



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE – CAA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL –
PPGECAM

GILVANDRO BARBOSA TITO

**LOCALIZAÇÃO E DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM UM SISTEMA DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: Estudo de caso na região metropolitana do Recife-PE**

Caruaru

2023

GILVANDRO BARBOSA TITO

**LOCALIZAÇÃO E DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM UM SISTEMA DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: Estudo de caso na região metropolitana do Recife-PE**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra

Coorientador: Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho

Caruaru

2023

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Nasaré Oliveira - CRB/4 - 2309

T6211 Tito, Gilvandro Barbosa.
Localização e detecção de vazamentos em um sistema de distribuição de água: estudo de caso na região metropolitana do Recife-PE. / Gilvandro Barbosa Tito. – 2023.
119 f.; il.: 30 cm.

Orientador: Saulo de Tarso Marques Bezerra.
Coorientador: Artur Paiva Coutinho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2023.
Inclui Referências.

1. Abastecimento de água. 2. Controle de perdas. 3. Modelagem hidráulica. 4. Distrito de medição e controle. I. Bezerra, Saulo de Tarso Marques (Orientador). II. Coutinho, Artur Paiva (Coorientador). III. Título.

CDD 620 (23. ed.) UFPE (CAA 2023-077)

GILVANDRO BARBOSA TITO

**LOCALIZAÇÃO E DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM UM SISTEMA DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: Estudo de caso na região metropolitana do Recife-PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Aprovado em: 26/10/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Elizabeth Amaral Pastich Gonçalves (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Laís Régis Salvino (Examinador Externo)
AEGEA - Saneamento

Primeiro ao criador do universo pela minha existência, através dos meus pais por ter me concebido pela graça divina, dedico todo o meu conhecimento adquirido nesta jornada a dedicação, afeto e cuidado que sempre tive dos meus pais, pelos bons e difíceis momentos da vida, e também pelas palavras sábias de ensinamentos que nunca me faltou. Por isso, serei sempre grato aos meus pais, os quais foram os meus maiores formadores.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre foi a base das minhas conquistas, serei sempre grato a ele, por ter ensinados a ter paciência e dedicação a este trabalho, apesar das dificuldades do dia a dia, mesmo com pouco tempo que tive, nesta jornada de trabalho e estudos ao mesmo tempo.

Agradeço também a dedicação e paciência dos meus colegas de trabalho, Engenheiros Antônio Sérgio Torres, Daniel Genuíno de Oliveira que sempre se prontificaram em ajudar nesta pesquisa, fornecendo os dados necessários e fundamentais no desenvolvimento deste estudo.

Sou grato também aos meus professores, em especial ao meu orientador Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra, sempre atendendo em qualquer horário, principalmente, nos finais de semana e feriados, devido ao meu trabalho não tinha tempo para tirar as dúvidas, por isso sempre os contatos aconteciam fora do horário comercial, e nunca deixou de me atender.

Aos meus pais José Gil Mota Tito e Eurides Barbosa Tito, pelas palavras sábias de ensinamentos e sempre presente na minha vida, nos bons e difíceis momentos desta caminhada na terra. Muito obrigado por tudo, nunca mediram esforços para meu crescimento pessoal. Vocês sempre serão meus maiores referenciais.

A minha família, principalmente, a minha esposa Noêmia Braga Lima Tito pela compreensão da minha ausência nos finais de semana e feriados durante o desenvolvimento deste estudo. E também aos meus filhos: Gisele da Silva Tito, José Gil Mota Tito Neto e Gilvandro Pedro Lima Tito, pelo carinho e sapiência da minha privação no desenvolvimento desta pesquisa. Deus me deu um lar com muito amor, paz e carinho, isso foi fundamental para seguir em frente, apesar das dificuldades que enfrentamos, mas se a base de sustentação é forte, nunca iremos desistir.

RESUMO

A perda de água nas redes urbanas de distribuição de água é um dos grandes problemas para as entidades gestoras do saneamento. No Brasil, a quantidade de água perdida na distribuição ainda é alarmante, acima de 40% (SNIS, 2021), quando comparada com as dos países desenvolvidos. Uma porcentagem significativa dessa água perdida é devido aos vazamentos nos sistemas de distribuição de água, acelerando a deterioração da infraestrutura e trazendo prejuízo financeiro para as companhias. O objetivo deste trabalho foi realizar um diagnóstico das perdas utilizando as metodologias do balanço hídrico (BH) e da vazão mínima noturna (VMN), e localizar e detectar vazamentos em uma rede de distribuição através da modelagem hidráulica. Neste estudo de caso, foi utilizado o Distrito de Medição e Controle 39 do sistema de abastecimento de água da Região Metropolitana do Recife/PE. Os dados de vazão e pressão utilizados foram cedidos pela Companhia de Saneamento de Pernambuco (COMPESA). Após aplicar os métodos do BH e da VMN, as perdas reais calculadas para ambos os métodos foram compatíveis, mas com valores superiores à média nacional. Já a modelagem hidráulica, mostrou-se uma ferramenta eficaz na tomada de decisão, apontando os trechos com prováveis pontos de vazamentos na rede, assim reduzindo a área de atuação dos técnicos que atuam no controle ativo de vazamentos. Desta forma, melhorando a gestão operacional da companhia, amenizando as pressões sociais, política e ambientais.

Palavras-chave; Abastecimento de água, perdas de água, distrito de medição e controle, modelagem hidráulica.

ABSTRACT

Water loss in urban water distribution networks is one of the major problems for sanitation management entities. In Brazil, the amount of water lost in distribution is still alarming, above 40% (SNIS, 2021), compared to that of developed countries. A significant percentage of this lost water is due to leaks in water distribution systems, accelerating the deterioration of infrastructure and bringing financial losses to companies. The objective of this study was to carry out an accurate diagnosis of losses using the methodology of water balance (BH) and minimum nocturnal flow (VMN), and also to present strategies for controlling and reducing real losses, through hydraulic modeling to locate and detect leaks in the water distribution network. In this case study, a district metered area of the water supply system in the Metropolitan Region of Recife/PE was used. The flow and pressure data used were provided by the Sanitation Company of Pernambuco (COMPESA). After applying the BH and VMN methods, the actual losses calculated for both methods were compatible, but with values higher than the national average indicated by the National Sanitation Information System (SNIS, 2021). Hydraulic modeling, on the other hand, proved to be an effective tool in decision making, pointing out the sections with probable points of leaks in the network, thus reducing the areas of action of technicians who work in the active control of leaks, mainly, not visible ones. In this way, improving the company's operational management, easing social, political and environmental pressures.

Keywords; Water losses, district metered area, water supply, hydraulic modeling.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 1 – | Evolução das perdas da distribuição no Brasil | 24 |
| Figura 2 – | Tipos de vazamentos | 25 |
| Figura 3 – | Características de perdas aparentes | 27 |
| Figura 4 – | Índice de perdas da distribuição das unidades da Federação do Brasil | 33 |
| Figura 5 – | Meta do índice de perdas da distribuição para COMPESA | 33 |
| Figura 6 – | Meta do IPL para COMPESA | 36 |
| Figura 7 – | Principais práticas para controle de perdas reais | 37 |
| Figura 8 – | Sistema de distribuição de água setorizado | 38 |
| Figura 9 – | Principais práticas para controle das perdas aparentes | 41 |
| Figura 10 – | Balanço hídrico proposta pela IWA/AWWA | 45 |
| Figura 11 – | Interpretação gráfica dos componentes da vazão mínima noturna | 48 |
| Figura 12 – | Esboço do desmembramento da vazão simulada | 51 |
| Figura 13 – | Esboço do balanço das vazões | 52 |
| Figura 14 – | Mapa de identificação dos pontos de fugas | 58 |
| Figura 15 – | Localização do município de Recife-PE | 63 |
| Figura 16 – | Visão aérea (delimitação) do DMC-39 | 65 |
| Figura 17 – | Gráfico com a faixa de probabilidade de valores por exemplo | 67 |
| Figura 18 – | Interface <i>WB-easyCalc</i> | 68 |
| Figura 19 – | Curva de desempenho de medição HD | 70 |
| Figura 20 – | Padrão dos elementos do Modelo hidráulico | 72 |
| Figura 21 – | Esquema hidráulico do DMC-39 | 73 |
| Figura 22 – | Transferência dos consumos das ligações para as junções | 75 |
| Figura 23 – | Planilha “ <i>Financial Data</i> ”/Rede | 84 |
| Figura 24 – | Vazão média distribuída no DMC-39 | 87 |
| Figura 25 – | Dados de pressões médias semanais | 88 |
| Figura 26 – | Volume fornecido e perdas reais pelos métodos do BH e VMN | 90 |
| Figura 27 – | Volume fornecido e perdas totais pelos métodos do BH e VMN | 90 |
| Figura 28 – | Localização dos dispositivos <i>dataloggers</i> instalados no DMC-39 | 92 |
| Figura 29 – | Regressão linear entre os valores de pressão medido e simulado | 94 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Figura 30 – | Gráfico comparativo dos dados de vazão simulados Planilha | 96 |
| Figura 31 – | Gráfico comparativo dos valores registrados na junção J-219 | 97 |
| Figura 32 – | Gráfico comparativo dos valores registrados na junção J-156 | 97 |
| Figura 33 – | Gráfico comparativo dos valores registrados na junção J-88 | 98 |
| Figura 34 – | Gráfico comparativo dos valores registrados na junção J-243 | 98 |
| Figura 35 – | Junções apontadas pelo <i>software</i> com anormalidade | 99 |
| Figura 36 – | Locais de pesquisa realizada com geofone na rua Jamaica | 100 |
| Figura 37 – | Pontos com vazamentos comprovados e suspeitos | 101 |
| Figura 38 – | Localização das junções com anormalidade | 103 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabela 1 – | Caracterização geral das perdas | 22 |
| Tabela 2 – | Metas estabelecidas para indicadores de IPD e IPL | 23 |
| Tabela 3 – | Índice de perdas na distribuição – IPD | 24 |
| Tabela 4 – | Águas não lucrativas dos países desenvolvidos | 24 |
| Tabela 5 – | Matriz de avaliação de perdas de água baseado em IVI | 29 |
| Tabela 6 – | Classificação do desempenho do SAA | 31 |
| Tabela 7 – | Índice de perdas da distribuição | 32 |
| Tabela 8 – | Índice de perdas por ligação/dia – IPL | 35 |
| Tabela 9 – | Faturamento perdido por motivo da submedição de hidrômetro | 42 |
| Tabela 10 – | Valores do expoente N_1 | 49 |
| Tabela 11 – | Fases da construção do modelo hidráulico | 55 |
| Tabela 12 – | Etapas da Metodologia | 65 |
| Tabela 13 – | Dados reais de pressões coletados no sistema Vectora da COMPESA | 66 |
| Tabela 14 – | Dados reais de vazões coletados no sistema Vectora da COMPESA | 67 |
| Tabela 15 – | Dados de entrada, WB-easyCalc | 69 |
| Tabela 16 – | Valores de submedição | 71 |
| Tabela 17 – | Propriedades dos elementos da modelagem | 73 |
| Tabela 18 – | Dados da rede de distribuição do DMC-39 | 74 |
| Tabela 19 – | Faixas adotadas para critérios da pressão | 79 |
| Tabela 20 – | Valores “sys.Ipunt”/Entrada anual | 81 |
| Tabela 21 – | Valores “Billed Cons”/consumo faturado | 81 |
| Tabela 22 – | Valores “Unb Cons”/consumo não faturado | 82 |
| Tabela 23 – | Valores “Unauthorized Consumption”/consumo não autorizado | 83 |
| Tabela 24 – | Valores “Meter erros”/Erros dos medidores | 83 |
| Tabela 25 – | Valores “Network”/Rede | 83 |
| Tabela 26 – | Valores “Pressure”/Pressão | 84 |
| Tabela 27 – | Planilha balanço hídrico do DMC-39 | 85 |
| Tabela 28 – | Principais indicadores de performance do DMC-39 | 86 |
| Tabela 29 – | Dados de vazões (L/s) médias semanais do mês de maio de 2022 do DMC-39 | 87 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabela 30 – | Dados de pressões (mca) médias do mês de maio de 2022 do DMC-39 | 88 |
| Tabela 31 – | Localização dos <i>dataloggers</i> | 92 |
| Tabela 32 – | Pressão às 15:00h dos dias 23 a 29 de maio de 2022 do DMC-39 | 93 |
| Tabela 33 – | Vazão das junções do dia 23 de maio de 2022 do DMC-39 | 93 |
| Tabela 34 – | Vazão observada e simulada | 94 |
| Tabela 35 – | Pontos elencados pelo <i>software</i> com possíveis vazamentos | 100 |
| Tabela 36 – | Pontos com vazamentos comprovados e suspeitos | 101 |
| Tabela 37 – | Vazamentos ocorridos no DMC-39 entre o período 25/11/2022 até 03/02/2023 | 102 |
| Tabela 38 | Junções elencadas pelo <i>software</i> com anormalidade em dias diferentes | 103 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AWWA | American Water Works Association |
| AWWA WLC | American Water Works Association Water Loss Control Committee |
| BABE | Bursts and Background Estimates |
| BH | Balanco hídrico |
| COMPESA | Companhia Pernambucana de Saneamento |
| DMC | Distrito de medição e controle |
| EPANET | U. S. Environmental Protection Agency |
| ETA | Estação de tratamento de água |
| FAVAD | Fixed and Variable Area Discharge |
| FUNASA | Fundação Nacional de Saúde |
| GCG | Gerência Comercial e Geoprocessamento |
| GPE | Gerência de Projetos |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IBNET | International Benchmarking Network |
| IPD | Índice de Perdas de Distribuição |
| IPL | Índice de Perdas por Ligação |
| IWA | International Water Association |
| MDC | Ministério do Desenvolvimento Regional |
| N_1 | Coefficiente exponencial da expressão vazão/pressão |
| NBR | Normas brasileira |
| PBA | Ponta-bolsa-anel |
| PLANASA | Plano Nacional de Saneamento |
| PLANASAB | Plano Nacional de Saneamento Básico |
| PVC | Policloreto de vinil |
| RDA | Rede de distribuição de água |
| RMR | Região Metropolitana de Recife |
| SAA | Sistema de abastecimento de água |
| SCADA | <i>Supervisory control and data acquisition</i> |
| SDA | Sistema de distribuição de água |
| S/I | Sem informações |
| SNIS | Sistema Nacional de Informações de Saneamento |

| | |
|-----|-------------------------------------|
| TAU | Tanque de alimentação unidirecional |
| VMN | Vazão Mínima Noturna |
| VRP | Válvula Reguladora de Pressão |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------------------|---|
| B_A | Balanço de vazões no ponto A |
| B_B | Balanço de vazões no ponto B |
| C | Consumo no Nó |
| F_{nd} | Fator noite / dia |
| H | Carga hidráulica |
| h | Perda de carga total |
| m | Coefficiente de perda de carga localizada |
| n | Expoente da fórmula de perda de carga |
| N_1 | Coefficiente exponencial da relação vazão/pressão |
| P | Perdas totais |
| P_0 | Pressão no instante 0 |
| P_1 | Pressão no instante 1 |
| \bar{P} | Pressão média |
| $\bar{P}_{3 \rightarrow 4}$ | Pressão média entre 3 e 4 horas |
| Q | Vazão |
| Q_0 | Vazão de vazamento na pressão P_0 |
| Q_1 | Vazão de vazamento na pressão P_1 |
| $Q_{\overline{ab}}$ | Vazão fornecida entre os pontos A e B |
| Q_{E_A} | Vazão de entrada no ponto A |
| Q_{E_B} | Vazão de entrada no ponto B |
| Q_{min} | Vazão média mínima noturna |
| q_i | Demandas consumidas |
| Q_{pr} | Vazão média diária de perdas reais |
| Q_{S_A} | Vazão de saída no ponto A |
| Q_{S_B} | Vazão de saída no ponto B |
| r | Termo de perdas de carga |
| S_r | Incerteza de série de registros no horário |
| x | Valor observado |
| x_m | Valor médio horário |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 | OBJETIVO | 20 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 20 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 20 |
| 1.2 | ESTRUTURA | 20 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 22 |
| 2.1 | PERDAS DE ÁGUA | 17 |
| 2.1.1 | Perdas reais | 22 |
| 2.1.2 | Perdas aparentes | 26 |
| 2.1.3 | Indicadores de perdas | 27 |
| 2.1.3.1 | Índice de perdas de distribuição (IN049 – em percentual) | 30 |
| 2.1.3.2 | Índice bruto de perdas lineares (IN050 – em m ³ . km ⁻¹ . dia ⁻¹) | 36 |
| 2.1.3.3 | Índice de perdas por ligação (IN051 – em L. lig ⁻¹ . dia ⁻¹) | 34 |
| 2.2 | PRÁTICAS DE COMBATE AS PERDAS REAIS | 36 |
| 2.2.1 | Setorização da rede | 37 |
| 2.2.2 | Gerenciamento das pressões | 38 |
| 2.2.3 | Controle ativos de fugas | 38 |
| 2.2.4 | Reparo de vazamento | 39 |
| 2.2.5 | Reabilitação da infraestrutura | 39 |
| 2.2.6 | Modelagem hidráulica no combate as perdas | 40 |
| 2.3 | PRÁTICAS DE COMBATE AS PERDAS APARENTES | 40 |
| 2.3.1 | Instalação e manutenção da macromedição | 41 |
| 2.3.2 | Implantação e modernização do parque dos hidrômetros | 42 |
| 2.3.3 | Gestão eficiente da área comercial | 43 |
| 2.4 | MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE PERDAS | 44 |
| 2.4.1 | Balanço hídrico (<i>top-down</i>) | 45 |
| 2.4.2 | Vazão mínima noturna (<i>bottom-up</i>) | 47 |
| 2.5 | MODELAGEM HIDRÁULICA DE SAA | 50 |
| 2.6 | SOFTWARE WATERGEMS | 56 |
| 2.7 | UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTA PARA DETECTAR VAZAMENTOS | 59 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 62 |
| 3.1 | ESTUDO DE CASO – APLICAÇÃO DO DMC-39 | 63 |
| 3.1.1 | Visão geral do sistema de abastecimento de água | 63 |
| 3.2 | METODOLOGIA | 65 |
| 3.2.1 | Levantamento dos dados | 66 |
| 3.2.1.1 | Construção do modelo no aplicativo de simulação hidráulica | 66 |
| 3.2.1.2 | Coletas de medições de campo | 66 |
| 3.2.1.3 | Tratamento e análise dos dados coletados | 67 |
| 3.2.2 | Elaboração do balanço hídrico | 68 |
| 3.2.3 | Construção do modelo no aplicativo de simulação hidráulica com inserção dos dados físicos da rede | 72 |
| 3.2.4 | Definição e inserção dos dados de demanda de água no modelo hidráulico | 74 |
| 3.2.5 | Calibração automática do modelo hidráulico por meio da ferramenta <i>Darwin Calibration do Software WaterGEMS</i> | 76 |
| 3.2.6 | Validação do modelo utilizando dados de vazão e pressão da RDA | 77 |
| 3.2.7 | Localização e detecção de vazamentos por meio da ferramenta <i>Darwin Leak Calibration do Software WaterGEMS</i> | 78 |
| 3.2.8 | Avaliação dos resultados com base em dados advindos de campanha de detecção de vazamentos | 79 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 81 |
| 4.1 | CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO | 81 |
| 4.2 | CÁLCULO DA VMN E DAS PERDAS | 86 |
| 4.2.1 | Dados das vazões e pressões do setor | 86 |
| 4.3 | COMPARAÇÃO DAS PERDAS DE ÁGUA PELOS MÉTODOS BH E VMN | 89 |
| 4.3.1 | Abordagem de perdas reais | 89 |
| 4.3.2 | Abordagem de perdas aparentes | 90 |
| 4.4 | MODELAGEM HIDRÁULICA DO DMC-39 | 91 |
| 4.5 | CALIBRAÇÃO DA RDA DO DMC-39 | 91 |
| 4.5.1 | Dados coletados | 91 |
| 4.5.2 | Consumo adotados nas junções | 93 |
| 4.6 | ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO | 93 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 4.7 | ANÁLISES DAS GRANDEZAS SIMULADAS E OBSERVADAS | 95 |
| 4.7.1 | Medição de vazão | 95 |
| 4.7.2 | Medição de pressão | 96 |
| 4.8 | ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO ANORMAL DA RDA | 99 |
| 4.9 | NOVA SIMULAÇÃO APÓS FISCALIZAÇÃO COM GEOFONE | 102 |
| 5 | CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO | 104 |
| | REFERÊNCIAS | 106 |
| | APÊNDICE A - ANÁLISE DAS INCERTEZAS DOS DADOS UTILIZADOS | 110 |
| | ANEXO A - VAZÃO DAS JUNÇÕES ÀS 15:00h DO DIA 23 DE MAIO DE 2022 DO DMC-39 | 112 |
| | ANEXO B - RELATÓRIO REALIZADO PELA COMPESA SOBRE OS LOCAIS APONTADOS PELO <i>SOFTWARE</i> COM POSSÍVEIS VAZAMENTOS NO DMC-39 | 117 |

1 INTRODUÇÃO

A nova Lei Federal nº 14.026/2020, referente ao novo marco legal regulatório do saneamento básico no Brasil, ressalta a necessidade de reduzir perdas de água em sistemas de abastecimento de água, estipulando metas para universalização do abastecimento de água e redução de perdas. O tema redução de perdas tornou-se uma preocupação inerente às empresas de saneamento, que não devem operar com elevadas perdas de água nos sistemas de abastecimento. Neste contexto, Berardi e Giustolisi (2021) destacam que, do ponto de vista da gestão de recursos hídricos, o volume de água perdido também está associado ao desperdício de energia, produtos químicos e mão de obra, gastos para bombear, tratar e transportar água das fontes para as torneiras dos consumidores.

Segundo Dighade (2014), a urgência em gerenciar os desafios decorrentes dos vazamentos nas tubulações de redes de distribuição tornou-se primordial nos últimos anos em virtude da escassez de água, causadas por crises hídricas (secas severas) sucessivas nas últimas décadas, do crescimento da demanda, e das pressões sociais, ambientais e políticas.

As perdas reais em alguns sistemas de abastecimento de água agravam a falta de água nas torneiras dos clientes, devido ao volume perdido pelos vazamentos nas tubulações, causando muitas vezes intermitência no abastecimento de água. Segundo o Atlas de Saneamento, Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário (IBGE, 2017), Pernambuco possui cinquenta municípios afetados com racionamento de água em decorrência da deficiência nas instalações e nos equipamentos para distribuição de água, incluindo Recife. De acordo com Ferrante *et al.* (2013), reduzir o volume de vazamento não apenas economiza água para abastecer a população cada vez maior, mas potencialmente evita ou, pelo menos, atrasa expansões dispendiosas do sistema por meio de obras hidráulicas e reduz custos relacionados a perdas energéticas e ambientais.

Neste contexto, segundo Campos (2023), caso as perdas de água no Brasil fossem reduzidas para 20%, haveria uma economia de 1.871.587.594 m³ de água / ano, o que seria suficiente para atender uma população aproximada de 34.659.030 habitantes/ano, causando um impacto positivo para o meio ambiente na redução de captação de água nos mananciais e sobretudo contribuindo para atingir a meta imposta pelo novo marco regulatório do saneamento básico, referente à universalização do sistema de abastecimento de água no Brasil.

As novas tecnologias aplicadas na modelagem matemática têm evoluído com o aumento da capacidade de processamento dos computadores, desta forma, permitindo usar a tecnologia a favor da gestão de perdas nas empresas. Neste contexto, a modelagem computacional dos

sistemas de distribuição de água se apresenta como importante técnica para a detecção de vazamentos.

A utilização de modelagem hidráulica em sistemas de distribuição de água é bastante habitual em muitos estudos voltados para a melhoria da eficiência hidráulica. O avanço dessa ferramenta facilita a previsão do estado do sistema sob diferentes condições. Um modelo hidráulico bem calibrado pode ser usado como referência para comparar dados hidráulicos de passo de tempo subsequentes em detecção de vazamento. Na análise baseada em modelo, a quantidade e a qualidade dos dados disponíveis são os principais fatores para a construção de um modelo bem calibrado, que é primordial para a obtenção de bons resultados. A detecção de vazamentos com o modelo hidráulico é baseada, principalmente, na análise residual entre as previsões do modelo hidráulico e o observado.

O envelhecimento das infraestruturas de abastecimento de água e dos respectivos equipamentos, desde a captação até o consumidor, é um processo natural e inevitável. À medida que os diferentes componentes do sistema (i.e., tubos, estações elevatórias, reservatórios, estações de tratamento e equipamentos eletromecânicos) se aproximam do fim da sua vida útil, o volume de perdas reais de água tende a aumentar, a ocorrência de rupturas e interrupções de abastecimento torna-se cada vez mais frequente, e os custos de manutenção corretiva dos sistemas aumentam (Gomes, 2007).

No Brasil, algumas empresas de Saneamento Básico estão em processo de planejamento e implantação de automação para monitoramento das grandezas hidráulicas (vazão, pressão e nível) nos sistemas de distribuição de água, utilizando dispositivos para a medição de pressão e vazão para detecção de vazamentos. A COMPESA, por exemplo, instalou na Região Metropolitana do Recife cerca de 2.000 *dataloggers* (registradores) com a finalidade de gerenciar e monitorar o sistema de abastecimentos de água. Desta maneira, prestando um serviço de melhor qualidade para a população.

O presente estudo propõe realizar estimativa das perdas de água, modelagem hidráulica e calibração para detecção de possíveis vazamentos em uma rede de distribuição de água localizada em Recife-PE. Desta forma, atuando com mais assertividade na procura dos vazamentos, principalmente, não visíveis (ocultos).

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo realizar estimativas de perdas de água, assim como localizar e detectar vazamentos, em uma rede de distribuição de água localizada em Recife – PE, por meio do desenvolvimento e avaliação de um modelo hidráulico calibrado.

1.1.2 Objetivos específicos

Realizar estimativa de perdas de água utilizando os métodos do balanço hídrico e da vazão mínima noturna no distrito de medição e controle (DMC-39) com o intuito de estimar as perdas reais.

Aplicar a modelagem hidráulica na rede de distribuição de água do distrito de medição e controle (DMC-39) por meio do *software WaterGEMS Connect Editon*.

Avaliar a localização e detecção de vazamentos em uma rede de distribuição de água por meio da ferramenta *Darwin Leak Calibration* do *software WaterGEMS*.

Permitir aos gestores das prestadoras de serviço de saneamento o direcionamento de seus recursos em escolhas mais assertivas no combate as perdas por vazamentos.

1.2 ESTRUTURA

Além desta Introdução, o presente trabalho está dividido em mais cinco capítulos. No Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico com uma revisão da literatura sobre sistemas de abastecimento de água, perdas físicas e aparentes, combate e controle das perdas, modelagem hidráulica, calibração e otimização.

No Capítulo 3 é apresentado a caracterização da área de estudo para aplicação da modelagem hidráulica, bem como uma descrição simplificada do sistema de abastecimento de água do DMC-39, assim como os materiais e métodos usados para o estudo esclarecendo a montagem do problema, os indicadores de desempenho do sistema de abastecimento de água do Recife e do DMC-39, balanço hídrico, vazões mínimas noturnas, aplicação da modelagem hidráulica para detectar vazamentos, análise de consistência dos dados de vazões e pressões registrados nos *dataloggers*, construção do modelo no aplicativo de simulação hidráulica, tratamento de dados para simulação e análise, calibração do modelo com uso da ferramenta

“*Darwin Leak Calibrator*”, avaliação das perdas, análise da eficácia dos resultados no diagnóstico de perdas de água.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados gerais obtidos com os métodos do balanço hídricos e da vazão mínima noturna, além da utilização da modelagem hidráulica para detecção de perdas. Por fim, no Capítulo 5, são destacadas as principais conclusões do estudo e contribuições, bem como as suas limitações, além de sugeridos trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PERDAS DE ÁGUA

Na década de 70, o Brasil concebeu o Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANASA, com o intuito de fornecer as diretrizes no combate às perdas de água, na época as ações foram priorizadas em micromedição, pitometria e pesquisas de vazamentos não visíveis (Vicentini, 2012). Dando continuidade, Vicentini (2012), visando a melhoria da gestão no controle das perdas de água, o Governo Federal instituiu o Plano de Modernização do Setor de Saneamento em 2003, fornecendo suporte técnicos para os prestadores e reguladores dos serviços de saneamento básico.

De acordo com o Atlas Águas (2021), as perdas nos SAA's têm que ser tratadas como fenômeno bastante complexo, primeiramente, é necessário distinguir as perdas reais em relação as aparentes, em relação a primeira, a água não chega passar no medidor do cliente, e a segunda, a água passa pelo hidrômetro, mas não é contabilizada, por diversos motivos (por exemplo, submedição, fraudes e ligações clandestinas).

Os volumes perdidos nos vazamentos de água, correspondem as perdas reais, os quais contribuem para o aumento do custo de produção, tais como o custo de energia elétrica, produtos químicos, mão de obra, dentre outros. No que diz respeito as perdas aparentes, os custos são relacionados ao consumidor na ponta, através da política tarifaria de cada companhia de saneamento (Tsutiya, 2013). Demonstrado sinteticamente na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização geral das perdas

| Item | Características principais | |
|---|--|---------------------------------------|
| | Perdas reais | Perdas aparentes |
| Tipo de ocorrência mais comum | Vazamentos | Erro de medição |
| Custo associados ao volume de água perdido | Custo de produção de água tratada | Valor cobrado no varejo ao consumidor |
| Efeito no meio ambiente | Desperdícios de recursos naturais Maiores impactos ambientais devido a necessidade de ampliação da exploração de mananciais | Não é relevante |
| Efeito na saúde pública | Riscos de contaminação | Não é relevante |
| Ponto de vista empresarial | Perda de produto “industrializado” Imagem negativa da empresa, | Perda elevada de receita |
| Ponto de vista do consumidor | associado as desperdício e ineficiência | Não é uma preocupação imediata |

Fonte: Adaptado de Tsutiya (2013).

Entretanto, o Governo Federal através do Ministério do Desenvolvimento Regional publicou a Portaria nº 490, de 23 de março de 2021, condicionando para alocação de recursos públicos federais e os financiamentos ou recursos da união ou recursos geridos ou operados por órgãos ou entidades da união, exigência de redução de perdas de água na distribuição, e para objetivo de comprovação de cumprimento do índice de perdas de água na distribuição, precisam ser adotados os índices de perdas IN049 (índice de perdas na distribuição, medido em percentual) e IN051 (índice de perdas por ligação, medido em litro/ligação/dia), e enquanto não seja criado o Sistema de Informações de Saneamento Básico (SINISA) devem-se adotar esses indicadores do SNIS. Para atendimento a condição estabelecida anteriormente, os municípios a serem beneficiados, devem atingir as metas para os indicadores, sendo iguais ou menores à seguinte proporção do índice médio nacional da última atualização da base de dados do SNIS, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Metas estabelecidas para o indicador de IPD

| Anos | Percentual atingir em relação à média nacional do IPD |
|--------------------|---|
| 2021 – 2022 | 100% |
| 2023 – 2024 | 95% |
| 2025 – 2026 | 90% |
| 2027 – 2028 | 85% |
| 2029 – 2030 | 80% |
| 2031 – 2032 | 75% |
| 2033 | 70% |
| 2034 | 65% |

Fonte: Autor (2022), adaptado da Portaria nº 490/2021 do MDR.

De maneira geral, as perdas de água em sistemas de abastecimento de água são influenciadas por diversos fatores estruturais e operacionais. Estas dependem basicamente das características da rede hidráulica e de fatores relacionados às práticas de operação, do nível de tecnologia do sistema e da experiência dos técnicos responsáveis pelo controle dos processos em SAA's (Bezerra e Cheung, 2013).

De acordo com o SNIS (2021), as perdas de água na distribuição aumentaram, sendo observado que os maiores índices foram nas regiões Norte (51,2%) e Nordeste (46,3%) e nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste foram menores, ainda assim superiores a 30%. Quanto aos Estados da Federação, o menor percentual foi do Estado de Goiás (27,7%) e o maior com 74,6% no Estado de Amapá. Sendo este último perde quase 75% da água produzida no estado. Em relação ao Estado de Pernambuco, este índice está próximo de 50%. Na Tabela 3, encontra-se os dados de todas as macrorregiões.

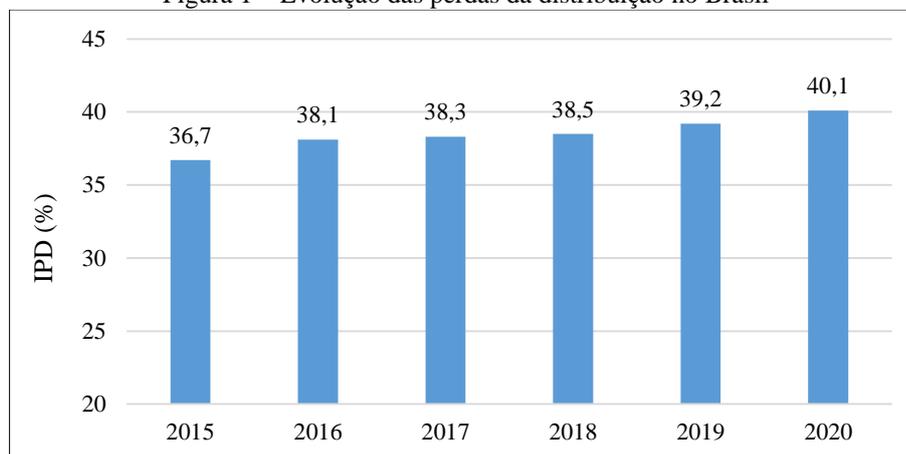
Tabela 3 – Índice de perdas na distribuição – IPD

| Macrorregião | IPD |
|---------------------|---------------|
| Norte | 51,2 % |
| Nordeste | 46,3 % |
| Sul | 36,7 % |
| Sudeste | 38,1 % |
| Centro Oeste | 34,2 % |
| Brasil | 40,1 % |

Fonte: Adaptado do SNIS (2021).

Analisando a evolução das perdas na distribuição no sistema de abastecimento de água do Brasil, verifica que na Figura 1 aponta um aumento de 9,26% entre os anos de 2015 e 2020. Indicando uma má gestão no combate as perdas (SNIS, 2021).

Figura 1 – Evolução das perdas da distribuição no Brasil



Fonte: Autor (2023). Elaborado com dados do SNIS (2021)

De acordo com a *IBNET* (2022), as perdas de água não lucrativa (%) refere-se à quantidade de água fornecida menos a vendida, ou seja, o volume de água perdido, expresso em percentagem. Desta forma, pode-se comparar com o indicador IN049 adotado pelo SNIS (2021). Na Tabela 4, encontram-se os indicadores de perdas de água dos países desenvolvidos.

Tabela 4 – Águas não lucrativas dos países desenvolvidos

| Países desenvolvidos | Águas não lucrativas (%) | |
|-----------------------------|---------------------------------|-------------|
| | 2019 | 2020 |
| Estados Unidos | 16,22 | 13,58 |
| Bélgica | 26,61 | 26,15 |
| Noruega | 35,24 | 34,10 |
| Finlândia | 20,80 | 19,09 |
| Nova Zelândia | 23,41 | 21,23 |

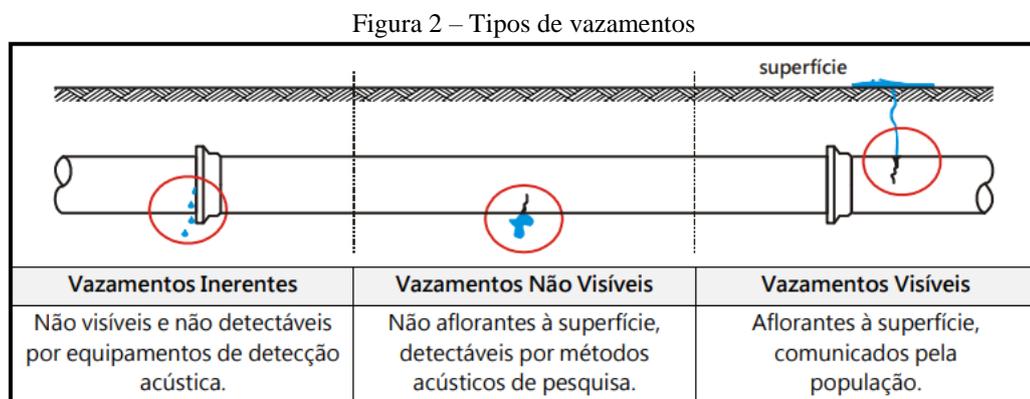
Fonte: IBNET (2022).

2.1.1 Perdas reais

Em conformidade com a nova designação proposta pela *International Water Association* – IWA, denominada de Perdas Reais, corresponde ao volume de água que não chega ao consumidor na ponta, devido a diversos motivos, por exemplo: ocorrência de vazamentos nas adutoras; rede de distribuição e bem como extravasamento de reservatórios (Tsutiya, 2013).

Existem três tipos de vazamentos que foram denominados pela IWA, conforme demonstrado na Figura 2:

- Vazamentos Inerentes: De pequena magnitude e são de maneira em geral, não detectável por equipamento de detecção acústica;
- Vazamentos não visíveis: Mesmo não aflorando a superfície, são detectáveis através de pesquisa acústica, sendo bastante considerado sua magnitude ao passar do tempo;
- Vazamentos visíveis: Aflora a superfície, desta forma, é mais fácil realizar o conserto da tubulação.



Fonte: Modificado de Tardelli Filho (2006).

De acordo com *American Water Works Association* (AWWA, 1999) as razões mais frequentes das perdas reais de água em SAA são:

- Fabricação de material que não preserve aos padrões de qualidade, desde a má qualidade do material empregado ou na montagem destes, acarretando imperfeições nas bordas e superfícies;
- Tubulações assentadas em vala sem o material adequado, causando rupturas devido ao tráfego veículo pesados ou deflexão excessiva nas juntas;

- Falta de experiência dos operadores, provocando pressões elevadas nas aberturas de válvulas ou fechamento rápido de manobras podendo causar transientes hidráulico no sistema;
- Dependendo da qualidade da água, poderá ocorrer incrustações internas na tubulação, provocando perdas de cargas acima do previsto, desta forma aumentando a pressão no sistema e conseqüentemente, causando a ruptura da tubulação;
- Falta de manutenção preventivas nos componentes dos elementos da tubulação como ventosas, válvulas, hidrantes entre outros.

2.1.2 Perdas aparentes

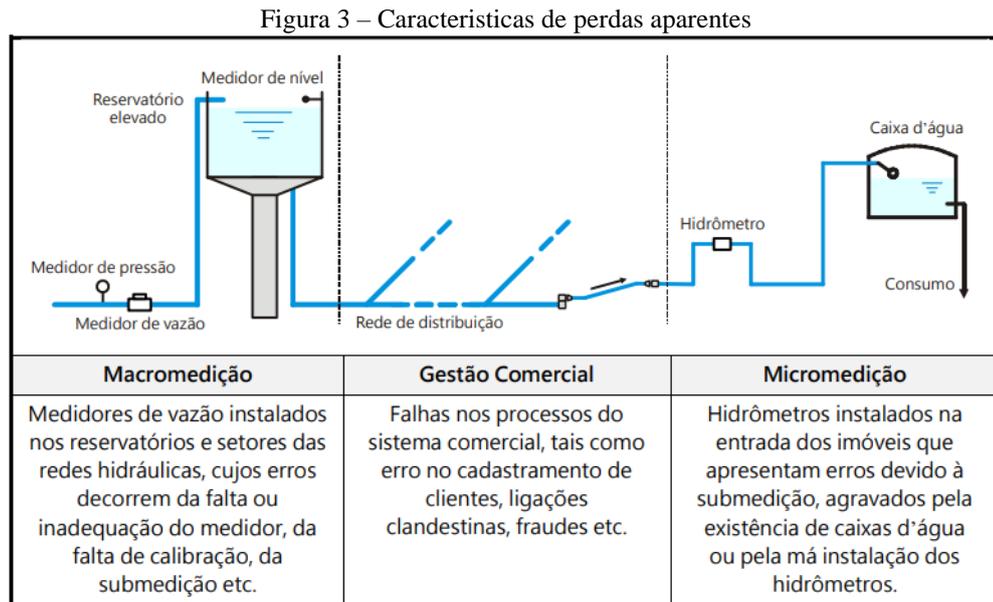
Uma empresa onde seu produto principal é a venda de água, o hidrômetro é a “caixa registradora”, desta forma, a micromedição com todas as suas funções, não poderá ser negligenciada, podendo acarretar prejuízo financeiro incalculável, por isso deve estar inserida no contexto da área comercial (Coelho, 2009). Segundo Tardelli Filho (2006), essa água foi consumida, mas não foi faturada, devido a vários fatores: submedição; ligações clandestinas; falhas no cadastro comercial e ligações sem hidrômetros, dentre outros. Bezerra e Cheung (2013) afirmam que, são denominadas de perdas não-físicas e perdas comerciais, e não foram contabilizados pelo consumidor na ponta, apesar de serem consumidas através de furto em alguns dispositivos de proteção do sistema adutor ou erro de leitura, bem como falha no cadastro comercial, furto ou uso em ilegal.

Segundo Coelho (2006) relata que, os principais motivos das perdas aparentes são as seguintes:

- Hidrômetro mal dimensionado;
- Ligações clandestinas;
- Desvio fraudulento do hidrômetro;
- Violação do hidrômetro;
- Hidrômetro invertido;
- Ligação cortada e religada à revelia;
- Ligação suprimida e religada à revelia;
- Submedição de hidrômetro;
- Reservatório com vazamento devido problema na boia;
- Válvula com vazamento;
- Caixa de descarga com vazamento;

- Coluna de alimentação com problema;
- Cliente sem hidrômetro.

Na Figura 3 nota-se alguns pontos prováveis de vazamentos que faz parte de um sistema de abastecimento que caracteriza em perdas aparentes.



Fonte: Modificado de Tardelli Filho (2006).

2.1.3 Indicadores de perdas

Os indicadores de perdas servem de orientação para os gestores das companhias de saneamento, no sentido de direcionar os investimentos, desta forma tendo maior possibilidade de asserto e, conseqüentemente, maior garantia do retorno dos investimentos aplicados, refletindo em melhorias nas prestações dos serviços.

Mediante os aspetos citados acima, Alegre *et al.* (2006) afirmaram que as companhias de saneamento desconhecem a real necessidade de gerenciar com dados confiáveis sobre o volume de água disponível e medido, desta forma subestimando os indicadores de perdas, não priorizando as ações que poderiam melhorar o faturamento da empresa, caso investisse em redução de perdas.

De acordo com Motta (2018), mensurar as perdas de água no sistema através de indicadores, permite criar um banco de dados que possibilita a comparação de vários períodos, desta forma podendo equiparar o volume distribuído e consumido. Além do mais, permiti

conhecer o estágio das perdas, conhecendo o volume perdido, assim direcionando as ações de controle e diminuição

Segundo a Portaria nº 490/2021 do Ministério do Desenvolvimento Regional, exige para ser adotados os indicadores: IN049 (índices de perdas de distribuição – IPD) e IN051 (índice de perdas por ligação – IPL). Sendo ambos desenvolvidos pelo SNIS. Para que as Companhias de Saneamento reduzissem em 25% destes indicadores, até o ano de 2034, considerando os índices composto no relatório do SNIS do ano de 2020, assim impondo as gestoras das Companhias a buscarem a eficiência e eficácia na prestação dos serviços públicos. Além de condicionarem liberação de recursos financeiros do Governo Federal no atingimento das metas estipuladas pelo MDR.

Segundo recomendação da IWA os indicadores de perdas de água foram propostos para avaliar a infraestrutura das redes de distribuição de água, baseado nos conceitos BABE, dentre esses:

- índice de perdas na distribuição;
- índice de perdas reais inevitáveis;
- índice de perdas reais anual inevitáveis e;
- índice de vazamento de infraestrutura.

Em relação ao primeiro índice, será tratado de acordo com a metodologia do SNIS em itens posteriores, já sobre os demais serão considerados. Bezerra (2013) afirma que o Índice Perdas Reais Inevitáveis (PRI), expresso na unidade em L/dia, é representado pela Equação 1.

$$PRI = (18xEXT_{rede} + 0,8xLIG + 25.C_{ramal}xLIG)xP \quad \dots Eq.(1)$$

em que EXT_{rede} é a extensão da rede em km; LIG é quantidade de ligações ativas; C_{ramal} é o comprimento médio da ligação desde a divisa do terreno até o hidrômetro em km e P é a pressão média do setor em mca

Ainda segundo Bezerra (2013), a pressão influencia muito no resultado no índice de perdas reais inevitáveis. Qualquer variação no valor da pressão, resulta alterações expressivas no cálculo da Equação 1.

Outro indicador importante na avaliação dos sistemas é o índice de vazamento de infraestrutura (IVI), que é considerado pela maioria dos especialistas da área, o melhor indicador de desempenho para perdas reais, além de ser recomendado pela IWA (Farley *et al*,

2008; Thornton, Sturm e Kunkel, 2008). As Equações (2) e (3) representam a razão entre os volumes de perdas real de água e a perda real inevitável, que corresponde ao IVI.

$$IVI = \frac{V_F - V_{CA} - V_{PA}}{PRI} \dots \text{Eq. (2)}$$

$$IVI = \frac{V_F - V_{CA} - V_{PA}}{(18 \times EXT_{rede} + 0,8 \times LIG + 25 \cdot C_{ramal} \times LIG) \times P \times \left[\frac{365}{1000} \right]} \dots \text{Eq. (3)}$$

em que V_F é o volume fornecido, em m^3 ; V_{CA} é o volume de consumo autorizado, m^3 ; e V_{PA} é o volume de perdas aparentes, em m^3 .

A Tabela 5 indica os valores de IVI agrupados em quatro categorias de desempenho técnico (A, B, C e D), cujas avaliações de perdas são:

- A – não considerada econômica a redução de perdas inferior a este nível, a não ser que o abastecimento não seja suficiente, no entanto são necessárias análises mais ponderada para identificar o custo da melhoria legítima.
- B – possibilidade de melhorias relevantes; admite o gerenciamento das pressões; melhores práticas de controle ativos de vazamentos e uma melhor manutenção de rede.
- C – ficha irregular de vazamentos; caso tenha bastante água e custo baixo, só assim torna-se aceitável; apesar disso, verificar o nível e a natureza dos vazamentos e especificar o empenho para redução de vazamentos.
- D – Falta de eficácia no uso dos recursos; implantar urgentemente programa de redução de vazamento.

Tabela 5 – Matriz de avaliação de perdas de água baseado em IVI

| Categoria de desempenho técnico | IVI | Pressão média (metros) | | | | | |
|---------------------------------|-----|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | |
| | | Perdas (litros/ligação/dia) | | | | | |
| Países desenvolvidos | A | 1 – 2 | - | <50 | <75 | <100 | <125 |
| | B | 2 – 4 | - | 50-100 | 75-150 | 100-200 | 125-250 |
| | C | 4 – 8 | - | 100-200 | 150-300 | 200-400 | 250-500 |
| | D | >8 | - | >200 | >300 | >400 | >500 |
| Países em desenvolvimento | A | 1 – 4 | <50 | <100 | <150 | <200 | <250 |
| | B | 4 – 8 | 50-100 | 100-200 | 150-300 | 200-400 | 250-500 |
| | C | 8 – 16 | 100-200 | 200-400 | 300-600 | 400-800 | 500-1000 |
| | D | >16 | >200 | >400 | >600 | >800 | >1000 |

Fonte: Adaptado do Banco mundial (2008).

Recomenda-se não utilizar o PRI em sistema com baixas pressões operacionais, menor do que 20 mca e também com elevada intermitência no suprimento de água. Além disso, não é adequado com baixo índice de ligações. Enfim, também não pode calcular para períodos inferiores a um ano (Bezerra e Cheung, 2013).

Assim como IWA PI e SNIS divulgam os indicadores de relevância inegável à regulação, por embasarem características de eficácia final na prestação dos serviços. Entretanto, nem todos os indicadores se prestam na regulação. Pelo contrário, a formalização de um referencial excedente de indicadores visaria desagregar a relação normativa entre o serviço regulado e sua eficácia final. Desta forma, a facilidade de gerar relatórios em vez de ajudar, dificulta o trabalho de regulação e controle da prestação de serviço (Galvão Junior e Ximenes, 2008).

Neste sentido, nos itens a seguir, aborda e discute a relevância dos indicadores de perdas, sugeridos pelo SNIS.

2.1.3.1 Índice de perdas de distribuição (IN049 – em percentual)

O IN049 (%) é um indicador volumétrico da água na distribuição perdida, comparando com a água produzida que é obtida por meio da Equação (4):

$$IN049 = \frac{AG006+AG0018-AG010-AG024}{AG006+AG018-AG024} X 100 \quad \dots \text{Eq.(4)}$$

Onde AG006 é o volume de água produzido, AG010 corresponde ao volume de água consumindo, AG018 é o volume de água produzido importado e AG024 significa o volume de água de serviço.

Bezerra e Cheung (2013) afirmam que este indicador é considerado comum e não recomenda sua aplicação com objetivos operacionais. Os autores, alegam, várias críticas em relação ao indicador:

- A utilização deste indicador oferece desvio na análise de desempenho e na comparação entre os sistemas;
- Geração de impasse na combinação entre os períodos de medição da água ofertada e consumida;
- Assim também, ocorre impasse física entre os grupos de leitura de hidrômetros e os setores de macromedição;

- Deficiência na regulação entre os diversos sistemas brasileiros das definições dos componentes usados na fórmula de cálculo;
- Por último, a função da relação percentual entre os volumes ofertados e consumido, não são adequados para esclarecer perdas.

Por outro lado, segundo os mesmos autores, Bezerra e Cheung (2013) sugerem que, mesmo assim, existe importância na apuração sistemática do referido indicador, além de um certo grau de veracidade, assim como uma tendência de evolução das perdas nos sistemas, que poderá constituir de ferramenta valiosa para controle e monitoramento do nível de perdas. Além do mais, segundo SNIS (2020) afirma que o indicador (IN049) possui uma utilidade para o público menos especializado por ter uma boa compreensão.

Uma forma de avaliar os resultados do indicador (IN049), foi através da classificação do desempenho do sistema de abastecimento de água, conforme Tabela 6 (Tardelli Filho, 2006).

Tabela 6 – Classificação do desempenho do SAA

| Índice total de perdas | Classificação do sistema |
|-------------------------------|---------------------------------|
| IPD < 25 % | Boa gestão |
| 25% < IPD < 40% | Gestão regular |
| IPD > 40% | Má gestão |

Fonte: Tardelli Filho (2006).

O Índice de Perdas na Distribuição (IN049) do Brasil foi, em 2020, de 40,10%, conforme Tabela 7, em que se percebe o IN049 mais crítico é nas regiões do Norte e Nordeste do País, onde o índice foi superior a 45% (SNIS, 2021). Diante do resultado, as regiões Norte e Nordeste podem ser classificadas de acordo com a Tabela 5, como: sistema mal gerenciado. Em relação as regiões Sul e Sudeste obtiveram os menores índices.

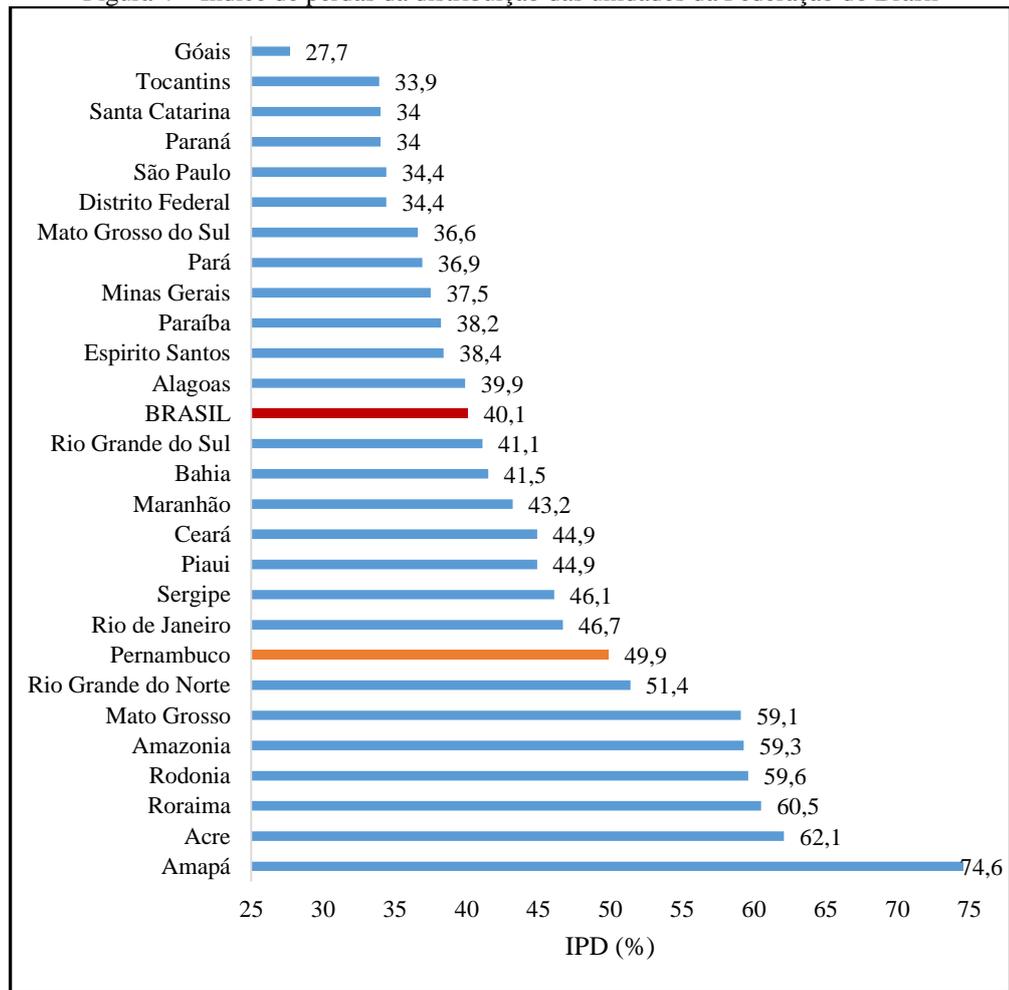
Tabela 7 – Índice de perdas da distribuição no Brasil

| Macrorregião | Abrangência do prestador de serviço | | | | | Total |
|---------------|-------------------------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------|
| | Regional (%) | Microregional (%) | Local direito público (%) | Local direito privado (%) | Local empresa privada (%) | |
| Norte | 55,7 | 32,4 | 31,7 | - | 63,4 | 51,2 |
| Nordeste | 46,9 | - | 43,1 | 24,6 | 50,3 | 46,3 |
| Sudeste | 39,3 | 25,5 | 37,1 | 31,3 | 31,2 | 38,1 |
| Sul | 37,6 | 25,7 | 34,6 | 41,8 | 34,4 | 36,7 |
| Centro Oeste | 31,9 | 36,8 | 37,1 | - | 38,9 | 34,2 |
| Brasil | 41,2 | 26,7 | 37,0 | 32,7 | 44,1 | 40,1 |

Fonte: SNIS (2021).

Em relação aos Estados da Federação, observa-se na Figura 4 que o Estado de Pernambuco está com índice elevado, acima da média nacional em 24,43%, significa que, de acordo com a Portaria nº 490, de 23 de março de 2021 do MDR, o índice que a entidade gestora de Saneamento de Pernambuco deverá atingir em 2034 será 30,07% do IPD, como também para os demais Estados da Federação, sendo os mais desfavoráveis os Estados, Rio Grande do Norte, Mato Grosso, Amazônia, Rondônia, Roraima e Acre, todos com índice acima de 50%, sendo o Amapá em situação extrema, precisa diminuir o índice em torno de 60% do valor de 2020. Entretanto, em condições de atingirem a meta são: estados de Tocantins; Santa Catarina, Paraná; São Paulo e Distrito da Federação. Apenas o estado de Goiás já está abaixo da meta.

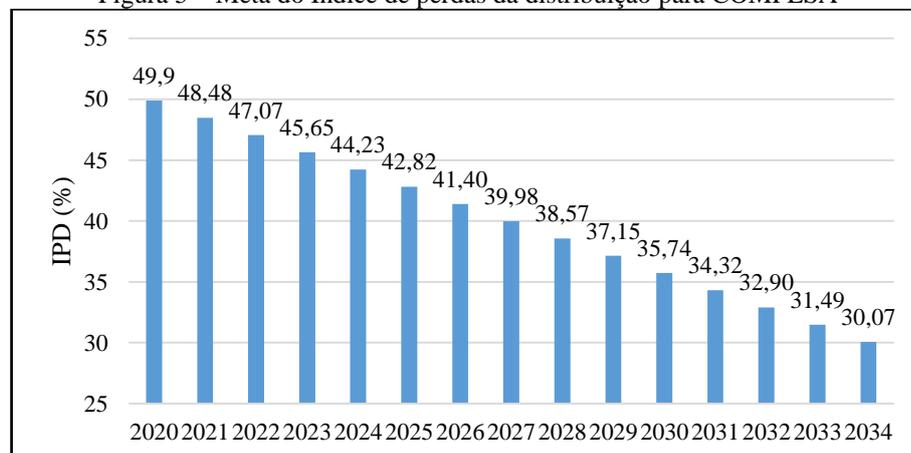
Figura 4 – Índice de perdas da distribuição das unidades da Federação do Brasil



Fonte: Autor, adaptado SNIS (2021).

Verificando o percentual que o Estado de Pernambuco precisará diminuir a cada ano até atingir a meta de 30,07% do IPD a partir de 2021, através da Figura 5, nota-se que deverá reduzir cerca de 1,41 pontos percentuais por ano.

Figura 5 – Meta do Índice de perdas da distribuição para COMPESA



Fonte: Autor, adaptado Portaria nº 490/21 do MD (2021).

2.1.3.2 Índice bruto de perdas lineares (IN050 – em m³. km⁻¹. dia⁻¹)

Mediante a necessidade de apresentar um indicador de perdas que representasse de maneira mais adequada sistemas de abastecimento de água distintos, foi sugerido o IN050 pelo SNIS, que consideram a pressão de serviço, à extensão da rede, o número e comprimento das ligações de água, expresso através da Equação (5):

$$IN050 = \frac{AG006 + AG018 - AG010 - AG024}{AG005} \times \frac{1.000}{365} \quad \dots \text{Eq. (5)}$$

em que AG006 é o volume de água produzido, AG018 corresponde ao volume de água tratada importada, AG010 é o volume de serviço e AG005 é a extensão da rede de água, sendo este último elemento utiliza-se a média aritmética dos valores do ano de referência e do ano anterior ao mesmo.

Segundo Bezerra e Cheung (2013), além do SNIS ter apresentado o indicador IN050, a IWA também adota o mesmo, sendo com outra nomenclatura, Op24, mas com as mesmas características técnicas. Os autores afirmam que este indicador incluem as perdas reais e aparentes, sendo classificado como um indicador intermediário e operacional, tem a finalidade de distribuir as perdas ao longo da extensão da rede, indicando valores altos quando há ocupação urbana elevada, e não se adota para número inferior a 20 ligações por km de rede.

2.1.3.3 Índice de perdas por ligação (IN051 – em L.lig⁻¹. dia⁻¹)

Em relação ao indicador IN051, avalia as perdas considerando as ligações ativas de água que é obtida através da Equação (6):

$$IN051 = \frac{AG006 + AG018 - AG010 - AG024}{AG002} \times \frac{1.000}{365} \quad \dots \text{Eq. (6)}$$

onde AG006 é o volume de água produzida, AG018 é o volume de água tratada importada, AG010 é o volume de água consumida, AG024 equivale ao volume de serviço e AG002 é a quantidade de ligações ativas de água, considerando a média do ano de referência e do ano anterior.

De acordo com Portaria Nº 490/2020 do Ministério do Desenvolvimento Regional do Governo Federal, adotou o indicador (IN051) como condicionante para liberação de recursos financeiros, ou seja, as entidades candidatas devem atingirem as metas estipuladas, conforme descrita no item 2.2 deste.

Segundo o último SNIS (2021), o volume médio de perdas de água por ligação ativas é de 343,4 L/lig./dia nos municípios do Brasil. Nas macrorregiões os índices de perdas por ligação variam de 235,9 L/lig./dia, na região Centro-Oeste, a 595,9 L/lig./dia, na Norte (Tabela 8). E de acordo com o índice estipulado como meta para as companhias reduzirem 25% do valor médio do Brasil, significa que até 2034 os prestadores de serviço de saneamento devem atingir o índice de 257,55 L/lig./dia. Desta forma, as que estão com os índices elevados, no caso da região Norte, terão maiores dificuldades em diminuir o volume de perdas de água por ligação, haja vista que deverá reduzir 56,72% do IPL em 14 anos.

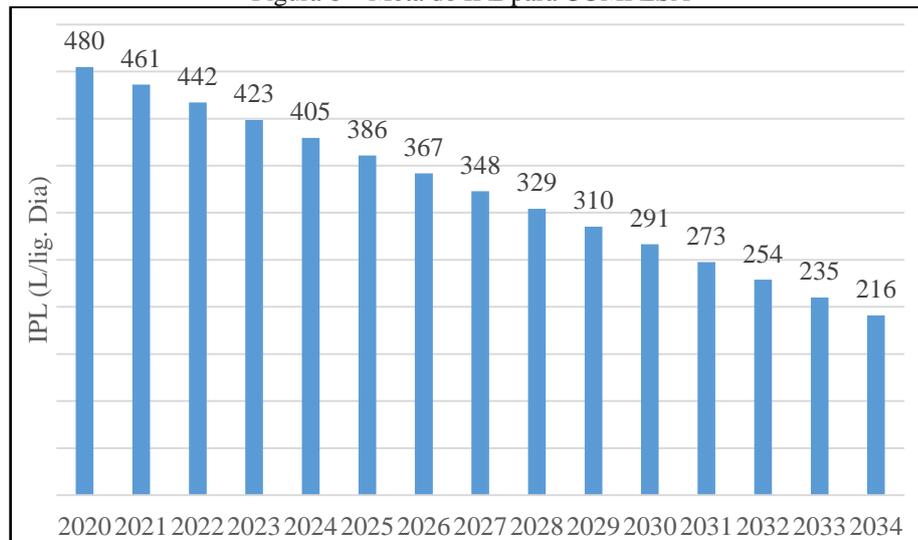
Tabela 8 – Índice de perdas por ligação/dia

| Macrorregião | IPL (L/lig./dia) |
|---------------------|-------------------------|
| Norte | 595,9 |
| Nordeste | 349,1 |
| Sul | 289,4 |
| Sudeste | 354,3 |
| Centro Oeste | 235,9 |
| Brasil | 343,4 |

Fonte: Autor, adaptado SNIS (2021).

Em se tratando da meta estipulada pela Portaria nº 490/20 do MDR referente ao IPL, o Estado de Pernambuco precisará diminuir o índice de 479,88 L/lig./dia para 216 L/lig./dia, ou seja, reduzir 263,88 litros por ligação por dia em 14 anos, conforme mostra o gráfico (Figura 6). A redução anual deverá ser de 18,85 L/lig./dia. Desta forma, poderá atingir a meta para o indicador.

Figura 6 – Meta do IPL para COMPESA



Fonte: Autor, adaptado Portaria nº 490/21 do MDR (2021).

2.2 PRÁTICAS DE COMBATE AS PERDAS REAIS

Em nenhum sistema de abastecimento de água está imune as perdas, não existem redes totalmente estanques, todas vazam em menores ou maiores proporções. Mas não se pode admitir perdas reais igual ou superior a 40% do total disponibilizado para o abastecimento, não é só o Brasil que carrega esse fardo, geralmente, a maioria dos países em desenvolvimento está igual ou superior a este patamar (Bezerra e Cheung, 2013)

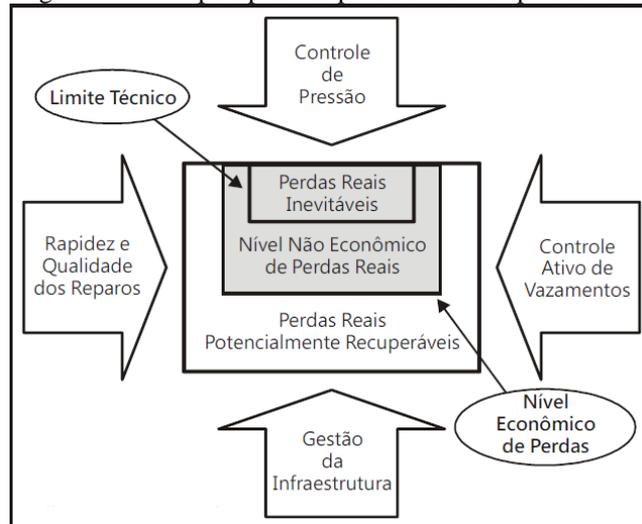
No Brasil, a norma ABNT NBR 12218/1994, sugere alguns parâmetros para dimensionamento de rede para evitar sobrecarga nas redes de distribuição, desta forma segundo Bezerra e Cheung (2013):

(...) recomenda que a rede de distribuição de água seja dividida em zonas de pressão. Nestes setores, a pressão estática máxima nas tubulações distribuidoras deve ser de 50 mca, com exceção dos condutos principais que não abastecem consumidores ou condutos secundários. Sempre que possível, recomenda-se adotar as zonas de pressão coincidentes com os Distritos de Medição e Controle. Há um limite inferior para as pressões de serviço, de modo a garantir que a água chegue aos pontos de consumo com uma carga hidráulica suficiente para vencer as perdas nas instalações residenciais. A norma citada estabelece uma pressão dinâmica mínima de 10 mca.

Tardelli Filho (2006) afirma que, “cada sistema de abastecimento possui características próprias que definem quais ações proporcionarão redução de perdas e manutenção a um nível aceitável”. Manter as ações continua no combate a redução das perdas, independe do nível que

esteja o sistema, é o que tem demonstrado a experiência adquirida ao longo do tempo na permanência dos bons índices. A Figura 7 demonstram as fases dos componentes básicos para controle de vazamentos que são: Controle de pressão; Controle ativo de vazamentos; Gestão de Infraestrutura; Rapidez e qualidade dos reparos (Bezerra e Cheung, 2013).

Figura 7 – Principais práticas para controle de perdas reais



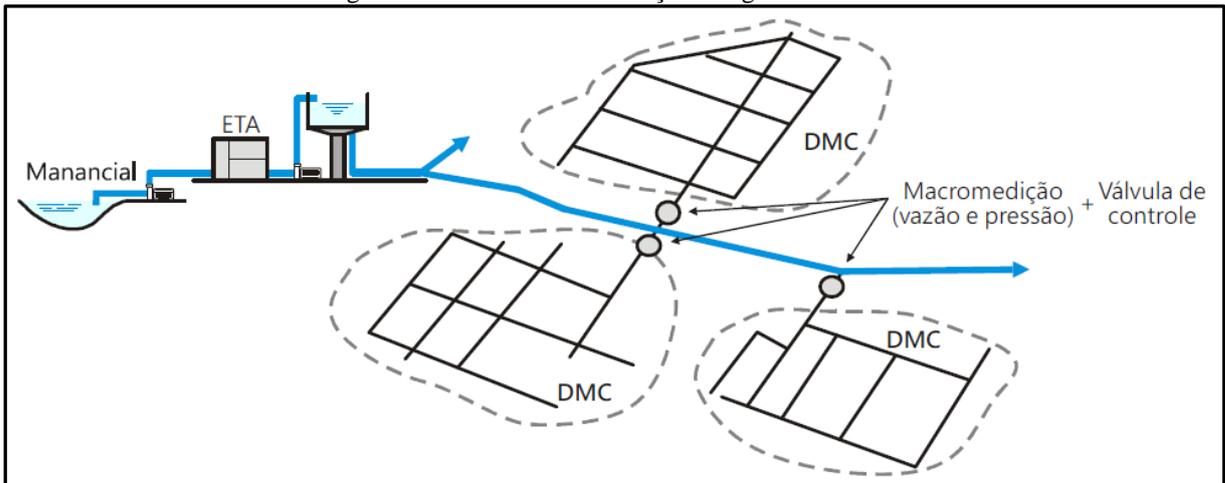
Fonte: Adaptado IWA, AWWA, Bezerra e Cheung (2013).

2.2.1 Setorização da rede

Desde os anos 80 que foi implementada pelos Ingleses a metodologia de gestão de perdas através da setorização, denominado de Distrito de Medição e Controle – DMC , como sendo um setor de distribuição de água, com a finalidade de isolar a área de abastecimento pelo fechamento de válvulas e/ou desconexão de trechos, de tal forma que a vazão medida na entrada é comparada com dos micromedidores, possibilitando aos gestores a quantificação do volume perdido, norteando nas tomadas de decisões no combate as perdas reais e aparentes. A setorização garante o isolamento da área do abastecimento de água, em áreas menores e bem delimitada, conforme Figura 8 (Bezerra e Cheung, 2013).

De acordo com a norma ABNT NBR 12128/1944, Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público, no item 3.2 relata que, o setor de manobra é a menor subdivisão da rede de distribuição, podendo ser isolado o abastecimento, sem prejudicar o abastecimento do restante da rede. Além de outro setor de medição, item 3.3, parte da rede de distribuição é isolada e delimitada, facilitando o acompanhamento da evolução do consumo dentro da área, desta forma, pode-se quantificar o volume de água perdido através da macro e micromedição.

Figura 8 – Sistema de distribuição de água setorizado



Fonte: Adaptado Bezerra e Cheung, (2013).

2.2.2 Gerenciamento das pressões

Toda rede de distribuição de água é dimensionada considerando a norma ABNT NBR 12218/1994, recomenda a pressão mínima dinâmica da rede de 10 mca e a máxima estática de 50 mca. Para não fugir deste intervalo de pressão, é preciso subdividir a rede em zonas de pressão, alta, média e baixa, sendo que cada zona de pressão poderá ser abastecida por um ou mais reservatórios ou até mesmo dividido por válvula reguladora de pressão (Tsutyia, 2006).

Além da norma Brasileira, algumas Companhias de Saneamento Básico, adotam sua própria norma, a COMPESA recomenda através da norma GPE-NI-014-01, Diretrizes Gerais para Elaboração de Projeto de Rede de Distribuição de Água:

(...) As zonas de pressão devem ser estabelecidas de modo a serem atendidos os limites para as pressões dinâmicas mínimas e pressões estáticas máximas na rede, que não deverão extrapolar o intervalo de 10 a 40 mca. Em casos específicos, em cidades com regime de abastecimento de água intermitente, poderão ser admitidas pressões dinâmicas mínimas de 6 mca.

2.2.3 Controle ativos de fugas

Uma Companhia de Saneamento que se prese, deve realizar controle de ativo de vazamento, através de métodos acústico de pesquisa. Segundo Alegre *et al* (2004; 2005) existem várias técnicas capaz de detectar fugas em condutas:

- Subzonamento da rede de um DMC (estretar área de pesquisa);
- Localização e detecção da fuga (diligências periódicas);
- Reparação de fugas encontradas (ação imediata);

Outra maneira de reduzir perdas reais em SAA é identificar o local do vazamento em RDA. Utilizar métodos de campo para identificar o local do vazamento em toda RDA é demorado e antieconômico. Antes de usar métodos de campos, é melhor primeiro identificar a zona de vazamento, calibrando e simulando o modelo hidráulico da RDA e, em seguida, determinar a localização exata do vazamento usando dispositivo de detecção de vazamento. Desta forma, o uso da modelagem hidráulica para detectar vazamento é valorizado por ser mais econômico e gastar-se menos tempo, sendo mais assertivos nas localizações dos vazamentos, principalmente, os não visíveis, sendo o foco deste estudo.

Após utilizar modelos de simulação hidráulica para detectar possível vazamentos em rede de distribuição de água, com a finalidade de elaborar diagnóstico de perdas de água, reduzindo área de pesquisa de vazamento, otimizando o trabalho da equipe caça vazamentos, segundo Palo (2010) o resultado foi bastante eficaz.

2.2.4 Reparo de vazamento

Geralmente, as Companhias de Saneamento Básico terceirizam este tipo de manutenção, as vezes o contrato de prestação de serviço é mal elaborado, atualmente está ocorrendo uma migração para contrato por performance, este tipo de contrato melhora a qualidade do serviço prestado, dando mais qualidade na realização do reparo do conserto do vazamento, desde que o gestor monitore e fiscalize as cláusulas do contrato. Desta forma, caso ocorra vazamento no mesmo local do ocorrido a empresa é penalizada, através de multa ou até suspensão por justa causa do contrato firmado. Além de melhorar a infraestrutura e logística de tal forma que agiliza o reparo em um menor prazo possível.

2.2.5 Reabilitação da infraestrutura

Enquanto as intervenções de reparação de fugas nas tubulações ocorram de formas pontuais, não se faz necessário substituição da infraestrutura. Entretanto quando os níveis de perdas se elevam bastante numa determinada área ou rompimentos nas tubulações, indica um mau estado de conservação, desta forma o gestor deve se atentar para um estudo detalhado de

viabilidade para realizar as intervenções mais abrangentes. O âmbito da reabilitação pode ser uma ou outra tubulação ou poder ser muito mais. É necessário que as intervenções de reabilitação sejam analisadas com alguns detalhes (Alegre *et al.*, 2005):

- Estabelecer um diagnóstico embasado em indicadores de desempenho adequado, com destaque para os indicadores de perdas de água e de frequência de rompimento da tubulação;
- Análise de histórico de rompimento e previsão de probabilidade de surgimento de falhas no futuro;
- Identificar as tubulações mais críticas em termos da confiança do sistema;
- Definir estratégia para longo prazo (planejamento de longo prazo);
- Realizar a curto, médio e longo prazo as intervenções necessárias para reabilitação da infraestrutura.

2.2.6 Modelagem hidráulica no combate as perdas

A utilização da modelagem hidráulica, ultimamente, tem sido aplicada para elaborar informações de diagnóstico de perdas de água. As prestadoras de serviços de saneamento básico têm mostrado interesses no uso desta ferramenta para reduzir perdas, principalmente, por vazamento. Entretanto, são poucas que tem utilizado, as vezes por falta de conhecimento ou quadro pessoal sem capacidade técnica.

Neste estudo, foi utilizado o *software WaterGEMS* para calibrar e simular um distrito de medição e controle para localizar e detectar vazamentos em rede de distribuição de água. Desta forma, será detalhado a utilização do modelo nos itens posteriores.

2.3 PRÁTICAS DE COMBATE AS PERDAS APARENTES

Toda empresa de água, deveria adotar no seu planejamento estratégico, como um dos focos principais, ações voltadas para minimizar ou zerar as perdas comerciais, a fim de atingir os objetivos da organização, ou seja, o sistema comercial é a “caixa registradora” da empresa. Neste sentido, para obtenção de uma rentabilidade que permita autossuficiência financeira da instituição, justifica priorizar o combate as perdas aparentes (Coelho, 2009).

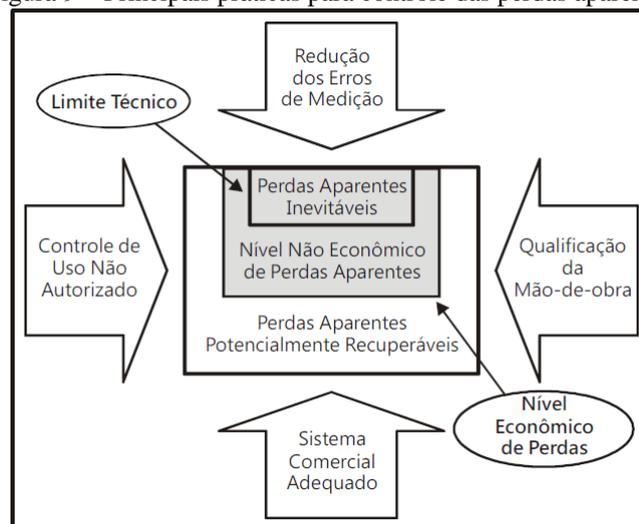
Neste contexto, Bezerra e Cheung (2013), elencaram algumas ações prioritária para o combate as perdas comerciais:

- Instalação de macromedidores e melhoria dos existentes;

- Instalar 100% de micromedição e realizar manutenção dos atuais;
- Analisar os perfis dos consumos dos grandes consumidores a fim de adequar a capacidade de medição do medidor;
- Realizar vistoria “*in loco*” para corrigir falhas nas instalações dos hidrômetros;
- Analisar a viabilidade da substituição dos micromedidores;
- Fiscalizar as ligações ativas e inativas para evitar as fraudes;
- Capacitar os colaboradores na área de gestão comercial.

Segundo a IWA preconiza algumas ações para reduzir o volume das perdas aparentes, conforme apontado na Figura 9. Destacando dois limites, sendo o primeiro as perdas aparentes inevitáveis e o segundo nível não econômico.

Figura 9 – Principais práticas para controle das perdas aparentes



Fonte: Adaptado IWA, Bezerra e Cheung (2013).

2.3.1 Instalação e manutenção da macromedição

Aferição dos macromedidores é uma tarefa importante para acompanhamento dos volumes medidos, principalmente, nas entradas dos DMC's, as variáveis hidráulicas são indispensáveis para uma boa gestão da rede de distribuição de água, não se controla perdas de água de um sistema, se os dados não forem confiáveis, caso contrário, as ações tomadas não resolverão os problemas das perdas comerciais.

Baseado neste contexto, Bezerra e Cheung (2013) afirmam que “*o sistema de medição deve considerar as finalidades e objetivos da operação e/ou dos diagnósticos, bem como levar em consideração as realidades técnicas, operacionais e culturais de cada serviço de*

saneamento”. Além do mais, as estimativas dos volumes dos componentes utilizados no balanço hídricos da IWA, entre outros, está o volume de perdas aparentes, desta forma a consistência dos dados aferidos é fundamental para subsidiar diagnóstico operacional assertivos.

De acordo com Tardelli Filho (2006), a macromedição é fundamental para o combate as perdas em SAA's e existem três pontos a medir:

- No sistema de produção: vazão da captação do manancial e vazão de lavagem dos filtros da estação de tratamento;
- Sistema adutor: tanto de água bruta como também de água tratada, assemelha a da produção;
- Na distribuição: vazão nas entradas dos DMC's; nas entradas dos reservatórios de reservação setoriais; saídas da VRP's e Booster.

2.3.2 Implantação e modernização do parque dos hidrômetros

Até o momento, não houve avanço na tecnologia que substituísse o hidrômetro, não sendo um aparelho de medição ideal, ou seja, incapaz de registrar 100% do volume de água consumido. Desta forma, parte da água consumida pelos clientes não é faturada pela concessionária, acarretando prejuízo financeiro para empresa. Por outro lado, as perdas por imprecisão dos hidrômetros contribuem como um elemento expressivo para as perdas aparentes (comercial). Por esta razão, é fundamental que as empresas quantifiquem e identifiquem seus fatores, de forma esta sejam ínfimas (Coelho, 2009). Na Tabela 9 consta as estimativas das perdas por submedição de empresas concessionária de água.

Tabela 9 – Faturamento perdido por motivo da submedição de hidrômetro

| Empresa | Percentual de perda por submedição | Faturamento mensal (R\$) | Perda mensal por submedição (R\$) |
|----------------|---|---------------------------------|--|
| A | 15% | 40.000.000 | 6.000.000 |
| B | 15% | 60.000.000 | 9.000.000 |
| C | 15% | 80.000.000 | 12.000.000 |
| D | 15% | 100.000.000 | 15.000.000 |

Fonte: Coelho (2006).

Segundo Alegre *et al.* (2005), os erros de medição acarretam perdas aparentes, entre essas elencadas:

- Erros de medição dos hidrômetros em condições normais de funcionamento;
- Erro de medição devido o mal dimensionamento ou instalação;

- Erro na leitura ou registro;
- Erro de medição por avaria ou danos causados por terceiros;
- Falta de acesso ao local do hidrômetro, geralmente instalado no interior da residência ou jardim.

Geralmente, os hidrômetros instalados em sistema de distribuição de água, tem capacidade de medição entre 1,5 m³/h ou 3,0 m³/h. Os grandes consumidores de água, acima de 3 m³/h, são as indústrias, supermercado, condomínios e órgãos públicos e outros mais. Esses representam menos de 1% do total instalados, por isso justifica a Companhia de saneamento priorizar as ações que envolvem a instalação, substituição, análise de consumo e faturamento. Sendo significativo no peso do volume medido em relação aos pequenos consumidores (Tardelli Filho, 2006).

Ainda segundo Coelho (2009), ao passar do tempo, os hidrômetros perdem precisão na medição por diversos fatores, dentre esses:

- Qualidade da água;
- Regime de operação do sistema (intermitência);
- Projeto e qualidade do hidrômetro adquirido;
- Tipo de instalação;
- Fraudes.

2.3.3 Gestão eficiente da área comercial

Segundo o Atlas Águas (2021), foram selecionados 92 municípios de médio e alto porte para o alcance de metas estabelecidas, o município de Recife está entre esses, para realizar intervenções necessárias para redução de perdas aparentes. O investimento previsto foi de 1,3 bilhão de reais, para isso foram consideradas as seguintes ações para o combate as perdas aparentes:

- Instalação e substituição de hidrômetros;
- Atualização do cadastro comercial;
- Fiscalização das ligações ativas e inativas;
- Combate às fraudes.

Toda empresa de água que se importar com a medição e leitura eficiente dos contadores, é primordial para o sucesso na gestão comercial. Alegre *et al.* (2005) apontaram algumas ações:

- A instalação e manutenção do parque dos hidrômetros é parte fundamental para redução das perdas aparentes, bem como os procedimentos de leitura, processamento dos dados e atividades na gestão de clientes;
- Para contabilizar as perdas reais é necessário quantificar o consumo dos clientes de forma mais precisa possível;
- Confiabilidade dos equipamentos de medição e sistema de leitura, são finalidades essenciais da Companhia de Saneamento para melhoria na prestação de serviços, desta forma satisfazendo as necessidades dos clientes;
- O grau de satisfação dos clientes é termômetro para se medir a qualidade da prestação de serviço de uma empresa, por essa razão é necessário atender da melhor forma possível os clientes, atendendo suas necessidades;
- A tecnologia alcançada na medição dos contadores, na leitura dos hidrômetros por telemetria, principalmente, dos grandes clientes, tem-se mostrado importante avanço da modernização.

Um das Companhias de Saneamento que mais investiu na modernização na leitura dos hidrômetros foi a COMPESA, a leitura é realizada e a fatura é impressa instantaneamente, através do smartfone. O cliente pode até conferir os dados anotados, desta forma se ganha mais confiabilidade no processo de faturamento. Atualmente, algumas faturas, já não são mais impressas, utiliza-se a forma de envio por e-mail, economizando na impressão de papel, além da política em favor do meio ambiente, na redução de produção de celulose.

Embora ainda seja elevado o custo do uso da telemetria para leitura de consumo, entretanto deve levar em consideração o custo-benefício da utilização desta tecnologia para os grandes consumidores (100 m³/mês), a COMPESA já utiliza deste processo. Com o acompanhamento diário do consumo, pode-se analisar qualquer anormalidade que venha ocorrer, caso ocorra alguma falha no consumo, pode-se corrigir a tempo.

2.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE PERDAS

Em 1997, a *International Water Association – IWA*, instituiu uma associação para tratar sobre perdas de água (*Water Loss Task Force*), liderado primeiro por Alan Lambert (Reino Unido), juntamente com outros profissionais de prestação de serviços públicos de água, com a finalidade de padronizar a terminologia utilizada pelos técnicos das Companhias de Saneamento de vários países. Após estudos deste grupo, resultou na elaboração do Balanço

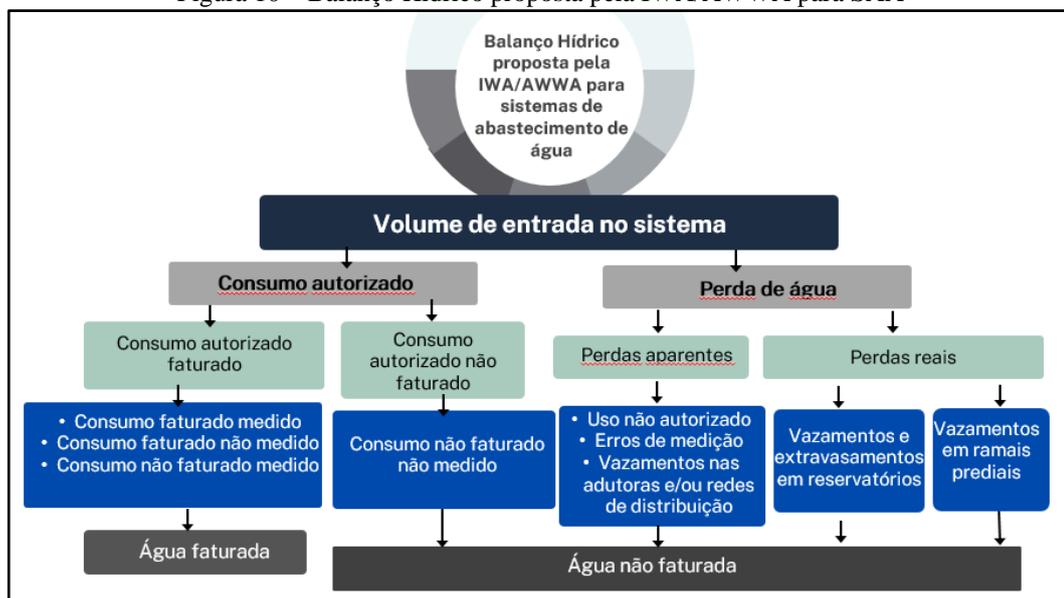
Hídrico para os sistemas de abastecimento de água, criando denominações para perdas físicas (reais) e perdas não-físicas (aparentes). Iniciou-se naquele momento, as fundamentações teóricas para progredir na estruturação e sugestão de indicadores de desempenho para os serviços de abastecimento. E para reforçar ainda mais, essa padronização, em 2003, a *American Water Works Association Water Loss Control Committee – AWWA WLC*, ratificou com a publicação do relatório *Applying Worldwide Best Management Practices in Water Loss Control* que preconizasse a utilização do Balanço Hídrico e dos seus indicadores de desempenho (Bezerra e Cheung, 2013).

Com base em conceito preconizado, Alegre *et al.* (2005), recomenda a terminologia adotada pela IWA, para evitar definições equivocadas sobre perdas de água, bem como uniformizar uma linguagem trivial entre os profissionais da área de Saneamento, desta forma universalizando o conhecimento de forma mais científica, evitando as interpretações e decisões inadequadas.

2.4.1 Balanço hídrico (*top-down*)

De acordo com Bezerra e Cheung (2013), o método do Balanço Hídrico é conhecido mundialmente como *top-down*, devido ao cálculo do BH iniciar pelo volume de água (de cima) que entra, menos o volume consumido (de baixo) pelos clientes, desta forma se determina as perdas aparentes por suposição e logo depois estima-se as perdas reais, pela diferença. Este método é resumido na Figura 10.

Figura 10 – Balanço Hídrico proposta pela IWA/AWWA para SAA



Fonte: Autor, adaptado IWA (2022).

A seguir, é conhecido os detalhes dos conceitos dos termos definidos pela IWA (Bezerra e Cheung, 2013):

Volume de entradas no sistema: Volume oriundo das fontes de captação, tanto pode ser superficial como também subterrâneo, além do volume de água importada.

Consumo autorizado: Volume de água medido e/ou não medido disponibilizado aos clientes cadastrados na empresa, inclusive aquelas ligações sem hidrômetro. Além do somatório dos volumes que são implicitamente ou explicitamente autorizados pela empresa. Inclui-se também o volume de descarga de rede, combate a incêndio, limpeza reservatórios da Companhia de Saneamento, abastecimento de caminhões pipas etc. Alguns desses consumos podem ser faturados ou não, depende do entendimento da empresa fornecedora.

Perdas aparentes: volume de água consumido, porém não contabilizado pela empresa. Corresponde as ligações clandestinas, submedição, fraudes nos hidrômetros, descargas de adutoras, erros de leituras dos hidrômetros, cadastro comercial desatualizado, dentre outros.

Perdas reais: equivale ao volume que se perdeu antes de chegar ao cliente, ou seja, antes do hidrômetro. Corresponde a quantidade de água perdida em vazamentos de rede, adutoras, extravasamento de reservatórios da Companhia de água, nos ramais antes do hidrômetro, nas ETAs e nos extravasamentos de reservatórios.

Consumo faturado medido: corresponde ao volume de água anual que gera receita para a companhia prestadora de serviços, referente ao somatório dos valores arrecadados nas faturas de água emitidas. Equivale ao consumo dos clientes medido nos hidrômetros. Difere do volume faturado pelas Companhias, já que algumas contabiliza o volume que não consumido.

Consumo faturado não medido: as companhias estimam o volume consumido nas ligações de água onde não possui hidrômetros, a maioria supõe que o consumo utilizado, em média de 10 m³ por mês, independente do poder aquisitivo.

Consumo não faturado medido: volume de água utilizado pela própria companhia de saneamento, mas não foi faturado, corresponde ao consumo de lavagem de filtros da estação de tratamento de água e também do consumo interno dos prédios administrativos.

Consumo não faturado não medido: corresponde ao volume de água utilizado pelos consumidores sem as companhias emitirem faturas pelo consumo de água, referente ao uso de combate a incêndio, por exemplo.

Uso não autorizado: volume correspondente que as companhias não faturam, ou seja, não gera receita. As ligações clandestinas e fraudes: por exemplo.

Erros de medição: quando o hidrômetro não mede o volume de água correto, devido a instalação inadequada bem como dimensionamento incorreto e até falhas de fabricação.

Vazamentos nas adutoras e/ou redes de distribuição: volume de água perdido em decorrência de rompimento ou vazamentos nas adutoras e redes de distribuição. Podendo ocorrer perdas de volume considerado em sistema adutor.

Vazamentos e extravasamentos em reservatórios: as vezes por falhas nos equipamentos de medição de nível, os reservatórios transbordam, provocando perdas de água devido à má operação e até mesmo a inexistência de dispositivo de alerta ou controle.

Vazamentos em ramais prediais: é o volume de vazamentos que ocorre entre o colar de tomada e o cavalete residencial. As principais causas devem-se à instalação inadequada, à qualidade de material, às pressões atuantes e/ou à movimentação do solo.

As principais vantagens provenientes da utilização do BH são as possibilidades de:

- Realizar auditoria no volume produzido e consumido;
- Maiores detalhes dos tipos de consumo e de perdas em SAA;
- Universalizar o conceito sobre perdas de água preconizado pela IWA;
- Permiti que os gestores evitem tomar decisões equivocadas em relação aos investimentos para redução de perdas de água;

2.4.2 Vazão mínima noturna (*bottom-up*)

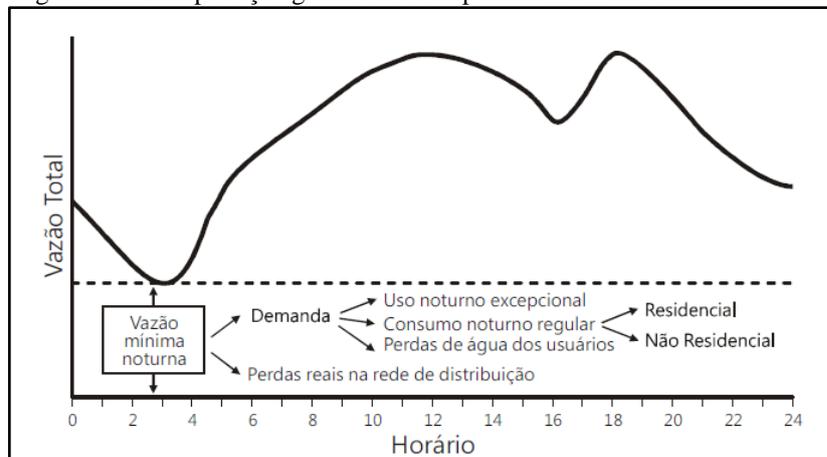
O princípio deste método é a variação do consumo no sistema de abastecimento de água no transcorrer do dia (Tardelli Filho, 2006). Segundo Bezerra e Cheung (2013), a VMN considera como fundamental a análise específica das vazões durante o horário de menor consumo que, geralmente, ocorre entre 2 e 4 horas da madrugada. Neste horário considerada a

vazão mínima noturna. Julga-se que, pelo horário, os reservatórios domiciliares estão cheios, pois não há consumo devido os clientes estarem inativos. Uma parte relevante da vazão mínima noturna considera perdas de água por vazamento, desta forma pode se adotar as perdas reais por estimativa do setor analisado. Mas sobretudo que, neste período o consumo autorizado é ínfimo, em consequência disso, a perda de água por vazamento é máxima. Conforme demonstrado no gráfico da Figura 11 a vazão mínima noturna e suas partes relevantes.

O método vazão mínima noturna é um suplemento muito importante do Balanço Hídrico, por fornecer uma estimativa de volume de perdas reais, pois utiliza-se dados de teste campos para determinar os volumes de água perdido. Desta forma, podendo ser usado para estimar a divisão das perdas reais e aparentes.

Pela aplicabilidade do método VMN ser embasado em diagnósticos de campo, admite-se que é um método mais consciencioso e proporciona resposta mais ponderadas do que o método do balanço hídrico, porém é muito mais trabalhoso e requisita mais recursos. Entretanto, tem vantagens em ser mais confiável, maior representatividade das perdas reais, além de proporcionar maiores conhecimentos das condições operacionais do setor.

Figura 11 – Interpretação gráfica dos componentes da vazão mínima noturna



Fonte: Bezerra e Cheung, (2013).

Deve-se levar em consideração na utilização deste método que a vazão dos vazamentos atinge valores de pico de madrugada devido as pressões elevadas, já durante o dia as pressões diminuem, conseqüentemente, reduzindo também as vazões dos vazamentos. Portanto, não se pode considerar o valor da VMN obtido durante a madrugada para as 24 horas do dia, desta forma estaria superestimando a vazão correspondente ao volume perdido.

Para resolver este problema, foi criado o “fator noite-dia” (F_{ND}) que é obtido a partir de medição da pressão horária no ponto médio da área medida, e calculado através da relação da

pressão e vazão. Desta forma se calcula a vazão média diária de perdas reais (Q_{pr}) pela Equação (7):

$$Q_{pr} = F_{nd} \times Q_{min} \quad \dots \text{ Eq. (7)}$$

em que Q_{min} é a vazão média mínima noturna. F_{nd} é um número dado em horas por dia que represente o setor, através da seguinte Equação (8):

$$F_{nd} = \sum_{n=1}^{24} \left(\frac{\bar{p}_{(n-1) \rightarrow n}}{\bar{p}_{3 \rightarrow 4}} \right)^{N_1} \quad \dots \text{ Eq. (8)}$$

onde $\bar{p}_{(n-1) \rightarrow n}$ é a pressão média horária entre a hora $(n-1)$ e n , em mca. O N_1 pode ser calculado com dados de campo pela Equação (9):

$$\left(\frac{Q_1}{Q_0} \right) = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{N_1} \quad \dots \text{ Eq. (9)}$$

em que Q_0 é a vazão inicial em l/h, relacionada a pressão inicial P_0 (mca); Q_1 é a vazão final em L/h, relacionada a pressão final P_1 (mca); e N_1 depende do material da tubulação.

Em meados de 1994 a pesquisadora May, revelou através de seus estudos a teoria *FAVAD* (*Fixed and Variable Area Discharge Paths*), que correlaciona a vazão perdida com pressão de serviço demonstrada pela Equação (9). Nesta pesquisa ficou evidente que, em abertura de tubos plásticos, quanto maior a pressão mais água se perde, devido a flexibilidade do material. Desta forma, quanto mais rígido o material, menos água perdida. Demonstrado pelo Tabela 10, quanto é sensível o valor de N_1 de acordo com pressão de serviço no furo da tubulação.

Tabela 10 – Valores do expoente N_1

| País | Número de DMCs testadas | Faixa de valores e N_1 | Valor médio de N_1 |
|---------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|
| Japão (1979) | 20 | 0,63 – 2,12 | 1,15 |
| Brasil (1998) | 13 | 0,52 – 2,79 | 1,15 |
| Reino Unido (2003) | 75 | 0,36 – 2,95 | 1,01 |
| Chipre (2005) | 15 | 0,64 – 2,83 | 1,47 |
| Brasil (2006) | 17 | 0,73 – 2,42 | 1,40 |
| Total | 140 | 0,36 – 2,95 | 1,14 |

Fonte: Lambert *et al.* (2006).

De acordo com Palo (2010), foram realizados vários ensaios para determinar o valor de N_1 , encontraram os seguintes:

- Em tubulação metálica $N_1 = 0,5$;
- Em tubulação plástica $1,2 < N_1 < 2,5$.

Com base nos valores da vazão mínima noturna e da vazão média, calcula-se o Fator de Pesquisa, é justamente a relação entre o primeiro e o segundo. Na Equação (10), caso o F_p seja superior a 30%, significa que deve selecionar uma área para realizar estudo de pesquisa em campo a procura de vazamentos.

$$F_p = \frac{Q_{min}}{\bar{Q}} \cdot 100 \quad \dots \text{Eq.}(10)$$

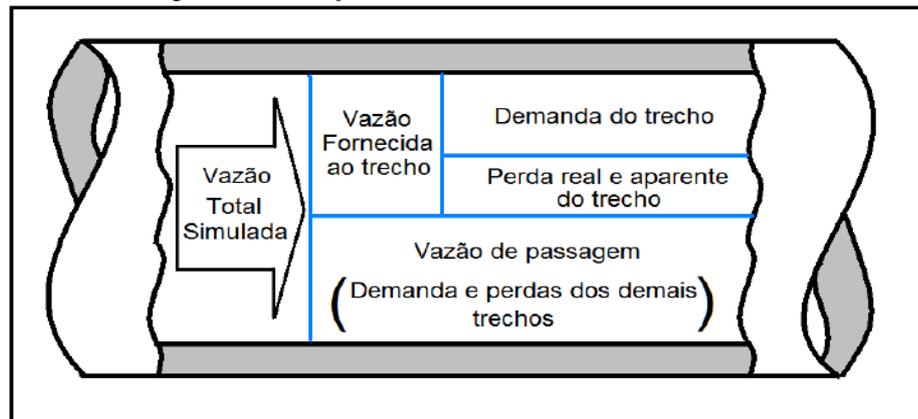
Onde, F_p é o fator de pesquisa, Q_{min} é a vazão mínima noturna em L/s e \bar{Q} é a vazão média em L/s.

2.5 MODELAGEM HIDRÁULICA DE SAA

Tendo a infraestrutura enterradas e não visíveis, por isso as deficiências apresentadas na rede de distribuição de água não são fáceis de detectar de forma direta, desta forma dificultando aos operadores das companhias de saneamento perceber alguma anormalidade, dentre essas: falta de água; despressurização da rede; água aflorando a superfície; aumento de volume de água perdido; baixo índice de cloração da água fornecida, entre outros. Além do mais, quando se projeta expansões aos sistemas existentes, é preciso avaliar o impacto no sistema apresentado a fim de mitigar as implicações negativos aos clientes. Por outro lado, o funcionamento hidráulico de um sistema tem suas complexidades involuntárias, o auxílio da modelagem hidráulica é imprescindível, especificamente, no controle de perdas. O apoio da modelação matemática é sobretudo valioso na estruturação da medição setorizada e de elucidaciones de gestão das pressões (Alegre *et al.*, 2005).

Em relação a modelagem hidráulica de sistema de abastecimento de água, em face as inúmeras circunstâncias operacionais, a simulação hidráulica analisa os resultados do sistema em função das suas variáveis de estado, assim como pressão, vazão e níveis de reservatórios. A simulação hidráulica fornece a vazão total que é transportada através do trecho da rede e que abastece também aos demais trechos conectados, conforme demonstrado na Figura 12.

Figura 12 – Esboço do desmembramento da vazão simulada



Fonte: Palo (2010).

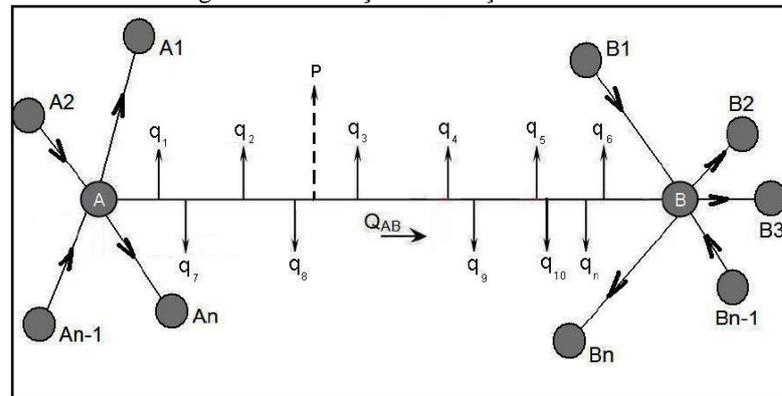
De acordo com Palo (2010), a vazão transportada no trecho se divide em duas parcelas, sendo uma correspondendo a vazão consumida e a outra perdida no trecho. No esboço do balanço das vazões, conforme mostra a Figura 12, a vazão $Q_{\overline{ab}}$ foi estabelecida como aquela apenas que abastece ao trecho analisado. A qual é expressa através da Equação (11) a seguir:

$$Q_{\overline{ab}} = \sum_{i=1}^n q_i + P \quad \dots \text{Eq. (11)}$$

Em que, $Q_{\overline{ab}}$ é a vazão fornecida, q_i são as demandas consumidas e P são as perdas totais, apenas no trecho analisado.

Conforme esboço do balanço das vazões demonstrada na Figura 13, o cálculo da vazão fornecida ao trecho é realizado pelo balanço das vazões, sendo um em cada limite do trecho analisado. Para tal, consideram-se as vazões que entram e que saem de cada limite. Assim, expressa-se a vazão fornecida no trecho AB, através da soma do balanço de vazões dos pontos A e B. Para isso, o balanço de vazões dos referidos pontos são expressos pelas Equações 12 e 13.

Figura 13 – Esboço do balanço das vazões



Fonte: Palo (2010).

$$B_A = \sum_{i=1}^n QE_A - \sum_{i=1}^n QS_A - Q_{\overline{AB}} = 0 \quad \dots Eq. (12)$$

$$B_B = \sum_{i=1}^n QE_B - \sum_{i=1}^n QS_B = 0 \quad \dots Eq. (13)$$

Onde, QE_A , QE_B , QS_A e QS_B são as vazões quem entram e as que saem, respectivamente. Em relação a B_A e B_B são os balanços de vazões em A e B, respectivamente. Portanto, a vazão fornecida ao trecho é a soma dos balanços de vazão de cada limite, expressa na seguinte Equação 14:

$$Q_{\overline{AB}} = B_A + B_B = \sum_{i=1}^n QE_A - \sum_{i=1}^n QS_A + \sum_{i=1}^n QE_B - \sum_{i=1}^n QS_B \quad \dots Eq. (14)$$

em que, $Q_{\overline{AB}}$ é a vazão fornecida ao trecho. Com as expressões anteriores adquire-se o valor da vazão fornecida a cada trecho, sendo que, o único parâmetro que a simulação hidráulica fornece direto é a vazão total por hora em cada trecho (Palo, 2010).

Após a definição da construção do modelo, a modelagem hidráulica do sistema de abastecimento de água, de acordo com Bezerra e Cheung (2013), viabiliza o conhecimento das variáveis hidráulicas para inúmeros cenários de benefícios, assim como estima o comportamento da qualidade da água nos trechos da rede, bem como utiliza-se métodos de otimização para o SDA, além do mais avalia os valores de perdas por vazamentos nas redes. Neste contexto, Gomes (2007), afirma que a modelagem hidráulica é uma ferramenta de fundamental importância no diagnóstico de perdas de água por vazamentos em rede.

Para representar um sistema de distribuição de água por intermédio de um modelo hidráulico, precisa-se de uma estrutura de conceitos teóricos e experimentais. De acordo com Carrijo (2004), para simulação de um sistema de abastecimento de água, precisa-se de um modelo matemático que representem as leis físicas que regem o fenômeno do escoamento de fluidos sob pressão. Os modelos de simulação hidráulica são fundamentados no equacionamento das principais variáveis envolvidas no processo. O estudo pode ser realizado tanto em regime permanente de escoamento como não permanente, ou seja, com variações de vazões e pressões no decorrer do tempo. Geralmente, os modelos que contam com o regime permanente de escoamento, valem-se da equação da continuidade dos nós e a equação da energia ao longo dos trechos. O sistema de equações adquiridos é solucionado através de linearizações sucessivas, utilizando o método Hard-Cross ou Newton-Raphson.

Além do exposto, é preciso estabelecer alguns procedimentos na construção do modelo hidráulico. O trabalho seguiu as recomendações de Coelho (2006), que recomenda as fases para estruturar o modelo, conforme Tabela 11.

O método utilizado no simulador hidráulico do EPANET (U. S. Environmental Protection Agency) para obtenção dos valores de pressão e vazão na rede é o “método gradiente”. Desta forma, podendo resolver as equações da continuidade e da conservação da energia entre a perda de carga e a vazão, para um determinado instante, se determina as condições de equilíbrio hidráulico da rede. Levando em conta uma rede de N nós e NF nós com carga hidráulica fixa, a combinação perda de carga \times vazão em uma tubulação entre os nós i e j podendo ser descrito pela seguinte Equação 15.

$$H_i - H_j = h_{ij} = r \cdot Q_{ij}^n + m \cdot Q_{ij}^2 \quad \dots \quad \text{Eq. (15)}$$

em que H é a carga hidráulica no nó, h é a perda de carga total, r é o termo de perda de carga que depende da fórmula utilizada, Q é vazão na tubulação, n é o expoente da fórmula das perdas de carga \times vazão e m é o coeficiente de perda de carga localizada. Em relação à conservação de massa nos nós, esta é descrita pela Equação 16.

$$\sum_{j \in J_i} Q_{ij} - C_i = 0 \quad \text{Eq. (16)}$$

onde C é o consumo no nó, i e J_i são todos os nós conectados no nó i . Desta forma, entendendo a carga hidráulica nos NF nós, conseguem-se os valores de pressão e vazão na rede que atendam as expressões (7) e (8).

O EPANET é um *software* para modelagem de sistema de abastecimento de água, podendo ser utilizado em plataforma Windows. Criado pela Divisão de Recursos Hídricos e Sistema de Águas e Agência de Proteção Ambiental dos EUA (*U. S. Environmental Protection Agency*). Sua grande vantagem é por ser um programa de livre acesso, mas sobretudo por ter código aberto (Bezerra e Cheung, 2013).

Segundo Menezes (2011), após utilizar o programa EPANET para simular o sistema de produção de água da cidade de Campina Grande-PB, foi possível encontrar algumas falhas no SAA, dentre essas:

- Expansão de rede de distribuição de água sem ter previsto nos setores de abastecimento do sistema;
- Ausência de programa de manutenção preditiva e preventiva no sistema;
- Falta de programa da área comercial em relação a micromedição;
- Sem controle automático dos níveis dos reservatórios e a falta de manutenção, aumentam-se as perdas por vazamentos na rede;
- Devido ao subdimensionamento da rede, algumas áreas da cidade, principalmente, as periféricas são prejudicadas com a falta de água.

Existem vários *softwares* de simulação hidráulica, além do EPANET, o disponibilizado *WaterGEMS* pela *Bentley* é um desses, apesar de não ter a mesma política de utilização do anterior, mas tem suas vantagens.

O *software* *WaterGEMS* de modelagem hidráulica, principalmente, no tocante a detecção de vazamento na tubulação, será detalhado nos itens seguintes, por constituir alvo de estudo do presente trabalho.

Tabela 11 – Fases da construção de modelo hidráulico

| Etapas | Proposição |
|--|--|
| A – Estruturação do modelo | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Eleger o sistema a estudar, âmbito e objetivo do modelo ✓ Definir prioridades do modelo ✓ Elencar os dados preliminares de cadastro e operação ✓ Eleger, caso necessário a apresentação de propostas de alteração de procedimentos de busca de dados ✓ Definição da estrutura mínima e sistematização dos dados a modelar ✓ Definição de opções e necessidades básicas da modelação |
| B – Construção do modelo / descrição da infraestrutura | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Levantamento dos dados da estrutura física do sistema – cadastro das redes, de reservatórios, de elevatórias e de válvulas ✓ Após a estrutura definida organizar de acordo com os elementos |
| C – Construção do modelo / descrição de consumos e vazões | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Levantamento e edição de dados de medição de vazão ✓ Pesquisar estatisticamente os dados de vazão, análise de cenários e geração de padrões de consumo ✓ Estimativa de consumo nos nós da rede ✓ Levantamento de dados relativos à distribuição nos nós na rede ✓ Processamento de dados para carregamento no modelo |
| D – Construção do modelo / controle operacional | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Verificação das regras de operação do sistema, análise de níveis de reservatórios, regulação de válvulas, conjunto motor bomba e disponibilidade de vazão ✓ Reanalise e tipificação de cenários ✓ Processamento de dados para carregamento no modelo |
| E – Implementação da solução / base | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Compilação dos registros completos correspondente aos cenários modelados ✓ Descartar os erros encontrados e refinar as opções de modelação ✓ Pesquisar melhor as capacidades de simulação disponível a fim de ganhar sensibilidade do modelo |
| F – Calibração do modelo | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Identificação de algumas irregularidades de funcionamento do modelo ✓ Implementar atividade de aferição de vazão e pressão de rede ✓ Análise comparativa dos dados simulados com os de campo |
| G – Exploração do modelo e planejamento da gestão futura | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Redefinição dos objetivos iniciais do modelo, determinado na etapa A ✓ Planejamento com a finalidade de dá continuidade na melhoria do modelo ✓ Estabelecer os procedimentos de utilização do modelo |

Fonte: Coelho (2006).

2.5 SOFTWARE WATERGEMS

Segundo Alegre *et al.* (2006) para modelagem de sistema de abastecimento de água, existem vários *softwares* de computador acessíveis no mercado especializado. Alguns desses muitos semelhantes na maneira do cálculo dos parâmetros hidráulico e da qualidade da água, entretanto possuem diferenças inerentes na expressão das ferramentas de cálculo, na capacidade de diagnóstico, bem como na análise de vazão de incêndio, além da disponibilidade da calibração automaticamente.

Mediante os aspectos mencionados anteriormente, de acordo com Mota (2018) o *software WaterGEMS* é um desses disponível, o qual foi concebido pela *Bentley Water Systems*, apesar de ser um programa privado, mas possui algumas vantagens, entre essas:

- Simulação em período estendido de funcionamento e a utilização do elemento SCADA;
- Disponibilidade da ferramenta “*controls*” que viabiliza a simulação do controle da bomba através do inversor de frequência;
- O *software* permite produzir e formatar cenários, desempenho da rede de abastecimento, realizar simulações hidráulicas e de qualidade, extrair resultados através de tabelas e gráficos;
- Possibilidade de importar dados, incluindo ArcView, ArcInfo, ArcGIS, DWG, DXF e arquivos *Shapefile*;
- Flexibilidade para se conectar com qualquer banco de dados da Microsoft Access, dBase, Excel, Oracle e EQL Server;
- Oferece a possibilidade de conectar a qualquer banco de dados virtual através do suporte ODBC interno;
- O *software* utiliza uma ferramenta para calibração do modelo, embasada em algoritmos genéticos, denominada “*Darwin Calibrator*”.

O *Software WaterGEMS* utiliza uma ferramenta denominada de “*modelbuilder*” para importação dos dados de junção, extensão de rede, diâmetro e tipo de material das conexões e tubos, através de fontes de dados: *Acesses; coverages; geodatabases; geometric networks; dBase; Foxpro; ODBC; OLEDB; HTML import; HTML export; Lotus; Excel; Shapefiles e CAD files*. O *Modelbuilder* tem uma ferramenta chamada *Skelebrator* que ajuda a mapear os elementos do cadastro SIG para o modelo hidráulico com a finalidade de tornar mais simplificado, reduzindo os números de junções. Para cada camada do arquivo fonte que contém suas estruturas serão conectadas com as respectivas camadas do modelo hidráulico. Desta forma, agilizando o trabalho de inserção da estrutura da rede hidráulica no modelo.

Para importação dos dados de elevação da rede, utiliza-se a ferramenta denominada “*TREX*”, podendo trabalhar com diversas fontes de informações diferentes de superfície da área de modelagem, como dados de topografia, GPS, altímetros, *As-built*, vetores (curvas de níveis), entrada manual via mapas e modelos digitais de terreno (MDT). Entretanto, a referência espacial entre modelo e dados deve ser conhecida para evitar que os elementos tenham coordenadas distintas, por isso é necessário que estejam no mesmo sistema de coordenadas.

Existe uma forma de conectar o sistema, através da ferramenta do *SCADAConnect Simulator*, sendo responsável pelo armazenamento e gerenciamento dos dados coletados de campo, como medição de pressão e vazão. A modelagem hidráulica combinada com a utilização do sistema SCADA torna-se o uso mais completo, comparando as pontes fortes e fraquezas de cada tecnologia, tem-se:

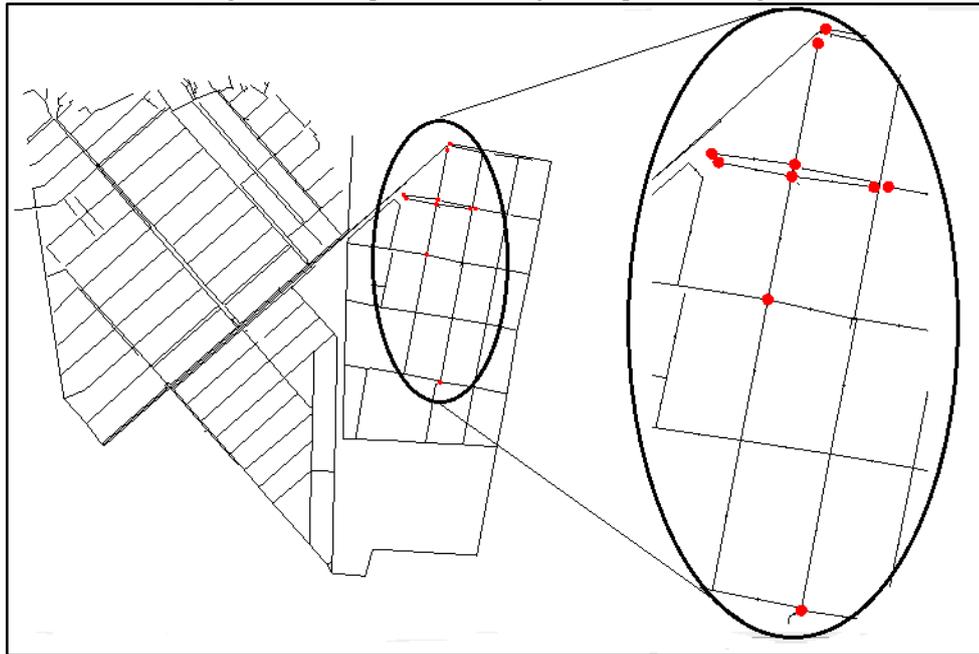
- Modelo hidráulico:
 - ❖ Pontos fortes:
 - ✓ Projeta novos casos;
 - ✓ Calcula e preenche as lacunas entre pontos medidos;
 - ✓ Calcula atributos não mensuráveis.
 - ❖ Pontos fracos:
 - ✓ Não informa o *status* corrente;
 - ✓ Não informa as condições de contorno.

- Sistema SCADA:
 - ❖ Pontos fortes:
 - ✓ Possui o *status* corrente;
 - ✓ Informa as tendências históricas;
 - ✓ Possui controle de saída.
 - ❖ Pontos fracos:
 - ✓ Incapaz de projetar o futuro
 - ✓ Não pode interpolar os dados entre sensores.

Desta forma, combinando as informações entre ambos, o sistema SCADA fornece condições iniciais e contorno para o modelo, assim como os dados históricos em tempo real para calibrar o modelo e simulações operacionais. Por outro lado, o modelo preenche os dados vazios dos sensores e projeta o desempenho do sistema para o futuro.

O propósito deste estudo, foi o uso da ferramenta, o “*Darwin Leak Calibration*”, que faz a busca dos pontos com possíveis vazamentos, apontado nas junções, gerando mapa conforme Figura 14. Desta forma, reduzindo a área de atuação da equipe de acústica, reduzindo tempo na procura dos vazamentos. A metodologia utilizada do programa para detectar vazamento será mostrada nos itens posteriores.

Figura 14 – Mapa de identificação dos pontos de fugas



Fonte: Autor, adaptado da Bentley (2022).

Vários estudos foram realizados utilizando o *software WaterGEMS Editon Simulator* para redução de perdas em sistema de abastecimento de água. De acordo com Solarckcyk (2013), o resultado da pesquisa realizada utilizando a ferramenta “*Darwin Leak Calibration*” em três DMC’s do condado de *Northumberland*, localizado no Reino Unido, foi bastante promissor, com uma percentagem de 80% de acertos, sendo apontados pelo *software* onze pontos de vazamentos, destes oito foram confirmados pela equipe que atua no controle ativo de vazamentos.

Já no estudo realizado por Kowalska (2022), utilizou o *software WaterGEMS* com a ferramenta *DMA-tool* para simular um sistema de abastecimento de água na divisão em áreas de medição distritais, com base na distribuição espacial da vazão e na estrutura geométrica da rede (diâmetros da rede, rotas, válvulas de manobra existentes) na zona de abastecimento de água analisada, aplicando o critério de no máximo de 200 nós por DMA. O Resultado atingido inicial foi superestimado em 81 DMC’s, portanto foi necessário modificar os resultados obtidos. As áreas indicadas foram mescladas em três DMC’s principais – DMA1, DMA2 e DMA3.

Sendo nas duas primeiras, foram apontadas como eficientes na operação do sistema de abastecimento de água em relação a vazão disponível e nos valores de pressão nas áreas, já em relação ao DMA3 as simulações computacionais mostraram insuficientes no atendimento da taxa de vazão e valores de pressões abaixo das normas. Desta forma, foram indicadas duas modificações, sendo a primeira para abertura de mais uma entrada para o setor de abastecimento, como também a modificação da operação da estação elevatória. Com isso, ocorreram aumento das pressões no setor, mas foram sugeridos instalação de VRPs e substituições de tubulações antigas.

De acordo com Kowalski (2022), informa como exemplo de utilização da integração do modelo numérico (*software Bentley WaterGEMS* integrado) e do sistema de monitoramento SCADA. Os dados de monitoramento são constantemente comparados com os resultados da simulação e quando os limites de conformidades são excedidos, os alertas apropriados são disparados pelo sistema. Desta forma, a operadora de saneamento não precisa analisar constantemente as indicações do sistema SCADA. Com isso, a aplicação adicional do método permite a detecção de vazamento na rede de distribuição de água.

2.6 UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTA PARA DETECTAR VAZAMENTOS

O controle do vazamento é essencial para gerenciamento diário das redes de distribuição de água, e um ponto primordial é a rapidez na localização do vazamento. A quantidade disponível atualmente de aparelhos para o monitoramento de variáveis hidráulicas na rede, tornou-se muito benéfico nesta função. Desta forma, os sensores de pressão e medidores de vazão cujas medições podem ser transmitidas em tempo real são bastante aplicadas, apesar que a quantidade e localização desses dispositivos são restringidos por vários aspectos, um deles é o custo de aquisição, instalação e manutenção. Nesta linha de raciocínio, Salguero, Cobacho e Pardo (2019), propuseram uma metodologia duplamente útil para controle de vazamentos. Para começar, baseado nas características da rede e nas medições diretas disponibilizadas pelos sensores, revela a localização de um vazamento, cuja magnitude foi detectada previamente. Em seguida, esta mesma metodologia pode ser aplicada para indicar a localização ideal para instalação de sensores e medidores de vazão de controle de uma rede.

Neste contexto segundo Rojek e Studzinski (2019), afirma que, em relação a diminuição da taxa de falhas na rede de distribuição de água é necessário controlar adequadamente o funcionamento das bombas nas EEA's de fonte e zona e revitalizar a rede, sendo a primeira

computacionalmente rigoroso devido à necessidade de aplicar algoritmos de otimização complexo, e a segunda tem custo elevadíssimo. Portanto, a terceira solução é a rápida detecção e localização de vazamentos, incluindo sobretudo as falhas ocultas, quando ocorrem, não são visíveis, pois dependem do vazamento de água para o solo através dos vãos criados nas tubulações/conexões danificados. Para resolver este problema, é instalar um sistema de monitoramento suficientemente denso no SAA, mas esta maneira tornasse onerosa, pois precisa de vários dispositivos de medição no sistema de monitoramento para obter uma detecção satisfatória de condições de emergência. Uma possível solução, seria utilizar algoritmo de detecção e localização não como um programa único, mas como um elemento de TI complexo, o qual requer a cooperação de vários elementos desse sistema: programa GIS; sistema de monitoramento SCADA; sistema de monitoramento do medidor de vazão e pressão; modelo hidráulico da RDA; algoritmo de calibração automática do modelo hidráulico; algoritmo de planejamento do sistema SCADA; e por fim, redes neurais.

De acordo com Fan, Zhang e Yu (2021), para detectar vazamentos em rede de distribuição de água tem sido utilizada algumas estratégias, podendo ser classificada em cinco categorias, exposta a seguir: baseadas em visão; apoiadas em sensores/instrumentais; embasadas em respostas transitórias; fundada em modelos e amparadas em dados. Em relação as duas primeiras tecnologias, tem custo alto e ainda assim é demorado a executar, devido uso de equipamentos de inspeção móvel especializados ou eletromagnéticos. Já em diz respeito a terceira, utiliza tecnologia com radar de penetração no solo para detectar vazamento ao redor da tubulação, porém precisa de pessoas para análise de sinal e de sensores com alta resolução espacial e temporal. Já abordagem fundada em modelos para detectar vazamentos demonstra teoricamente qualificado em descobrir vazamentos e localizar seu posicionamento, no entanto, a dificuldade de implementar em sistema reais, devidos a vários fatores: informações detalhadas do sistema; demanda dos usuários; condição da tubulação e distribuição de pressão. Entretanto, com a inteligência artificial e as tecnologias orientadas a dados têm corroborado capacidade de descoberta de conhecimento, processamento de imagem e previsão de eventos. A última tecnologia, detectar vazamentos orientado por dados, que se baseia no aprendizado e dados históricos com algoritmos estatísticos ou reconhecimento de padrões, promete ser mais viável, não precisa de coleta de um conjunto amplo de informações, já na abordagem do modelo é necessário.

Para localizar vazamentos em RDA, através de sensores de pressão, é preciso definir quantidade e posicionamento deste equipamento, no estudo realizado por Ruiz *et al* (2022),

realizaram experimentos utilizando o método para locação ótimo de sensores em RDA a partir da teoria da informação, utilizando uma seleção direta sequencial, maximizando a relevância e minimizando a redundância do subconjunto de nós selecionado de um sistema de abastecimento de água real. O resultado da aplicação do algoritmo gerado no MATLAB em uma rede de distribuição, com 31 nós consumidores e 31 tubos, mostrou a localização geográfica do posicionamento de três sensores obtido, considerando as junções mais bem classificadas pelo algoritmo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a utilização da modelagem hidráulica com o objetivo de detectar e localizar anormalidade da rede de distribuição de água é preciso conhecer o aplicativo que executa a simulação, assim como também a operação da área do sistema de abastecimento de água. É necessário ter conhecimento dos detalhes sobre as funções do aplicativo para uma simulação e calibração adequadas, tanto as informações técnicas como comerciais disponibilizadas, devem ser analisadas, e se possível, verificadas em campo. Desta forma, garantido maior confiabilidade na modelagem hidráulica.

Para desenvolvimento deste estudo foram realizadas várias visitas técnicas na área de abastecimento de água do DMC-39 para aplicação do programa WaterGEMS, com o objetivo de adquirir os dados físicos e operacionais deste sistema, assim como tentar entender melhor a rotina de operação do abastecimento de água do setor.

Junto à Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA, responsável pelo abastecimento de água do setor, foram obtidas informações de cadastro técnico, dados de vazão e pressão, tanto os registrados no Centro de Controle Operacional, como também os registrados pelo sistema de Telemetria da empresa, dados de consumo individual dos clientes na área do setor DMC-39, entre outras informações necessárias na modelagem hidráulica desenvolvida e apresentada neste estudo.

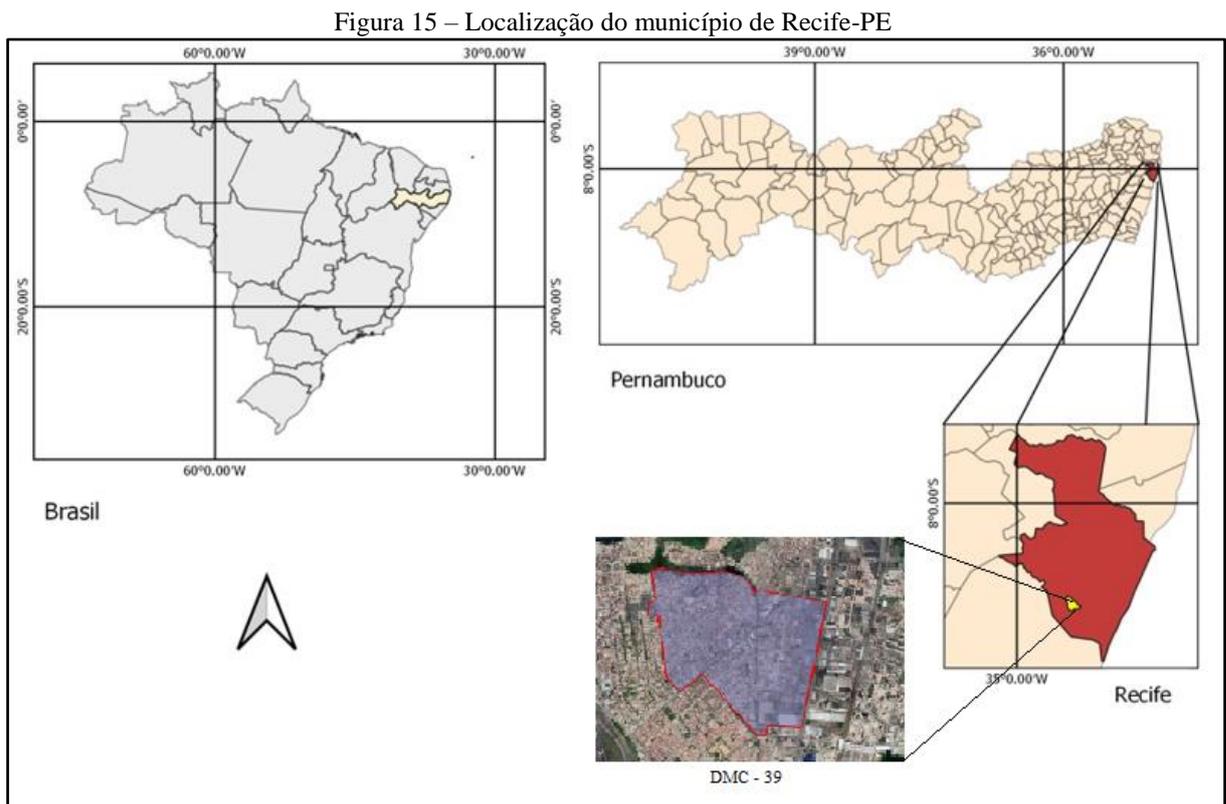
Neste contexto foi aplicado a simulação hidráulica em uma área que representa um distrito de medição e controle (DMC-39). As intervenções realizadas pela COMPESA no ano de 2013, no tocante a instalação de macromedidor, registradores de vazão e pressão (*datalogger*), assim como também válvula controladora de pressão na entrada do DMC-39. Além do isolamento da área, tornando estanque toda a rede, também foram substituídas as tubulações subdimensionadas do distrito que foi analisado.

A eficácia do resultado da modelagem hidráulica em relação ao diagnóstico de possíveis vazamentos na rede foi medida comparando com os resultados dos vazamentos encontrados *in loco*.

3.1 ESTUDO DE CASO – APLICAÇÃO DO DMC-39

3.1.1 Visão geral do sistema de abastecimento de água

O estudo de caso adotado é a rede de distribuição de água DMC-39, que está localizado na zona sul do município de Recife, capital do Estado de Pernambuco, na região Nordeste Brasileiro (Figura 15). Recife é a quarta maior cidade com maior aglomerado urbano do Brasil, possui 218,84 km² de área, com uma população estimada em 2021 de 1.661.017 habitantes. Com uma densidade demográfica de 7.039,64 habitantes por km² e altitude de 4 metros. Seu clima é predominantemente tropical úmido, caracterizado com chuvas médias mensais de 300 mm no período de abril a julho e temperatura média anual entre 25°C e 30°C (IBGE, 2010). Composta por uma área predominantemente residencial.



Fonte: Autor (2022).

O abastecimento de água da Região Metropolitana do Recife (RMR) é feito a partir da integração dos sistemas Tapacurá, Alto do Céu e Pirapama, que distribuem água para os distritos através de um grande anel, além de abastecer o DMC-39 fornece água para mais nove distritos da região metropolitana, sendo derivado do reservatório localizado no Jordão.

O abastecimento de água na RMR ainda está no regime intermitente, segundo a COMPESA, a disponibilidade de água está em torno de 80% com água todos os dias, e o restante em regime de rodízio. O motivo alegado de 20% da área não possui água nas torneiras diariamente, é devido à rede de distribuição está obsoleta (subdimensionada).

O distrito DMC-39 dispõe de alimentação direta a partir do grande anel (DN 1500 mm), com medidor eletromagnético de inserção e uma válvula redutora de pressão (VRP) com diâmetro de 200 mm. O DMC-39 é delimitado por capeamento das redes, existindo apenas um alimentador, e para simular o fornecimento de água para o DMC-39, o setor foi caracterizado, simplificada, por um reservatório R-1, que abastece o trecho P-349 do esquema hidráulico. O fornecimento de água é constante e sem interrupções, a não ser quando ocorre algum sinistro da rede de entrada do setor, que é raro acontecer. As pressões mínimas e máximas são em torno de 2,2 mca e 30,8 mca respectivamente. E as vazões mínimas e máximas em torno de 13,60 L/s e 107,30 L/s respectivamente. Ligados a malha de rede de distribuição existem 3.455 clientes agrupados por categoria em 3.008 residências, 436 comerciais, 5 industriais, e 6 públicos, ou seja, 87,06% de residências, 12,62% de comércios, 0,14% de indústrias, e 0,18% de imóveis públicos. A maior parte do consumo de água é para uso doméstico, mesmo assim foi considerado o perfil de consumo para as categorias residenciais e comerciais, que é permitido pelo *software* utilizado, garantindo mais confiabilidade na simulação. As ruas pavimentadas e as construções são térreas em sua maioria.

Com topografia regular, apresentando cotas altimétricas variando de 3 a 4 m, o DMC-39 possui uma extensão de rede 28,75 km, com diâmetros variando entre 50 e 400 mm e idade de 32 anos, composta de tubos de ferro fundido, PVC DEFoFo e PVC PBA. Os limites físicos do distrito de medição e controle (DMC-39) são apresentados a seguir, e percorrem as ruas, avenidas e divisores naturais listados abaixo:

- Ao Norte: Rio Tejipió, Rua Itapeva e Rua Jean Émile Favre;
- A Leste: Avenida Marechal Mascarenhas de Moraes;
- Ao Sul: Rua Dr. Tavares Correia, Rua Joaquim Pessoa, Rua Jaçanã e Rua Jean Émile Favre;
- A Oeste: Rua Dr. Raposo Pinto, Rua São Nicolau, Rua Virgínia Heráclio, Rua Pintor Antônio Albuquerque, Rua Dr. Raposo Pinto, Rua Rio Amazonas.

Na Figura 16 é apresentado uma área da região Metropolitana do Recife com destaque para o DMC-39, tendo outros Distritos com vizinhos, entre esses: DMC-38; DMC-41; DMC-48 e DMC-50.

Figura 16 – Visão aérea (delimitação) do DMC-39



Fonte: Google Earth (2022).

3.2 METODOLOGIA

Os processos deste estudo podem ser sistematizados através da Tabela 12 que é dividida para apresentar a descrição das etapas metodológicas utilizadas no presente trabalho.

Tabela 12 – Etapas da Metodologia

| Etapas | Descrição |
|----------------|---|
| Etapa 1 | Levantamento dos dados |
| Etapa 2 | Elaboração do Balanço Hídrico |
| Etapa 3 | Construção do modelo no aplicativo de simulação hidráulica com a inserção dos dados físicos da rede |
| Etapa 4 | Definição e inserção dos dados de demanda de água no modelo hidráulico. |
| Etapa 5 | Calibração automática do modelo hidráulico por meio de <i>Darwin Calibration</i> do <i>Software WatetGEMS</i> |
| Etapa 6 | Validação do modelo utilizando dados de vazão e pressão da rede de distribuição |
| Etapa 7 | Localização e detecção de vazamentos por meio da ferramenta <i>Darwin Leak Calibration</i> do <i>Software WaterGEMS</i> |
| Etapa 8 | Avaliação dos resultados com base em dados advindos de campanhas de detecção de vazamentos |

Fonte: Autor (2022).

3.2.1 Levantamento dos dados

3.2.1.1- Construção do modelo no aplicativo de simulação hidráulica

Na estruturação do modelo no aplicativo são necessárias algumas informações pertinentes ao sistema modelado, entre essas:

- Plantas contendo as redes de distribuição de água e seus acessórios;
- Plantas das ligações de água cadastradas;
- Dados comerciais do setor contendo os consumos dos clientes, categoria, quantidade de ligações e economias existentes.

3.2.1.2 – Coletas de medições de campo

Foram necessários coletar as informações de campo cadastradas através de equipamentos para calibrar o modelo, listados a seguir;

- Planta contendo os locais exatos dos pontos de medição e dos registros limítrofes;
- *Datalogger* (registrador) de vazão;
- *Datalogger* (registradores) de pressão.

Os dados de pressão registrados no *datalogger* são apresentados a cada 15 minutos. A Tabela 13 ilustra a forma como os dados são descarregados dos registradores, análogo também são mostrados de vazão na Tabela 14.

Tabela 13 – Dados reais de pressões coletados no sistema Vectora da COMPESA

| Data | Hora | Pressão (mca) |
|-------------|-------------|----------------------|
| 01/07/2022 | 00:00 | 1,63 |
| 02/07/2022 | 00:15 | 1,62 |
| 03/07/2022 | 00:30 | 1,60 |
| . | . | . |
| . | . | . |
| . | . | . |
| 01/08/2022 | 00:00 | 1,43 |
| 02/08/2022 | 00:15 | 1,38 |
| 03/08/2022 | 00:30 | 1,32 |

Fonte: Autor, adaptado do sistema Vectora da COMPESA (2022).

Tabela 14 – Dados reais de vazões coletadas no sistema Vectora da COMPESA

| Data | Hora | Vazão (L/s) |
|------------|-------|--------------|
| 01/07/2022 | 00:00 | 33,60 |
| 02/07/2022 | 00:15 | 32,50 |
| 03/07/2022 | 00:30 | 32,60 |
| . | . | . |
| . | . | . |
| . | . | . |
| 01/08/2022 | 00:00 | 27,26 |
| 02/08/2022 | 00:15 | 27,20 |
| 03/08/2022 | 00:30 | 27,30 |

Fonte: Autor, adaptado do sistema Vectora da COMPESA (2022).

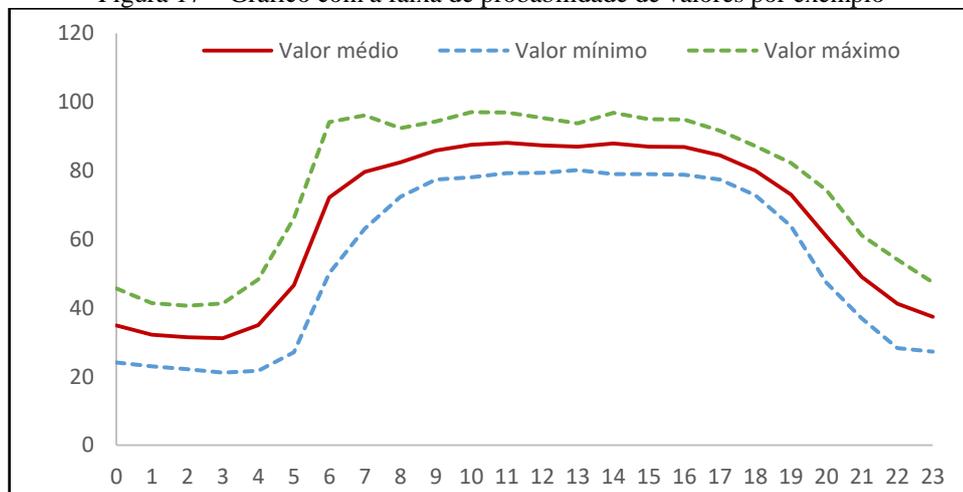
3.2.1.3 – Tratamento e análise dos dados coletados

Os dados adquiridos foram tratados, de modo a retirar os dados “anormais” da amostra. Analisando as oscilações dos dados em torno de um valor médio a 15 minutos registrado. Para isso, utilizou-se a faixa de probabilidade de ocorrência de valor medido que é calculado através da Equação (17) a seguir:

$$X \in [X_m \pm S_r] \quad \dots \text{Eq. (17)}$$

em que X significa o valor observado, X_m o valor médio horário e S_r a incerteza da série de registros naquele horário, já a expressão $[X_m \pm S_r]$ significa o intervalo determinado por X_m . Para representar graficamente a faixa de probabilidade dos valores adquiridos em campo, que foi aplicado para comparação dos valores simulados, tanto de vazão ou pressão. Supõe-se que os dados simulados estejam dentro da faixa estabelecida, expressado pelo gráfico da Figura 17.

Figura 17 – Gráfico com a faixa de probabilidade de valores por exemplo



Fonte: Autor (2023)

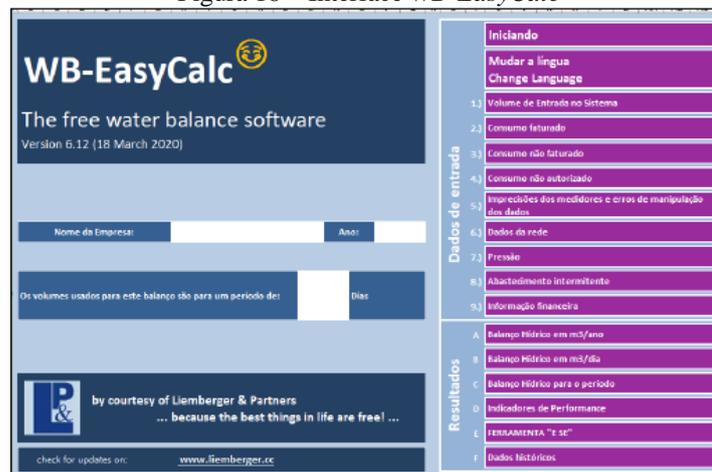
A avaliação da incerteza relacionada ao processo de medição, determinando as faixas cuja probabilidade de ocorrência dos valores mais prováveis. Para tal, utiliza-se o método da determinação da incerteza conforme demonstrado no apêndice A.

Em relação ao período de dados que foi analisado, foi considerado o período referente a média do mês para os horários dos dias da semana, mas deverá verificar neste período se ocorre alguma inconsistência nos dados coletados, caso tenha, será reavaliado considerando outras semanas.

3.2.2 Elaboração do balanço hídrico

Utilizou-se *software WB-easyCalc* (Figura 18) para concepção do balanço hídrico. Por intermédio do programa calcula-se os volumes autorizado e não-autorizado. Assim como também as perdas reais e aparentes, distinguindo-as em percentuais para o período analisado. Através da matriz do balanço hídrico os resultados são expressos. O *software* apresenta os dados de entrada em nove camadas, sendo divididas ainda em subcamadas, conforme discriminado na Tabela 15.

Figura 18 – Interface *WB-EasyCalc*



Fonte: WB-easy Calc (2022).

Tabela 15 – Dados de entrada do WB-easyCalc

| Camadas de dados de entrada | Subcamadas de dados |
|---|--|
| A – Volume de entrada no sistema | A ₁ – Fonte de água; A ₂ – margem de erro. |
| B – Consumo faturado | B ₁ – Consumo medido faturado; B ₂ – Consumo medido não faturado. |
| C – Consumo não faturado | C ₁ – Consumo medido não faturado; C ₂ – Consumo não medido não faturado. |
| D – Consumo não autorizado | D ₁ – Ligações clandestinas; D ₂ – Hidrômetros violados, <i>by-pass</i> , etc. D ₃ – Consumo medido per capita (L/hab./dia) |
| E – Imprecisões dos medidores e erros de manipulações de dados | E ₁ – Submedição; E ₂ – Margem de erro. |
| F – Rede de distribuição | F ₁ – Comprimento de rede (km); F ₂ – Comprimento médio do ramal (m); F ₃ – Número de clientes cadastrados; F ₄ – Número de clientes ativos; F ₅ – Número de clientes inativos; F ₆ – Margem de erro. |
| G – Pressão na rede | G ₁ – Pressão média na rede; G ₂ – Números de ligações; G ₃ – Margem de erro. |
| H – Abastecimento contínuo ou intermitente | H ₁ – Número de ligações aproximado; H ₂ – Tempo de abastecimento (dias por semana); H ₃ – Tempo de abastecimento (horas por dia). |
| I – Dados financeiros | I ₁ – Tarifa média de água; I ₂ – Custo variável de produção e distribuição. |

Fonte: Adaptado WB-easyCalc (2022).

Para elucidar a metodologia aplicada no preenchimento dos dados necessários, apresenta-se a seguir:

➤ *Volume de entrada no sistema*

- Fonte de água: Os dados de volume de entrada são adquiridos do *datalogger* instalado no macromedidor localizado no acesso do DMC-39, disponível pelo *software* Vectora, utilizada pela COMPESA para aquisição dos dados via telemetria.
- Margem de erro: Os equipamentos de medição possuem uma margem de erro, será adotada aquela informada pelo fabricante.

➤ *Consumo faturado*

- Consumo medido faturado: O consumo faturado foi extraído das leituras dos hidrômetros, considerando apenas as ligações ativas do DMC-39. Para obtenção destes dados, utilizou-se o aplicativo G SAN para extrair os consumos dos clientes considerando as categorias residencial, comercial, industrial e público.
- Consumo não medido faturado: O consumo não medido faturado corresponde às vendas de água que a concessionária pode realizar dentro da sua operação,

através de caminhões pipas em momentos de emergência/desabastecimento ou até fornecimento de água para grandes eventos.

➤ *Consumo não faturado*

- Consumo medido não faturado: Caracterizado pelas ligações isentas, sendo estas utilizadas pela própria companhia, desde o volume disponível para lavagens de filtros assim como uso nas unidades operacionais e administrativas.
- Consumo não medido não faturado: Nessa categoria, atribui-se os consumos utilizado nas descargas de rede da companhia, ao volume de água utilizado pelos consumidores, referente ao uso de combate a incêndio.

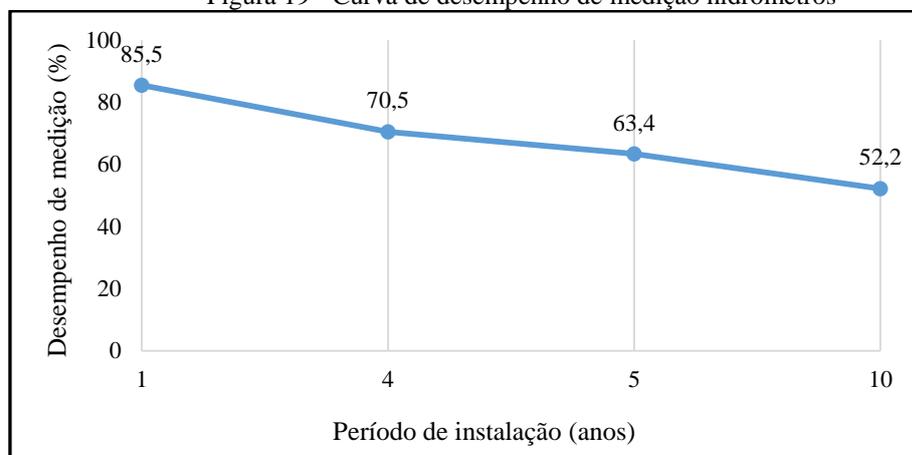
➤ *Consumo não autorizado:*

- Consideram-se os consumos das ligações clandestinas, hidrômetros violados, by-pass detectado pela COMPESA.
- Consumo médio per capita (L/hab./dia): Foram utilizados os dados calculados pela COMPESA, em seu Estudo Populacional e de Demanda, onde o consumo médio per capita ao longo dos últimos 12 anos foi de 198,73 (L/hab.dia).

➤ *Imprecisões dos medidores e erros de manipulação de dados*

- Submedição: Inicialmente foi calculada a média ponderada do parque de hidrômetro do DMC-39 e utilizado a curva de desempenho observado na Figura 19 da própria Companhia. Desse modo, foi calculada a média ponderada do parque de hidrômetros, para meramente aplicar o valor médio da submedição. Os resultados dos valores são vistos na Tabela 16.

Figura 19 - Curva de desempenho de medição hidrômetros



Fonte: COMPESA (2022).

Tabela 16 – Valores de submedição

| Idade dos hidrômetros (anos) | Quant. | Submedição (%) | Média ponderada |
|------------------------------|--------|----------------|-----------------|
| 01 | 1.414 | 14,50% | |
| 04 | 472 | 29,50% | 26,80% |
| 05 | 881 | 36,60% | |

Fonte: Autor, adaptada COMPESA (2022).

- Margem de erro: Foi assumido o valor de 5%, valor esse definido pelo INMETRO através da portaria nº 246/2000, como o erro máximo que um hidrômetro multijato Classe B e vazão nominal de 1,5 m³/h pode apresentar em sua leitura – para mais ou para menos – sem que seja necessário substituir.

➤ *Rede de distribuição*

- Comprimento de rede (km): O comprimento da rede foi extraído do *software*.
- Comprimento médio do ramal: De acordo com orientação dos técnicos da COMPESA, os hidrômetros estão instalados na calçada ou muro do imóvel, por isso considera nulo o comprimento do medidor até o testada do imóvel.
- Números de clientes cadastrados, ativos e inativos: Para obtenção destes dados, utilizou-se o aplicativo GSAN para extrair os consumos dos clientes considerando as categorias residencial, comercial, industrial e público.
- Margem de erro: Como o número de ligações foi obtido através do *software*, que por sua vez utiliza as coordenadas georreferenciadas de cada cliente, utilizou-se uma margem de 1% para cobrir eventuais erros de cobertura de GPS ou cadastro.

➤ *Pressão na rede*

- Pressão média na rede: A COMPESA já tinha instalados 05(cinco) *dataloggers* para monitoramento da pressão na rede do DMC-39, portanto será extraído a pressão média destes aparelhos via telemetria.
- Número de ligações: O número de ligações foi extraído do aplicativo GSAN da COMPESA.
- Margem de erro: Optou-se em utilizar um valor de 3% de margem, para cobrir eventuais falhas cadastrais que possam resultar em resultados divergentes na modelagem.

➤ *Abastecimento intermitente*

Esse tema não foi preenchido por se tratar de uma área com abastecimento de água ininterruptamente.

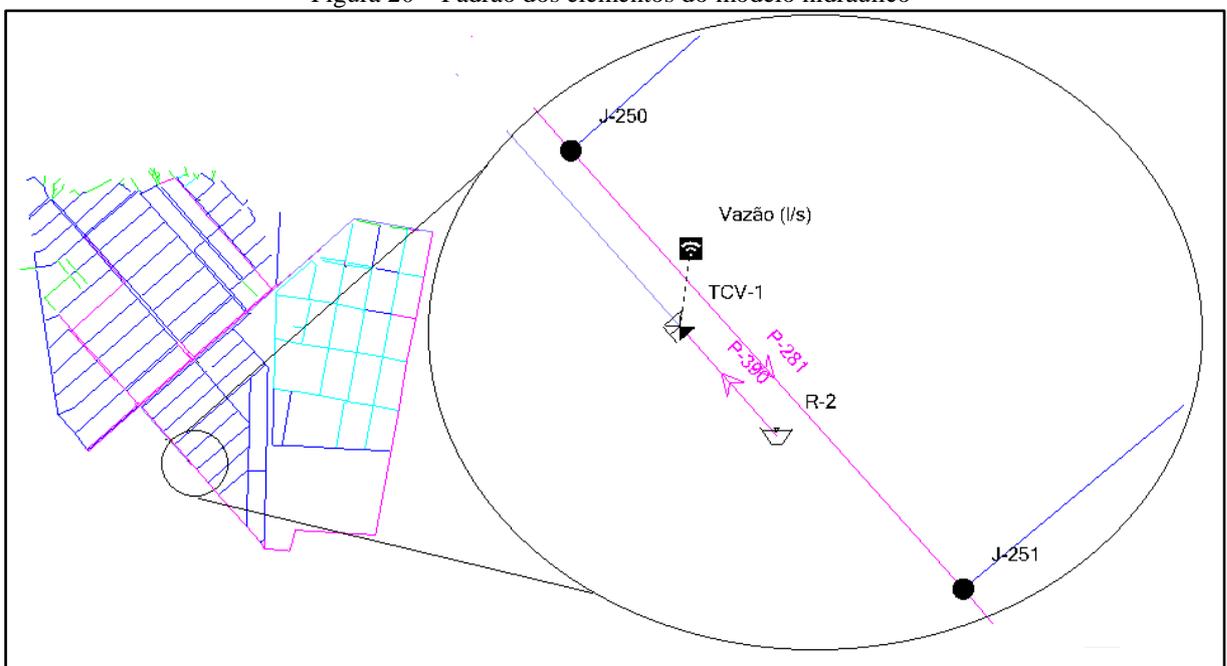
➤ *Dados financeiros*

- Tarifa média de água: A tarifa média de água foi retirada do indicador IN005 – Tarifa média praticada do SNIS de 2019, com um valor R\$ 4,96 por m³.
- Custo variável de produção de distribuição de água: Como a COMPESA não possui essa informação de maneira clara, o valor utilizado foi o do indicador IN003 – Despesa total com os serviços por m³ faturado. Esse valor no SNIS de 2019 é de R\$ 3,89 por m³.

3.2.3 Construção do modelo no aplicativo de simulação hidráulica com a inserção dos dados físicos da rede

Os componentes do sistema inseridos no modelo hidráulica estão apresentados na Figura 20. As propriedades dos elementos são apresentadas na Tabela 17.

Figura 20 – Padrão dos elementos do modelo hidráulico



Fonte: Autor, adaptado da Bentley WaterGEMS (2022).

Tabela 17 – Propriedades dos elementos da modelagem

| Elemento | Tipo | Função no modelo |
|---------------------|--------------|---|
| Reservatório | Nó | ✓ Volume infinito e nível constante, tanto para o regime estático como para o regime de período estendido |
| Bomba | Nó ou linhas | ✓ Responsável por adicionar energia ao sistema para elevar a carga hidráulica |
| Junção | Nó | ✓ Define a posição de demanda como também pode fornecer água ao sistema |
| Tubo | Linha | ✓ Interliga um nó a outro, responsável pelo transporte da água entre dois pontos |
| Hidrante | Nó ou linhas | ✓ Serve para atender demanda de incêndio como também para teste de perdas de água |
| Válvula | Nó ou linhas | ✓ Monitora a pressão ou vazão no sistema conforme parâmetros pré-definidos |
| Tanque | Nó | ✓ Armazena o excesso de água do sistema e libera nos horários de pico de consumo |

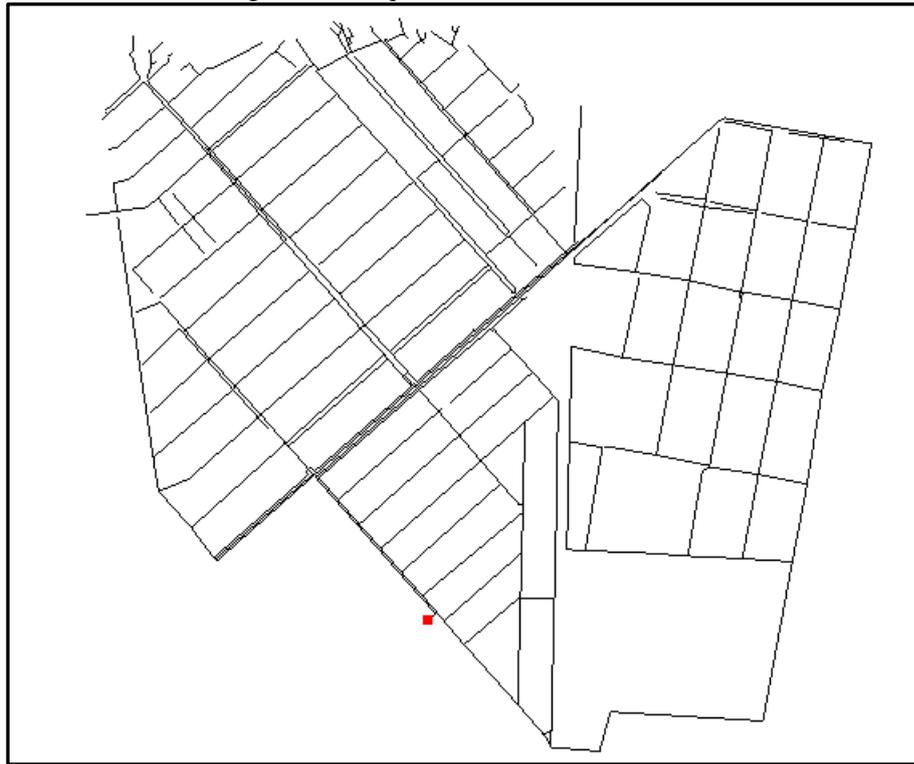
Fonte: Bentley WaterGEMS (2022).

Na estruturação do modelo no aplicativo são necessárias algumas informações pertinentes ao sistema modelado, entre essas:

- Plantas contendo as redes de distribuição de água e seus acessórios;
- Plantas das ligações de água cadastradas;
- Dados comerciais do setor contendo os consumos dos clientes, categoria, quantidade de ligações e economias existentes

Para este estudo, foi utilizado o distrito de medição e controle (DMC-39), o qual está representado através da Figura 21 o esquema hidráulico sendo abastecimento por uma única entrada que alimenta o setor, e na Tabela 18 contendo os diâmetros, extensão e tipo de material da tubulação.

Figura 21 – Esquema hidráulico do DMC-39



Fonte: Autor (2022).

Tabela 18 – Dados da rede de distribuição DMC-39

| Diâmetro nominal (mm) | Material / extensão (m) | | | | Extensão (m) total por diâmetro |
|------------------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------------------------|
| | PVC PBA | PVC DEFoFo | Ferro Fundido | S / I | |
| 50 | 1.054,96 | | | 223,81 | 1.278,77 |
| 63 | 72,40 | | | | 72,40 |
| 75 | 659,18 | | | | 659,18 |
| 85 | 3.844,63 | | | | 3.844,63 |
| 100 | 15.851,59 | | | | 15.851,59 |
| 150 | | 5.034,43 | | 540,84 | 5.575,27 |
| 200 | | 45,14 | | | 45,14 |
| 350 | | | 1.121,58 | | 1.121,58 |
| 400 | | | 309,72 | | 309,72 |
| Extensão total por material | 21.482,76 | 5.079,57 | 1.431,30 | 764,65 | |

Fonte: Autor, adaptada da COMPESA (2022).

3.2.4 Definição e inserção dos dados de demanda de água no modelo hidráulico

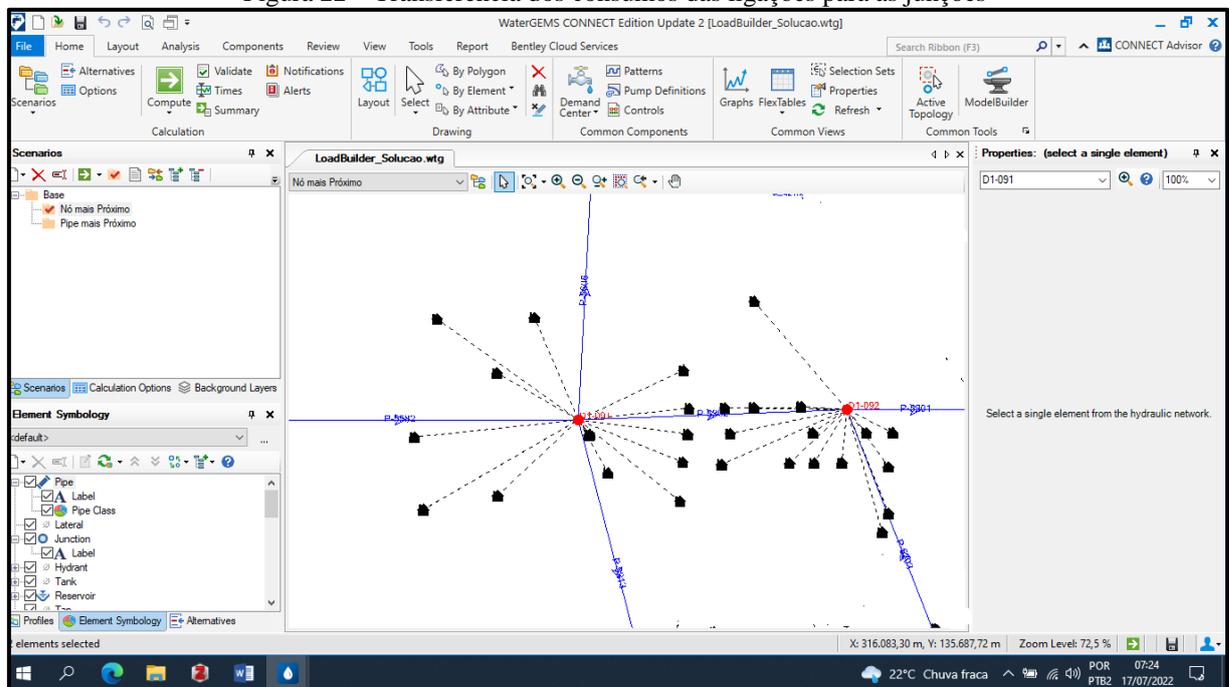
Depois da topologia da rede no *software* de simulação, foi preciso carregar e definir as demandas nodais e o padrão horário de variação. Em relação aos consumos, foi importado através da locação de dados de pontos de GIS, diretamente aos nós mais próximo, desde que

sejam dados pontuais, no caso de hidrômetros, mas existem outras maneiras, como a vazão por área aos nós ou população por uso de solo, mas para este estudo foi utilizado os consumos medidos pelos hidrômetros, haja visto que a COMPESA possui o sistema GISCOMP com todas as ligações georreferenciadas.

Os consumos inseridos de cada ligação são as médias mensais dos últimos 12 meses informado pela Gerência Comercial e Geoprocessamento, setor responsável pelos dados técnicos e comerciais da COMPESA, sendo a importação dos dados através de uma planilha em Excel contendo os pontos em coordenadas georreferenciadas com os respectivos consumos médios, possibilitando a transferência dos dados de forma mais rápida, desta maneira, agilizando o trabalho da modelagem.

A importação dos dados de consumo foi realizada pela ferramenta *LoadBuilder* do simulador *WaterGEMS* que faz a transferência de demanda para a junção mais próxima ou para tubulação. Este mecanismo tem por objetivo aglutinar todos os consumos medidos nos hidrômetros nas junções, conforme demonstrado na Figura 22, as linhas azuis são os tubos, os pontos vermelhos são as junções e os pontos em forma de casa são as ligações georreferenciadas.

Figura 22 – Transferência dos consumos das ligações para as junções



Fonte: WaterGEMS Systems da Bentley (2022).

Após o carregamento dos consumos foi necessário definir o padrão horário de variação das demandas nas junções. Para definir a curva do padrão da demanda foi preciso obter os dados

de vazão por hora do setor selecionado. Para tanto, foram usados os valores do relatório do macromedidor instalado na entrada do DMC-39, sendo monitorado pelo Centro de Controle Operacional, extraído do banco de dados da *Vectora Systems* da região metropolitana do Recife criado pela COMPESA. A curva de demanda foi definida pela média entre os meses abril de 2021 até março de 2022 dos consumos registrados nos hidrômetros dos clientes pertencentes ao setor.

3.2.5 Calibração automática do modelo hidráulico por meio da ferramenta *Darwin Calibration do Software WaterGEMS*

Antes de simular o modelo é preciso calibrar, para isso foram necessários dados de pressão e vazão, porém estes dados precisam ser reais. Para tal, foram instalados *dataloggers* a fim coletar os dados de pressão e vazão da rede de distribuição de água. A COMPESA instalou os aparelhos de medição para coleta dos dados de vazão e pressão, assim como também os sensores, sendo um instalado no macromedidor de entrada do setor, e quatro sensores para coleta dos dados de pressão, os critérios adotados foram atendidos, segundo recomendação de Gamble (2000), sendo desta forma, em cinco pontos da rede, conforme a seguir.

- Entrada do setor;
- Ponto médio da malha de distribuição de água;
- Ponto crítico de pressão mínima;
- Ponto crítico de pressão máxima;
- Ponto mais distante da entrada do abastecimento.

Os dados coletados de pressão, foram utilizados para calibrar as rugosidades dos tubos, já os dados de vazão para ajustar o modelo nas condições reais de operação. Neste contexto, com os dados trabalhados, utilizou-se o *software WaterGEMS* para calibrar o modelo. O *software* possui uma ferramenta própria, o “*Darwin calibrator*”, que faz a busca do melhor resultado baseado no algoritmo genético. Esse dispositivo tem por propósito de enquadrar a pressão e o fator de atrito nos trechos selecionados. Desta forma, reduzir a diferença dos dados simulados e os observados. Entretanto, conforme orientação do manual da empresa Bentley detentora do *software WaterGEMS*, previamente é preciso inserir alguns parâmetros no *software* para simular o modelo, dentre esses:

- Limites de gerações concebidas;

- Quantidade de interações máxima;
- Diferença máxima entre o simulado e o observado;
- Seleção das variáveis a serem ajustadas (vazão, rugosidade e pressão).

Foi necessário inserir também as porcentagens de perdas reais e aparentes no modelo hidráulico, utilizando o método do balanço hídrico, preconizado pela IWA, conforme descrito no item 2.5.1. O método BH foi adotado para estimar as perdas reais, em virtude de ser mais preciso que o método da VMN, haja vista que, este último método não considerou uma média anual das vazões mínima noturna.

Para um modelo hidráulico devidamente calibrado, o efeito na busca por vazamento é seguro. Desta forma, ultrapassando o método do consumo mínimo noturno, assim também superando os métodos baseados em dados bruto e residual na localização de vazamentos (Mohammed; Zelele e Abele, 2021).

3.2.6 Validação do modelo utilizando dados de vazão e pressão da RDA

Nesta etapa, permite-se compreender e analisar o comportamento hidráulico da rede de distribuição de água do distrito. Desta forma, podendo elaborar vários cenários para simulação da rede de distribuição de água.

Neste estudo, utilizou-se o *software WaterGEMS® Connect Edition da Bentley* para simulação da rede de distribuição de água para a zona DMC-39, neste setor foi realizado o recadastramento comercial e a execução de algumas intervenções físicas para isolamento 100% da área do setor, utilizado pela COMPESA para servir de modelo para os demais.

Para validar a modelagem hidráulica setor DMC-39, utilizam-se os dados de vazão e pressão observados no sistema e simula para um cenário base, e através de gráficos é possível visualizar aproximação dos dados simulados e observados, assim como também pode-se calcular em percentual o grau de correlação entre os dois dados.

O *software* utilizado possui três fórmulas para ajuste, comparando os dados modelados com os observados, quanto mais baixo o valor do ajuste, significa que o modelo se aproxima da realidade. Em relação ao período utilizado para validação, foi considerado uma semana. As fórmulas estão apresentadas nas Equações 18, 19 e 20 a seguir.

- Método diferenças dos mínimos quadrados;

$$F = \frac{1}{W_H} \sum (H_{mod} - H_{obs})^2 + \frac{1}{W_Q} \sum (Q_{mod} - Q_{obs})^2 \quad \dots Eq. (18)$$

- Método valor mínimo absoluto das diferenças

$$F = \frac{1}{W_H} \sum |H_{mod} - H_{obs}| + \frac{1}{W_Q} \sum |Q_{mod} - Q_{obs}| \quad \dots Eq. (19)$$

- Método mínimo pior ponto

$$F = \frac{1}{W_H} \max |H_{mod} - H_{obs}| + \frac{1}{W_Q} \max |Q_{mod} - Q_{ov=bs}| \quad \dots Eq. (20)$$

3.2.7 Localização e detecção de vazamentos por meio da ferramenta *Darwin Leak Calibration do Software WaterGEMS*

Após carregar, calibrar e validar o modelo, foi possível simular a modelagem hidráulica para o setor do DMC-39 para vários cenários, desde a setorização, instalação de válvulas redutoras de pressão, assim como também reabilitação da rede, e, principalmente, para detectar vazamento de água na rede. Nesta pesquisa, prioriza as perdas de água por vazamentos utilizando a modelagem hidráulica.

Este estudo propõe uma abordagem de detecção e localização de vazamentos. Para tal, utilizou-se a ferramenta “*Darwin Leak Calibration*” do simulador *WaterGEMS CONNECT® Edition* da *Bentley* para detectar pontos prováveis de vazamentos, mas não é qualquer vazamento, este dever causar uma perda de carga mensural suficientes para detectá-lo. Trabalha a partir da alteração do coeficiente emissor até a comparação da linha piezométrica e da vazão, utilizando dados observados e simulados. Desta forma, ajustando o coeficiente emissor e também detectando os pontos de vazamentos.

A calibração para detectar vazamento, deve modelar o sistema usando somente as demandas medidas, os dados de vazão e pressões são coletados em campo. Além do mais, a vazão medida no sistema tem que ser superior a demanda de consumo nas junções, esta

diferença é utilizada para justamente colocar os vazamentos ou desvios nos melhores nós, sendo estas localizações mais prováveis de vazamentos.

Assim como foi preciso na calibração do modelo, também é preciso inserir as perdas reais e aparentes, as quais devem ser a mais próxima da realidade, por isso, deve antes analisar os dados utilizados, para que os mesmos sejam confiáveis para calcular as perdas.

Para se ter uma boa precisão para detectar anormalidades, inclusive vazamentos, é preciso que as perdas aparentes seja a menor possível, para isso o melhor horário para simular o modelo é de madrugada, onde as perdas reais superam as aparentes.

3.2.8 Avaliação dos resultados com base em dados advindos de campanhas de detecção de vazamentos

Com os resultados dos dados simulados, é possível apresentar a eficiência da pesquisa realizada na elaboração do diagnóstico de perdas de água do distrito, a partir dos cálculos de perdas executados tomando os resultados da simulação hidráulica, e conferindo com os valores reais encontrados no sistema de abastecimento de água.

Os valores a serem conferidos, são estes:

- Verificação dos pontos que apresentaram anormalidade na rede de distribuição de água apontados pelo modelo;
- Analisar os dados coletados em campo se foram vazamentos ou outros tipos de anormalidade.

Deve-se adotar um critério para avaliação das medidas em campo, com a finalidade de comparar os valores simulados e observados de pressão e vazão. Para tal, utiliza-se um intervalo de confiança, se o valor simulado estiver dentro da faixa, é aceitável. Os critérios utilizados para os intervalos de confiança para análise do desempenho da calibração, são os preconizados pelo Water Research Center (WCR, 1989) para comparar entre os valores observados (medidos) e aqueles obtidos através da simulação. Para os valores de pressão deve se basear no erro absoluto, dado entre o valor observado e simulado, conforme Tabela 19.

Tabela 19 – Faixas adotadas para critérios da pressão

| Intervalos de faixas | Medidas das pressões |
|-----------------------------|-----------------------------|
| ± 0,5 m | 85% |
| ± 0,75 m | 95% |
| ± 2,00 m | 100% |

Fonte: WCR (1989).

Já em relação a vazão, o erro relativo, deve estar no intervalo das seguintes faixas, de acordo com WCR (1989):

- Caso as medidas de vazão que excedem 10% da vazão abastecida total, considera-se $\pm 5\%$ de erro;
- Já em relação, as medidas de vazão que não excedem 10% da vazão abastecida, considera-se $\pm 10\%$ de erro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO

Logo depois do levantamento dos dados básicos de controle do setor para o período de abril de 2021 até abril 2022, excluindo o mês de dezembro de 2021 devido falta de dados, e considerando a obtenção dos dados de pressão e vazão do sistema Vectora da COMPESA para o período citado, foram calculados: o balanço hídrico e os indicadores de performance através do *software* W-B Easy Calc (v6.17). Para melhor compreensão, foi apresentada mais detalhadamente para o setor em estudo, com o passo a passo de cada planilha.

Em seguida, foram introduzidos os dados de entradas na planilha “*Sys.Ipunt*”/Entrada do sistema (Tabela 20) com os dados do volume anual do sistema, cujo volume para o setor DMC-39 em 2022 foi de 1.955.076 m³, considerando a recomendação do fabricante do macromedidor, o erro adotado foi de 2%.

Tabela 20 – Valores “*Sys.Ipunt*”/Entrada anual

| Volume de entrada no sistema | | |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Fonte de água | (m³) | Margem de erro (+/- %) |
| Sistema Pirapama | 1.955.076 | 2,0 % |

Fonte: Autor, adaptado WB-EasyCalc, (2022).

Próxima etapa foi preencher a planilha “*Billed Cons*”/consumo faturado (Tabela 21) com os consumos medidos faturados com hidrômetros foi 479.205 m³ e considerando que existem 126 ligações sem hidrômetros (sistema GISCOMP da COMPESA, 2022), adotou-se um consumo médio para estas ligações em torno de 10 m³ por mês, pois este valor é adotado pela COMPESA quando não existe medidor instalado. Desta forma, foi calculado para o período de um ano o volume não medido faturado que foi de 15.120 m³.

Tabela 21 – Valores “*Billed Cons*”/consumo faturado

| Consumo medido faturado | | Consumo não medido faturado | |
|--|------------------------|--|------------------------|
| Descrição | (m³) | Descrição | (m³) |
| Venda de água por atacado (exportação) | 479.205 | Venda de água por atacado (exportação) | 15.120 |
| Outras fontes | 0,00 | Outras fontes | 0,00 |
| Total | 479.205 | Total | 15.120 |

Fonte: Autor, adaptado WB-EasyCalc (2022).

Posteriormente, foi preenchida a planilha “Unb Cons”/consumo não faturado (Tabela 22) com os volumes não faturados. Considera-se o volume não medido e não faturado as ligações sem hidrômetros, assim foi estimado o volume médio consumido por ligação com hidrômetros em torno de 13,60 m³ por mês, entretanto foi subtraído do consumo faturado não medido, 13,6 m³ menos 10 m³, portanto o volume de 3,60 m³ por mês foi considerado para o cálculo do volume não faturado e não medido, sabe-se que existem 126 ligações sem medidores. Desta forma, o volume estimado foi de 5.443 m³ por ano. Deve estimar também o volume de descarga de rede, a COMPESA não registra as descargas de rede, por isso foi considerado a fórmula adotada pela Companhia, foi analisado a extensão da rede de distribuição d’água e também um fator de descarga de rede. Desta forma, a multiplicação resulta o volume de descarga de rede para um período de um ano, sendo o fator de descarga de rede de 0,015 e a extensão de 28.758,28 m, então o volume considerado de perdas é de 5.176,49 m³ ao ano.

Tabela 22 – Valores “Unb Cons”/consumo não faturado

| Consumo medido não faturado | | Consumo não medido não faturado | | |
|-----------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|------------------------|
| Descrição | (m ³) | Descrição | (m ³) | Margem de erro (+/- %) |
| Venda de água por atacado | 0,00 | Ligações sem HD | 5.443 | 5,0 % |
| - | - | Descarga de rede | 5.147 | 5,0 % |
| Total | 0,00 | Total | 10.590 | 3,5 % |

Fonte: Autor, adaptado WB-EasyCalc (2022).

A próxima planilha a ser preenchida foi “Unauth. Cons”/consumo não autorizado (Tabela 23) corresponde aos volumes fraudados. Em relação área do abastecimento de água do setor DMC-39, foi realizado fiscalização dos 592 imóveis na situação de cortados, segundo a equipe técnica da COMPESA foi verificado que existiam cerca de 35% ligações religados à revelia. Portanto, foi considerado 207 ligações clandestinas, referente ao mês de novembro de 2022. Considerando que a taxa de ocupação por domicílio 3,25 (IBGE, 2010) na região urbana de Recife e um consumo de 198 L/pessoas/dia (COMPESA, 2022) foi calculado o volume considerado fraudado de 48.667 m³ por ano.

Tabela 23 – Valores “Unauthorized Consumption”/consumo não autorizado

| Consumo não autorizado | | | | | |
|---|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Descrição | Número estimado | Margem de erro (+/- %) | Pessoas por residência | Consumo (L/pessoas/dia) | Total (m³) |
| Ligações clandestinas – residenciais | 207 | 2 % | 3,25 | 198 | 48.667 |
| Ligações clandestinas – outras | - | - | - | - | - |
| Hidrômetros violados | - | - | - | - | - |
| Total | | | | | 48.667 |

Fonte: Autor, adaptado WB-EasyCalc (2022).

Posteriormente, foi preenchida a planilha “Meter erros”/Erros dos medidores (Tabela 24) com os erros de submedição, extraído dos dados fornecido pela COMPESA. Em relação aos erros de manipulação e leitura, foram considerados nulos.

Tabela 24 – Valores “Meter erros”/Erros dos medidores

| Imprecisões dos medidores e erros de manipulações de dados | | | | |
|---|------------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Descrição | Total (m³) | Submedição (%) | Total (m³) | Margem de erro (+/- %) |
| Consumo faturado medido | 479.205 | 26,8 % | 175.805 | 5 % |

Fonte: Autor, adaptado WB-EasyCalc (2022).

Em relação ao preenchimento da planilha “Network”/Rede (Tabela 25) foram lançados os dados de extensão de rede (28,5 km) e a quantidade e ligações (3.485), considerando uma margem de erro de 1%, por motivo que todas as redes e ligações foram georreferenciadas. O número de ligações clandestinas foi de 207 e o comprimento médio do ramal predial do limite da propriedade até o hidrômetro é zero, haja vista que os hidrômetros são instalados na calçada ou no muro dos imóveis.

Tabela 25 – Valores “Network”/Rede

| Rede de distribuição e adutoras | | Ramais prediais | | |
|--|-------------------------|--|---------------|-------------------------------|
| Descrição | Comprimento (km) | Descrição | Número | Margem de erro (+/- %) |
| Tubulações | 28,5 | Números de clientes (ativos) | 2.671 | 1,0 % |
| - | - | Números de ligações de clientes registrados | 3.485 | 1,0 % |
| - | - | Números de contas inativas com ligações existentes | - | - |
| - | - | Números estimados de ligações clandestinas | 207 | 2,0 % |

Fonte: Autor, adaptado WB-EasyCalc (2022).

Para o preenchimento da planilha “*Pressure*”/Pressão (Tabela 26) foram considerados os dados de pressão média 5,4 mca, área do DMC-39 corresponde a 218,84 km² e quantidade de ligações foi de 3.485.

Tabela 26 – Valores “*Pressure*”/Pressão

| Pressão média (mca) | | |
|-------------------------|--------------------------------|-------------------|
| Área (km ²) | Números de ligações aproximado | Pressão média (m) |
| 218,84 | 3.475 | 5,4 |

Fonte: Autor, adaptado WB-EasyCalc (2022).

Apesar da despressurização da rede de distribuição d’água no período das 18h até às 04h do dia seguinte, mesmo assim o DMC-39 continua com vazão. Desta forma, foi considerado o regime de abastecimento contínuo. Por isso, a planilha “*Intermittent Supply*”/Abastecimento intermitente não foi preenchida.

Por último, foi preenchida a planilha “*Financial Data*”/Dados financeiros (Figura 23) foram considerados os dados da tarifa média, com um valor R\$ 4,96 por m³, assim como também foi considerado o custo do m³ faturado de R\$ 3,89 (SNIS, 2019).

Figura 23 – Planilha “*Financial Data*”/Dados financeiros

| Informação financeira | | |
|---|-----------|-------------|
| por m ³ | moeda | Início |
| Tarifa média | 4,96 | R\$ |
| Custo variável de produção e distribuição (custo marginal da água) | 3,89 | R\$ |
| Componente de ANF | | Valor Anual |
| Consumo medido não faturado | - | R\$ |
| Consumo não medido não faturado | 52.526 | R\$ |
| Perdas Aparentes | 1.113.377 | R\$ |
| Imprecisões dos medidores e erros de consumo não autorizado | 871.931 | R\$ |
| | 241.386 | R\$ |
| Perdas Reais | 4.787.333 | R\$ |
| Volume Total (m ³ /d) | 3.358 | |
| Volume que pode ser vendido para consumidores novos ou existentes (m ³ /d) | - | |
| Valor total de ANF | 5.933.837 | R\$ |
| Custo operacional anual (sem depreciação) | | R\$ |

Fonte: WB-EasyCalc (2022).

Após o preenchimento de todas as planilhas, obteve-se o balanço hídrico e todos os seus integrantes, retirado da planilha “*Water Balance*”/Balanço hídrico (Tabela 27). Foi extraído as

perdas totais do DMC-39 de 1.450.161 m³ ao ano, que corresponde a 74,17% do volume disponibilizado. De acordo com a Tabela 5 de classificação de desempenho do SAA, considera-se mal gerenciado. Ainda sobre as perdas, nota-se que as perdas reais predominam em relação as perdas aparentes, atingindo um percentual de 84,52% das perdas totais.

Tabela 27 – Planilha Balanço Hídrico do DMC-39

| | | | | |
|--|---|---|---|--|
| Volume de entrada 1.955.076 m³/ano | Consumo autorizado 504.915 m³/ano | Consumo autorizado faturado 494.325 m³/ano | Consumo medido faturado 479.205 m³/ano | Água faturada 494.325 m³/ano |
| | Margem de erro (+/-) 0,1% | | Consumo não medido faturado 15.120 m³/ano | |
| Margem de erro (+/-) 2,0 % | | Consumo autorizado não faturado 10.590 m³/ano | Consumo medido não faturado 0 m³/ano | |
| | | Margem de erro (+/-) 3,7 % | Consumo não medido não faturado 10.590 m³/ano | |
| | | | Margem de erro (+/-) 3,5 % | Água não faturada 1.460.751 m³/ano |
| | Perdas de água 1.450.161 m³/ano | Perdas aparentes 224.471 m³/ano | Consumo não autorizado 48.667 m³/ano | Margem de erro (+/-) 2,7 % |
| | Margem de erro (+/-) 2,7 % | Margem de erro (+/-) 3,9 % | Margem de erro (+/-) 2,0 % | |
| | | | Imprecisões dos medidores e erros de manipulação dos dados Margem de erro (+/-) 3,5 % | |
| | | | Perdas reais 1.225.690 m³/ano | |
| | | | Margem de erro (+/-) 3,3 % | |

Fonte: Autor, adaptado do *software* W-B Easy Calc (2022).

Em seguida foram extraídos os indicadores de performance na planilha “PIs”/Indicadores e performance, evidenciando as perdas reais (Tabela 28), enquadrando na categoria de performance técnica do grupo “D”, conforme consta na Tabela 4. A classificação no grupo “D” aponta que existe um grande potencial para melhorias expressivas. Já em relação ao indicador de perdas por ligação, está muito acima o que determina a Portaria n° 490/2021 do MDR, conforme consta na Figura 8 a meta da COMPESA é 404,37 L/lig/dia. Dia para o ano de 2023, mas o valor encontrado foi de 909 L/lig/dia, significa que está 124,79% acima da meta estabelecida.

Tabela 28 – Principais indicadores de performance do DMC-39

| | Indicadores de Performance de perdas de reais | | | | Grupo de performance | |
|---|---|----------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-------------------------|
| | Melhor estimativa | Margem de erro [± %] | Limite inferior | Limite superior | País Desenvolvido | País em Desenvolvimento |
| Índice infraestrutural de perdas (IIE) | 179 | 3% | 173 | 185 | | |
| Litros por ligação por dia (q.s.p) | 909 | 3% | 879 | 940 | | |
| q.s.p.: quando o sistema está pressurizado – isto significa que o valor já está corrigido no caso de intermitência no abastecimento | | | | | D | D |
| | | | | | Explicações | Explicações |
| Litros por ligação por dia por metro de pressão (q.s.p.) | 168 | 3% | 162 | 174 | | |
| m ³ /km rede por hora (q.s.p.) | 4,91 | 3% | 4,75 | 5,07 | | |

Fonte: WB-EasyCalc (2022).

4.2 CÁLCULO DA VMN E DAS PERDAS

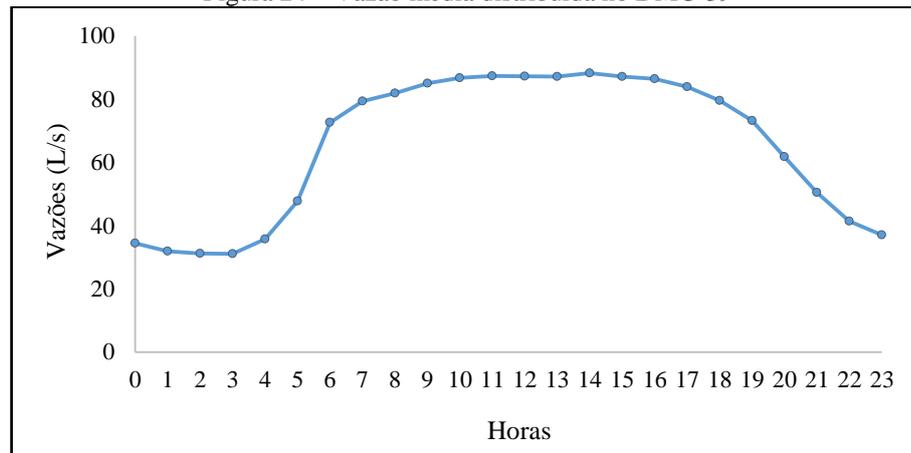
4.2.1 Dados das vazões e pressões do setor

Os levantamentos das vazões e pressões do distrito de medição e controle (DMC-39) foram realizados através de:

- Cadastro técnico da rede de distribuição de água;
- Macromedidor e manômetros instalados no DMC-39;
- Sistema de telemetria COMPESA.

Em relação aos dados de vazões, estão apresentados na Tabela 29, obtidos através do sistema Vectora, que presta serviço a COMPESA, via telemetria, referente ao mês de maio de 2022, em intervalos sequenciais de hora em hora, mas foi utilizado a média do período de 30 dias para 24 horas, demonstrado pela Figura 24.

Figura 24 – Vazão média distribuída no DMC-39



Fonte: Autor, adaptado da COMPESA (2022).

Tabela 29 – Dados de vazões (L/s) médias semanais do mês de maio de 2022 do DMC-39

| Hora | 1ª semana | 2ª semana | 3ª semana | 4ª semana | Média |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 01 | 36,22 | 32,37 | 33,47 | 34,56 | 34,40 |
| 02 | 32,98 | 31,68 | 31,21 | 29,55 | 31,86 |
| 03 | 29,88 | 31,41 | 32,62 | 28,06 | 31,17 |
| 04 | 28,88 | 29,85 | 34,96 | 27,02 | 31,05 |
| 05 | 28,76 | 30,80 | 44,04 | 39,90 | 35,77 |
| 06 | 40,01 | 41,61 | 68,24 | 47,14 | 47,80 |
| 07 | 71,55 | 66,43 | 82,64 | 73,58 | 72,68 |
| 08 | 82,54 | 81,16 | 81,18 | 79,45 | 79,44 |
| 09 | 86,01 | 86,95 | 83,86 | 78,19 | 81,96 |
| 10 | 86,59 | 88,11 | 86,30 | 83,89 | 85,05 |
| 11 | 87,04 | 91,55 | 85,92 | 83,66 | 86,78 |
| 12 | 87,16 | 92,41 | 83,90 | 83,28 | 87,37 |
| 13 | 88,49 | 87,30 | 83,90 | 81,73 | 87,24 |
| 14 | 89,29 | 86,35 | 83,76 | 84,46 | 87,19 |
| 15 | 89,01 | 85,55 | 87,54 | 91,84 | 88,32 |
| 16 | 88,86 | 85,16 | 82,86 | 91,81 | 87,20 |
| 17 | 89,96 | 86,83 | 81,23 | 89,68 | 86,52 |
| 18 | 87,87 | 88,26 | 79,85 | 82,72 | 83,94 |
| 19 | 84,52 | 84,72 | 73,49 | 75,60 | 79,63 |
| 20 | 73,43 | 78,40 | 64,40 | 69,15 | 73,21 |
| 21 | 58,58 | 64,04 | 50,61 | 58,64 | 61,86 |
| 22 | 50,17 | 45,32 | 43,57 | 46,58 | 50,49 |
| 23 | 47,04 | 38,79 | 38,85 | 34,43 | 41,41 |

Fonte: Autor, adaptado da COMPESA (2022).

Com a vazão média diária do setor e a vazão mínima noturna média foi possível, através da Equação (11), determinar o Fator de Pesquisa de 47%, significa que se trata de uma área susceptível a vazamentos ocultos. Desta forma, é preciso realizar pesquisa em campo a procura dos vazamentos com equipamentos acústicos.

Para obtenção das pressões no ponto médio foram extraídos do sistema de telemetria da Vectora, os pontos estão localizados nas junções, conforme estão na Tabela 30, apresentados os valores de pressões médias por horas.

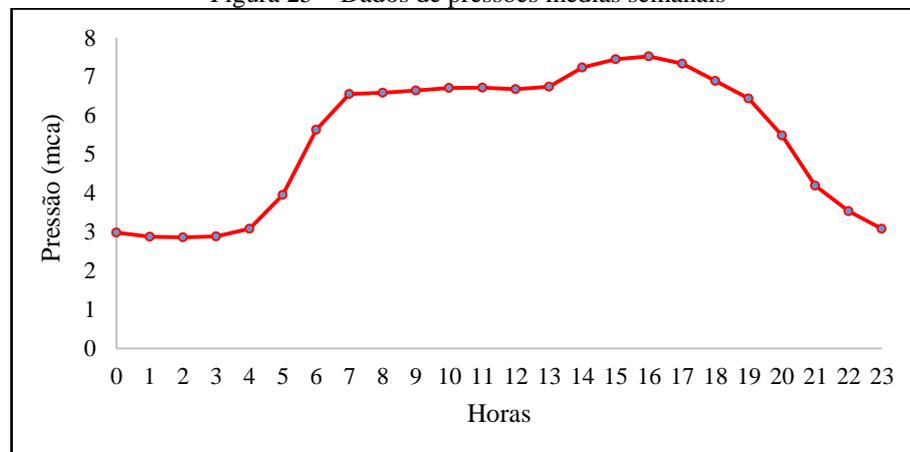
Tabela 30 – Dados de pressões médias horárias do mês de maio de 2022 do DMC-39

| Hora | Pressão J-88 (mca) | Pressão J-156 (mca) | Pressão J-219 (mca) | Pressão J-243 (mca) | Pressão média (mca) | $\left(\frac{\bar{p}_{(n-1) \rightarrow n}}{\bar{p}_{3 \rightarrow 4}}\right)^{N_1}$ |
|------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|
| 01 | 1,04 | 3,41 | 2,98 | 3,69 | 2,78 | 0,66 |
| 02 | 0,93 | 3,29 | 2,87 | 3,21 | 2,57 | 0,60 |
| 03 | 0,89 | 3,23 | 2,86 | 3,13 | 2,53 | 0,59 |
| 04 | 0,92 | 3,21 | 2,88 | 3,15 | 2,54 | 0,59 |
| 05 | 1,04 | 3,37 | 3,08 | 4,13 | 2,90 | 0,69 |
| 06 | 1,11 | 4,20 | 3,96 | 6,86 | 4,03 | 1,01 |
| 07 | 1,98 | 5,58 | 5,63 | 13,54 | 6,68 | 1,81 |
| 08 | 2,26 | 6,46 | 6,55 | 15,62 | 7,72 | 2,14 |
| 09 | 2,04 | 6,56 | 6,58 | 15,98 | 7,79 | 2,16 |
| 10 | 1,96 | 6,49 | 6,64 | 16,88 | 7,99 | 2,22 |
| 11 | 1,86 | 6,41 | 6,71 | 17,53 | 8,13 | 2,27 |
| 12 | 1,91 | 6,44 | 6,71 | 17,68 | 8,18 | 2,28 |
| 13 | 1,98 | 6,27 | 6,67 | 17,47 | 8,10 | 2,26 |
| 14 | 1,94 | 6,54 | 6,74 | 17,60 | 8,21 | 2,29 |
| 15 | 1,92 | 7,05 | 7,24 | 18,52 | 8,68 | 2,44 |
| 16 | 1,92 | 7,44 | 7,45 | 18,45 | 8,81 | 2,49 |
| 17 | 2,04 | 7,50 | 7,52 | 18,51 | 8,89 | 2,51 |
| 18 | 1,93 | 7,35 | 7,33 | 17,58 | 8,55 | 2,40 |
| 19 | 2,51 | 6,93 | 6,89 | 15,93 | 8,06 | 2,24 |
| 20 | 2,53 | 6,63 | 6,43 | 13,81 | 7,35 | 2,02 |
| 21 | 2,42 | 5,72 | 5,48 | 10,17 | 5,95 | 1,58 |
| 22 | 1,87 | 4,47 | 4,19 | 6,77 | 4,33 | 1,10 |
| 23 | 1,36 | 3,77 | 3,53 | 4,93 | 3,40 | 0,83 |
| | | | | | FND = | 39,89 |

Fonte: Autor, adaptado da COMPESA (2022).

Em forma de gráfico demonstrado na Figura 25, são apresentados os dados da pressão média do ponto intermediário do setor do DMC-39 com intervalos sequenciais de hora em hora para um período de 24h.

Figura 25 – Dados de pressões médias semanais



Fonte: Autor, adaptado da COMPESA (2022).

A partir dos dados de pressões foi calculado FND, através da Equação (8), foi encontrado um valor relativamente alto, devido as pressões no período da madrugada serem muita baixa, em torno de 3 mca, valor este considerado na fórmula do Fator Noite Dia e multiplicado pela vazão mínima noturna para determinar o volume correspondente as perdas reais (Q_{pr}) do DMC-39, tem-se:

- $Q_{min} = 31,05 \text{ L/s};$
- $FND = 39,89;$
- $N_1 = 1,15$ (adotado, Tabela 10).

Considerando um consumo mínimo de 5 L/h por ligação durante o período da madrugada e aplicando a Equação (7), encontra-se a vazão de perdas reais (Q_{pr}) em torno de $3.769,80 \text{ m}^3$ por dia.

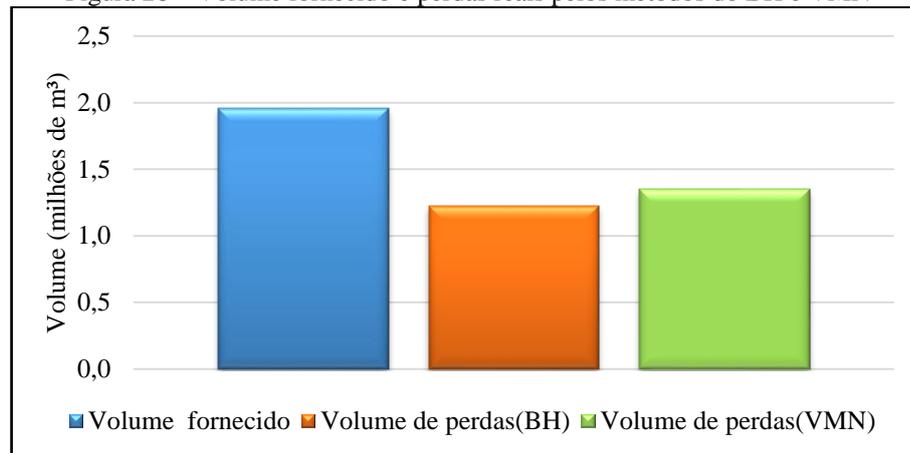
4.3 COMPARAÇÃO DAS PERDAS DE ÁGUA PELOS MÉTODOS BH E VMN

4.3.1 Abordagem de perdas reais

As perdas reais determinada pelo método BH foi de 3.358 m^3 por dia, considerando a quantidade de ligações ativas de 2.671, obtêm-se um índice de perdas reais por ligação de 1.257 L/lig./dia. Em relação ao resultado encontrado pelo método da VMN para perdas reais, os resultados apontam 3.769 m^3 por dia, o que corresponde a um índice de perdas reais por ligação de 1.411 L/lig./dia, superior ao valor obtido pelo primeiro método, o que equivale a diferença de 12,25% a mais.

Para demonstrar melhor os volumes de perdas reais em relação ao volume disponibilizado para o DMC-39 no período de 01 de abril de 2021 até o dia 30 de abril de 2022, excluindo o mês de dezembro de 2021 devido à falta de dados. A Figura 26 ilustra os volumes de perdas reais para um período de um ano, considerando os dois métodos utilizados, tanto do BH como também VMN.

Figura 26 – Volume fornecido e perdas reais pelos métodos do BH e VMN

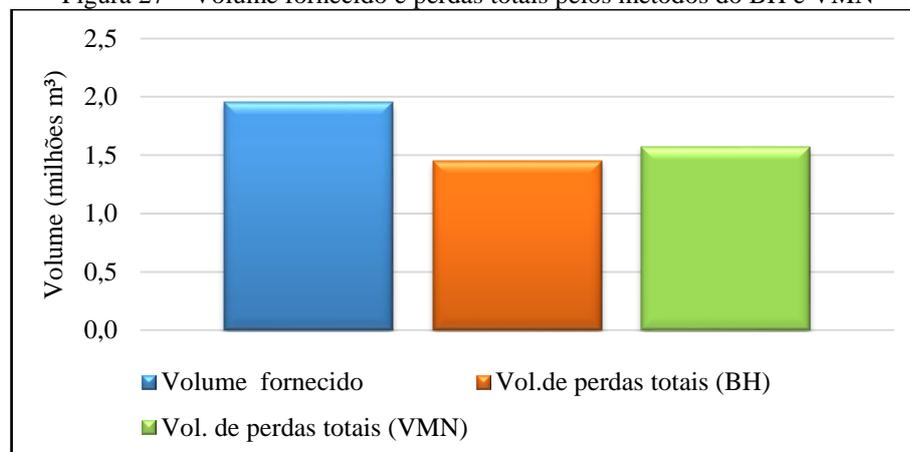


Fonte: Autor, adaptado da COMPESA (2022).

4.3.2 Abordagem de perdas aparentes e perdas totais

A partir dos dados da Tabela 27, as perdas aparentes encontradas pelo método BH foi de 224.471 m³ por ano, sendo adotado o mesmo valor no somatório das perdas totais tanto pelo método anterior como para a VMN, para ilustrar melhor os volumes de perdas totais para um período de 12 meses pelos dois métodos. A Figura 27 aponta uma perda total maior pelo método da VMN. Observa-se que os índices de perdas totais na distribuição obtidos pelos métodos BH e VMN são respectivamente, 74% e 80%, logo para este último o percentual do volume que gerou receita para companhia foi de apenas 20%.

Figura 27 – Volume fornecido e perdas totais pelos métodos do BH e VMN



Fonte: Autor, adaptado da COMPESA (2022).

Analisado as perdas totais tanto pelo método BH e VMN e comparando com os indicadores de perdas de água dos países desenvolvidos (*IBNET*, 2020), entre esses: Estados

Unidos (13,58%), Bélgica (26,15%), Finlândia (19,09%) e Nova Zelândia (21,22%). Verifica-se que as perdas encontradas no DMC-39 estão acima 445% a dos Estados Unidos, que possui a menor perda, e 183% acima da Bélgica, sendo este último a maior perda entre os países citados anteriormente.

4.4 MODELAGEM HIDRÁULICA DO DMC-39

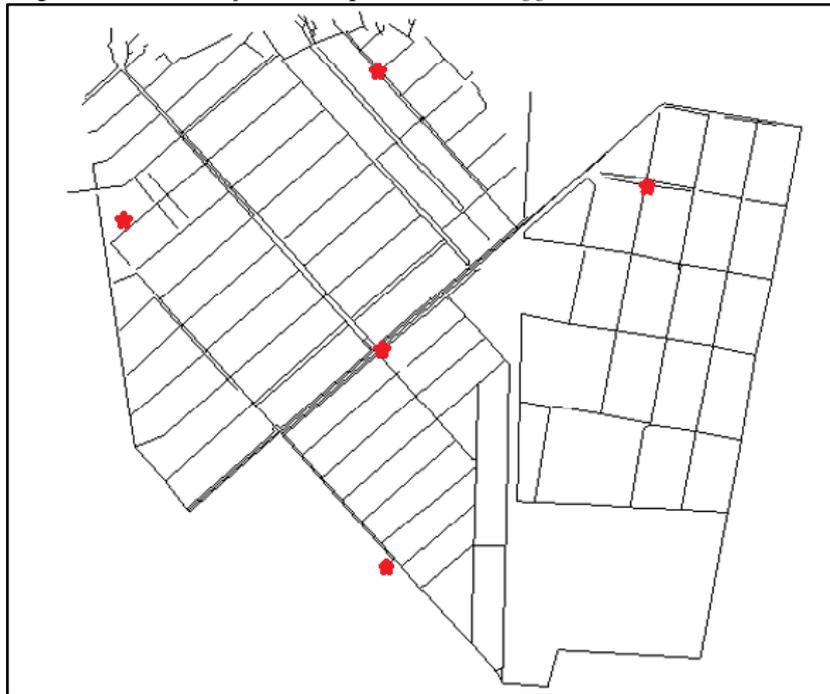
O modelo do DMC-39 possui 389 trechos de tubulações com material de PVC e ferro fundido, com as seguintes quantidades respectivamente, 260 e 29. Já as junções são 320, sendo com consumo e sem, respectivamente, 279 e 41. Sobre as categorias de consumo das junções foram consideradas 4 públicas, 3 industriais, 39 comerciais e 274 residenciais, logo 85% das junções foram, predominantemente, consideradas categoria residencial.

4.5 CALIBRAÇÃO DA RDA DO DMC-39

4.5.1 Dados coletados

Os dados coletados em campo, por meio do sistema Vectora, compõem a base na qual o modelo de simulação hidráulica se apoia para elaborar a calibração das variáveis hidráulicas. A seguir é demonstrado na Figura 28 os pontos da localização dos aparelhos *dataloggers* instalados no DMC-39 para coleta de dados de vazões e pressões.

Figura 28– Localização dos dispositivos *dataloggers* instalados no DMC-39



Fonte: Autor, adaptado software *WaterGEMS* (2022).

Na Tabela 31 são apresentadas as junções onde estão instalados os registradores dos dados de vazão e pressão com as coordenadas geográficas de cada ponto, assim como também os nomes das ruas.

Tabela 31 – Localização dos *dataloggers*

| Junções | Ruas | Coordenadas Latitude (UTM) | Coordenadas Longitude (UTM) |
|--------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|
| J-88 | Rua Jamaica | - 8.1072833 | - 34.9139666 |
| J-156 | Rua Carijó | - 8.1052274 | - 349178314 |
| J-219 | Av. Jean Emile Frave | - 8.1101832 | - 34.9183148 |
| J-243 | Rua Rio Amazonas | - 8.1128400 | - 34.9183833 |
| PRV-1 | Rua Rio Amazonas | - 8.1128400 | - 34.9183833 |
| J-300 | Rua Irapuã | - 8.1085333 | - 349220000 |

Fonte: Autor, adaptado WB-EasyCalc (2022).

A vazão foi medida, na entrada da área do DMC-39, através do macromedidor e as pressões foram aferidas pelos manômetros instalados nos pontos estratégicos, conforme recomendação de Gamble (2000) descritos no item 3.2.5, sendo transmitido via telemetria para o Centro de Controle Operacional da COMPESA. Na Tabela 32 encontra-se os dados de vazão e pressão inseridos no software *WaterGEMS Connet Edition* utilizado para calibrar a rede hidráulica do distrito, correspondente as junções que possui *datalogger* (registradores) dos dados de pressão e vazão durante no período de Segunda Feira à Domingo do dia 23 de maio de 2022, foi escolhido este intervalo devido não ter encontrado falhas no sistema de

abastecimento de água, apesar que um dos datalogger não estava funcionando, entretanto foi analisado outros períodos e sempre havia falha em um dos cinco aparelhos dos registradores.

Tabela 32 – Pressão às 15:00h dos dias 23 a 29 de maio de 2022 do DMC-39

| Dia | Pressão (mca) J-88 | Pressão (mca) J-156 | Pressão (mca) J-219 | Pressão (mca) J-243 |
|------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 23 | 4,60 | 9,90 | 10,63 | 21,07 |
| 24 | 4,80 | 11,24 | 10,89 | 21,77 |
| 25 | 5,50 | 10,77 | 10,96 | 22,77 |
| 26 | 4,50 | 8,77 | 9,97 | 21,67 |
| 27 | 5,00 | 10,29 | 10,87 | 25,67 |
| 28 | 6,10 | 12,67 | 12,25 | 25,57 |
| 29 | 4,80 | 5,87 | 9,00 | 18,77 |

Fonte: Autor, adaptado da COMPESA (2022).

4.5.2 Consumo adotado nas junções

Com os dados de consumo dos clientes gerados pelo sistema GISCOMP da COMPESA referente ao período de abril de 2021 até abril de 2022, excluindo o mês de dezembro de 2021, por motivo de falta de dados, foi possível inserir no *software WaterGEMS Connect Edition*, através da ferramenta *Loadbuilder*. Desta forma, foi factível destinar as demandas nas junções correspondente a vazão de consumo considerando a vazão fornecida, com isso as perdas de água foram contabilizadas nas junções. Na Tabela 33 está parte dos dados referentes a vazão disponibilizada para cada junção, mas os dados completos estão no Anexo A.

Tabela 33 – Vazão das junções do dia 23 de maio de 2022 do DMC-39

| Junção | Categoria | Vazão (L/s) |
|---------------|------------------|--------------------|
| J-3 | Comercial | 0 |
| J-4 | Residencial | 0 |
| J-5 | Comercial | 0,5787 |
| J-6 | Residencial | 0 |
| . | . | . |
| . | . | . |
| . | . | . |
| J-328 | Residencial | 0,3160 |
| J-329 | Residencial | 0,1624 |
| J-332 | Residencial | 0,0212 |
| J-333 | Residencial | 0,0830 |

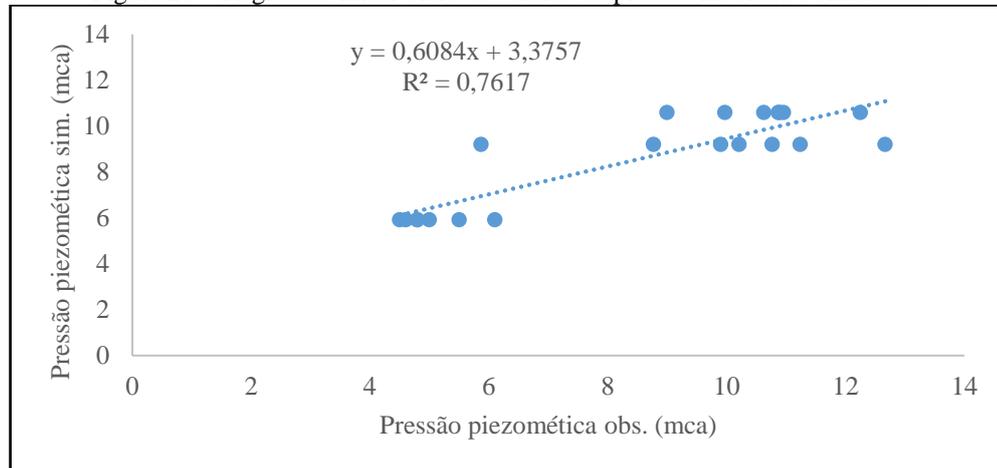
Fonte: Autor, adaptado da COMPESA (2022).

4.6 ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO

Após carregar os dados, conforme descrito no item anterior, foi possível rodar o modelo hidráulico, obtendo os resultados para calibração do coeficiente C da fórmula de Hazen-

Williams, através dos dados de pressão e vazão observados. Na Figura 29, é apresentado o comportamento dos valores simulados com os valores observados da pressão piezométrica, referente aos dados dos dias 23 a 29 de maio de 2022, às 15 horas.

Figura 29 – Regressão linear entre os valores de pressão medidos e simulados



Fonte: Autor (2022).

Para o cálculo do ajuste da solução, foi utilizado a fórmula das diferenças dos mínimos quadrados com dados observados e simulados, conforme descrito no item 3.2.6 através da Equação (18). O coeficiente de correlação foi 0,7617, o que resultou em uma classificação como uma correlação forte, de acordo com Pearson. Entretanto, houve uma melhora significativa deste índice, antes da simulação hidráulica considerando apenas a categoria residencial, o coeficiente de correlação era apenas 0,5625, considerada moderada, mas quando considerou outras categorias, entre essas: comercial; pública e industrial, além da residencial. Houve um incremento no índice de correlação de Pearson de 30%.

Em relação a vazão, na Tabela 34 é demonstrado os valores observados comparado com os valores simulados.

Tabela 34 – Vazão observada e simulada

| Data | Vazão obs. (L/s) | Vazão sim. (L/s) | Obs. – Sim. (L/s) |
|-------------------|------------------|------------------|--------------------|
| 23/05/2022 às 15h | 86,50 | 96,38 | 9,88 |
| 24/05/2022 às 15h | 86,00 | 96,38 | 10,88 |
| 25/05/2022 às 15h | 89,00 | 96,38 | 7,38 |
| 26/05/2022 às 15h | 90,20 | 96,38 | 6,18 |
| 27/05/2022 às 15h | 96,20 | 96,38 | 0,18 |
| 28/05/2022 às 15h | 89,90 | 96,38 | 6,48 |
| 29/05/2022 às 15h | 82,90 | 96,38 | 13,48 |
| Média | 88,67 | | |

Fonte: Autor (2022).

Comparando o valor da vazão simulada com média da observada, tem-se uma diferença de 7,71 L/s, corresponde a 8,69% a mais do que a vazão média observada. Considerando a orientação da WCR, conforme item 3.2.8, deve-se adotar um percentual de $\pm 10\%$ de erros. Desta forma, atende-se a recomendação para a variável da vazão.

A solução encontrada pelo *software WaterGEMS® Connect Edition* para o menor valor de ajuste dos dados observados e simulados utilizando as variáveis de pressão e vazão, a fim de calcular o coeficiente C de Hazen-Williams, aplicando algoritmo genético para otimizar o menor *fitness*, foi obtido o valor de 18,032, sendo considerado o valor ideal próximo de zero.

4.7 ANÁLISES DAS GRANDEZAS SIMULADAS E OBSERVADAS

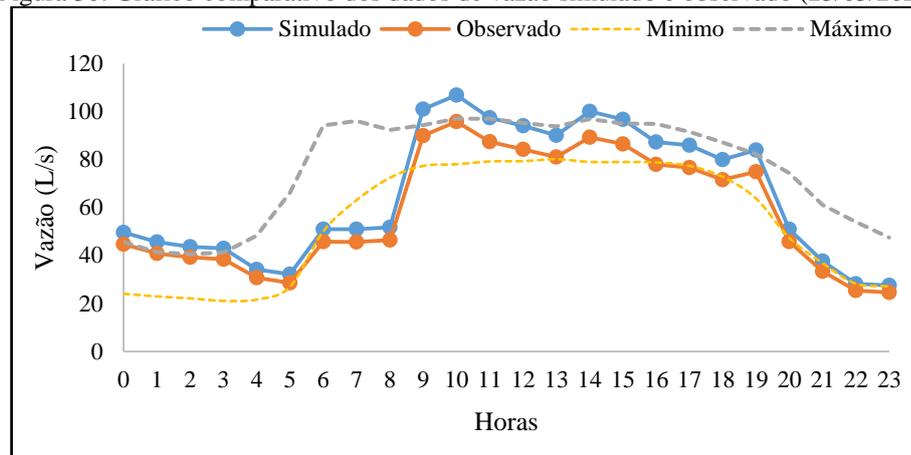
O coeficiente de rugosidade da fórmula Hazen-Williams teve seu valor obtido através na calibração pelo *software WaterGEMS® Connect Edition* e foi considerado igualmente em todos os trechos da rede, desde que possua o mesmo tipo de material da tubulação, o que não ocorre no sistema real, onde cada trecho possui uma rugosidade específica inerente.

Após a calibração do coeficiente de rugosidade, foram encontrados valores tanto de material ferro fundido como de PVC, respectivamente 73,1 e 100, valores esses compatíveis com o tempo de uso do material da rede de distribuição de água existente no DMC-39. A seguir é apresentada a análise dos dados de vazão e pressão simuladas comparando com os dados observados.

4.7.1 Medição de vazão

A comparação entre a vazão observada com a vazão simulada, demonstrou valores coesivos e integralmente toleráveis. A Figura 30 mostra o gráfico comparativo dos valores medidos e simulados para o dia 23 de maio de 2022.

Figura 30: Gráfico comparativo dos dados de vazão simulado e observado (23/05/2022)



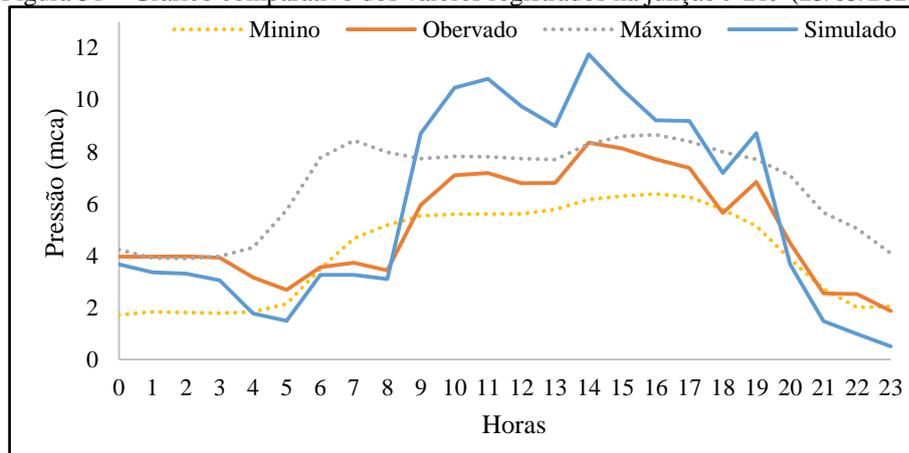
Fonte: Autor (2022).

Os valores das vazões determinadas pela modelagem hidráulica representaram bem as condições operacionais do sistema, haja vista que a área escolhida possui predominantemente residencial, a vazão resultante ficou definida e próxima dos limites mínimos e máximos. Ilustrando que a correção das demandas obtida pela aplicação do algoritmo genético, apesar que nos horários das 00 às 03h, das 07 às 10h, 14h e 19h, ficaram fora do intervalo dos valores mínimos e máximos, mesmo assim concedeu resultados satisfatório na retificação da vazão total da área em estudo.

4.7.2 Medição de pressão

O comportamento da pressão é inversamente proporcional à vazão, geralmente, quando a pressão é máxima a vazão é mínima, isso vice-versa. Entretanto, esse comportamento das variáveis hidráulicas de pressão e vazão não apresentaram essa lógica, justamente pelo motivo do sistema de abastecimento do DMC-39 durante o período da noite é despressurizado. Desta forma, a pressão diminui assim como também a vazão. As pressões foram medidas em cinco pontos distintos. Na Figura 31, apresenta o comportamento da simulação do registrador J-219, comparado aos valores reais, e com os limites inferiores e superiores. O comportamento da variação da linha de pressão ao longo do dia foi representado uma aproximação razoável, devido os horários das 08h às 17h os valores atingiram fora da faixa do limite definido. Estudando os valores simulados pode-se constatar que as variações têm o mesmo comportamento das pressões reais do sistema.

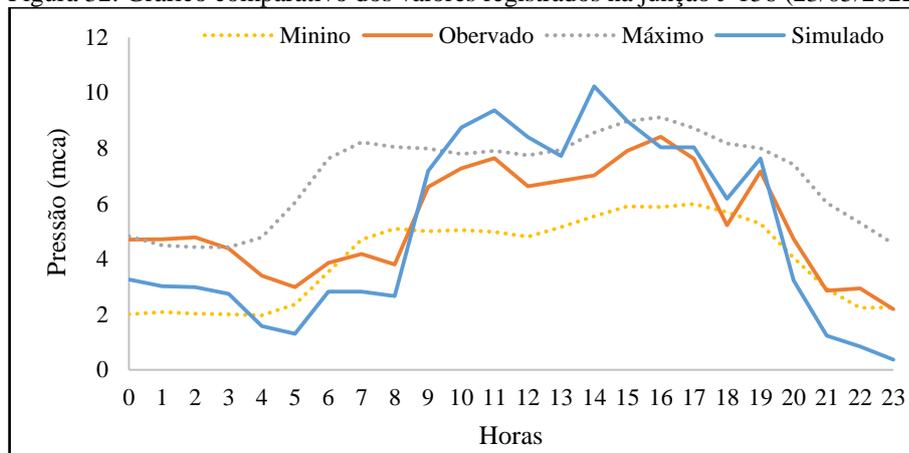
Figura 31 – Gráfico comparativo dos valores registrados na junção J-219 (23/05/2022)



Fonte: Autor (2022).

Na Figura 32, é apresentado o comportamento dos valores simulados do registrador J-156. Apesar dos valores, comparados com os observados, estejam fora dos limites definidos, o comportamento das variações das pressões, no período de 24h, equivalente ao observado.

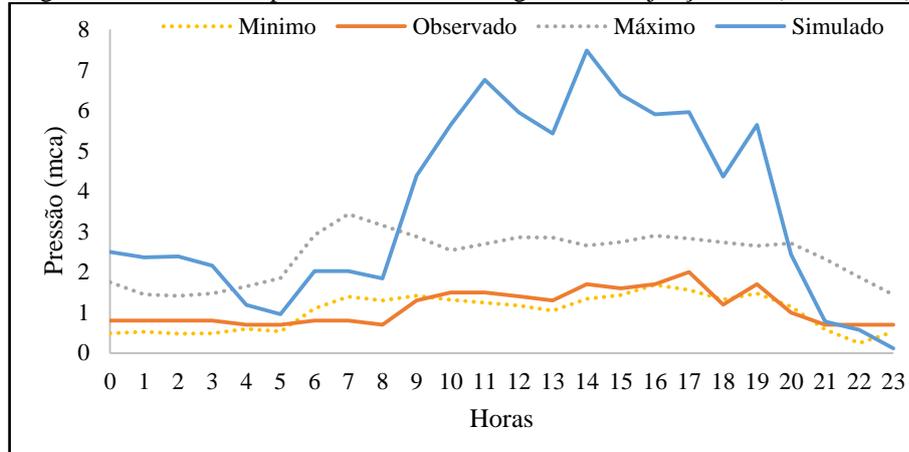
Figura 32: Gráfico comparativo dos valores registrados na junção J-156 (23/05/2022)



Fonte: Autor (2022).

Já em relação, a Figura 33, é apresentado o comportamento dos valores simulados do registrador J-88, entre as horas 08:30 às 19:30h, os valores encontrados foram discrepantes em relação aos valores limites definidos.

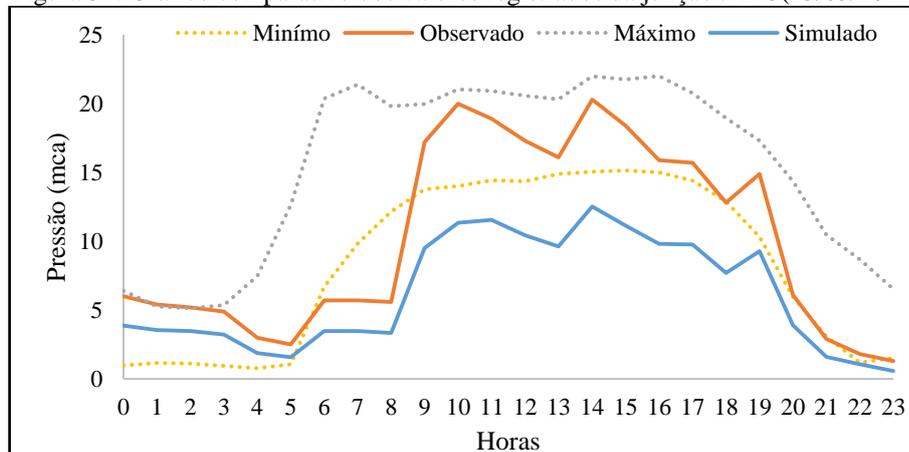
Figura 33: Gráfico comparativo dos valores registrados da junção J-88(23/05/2022)



Fonte: Autor (2022).

Por último, a Figura 34, é apresentado o comportamento dos valores simulados do registrador J-243, entre às 06 e 19h, os valores simulados foram abaixo do limite inferior dos valores observados, apesar disso o comportamento das variações das pressões, no período de 24h, equivalente ao observado.

Figura 34: Gráfico comparativo dos valores registrados da junção J-243(23/05/2022)



Fonte: Autor (2022).

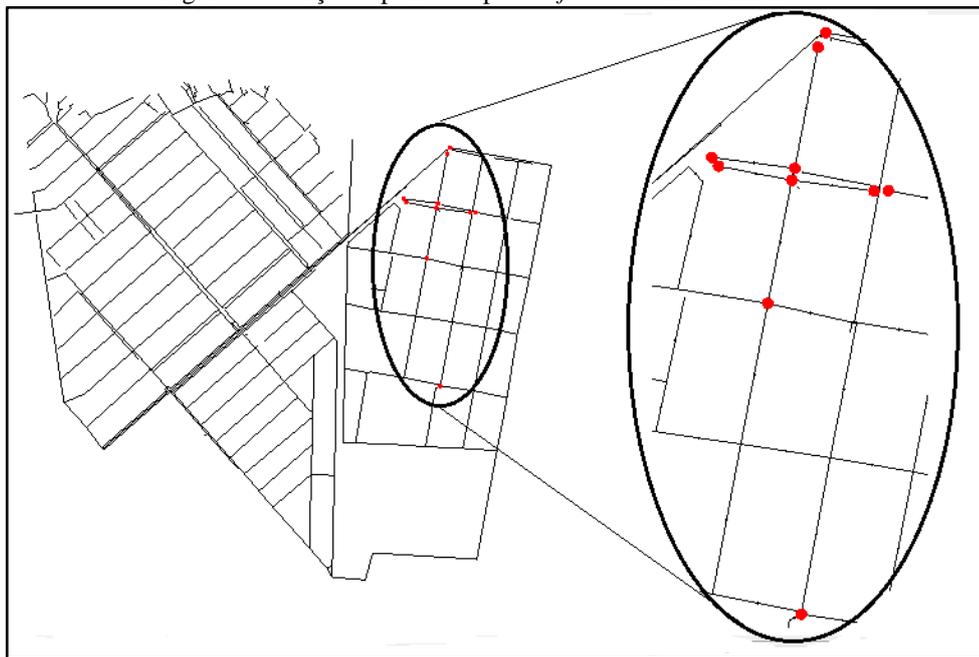
Em todos os gráficos comparativo da pressão, nota-se que apenas nos horários das 07 e 08h, o valor da pressão observada ficou fora dos limites definidos. E considerando as normas da ABNT NBR 12218/1994 e atualizada ABNT NBR 12218/2017 em relação a pressão estática como se observa nos gráficos das figuras 31, 32, 33 e 34 todas as pressões observadas estão abaixo de 40 mca, no entanto a pressão dinâmica mínima não foi atendida, nota-se que em todos

os pontos que registraram as pressões dinâmicas foram inferiores a 10 mca, principalmente, nos horários da madrugada quando o sistema se encontra despressurizado.

4.8 ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO ANORMAL DA RDA

Com a ferramenta *Darwin Leak Calibration e a SCADAConect*, considerando o modelo já calibrado, aplicou-se a ferramenta que elencou os pontos da rede com anormalidade, ou seja, locais com possíveis vazamentos na rede ou ligações clandestinas que impacta no consumo médio, mas antes foi preciso inserir os dados de pressão e vazão para simular no período da madrugada, precisamente das 00 às 04h, horário esse que ocorre a menor perda aparente, conforme consta no item 3.2.7. O dia escolhido para simular foi 24 de novembro de 2022. Na Figura 35 consta a rede de distribuição de água do DMC-39 e os pontos que apresentaram anormalidades na rede.

Figura 35: Junções apontadas pelo *software* com anormalidade



Fonte: Autor (2022).

As junções apontadas pelo *software* foram: J-06; J-60; J-71; J-87; J-88; J-89; J-90; J-91; J-92; J-93. Considerou-se 10 pontos para simulação no *software*, a recomendação da empresa Bentley, detentora da patente do programa é de no máximo 20 pontos.

Esses pontos foram informados a COMPESA, com a finalidade de fazer pesquisa em campo com geofone, aparelho que detecta ruído. A verificação foi realizada no dia 03 de fevereiro de 2023, depois de transcorridos 71 dias. Por isso, foi necessário analisar se neste

período houve registro de vazamentos nos locais detectado pelo *software*. Na Figura 36 mostra a rua Jamaica sublinhada em azul claro que foi realizado a pesquisa de vazamento com o aparelho geofone. Vale ressaltar que, não foram realizados em todos os trechos sugeridos pelo *software* dos possíveis vazamento na rede, a pesquisa com geofone foi realizada apenas na rua Jamaica, com isso os pontos em círculo vermelho das ruas Jean Emile Favre e Itacari, assim como também na rua Itacaré, não foram fiscalizados.

Figura 36 – Locais de pesquisa com geofone na rua Jamaica



Fonte: Imagem do Google Earth (2022).

O relatório completo apresentado pela COMPESA referente a pesquisa realizada nos pontos apontados pelo *software* está no Anexo B, mas na Tabela 35 é apresentado os pontos, extensão da rede a jusante/montante da junção e a extensão da rede fiscalizada.

Tabela 35 – Pontos elencados pelo *software* com possíveis vazamentos

| Junção | Diâmetro da rede (mm) | Material da rede | Extensão à mon. (m) | Extensão à jus. (m) | Extensão fiscalizada (m) |
|--------|-----------------------|------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| J-6 | 350 | FºFº | 328 | 242 | 0 |
| J-60 | 100 | PVC PBA | 75 | 0 | 75 |
| J-71 | 75 | PVC PBA | 247 | 88 | 79 |
| J-87 | 75 | PVC PBA | 122 | 89 | 0 |
| J-88 | 75 | PVC PBA | 123 | 0 | 123 |
| J-89 | 75 | PVC PBA | 12 | 0 | 12 |
| J-90 | 75 | PVC PBA | 121 | 0 | 0 |
| J-91 | 75 | PVC PBA | 81 | 0 | 81 |
| J-92 | 75 | PVC PBA | 72 | 0 | 72 |
| J-93 | 75 | PVC PBA | 81 | 0 | 81 |

Fonte: Autor (2022).

Por motivo de excesso de outros serviços, os técnicos da COMPESA não fiscalizaram a extensão necessária para detectar os trechos candidatos a possíveis vazamentos, apenas 523

m de 1.681 m, corresponde aproximadamente 31% da extensão total que o *software* indicou com possíveis vazamentos. Na Tabela 36, é apresentado os locais dos vazamentos detectados com a geofonagem.

Tabela 36 – Pontos com vazamentos comprovados e suspeito

| Localização | Coordenadas | | Status |
|---------------------------------------|---------------|--------------|------------|
| | Longitude UTM | Latitude UTM | |
| Av. Jean E. Favre | 289209 | 9103468 | Comprovado |
| Rua Cachoeira | 289008 | 9103468 | Comprovado |
| Cruzamento Rua Itacarai com Itamaracá | 289073 | 9103220 | Suspeito |

Fonte: Autor (2022).

Na Figura 37, é apresentado espacialmente os locais dos vazamentos detectados pela pesquisa realizada em campo. Entretanto foram apontadas 10 junções como candidatas a vazamentos, sendo necessários fiscalizar a extensão a montante e jusante das junções apresentadas, conforme mencionados anteriormente, menos da metade da extensão foram fiscalizadas.

Figura 37 – Pontos com vazamentos comprovados e suspeitos



Fonte: Imagem do Google Earth (2023).

De acordo com os registros de atendimento (RA) nº 63691310, referente ao vazamento da Av. Jean Emile Frave e nº 63693438 da rua Cachoeira, extraídos do sistema GSAN da

COMPESA, os quais foram registrados para programação da equipe de manutenção de rede e ramais a fim de executar os consertos dos vazamentos, entretanto apenas o primeiro foi realizado, o segundo não consta nos registros se foi executado o conserto. Em relação do cruzamento da rua Itacarai com Itamaracá não foi registrado no sistema da COMPESA.

Em diz respeito ao intervalo da simulação e da pesquisa em campo, foram registrados no sistema GSAN, vazamentos no período de 24 de novembro de 2022 a 03 de fevereiro de 2023, assim como também os registros dos consertos dos mesmos. Na Tabela 37 é apresentado a quantidade de vazamentos e datas que foram registrados no sistema da COMPESA.

Tabela 37 – Vazamentos ocorridos no DMC-39 entre o período 25/11/2022 até 03/02/2023

| Número do Registro de atendimento | Data do vazamento | Local do vazamento | Diâmetro (mm) | Material do tubo |
|--|--------------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------|
| 62788692 | 25/11/2022 | Rua Itajai | 50 | PVC PBA |
| 62906124 | 09/12/2022 | Rua Itamaracá | 20 | PVC PBA |
| 63098199 | 04/01/2023 | Rua Jamaica | 20 | PEAD |
| 63119918 | 06/01/2023 | Av. Jean Frave | 20 | PVC PBA |
| 63276140 | 24/01/2023 | Rua Itajai | 20 | PEAD |
| 63311096 | 27/01/2023 | Rua Itajai | 20 | PEAD |
| 63322929 | 30/01/2023 | Rua Itajai | 20 | PEAD |

Fonte: COMPESA (2023).

Nota-se que a maioria dos vazamentos encontrados foram nos ramais predial, apenas um foi na rede primária e como não foi realizado em todo o trecho da rede que apresentou pontos com possíveis vazamentos, logo pode ter vazamentos ocultos também na rede de distribuição de água que não foram fiscalizados com o aparelho geofone.

4.9 NOVA SIMULAÇÃO APÓS FISCALIZAÇÃO COM GEOFONE

Para analisar se houve redução nas quantidades de junções com anormalidade, no dia 13 de fevereiro de 2023 foi realizada nova simulação com a ferramenta *Darwin Leak Calibration* com a finalidade de verificar as possíveis alterações nos coeficientes emissores. Desta forma, poderá comparar os valores antes e depois. Ressaltando que a primeira simulação foi realizada no dia 24 de novembro de 2022. Na Tabela 38 é apresentado as faixas de valores dos coeficientes emissores, em relação as junções J-71, J-88 e J-90 apresentaram os mesmos valores anteriores, já sobre as demais nota-se uma diminuição dos valores para zero nas junções J-6, J-60, J-87, J-89, J-91 e J-92, sendo apenas na J-93 uma pequena redução de 0,500 para 0,450. Além de reduzir também a quantidade de junções com anormalidade de 10 na primeira simulação para 7 na segunda.

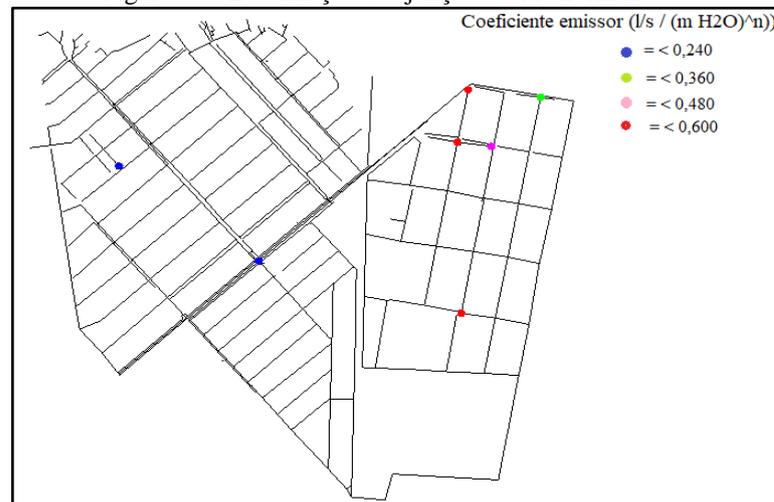
Tabela 38 – Junções elencadas pelo *software* com anormalidade em dias diferentes

| Junção | Coeficiente emissor ajustado (L/s/(mca) ⁿ) | |
|-------------|---|------------|
| | 24/11/2022 | 13/02/2023 |
| J-6 | 0,500 | 0,000 |
| J-60 | 0,500 | 0,000 |
| J-71 | 0,500 | 0,500 |
| J-87 | 0,500 | 0,000 |
| J-88 | 0,500 | 0,500 |
| J-89 | 0,500 | 0,000 |
| J-90 | 0,500 | 0,500 |
| J-91 | 0,500 | 0,000 |
| J-92 | 0,500 | 0,000 |
| J-93 | 0,500 | 0,450 |

Fonte: Autor (2023).

Na Figura 38 é apresentado os locais das junções na rede onde houve anormalidade na operação do sistema, sendo esses pontos com possíveis vazamentos que poderão ser pesquisados em campo com a equipe acústica, entretanto esses pontos não foram fiscalizados pela equipe da COMPESA.

Figura 38 - Localização das junções com anormalidade



Fonte: *software WaterGEMS® Connect Edition da Bentley* (2023).

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO

As perdas de água no DMC-39 foram consideradas elevadas, tanto pela aplicação do método do balanço hídrico, assim como também pelo método da vazão mínima noturna, o que significa que existe um grande potencial para melhorias expressivas, apesar do investimento realizado pela COMPESA em setorizar o distrito, com instalação da válvula redutora de pressão, além do macromedidor para medir a vazão na entrada do distrito de medição e controle, assim como a substituição de parte da rede mais antiga. E para facilitar a coleta dos dados de vazão e pressão do sistema, foram instalados transdutores com *dataloggers* para transmitir os dados remotamente de vazão e pressão para o Centro de Controle Operacional da COMPESA. Apesar das intervenções realizadas pela COMPESA, há suspeita que o distrito não esteja estanque, o que acarreta transferência de água para distritos vizinhos. Desta forma, comprometendo o estudo na análise das perdas de águas.

Considerando que as perdas reais superaram as perdas aparentes, significa que às ações devem ser direcionadas para redução, principalmente, no combate dos vazamentos. Entre outras ações que devem ser implementadas, a rapidez do conserto é fundamental na redução das perdas reais ou até mesmo evitar que ocorra, e a substituição de tubulações antigas, principalmente as que possuem alta frequência de rompimentos. Além de priorizar a qualidade do serviço na manutenção da rede, a fim de evitar retrabalho na execução do reparo do vazamento e também prezar pela qualidade do material aplicado no conserto ou até mesmo substituir, principalmente, o ramal por completo incluindo material mais resistente.

A ferramenta utilizada pelo modelo hidráulico no fornecimento de informações para elaboração de um diagnóstico de perdas de água de um sistema de distribuição mostrou-se adequada. A calibração da rede apresentou resultados satisfatórios, pois o software só permite a adoção de um único coeficiente de perdas de carga por material. Por isso, a detecção de vazamentos na rede foi prejudicada.

O resultado da pesquisa de campo na procura de vazamento dos pontos gerados pela ferramenta *Darwin Leak Calibration* foi comprometido, como a data da simulação foi no dia 24 de novembro de 2022 e a pesquisa da equipe acústica ocorreu após 71 dias, houve um atraso. Além do mais, a equipe de geofonagem não visitou todos os pontos com prováveis vazamentos, prejudicando mais ainda a pesquisa de detecção de vazamento via modelagem hidráulica.

Apesar da demora da pesquisa em campo da equipe acústica, mesmo assim vale ressaltar a importância da aplicação da ferramenta *Darwin Leak Calibration*, que possibilitou a redução da área de atuação da equipe técnica. Desta forma, economizando tempo e reduzindo custos na

procura de vazamentos, principalmente, os não visíveis (ocultos) que são os mais difíceis de serem detectados. Além do mais, vale ressaltar o aumento da disponibilidade de água advinda da detecção dos vazamentos, como também o aumento no faturamento das entidades gestora de saneamento.

Recomenda-se, que nos próximos estudos de localização e detecção de vazamentos utilizando modelagem hidráulica, que sejam realizadas as pesquisas de vazamentos logo após a simulação hidráulica, com o intuito de não comprometer a comparação dos pontos gerados dos possíveis vazamentos com os resultados das pesquisas advindas de campo. Além do mais, deverá realizar a pesquisa em toda a extensão da rede hidráulica apontada pela ferramenta do *software* e executar os consertos dos pontos com vazamentos, a fim de analisar melhor sobre o vazamento encontrado, se foi em ramal ou na rede principal. Desta forma, caracterizando o grau de interferência no impacto nas perdas de água devido aos vazamentos na rede.

REFERÊNCIAS

ALEGRE, H; COELHO, S.T; ALMEIDA, M.C; VIERA, P. **Controle de perdas de água em sistemas públicos de adução e distribuição**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa. 306 p, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. **NBR 12.218**. Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público – Procedimentos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. **NBR 12.218**. Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2017.

BENTLEY. Water Distribution Modeling and Management, 2022. Disponível em: <<https://ims.bentley.com>>. Acesso em: 15 jun. 2022.

BERADI, L.; GIUSTOLISI, O. **Calibration of Design Models for Leakage Management of water Distribution Networks**. Disponível em: <<https://springer.com/article/10.1007/s11269-02847-x>>. Acesso em: 06 abr. 2022.

BEZERRA e CHEUNG, S. T. M.; CHEUNG, P. B. **Perdas de água**. Tecnologias de Controle. João Pessoa, 2013.

BOUACH, A.; BENMAMAR, S. **Examining the effect of water demand variation on optimization**: the case for a genetic algorithm. International Journal of Energy and Water Resources, v. 5, n. 1, p. 95-99, 2021.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. **Lei de Saneamento Básico**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, v. 135, Seção 1. pt.1. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.026-de-15-de-julho-de-2020-267035421>>. Acesso em: 06/05/2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Plano Nacional do Saneamento Básico**, 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/plansab/RELATRIODEAVALIAOANUALDOPLANSAB20192.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. SNIS Sistema Nacional sobre Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2019**. Brasília, 2019.

CAMPOS, V. C. C.; ZUKOWSKI JUNIOR, J. C. Z. J.; OLIVEIRA, J. C. F. de O. Estimativa de pessoas beneficiadas com reduções de perdas de águas no mundo, Brasil e no estado do Tocantins. **Conjecturas**, [S. l.], v. 22, n. 17, p. 1011–1031, 2022. Disponível em: <https://www.conjecturas.org/index.php/edicoes/article/view/1880>. Acesso em: 30 out. 2023.

CARRIJO, Ivaltemir Barros (2004). **Extração de regras operacionais ótimas de sistema de distribuição e água através de utilização de algoritmos genéticos multiobjectivos e aprendizado de máquinas**. Orientadora: Luiza Fernandes Ribeiro Reis. 2004. 234 f. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-01032005-154332/publico/Tese_Tinil-2004.pdf. Acesso em: 13 de jun. 2022.

COELHO, S. T; ALEGRE, H; LOUREIRO, D. **Modelação e análise de sistemas de abastecimento de água**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 2006.

COELHO, A. C. **Micromedição em Sistemas de Abastecimento de Água**. 1. Ed. João Pessoa. 2009.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEMAENTO – COMPESA. Calendário de abastecimento de água. Disponível em; < <https://servicos.compesa.com.br/calendario-de-abastecimento-da-compesa/>>. Acesso em: 15 ago. 2022.

DESAI, S., e RAJAPARA, G. (2022). **Leakage Optimization of Water Distribution Network Using Artificial Intelligence**. In Advanced Modelling and Innovations in Water Resources Engineering (pp. 265-284). Springer, Singapore.

FAN, X., ZHANG, X. e YU, X. B. Machine learning model and strategy for fast and accurate detection of leaks in water supply network. *Jornal Infrastruct Presev Resil* 2, 10 (2021). Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s43065-021-00021-6>. Acesso em: 15 ago. 2022.

FARLEY, M. *et al.* The Manager's Non-Revenue Water Handbook: A Guide to Understanding Water Losses. **Estados Unidos da América: Agência dos Estados Unidos para o Desenvolvimento Internacional (USAID)**, p. 1-110, 2008.

GOMES, H. P.(Coord.). **Sistema de Saneamento, Eficiência Energética**. 1. ed. João Pessoa. 2007.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Atlas de Saneamento**. Abastecimento de água e esgotamento sanitário. 3ª Ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/atlas_saneamento/#/home>. Acesso em: 06 abr. 2022.

JORNADA, D. H. da. **Implantação de um Guia Orientação de Incerteza de Medição para Avaliadores de Laboratório da Rede de Metrológica RS**. 2009. 155 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

KOWALSKA, B., SUCHORAB, P. e KOWALSKI, D. **Division of district metered areas (DMAs) in a part of water supply network using WaterGEMS (Bentley) software: a case study**. Appl Water Sci 12, 166 (2022). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s1301-022-01688-2>. Acesso em: 14 ago. 2022.

KOWALSKI, D., KOWALSKA, B. e SUCHORAB, P. **Smart water supply system: a quasi intelligent diagnostic method for a distribution network**. Appl Water Sci 12, 135 (2022). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01656-w>. Acesso em: 14 ago. 2022.

MASKIT, Matan; OSTFELD, Avi. **Multi-Objective Operation-Leakage Optimization and Calibration of Water Distribution Systems**. Water, v. 13, n. 11, p. 1606, 2021.

MOTTA, Barbará Lorryne da Silva. **Análise das pressões em sistema de distribuição de água visando o controle de perdas: estudo de caso em uma região de Maringá – Pr**. Orientador: Ed Pinheiro Lima, 2018.115 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Maringá. Engenharia Urbana do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Urbana. Maringá, 2018. Disponível em: http://www.peu.uem.br/Barbara_Motta.pdf. Acesso em: 02 jul. 2022.

MELATO, Débora Soares. **Discussão de uma metodologia para o diagnóstico e ações para redução de perdas de água: aplicação para o sistema de abastecimento de água da região de São Paulo**. Orientador: Kamel Zahed Filho, 2010.133 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 2010. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-17082010-092608/publico/Dissertacao_Debora_S_Melato.pdf. Acesso em: 12 ago. 2022.

MENEZES, Ronaldo Amâncio. **Diagnóstico operacional de sistema de abastecimento de água: o caso de Campina Grande**. Orientador: Carlos Oliveira Galvão, 2011. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande. Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária.

MOHAMMED, Eliyas Girma; ZELEKE, Ethiopia Bisrat; ABEBE, Surafel Lemma. **Water leakage detection and localization using hydraulic modeling and classification**. Journal of Hydroinformatics, v. 23, n. 4, p. 782-794, 2021. Disponível em: <https://iwaponline.com/jh/article/23/4/782/82177/Water-leakage-detection-and-localization-using>. Acesso em: 06 abr. 2022.

PALO, Paulo Rogério. **Avaliação da eficácia de modelo de simulação hidráulica na obtenção de informações para diagnóstico de perdas de água.** Orientador: Kamel Zahed Filho, 2010. 169 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 2010. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-27092010-104217/publico/Dissertacao_PRP.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2022.

POOJITHA, Seelam Naga; JOTHIPRAKASH, Vinayakam. **Bio-Inspired Genetic Algorithm for Optimal Design of Water Distribution Networks.** In: Hydrological Modeling. Springer, Cham, 2022. p. 9-20.

SALGUERO, F. J., COBACHO, R. e PARDO, M. A. **Unreported leaks location using pressure and flow sensitivity in water distribution networks.** Water Supply 1, 19 (2019). <https://doi.org/10.2166/ws.2018.048>. Acesso em: 15 ago. 2022.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Disponível em: <<http://snis.gov.br>>. Acesso em: 10 jun. 2022.

SOARES, Alexandre kepler. **Calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos de demandas dirigidas pela pressão.** Orientadora: Luiza Fernandes Ribeiro Reis, 2003.153 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos 2003. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-13102004-150130/publico/Dissertacao_AKS.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2022.

SOLARCZYK, Alicja. **Using the Darwin Calibrator for Leak Detection Analysis in Northumbrian Water.** 2013. Disponível em: <https://docplayer.net/14050918-Using-the-darwin-calibrator-for-leak-detection-analysis-in-northumbrian-water.html>. Acesso em: 13 ago. 2022.

ROJEK, I. STUDZINSKI J. **Detection and Localization of Water Leaks in Water Nets Supported by an ICT System with Artificial Intelligence Methods as a Way Forward for Smart Cities.** Sustentabilidade. 2019; 11(2):518. <https://doi.org/10.3390/su11020518>. Acesso em: 16 ago. 2022

RUIZ, I. S. *et al.* **Pressure Sensor Placement for Leak Localization in Water Distribution Networks Using Information Theory.** Sensores, v. 22, n. 2, p. 443, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s22020443>. Acesso em: 15 ago. 2022.

TARDELLI, J. F. 2006. **Controle e Redução de Perdas.** In: Abastecimento de Água. TSUTIYA, M.T. (org.). 3ª ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

THORNTON, J.; STURM, R; KUNKEL, G. 2008. Water Loss Control Manual. 2ª ed., New York: Mcgraw Hill Professional, 632p.

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

APÊNDICE A – ANÁLISE DAS INCERTEZAS DOS DADOS UTILIZADOS

Todos os dados coletados por equipamentos de medição, geram incertezas na precisão dos dados. Desta forma, é necessário avaliar a eficácia na utilização das informações coletadas a fim obter um grau de confiança dos valores medidos.

Neste contexto, os aparelhos de medição de vazão, assim como equipamento de aferição de pressão contêm margens de erros que os próprios fabricantes informam no manual de utilização. Em relação aos equipamentos de medição de vazão, é fornecido uma curva de erro para cada vazão considerada, que permiti associar a cada observação da vazão. Como a Companhia de Saneamento não forneceu, foi utilizado o erro teórico à vazão máxima, ou seja, na determinação da incerteza total.

A.1 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIDA

De acordo com Jornada (2009), a incerteza assegura a comparação das medições, sendo vantajoso na tomada de decisões, principalmente, quando é necessário impor um limite flexível entre o máximo e o mínimo para o mensurando, podendo ser especificado por uma legislação ou de outra maneira determinada. Desta forma, a incerteza propicia essencialmente a compreensão adequada de modo consequente da medição.

Neste contexto, deve-se diferenciar o significado de erro de medição de um equipamento em relação a incerteza, este caracteriza sobre uma faixa de dispersão ou período, e não um valor exato, em relação ao primeiro trata-se de um valor pontual.

Para este estudo foi utilizado o tipo de incerteza que emprega uma análise estatística de uma série de observações repetidas de um aparelho de medição, podendo expressar pelo desvio padrão experimental da média aritmética.

A.2 MEDIDAS DE POSIÇÃO E DISPERÇAO (MÉDIA E DESVIO PADRÃO)

A média aritmética ou média \bar{x} de n observações de uma grandeza que varia aleatoriamente e considerando independentes x_i e obtidas sob as mesmas condições de medição, é expressa pela Equação (21).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \dots Eq. (21)$$

em que \bar{x} é a média aritmética das medições, n é o número de medições e x_i é uma medição individual.

A estatística utiliza-se a variância e desvio padrão como medidas de dispersão para calcular o quanto os dados de um conjunto de valores podem variar. Desta forma, esses parâmetros permitem conhecer a dispersão dos dados, sendo o primeiro parâmetro definido pela seguinte Equação (22).

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad \dots Eq. (22)$$

Onde σ^2 é a variância, n é o número de medições, x_i é uma medição individual e \bar{x} é a média aritmética do conjunto. Como o desvio padrão (DP) é expresso pela raiz quadrada da variância, basta extrair a raiz quadrada da formula da variância, demonstrada a seguir pela Equação (23).

$$DP = \sqrt{\sigma^2} \quad \dots Eq. (23)$$

O desvio padrão apresenta a mesma unidade da amostra ou população dos dados do conjunto, significa que é muito adequado para análise e comparação dos dados. Além do mais, o valor verdadeiro de uma grandeza é incógnito, as distinções existentes entre os diversos dados coletados, se referem as variações processadas nas diversas observações realizadas.

**ANEXO A – VAZÃO DAS JUNÇÕES ÀS 15:00h DO DIA 23 DE MAIO DE 2022 DO
DMC-39**

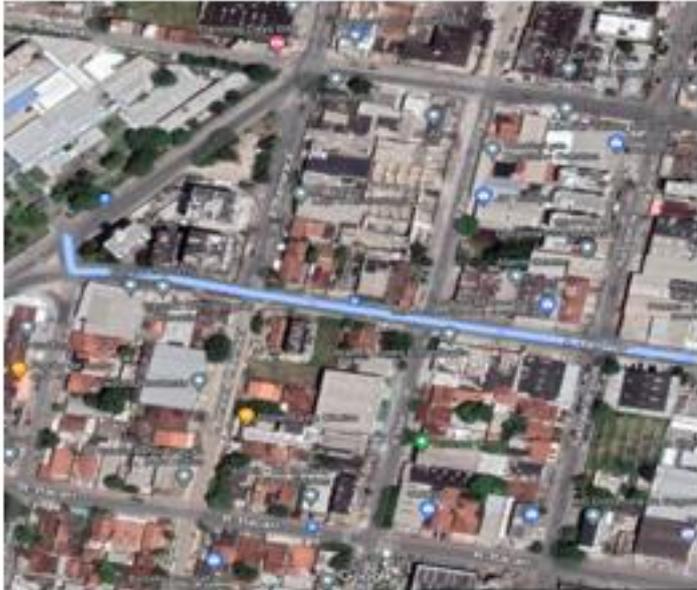
| Junção | Categoria | Vazão (L/s) | Junção | Categoria | Vazão (L/s) |
|---------------|------------------|--------------------|---------------|------------------|--------------------|
| J-3 | Comercial | 0 | J-169 | Residencial | 0 |
| J-4 | Residencial | 0 | J-170 | Residencial | 0,1844 |
| J-5 | Comercial | 0,5787 | J-171 | Residencial | 0,0059 |
| J-6 | Residencial | 0 | J-172 | Residencial | 0,0529 |
| J-7 | Residencial | 0,0987 | J-173 | Residencial | 0,0706 |
| J-8 | Residencial | 0,114 | J-174 | Residencial | 0,06 |
| J-9 | Residencial | 0,205 | J-175 | Residencial | 0,0482 |
| J-10 | Publico | 0,246 | J-176 | Residencial | 0,1251 |
| J-11 | Residencial | 0 | J-177 | Residencial | 0,4405 |
| J-13 | Comercial | 0,1987 | J-178 | Residencial | 0,2501 |
| J-14 | Residencial | 0 | J-179 | Residencial | 0,4291 |
| J-15 | Residencial | 0,0143 | J-180 | Residencial | 0,2663 |
| J-16 | Residencial | 0,8839 | J-181 | Residencial | 0,0436 |
| J-17 | Residencial | 0,4578 | J-182 | Residencial | 0,0318 |
| J-18 | Residencial | 0,0049 | J-183 | Residencial | 0,0686 |
| J-19 | Residencial | 0,0348 | J-184 | Residencial | 0,0247 |
| J-20 | Comercial | 0,6209 | J-185 | Residencial | 0,0222 |
| J-21 | Residencial | 0,9862 | J-186 | Residencial | 0 |
| J-22 | Residencial | 0,5899 | J-187 | Residencial | 0,1977 |
| J-24 | Residencial | 0,2205 | J-188 | Residencial | 0,0295 |
| J-25 | Residencial | 0,1742 | J-189 | Comercial | 0,0086 |
| J-26 | Residencial | 0,4986 | J-190 | Residencial | 0,0743 |
| J-27 | Residencial | 0,2978 | J-191 | Residencial | 0,1771 |
| J-28 | Comercial | 0,0233 | J-192 | Residencial | 0,025 |
| J-29 | Residencial | 0 | J-193 | Residencial | 0,0225 |
| J-30 | Industrial | 0,1082 | J-194 | Residencial | 0,2091 |
| J-31 | Residencial | 0 | J-195 | Residencial | 0,1839 |
| J-32 | Residencial | 0,2669 | J-196 | Residencial | 0 |
| J-33 | Residencial | 0,9935 | J-197 | Residencial | 0,6255 |
| J-34 | Residencial | 0,5574 | J-198 | Residencial | 0,5588 |
| J-35 | Residencial | 0 | J-199 | Residencial | 0,0263 |
| J-36 | Residencial | 0,7673 | J-200 | Residencial | 0,0803 |
| J-38 | Residencial | 0,3464 | J-201 | Comercial | 0,3639 |
| J-39 | Residencial | 0,1432 | J-202 | Residencial | 0,272 |
| J-40 | Comercial | 0 | J-203 | Residencial | 0,1746 |
| J-41 | Residencial | 0,6558 | J-204 | Residencial | 0,1006 |
| J-42 | Residencial | 0,3254 | J-205 | Residencial | 0,0961 |
| J-43 | Residencial | 0,4573 | J-206 | Residencial | 0,3109 |
| J-44 | Residencial | 0,4275 | J-207 | Residencial | 0,1484 |
| J-45 | Residencial | 0,5463 | J-208 | Residencial | 0,0917 |
| J-46 | Residencial | 0,0222 | J-209 | Comercial | 0,0323 |
| J-47 | Residencial | 0 | J-210 | Residencial | 0,0475 |

| | | | | | |
|-------------|-------------|--------|--------------|-------------|--------|
| J-49 | Residencial | 0,108 | J-211 | Residencial | 0 |
| J-50 | Residencial | 0,0461 | J-212 | Publico | 0,1205 |
| J-51 | Residencial | 0,3024 | J-213 | Residencial | 0,042 |
| J-52 | Residencial | 0,2009 | J-214 | Residencial | 0,0154 |
| J-53 | Residencial | 0,0851 | J-215 | Comercial | 0,0028 |
| J-54 | Residencial | 0,2354 | J-216 | Residencial | 0,0724 |
| J-55 | Comercial | 0 | J-217 | Residencial | 0,0239 |
| J-57 | Residencial | 0,2712 | J-218 | Residencial | 0,2888 |
| J-58 | Residencial | 0,0117 | J-219 | Residencial | 0,3124 |
| J-59 | Residencial | 0,6528 | J-220 | Comercial | 0 |
| J-60 | Residencial | 0,0388 | J-221 | Residencial | 0 |
| J-61 | Residencial | 0,6065 | J-222 | Residencial | 0 |
| J-62 | Comercial | 0 | J-223 | Residencial | 1,3548 |
| J-63 | Residencial | 0 | J-224 | Residencial | 1,5926 |
| J-64 | Residencial | 0,0478 | J-225 | Residencial | 0,1038 |
| J-65 | Industrial | 0,2231 | J-226 | Comercial | 0,1132 |
| J-66 | Residencial | 0,0192 | J-227 | Residencial | 0 |
| J-67 | Residencial | 0 | J-228 | Residencial | 0,3184 |
| J-68 | Residencial | 0,5267 | J-229 | Residencial | 0,2458 |
| J-69 | Residencial | 1,3434 | J-230 | Residencial | 0 |
| J-70 | Publico | 0,6197 | J-231 | Comercial | 0 |
| J-71 | Residencial | 0,0162 | J-232 | Residencial | 0 |
| J-72 | Residencial | 0,504 | J-233 | Residencial | 0 |
| J-73 | Residencial | 0,9411 | J-234 | Residencial | 0,0995 |
| J-74 | Residencial | 0,4551 | J-235 | Residencial | 0,0878 |
| J-75 | Residencial | 0,7077 | J-236 | Residencial | 0,3037 |
| J-76 | Residencial | 0,6805 | J-237 | Residencial | 0,0475 |
| J-77 | Residencial | 0,2679 | J-238 | Residencial | 0,0714 |
| J-78 | Residencial | 0,3284 | J-239 | Residencial | 0 |
| J-79 | Residencial | 0,6396 | J-240 | Residencial | 0,2658 |
| J-80 | Comercial | 0,3577 | J-241 | Residencial | 0,2767 |
| J-81 | Residencial | 0,8753 | J-242 | Residencial | 0 |
| J-82 | Comercial | 0,4795 | J-243 | Residencial | 0 |
| J-83 | Residencial | 0 | J-244 | Residencial | 0,0192 |
| J-84 | Residencial | 0,2603 | J-245 | Residencial | 0,473 |
| J-85 | Comercial | 0,324 | J-246 | Residencial | 0,441 |
| J-86 | Residencial | 0,6249 | J-247 | Residencial | 0,1624 |
| J-87 | Residencial | 0,77 | J-248 | Residencial | 0 |
| J-88 | Comercial | 0,3427 | J-249 | Comercial | 0,5924 |
| J-89 | Comercial | 0,882 | J-250 | Residencial | 0,732 |
| J-90 | Industrial | 0,1305 | J-251 | Residencial | 0,7068 |
| J-91 | Residencial | 0,3452 | J-252 | Residencial | 0,4795 |
| J-92 | Residencial | 0,0407 | J-253 | Residencial | 0,5496 |
| J-93 | Comercial | 0,0608 | J-254 | Residencial | 0,591 |
| J-94 | Residencial | 0,4402 | J-255 | Residencial | 0 |

| | | | | | |
|--------------|-------------|--------|--------------|-------------|--------|
| J-95 | Residencial | 0,2661 | J-256 | Residencial | 0 |
| J-96 | Residencial | 0,1305 | J-258 | Residencial | 0,0044 |
| J-97 | Residencial | 0,0751 | J-259 | Residencial | 0,2615 |
| J-98 | Residencial | 0,5226 | J-260 | Comercial | 0,0683 |
| J-99 | Residencial | 0,0817 | J-261 | Residencial | 0,3318 |
| J-100 | Residencial | 0,2661 | J-262 | Residencial | 0,272 |
| J-101 | Comercial | 0,4197 | J-263 | Residencial | 0,6933 |
| J-102 | Residencial | 0,3689 | J-264 | Residencial | 0,6719 |
| J-103 | Residencial | 0,0897 | J-265 | Residencial | 1,0393 |
| J-104 | Residencial | 0 | J-266 | Comercial | 1,9348 |
| J-105 | Residencial | 0,3996 | J-267 | Residencial | 0,1974 |
| J-106 | Residencial | 0,0355 | J-268 | Residencial | 0,3201 |
| J-107 | Residencial | 0 | J-269 | Residencial | 0 |
| J-108 | Residencial | 0,0032 | J-270 | Residencial | 0,4685 |
| J-109 | Residencial | 0,2525 | J-271 | Residencial | 0 |
| J-110 | Residencial | 0,294 | J-272 | Residencial | 0,4948 |
| J-111 | Comercial | 0,4469 | J-273 | Residencial | 0,4636 |
| J-112 | Residencial | 0,4961 | J-274 | Residencial | 0,8254 |
| J-113 | Comercial | 0,9329 | J-275 | Residencial | 0,8527 |
| J-114 | Residencial | 0,8218 | J-276 | Residencial | 0,7413 |
| J-115 | Residencial | 0,8961 | J-277 | Comercial | 1,1851 |
| J-116 | Residencial | 0,8242 | J-278 | Comercial | 0,7747 |
| J-117 | Residencial | 0,9162 | J-279 | Residencial | 0,1196 |
| J-118 | Residencial | 1,2032 | J-280 | Residencial | 0,5392 |
| J-119 | Comercial | 0,9082 | J-281 | Residencial | 0,1438 |
| J-120 | Residencial | 1,1212 | J-282 | Residencial | 0,8867 |
| J-121 | Comercial | 0,6684 | J-283 | Residencial | 0,5338 |
| J-122 | Residencial | 0,9436 | J-284 | Residencial | 0,3429 |
| J-123 | Residencial | 0,6957 | J-285 | Residencial | 0,0562 |
| J-124 | Publico | 0 | J-286 | Residencial | 0,5207 |
| J-125 | Residencial | 2,4503 | J-287 | Residencial | 0,3553 |
| J-126 | Residencial | 1,906 | J-288 | Residencial | 0,294 |
| J-127 | Residencial | 0,6786 | J-289 | Residencial | 0,272 |
| J-128 | Residencial | 0,039 | J-290 | Residencial | 0,1434 |
| J-129 | Residencial | 0,0345 | J-291 | Residencial | 0,0445 |
| J-130 | Residencial | 0,147 | J-292 | Residencial | 0,121 |
| J-131 | Comercial | 0,1125 | J-294 | Residencial | 1,1438 |
| J-132 | Residencial | 0,4787 | J-295 | Residencial | 0,1695 |
| J-133 | Residencial | 0,2737 | J-296 | Residencial | 0 |
| J-134 | Residencial | 0,2188 | J-297 | Residencial | 0,159 |
| J-135 | Residencial | 0,9149 | J-298 | Residencial | 0,1563 |
| J-136 | Residencial | 0,3808 | J-299 | Residencial | 0,192 |
| J-137 | Residencial | 0,8753 | J-300 | Residencial | 0,1554 |
| J-138 | Residencial | 0,4172 | J-301 | Comercial | 0,062 |
| J-139 | Residencial | 0,1657 | J-302 | Residencial | 0,3223 |

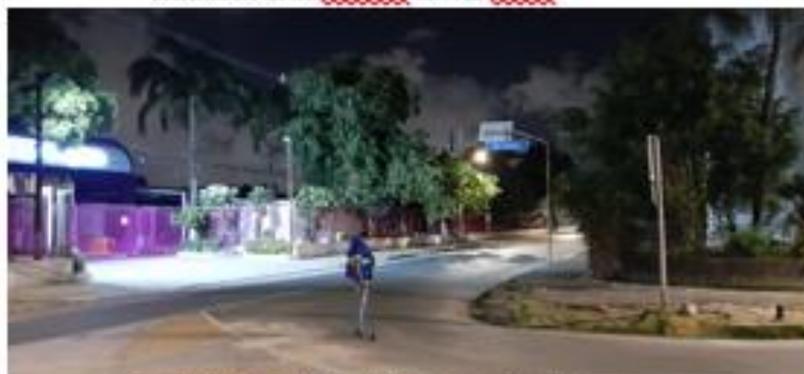
| | | | | | |
|--------------|-------------|--------|--------------|-------------|--------|
| J-140 | Residencial | 0,1841 | J-303 | Residencial | 0,0227 |
| J-141 | Residencial | 0,2222 | J-304 | Residencial | 0,0887 |
| J-142 | Residencial | 0,3895 | J-305 | Residencial | 0 |
| J-143 | Comercial | 0,4429 | J-306 | Residencial | 0,5001 |
| J-144 | Residencial | 0,1391 | J-307 | Residencial | 0,5207 |
| J-145 | Residencial | 0,0453 | J-308 | Residencial | 0,5216 |
| J-146 | Residencial | 0,1671 | J-309 | Residencial | 0,067 |
| J-147 | Residencial | 0,1185 | J-310 | Residencial | 0,0412 |
| J-148 | Residencial | 0,4416 | J-311 | Comercial | 0,4985 |
| J-149 | Residencial | 0,358 | J-312 | Comercial | 0,5884 |
| J-150 | Residencial | 0,4112 | J-313 | Residencial | 0,0767 |
| J-151 | Residencial | 0,7149 | J-314 | Residencial | 0,1419 |
| J-152 | Residencial | 0,2511 | J-315 | Residencial | 0,1514 |
| J-153 | Residencial | 0,1188 | J-316 | Residencial | 0,0431 |
| J-154 | Residencial | 0,1247 | J-317 | Residencial | 0,0029 |
| J-155 | Residencial | 0,2707 | J-318 | Residencial | 0,0236 |
| J-156 | Residencial | 0,4611 | J-319 | Residencial | 0,0323 |
| J-157 | Residencial | 0,2937 | J-320 | Residencial | 0,0843 |
| J-158 | Residencial | 0,1394 | J-321 | Residencial | 0,1134 |
| J-160 | Residencial | 0,0144 | J-322 | Residencial | 0,0464 |
| J-161 | Residencial | 0,1291 | J-323 | Residencial | 0,2911 |
| J-162 | Residencial | 0,0562 | J-324 | Residencial | 0,2298 |
| J-163 | Residencial | 0,0429 | J-326 | Residencial | 0,0667 |
| J-164 | Residencial | 0,026 | J-327 | Residencial | 0,6106 |
| J-165 | Comercial | 0,0228 | J-328 | Residencial | 0,316 |
| J-166 | Comercial | 0,0688 | J-329 | Residencial | 0,1624 |
| J-167 | Residencial | 0,0417 | J-332 | Residencial | 0,0212 |
| J-168 | Comercial | 0 | J-333 | Residencial | 0,083 |

ANEXO B – RELATÓRIO REALIZADO PELA COMPESA SOBRE OS LOCAIS APONTADOS PELO SOFTWARE COM POSSÍVEIS VAZAMENTOS NO DMC-39

| | | |
|--|-------------------------------------|------------------------------------|
|  | COORDENAÇÃO DE MACROMEDIDAÇÃO - CMA | Página: 1/3 |
| | RELATÓRIO - GEOPONAGEM | |
| SOLICITANTE: RAFAEL SILVA | | Data: 03/02/2023 |
| UNIDADE: GNM CENTRO | | |
| MOTIVO: PESQUISA DE VAZAMENTO OCULTO | | |
| TÉCNICO(S) RESPONSÁVEL(S) PELO SERVIÇO: FLÁVIO FRANCISCO / ANDRÉ BOUTHER | | |
| RESPONSÁVEL PELO ACOMPANHAMENTO DA UNIDADE: JÚNIOR | | |
| LOCAL DA PESQUISA: RUA JAMAICA, 288 – RUA ITAMARACA – RUA ITAJAI – RUA ITACARAI – RUA JEAN EMILE FAVRE - IMBIRIBEIRA | | |
| DIÂMETRO DA REDE: 50mm / 75mm / 85mm | | MATERIAL: PVC |
| EQUIPAMENTO UTILIZADO: GEOPONE | | |
| DISTÂNCIA PESQUISADA: 523 m | | QUANTIDADE DE PONTOS SUSPEITOS: 08 |
| REFERÊNCIAS: NO ENTORNO DA RUA JAMAICA - IMBIRIBEIRA | | |
| LOCALIZAÇÃO | | |
|  | | |
| <p>Figura 01: Mapa</p> | | |



Cruzamento da rua ~~Lattapaca~~ com rua ~~Bacaba~~



Cruzamento da rua Jean Emile ~~Fesse~~ com rua Jamaica



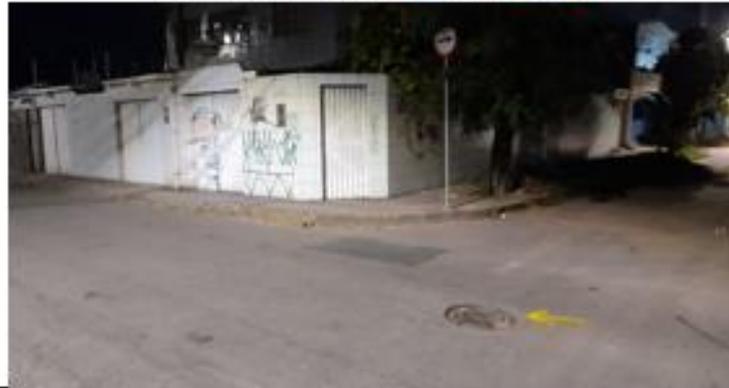
Cruzamento da rua Jamaica com rua ~~Sol~~



Cruzamento da rua Jamaica com rua ~~Sol~~

| | | |
|---|---|-------------|
|  | COORDENAÇÃO DE MACRO MEDICÃO - CMA | Página: 2/3 |
| | RELATÓRIO - GEOFONAGEM | |

DESENVOLVIMENTO DA ATIVIDADE

Cruzamento da rua Jean Emile ~~Góes~~ com rua ~~Cachoeira~~Rua Cachoeira - ~~Geofonagem~~Rua Jean Emile ~~Góes~~ - Em frente ao número 143 B

| | | |
|---|---|---|
|  | <ul style="list-style-type: none"> COORDENAÇÃO DE MACROMEDIÇÃO - CMA | <ul style="list-style-type: none"> Página: 3/3 |
| | <ul style="list-style-type: none"> RELATORIO - GEOFONAGEM | |

CONSIDERAÇÕES / OBSERVAÇÕES

RA – 63098199 / RM - 66795

Geofonagem no cruzamento da Rua Jean Emile Favre com a Rua Itamaraca - Foi realizada a pesquisa de vazamento oculto neste trecho do cruzamento até as proximidades da Faculdade Boa Viagem e não foi detectado, através do geofone, nenhum indício de vazamento oculto.

Geofonagem no cruzamento da Rua Itacari com a Rua Itamaraca - Neste cruzamento fizemos a escuta com geofone em todo entorno do trecho sem que fosse detectado vazamento. Porém escutamos tanto sem o uso do geofone como com a utilização do mesmo, uma queda d'água acentuada na caixa cuja tampa não conseguimos retirar para averiguar devido a mesma ter uma espécie de trava que dificulta a sua abertura e também por causa do tráfego intenso de carros. Esta tampa que está identificada com a seta amarela precisa ser aberta para que se possa chegar a um diagnóstico mais preciso do sentido do fluxo.

Geofonagem no cruzamento da Rua Jean Emile Favre com a Rua Jamaica - A pesquisa de vazamento oculto neste trecho do cruzamento não foi detectado, através do geofone, nenhum indício de vazamento.

Geofonagem no cruzamento da Rua Jamaica com a Rua Itajaí - Foi realizada a pesquisa de vazamento oculto neste trecho do cruzamento e não foi detectado, através do geofone, nenhum indício de vazamento oculto.

Geofonagem na Rua Jean Emile Favre * - A pesquisa de vazamento oculto detectou, através do geofone, um vazamento minando do asfalto em frente ao imóvel de número 143 B.

Geofonagem na Rua Cachoeira * - A pesquisa de vazamento oculto detectou, através do geofone, um vazamento minando do asfalto entre a concessionária de veículos Multimarcas e o Restaurante Sabor Caseiro, rua esta transversal à rua Jamaica na Imbiribeira.

***Geofonagem na Rua Jamaica, número 233 *** - Foi realizada a pesquisa de vazamento oculto em trechos por onde passam a rede de abastecimento e em frente ao Edf. Monte Parnaso e não foi detectado, através do geofone, nenhum indício de vazamento oculto.

