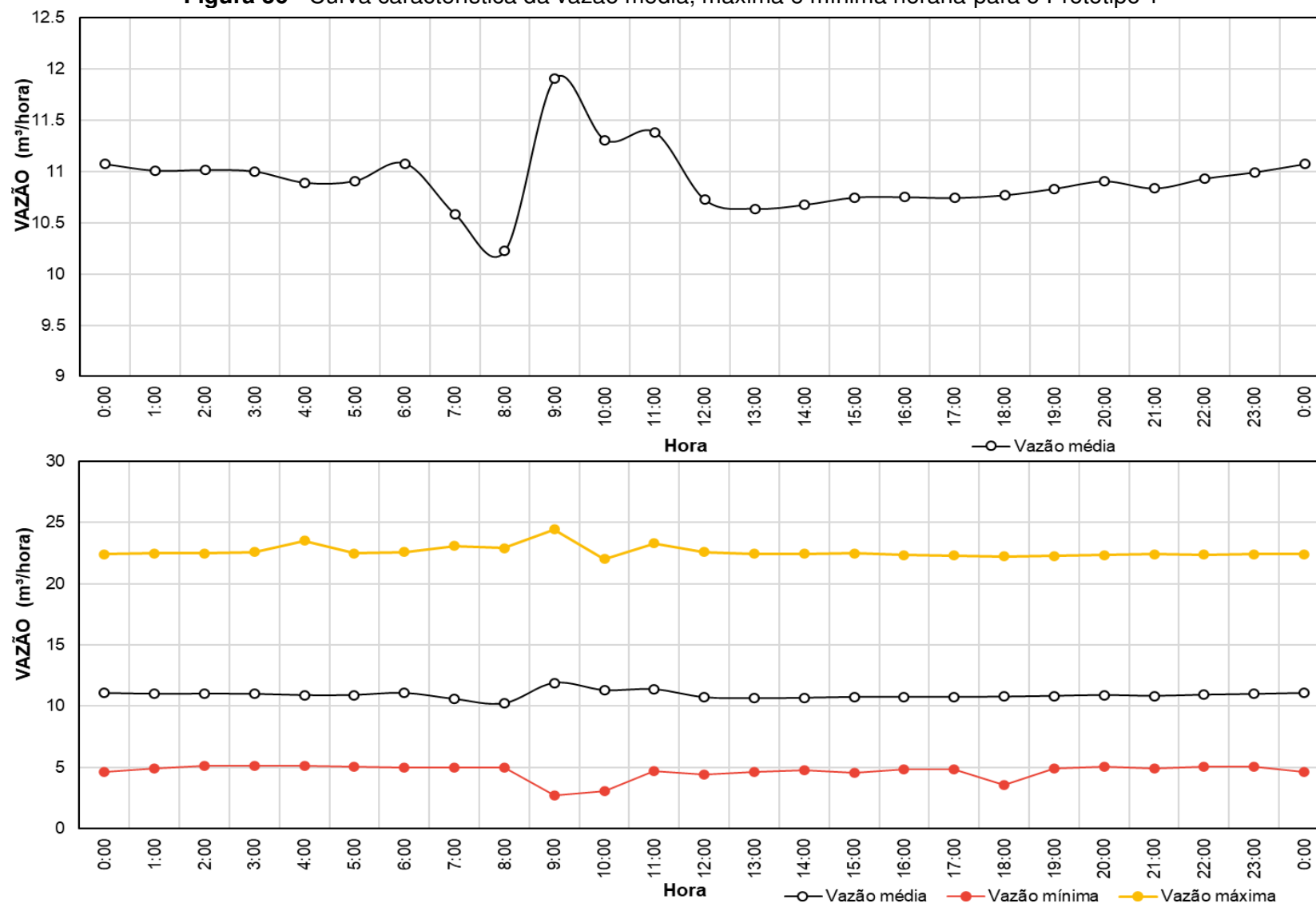
Ainda na Figura 36 são ilustrados os valores máximos, médios e mínimos horários, informação importante para o planejamento e a gestão futura na rede de distribuição, inclusive para verificar horários críticos de abastecimento, como o valor de vazão média máxima observada, na ordem de 22,62 m³/hora e a vazão mínima com valor médio de 4,65m³/hora.

Figura 35 - Vazão diária média para o Protótipo 1



Fonte: Autora (2022).

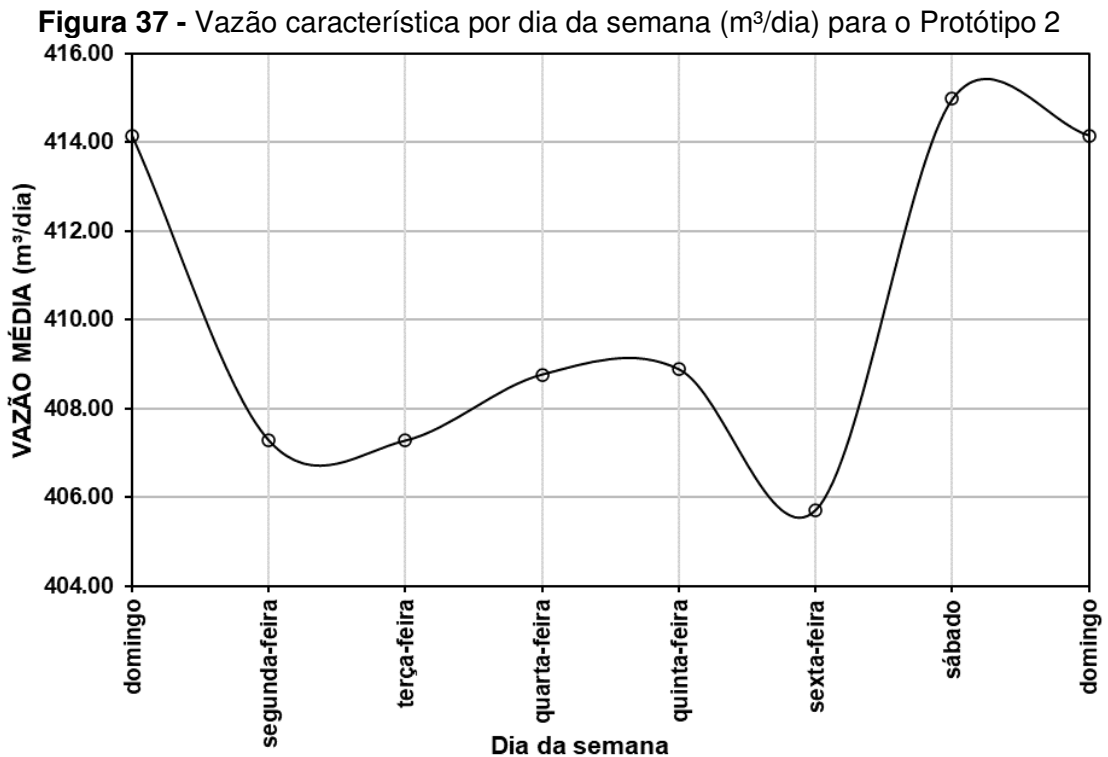
Figura 36 - Curva característica da vazão média, máxima e mínima horária para o Protótipo 1



Fonte: Autora (2022).

4.3.2 Análise de vazão - Protótipo 2

Para o protótipo 2, foi realizada a coleta de 9.967 dados durante o recorte temporal de 29 de novembro de 2021 até 15 de janeiro de 2022, o período de observação diverge do Protótipo 1 em razão de parada do equipamento e necessidade de substituição. A Figura 37 apresenta a curva de consumo médio por dia da semana durante o período observado.



Fonte: Autora (2022).

Foi possível observar que a vazão registrada durante a semana atinge seu valor máximo no sábado (414,98 m³/dia), e o mínimo na sexta-feira (405,7 m³/dia). Esta série de dados diverge da obtida pelo protótipo 1, mesmo com grande parte da série de dados sendo coletadas simultaneamente. Algumas razões que justificam a divergência dos dados são a maior exposição do sensor à umidade, as falhas de conexão para envio dos dados e as dificuldades obtidas para manter o controlador funcionando, visto que em algumas horas diárias do período avaliado houve o desligamento do aparelho para uso da tomada existente no local em outros equipamentos, por exemplo: furadeiras e betoneiras, já que ocorria a execução de

uma obra nas proximidades e os colaboradores da obra utilizavam a tomada exclusiva do protótipo para outros fins.

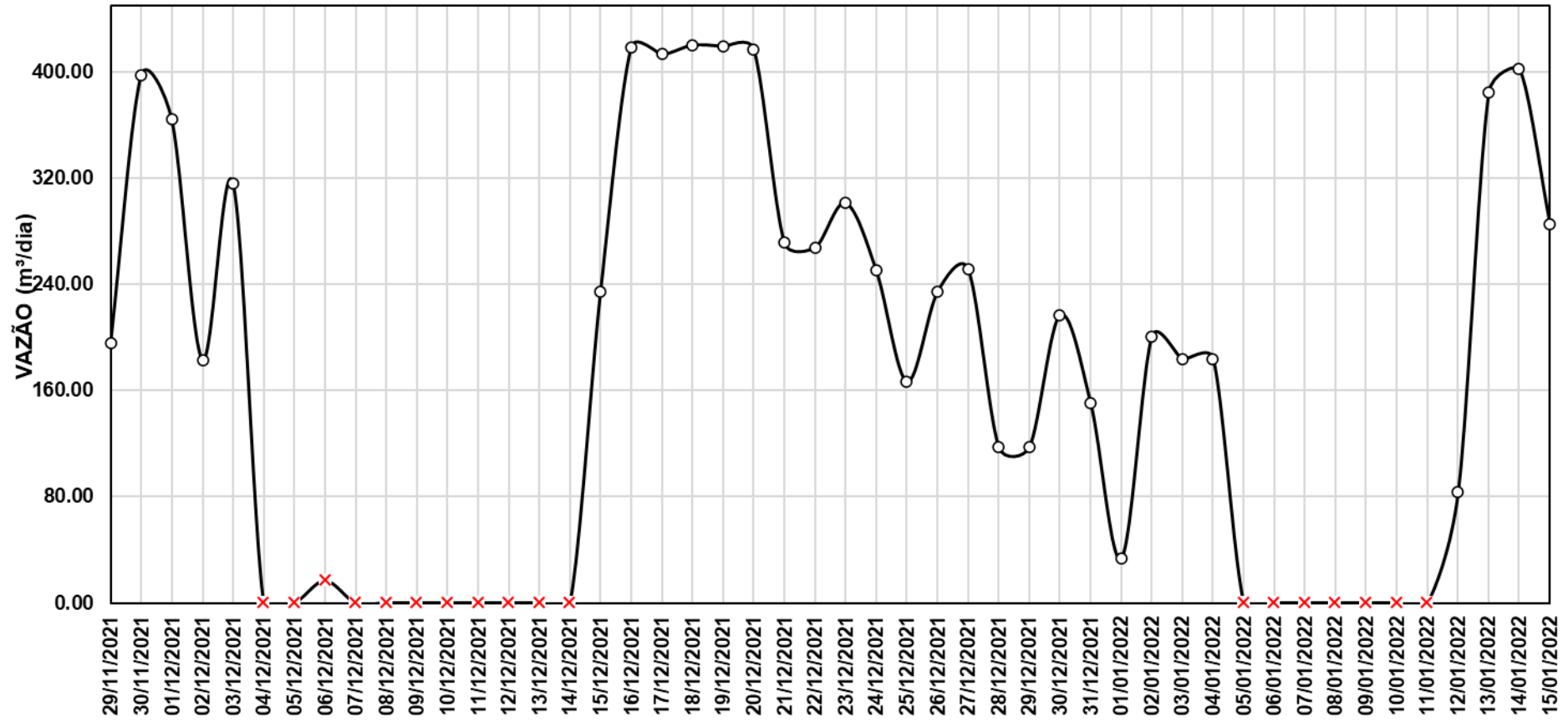
Além disso, comparado à curva da Figura 34, observa-se que as vazões no protótipo 2 são superiores às registradas no protótipo 1. Uma das justificativas para os altos valores obtidos pelo protótipo 2 é a sua localização, uma vez que este encontra-se em uma cota inferior ao protótipo 1 e isto pode ter influenciado na energia de chegada à placa de orifício 2, já que a carga de posição com relação ao ponto 1 foi transformada em pressão no trecho estudado. A escolha pelo ponto para instalação do protótipo 2 deveu-se à limitação de cotas topográficas, de modo que os dois sensores não puderam ser instalados na mesma altura, situação ideal para que os dados fossem compatíveis.

Na Figura 38 é apresentado o gráfico obtido para a vazão média diária, com dados registrados de 29/11/2021 a 15/01/2022. É possível observar dois períodos nos quais não foram registrados dados: 04 a 14 de dezembro de 2021 e 05 a 11 de janeiro de 2022. Durante estes intervalos, houve interrupção das leituras pelo microcontrolador NodeMCU devido à queima do dispositivo, provavelmente proveniente de umidade pela presença de água na caixa protetora.

No segundo período de pausa não foram verificados problemas nos componentes do protótipo 2. Acredita-se que houve alguma interrupção no fornecimento de energia ou desligamento do roteador wireless ao qual o microcontrolador está conectado para envio dos dados ao sistema supervisor, pois tanto o protótipo 1 quanto o protótipo 2 escolhidos para instalação no sistema possuem circuito inteligente do Tipo 1, com alimentação somente por fonte elétrica.

Mesmo diante das limitações que permitiram a redução de confiabilidade dos dados obtidos pelo protótipo 2, foi possível observar que no dia 01 de janeiro de 2022 o consumo registrado foi o menor da série ($33,41 \text{ m}^3/\text{dia}$), o que é coerente, uma vez que não houve atividades administrativas e de pesquisa nesta data na UFCG. Já o maior consumo diário registrado foi no dia 16 de dezembro de 2021, com $418,35 \text{ m}^3/\text{dia}$. A motivação quanto à variabilidade dos dados que aconteceram deve-se ao incremento de pressão decorrente da cota no Protótipo 2, não previsto na análise.

Figura 38 - Vazão diária média para o Protótipo 2



Fonte: Autora (2022).

A Figura 39 representa a curva característica do consumo horário médio na rede para o período avaliado pelo protótipo 2, considerando-se os 48 dias de medições, totalizando 9.967 dados obtidos a partir do sistema supervisorio online. Além disso, estão apresentados também os valores máximos e mínimos registrados a cada hora.

É possível perceber que a vazão média horária apresentou valores pouco variáveis ao longo do dia. O valor máximo de consumo foi observado às 09:00h, com vazão média de 17,03 m³/hora. Conforme observado anteriormente, este foi o mesmo horário de pico registrado pelo protótipo 1, apesar dos valores divergirem quantitativamente. Já a hora que apresentou o menor consumo médio na rede foi às 12:00h, com vazão de 16,47 m³/hora.

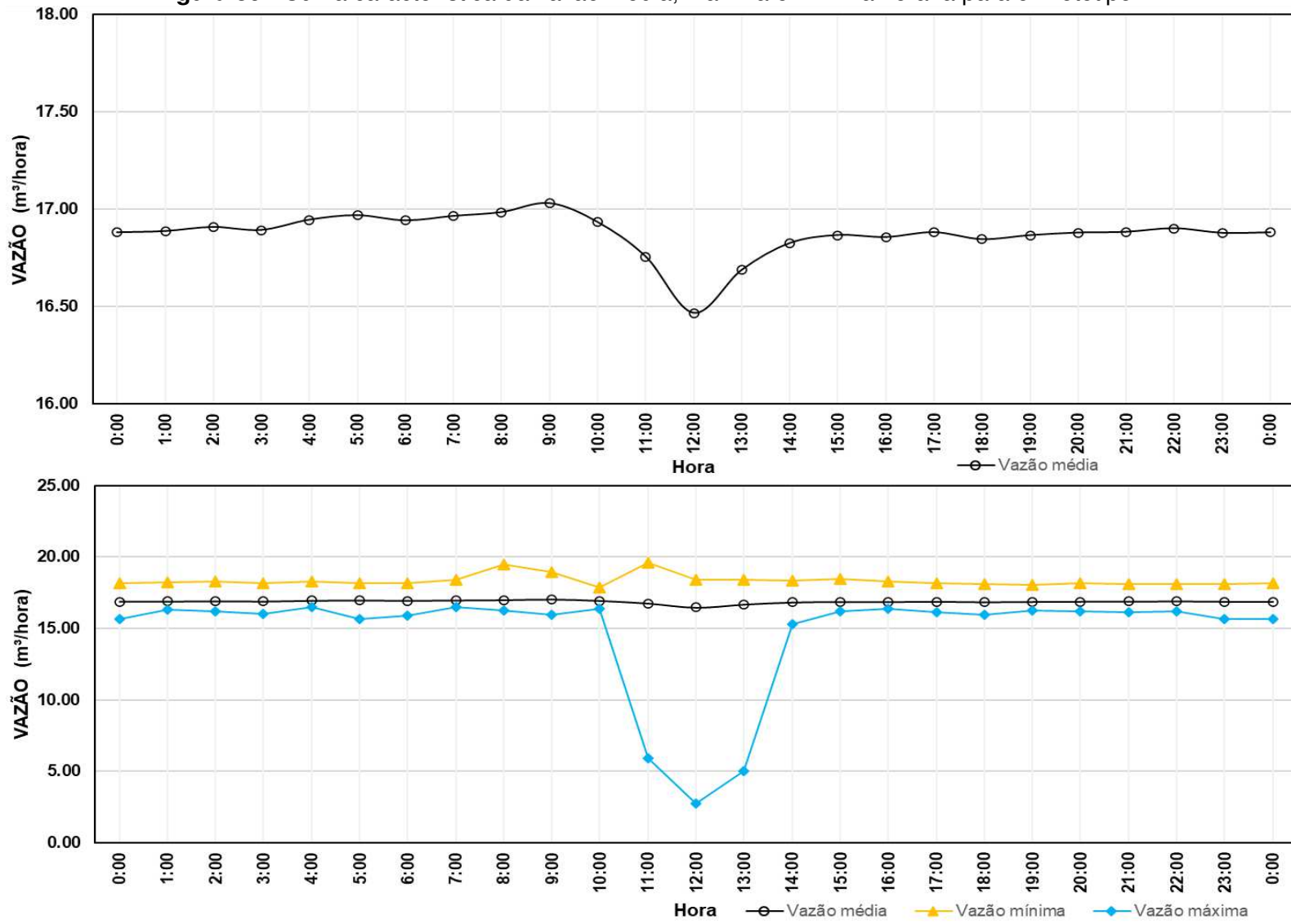
De acordo com Figura 39 alguns valores mínimos horários divergem consideravelmente dos valores médios e máximos das 11:00h às 13:00h, o que pode estar associado a inconsistência de algumas medições, além das falhas observadas durante os períodos já destacados na Figura 36. Faltaram registros de dados em 16 dos 48 dias monitorados, o que comprometeu significativamente a geração das curvas de vazão característica horária na rede. Além disso, a maior parte das falhas horárias aconteceram durante estes horários.

Algumas limitações e dificuldades foram encontradas nas aplicações na rede. A primeira delas foi a condição não controlada de operação no sistema. Problemas na oscilação de conexão wi-fi e o fato de não ser um wireless exclusivo para a operação dos sensores tornou a transmissão de dado limitada.

Muitas vezes os valores registrados para pressão e vazão eram muito baixos ou variáveis no tempo observado. Quando era feita a verificação *in loco*, percebia-se que a tubulação não estava trabalhando completamente preenchida com água e havia presença de ar pressurizado quando desconectado o sensor da mangueira que faz a ligação entre a tubulação e o sensor 1, localizado na cota elevada.

Como o sensor escolhido para compor o protótipo macromedidor inteligente pode ser aplicado tanto para leitura de líquidos quanto de gases, os valores lidos por este poderiam não representar fielmente a realidade, já que parte do fluido que estava gerando pressão era ar pressurizado.

Figura 39 - Curva característica da vazão média, máxima e mínima horária para o Protótipo 2



Fonte: Autora (2022).

Outra dificuldade observada foi o fato da rede não trabalhar completamente cheia e ocorrerem períodos de pausas no abastecimento, no qual os registros de distribuição eram fechados sem aviso prévio, o que comprometia o acompanhamento real das informações lidas.

Diante do exposto, quando o sistema de macromedição inteligente for aplicado em rede de abastecimento contínuo, havendo ocorrência de manobras que interrompam o transporte de água no DMC, essas devem ser informadas previamente aos gestores e equipe de monitoramento, para evitar a geração de dados falsos de consumo na rede.

A inexistência de outro medidor de fluxo instalado na rede de distribuição de água também limitou a comparação dos dados coletados, pois não havia um valor comparativo como critério para avaliar a reprodutibilidade e validade do sistema macromedidor inteligente instalado na rede.

As variações das leituras entre os sensores 1 e 2, mesmo estando num trecho sem derivações de consumo entre eles, são justificáveis, pois os pontos estão em cotas diferentes e parte da energia que chega ao sensor 2 é devida ao desnível existente, como o fluido chega com energia maior ao protótipo 2, também é gerado uma dissipação de energia maior, o que faz o escoamento ser modificado e, conseqüentemente, a vazão.

Portanto, apesar de em bancada experimental, sob condições controladas, o sistema comportar-se com resultados coerentes e precisos, quando o sistema foi instalado na rede e submetido a fatores externos e condições não controladas, foram observadas algumas interferências nas leituras que limitaram o desempenho dos protótipos e a confiabilidade das medições realizadas. Dessa forma, sugerem-se estudos mais aprofundados para avaliação dos fatores de interferência e possíveis ajustes nos protótipos desenvolvidos.

Foi realizada também uma simulação de vazamento entre os dois protótipos. Uma torneira foi conectada através de um colar de tomada na rede entre os sensores, com a finalidade de provocar um vazamento durante determinado período e observar o comportamento dos sensores, principalmente o instalado à montante do vazamento.

Observou-se que o sensor apresentou uma redução de pressão no sistema quando a torneira estava aberta, porém não foi obtida uma relação lógica entre a variação de pressão e a distância onde estava o vazamento, não sendo aprofundada esta análise em razão das limitações da pesquisa.

Outra discussão importante é sobre a possibilidade do uso de automação nos sistemas de abastecimento de água a partir das instalações de medidores inteligentes tanto na rede quanto nos alimentadores prediais das edificações existentes no setor estudado. Se todos os pontos de consumo na rede fossem monitorados de maneira digital, seria possível realizar um balanço hídrico da água disponibilizada à jusante do reservatório de distribuição com a consumida nas edificações durante um período pré-estabelecido. O estudo dessas informações é primordial para ser aplicado nos serviços de abastecimento de água como forma de mensurar perdas físicas na distribuição, bem como perdas de faturamento.

5 CONCLUSÕES

O protótipo inteligente de macromedição desenvolvido mostrou-se adequado para a função pretendida em bancada hidráulica, com a utilização do sensor MPX5700-DP realizando leituras e obtendo vazões compatíveis com as esperadas a partir dos medidores de referência usados para calibração e validação do sistema inteligente de macromedição de consumo.

Para vazões superiores a 3 m³/hora, os erros obtidos em relação ao medidor de referência GullPress-1000 foram inferiores a 2,5%, o que permite a sua utilização para vazões maiores, como as que ocorrem em sistemas de abastecimento de água, principalmente em localidades no qual o monitoramento presencial de vazões e pressões no sistema é deficiente ou inexistente, comprometendo a gestão e controle de perdas, sejam elas físicas ou de faturamento.

Os testes de normalidade e Anova de fator único aplicados na pesquisa para os resultados obtidos em bancada confirmaram que as leituras nos três medidores apresentam uma distribuição normal e a hipótese que o sensor MPX5700-DP apresenta valores coerentes foi reafirmada, não apresentando diferença significativa em relação aos outros métodos de referência comparados na análise.

A instalação dos protótipos 1 e 2 foi realizada como planejado e possibilitou a obtenção das curvas de vazão média em diferentes escalas temporais para o conhecimento do comportamento de consumo monitorado no sistema durante o período de observação. É importante ressaltar que as aplicações foram realizadas em período pandêmico no qual as atividades no Campus central da UFCG ocorriam de maneira reduzida, com fluxo de pessoas inferior ao existente em período normal de atividade.

As curvas dos protótipos diferem entre si, o que pode ser justificado pelo desnível considerável existente entre eles no trecho escolhido para instalação. Os dados obtidos pelo protótipo 1 são mais coerentes e possuem menor número de falhas comparados ao protótipo 2. Estas falhas devem-se às condições não controladas do sistema, como falta de conexão para envio dos dados coletados, desligamento da fonte de alimentação energética, despressurização da rede, abastecimento intermitente, entre outros.

Quanto à análise de perdas, foi observado que o sensor apresentou uma redução de pressão no sistema quando a torneira existente entre os protótipos estava aberta, porém não foi obtido uma relação numérica lógica entre a variação de pressão e a vazão simulada como vazamento no trecho, o que impossibilitou o avanço desta análise. Mesmo assim, com o conhecimento da curva característica de vazão no sistema, é possível que este identifique variações de pressão como possíveis vazamentos no trecho.

A automação nos sistemas de abastecimento de água a partir das instalações de medidores inteligentes é promissora e pode ser realizada com custos acessíveis, com diferentes possibilidades quanto às aplicações, desde o monitoramento de vazão até o controle de perdas nas redes e edificações.

Uma ideia inicial da pesquisa que por falta de recursos financeiros e as dificuldades advindas com a pandemia não foi possível ser alcançada era a instalação de hidrômetros inteligentes em todos os blocos localizados na rede estudada. Esta ferramenta, juntamente com a desenvolvida nesta pesquisa, tornam o monitoramento de consumo mais robusto para gestão de demandas e possíveis perdas em sistemas de menor porte, devendo, portanto, serem incentivadas e financiadas como mecanismo de gestão, principalmente no que tange o uso de um recurso natural limitado e escasso na região.

6 RECOMENDAÇÕES

Sugere-se para pesquisas futuras que seja estudado com prioridade a aplicação deste protótipo para verificação de perdas, principalmente em escala reduzida sob condições controladas, dado o potencial identificado para uso com essa finalidade, o que não foi possível ser aprofundado nessa pesquisa.

A inviabilidade de cotas com trecho retilíneo em pontos da rede para instalação dos protótipos limitou a análise, sendo sugerido que esta seja refeita considerando o incremento de pressão na chegada do ponto 2, para não gerar leituras divergentes entre os protótipos 1 e 2 em função do aumento de turbulência e pressão na água devido ao desnível existente.

Outra sugestão é a busca pela adoção de um sensor para compor o sistema que leia somente líquidos ou tenha algum dispositivo de fechamento/bloqueio de ar na tubulação para aplicação em sistemas nos quais o fluxo de água seja intermitente.

O conhecimento da curva característica de vazão do sistema possibilita a identificação de quedas de pressão como possíveis vazamentos no trecho, sendo proposto para pesquisas futuras que seja estudada de forma mais detalhada a aplicação deste protótipo para verificação de perdas.

Por fim, um sistema de armazenamento de dados interno, com adoção de cartão memória, uma caixa protetora mais segura para os componentes e uma conexão exclusiva para envio de dados são algumas das ferramentas que podem tornar o sistema mais robusto em outras aplicações, sendo limitações observadas na pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABIQUIM. Grupo de Trabalho sobre Recursos Hídricos. **Manual de gestão eficiente de recursos hídricos / Grupo de Trabalho sobre Recursos Hídricos (GT Água)**. – São Paulo: ABIQUIM, 2016.
- ALVES, M. C. **Bancada Móvel de Testes de Calibração para Medidores de Vazão**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade do Vale da Taquari. Lajeado. 2020.
- ANDRADE, M. R. **Balanço hidroenergético de sistema de distribuição de água aplicado a um setor do município de Cambuí-MG**. Dissertação (Mestrado Engenharia de Energia). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá – Mg. 2016.
- ANDRADE SOBRINHO, R. BORJA, P. C. Gestão das perdas de água e energia em sistema de abastecimento de água da Embasa: um estudo dos fatores intervenientes na RMS. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 21, n. 4, p. 783-795. 2016. DOI: 10.1590/S1413-41522016116037
- ASSIS, G. D. **Automação em sistemas de abastecimento de água**. 100f. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS ESTADUAIS DE SANEAMENTO – AESBE. **Guia Prático para Método Direto de Quantificação de Perdas Reais em Sistemas de Abastecimento**. 1º ed. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL - ABES. **Perdas em sistemas de abastecimento de água: diagnóstico, potencial de ganhos com sua redução e propostas de medidas para o efetivo combate**. 2013.
- _____. **Controle e redução das perdas nos sistemas públicos de abastecimento de água. Posicionamento e contribuições técnicas da ABES**. Revisão 1. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 5167-1: Medição de vazão de fluidos por meio de instrumentos de pressão – Parte 1: Placas de orifício, bocais e tubos de Venturi instalados em seção transversal circular de condutos forçados**. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. **NBR 12128: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2017.
- _____. **NBR 5626: Instalação predial de água fria**. Rio de Janeiro, 2020.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**—Volume 2, 2ª Edição. Rio de Janeiro: LTC/Grupo Gen, 2011.
- BEZERRA, S. T. M.; CHEUNG, P. B. **Perdas de Água: Tecnologias de Controle**. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013.
- BRAGALLI, C.; NERI, M.; TOTH, E. Effectiveness of smart meter-based urban water loss assessment in a real network with synchronous and incomplete readings. **Environmental Modelling & Software**. v. 112, p. 128-142, 2019.
- BRASIL. **Lei 9433, de 08 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília. 1997.
- _____. **Lei n.º 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, Seção 1, p. 3-7. 2007.
- _____. **Portaria nº 490, de 22 de março de 2021. Estabelece os procedimentos gerais para o cumprimento do disposto no inciso IV do caput do art. 50 da Lei n. 11445, de 5 de Janeiro de**

2007, e no inciso IV do caput do art. 4º do Decreto n. 10.588, de 24 de dezembro de 2020. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília. 2021.

BRITTON, T. C.; STEWART, R. A.; O'HALLORAN, K. R. Smart metering: enabler for rapid and effective post meter leakage identification and water loss management. **Journal of Cleaner Production**. v. 54, p. 166-176, 2013.

BROWN, T. C.; MAHAT, V.; RAMIREZ, J. A. Adaptation to future water shortages in the United States caused by population growth and climate change. **Earth's Future**. v. 7, n. 3, p. 219-234. 2019.

CAILLOT, E. M. **Integração do Google Maps com banco de dados georreferenciado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em em Análise e Desenvolvimento de Sistemas). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa. 2019.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos, INPE, 2004.

CARDELL-OLIVER, R; WANG, J; GIGNEY, H. Smart meter analytics to pinpoint opportunities for reducing household water use. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 142, n. 6. 2016.

CARLI, L. N. CONTO, S. M. BEAL, L. L. PESSIN, N. **Racionalização do uso da água em uma instituição de ensino superior – estudo de caso da Universidade de Caxias do Sul**. Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade. ISSN: 2316-9834. v.2, n. 01, p. 143-165. 2013.

CHEUNG, P.B.; REIS, L.F.R. **Gerenciamento da Qualidade da Água em Sistemas de Distribuição – Técnicas Computacionais**. In: GOMES H., GARCIA R., REY (EDS). Abastecimento de Água – O Estado da Arte e Técnicas Avançadas. Ed. 1, cap. 1, Editora Universitária da UFPB, João Pessoa, Brasil, 2007.

CHIMELLI, M. A. **Análise estratégica do sistema de abastecimento de água: estudo de caso de Itaboraí**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Gestão) - Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. Niterói, Rio de Janeiro. 2016.

CHRISTODOULOU, S. DELIGIANNI, A. A neurofuzzy decision framework for the management os water distribuiton networks. **Water Resour Manage**. v. 24, p. 139-156. 2010. DOI: 10.1007/s11269-009-9441-2.

COMINOLA, A.; GIULIANI, D.; PIGA, D.; CASTELLETTI, A.; RIZZOLI, A. E. Benefits and challenges of using smart meters for advancing residential water demand modeling and management: A review. **Environmental Modelling & Software**. v. 72, p. 198-214, 2015.

COSGROVE, W. J.; LOUCKS, D. P. Water management: Current and future challenges and research directions. **Water Resources Research**. v. 51, n. 6, p. 4823-4839, 2015.,

COVAS, D. RAMOS, H. Case studies of leak detection and location in water pipe systems by inverse transient analysis. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 136, n. 2, p. 248-257, 2010. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2010)136:2(248).

CREACO, E.; CAMPISANO, A.; FONTANA, N.; MARINI, G.; PAGE, P. R.; WAISKI, T. Real time control of water distribution networks: A state-of-the-art review. **Water research**. v. 161, p. 517-530, 2019.

DE BRITO, Y. M. A.; RUFINO, I. A. A.; BRAGA, C. F. C.; MULLIGAN, K. The Brazilian drought monitoring in a multi-annual perspective. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 193, n. 1, p. 1-14. 2021. DOI: [10.1007/s10661-020-08839-5](https://doi.org/10.1007/s10661-020-08839-5)

DE NYS, E.; ENGLE, N.L.; MAGALHÃES, A.R. **Secas no Brasil: política e gestão proativas**. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos- CGEE; Banco Mundial, 2016.

- DELGADO-GALVÁN, X., PÉREZ-GARCÍA, R., IZQUIERDO, J., & MORA-RODRÍGUEZ, J. An analytic hierarchy process for assessing externalities in water leakage management. **Mathematical and Computer Modelling**. v. 52, p. 1194-1202, 2010. DOI: 10.1016/j.mcm.2010.03.014.
- DEPARI, A.; FLAMMINI, A.; LAVARINI, M.; SISINNI, E.. Enhanced software defined meter for smart utility networks. **Computer Standards & Interfaces**, v. 48, p. 160-172. 2016. DOI: 10.1016/j.csi.2016.06.005
- DEPURU, S.S.S.R.; WANG, L.; DEVABHAKTUNI, V. Smart Meters for Power Grid: Challenges, Issues, Advantages and Status. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 15, 2736-2742. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.039>
- DI MAURO, A.; COMINOLA, A.; CASTELLETTI, A.; DI NARDO, A. Urban water consumption at multiple spatial and temporal scales. A review of existing datasets. **Water**. v. 13, n. 1, p. 36. 2020. DOI: 10.3390/w13010036
- DINIZ, A. R. S. **Avaliação do controle de perdas físicas em redes de distribuição de água da região metropolitana de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2012.
- DONNELLY, K.; COOLEY, H. **Water Use Trends**. Oakland, California: Pacific Institute. 2015.
- EGGIMANN, S.; MUTZNER, L.; WANI, O.; SCHNEIDER, MY; SPÜHLER, D.; MOY DE VITRY, M.; BEUTLER, P.; MAURER, M. O Potencial de Saber Mais: Uma Revisão da Gestão da Água Urbana Orientada por Dados. **Ambiente. Science Technology**. v. 51, p. 2538-2553. 2017.
- EPAL, Empresa Portuguesa das Águas Livres S.A. **Controlo Ativo de Perdas de Água**. Lisboa, 2017.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Resource and Economic Efficiency of Water Distribution Networks in the EU – EC Report**. Belgica. 2015.
- FARAH, E.; SHAHROUR, I. Leakage detection using smart water system: combination of water balance and automated minimum night flow. **Water Resources Management**. v. 31, n. 15, p. 4821-4833. 2017. DOI: 10.1007/s11269-017-1780-9.
- FARIAS, A. P. S.; FONTANA, M. E.; MORAIS, D. C. Modelo de sistema de informação e decisão para intervenções de reabilitação em redes de distribuição de água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 2, p. 55-65, 2013.
- FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. Oficina de textos, 2018.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. **2050: Water Supplies to Dwindle in Parts of the World, Threatening**. 2018.
- FONSECA, F. R. **Modelo de Sistema de Automação Aplicado à Setorização de Redes de Abastecimento Hídrico**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade de São Paulo. São Paulo – SP. 2011.
- FONTANA, M. E. **Modelo de setorização para manobra de rede de distribuição de água baseado nas características das unidades consumidoras**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Pernambuco. 2012.
- FONTANA, N.; GIUGNI, M.; GLIELMO, L.; MARINI, G.; ZOLLO, R. Real-time control of pressure for leakage reduction in water distribution network: Field experiments. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 144, n. 3. 2018.
- FREESCALE SEMICONDUCTOR. **Datasheet Manual Series: MPX 5700**. 2012 Disponível em: <<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX5700.pdf>>. Acesso: setembro de 2018.

- FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Manual de saneamento**. 3. Ed. Brasília: Ministério da saúde, 2006.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo. Atlas. 2010.
- GIURCO, D.; CARRARD, N.; MCFALLAN, S.; NALBANTOGLU, M.; INMAN, M.; THORNTON, N.; WHITE, S. **Guia de Medição de Uso Final Residencial: Um Guia para Estudo de Projeto, Amostragem e Tecnologia - Relatório técnico**. Institute for Sustainable Futures. Austrália, 2008.
- GOMES, H. P. **Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento: Análise Econômica de Projetos**. 2.ed. João Pessoa – PB. Brasil, Editora UFPB, 2009.
- GOUVEIA, R. M. M. **Modelo computacional de otimização para dimensionamento de redes de distribuição de água abastecidas por múltiplos bombeamentos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa - PB. 2012.
- GULTON. **Manômetro de processo**. 2010. Disponível em: <<https://www.gulton.com.br/upload-adm/prod/manometro-de-processo-gulpress-1000.pdf>> Acesso: janeiro de 2020.
- GÜNGÖR, M.; YARAR, U.; FIRAT, M. Reduction of water losses by rehabilitation of water distribution network. **Environmental monitoring and assessment**. v. 189, n. 10, p. 1-12, 2017.
- GURUNG, T. R., STEWART, R. A., BEAL, C. D., & SHARMA, A. K. Smart meter enabled informatics for economically efficient diversified water supply infrastructure planning. **Journal of Cleaner Production**. v. 135, p. 1023-1033, 2016.
- HAROU, J. J.; GARRONE, P. A. O. L. A.; RIZZOLI, A. E.; MAZIOTIS, A.; CASTELLETTI, A.; FRATERNALI, P.; NOVAK, J.; WISSMANN-ALVES, R.; CESCHI, P. A.. Smart metering, water pricing and social media to stimulate residential water efficiency: Opportunities for the smartH2O project. **Procedia Engineering**. v. 89, p. 1037-1043. 2014. DOI: [0.1016/j.proeng.2014.11.222](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.222)
- HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano. revisada e atualizada**. Belo Horizonte: Editora UFMG. v. 1, 2010.
- HIDRODIDÁTICA. **Manual experimental: Bancada HD-98**. 2010.
- HIDROMETER. **Sistema de Telemetria para Hidrômetros e Medidores. Aquisição de Dados Móvel e Fixa por Radio Frequência**. Disponível em: <www.hidrometer.com.br> Acesso em: agosto de 2018.
- INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION - IWA. **Losses from water supply systems: Standard terminology and Recommended Performance Measures**. Londres: IWA Publishing, 2000.
- JAN, F.; MIN-ALLAH, N.; SAEED, S.; IQBAL, S. Z.; AHMED, R.. IoT-Based Solutions to Monitor Water Level, Leakage, and Motor Control for Smart Water Tanks. **Water**, v. 14, n. 3, p. 309. 2022.
- KADU, M. S.; DIGHADE, R. R. Infrastructure leakage index and challenges in water loss management in developing countries. In: **World Environmental and Water Resources Congress 2015**. p. 1322-1331. 2015.
- KIM, J.; CHOI, D.; KIM, D.; LEE, D.. Water distribution operation systems based on smart meter and sensor network. **Procedia Engineering**, v. 89, p. 444-448. 2014. DOI: [10.1016/j.proeng.2014.11.210](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.210)
- KOECH, R.; GYASI-AGYEI, Y.; RANDALL, T.. The evolution of urban water metering and conservation in Australia. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 62, p. 19-26. 2018. DOI: [10.1016/j.flowmeasinst.2018.03.011](https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.03.011)
- KONDRATJEVS, K.; ZABASTA, A.; KUNICINA, N.; RIBICKIS, L.. Development of pseudo autonomous wireless sensor monitoring system for water distribution network. In: **2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)**. IEEE. p. 1454-1458. 2014.

KULKARNI, P.; FARNHAM, T. Smart city wireless connectivity considerations and cost analysis: Lessons learnt from smart water case studies. **IEEE Access**. v. 4, p. 660-672. 2016.

KUSTERKO, S. ENSSLIN, S. R. ENSSLIN, L. CHAVES, L. C. Gestão de perdas em sistemas de abastecimento de água: uma abordagem construtivista. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.23, n.3, p. 615-626. 2018. DOI: 10.1590/S1413-41522018156436

LIEMBERGER, R. WYATT, A. Quantifying the global non-revenue water problem. **Water Supply**. v. 19, n. 3, p. 831-837. 2019.

LAMBERT, A. O. International Report: Water loses management and techniques **Water Supply**. v. 2, p. 1-20, 2002.

LEE, M.; TANSEL, B.; BALBIN, M. Influence of residential water use efficiency measures on household water demand: A four year longitudinal study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 56, n. 1, p. 1-6, 2011.

LI, W. F.; LING, W. C.; LIU, S. X.; ZHAO, J.; LIU, R. P.; CHEN, Q. W.; QIANG, Z.; QU, J. Development of systems for detection, early warning, and control of pipeline leakage in drinking water distribution: A case study. **Journal of Environmental**. v. 23, n. 11, p. 1816-1822. 2011.

LI, W.; HAI, X.; HAN, L.; MAO, J.; TIAN, M. Does urbanization intensify regional water scarcity? Evidence and implications from a megaregion of China. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 118592, 2020.

LIMA, C. B.; VILLAÇA, M. V. M. **AVR e Arduino técnicas de projetos**. Florianópolis: Edição dos Autores, 2012.

LINDOSO, D. P.; EIRÓ, F.; BURSZTYN, M.; RODRIGUES-FILHO, S.; NASUTI, S. Harvesting water for liv-ing with drought: Insights from the Brazilian Human Coexistence with Semi-Aridity approach towards achieving the sustainable development goals. **Sustainability**. v. 10, n. 3, p. 622, 2018. DOI: 10.3390/su10030622

LIU, A.; MUKHEIBIR, P. Digital metering feedback and changes in water consumption—A review. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 134, p. 136-148, 2018.

LOUREIRO, D.; VIERA, P.; MAKROPOULOS, C.; KOSSIERIS, P.; RIBEIRO, R.; BARATEIRO, J.; KATSIRI, E. Smart metering use cases to increase water and energy efficiency in water supply systems. **Water Science and Technology: Water Supply**. v. 14, n. 5, p. 898-908, 2014.

LU, Y; XU, X; WANG, L.. Smart manufacturing process and system automation—a critical review of the standards and envisioned scenarios. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 56, p. 312-325. 2020. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.06.010

LUO, T.; YOUNG, R.; REIG, P. Aqueduct projected water stress country rankings. **Technical Note**, v. 16, 2015.

MAGGIONI, E. Gestão da demanda de água em tempos de seca: o que importa para a conservação da água. **Revista Recursos Hídricos**. v. 51, 125-139. 2015.

MARTINS, T. J. C. **Sistemas de abastecimento de água para consumo humano: Desenvolvimento e aplicação de ferramenta informática para a sua gestão integrada**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental). Escola Superior Agrária. Instituto Politécnico de Bragança. Bragança, 2014.

MEDEIROS, L. E. L. **Utilização de indicadores convencionais e de satisfação dos usuários para avaliação da qualidade do serviço de abastecimento de água na cidade de Campina Grande/PB**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 2017.

- MENESES, R. A. **Diagnóstico operacional de sistemas de abastecimento de água: o caso de Campina Grande**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 2011.
- MORAIS, D. C.; CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. **Priorização de áreas de controle de perdas em redes de distribuição de água**. Pesquisa Operacional. v. 30, n. 1. Rio de Janeiro - RJ. 2010.
- MORRISON, J; TOOMS, S; ROGERS, D. **DMA Management Guidance Notes**. IWA, 2007.
- MOTTA, R. G. **Importância da setorização adequada para combate as perdas reais de água de abastecimento público**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2010.
- MOUNCE, S. R.; BOXALL, J. B.; MACHELL, J. Development and verification of an online artificial intelligence system for detection of bursts and other abnormal flows. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 136, n. 3, p. 309-318, 2010.
- MUÑOZ, H. R. **Interfaces da Gestão de Recursos Hídricos: Desafios da Lei de Águas de 1997**. 2. ed. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, 2000.
- NIELSEN, M.J.; TREVISAN, J.; BONATO, A.; SACHET, M.A.C. **Medição de água: estratégias e experimentações**. Curitiba: Sanepar, 2003. 218 p.
- NGUYEN, K. A.; STEWART, R. A.; ZHANG, H.; SAHIN, O.; NILMINI, S. Re-engineering traditional urban water management practices with smart metering and informatics. **Environmental Modelling & Software**. v. 101, p. 256-267. 2018.
- ODAN, F. K. **Estudo de confiabilidade aplicado à otimização da operação em tempo real de redes de abastecimento de água**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos – SP. 2013.
- OLSSON, G. ICA and me—a subjective review. **Water research**. v. 46, n. 6, p. 1585-1624, 2012.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT - OECD. **Conselho da OECD - Recomendação sobre a Água**. 2016. Disponível em: <<https://www.oecd.org/water/Recomendacao-sobre-a-agua.pdf>>. Acesso em: março de 2018.
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE – OMS. **Safely managed drinking water**. 2017.
- PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. São Carlos: EESC – USP, 2006.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho científico**. 2. ed. Novo Hamburgo. Feevale, 2013.
- PUUST, R.; KAPELAN, Z.; SAVIC, D. A.; KOPPEL, T. A review of methods for leakage management in pipe networks. **Urban Water Journal**. v. 7, p. 25-45, 2010.
- RAMOS, F. **Modelo de um sistema de automação aplicado a setorização de redes de abastecimento de água**. (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo - SP. 2011.
- RHODES, J. D.; UPSHAW, C. R.; HARRIS, C. B.; MEEHAN, C. M.; WALLING, D. A.; NAVRÁTIL, P.A.; BECK, A. L.; NAGASAWA, K.; FARES, R. L.; COLE, W. J. Experimental and data collection methods for a large-scale smart grid deployment: Methods and first results. **Energy**, v. 65, p. 462-471. 2014. DOI: [10.1016/j.energy.2013.11.004](https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.004)
- RIZZOLI, A. E.; CASTELLETTI, A.; COMINOLA, A.; FRATERNALI, P.; SANTOS, D. A.; STORNI, B.; WISSMANN-ALVES, R.; BERTOCCHI, M.; NOVAK, J.; MICHAEL, I. The SmartH2O project and the

role of social computing in promoting efficient residential water use: a first analysis. In: **Proceedings of the 7th International Congress on Environmental Modelling and Software**. 2014.

ROMERO, M. GUÉDRIA, W., PANETTO, H., BARAFORT, B.. Towards a characterisation of smart systems: A systematic literature review. **Computers in industry**, v. 120 . 2020. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103224Get

ROSSMAN, L. **Epanet 2.0 em Português – Manual do Utilizador. Tradução e Adaptação de D. Loureiro e S.T. Coelho. Manual, LNEC**. 2002. Disponível em:<http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/epanet/manual_do_epanet_brasil.pdf>

SANTOS, D. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Avaliação da metodologia para controle de perdas de água em rede de distribuição no Recife-PE. **Revista DAE**. v. 197, p. 56-70. 2014. DOI: 10.4322/dae.2014.128.

SAVIĆ, D.; FERRARI, G. Design and performance of district metering areas in water distribution systems. **Procedia Engineering**, v. 89, p. 1136-1143. 2014. DOI: [10.1016/j.proeng.2014.11.236](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.236)

SICHONANY, O. R. A.O.; SCHLOSSER, J. F.; MEDINA, R. D.; ROGGIA, I. B.; LOBO, J. Z.; SANTOS, F. B. Telemetria na transmissão de dados de desempenho de máquinas agrícolas utilizando tecnologias GSM/GPRS e ZigBee. **Revista Ciência Rural**. Ed. 42, n. 8. 2012.

SILVA, R. T.; PORTO, M. F. D. A. **Gestão urbana e gestão das águas: caminhos da integração**. Estudos avançados, v. 17, n. 47, p. 129-145, 2003.

SILVA, G. S. **Programas permanentes de uso racional da água em campi universitários: o programa de uso racional da água na Universidade de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana). Universidade de São Paulo. São Paulo – SP. 2004.

SILVA, C. M.; PÁDUA, V. L.; BORGES, J. Contribuição ao estudo de medidas para redução da perda aparente de água em áreas urbanas. **Ambiente & Sociedade**. v. 19, p. 249-268. 2016.

SILVA JUNIOR, J. F. **Detecção de Pedras em Sistemas de Distribuição de Água através de Rede de Sensores sem Fio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Pernambuco. Recife – PE. 2017

SIQUEIRA, N. A.; SOUZA, P. A. Medidor prismático hexagonal: uma alternativa à macromedição. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**. v. 25, n. 5, p. 649-653, 2020.

SIRKIÄ, J.; TUIJA, L.; SUVI, A.; OSSI, Y.; JARI, P.; RIKU, V. Data utilization at finnish water and wastewater utilities: Current practices vs. state of the art. **Utilities Policy**. v. 45, p. 69-75, 2017.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOBRE SANEAMENTO - SNIS. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos**. Brasília, SNIS, 2021. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2021>>. Acesso em: 25 março de 2022.

SOUZA JUNIOR, J. C. **Distritos de medição e controle como ferramenta de gestão de perdas em redes de distribuição de água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Campinas – SP. 2014.

SPOLAOR, A. S. **Automação nos sistemas de abastecimento de água. Caso do controle da reservação de distribuição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Campinas -SP. 2011.

STAVENHAGEN, M.; BUURMAN, J.; TORTAJADA, C. Saving water in cities: Assessing policies for residential water demand management in four cities in Europe. **Cities**. v. 79, p. 187-195, 2018. DOI: 10.1016/j.cities.2018.03.008.

STEWART, R. A.; NGUYEN, K.; BEAL, C.; ZHANG, H.; SAHIN, O.; BERTONE, E.; VIEIRA, A. S.; CASTELLETTI, A.; COMINOLA, A.; GIULIANI, M.. Integrated intelligent water-energy metering systems and informatics: Visioning a digital multi-utility service provider. **Environmental Modelling & Software**, v. 105, p. 94-117. 2018. DOI: [10.1016/j.envsoft.2018.03.006](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.006)

TAIRA, N. M.; PRADO, A. P. A. **Novas tecnologias de equipamentos de monitoramento e controle de redes de abastecimento**. IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas Centro de Metrologia de Fluidos. 2003.

TARDELLI FILHO, J. Aspectos relevantes do controle de perdas em sistemas públicos de abastecimento de água. **Revista DAE**. Ed. 201, vol. 54. p. 6-20. 2016.

TORTAJADA, C.; GONZALES-GOMEZ, F.; BISWAS, A. K.; BUURAN, J. Water demand management strategies for water-scarce cities: The case of Spain. **Sustainable cities and society**. v. 45, p. 649-656, 2019.

THORNTON, J.; LAMBERT, A. Pressure management extends infrastructure life and reduces unnecessary energy costs. In: **IWA Conference'Water Loss'**. 2007.

TROJAN, F.; MORAIS, D. C. Prioritizing alternatives for maintenance of water distribution networks: a group decision approach. **Water S.A.** v. 38, p. 555-514, 2012. DOI: [10.4314/wsa.v38i4.11](https://doi.org/10.4314/wsa.v38i4.11).

TSUTIYA, M. T. **Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água**. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2006.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 3ª ed, 2006.

UZCATEGUI, J. A. S. **Redução de perdas aparentes em sistemas de abastecimento de água**. Dissertação (Mestrado integrado em Engenharia do Ambiente). Universidade do Porto. Porto. 2017.

VOTRE, R. **Automação no controle de perdas e redução de impactos ambientais em sistemas de abastecimento de água**. Dissertação (Mestrado profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial). Universidade Federal do Paraná. Curitiba – PR. 2014.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO. **Statement on the state of the global climate in 2016**. World Meteorological Organization (WMO), 2017.

XIAO, Y.; FANG, L.; HIPEL, K. W. Agent-based modeling approach to investigating the impact of water demand management. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 144, n. 3, p. 04018006, 2018.

XIN, X.; LI, K.; FINLAYSON, B.; YIN, W. Evaluation, prediction, and protection of water quality in Danjiangkou Reservoir, China. **Water Science and Engineering**. v. 8, n. 1, p. 30-39, 2015.

YUAN, Z.; OISSON, G.; CARDELL-OLIVER, R.; SCHAGEN, K.; MARCHI, A.; DELETIC, A.; URICH, C.; RAUCH, W.; LIU, Y.; JIANG, G. Sweating the assets—the role of instrumentation, control and automation in urban water systems. **Water research**. v. 155, p. 381-402, 2019.

ZHANG, Z.; YANG, H.; SHI, M. Analyses of water footprint of Beijing in an inter-regional input-output framework. **Ecological Economic**. v. 70, n. 12, p. 2494-2502. 2011.

ZYOUNG, S. H., KAUFMANN, L. G., SHAHEEN, H., SAMHAN, S., & FUCHS-HANUSCH, D. A framework for water loss management in developing countries under fuzzy environment: Integration of Fuzzy AHP with Fuzzy TOPSIS. **Expert Systems with Applications**. v. 61, p. 86-105, 2016. DOI: [10.1016/j.eswa.2016.05.016](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.05.016)

