

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC**

**FELIPE VIEIRA DE LUCA**

**ENSAIOS E MODELAGEM APLICADOS À PREVISIBILIDADE DO  
DESEMPENHO DE HIDRÔMETROS**

**JOINVILLE/SC**

**2022**

**FELIPE VIEIRA DE LUCA**

**ENSAIOS E MODELAGEM APLICADOS À PREVISIBILIDADE DO  
DESEMPENHO DE HIDRÔMETROS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.  
Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Andreza Kalbusch  
Coorientadora: Dr<sup>a</sup>. Elisa Henning

**JOINVILLE/SC**

**2022**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

de Luca, Felipe

Ensaíos e modelagem aplicados à previsibilidade do  
desempenho de hidrômetros / Felipe de Luca. -- 2022.  
120 p.

Orientadora: Andreza Kalbusch

Coorientadora: Elisa Henning

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de  
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2022.

1. Desempenho de hidrômetros. 2. Modelagem estatística.  
3. Gestão do parque de hidrômetros. 4. Controle de perdas  
aparentes. 5. Sistemas de abastecimento de água. I.  
Kalbusch, Andreza. II. Henning, Elisa. III. Universidade do  
Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

**FELIPE VIEIRA DE LUCA**

**ENSAIOS E MODELAGEM APLICADOS À PREVISIBILIDADE DO  
DESEMPENHO DE HIDRÔMETROS**

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil do  
Centro de Ciências Tecnológicas da  
Universidade do Estado de Santa Catarina,  
como requisito parcial para a obtenção do  
grau de Mestre em Engenharia Civil.  
Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Andreza Kalbusch  
Coorientadora: Dr<sup>a</sup>. Elisa Henning

**BANCA EXAMINADORA:**

Profa. Dra. Andreza Kalbusch  
CCT/UDESC (Presidente / Orientadora)

Membros:

Dr. Peter Batista Cheung

Dr. Doalcey Antunes Ramos

Joinville, 15 de dezembro de 2022.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à orientação e o apoio incondicional da Professora Dr<sup>a</sup> Andreza Kalbusch, pessoa a qual sou muito grato à Deus por ter tido a oportunidade de conhecer. A Professora Andreza, grande entusiasta do segmento do saneamento e abastecimento predial, em especial de estudos ligados ao consumo hídrico, foi fundamental para os avanços desta pesquisa. Faz juz a alcunha de orientadora, se fazendo muito presente com muita atenção e interesse em todos os momentos da minha trajetória acadêmica na instituição UDESC. Muita gratidão por me ajudar a escrever exatamente o trabalho que eu gostaria de escrever.

A coorientação da Professora Dr<sup>a</sup> Elisa Hening, pessoa que me oportunizou iniciar as atividades acadêmicas na UDESC, cursando a disciplina de modelagem estatística, e especialmente neste tema municiou fundamentais informações para enriquecimento da pesquisa e atingimento dos objetivos traçados para este projeto.

Aos Professores da banca: **i)** Dr. Peter B. Cheung, pela pronta disponibilidade em julgar o projeto, pessoa a qual tive a oportunidade de desfrutar de seus vastos conhecimentos no campo da engenharia sanitária com enfoque em perdas de água, por vezes em congressos, ou atividades profissionais; **ii)** Prof. Dr. Doalcey Ramos que igualmente muito prontamente, com muita solicitude aceitou o convite em contrinuir para este projeto.

A Companhia Águas de Joinville, empresa a qual tenho a honra em pertencer a mais de 15 anos, e através de seu capital humano, me possibilitou o ingresso e continuidade ao programa de mestrado, e mais do que isso, sempre com muito apoio, e em ambiente colaborativo. Agradeço em especial aos colaboradores: Emilly (minha chefe irmã); ao Vilmot, Marcos Pogan, Hygor e ao João, pela execução dos ensaios laboratoriais junto ao Labhidro – Laboratório de Hidrometria; à minha parceira Técnica Edi Werner pelo apoio, orientações e discussões constantes acerca da pauta micromedição, sempre com muita atenção e solicitude; e igualmente ao Técnico Edson Schwitzk pelas discussões acerca da gestão de micromedidores; aos estagiários Hygor, Lucas, Alice, João, e Alex-Alessandro cada qual contrinuindo com parcelas importantes para avanço desta pesquisa, seja com levantamento de dados, auxílio do texto, elaboração

de scripts em linguagem R, ou discussões da temática. Por fim a todos os colegas da CAJ, em especial da família GFC, ainda que não citados, que contribuíram ou apoiaram o projeto.

À todo o corpo docente da UDESC, por compartilharem seus conhecimentos com muita competência e paciência, e aos colegas discentes pelos apoios durante a trajetória, embora em tempos de pandemia muitos eu tenha conhecido apenas pela voz, nome e fotografia.

Aos meus filhos Mateus e Miguel, anjos da minha vida, e a Marcele. Agradeço pela paciência e apoio, e pelo fato de me possibilitam manter equilíbrio entre vida profissional, pessoal e acadêmica. Mateus e Miguel, meus amores: talvez mesmo que não percebam, vocês me ensinam a cada dia, e são fundamentais para me proporcionar a pujança do viver. Seus sorrisos, abraços, brincadeiras, ou vossas simples presenças encantadoras, enchem o meu coração de ânimo. Gratidão por existirem!

Enfim, à Deus, que em sua sabedoria universal e bondade infinita, por alguma razão me possibilitou todas estas beneces.

Seguimos avançando... Gratidão!

*A água de boa qualidade é como a saúde ou a liberdade:*

*Só tem valor quando acaba.*

**Guimarães Rosa.**

## RESUMO

O foco desta pesquisa são as perdas aparentes ocasionadas por submedição, ou seja, medição insuficiente do consumo de água. A submedição impacta diretamente o balanço hídrico das concessionárias de saneamento, pois permite a passagem de água até o consumidor final sem que a mesma seja contabilizada, comprometendo ainda o faturamento. Durante a pesquisa foram realizados ensaios em hidrômetros e estabelecida modelagem prevendo a perda de desempenho dos medidores de água. Os hidrômetros foram ensaiados utilizando-se da metodologia presente na ABNT NBR 15.538 de 2014, a qual estabelece os procedimentos para avaliação da eficiência em medidores de água fria. O desempenho dos hidrômetros é quantificado por meio do Índice de Desempenho Metrológico - IDM, que se trata de um valor numérico percentual. A compilação dos dados dos ensaios foi realizada em planilhas eletrônicas, e para o tratamento estatístico dos dados foi realizada a análise exploratória usando métodos descritos e gráficos com auxílio do software Microsoft Excel, além da linguagem de programação R. Foi analisada a correlação e regressão entre as variáveis que poderiam influenciar o decaimento do desempenho de hidrômetros. Desta forma, o tipo do hidrômetro, a marca, e a volumetria total registrada foram consideradas. A validação do modelo foi realizada com o cálculo de IDM de hidrômetros ensaiados e que não foram inseridos no banco de dados para a formulação do modelo de regressão. Com base nas análises estatísticas encontrou-se um modelo de previsão do IDM para hidrômetros taquimétricos unijato classe metrológica B, e hidrômetros volumétricos classe metrológica C. O modelo encontrado permitiu entender que o aumento da volumetria registrada no medidor repercute na perda de seu desempenho, considerando diferentes modelos e marcas. A pesquisa permitiu evidenciar que a marca mostrou influenciar o IDM, para ambos os tipos de medidores estudados. A taxa de decaimento de desempenho para os medidores taquimétricos unijato foi apurada em  $-0,0055\%$  por  $m^3$ . Para este modelo, o IDM inicial foi apurado em 91,24% até 94,19%, dependendo do fabricante. O medidor volumétrico apresentou um desempenho superior ao taquimétrico, tendo um decaimento de  $-0,0040\%$  por  $m^3$ , com IDM inicial de 99,90% a 100,46%, dependendo do fabricante. O erro absoluto médio dos modelos foi de  $-0,07\%$



para os taquimétricos, e de -0,39% para os volumétricos, resultado considerado bastante satisfatório. Com os resultados do modelo, o índice de submedição global do parque de medidores da Companhia Águas de Joinville foi apurado, sendo possível perceber que, com o aumento da utilização dos medidores volumétricos, o índice de submedição foi reduzido de 12,2% a 6,2%, o que corresponde a uma queda de aproximadamente 50%. Em termos práticos, por meio da modelagem presente na pesquisa, possibilita-se viabilizar a efficientização da gestão de parques de hidrômetros de concessionárias de saneamento, auxiliando na tomada de decisão das campanhas de substituições preventivas, ao passo que a previsibilidade do IDM permite levantar as melhores oportunidades de recuperação de receita e redução de perdas aparentes. Percebe-se no cenário nacional uma alta oportunidade de melhorias de processos ligados a esta área, surgindo daí a justificativa para tal pesquisa.

**Palavras-chave:** Desempenho de hidrômetros, Modelagem estatística, Gestão do parque de hidrômetros, Controle de perdas aparentes, Sistemas de abastecimento de água.

## **ABSTRACT**

*This is a survey on apparent water losses, specifically caused by under-measurement, which are measurement errors in water meters. To predict the loss of performance in water meters, tests were conducted and statistical modeling was established. Under-measurement occurs when the hydrometer cannot record water flows and the volumes consumed. Under-metering directly impacts the water balance of water utilities, as the water consumed is not accounted for, which also affects billing. The water meters were tested using ABNT NBR 15538 (2014) methodology, which establishes the procedures for evaluating the efficiency of water meters. The "Metrological Performance Index" (MPI), which is a numerical percentage value, quantifies the performance of water meters. Laboratory data was compiled in electronic spreadsheets, and to synthesize and organize the variables, exploratory data analysis was performed using described methods and graphics with Microsoft Excel software and R programming language. In this work, the correlation and regression between the variables that could influence the decline in water meter performance were analyzed. Characteristics of the type of water meter, the manufacturer, and the total volume recorded were considered. Model validation was performed by calculating the MPI of water meters outside the database used to formulate the regression model, allowing the model efficiency to be calculated. Based on statistical analyses, assumptions, hypotheses, and statistical tests, prediction models of the MPI were found for metrological class B single-jet velocity water meters and metrological class C volumetric water meters, given the increase in volumetry registered and their manufacturers. The research showed that different brands influence MPI performance, regardless of the type of meter studied. The performance decay rate of single-jet velocity water meters was  $-0.0055\%$  per  $\text{m}^3$ . For this model, the initial MPI ranges from 91.24% to 94.19%, depending on the manufacturer. The performance of the volumetric meter was better than the velocity meter, with a decay of  $-0.0040\%$  per  $\text{m}^3$ . The initial MPI ranges from 99.90% to 100.46% depending on the manufacturer. The mean absolute error was  $-0.07\%$  for velocity meters, and  $-0.39\%$  for volumetric meters. This is a very satisfactory result. The inventory of the Águas de Joinville Company's meters was calculated using these models, and it was perceived that with the increased use*

*of volumetric meters, the under-metering index of the park reduced from 12.2% to 6.2%, a reduction of approximately 50%. In practical terms, through statistical modeling, it is possible to improve the water utilities' management of water meter parks, and thus contributing to the decision-making process for preventive replacement campaigns. Meanwhile, the predictability of the MPI allows for the identification of the best opportunities for revenue recovery and the reduction of apparent losses. On a national scale, there is a significant opportunity for process improvements in this area, which justifies this study.*

*Keywords: Water meter performance, Statistical modeling, Water meter park management, Apparent loss control, Water supply systems.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema geral de um sistema de abastecimento de água.....	25
Figura 2 - Balanço Hídrico da IWA.....	29
Figura 3 – Comparação entre o percentual de água não faturada em algumas cidades do mundo e do Japão .....	31
Figura 4 – Representação espacial do índice de perdas de distribuição (IN049) para todo o conjunto de prestadores de serviço participantes do SNIS, com valores distribuídos por faixas percentuais .....	32
Figura 5 – Hidrômetro Volumétrico.....	42
Figura 6 – Hidrômetro Volumétrico, vista explodida .....	42
Figura 7 – Hidrômetro Velocimétrico Unijato.....	43
Figura 8 – Hidrômetro Velocimétrico Unijato, vista explodida .....	44
Figura 9 - Hidrômetro Velocimétrico Multijato.....	45
Figura 10 – Hidrômetro Velocimétrico Multijato, vista explodida .....	46
Figura 11 - Hidrômetro Velocimétrico Woltmann.....	47
Figura 12 - Hidrômetro Eletromagnético .....	48
Figura 13 – Hidrômetro Ultrassônico.....	49
Figura 14 – Curvas características de hidrômetro de velocidade.....	51
Figura 15 - Fluxograma da Metodologia da Pesquisa .....	58
Figura 16 - Planejamento da pesquisa.....	61
Figura 17 - Tanques de Referência do LabHidro .....	64
Figura 18 - Tanques de Referência do LabHidro (vista superior).....	65
Figura 19 - Escala para leitura do volume do tanque de referência, vaso comunicante evidenciando o nível e registro do lacre do INMETRO .....	66
Figura 20 - Rotâmetro utilizado para ajuste de vazão do ensaio. Ao fundo, visualiza-se tanque de referência e respectivo vaso comunicante em vidro para visualização do nível e régua para leitura .....	67
Figura 21 - Conjunto de componentes da bancada do LabHidro .....	68
Figura 22 - Manômetro do LabHidro .....	69
Figura 23 - Desenho esquemático da bancada volumétrica – Vista isométrica	71
Figura 24 - Desenho esquemático da bancada volumétrica– Vista lateral e planta .....	71
Figura 25 - Desenho esquemático da linha de calibração para posicionamento dos hidrômetros.....	72
Figura 26 - Desenho esquemático da operação da bancada e ajuste de vazões .....	72
Figura 27 - Desenho esquemático da operação da bancada e leitura do volume de referência .....	73
Figura 28 - Desenho esquemático da operação da bancada e leitura do volume de referência, evitando erro de paralaxe .....	73
Figura 29 - Laboratório de Hidrometria da Companhia Águas de Joinville – Instalações internas .....	74

Figura 30 - Bancada volumétrica para ensaios em hidrômetros – registro de ensaios.....	75
Figura 31 - Vista da área externa do laboratório .....	76
Figura 32 - Boxplot de resultado de IDM de medidores ensaiados por categorias – Hidrômetros taquimétricos.....	83
Figura 33 - Histograma e grafico de boxplot – Hidrômetros taquimétricos.....	84
Figura 34 - Gráfico boxplot para para hidrômetros taquimétricos para os três fabricantes.....	85
Figura 35 - Análise da normalidade dos dados de IDM dos hidrômetros taquimétricos para as três marcas .....	86
Figura 36 - Gráfico boxplot para hidrômetros taquimétricos para as três faixas de volumetria.....	87
Figura 37 - Análise da normalidade dos dados de IDM dos hidrômetros taquimétricos, comparando as três faixas de volumetria.....	88
Figura 38 - Dispersão do IDM, pela volumetria – Hidrômetros taquimétricos...	88
Figura 39 - Erros residuais ajustados – Hidrômetros taquimétricos .....	90
Figura 40 - Normalidade dos erros – Hidrômetros taquimétricos .....	90
Figura 41 - Distribuição dos pontos entre variáveis independentes – Hidrômetros taquimétricos .....	91
Figura 42 - Distância de Cook – Hidrômetros taquimétricos .....	91
Figura 43 - Boxplot de resultado de IDM de medidores ensaiados por categorias – Hidrômetros volumétricos.....	94
Figura 44 - Histograma e grafico de boxplot – Hidrômetros volumétricos .....	95
Figura 45 - Gráfico boxplot para para hidrômetros volumétricos para os dois fabricantes.....	95
Figura 46 - Análise da normalidade dos dados de IDM dos hidrômetros volumétricos, comparando ambas as marcas .....	96
Figura 47 - Gráfico boxplot para hidrômetros taquimétricos para as três faixas de volumetria.....	97
Figura 48 - Análise da normalidade dos dados de IDM dos hidrômetros volumétricos, comparando as três faixas de volumetria.....	98
Figura 49 - Dispersão do IDM, pela volumetria – Hidrômetros volumétricos....	99
Figura 50 - Erros residuais ajustados – Hidrômetros volumétricos .....	100
Figura 51 - Normalidade dos erros – Hidrômetros volumétricos .....	101
Figura 52 - Distribuição dos pontos entre variáveis independentes – Hidrômetros volumétricos .....	101
Figura 53 - Distância de cook – Hidrômetros volumétricos .....	102
Figura 54 - Evolução do índice de submedição (%) do parque da CAJ .....	106
Figura 55 - Evolução do quantitativo de tipos de medidores do parque da CAJ .....	107
Figura 56 - Evolução dos valores não faturados estimados .....	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativas do volume de água não faturado global, 2006 .....	33
Tabela 2 – Indicadores de perda da IWA .....	36
Tabela 3 – Tolerâncias para hidrômetros em uso .....	53
Tabela 4 - Parâmetros para determinação do erro de indicação e IDM .....	63
Tabela 5 - Descrição e classificação das variáveis utilizadas na modelagem – Hidrômetros taquimétricos .....	81
Tabela 6 – Resultado de valores de IDM dos hidrômetros taquimétricos ensaiados, respectivos fabricantes e faixa de volumetria, e volumetria total ...	82
Tabela 7 - Estatísticas descritivas do IDM (%) para hidrômetros taquimétricos dos três fabricantes .....	84
Tabela 8 - Estatísticas descritivas do IDM (%) para hidrômetros taquimétricos para as três faixas de volumetria.....	86
Tabela 9 - Tabela de coeficientes da regressão – Hidrômetros taquimétricos.	89
Tabela 10 - Análise da validação geral do modelo – Hidrômetros taquimétricos .....	92
Tabela 11 - Descrição e classificação das variáveis utilizadas na modelagem – Hidrômetros taquimétricos .....	93
Tabela 12 - Resultado de IDM dos hidrômetros volumétricos ensaiados, respectivos fabricantes e faixa de volumetria, e volumetria total.....	93
Tabela 13 – Estatísticas descritivas do IDM (%) para hidrômetros volumétricos dos dois fabricantes .....	95
Tabela 14 - Estatísticas descritivas do IDM (%) para hidrômetros taquimétricos para as três faixas de volumetria.....	97
Tabela 15 - Tabela de coeficientes da regressão – Hidrômetros volumétricos .....	100
Tabela 16 - Análise da validação geral do modelo – Hidrômetros volumétricos .....	103
Tabela 17 - Validação do modelo – Hidrômetros taquimétricos .....	104
Tabela 18 - Validação do modelo – Hidrômetros volumétricos .....	105
Tabela 19 - Sumário estatístico dos erros absolutos – Hidrômetros taquimétricos .....	105
Tabela 20 - Sumário estatístico dos erros absolutos – Hidrômetros volumétricos .....	105
Tabela 21 - Evolução do índice de submedição (%) do parque da CAJ .....	107
Tabela 22 - Evolução do percentual de submedição, e respectivos consumos e valores faturados e não faturados .....	108

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWWA	American Water Works Association
ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAJ	Companhia Águas de Joinville
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IWA	International Water Association
LabHidro	Laboratório de Hidrometria
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
PMJ	Prefeitura Municipal de Joinville
PNCDA	Programa Nacional Combate ao Desperdício Água
SNSA	Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
RBC	Rede Brasileira de Calibração

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	17
1.1. JUSTIFICATIVA .....	20
1.2. OBJETIVOS .....	23
1.2.1. Objetivo geral.....	23
1.2.2. Objetivos específicos.....	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	25
2.1. SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA - FUNCIONAMENTO ESPERADO E EVENTUAIS PROBLEMAS .....	25
2.2. PERDAS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA .....	27
2.2.1. Balanço hídrico e tipos de perda de água.....	27
2.2.2. A realidade das perdas de água no Brasil e no mundo .....	30
2.3. PERDAS APARENTES.....	34
2.3.1. Definição.....	34
2.3.2. Medição de água em sistemas de abastecimento .....	34
2.3.3. Indicadores de perdas .....	35
2.3.4. Gestão e controle de perdas aparentes.....	38
2.4. MICROMEDIÇÃO.....	39
2.4.1. Definição e a importância da micromedição .....	39
2.4.2. Hidrômetros .....	40
2.4.3. Tipos de hidrômetros e seus princípios de funcionamento .....	41
2.4.4. Vazões e classificação metrológica .....	49
2.4.5. Vida útil dos hidrômetros .....	52
2.4.6. Submedição e Sobremedição em hidrômetros.....	53
2.4.7. Fatores intervenientes nas perdas aparentes de água por submedição.....	54
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	58
3.1. ENSAIOS E APURAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO METROLÓGICO – IDM EM MEDIDORES.....	58
3.2. ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS PARA APURAÇÃO DO IDM	76
3.3. MODELO DE APURAÇÃO DO DESEMPENHO .....	77
3.4. APURAÇÃO DO INDICADOR DE SUBMEDIDAÇÃO DO PARQUE DE MEDIDORES E CÁLCULO DA RECUPERAÇÃO DE RECEITA .....	80
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	81
4.1. ANÁLISE DOS ÍNDICES DE DESEMPENHO METROLÓGICO APURADOS NOS ENSAIOS E ELABORAÇÃO DO MODELO DE DESEMPENHO .....	81
4.1.1. Análise dos resultados de IDM e elaboração do modelo para medidores taquimétricos.....	81
4.1.2. Resultado de IDM e modelo para medidores volumétricos .....	92
4.2. VALIDAÇÃO DOS MODELOS.....	104
4.3. CÁLCULO DA RECUPERAÇÃO DE RECEITA .....	106
5. CONCLUSÕES.....	110
6. REFERÊNCIAS .....	112



## 1. INTRODUÇÃO

Sistemas de abastecimento de água vêm sendo utilizados por milhares de anos, sendo que os antigos egípcios, gregos e romanos já coletavam, tratavam e distribuíam água com métodos semelhantes aos utilizados pela sociedade contemporânea (THORNTON *et al.*, 2008). Segundo os autores, a tecnologia mudou, mas os conceitos básicos permanecem os mesmos: captação em mananciais, recalque de água, armazenamento, e distribuição para atendimento ao consumidor final. Nesse contexto, os povos antigos também procuravam minimizar as perdas de água em seus sistemas de abastecimento. Na Roma antiga existiam aproximadamente 250 reservatórios presentes em um sistema completamente abastecido por gravidade, em que um comissionário e sua equipe composta por engenheiros, técnicos e trabalhadores administravam o complexo, sendo uma das principais prioridades administrativas o controle de perdas de água (THORNTON *et al.*, 2008).

Inerentes a qualquer sistema de abastecimento público, estão as perdas de água, as quais podem ser caracterizadas como ineficiências técnicas de naturezas diversas, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS (SNIS, 2022). Considerando o atual cenário mundial de escassez hídrica, os altos custos de energia elétrica, e a relação direta com o desempenho financeiro das companhias de saneamento, as perdas de água se tornam um tema de alta relevância (SNIS, 2022). Neste íterim, ações estruturantes e programas de avaliação para controle e redução de perdas de água se fazem fundamentais (SNIS, 2022).

No contexto da segurança hídrica das cidades, não obstante se aborde, em geral, mais amplamente a questão da gestão da oferta, ou seja, a disponibilidade, qualidade, e proteção dos mananciais, um segundo fator de extrema relevância a ser considerado é a gestão da demanda de água (HORNE, 2019). Isto porque, ao se negligenciar a demanda, expõe-se o risco de haver necessidade ainda maior de disponibilidade hídrica. Diante disso é crescente a preocupação e a mobilização da sociedade e de corporações em busca de modelos de gestão, com adequados controle e medição, que possam contribuir para amenizar a escassez de recursos hídricos e de seus reflexos às populações (FORMIGA-JOHNSSON; BRITTO, 2020). Para os autores, o uso racional da

água, bem como o reúso de efluentes tratados, e o combate às perdas nos sistemas de distribuição desempenham importante papel neste contexto. Tal fato encontra-se em total consonância com a agenda dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS, da Organização das Nações Unidas – ONU, em especial quanto ao sexto objetivo, que é o de garantir acesso universal e seguro à água potável até 2030 (HORNE, 2019).

Lambert e Hirner (2000) definem o balanço hídrico como a contabilização das entradas e saídas de água de um determinado sistema de abastecimento. Para os autores, a matriz do balanço hídrico é composta pelo volume produzido ou importado pelo sistema de abastecimento (volumes disponibilizados que se referem à entrada no balanço hídrico) e os volumes consumidos medidos ou estimados; bem como a água exportada; as águas de serviço (combate a incêndios, suprimento de água em áreas irregulares, descargas operacionais); os consumos não autorizados (fraudes, falhas do sistema comercial, submedição dos hidrômetros); e os vazamentos e extravasamentos. Esta definição e metodologia é a adotada e padronizada pela International Water Association – IWA.

Conforme o balanço hídrico proposto pela IWA, em geral, as maiores perdas nos sistemas de distribuição ocorrem devido a vazamentos na rede de distribuição, ou nos ramais e cavaletes da ligação de água (perdas reais) (RÍOS *et al.*, 2013). Contudo existe significativa parcela de água que é entregue aos usuários sem o devido registro, as quais conceituam-se como perdas aparentes (THORNTON *et al.*, 2008).

Este trabalho tem em foco as perdas aparentes, conceituadas pela IWA como a perda comercial ou não-física, referente ao volume de água produzido pelas companhias, consumido pelo cliente, mas não contabilizado devido a erros de medição dos hidrômetros, ligações clandestinas, violação dos hidrômetros e falhas no cadastro comercial (THORNTON *et al.*, 2008). Especificamente o presente trabalho trata das perdas aparentes ocasionadas por submedição, ou seja, erros de medição, ou falta de acuracidade dos hidrômetros.

A micromedição é definida como a medição do consumo realizada no ponto de abastecimento de um determinado usuário, independentemente de sua categoria ou faixa de consumo. Em suma, a micromedição compreende a

medição periódica do volume consumido utilizando hidrômetros, segundo o Programa Nacional Combate ao Desperdício Água - PNCDa (PNCDa, 2003).

Como todos os instrumentos de medição, os hidrômetros possuem limites em relação a seus usos, e estes equipamentos apresentam imprecisão intrínseca (COELHO, 2009). Este é um fato, e apresenta lógica coerente aos conceitos da área de metrologia: o instrumento de medição possui precisão dentro de um campo de aplicação considerando a incerteza de medição associada ao processo. Os medidores de água possuem, portanto, um erro de medição, medindo geralmente a menor (submedição), fato este que ocorre quando não se é capaz de registrar na totalidade os fluxos de água passantes, e, por conseguinte, registros de volume consumidos, seja por problemas de instalação, erros de dimensionamento, desgastes devido à utilização, dentre outros fatores (TARDELLI FILHO, 2006).

Segundo Tardelli Filho (2006), hidrômetros apresentam imprecisão natural que varia com os tipos de medidores, e esta imprecisão pode ser incrementada devido a fatores tais como: instalação inadequada, descalibração do medidor, dimensionamento inadequado, operação em baixas velocidades, grande amplitude de operação entre vazões máximas e mínimas, problemas na transmissão dos dados (ao se utilizar medição remota, *Internet of Things – IoT*), erros de paralaxe, dentre outros. As conclusões de Tardelli Filho (2006) são corroboradas por Thornton e Rizzo (2002) e Arregui *et al.* (2007), destacando que a submedição é ampliada com práticas de instalação incorretas, falta de manutenção ou calibração (desgaste interno de peças), utilização do tipo incorreto de medidor, classe metrológica, dimensionamento incorreto, presença de sólidos em suspensão, vazamentos, dentre outros.

Somado aos fatores elencados pelos autores citados no parágrafo anterior, levanta-se o fato de que, em geral, nos sistemas prediais em localidades sujeitas a intermitência na distribuição de água, utilizam-se reservatórios próprios com o intuito de evitar problemas de desabastecimento (AL-WASHALI *et al.*, 2020). Tais reservatórios contam usualmente com utilização de válvulas flutuantes, as quais possuem grande influência na precisão do hidrômetro. Os estudos realizados por Al-Washali *et al.* (2020), que investigaram o impacto de reservatórios dotados de válvula flutuante no desempenho de hidrômetros por meio de experimentos de laboratório, medições de campo e modelagem

hidráulica, revelam que os fluxos hídricos de entrada no reservatório de água são consistentemente mais baixos do que as taxas de saída do reservatório. Isto se dá em razão do mecanismo de equilíbrio do tanque. Os fluxos hídricos que passam por sua vez pelo hidrômetro são os mesmos da entrada no reservatório predial.

Hidrômetros operando em vazões próximas da vazão nominal e abaixo da vazão de sobrecarga, geralmente apresentam erros muito baixos (COELHO, 2009). Para consumos em taxas de fluxo mais baixas que o mínimo, o erro (volume indicado pelo medidor menos o volume efetivamente escoado) será negativo e muito alto até atingir “menos 100%”, quando a vazão de trabalho for menor que a vazão inicial (FONTANAZZA *et al.*, 2014). Como resultado, as perdas aparentes devido à submedição dependem da porcentagem de consumo do usuário que ocorre em vazões baixas e muito baixas (operação no campo inferior de vazões, entre vazão mínima e vazão de transição), bem como da capacidade do medidor de registrar com precisão o volume de água consumido. O efeito causado pelos baixos fluxos da válvula flutuante do reservatório, como destacado no parágrafo anterior, prejudica a medição neste contexto.

Apesar da existência de várias abordagens para o gerenciamento do parque de hidrômetros, menos atenção tem sido dada ao impacto do risco de falha do medidor nas receitas das concessionárias e ao momento ótimo de substituição, bem como à adequada tecnologia de medição a ser empregada (Yazdandoost *et al.*, 2018). Surgem neste contexto oportunidades de pesquisas que abordem tais temáticas.

## 1.1. JUSTIFICATIVA

A água é um recurso essencial para a sociedade contemporânea, tendo uma relação importante com fatores econômicos, sociais e ambientais atrelados ao desenvolvimento sustentável, segundo a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO, 2003). Ademais, não são poucos os aspectos problemáticos que empecilham a distribuição igualitária de água: problemas logísticos, econômicos e sociais são alguns dos tipos de dificuldades frequentemente encontradas (UNESCO, 2003). O acesso ao

abastecimento de água e ao esgotamento sanitário adequados é considerado um direito fundamental, essencial para assegurar condições dignas de habitação, saúde e preservação do meio ambiente (IBGE, 2017).

Considerando a importância e os desafios encontrados para se distribuir água igualmente, companhias de saneamento devem se atentar à necessidade de se medir precisamente o volume de água de seus respectivos sistemas de distribuição (HEINER *et al.*, 2011). Desta forma, empresas de saneamento vêm aplicando um grande esforço não somente para atender à expansão do abastecimento de água, mas também para distribuir água potável com maior qualidade, menor custo e trazer a conscientização ambiental para as gerações futuras (LOENERT, 2003).

Uma quantidade considerável de água é perdida desde o processo de coleta até a eventual distribuição para o cliente final, gerando um grande desafio para empresas de saneamento. Perdas de água em sistemas de abastecimento de água podem ser classificadas como perdas reais, que correspondem à água perdida nos diversos processos de distribuição, e perdas aparentes que representam o volume de água consumido, mas não registrado pelos prestadores de serviços de saneamento, conforme a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA, 2018). As perdas de água não são identificadas apenas como um problema econômico ou técnico, as implicações são mais amplas e também acarretam repercussões significativas em respeito a aspectos políticos, sociais, tecnológicos, legais, econômicos e ambientais (EUROPEAN COMMISSION, 2015). A submedição impacta diretamente o índice de perdas da concessionária de saneamento pelo fato de permitir a passagem de água até o consumidor final sem que a mesma seja contabilizada, comprometendo, portanto, o balanço hídrico e o faturamento (TARDELLI FILHO, 2006).

Um dos principais requisitos para que haja distribuição balanceada e adequada do uso da água é a existência de medição. A correta medição dos volumes de água é extremamente importante para combater o desperdício, pois permite apurar os volumes reais utilizados em substituição à aplicação de taxas baseadas em consumos médios, assim como possibilita a detecção de vazamentos (PEREIRA e ILHA, 2008).

Dentro do contexto dos sistemas de abastecimento o processo de medição constitui um instrumento indispensável que possibilita a obtenção de

dados de volumes distribuídos e consumidos, permitindo explorar as melhores formas de operação do sistema de abastecimento em todas as suas partes: captação, adução de água bruta, tratamento, adução de água tratada, armazenamento e distribuição (YAZDANDOOST *et al.*, 2018). A importância do hidrômetro no contexto das concessionárias de abastecimento de água, é inquestionável, como destacado anteriormente, uma vez que este componente é utilizado para medir o consumo dos usuários, e com base nisso permite-se a estas corporações efetuar o faturamento pela água consumida, além de avaliar o balanço hídrico do sistema de distribuição, e identificar falhas na rede, furto de água, bem como comportamentos anômalos por parte do usuário (FONTANAZZA *et al.*, 2014). Destaca-se ainda que a cobrança pelo serviço de coleta e tratamento de esgoto, em geral, é baseado proporcionalmente na água consumida pelos usuários do sistema.

Com relação a valores financeiros, é importante observar que o custo de venda da água é maior do que a despesa de exploração, dada a necessidade de se preservar a sustentabilidade econômico-financeira do negócio (MELATO, 2010). Para o autor isto é válido independentemente da despesa ser proveniente de investimentos ou manutenções, e neste contexto, o valor do metro cúbico não faturado (perdido na perda aparente) é maior do que do metro cúbico perdido em vazamentos (perda real), podendo ser dezenas de vezes maior. Investimentos em perdas aparentes costumam representar um retorno financeiro muitas vezes maior do que investimentos em perdas reais, sejam estes últimos em medidas estruturantes ou não (MELATO, 2010).

Como demonstrado anteriormente, dada a importância dos medidores de água para os sistemas de abastecimento de água, tanto do ponto de vista operacional, como do comercial, as concessionárias de saneamento em geral dispõem de programas de manutenção do seu parque de medidores para assegurar o ideal funcionamento do mesmo (COELHO, 2009). Yazdandoost *et al.* (2018) apresentam proposta de gerenciamento de ativos, como uma estrutura de gerenciamento holística que otimiza os custos do ciclo de vida, especialmente incorporando o risco de falha dos hidrômetros nas decisões de substituição de ativos. A conclusão é que o preço da água, o investimento inicial e a taxa de degradação da precisão dos hidrômetros, têm os maiores impactos nos resultados da determinação do momento ideal de troca.

Pelo fato dos medidores de água acurarem o volume para permitir pleno fornecimento da água como elemento social e *commodity* econômico, sustentando o faturamento da concessionária, os hidrômetros passam a ser importantes ativos de redes de distribuição, já que a receita das concessionárias é proveniente do somatório do volume registrado nas unidades consumidoras por meio dos hidrômetros, sendo esta uma política de cobrança utilizada globalmente (YAZDANDOOST *et al.*, 2018). Entender como se dá a perda de desempenho dos medidores leva as concessionárias a otimizarem seus planos de gestão de ativos, com estabelecimento dos momentos ótimos de substituições, proporcionando redução de perdas e maximização do faturamento. Surge daí a justificativa para realização desta pesquisa.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é o estabelecimento de modelagem estatística da perda de desempenho de medidores de água em função da volumetria total registrada, fabricante do medidor, e tipo de hidrômetro.

### 1.2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- i. Realizar ensaios de desempenho em medidores de água, e apurar estatísticas descritivas dos respectivos índices de desempenho metrológico – IDM obtidos nestes ensaios;
- ii. Apurar o histórico do índice de submedição do parque de medidores de água da Companhia Águas de Joinville – CAJ <sup>1</sup>, ao longo de cinco anos (2018 a 2022), a partir do desempenho

---

<sup>1</sup> A CAJ é a empresa concessionária dos serviços de saneamento, componentes água e esgoto, no município de Joinville-SC. Foi criada pela Lei Municipal nº 5054 de 02 de julho de 2004, e atualmente sua natureza jurídica se enquadra como Empresa Pública, sendo a Prefeitura Municipal de Joinville – PMJ acionista única (CAJ, 2018).

individual teórico de cada hidrômetro, apurado pela modelagem estatística da perda de desempenho;

- iii. Proceder com o cálculo teórico da recuperação de receitas decorrentes de eventual queda da submedição do parque de medidores ao longo deste período (2018 a 2022).



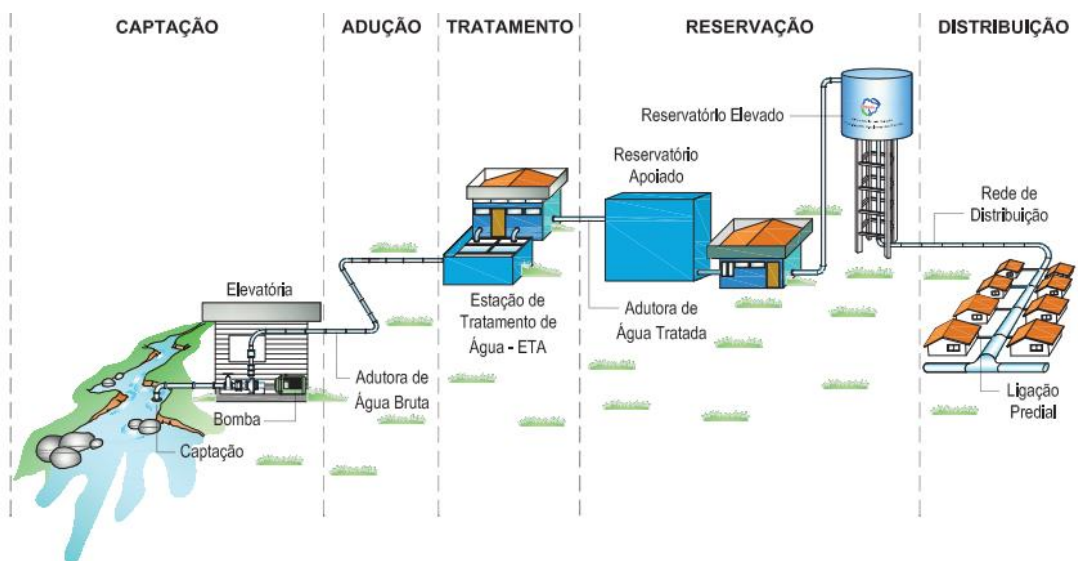
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA - FUNCIONAMENTO ESPERADO E EVENTUAIS PROBLEMAS

Os sistemas de distribuição de água acompanham a humanidade desde remotos tempos (DE PÁDUA, 2006). Para os autores, diversos são os relatos de complexos sistemas de abastecimento presentes nos povos antigos, como por exemplo o povo Inca na América Pré-Colombiana, bem como no antigo Egito e no Império Romano. Atualmente, as concessionárias de saneamento são os órgãos responsáveis pela distribuição de água, ou seja, entrega dos volumes de água para residências, comércios, indústrias e outras organizações localizadas em uma área ou comunidade urbana (BILLINGS e JONES, 2008). Um sistema de abastecimento de água é definido como a instalação composta por um conjunto de obras civis, materiais e equipamentos, desde a zona de captação até as ligações prediais, destinada à produção e ao fornecimento coletivo de água potável, por meio de rede de distribuição (INMETRO, 2011).

Um sistema de abastecimento de água é constituído, de forma geral, das seguintes unidades: manancial, captação, adutoras de água bruta e tratada, estações elevatórias, estações de tratamento, reservatórios de água bruta e tratada e a rede de distribuição (SILVA, 2015), expressos na Figura 1.

Figura 1 – Esquema geral de um sistema de abastecimento de água



Fonte: BRASIL (2019).

Salienta-se a importância da preservação da água como recurso, sendo que sua utilização deve ocorrer com racionalidade devido ao seu papel fundamental para a vida, especialmente considerando que seus métodos naturais de transformação são lentos e limitados (MIERZWA e HESPANHOL, 2005). Assim, a falta de eficiência no gerenciamento de sistemas de abastecimento de água tem se tornado uma crescente preocupação na atualidade, pois limita o desenvolvimento econômico, degrada o meio ambiente e afeta o bem-estar da sociedade (MORAIS e ALMEIDA, 2006).

Em escala global, um dos principais problemas enfrentados por companhias de distribuição de água é a grande concentração do volume de água não devidamente registrado entregue ao cliente final (KANAKOUDIS *et al.*, 2013). Os autores estimam que 16 bilhões de metros cúbicos de água são distribuídos sem devida cobrança, como em casos de furtos de água, micromedição inadequada, ou até mesmo em casos de corrupção. Somado a isso, a cada ano estima-se que mais de 32 bilhões de metros cúbicos de água tratada são perdidos em vazamentos presentes em sistemas de distribuição de água (KANAKOUDIS *et al.*, 2013).

A eficiência operacional dos sistemas de abastecimento de água tem sido amplamente contestada devido aos elevados índices de perda de água, não somente no que se refere aos recursos hídricos, mas também ao fato de que o setor de distribuição de água representa uma parcela significativa do consumo de energia global (AGUIAR, 2019). Também é importante salientar que a tomada de decisão para o gerenciamento de recursos naturais, como a água, é uma atividade bastante complexa. São necessárias negociações entre diferentes grupos ou indivíduos, os quais possuem interesses social, econômico e político conflitantes (MORAIS e ALMEIDA, 2006).

Complementarmente, Gularte (2005) menciona algumas medidas que podem ser adotadas em sistemas de abastecimento de água para a obtenção de bons níveis de racionalização da utilização de água:

- a) Tarifação horosazonal, que consiste na criação de postos horários de medição de consumo de água de acordo com o período do ano e controle das vazões máxima e mínima;
- b) Implantação de sistemas de telemedição em hidrômetros de grandes consumidores;

- c) Disponibilização de saídas de pulso, com intuito de que o consumidor possa programar rotinas de conservação e otimização da utilização de água e;
- d) Disponibilização do perfil de consumo de cada cliente para verificar fatores como o nível de sazonalidade de cada região e consumidor e a contribuição do usuário final no consumo da cidade.

## 2.2. PERDAS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

### 2.2.1. Balanço hídrico e tipos de perda de água

Perda de água é definida como a parcela de água produzida, porém não utilizada pelos consumidores finais ou utilizada sem o adequado registro (AL-WASHALI *et al.*, 2016). O impacto das perdas de água é significativo, como em casos de vazamentos, que afetam a estabilidade técnica dos sistemas de abastecimento de água, a qualidade da água e também a qualidade do serviço de distribuição de água (AL-WASHALI *et al.*, 2016). As perdas de água constituem-se em um problema mundial, gerando baixos índices de desempenho dos sistemas de abastecimento em várias partes do mundo. Porém, alguns países e/ou cidades, com devido planejamento, conhecimento, recursos e gestão, conseguiram atingir e manter baixos níveis de perdas nos seus sistemas, segundo a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES, 2015).

Perdas nos sistemas de abastecimento de água podem ser definidas de duas formas: as reais, em que a perda se caracteriza pela dissipação de água, de forma física, no sistema; e as aparentes, que representam a perda de faturamento (AGUIAR, 2019). De acordo com Thornton *et al.*, 2008, é imprescindível conhecer a importância de cada componente dos volumes não registrados (perdas) para que se possa tomar decisões com relação a quanto e onde se deve investir para melhorar cada um dos instrumentos de medição presentes no sistema, a fim de incrementar o rendimento. Por exemplo, torna-se pouco produtiva a dedicação de esforços para detecção de vazamentos se o principal componente das perdas for o mau estado de conservação em que se encontra o parque de hidrômetros, ou vice-versa (THORNTON *et al.*, 2008).

Segundo a ABES (2015), até o final do século passado, não havia um entendimento comum sobre o que eram perdas nos sistemas públicos de abastecimento de água. Por exemplo, nos Estados Unidos, o conceito de "Água Não Contabilizada" (*Unaccounted-for Water*) referia-se ao valor que sobrou ao se realizar uma espécie de "Auditoria das Águas". Desta forma, os vazamentos eram contabilizados e seus volumes de água estimados, e após todas as apurações e estimativas, as Águas Não Contabilizadas acabavam sendo os volumes sobre os quais não se tinha um conhecimento da sua destinação ou uso. Em contraste, no Japão, o conceito referia-se ao "Uso Efetivo" da água, em que eram incorporados todos os volumes utilizados e o que restou denominava-se "Uso Não Efetivo", ficando as perdas restritas aos vazamentos na rede de distribuição e ramais (ABES, 2015).

Devido à falta de uma definição global única para o conceito de perdas em sistemas de abastecimento de água, a IWA traçou diretrizes para estudar, discutir e propor uma padronização mundial de terminologia, conceitos e indicadores de perdas em sistemas públicos de abastecimento de água (ABES, 2015). O Brasil é um país que recentemente aderiu às diretrizes da IWA, diferentemente do Japão, que optou por utilizar suas próprias convenções (TARDELLI FILHO, 2016).

Neste contexto, a IWA classifica as perdas, como reais (físicas) ou aparentes (comerciais). As perdas reais equivalem ao volume de água perdido durante as diferentes etapas de produção - captação, tratamento, armazenamento e distribuição - antes de chegar ao consumidor final (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Segundo a American Water Works Association (AWWA, 2016), as perdas reais em sistemas de abastecimento de água decorrem, portanto, de vazamentos em tubulações pressurizadas. Todavia as perdas também podem ser ocasionadas por medição inadequada do consumo do cliente, fraudes, ou até mesmo pela própria negligência financeira da empresa de abastecimento, sendo tais fatores identificados como perdas aparentes.

A Matriz do Balanço Hídrico proposta pela IWA é considerada essencial para a estruturação do problema das perdas nos sistemas de abastecimento de água devido a sua objetividade e facilidade de interpretação, conforme demonstra a Figura 2 (ABES, 2015).

Figura 2 - Balanço Hídrico da IWA

VOLUME PRODUZIDO OU DISPONIBILIZADO	CONSUMOS AUTORIZADOS	Consumos Autorizados Faturados	Consumos medidos faturados (Inclui água exportada)	ÁGUAS FATURADAS
			Consumos não medidos faturados (estimados)	
		Consumos Autorizados Não Faturados	Consumos medidos não faturados (usos próprios, caminhões-pipa)	ÁGUAS NÃO FATURADAS
			Consumos não medidos não faturados (combate a incêndios, suprimento de água em áreas irregulares)	
	PERDAS	Perdas Aparentes (Comerciais)	Consumos não autorizados (fraudes); Falhas do sistema comercial; Submedição dos hidrômetros.	
		Perdas Reais (Físicas)	Vazamentos nas adutoras e redes de distribuição; Vazamentos nos ramais prediais; Vazamentos e extravasamentos nos reservatórios setoriais e aquedutos.	

Fonte: (ABES, 2015).

A terminologia de Balanço Hídrico proposta pela IWA pode ser considerada um avanço significativo em relação ao tópico de perdas de água, pois facilita comparações e discussões mais precisas com relação aos serviços de abastecimento público (AL-WASHALI *et al.*, 2016). Segundo Oliveira *et al.* (2018), o Balanço Hídrico tem como parâmetro inicial o volume de água produzido que ingressa no sistema, o qual, no processo de distribuição, pode ser classificado como consumo autorizado ou perdas. O consumo autorizado faz referência ao recurso hídrico fornecido aos clientes autorizados (medidos ou não), enquanto as perdas correspondem à diferença entre o volume de entrada e o consumo autorizado. Finalmente, para se estabelecer uma estratégia eficiente para controle de perdas de água é necessário compreender a causa das mesmas, bem como os fatores que influenciam seus componentes (WINARMI, 2009).

Um dos principais problemas enfrentados por empresas de abastecimento de água se dá pelos elevados níveis de águas não faturadas presentes em seus sistemas. (AWWA, 2016) Perdas de água, além de causadoras de significativos impactos ambientais, são responsáveis por danos financeiros que afetam as concessionárias envolvidas no processo de distribuição (KANAKOUDIS *et al.*, 2013). Estima-se que mais de um terço do

total do volume de água coletada em fontes hídricas para consumo seja perdido em vazamentos dentro dos sistemas de abastecimento (KANAKOUDIS *et al.*, 2013). De acordo com Lambert *et al.* (1999), é impossível eliminar 100% das perdas reais. Desta forma, solidifica-se o conceito de um valor denominado “perdas reais inevitáveis anuais” (em inglês *unavoidable anual real losses – UARL*).

Mesmo existindo diversas razões para buscar a minimização de vazamentos em sistemas de distribuição de água, provavelmente a mais importante delas está relacionada à melhoria da qualidade de serviço (ALMANDOZ, 2005). As perdas aparentes têm um impacto direto sobre a receita das empresas de saneamento, considerando que elas equivalem a volumes produzidos e consumidos, mas não faturados. Desta forma, um elevado nível de perdas aparentes reduz a capacidade financeira das companhias de saneamento (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Lambert *et al.* (1999) mencionam alguns métodos eficazes para o controle de perdas reais em sistemas de abastecimento:

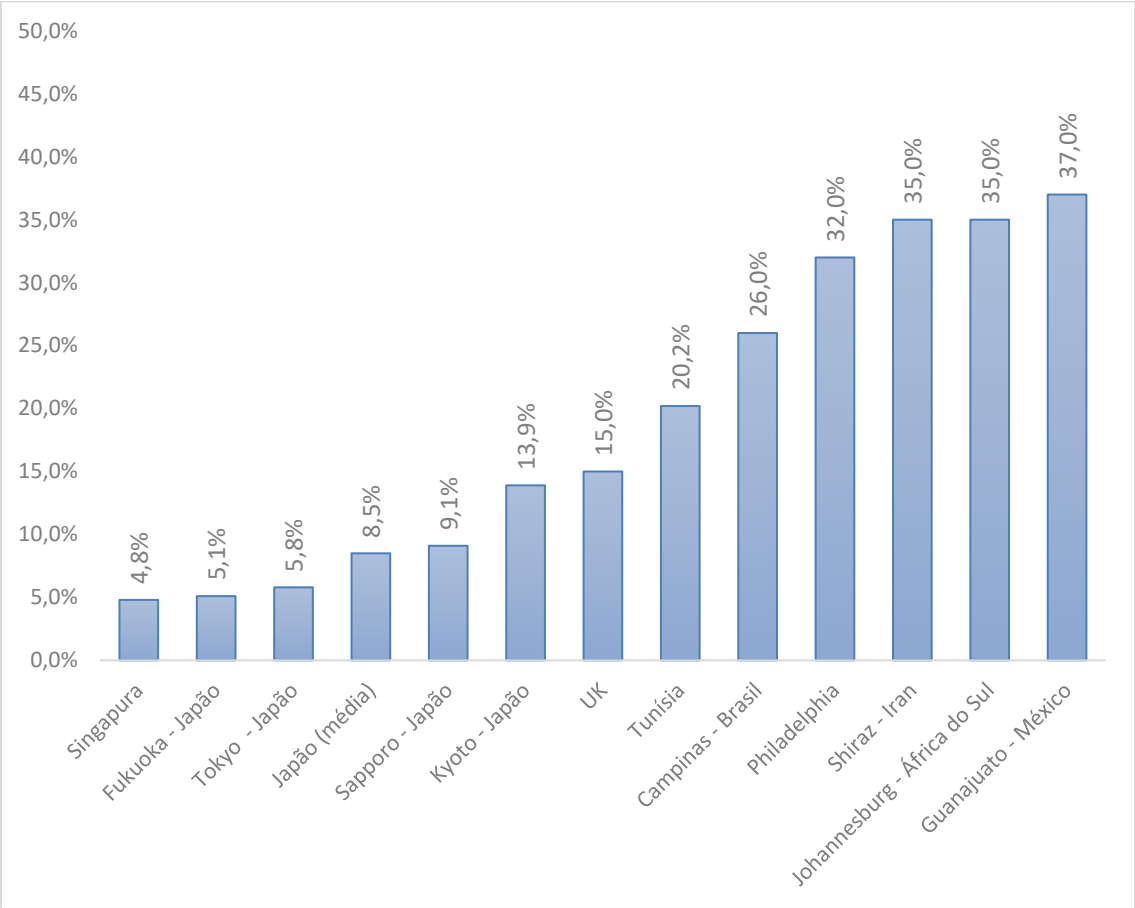
- Gerenciamento de pressão: procura minimizar o excesso de pressão no sistema e também a faixa de duração de pressões máximas;
- Controle ativo de vazamentos: representa um método proativo para o controle de perdas, se opondo ao controle passivo que representa a atividade de reparar os vazamentos apenas quando se tornam visíveis;
- Velocidade e qualidade dos reparos e;
- Gerenciamento adequado da infraestrutura.

### **2.2.2. A realidade das perdas de água no Brasil e no mundo**

No Brasil e no mundo muitos ainda são privados dos serviços de saneamento básico e a desigualdade nesse contexto faz com que sua carência ou inadequação esteja fortemente relacionada a situações de vulnerabilidade (IBGE, 2017). O Tokyo Metropolitan Water Bureau (Departamento Metropolitano de Água de Tóquio – Japão) pode ser considerado uma das melhores concessionárias de água do mundo, com aproximadamente 5,8% de água não faturada, um serviço com 100% de cobertura para uma população de cerca de 12 milhões de habitantes e um volume diário médio de abastecimento de água

de aproximadamente 4,4 milhões de m<sup>3</sup> (UEDA e BENHOUANI, 2009). O gráfico presente na Figura 3 expressa a diferença do percentual de água faturada em algumas regiões do mundo, em comparação com o Japão.

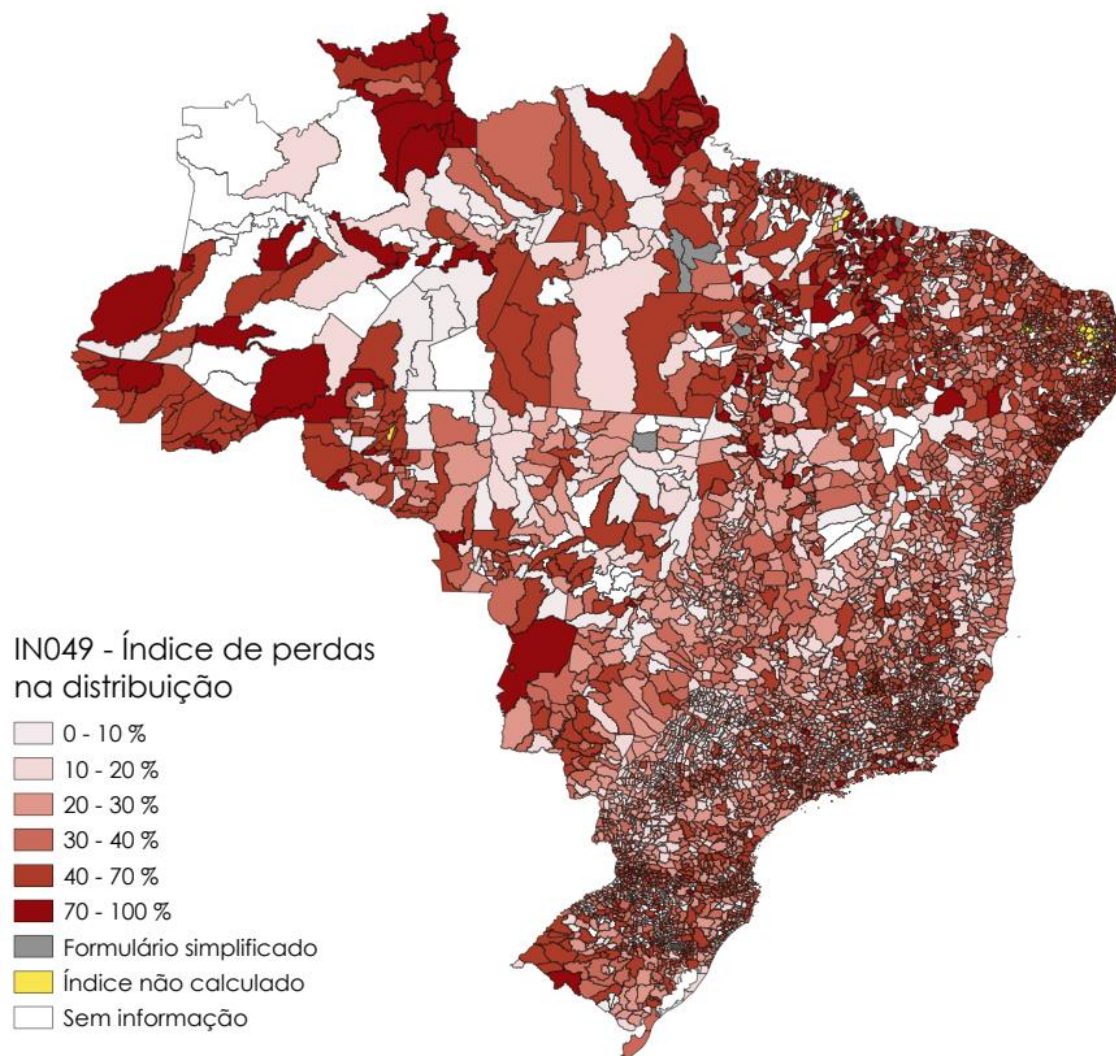
Figura 3 – Comparação entre o percentual de água não faturada em algumas cidades do mundo e do Japão



Fonte: Ueda e Benouahi (2009). Adaptado pelo autor.

No contexto nacional, o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos do SNIS, contemplou a apuração de informações sobre o serviço de abastecimento de água nos municípios brasileiros que aderem a este sistema. Foi estimado que em 2020, os sistemas de abastecimento sofreram perdas na distribuição com uma média nacional de 40,1% (SNIS, 2022). Em destaque, foi apurado o índice de perdas de distribuição IN049, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Representação espacial do índice de perdas de distribuição (IN049) para todo o conjunto de prestadores de serviço participantes do SNIS, com valores distribuídos por faixas percentuais



Fonte: SNIS (2022).

A quantidade de água perdida em sistemas de distribuição de água varia significativamente entre diferentes países. Em sistemas considerados bem planejados as perdas por vazamento representam um valor relativamente baixo, na ordem de 3 a 7%. Em contraponto, em sistemas deficitários esse número pode chegar a até mais de 50% (PUUST *et al.*, 2010). O custo global estimado ocasionado por perdas de água é de aproximadamente 14 bilhões de dólares por ano (KINGDOM *et al.* 2006).



Kingdom *et al.* (2006) argumentam que o volume de águas não faturadas em países em desenvolvimento é extremamente alto, e há carência de sistemas de monitoramento adequados para mensurar tais perdas. Segundo os autores, muitos dos países em desenvolvimento carecem de programas que coletem e consolidem informações a respeito do desempenho dos sistemas de abastecimento de água. A Tabela 1 exprime as estimativas no ano de 2006 para o volume de água não faturado em escala global (KINGDOM *et al.*, 2006).

Tabela 1 – Estimativas do volume de água não faturado global, 2006

	População abastecida (milhões, 2002)	Volume de entrada do sistema (l/capita/dia)	ESTIMATIVAS DO VOLUME DE ÁGUA NÃO FATURADO (2006)					
			Nível de volume de água não faturado	Proporção (%)		Volume (bilhões de m³/ano)		
				Perdas Reais	Perdas Aparentes	Perdas Reais	Perdas Aparentes	Total
Países Desenvolvidos	744,8	300	15	80	20	9,8	2,4	12,2
Eurásia	178,0	500	30	70	30	6,8	2,9	9,7
Países em desenvolvimento	837,2	250	35	60	40	16,1	10,6	26,7
			TOTAL			32,7	15,9	48,6

Fonte: KINGDOM *et al.*, 2006, adaptada pelo autor.

Normalmente, vazamentos são responsáveis pela maior parcela de perdas em países desenvolvidos, em contraponto ao normalmente observado em países em desenvolvimento, em que atividades fraudulentas, erros de medição e/ou de contabilidade são mais frequentes (WINARMI, 2009).

Conclui-se com o argumento de Frauendorfer e Liemberger (2010), que há uma divisão entre os países desenvolvidos e em desenvolvimento devido à grande diferença de desempenho existente nos sistemas de abastecimento de água, desta forma, torna-se incoerente traçar as mesmas metas de desempenho aplicadas a diferentes realidades de países.

## 2.3. PERDAS APARENTES

### 2.3.1. Definição

As perdas aparentes, também conhecidas por perdas comerciais ou não físicas, correspondem aos volumes de água consumidos, mas não autorizados nem faturados. Generalizando, são as perdas decorrentes de erros de medição dos hidrômetros, por fraudes, ligações clandestinas ou até mesmo por falhas no cadastro comercial (OLIVEIRA *et al.*, 2018). As perdas aparentes contabilizam todos os tipos de imprecisões associadas às medições da água produzida e da água consumida, e ainda o consumo não autorizado por furto ou uso ilícito (SILVA *et al.*, 2018). Perdas aparentes se referem ao volume de água que não é fisicamente perdido, mas que é utilizado pelo cliente final sem que o devido custo pelo serviço de distribuição seja cobrado (TARDELLI FILHO, 2016). As perdas aparentes incluem usos ilegais, submedição de hidrômetros e erros relacionados à análise de dados ou faturamento (AL-WASHALI *et al.*, 2016). De acordo com a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA, 2018), as perdas reais e aparentes têm naturezas distintas, pois as perdas reais se caracterizam pela perda do produto, se contrapondo às aparentes, em que a água é consumida porém sem o devido registro e faturamento.

### 2.3.2. Medição de água em sistemas de abastecimento

Medidores de água são definidos como instrumentos de medição utilizados para mensurar os volumes transcorridos entre duas leituras. Neste contexto, as medições nos sistemas de abastecimento de água são efetuadas desde a captação no manancial até o ponto final de entrega para o consumo (AGUIAR, 2019). Segundo Vicentini (2012), uma das propostas da IWA é reconhecer que sempre haverá erros e incertezas em relação aos dados associados ao balanço hídrico. Isso pode auxiliar a companhia de saneamento a priorizar as ações de controle de qualidade dos dados, de forma a melhorar a confiabilidade do cálculo do balanço hídrico e dos indicadores de perdas.

Pontos de medição de um sistema de abastecimento podem ser permanentes ou temporários, monitorados à distância (telemetria) ou localmente

(leitura presencial direta). A macromedição é a referência principal de todo o balanço hídrico, sendo que medidores de vazão de maior porte são utilizados para medição de entrada de setores de distribuição, ou ainda medição de água tratada entregue em volumes maiores a outros sistemas públicos (VICENTINI, 2012). Os distritos de medição e controle - DMC foram fundamentados com o intuito de detectar vazamentos em uma determinada área, integrando conceitos tecnológicos, administrativos e econômicos. O uso do DMC proporciona boas condições para o controle automático de perdas reais e aparentes. Um DMC deve contar com um macromedidor na entrada para acompanhar o comportamento das vazões, sendo que esta metodologia permite analisar todos os componentes das perdas aparentes (XIN *et al.*, 2014).

### **2.3.3. Indicadores de perdas**

Os indicadores de perdas têm o propósito de oferecer bases seguras para o planejamento das ações de redução e controle de perdas, e subsequente avaliação de seus resultados, assim como possibilitar a análise de desempenho e a definição de políticas públicas para o setor de saneamento (MIRANDA e KOIDE, 2003). Uma série de indicadores de desempenho pode ser calculada de forma a auxiliar a tomada de decisões. Ressalta-se que as análises que dão origem a indicadores são resultantes de operações entre múltiplas variáveis, sendo que cada uma delas tem uma incerteza associada (SILVA *et al.*, 2018).

De acordo com os parâmetros recomendados pela IWA, a avaliação de indicadores deve ser realizada em períodos de no mínimo um ano, em virtude das variações de comportamento das variáveis estudadas (COELHO, 2016). A Tabela 2 expressa os indicadores de perda recomendados pela IWA (AGUIAR, 2019).

Tabela 2 – Indicadores de perda da IWA

Grupo	Nomenclatura	Código	Unidades
Econômico e Financeiro	Água não faturada por volume	Fi <sub>46</sub>	%
	Água não faturada por custo	Fi <sub>47</sub>	%
Operacional	Perdas de água (Total)	Op <sub>23</sub>	m³/ligação/ano
		Op <sub>24</sub>	m³/km/dia
	Perdas aparentes	Op <sub>25</sub>	%
		Op <sub>26</sub>	%
	Perdas reais	Op <sub>27</sub>	L/ligação/dia
		Op <sub>28</sub>	L/km/dia
	Índice de vazamento na infraestrutura	Op <sub>29</sub>	Adimensional
Recurso Hídrico	Ineficiência de utilização dos recursos hídricos	WR <sub>1</sub>	%

Fonte: AGUIAR, 2019, adaptado pelo autor.

Os indicadores Op<sub>25</sub> e Op<sub>26</sub> relacionam as perdas de água aparentes e o volume de água, conforme Equações 1 e 2 (AGUIAR, 2019).

$$Op_{25} = \left( \frac{A_{18}}{A_3 - A_5 - A_7} \right) * 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

$$Op_{26} = \left( \frac{A_{18}}{A_3} \right) * 100 \text{ [%]} \quad (2)$$

Onde:

A<sub>3</sub> é o volume de água na entrada do sistema incluindo o volume captado e o volume importado (m³);

A<sub>18</sub> é o volume de Perdas Aparentes (m³);

A<sub>5</sub> é o volume de Água Bruta Exportada (m³);

A<sub>7</sub> é o volume de Água Tratada Exportada (m³).

De acordo com Tardelli Filho (2016), para avaliar e acompanhar as perdas em sistemas de distribuição de água, os quatro principais indicadores podem ser descritos como:

- Índice Percentual (IP): representa a relação entre os volumes de perdas totais em um período e os volumes de água produzidos;
- Indicador Técnico (IT), em L/(ligação\*dia): representa a relação entre os volumes totais perdidos em um período e o número de ligações ativas de água;

- c) Índice de Vazamentos da Infraestrutura (IVI): representa a relação entre os volumes de perdas reais e de perdas reais inevitáveis para o sistema em questão, ou seja, traduz o quanto o sistema está distante do volume de perdas que é possível de ser atingido;
- d) Índice de Perdas Aparentes (IPA), adimensional: representa o mesmo conceito do IVI, sendo a relação entre o volume de perdas aparentes e um fator equivalente a 5% do volume micromedido na cidade ou região (base anual), denominado perda aparente de referência.

Em relação ao Índice Percentual, apesar de sua fácil compreensão pelos técnicos e pela população em geral, apresenta grande dificuldade de comparação entre diferentes sistemas de abastecimento, sendo este influenciado pelo consumo per capita, pela presença de grandes consumidores e pela variação de consumo (VICENTINI, 2012). O SNIS utiliza três indicadores distintos para averiguar a distribuição de perdas de água no território nacional (SNIS, 2019):

- a) IN049 – Índice de perdas na distribuição, em percentual. Representa um indicador volumétrico, calculado pela diferença entre o volume de água produzido (sendo descontado deste o volume usado para atividades operacionais, e incrementado o volume de água tratada importada) e o volume de água consumido, dividido pelo volume de água produzido. A principal vantagem deste indicador é uma melhor comunicação para o público menos especializado;
- b) IN051 – Índice de perdas por ligação, em litros por ligação por dia. Responsável por avaliar as perdas de água considerando o número de ligações ativas de água, o que confere a este indicador melhores condições de medir a eficiência operacional dos prestadores de serviços. Calculado pela diferença entre o volume de água produzido e o de água consumido, somado ao volume de água tratada importada e descontado o volume destinado às atividades operacionais e especiais, dividido pela média da quantidade de ligações ativas de água do ano atual e anterior ao ano de referência.
- c) IN050 – Índice bruto de perdas lineares, em metros cúbicos por quilômetro de rede por dia.

Destaca-se que os indicadores propostos pelo SNIS não fazem diferenciação entre o valor das perdas reais e aparentes. De acordo com o SNIS (2022), os indicadores mais adequados consideram o tempo médio de abastecimento, a pressão média, a extensão das redes e o número de ligações de água.

#### **2.3.4. Gestão e controle de perdas aparentes**

O gerenciamento do controle de perdas envolve o acompanhamento de diversas ações especializadas, integradas e sequenciais, avaliando o andamento e medindo os resultados, e, utilizando-se destes, são definidas as próximas etapas de um programa de controle de redução de perdas em uma companhia de saneamento (TSUTIYA, 2006). Tardelli Filho (2016) menciona as principais ações que podem ser tomadas por companhias de saneamento para o combate a perdas aparentes:

- a) Substituição periódica dos hidrômetros (preventivamente), e imediata dos hidrômetros danificados (manutenção corretiva);
- b) Combate às fraudes a partir de denúncias, análises de variações atípicas de consumo ou outros indícios e evidências;
- c) Aprimoramento da gestão comercial das companhias (cadastros e sistemas comerciais).

A eficácia destas medidas depende da presença de cadastros técnicos (rede e ramais) e comerciais atualizados, assim como da medição dos volumes nos setores e subsetores do sistema (macromedição) e hidromedidação dos consumidores (micromedição), e também da compartimentação estanque dos setores de abastecimento e subsetores (zonas de pressão e distritos de medição e controle) (TARDELLI FILHO, 2016). Melato (2010) afirma que o direcionamento das ações para reduções de perdas aparentes se baseia na macromedição, na gestão comercial e na micromedição.

Loureiro *et al.* (2014) reforçam a ideia de que para atingir um desempenho elevado no controle de perdas, tanto reais quanto aparentes, metodologias e/ou tecnologias como leitura remota de dados e análise de dados são essenciais. A hidromedidação inteligente, com foco em características específicas do consumidor, permite que as concessionárias usufruam de uma ferramenta

poderosa para identificar e agir rapidamente para controlar volumes significativos de vazamentos pós-hidrômetros (BRITTON *et al.*, 2013).

Segundo Tsutiya (2018), os hidrômetros são a maior fonte de evasão de volumes não faturados das prestadoras de serviços de saneamento, sendo as principais causas:

- O hidrômetro mais utilizado no Brasil, classe metrológica B, não apresenta uma boa acurácia para medir pequenas vazões;
- Os hidrômetros apresentam um decaimento do nível de precisão ao longo de seu tempo de uso;
- Os hidrômetros apresentam uma curva típica de precisão que varia com a vazão;
- A indevida inclinação lateral do hidrômetro, quando do uso de medidores que apresentam diferenciação de classe metrológica ao trabalhar na posição horizontal ou vertical;
- A qualidade da água distribuída e;
- As características do perfil de consumo nos imóveis.

## 2.4. MICROMEDIÇÃO

### 2.4.1. Definição e a importância da micromedição

A micromedição do consumo de água consiste na apuração dos volumes de água de entrada dos consumidores finais por leituras periódicas coletadas por seus respectivos hidrômetros (denominação de um micromedidor especializado em mensurar o fluxo de água em uma tubulação) (AGUIAR, 2019). Garantir a confiabilidade da micromedição é uma ação importante para o controle de perdas, além de evitar prejuízos financeiros para a concessionária (GULARTE, 2005; SILVA *et al.*, 2016). Gularte (2005) menciona que, a micromedição é essencial para o controle de perdas de água, considerando que a submedição no parque de hidrômetros é considerada a maior parcela das perdas aparentes. Pereira e Ilha (2008) mencionam que um dos principais requisitos para uma adequada gestão do uso da água é a existência de medição, sendo que a correta medição dos volumes de água é extremamente útil para combater o desperdício,

pois permite que os volumes reais utilizados sejam apurados em substituição a taxas baseadas em consumos médios. Ao ser uma fonte de apuração de anomalias de consumo ocasionadas por vazamentos, os medidores também representam importante papel no contexto da segurança hídrica e da agenda ambiental (EMPINOTTI *et al.*, 2021).

#### **2.4.2. Hidrômetros**

Os hidrômetros, também chamados de medidores de vazão, são instrumentos de medição que mensuram o volume de água que transita em uma determinada seção de uma tubulação. Geralmente, as concessionárias de água são responsáveis por instalar e manter os hidrômetros de sua rede de abastecimento (AGUIAR, 2019). Complementarmente, Tsutiya (2006) define hidrômetros como aparelhos destinados a medir e indicar a quantidade de água fornecida pela rede distribuidora a um sistema predial.

Dentro de um sistema de abastecimento de água, os hidrômetros são equipamentos utilizados para a realização da micromedição do consumo dos clientes, permitindo a emissão de faturas de acordo com o consumo por matrícula (cliente). Os hidrômetros têm a aparência de um relógio, são instalados diretamente na tubulação, e seu funcionamento acontece conforme o fluido o atravessa (GULARTE, 2005). Em termos gerais, os hidrômetros são compostos geralmente por uma câmara de medição, um sistema de transmissão, e uma unidade de conversão que registra e apresenta os volumes escoados (TSUTIYA, 2006; VICENTINI, 2012). De acordo com a NBR 8194 (ABNT, 2019), cada hidrômetro possui uma numeração específica que representa informações de ano, capacidade, fabricante e número de série.

Scalizi *et al.* (2014), informam que no contexto do combate às perdas aparentes, o parque de hidrômetros deve ser submetido à manutenção preventiva ativa, considerando uma avaliação criteriosa dos hidrômetros a serem substituídos. Na grande maioria dos municípios do Brasil, empresas de saneamento costumam proceder com a substituição de hidrômetros com idade superior a cinco anos ou que possuam volume de medição maior ou igual a 2.000 m<sup>3</sup> (SCALIZI *et al.*, 2014). De acordo os autores, esse critério de substituição não é adequado pois desconsidera o desempenho metrológico. Salienta-se que



a substituição periódica de hidrômetros é de extrema importância para o combate à submedição do parque.

### **2.4.3. Tipos de hidrômetros e seus princípios de funcionamento**

Os hidrômetros mais utilizados podem ser classificados como hidrômetros de volume e hidrômetros de velocidade, todavia, recentemente novas tecnologias de medidores eletrônicos, como é o caso dos eletromagnéticos e ultrassônicos, foram aderidas ao mercado (VICENTINI, 2012). A escolha do tipo de hidrômetro depende das condições locais, operacionais e da importância do ponto a ser medido, sendo indispensável a calibração do medidor em todos os casos, feita em bancada ou no próprio local da instalação (TSUTIYA, 2018).

#### *2.4.3.1. Hidrômetros Volumétricos*

O hidrômetro volumétrico tem seu princípio de funcionamento baseado na medida real de volumes a partir do enchimento e esvaziamento, de forma cíclica, de sua câmara de medição. Essa característica torna-o mais sensível a baixas vazões em relação aos hidrômetros velocimétricos (PEREIRA e ILHA, 2008). Um mecanismo adequado permite que o movimento seja transferido da peça móvel da câmara de medição a um sistema de conversão, totalização e indicação (BAKER, 2016).

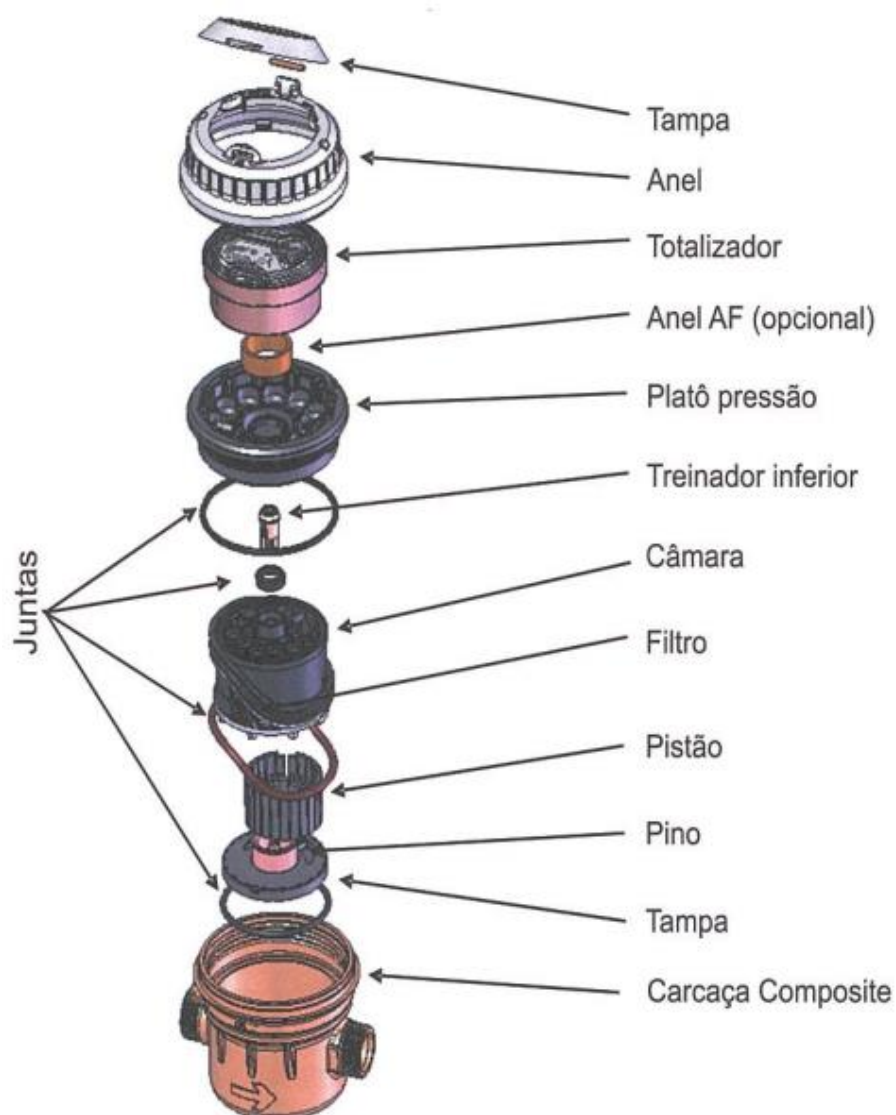
Os hidrômetros volumétricos, em média, têm uma vida útil longa e apresentam menores erros, sendo desta forma recomendados para o combate a perdas de receitas e desperdícios em sistemas domiciliares (VICENTINI, 2012). A principal desvantagem do hidrômetro volumétrico é que este apresenta uma maior sensibilidade aos sólidos em suspensão na água, que podem ocasionar o travamento do movimento da peça móvel da câmara de medição, interrompendo a passagem da água (VICENTINI, 2012). Complementarmente, Aguiar (2019) menciona que em sistemas com essas características, deve-se avaliar a instalação de filtros com malha de filtração fina para minimizar a influência dos sólidos sobre o hidrômetro volumétrico. As Figuras 5 e 6 apresentam um hidrômetro volumétrico.

Figura 5 – Hidrômetro Volumétrico



Fonte: Autor (2022).

Figura 6 – Hidrômetro Volumétrico, vista explodida



Fonte: Coelho (1996).

#### 2.4.3.2. Hidrômetros de velocidade

O hidrômetro de velocidade, também chamado de velocimétrico, taquimétrico ou inferencial, converte a velocidade de escoamento da água em números de rotações de uma turbina ou hélice que, por sua vez, é proporcional ao volume escoado através do medidor (VICENTINI, 2012; BAKER, 2016). A medição é obtida de forma indireta, por correlação entre o número de revoluções da turbina ou hélice e o volume de água (AGUIAR, 2019; BAKER, 2016).

As principais vantagens do hidrômetro velocimétrico se referem a sua reduzida perda de carga, menor custo em comparação aos hidrômetros volumétricos e a possibilidade de funcionamento acima das vazões de projeto em casos extremos. Todavia, os hidrômetros velocimétricos apresentam algumas desvantagens como uma vida útil menor em relação aos volumétricos, a necessidade de diversos cuidados na instalação (posicionamento na horizontal para que se mantenha a classe metrológica, e a necessidade de trechos retos a montante e jusante da tubulação) (PEREIRA e ILHA, 2008).

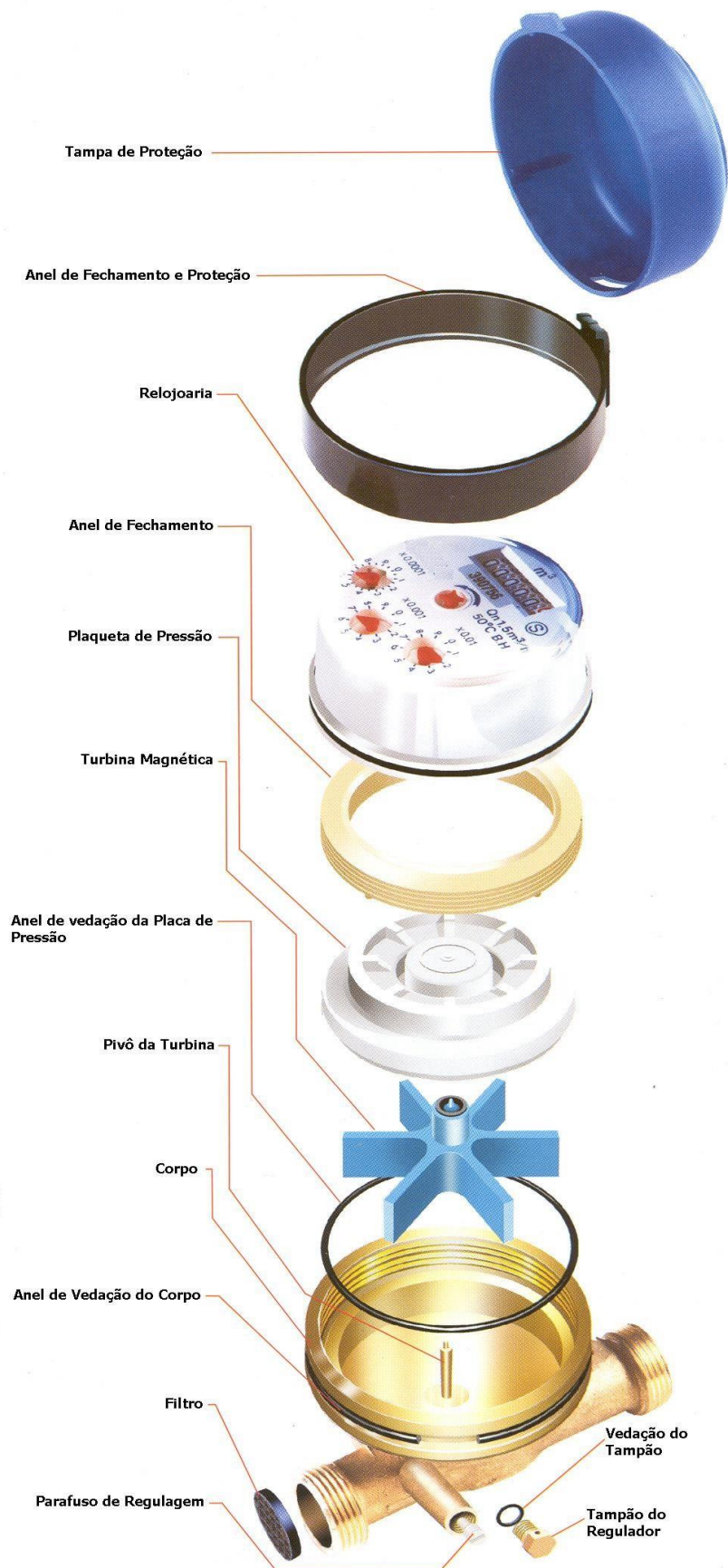
Os principais tipos existentes de hidrômetros velocimétricos são monojato (também conhecido como unijato), multijato, tipo Woltmann e compostos (PEREIRA e ILHA, 2008; COELHO, 1996). O hidrômetro monojato, unijato ou jato único funciona de acordo com o seguinte princípio: a turbina é acionada por somente um jato de líquido, que incide diretamente sobre ela ocasionando o giro da mesma. Ressalta-se que impurezas aglomeradas na passagem podem aumentar a velocidade do fluido, ocasionando imprecisões nas medições (AGUIAR, 2019). As Figuras 7 e 8 apresentam um hidrômetro velocimétrico unijato.

Figura 7 – Hidrômetro Velocimétrico Unijato



Fonte: Autor (2022).

Figura 8 – Hidrômetro Velocimétrico Unijato, vista explodida

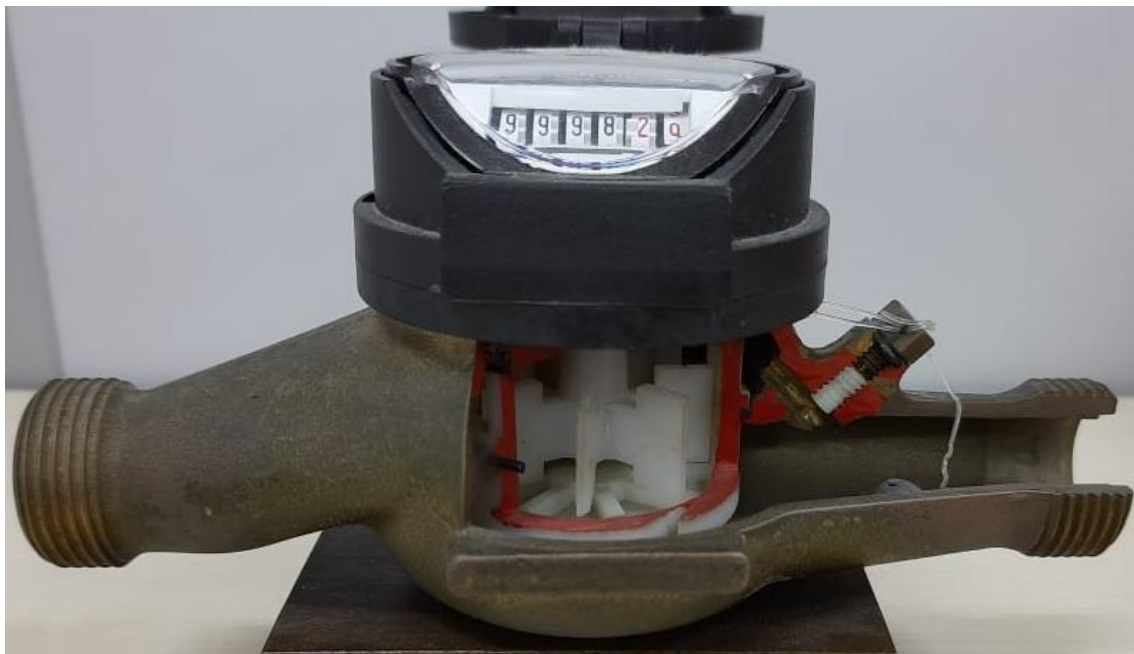


Fonte: Gularte (2005).

Em contraste com o modelo unijato, no hidrômetro taquimétrico multijato, como o próprio nome evidencia, múltiplos jatos incidem tangencialmente à turbina. O hidrômetro multijato tende a ter uma maior durabilidade quando comparado ao unijato em situações com regime de vazões mais elevadas, entre a vazão nominal e a máxima (AGUIAR, 2019). Hidrômetros multijato, em teoria, apresentam um pior desempenho para baixas vazões e possuem vazões iniciais mais altas, em relação aos hidrômetros unijato (ARREGUI *et al.*, 2007).

De forma similar aos hidrômetros unijato, a velocidade angular do impulsor depende da velocidade dos jatos de água. Consequentemente, qualquer modificação que afete o fluxo ou a velocidade de entrada da água na câmara de mensuração irá afetar a curva de erro (ARREGUI *et al.*, 2007). As Figuras 9 e 10 apresentam um hidrômetro multijato.

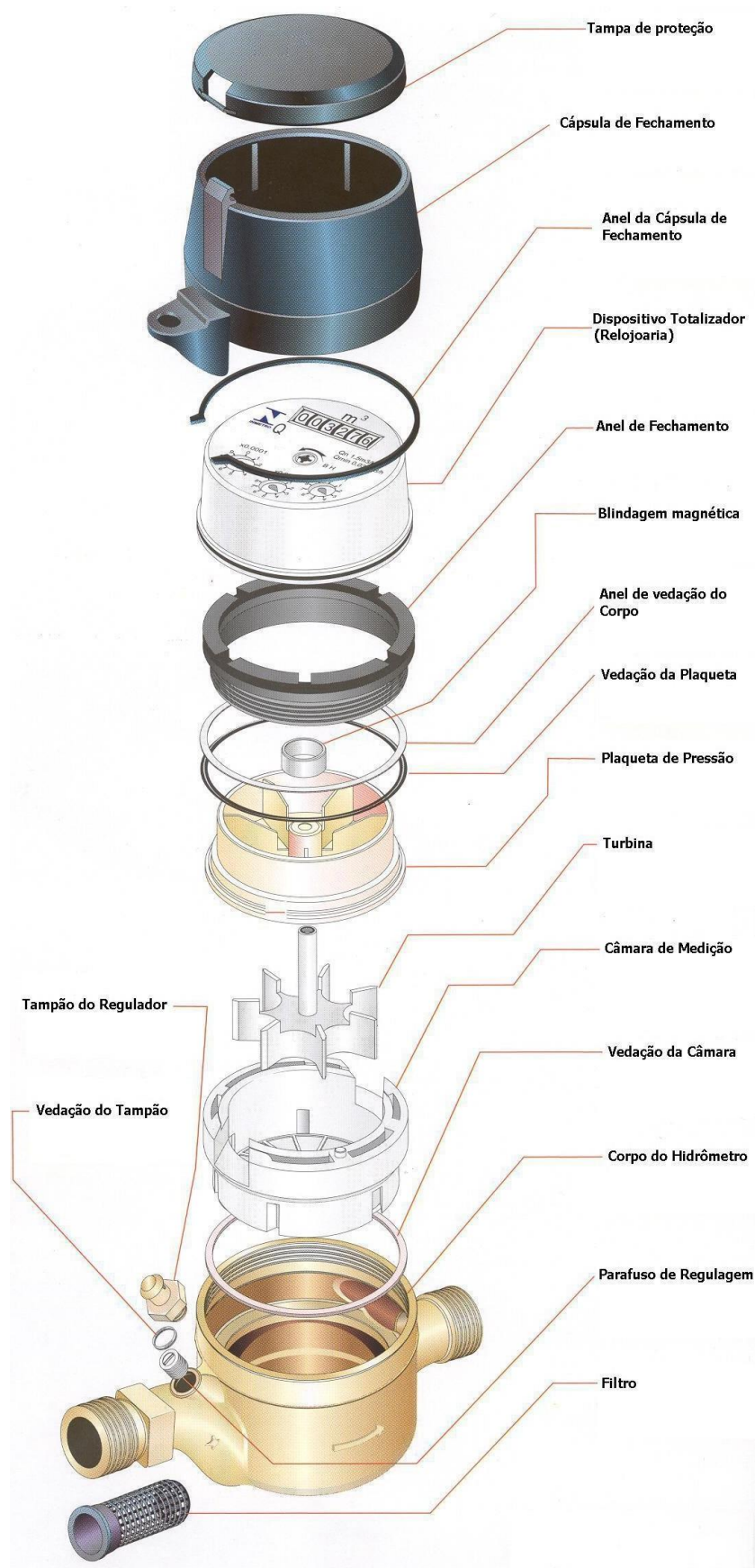
Figura 9 - Hidrômetro Velocimétrico Multijato



Fonte: Autor (2022).



Figura 10 – Hidrômetro Velocimétrico Multijato, vista explodida



Fonte: Gularte (2005).

O hidrômetro velocimétrico do tipo Woltmann opera de acordo com o seguinte princípio: uma turbina instalada dentro de um duto fechado atua no fluxo, na direção axial em relação ao eixo da turbina (AGUIAR, 2019). A Figura 11 apresenta um hidrômetro velocimétrico do tipo Woltmann.

Figura 11 - Hidrômetro Velocimétrico Woltmann



Fonte: Autor (2022).

#### 2.4.3.3. Hidrômetros Eletromagnéticos

Em 1832 Faraday descobriu a possibilidade de induzir voltagens em líquidos se movimentando ao longo de um campo magnético, todavia o primeiro projeto de um hidrômetro eletromagnético registrado foi feito por Willians em 1930 (BAKER, 2016). Baker (2016) cita ainda que o hidrômetro eletromagnético utiliza o princípio da Lei da Indução de Faraday em seu funcionamento. Segundo o autor, uma indução magnética ocorre quando um fluido condutor se move por um campo magnético. Esse campo magnético é criado, normalmente, por bobinas posicionadas nas paredes da tubulação perpendicular ao fluxo do líquido. Finalmente, dois eletrodos são posicionados nas paredes da tubulação, perpendicular a ambos, o fluxo do líquido e as bobinas indutoras. Tais eletrodos são responsáveis por registrarem a voltagem do sistema, que pode ser utilizada para inferir o fluxo de água na tubulação, utilizando-se de equações e constantes fornecidas pelo fabricante do hidrômetro (BAKER, 2016).

Martin (2005) menciona que é comum que o hidrômetro eletromagnético seja utilizado para validar as condições de instalações de hidrômetros, pois este é considerado um dos melhores hidrômetros disponíveis, sendo amplamente

utilizado em sistemas de abastecimento de água. Ademais, o hidrômetro eletromagnético tem ampla utilização no setor industrial para mensuração e monitoramento de fluxo, devido a sua simples estrutura e alta precisão (PENG *et al.*, 2012). A Figura 12 apresenta um hidrômetro eletromagnético.

Figura 12 - Hidrômetro Eletromagnético



Fonte: Autor (2022).

#### 2.4.3.4. Hidrômetros Ultrassônicos

A primeira proposta de utilização de ondas ultrassônicas para mensurar fluxo de um líquido foi proposta por uma patente alemã em 1928, porém somente a partir de 1945 a ideia foi difundida com a invenção de transdutores piezoelétricos, que tornaram aplicações ultrassônicas mais atrativas para o mercado (BAKER, 2016). Segundo o autor, hidrômetros ultrassônicos utilizam ondas sonoras para determinar a velocidade de um fluido presente em uma tubulação. Quando não há fluxo na tubulação, as frequências das ondas ultrassônicas transmitidas na tubulação e suas respectivas ondas refletidas pelo fluido são as mesmas. Já quando há a presença de fluxo na tubulação, a frequência da onda refletida pelo fluido é distinta devido ao efeito Doppler. Quanto mais rápido o fluido se move, maior a frequência, que aumenta de forma linear. Finalmente, o transmissor acoplado processa os sinais das ondas transmitidas e suas reflexões para determinar o fluxo do líquido (BAKER, 2016).



Hidrômetros ultrassônicos apresentam a grande vantagem de não serem invasivos, o que os torna mais adequados quando aplicados em sistemas de distribuição de gás, para mensurar o fluxo de oleodutos, e do abastecimento de água, além de outras áreas (RAJITA e MANDAL, 2016). A Figura 13 apresenta um hidrômetro ultrassônico.

Figura 13 – Hidrômetro Ultrassônico



Fonte: Autor (2022).

#### 2.4.4. Vazões e classificação metrológica

Após certo tempo de serviço, as peças que compõem um hidrômetro sofrem um desgaste, especialmente em se tratando de medidores mecânicos, ocasionado por atritos e sólidos em suspensão que aderem às partes internas do hidrômetro, e que eventualmente afetam a precisão do aparelho (COELHO, 2009). Os principais fatores que afetam a exatidão do hidrômetro em longo prazo são a qualidade da água, o regime de funcionamento do sistema de abastecimento, o padrão de instalação (horizontal, vertical ou inclinado), assim como o projeto e qualidade do hidrômetro utilizado (ARREGUI *et al.*, 1998; VICENTINI, 2012).

Em suma, Fontanazza *et al.* (2014) mencionam que, assim como qualquer outro instrumento de medição, os hidrômetros são incapazes de registrar com total exatidão o volume de água que um usuário consome. Ademais, todo

hidrômetro possui limitações de medição: o erro pode ser positivo ou negativo, dependendo da vazão presente na tubulação. Os hidrômetros podem ser caracterizados quando às classes de vazão e metrológica. As classes de vazão podem ser definidas por (AGUIAR, 2019; TSUTIYA, 2006):

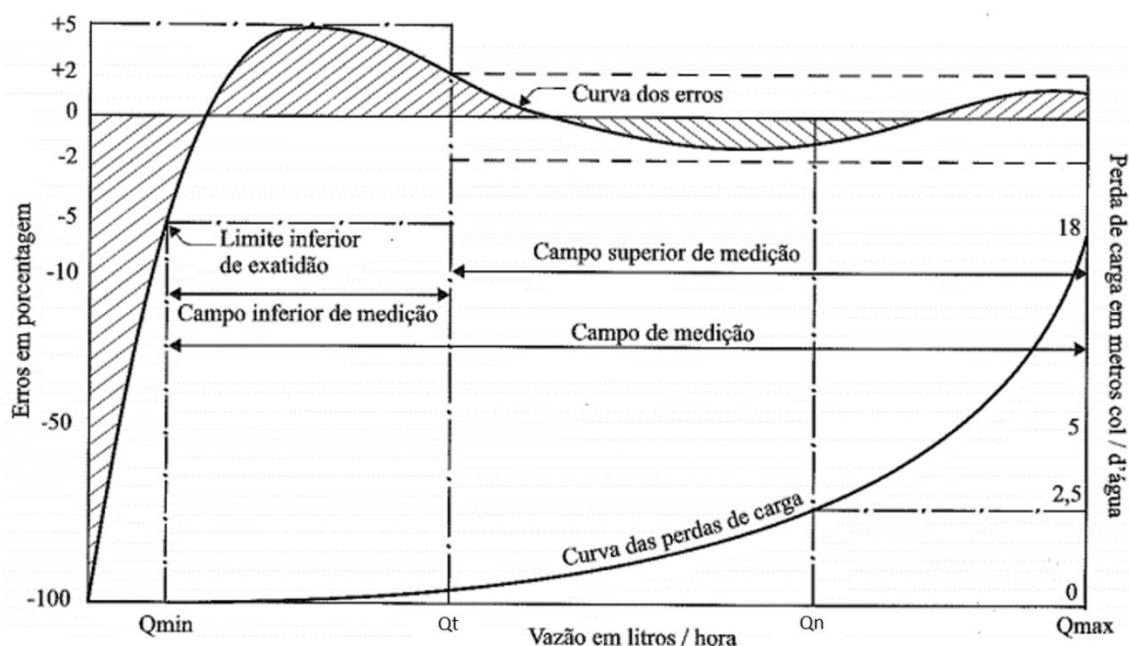
- Vazão ( $Q$ ): corresponde ao quociente entre o volume de água que atravessa o medidor e o tempo de passagem deste volume;
- Vazão de sobrecarga, limite superior de medição, ou vazão máxima ( $Q_{\text{máx}}$ ): corresponde à vazão até a qual o medidor pode funcionar de forma satisfatória por um curto período de tempo, sem que este seja danificado;
- Vazão Permanente ou Nominal ( $Q_n$ ): corresponde à vazão até a qual o hidrômetro pode funcionar de forma satisfatória, sob condições normais de uso;
- Vazão de transição ( $Q_t$ ): é um valor de vazão intermediário entre  $Q_{\text{mín}}$  e  $Q_n$  no qual ocorre a transição do campo inferior de medição para o campo superior de medição;
- Limite inferior de medição ou vazão mínima ( $Q_{\text{mín}}$ ): corresponde à menor vazão em que o medidor registra o consumo sem que haja erros maiores que os admissíveis.

Complementarmente, Tsutiya (2006) também define os seguintes conceitos:

- Capacidade do hidrômetro: normalmente atribuída a hidrômetros de menor porte. Indica de forma simples a designação de capacidade relacionada à vazão de sobrecarga, tendo o mesmo valor numérico;
- Campo de medição: corresponde ao intervalo de vazões compreendido entre  $Q_{\text{mín}}$  e  $Q_{\text{máx}}$  sendo este subdivido em campo inferior de medição ( $Q_{\text{mín}}$  a  $Q_t$ ) e campo superior de medição ( $Q_t$  a  $Q_{\text{máx}}$ ).

A Figura 14 apresenta as curvas características de um hidrômetro de velocidade.

Figura 14 – Curvas características de hidrômetro de velocidade



Fonte: Tsutiya (2006), adaptado pelo Autor (2022).

Os hidrômetros também podem ser classificados de acordo com sua classe metrológica, que é definida através de parâmetros pré-estabelecidos considerando os erros máximos admissíveis para os campos inferior e superior de medição (TSUTIYA, 2006). As classes metrológicas A, B e C estão previstas para hidrômetros de vazão igual ou menor que  $15\text{m}^3/\text{h}$ , sendo a Classe C a mais sensível à marcação de pequenas vazões, seguida pela Classe B, e finalmente pela Classe A (TSUTIYA, 2018). Em suma, os hidrômetros de Classe C medem com maior exatidão pequenas vazões, em relação às classes B e A (TSUTIYA, 2018).

Em contraste, Moraes (2019) menciona que segundo a International Organization for Standardization (ISO), os hidrômetros podem ser classificados nas classes metrológicas A, B, C e D. O Regulamento Técnico Metrológico 295/2018 (INMETRO, 2018) traz o conceito de faixa de vazão (*range*) e classe de exatidão em substituição às classes metrológicas. Contudo, destaca-se que a imensa maioria dos medidores instalados no Brasil, até o momento desta publicação, se tratam de medidores aprovados pelo Regulamento Técnico Metrológico 246/2000. Destaca-se ainda que, apesar da mudança de nomenclatura, o conceito permanece inalterado, uma vez que medidores com

maior faixa de vazão e classe de exatidão, apresentam condição metrológica superior.

Segundo Moraes (2019), a classe metrológica A está praticamente em desuso, porém, ainda pode ser encontrada no setor agrícola. Segundo o autor, a classe metrológica B é a mais utilizada atualmente, devido ao seu custo-benefício, tanto em sistemas de irrigação quanto em sistemas de abastecimento urbano. Por fim, a classe metrológica C corresponde aos hidrômetros mais precisos, devido a sua configuração de construção e material, desta forma apresentando pouca resistência às forças de atrito nas partes móveis do hidrômetro, o que permite maior sensibilidade a baixas vazões (MORAIS, 2019).

#### **2.4.5. Vida útil dos hidrômetros**

Como todos os aparelhos, os hidrômetros estão sujeitos a desgastes, quebras e desajustes. Por isso, recomenda-se que os hidrômetros sejam periodicamente retirados, examinados e reajustados (TSUTIYA, 2006). Para o autor, o tempo de vida útil de um hidrômetro depende da qualidade da água presente no sistema de abastecimento, assim como dos materiais e cuidados de fabricação do hidrômetro. Ademais, há de se considerar que a vida útil é influenciada ainda por fatores ligados a problemas de instalação (TARDELLI FILHO, 2006). Recomenda-se que o intervalo de troca de hidrômetros de grande capacidade seja menor, pois estes apresentam um desgaste maior, levando em consideração também o retorno financeiro que a substituição pode proporcionar, já os grandes consumidores representam significativa parcela (cerca de 20% a 30%) do faturamento das concessionárias (TSUTIYA, 2006). Coelho (2009) salienta-se que o envelhecimento dos hidrômetros é um fator de perda gradativa de precisão de medição que, por consequência, faz com que haja aumento das perdas aparentes do sistema.

A manutenção preventiva de hidrômetros por motivos de deterioração pode ser executada de acordo com a idade de instalação na rede, tipicamente estimada entre cinco e dez anos para hidrômetros de pequenas capacidades (COELHO, 2009). Também pode ser executada pelo total registrado no mostrador, normalmente representado por um período entre 3.500 e 7.000 horas de operação sob vazão permanente (TSUTIYA, 2006).

Ademais, os hidrômetros também devem ser substituídos de forma corretiva, ou seja, quando forem detectados erros de funcionamento ou quando forem testados e ocorrer alteração na calibração (AGUIAR, 2019). Complementarmente, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO, 2000; INMETRO, 2018) estabelece as vazões de ensaio mínima, de transição e nominal e suas respectivas tolerâncias de erro, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Tolerâncias para hidrômetros em uso

<b>Vazão</b>	<b>Erro admissível</b>
<b>Mínima</b>	<b>+/- 10%</b>
<b>Transição</b>	<b>+/- 5%</b>
<b>Nominal</b>	<b>+/- 5%</b>

Fonte: INMETRO, 2000, e INMETRO 2018, adaptado pelo autor.

#### **2.4.6. Submedição e Sobremedição em hidrômetros**

A submedição dos hidrômetros ocorre quando o volume de água registrado é inferior ao que realmente atravessa o hidrômetro, ou seja, uma quantidade maior de água chega ao consumidor sem que tal excesso seja contabilizado, gerando perdas à companhia de saneamento (AGUIAR, 2019). Para o autor, de forma oposta, a sobremedição ocorre quando um hidrômetro registra uma quantidade maior de água ao que realmente o atravessou. A submedição e a sobremedição podem ser denominadas, respectivamente, de acordo com seu tipo de erro: erro negativo e erro positivo (AGUIAR, 2019). Todavia, é importante ressaltar que experimentos com hidrômetros apresentaram em grande parte erros negativos (SILVA, 2015). Medidores bem aferidos e adequadamente dimensionados têm uma faixa de variação de precisão entre 0,5% e 2% para mais (que configura o erro positivo) ou para menos (que de forma análoga configura o erro negativo) (VICENTINI, 2012).

Tratando-se da submedição, é importante notar que um percentual importante do volume consumido em sistemas de abastecimento está em faixas de vazão abaixo do campo de medição, ocasionando uma perda de precisão de medição nessas faixas (SNSA, 2018). A sobremedição, todavia, de acordo com Silva (2014), é uma característica predominante a medidores antigos, que possuíam características que acarretavam na incrustação de partículas em

suspensão presentes na água, reduzindo o diâmetro dos orifícios de passagem, consequentemente elevando a velocidade do jato de água incidente sobre a turbina, ocasionando o erro positivo.

#### **2.4.7. Fatores intervenientes nas perdas aparentes de água por submedição**

A submedição nos hidrômetros pode ser provocada por vários fatores, por exemplo, o perfil de consumo horário, a velocidade da água, a concentração de sólidos em suspensão na água, condições climáticas e/ou ambientais, dimensionamento inadequado e posição de instalação (ARREGUI *et al.*, 2010). Um dos fatores que pode influenciar a submedição de hidrômetros é a presença de ar na rede de abastecimento de água. Lopes *et al.* (2011) realizaram um estudo piloto com o intuito de quantificar o volume de ar aferido por hidrômetros residenciais velocimétricos. Em uma primeira instância, sob condições normais de operação e rede, o volume de ar medido pelos hidrômetros foi comparável aos valores encontrados na água natural. Todavia, em uma segunda instância, logo após o esvaziamento da rede interligada ao ramal, foi constatada uma correlação positiva entre a duração da paralisação de abastecimento e a afluência de ar aos ramais domiciliares. Complementarmente, um estudo conduzido por Scalize e Leite (2013) concluiu que o balanço de água na rede de distribuição exerce influência sobre o volume de água medido. O experimento consistiu em submeter medidores a condições de refluxo, que é caracterizada por variações de pressão entre os ramais e a rede de distribuição, também conhecido como “Balanço de Rede”.

Gonçalves e Itonaga (2007) ressaltam que o posicionamento adequado dos medidores é uma atividade por vezes negligenciada por companhias de saneamento. O posicionamento inadequado, especialmente em hidrômetros velocimétricos, influencia a precisão das medições, ocasionando a submedição. Complementarmente, Aguiar (2019) menciona que a instalação inclinada de forma inadequada pode causar uma maior submedição ou até mesmo acelerar o desgaste do hidrômetro.

A submedição ocasionada pelo envelhecimento de hidrômetros é acentuada em situações em que um reservatório está presente entre o

hidrômetro e o ponto final de utilização da água (CRIMINISI *et al.*, 2009). Criminisi *et al.* (2009) afirmam que a principal razão para a utilização de reservatório pode ser atribuída à intermitente disponibilidade de água em sistemas de abastecimento, sendo que os usuários finais optam por armazenar água para uma eventual falta deste recurso na rede. A norma brasileira NBR 5626 (ABNT, 2020), traz a necessidade da instalação de reservatórios em sistemas hidráulico prediais. Todavia, a utilização de reservatórios afeta o perfil de demanda em unidades residenciais: os reservatórios normalmente utilizam um dispositivo denominado torneira de boia, que reduz a demanda instantânea de água, e consequentemente reduz a vazão de água que atravessa o hidrômetro (AL-WASHALI *et al.*, 2020). Consequentemente, o hidrômetro pode operar abaixo da vazão mínima ( $Q_{min}$ ), ocasionando a submedição (CRIMINISI *et al.*, 2009). Miranda (2005) argumenta que esta é a principal razão da elevada submedição por vazão mínima no Brasil.

Na medida em que os hidrômetros avançam em volumetria total registrada, em decorrência dos fluxos passantes pelo equipamento, as taxas de submedição tendem a aumentar, ou seja, ocorre a perda de desempenho, a qual fomenta os programas de manutenção preventiva dos parques de medidores (YAZDANDOOST *et al.*, 2018). As observações quanto à perda de desempenho em decorrência do tempo de vida citadas por Tardelli Filho (2016), com relação direta com a volumetria registrada, é uma das hipóteses a serem testadas.

Mutikanga *et al.* (2011) apresentam estudo destacando a perda do desempenho de medidores de água de pistão rotativo, com vazão nominal de 3 m<sup>3</sup>/hora, sendo a perda de desempenho acentuada pela presença de materiais particulados na água. Para os autores esse é um fator de grande influência para determinação do tempo ótimo em que o medidor deve permanecer em campo. Szilveszter *et al.* (2015) realizaram estudo de desempenho de medidores em um parque da concessionária de abastecimento da cidade de Ibarra, Equador. A pesquisa dos autores focou em três aspectos: elaboração de curva de erro do hidrômetro com base em sete vazões ensaiadas; avaliação do hidrômetro em função da classe metrológica, fabricante e volume registrado totalizado; e a influência do desempenho dos medidores no balanço hídrico. Os resultados de Szilveszter *et al.* (2015) indicam que 44% dos medidores analisados funcionaram em condições ideais. Segundo os autores, o erro ponderado obtido por meio de

dois padrões de consumo diferentes indica uma diferença de 0,95%, com impacto importante no balanço hídrico e nos resultados dos indicadores de desempenho da micromedição. Fontanazza *et al.* (2012) abordam a questão da perda de desempenho de medidores, destacando a importância do hidrômetro para medição do consumo dos usuários e coleta de dados para fins de faturamento, avaliação do balanço hídrico, e identificação de falhas na rede, além de furto de água e comportamento anômalo do usuário. Os autores destacam a presença de erros intrínsecos que causam as perdas aparentes, e apresentam proposta de programa de gestão de ativos, com substituições periódicas dos medidores, com base em um indicador de substituição composto, o qual considera três dos parâmetros mais influentes que podem afetar desempenho de medição: idade do medidor, volume total medido, e pressão da rede. Musaazi *et al.* (2021) realizaram estudo acerca da influência das pressões hídricas nos sistemas de abastecimento de água, na precisão do medidor de água. Os autores apuraram curvas de erro de medição e demonstraram que a precisão da medição foi influenciada positivamente quando a pressão foi aumentada de 10 para 50 mca. Contudo, os autores constataram que a idade do medidor é um fator muito mais determinante no resultado de sua precisão. No estudo constatou-se que a precisão da medição foi relativamente constante após um período de 5 anos. O parâmetro menos sensível foi a pressão de trabalho que causou uma ligeira alteração no volume faturado anual. Mendoza *et al.* (2021) apresentam estudo de caso de desempenho de medidores, analisando a qualidade metrológica e a degradação da precisão, em função do volume acumulado e do tempo de instalação. Os autores testaram hidrômetros em três vazões para avaliar a evolução do erro relativo e para determinar as curvas de erro médio, e por sua vez, a taxa de deterioração. Também foi calculado o volume de perdas aparentes decorrentes das imprecisões dos medidores. Os resultados da investigação estabelecem que os erros de submedição e taxa de degradação anual foram de -15% e -1,88%, respectivamente, para vazões abaixo de 30 L/h.

Marnewick *et al.* (2019), em estudo acerca do período ótimo de substituição de hidrômetros para minimizar a perda de receita de água, destacam que se deve buscar estratégias adequadas de substituição de medidores devido a imprecisões crescentes dos hidrômetros. Os autores correlacionaram o erro

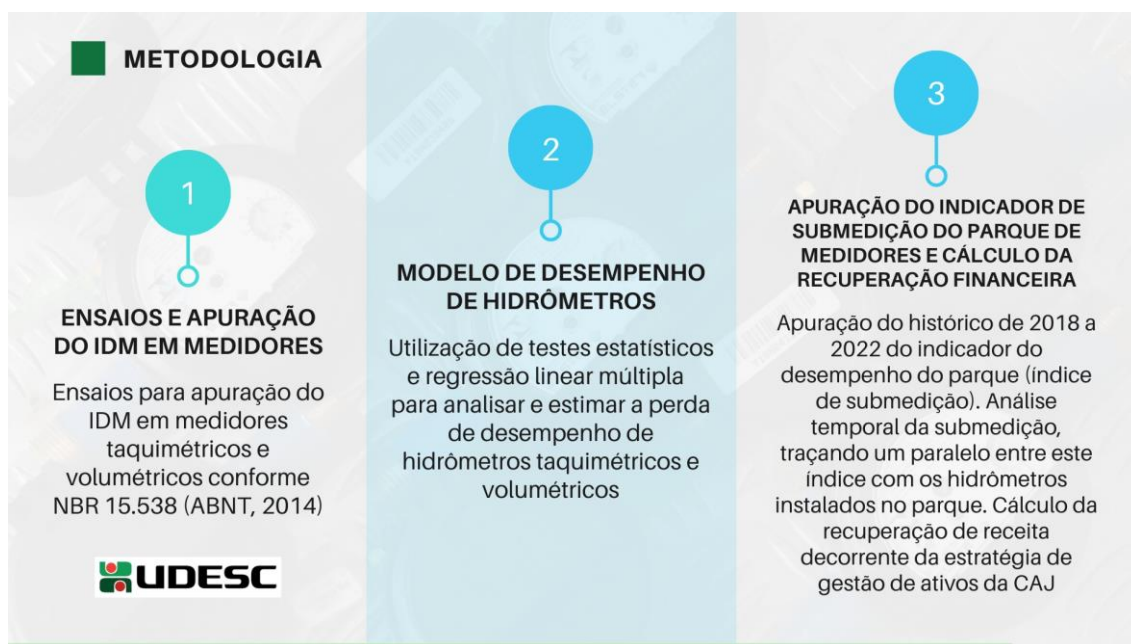


relativo do medidor com a idade do mesmo, e o volume total registrado. O método da cadeia de valor presente líquido foi usado para determinar o período ideal de substituição do hidrômetro doméstico. O trabalho não encontrou relação entre a idade do hidrômetro e o volume total registrado. Foi encontrada uma relação entre a idade do hidrômetro e a precisão e também entre o volume total registrado e a precisão.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo constam os procedimentos metodológicos adotados na presente pesquisa, com o propósito de se atingirem os objetivos traçados. No desenvolvimento deste estudo, inicialmente realizou-se uma pesquisa de caráter exploratório a partir de um levantamento bibliográfico. De fundamental importância para obtenção de uma base conceitual acerca do assunto, a revisão bibliográfica contemplou principalmente temas relacionados às perdas de água em sistemas de distribuição, e mais especificamente perdas aparentes originárias da submedição, ou seja, decorrentes da perda de desempenho dos medidores de água instalados nas ligações componentes do sistema público de abastecimento. A metodologia da pesquisa seguiu o fluxograma da Figura 15. Os procedimentos metodológicos detalhados estão descritos a seguir.

Figura 15 - Fluxograma da Metodologia da Pesquisa



Fonte: Autor (2022).

#### 3.1. ENSAIOS E APURAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO METROLÓGICO – IDM EM MEDIDORES

Para a obtenção de um modelo de previsão do desempenho dos medidores de água, ou seja, para analisar e modelar estatisticamente a perda

de desempenho dos hidrômetros, os mesmos foram submetidos a ensaios utilizando-se a metodologia presente na norma NBR 15.538 (ABNT, 2014), detalhada neste capítulo. Os medidores ensaiados são dos tipos volumétrico e taquimétrico, e de diferentes fabricantes, e volumetria total registrada. Tais diferenças de características geram diferentes curvas de queda de desempenho.

Como os medidores eletrônicos não se desgastam com o tempo por não possuírem partes móveis (LEE *et al.*, 2017), optou-se então pela realização de ensaios em medidores dos tipos volumétrico e taquimétrico, também por apresentarem uma maior incidência no parque de medidores da CAJ. Lee *et al.* (2017), apresentam estudo em que os medidores eletrônicos apontaram erros muito próximos a zero para todas as vazões de ensaio utilizando-se a norma ISO 4064-1 (ISO, 2014), a qual apresenta similaridade metodológica de ensaio em vazões com a NBR 15.538 (ABNT, 2014).

O princípio de coletar amostras de uma população é fundamental para entender a estatística (BAGULEY, 2012). Larson e Farber (2010) afirmam que os dados amostrais podem ser usados para formar conclusões sobre populações. Para os autores, os dados amostrais devem ser coletados utilizando um método apropriado, e, se assim não for, eles não terão valor ou significado algum. Neste contexto, para esta pesquisa utilizou-se metodologia de planejamento de experimentos (*Design of Experiments* - DoE).

O experimento, dentro da metodologia de planejamento de experimentos, pode ser definido como um ou uma série de testes em que são realizadas alterações propositalmente nas variáveis de entrada (independentes) de tal modo que se possam ser observadas e identificadas as razões para mudanças na variável resposta (dependente) (MONTGOMERY; RUNGER, 2018). O planejamento de experimentos inclui uma série de ferramentas estatísticas usadas para classificar e quantificar sistematicamente as relações de causa e efeito entre variáveis e resultados (JANKOVIC *et al.*, 2021).

Segundo Jankovic *et al.* (2021), embora esta metodologia tenha sido desenvolvida principalmente para fins agrícolas pelo estatístico britânico Sir Ronald Fischer na década de 1920, o planejamento de experimento como um método estatístico tem sido amplamente aplicado em diferentes campos da ciência e da indústria, especialmente para apoiar o projeto, desenvolvimento e otimização de produtos e processos.

As etapas de um planejamento de experimento incluem a definição de seu objetivo; a definição das variáveis de resposta; os fatores determinantes; o projeto experimental e a execução do experimento; bem como a análise estatística (JANKOVIC *et al.*, 2021). Segundo os autores, o planejamento de experimento se inicia selecionando o processo a ser investigado. A declaração do problema leva ao estabelecimento dos objetivos com base nos quais o indicador de desempenho (variável de resposta) precisa ser definido. A variável resposta deve representar uma medida quantitativa do comportamento do processo. Como uma etapa essencial adiciona-se a seleção dos fatores que afetam o indicador de desempenho e como eles são discretizados, além do número de execuções experimentais. A terceira etapa abrange a execução do experimento de acordo com o planejado e a coleta de dados. A última etapa inclui a análise de dados usando ferramentas estatísticas (a exemplo de ANOVA e métodos estatísticos associados) e interpretação dos resultados, levando a uma melhor compreensão do comportamento do processo ou sua otimização (JANKOVIC *et al.*, 2021).

Neste estudo serão ajustados modelos de regressão múltipla, em que a variável resposta é o índice de desempenho metrológico – IDM do hidrômetro; os fatores são a marca e a volumetria total registrada; o experimento se trata da execução do ensaio de IDM conforme metodologia presente na norma NBR 15.538 (ABNT, 2014). Os fatores elencados para este planejamento de experimento, foram selecionados conforme experiência do autor e revisão da literatura realizada, sendo definidos:

- a) modelo (tipo do medidor, ou seja, taquimétrico ou volumétrico);
- b) marca (fabricante do produto); e
- c) volumetria (totalizador do volume transpassado pelo medidor em toda sua vida útil).

Quanto ao modelo do medidor (taquimétrico ou volumétrico), optou-se pela confecção de modelagens distintas, ou seja, uma para cada tipo, afim de se obterem modelos mais precisos já que a tecnologia envolvida na medição de água difere muito de um para outro tipo.

O fator “marca” se trata de fator qualitativo e se refere à diversidade de fabricantes que constam no parque de medidores estudado. Já o fator “volumetria”, se trata de valor quantitativo contínuo e foi categorizado, sendo

estabelecidos três níveis para o planejamento do experimento, organizados da seguinte forma: zero a 600 m<sup>3</sup>; 600 a 1.200 m<sup>3</sup>; e acima de 1.200 m<sup>3</sup>. O planejamento da pesquisa está representado na árvore da Figura 16, para os medidores taquimétricos e volumétricos. Trata-se de um planejamento fatorial completo, cujo desenho consiste em todas as combinações possíveis dos fatores e níveis (JANKOVIC *et al.*, 2021).

Figura 16 - Planejamento da pesquisa



Fonte: Autor (2022).

Apurou-se, na sequência, a quantidade de amostras para estabelecimento de cada categoria. Kelley *et al.* (2003) afirmam que o tamanho da amostra depende fundamentalmente de fatores como os recursos disponíveis, bem como da qualidade estatística necessária para se chegar aos objetivos traçados. A quantidade de amostras para estabelecimento do modelo foi calculada utilizando-se o pacote BDEsize (CHUNG, 2021) do software R (R TEAM, 2009), com base no planejamento do experimento e do tamanho do parque de medidores, ou seja, 160 mil ligações. Foi utilizado um nível de significância de 5% e poder do teste de 80% e apenas efeitos principais.

Para o modelo taquimétrico trata-se de um experimento fatorial completo, com dois fatores e três níveis (3<sup>2</sup>) resultando em um mínimo de nove combinações possíveis (Figura 16). Considerando os valores para nível de

significância e poder do teste adotados, são necessárias três amostras (réplicas) para cada ramo.

Para o modelo volumétrico tem-se um experimento fatorial completo, com dois fatores, sendo um fator com dois níveis e outro com três níveis ( $2 \times 3$ ), resultando em um mínimo de seis combinações possíveis (Figura 16). O número de amostras mínimo por combinação para o nível de significância e poder do teste escolhidos é  $n = 4$ .

Foram ensaiados 7 artefatos para cada ramo da árvore amostral (Figura 16), resultando em sete réplicas do desenho original, acima do tamanho mínimo necessário. Para fins de validação do modelo, foram ainda ensaiadas outras 3 amostras de cada combinação.

A seleção de hidrômetros extraídos do parque dentro do estabelecido no planejamento de experimentos foi realizada de forma aleatória. Apurou-se um inventário do parque de medidores da CAJ, o qual conta com cerca de 160 mil hidrômetros de diversas marcas e tipos. O inventário consiste em um levantamento de como o parque se encontra em termos de diversas características e suas combinações. O inventário traz principalmente quantitativos e percentuais das seguintes informações: tipos de hidrômetros, fabricantes, classe metrológica, e histograma de consumo. Elencados os grupos de interesse desta pesquisa, foram realizadas substituições dos hidrômetros de interesse, sendo estes artefatos preservados para posterior realização dos ensaios.

Destaca-se que, o conceito de aleatoriedade, ao contrário da convenção popular de que esta seja caótica, representa uma ferramenta poderosa para obtenção de amostras e condução de experimentos (AGRESTI *et al.*, 2018). Uma amostra tende a ser um bom reflexo da população quando cada componente da população tem a mesma chance de ser incluído na amostra selecionada, sendo este o princípio da seleção aleatória (AGRESTI *et al.*, 2018).

Os métodos de ensaio foram realizados conforme especificações da norma NBR 15.538 (ABNT, 2014), que define os procedimentos para avaliação da eficiência em medidores de água fria. O objetivo final da realização do ensaio preconizado na NBR 15.538 (ABNT, 2014) é o levantamento do IDM de cada medidor. A avaliação dos medidores é quantificada, portanto, por meio do IDM,

que se trata de um valor numérico percentual correspondente ao desempenho dos hidrômetros, calculado pela equação 3 (ABNT, 2014).

$$IDM = 100 + EP \tag{3}$$

Onde:

*IDM* é o índice de desempenho metrológico;

*EP* é o erro ponderado, ou seja, a parcela de água não registrada pelo medidor. Este é um parâmetro de avaliação de desempenho obtido pela associação entre o perfil de consumo típico descrito na NBR 15.538 (ABNT, 2014) e o erro relativo apresentado pelo medidor de água, em faixas de vazões previamente definidas, representado pela equação 4 (ABNT, 2014).

$$EP = \frac{\{\sum[(erro*Qx)*(peso*Qx)]\}}{100} \tag{4}$$

Onde:

*Qx* são as vazões do ensaio: dez faixas de vazões, cada qual com um respectivo peso percentual baseado no perfil de consumo típico, conforme Tabela 4 (ABNT, 2014).

Tabela 4 - Parâmetros para determinação do erro de indicação e IDM

Faixas de Vazão (L/s)	Vazões de Ensaio (L/h)	Perfil de Consumo (%)
0 a 5	2,5	4,56
5 a 15	10	6,99
15 a 30	22,5	6,83
30 a 50	40	7,34
50 a 150	100	23,21
150 a 350	250	23,92
350 a 550	450	12,27
550 a 850	700	7,29
850 a 1150	1000	5,86
1150 a 1500	1325	1,73

Fonte: NBR 15.538 (ABNT, 2014).

Em resumo, trata-se de um ensaio comparativo, em que se defrontam os registros de volumes observados nos hidrômetros, com os registros reais obtidos em bancada, para as dez vazões do ensaio da Tabela 4. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Hidrometria - LabHidro da CAJ. O LabHidro possui bancada volumétrica de verificação de erros em medidores, com capacidade de

ensaio simultâneo de dez medidores (linha de calibração). A referida bancada é confeccionada conforme recomendações da OIML R120 (OIML, 2010) e INMETRO NIT-SEFLU-007 (INMETRO, 2017) e é validada pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO.

Os padrões de volume de referência da bancada volumétrica são confeccionados em aço inox AISI 304, com espessura de 1,5 mm, e calibrados com tolerância de 0,02%. Ao todo são três tanques com capacidade de medição que variam de 1 a 250 litros, sendo:

- 1 tanque volumétrico de 250 litros, com subdivisão de 100 litros; escala inferior e superior com menor divisão de 20 ml;
- 1 tanque volumétrico de 25 litros, com subdivisão de 10 litros; escala inferior e superior com menor divisão de 5 ml;
- 1 tanque volumétrico de 5 litros, com subdivisão de 1, 2 e 5 litros; escala inferior com menor divisão de 1 ml, e escala superior com menor divisão de 1 ml.

Nas Figuras 16 e 17 apresenta-se o registro das instalações internas do Labhidro, evidenciando-se os tanques de referência.

Figura 17 - Tanques de Referência do LabHidro



Fonte: Autor (2022).



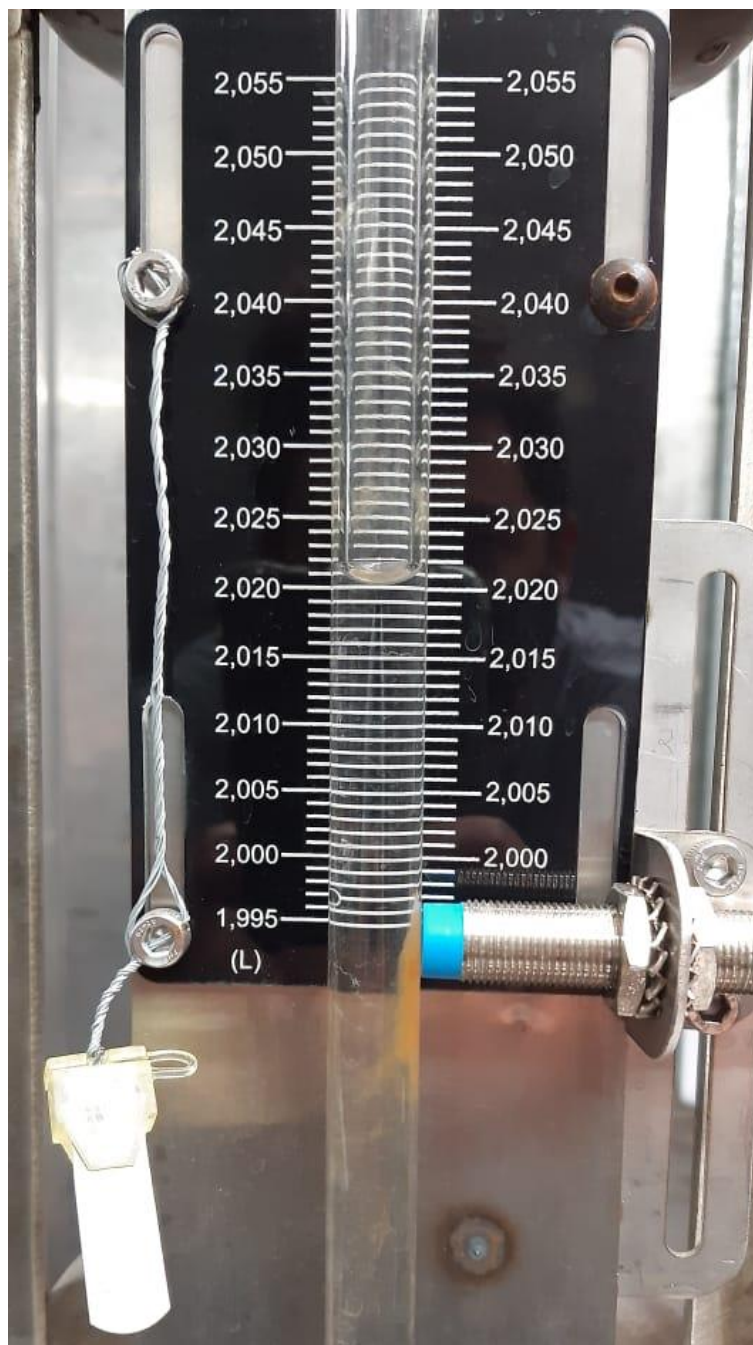
Figura 18 - Tanques de Referência do LabHidro (vista superior)



Fonte: Autor (2022).

Os tanques possuem, em sua parte frontal, réguas para leitura do volume, confeccionadas em material acrílico, e lacradas atendendo as normas INMETRO NIT-SEFLU-007 (INMETRO, 2017). Para a visualização dos níveis, contam-se com vasos comunicantes aos tanques, fabricados em tubo de vidro boro silicato (Figura 19).

Figura 19 - Escala para leitura do volume do tanque de referência, vaso comunicante evidenciando o nível e registro do lacre do INMETRO



Fonte: Autor (2022).

Na bancada são utilizadas válvulas manuais de controle de vazão do tipo agulha, para permitir uma maior precisão no ajuste das vazões de trabalho (vazões da Tabela 4). A linha de verificação é equipada com um conjunto de cinco rotômetros calibrados em todos os pontos da escala com exatidão menor ou igual a 2%, o que permite ajuste adequado das vazões do ensaio (Figura 20). Instalado em série aos rotômetros, a bancada conta com medidor ultrassônico, com display digital mostrando a vazão permanentemente, indicando a vazão instantânea.

Figura 20 - Rotômetro utilizado para ajuste de vazão do ensaio. Ao fundo, visualiza-se tanque de referência e respectivo vaso comunicante em vidro para visualização do nível e régua para leitura



Fonte: Autor (2022).



As entradas de água nos tanques de referência são independentes, possuindo altura suficiente para visualização da queda de água. O modo de leitura dos hidrômetros é do tipo manual. Na Figura 21 pode-se observar: barrilete de rotâmetros; tanques de referência; conjunto de registros para operação do rotâmetro e orientação ao respectivo tanque que se deseja utilizar; hidrômetros ultrassônicos para conferência de visualização da vazão; painel de controle; e demais componentes correlatos do conjunto citado.

Figura 21 - Conjunto de componentes da bancada do LabHidro



Fonte: Autor (2022).

A energia hidráulica utilizada para atendimento das vazões referendadas é fornecida por reservatório elevado e também através de conjunto motobomba hidráulica. O reservatório elevado possui volume de 100 litros, e é instalado em nível adequado para atingimento de pressão de 0,03 MPa. O conjunto motobomba hidráulica instalado é dotado de inversor de frequência. As bombas são dispostas em sistema de amortecimento antivibrações evitando perturbações ao ensaio. A bancada conta ainda com reservatório inferior com capacidade de 2.000 L. Este reservatório fica abrigado dentro das instalações do LabHidro a fim de preservar a temperatura da água. Ambos os reservatórios contam com controle de nível para evitar transbordamentos e permitir reposição automática da água, uma proteção para evitar que as bombas de alimentação operem a seco. O sistema hidráulico é construído com recirculação da água.

A bancada possui manômetros para controle de pressão a montante e a jusante da linha de aferição. Os manômetros são confeccionados com caixa em aço inox e componentes internos em latão, imerso em glicerina, com escala analógica de 0 a 30 kgf/cm<sup>2</sup>, para indicação da pressão de alimentação e a jusante, fornecidos com laudo de calibração emitido por laboratório credenciado pela Rede Brasileira de Calibração – RBC. A pressão é indicada no próprio instrumento (Figura 22).

Figura 22 - Manômetro do LabHidro



Fonte: Autor (2022).

A montante e a jusante das linhas de ensaio há termômetros eletrônicos de contato direto tipo PT-100, com faixa medição de 0 a 60°C, exatidão típica de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , menor divisão de  $0,1^\circ\text{C}$ , todos fornecidos com laudo de calibração emitido por laboratório credenciado pela Rede Brasileira de Calibração – RBC. A bancada é dotada de filtros tipo Y a montante das bombas e de retentores de partículas a montante da linha de calibração. Os retentores possuem malha com aproximadamente 0,175 mm, o que garante que quaisquer partículas acima de tal espessura não adentrem à câmara de medição do medidor. O corpo do filtro Y, bem como seu elemento filtrante (tela do filtro), são fabricados em aço inoxidável.

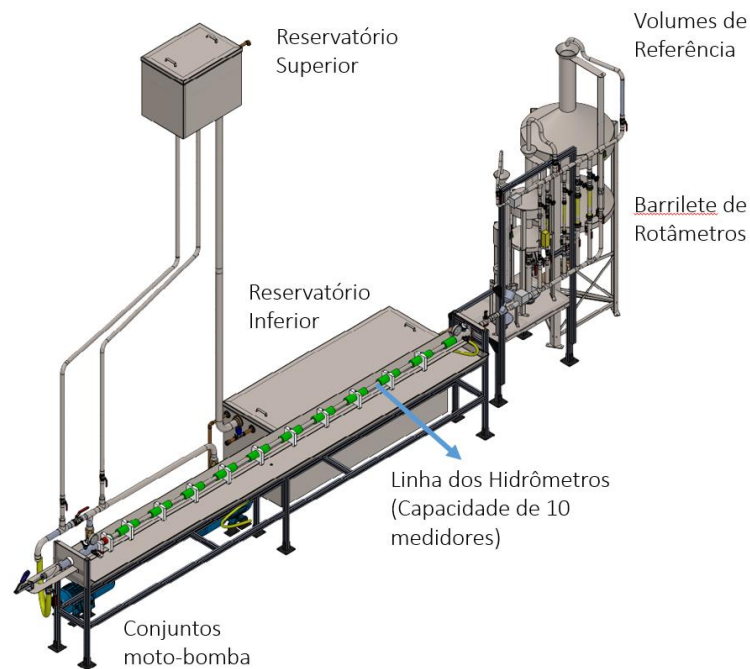
A bancada possui sensores capacitivos acionando válvula de bloqueio automático, para encerramento do escoamento ao se atingir o volume previamente determinado para o ensaio, proporcionando uma maior precisão. O tempo de resposta do fechamento é inferior a 0,5 segundo, contando ainda com *backup* de registros manuais, para acionamento somente em caso de necessidade. O painel de controle possui sistema de ventilação forçada atendendo aos requisitos da NBR IEC 60439-1 (ABNT, 2017). O início do escoamento, quando operada a bancada através de bomba, se dá por acionamento de chave.

O painel de comando possibilita acompanhamento de leitura de temperatura, cronômetro, luzes indicadoras (leds) de liga/desliga para bombas e frequência dos rotores da bomba. O cronômetro é acoplado e integrado ao painel, para que se possibilite inicialização e parada automática do relógio, para conferência do tempo do ensaio e cálculo de vazão. As vazões ensaiadas são, portanto, ajustadas por meio de rotâmetros, porém calculadas posteriormente pela divisão do volume de referência lido na bancada (numerador), pelo tempo decorrido de cada vazão do ensaio (denominador).

Antes dos ensaios é realizado procedimento de purga manual, através de golpes dos registros para eliminação completa do ar no interior dos medidores, evitando interferências na medição. O sistema de travamento da bancada se dá por alavanca para prensa dos mancais. O fechamento da linha é ainda realizado por meio de sistema mecânico de fuso com rosca sem fim, solidário ao torpedo de fechamento da linha, acionado manualmente. A saída inferior dos tanques para esgotamento da água se dá com válvula tipo globo em latão, sendo esta

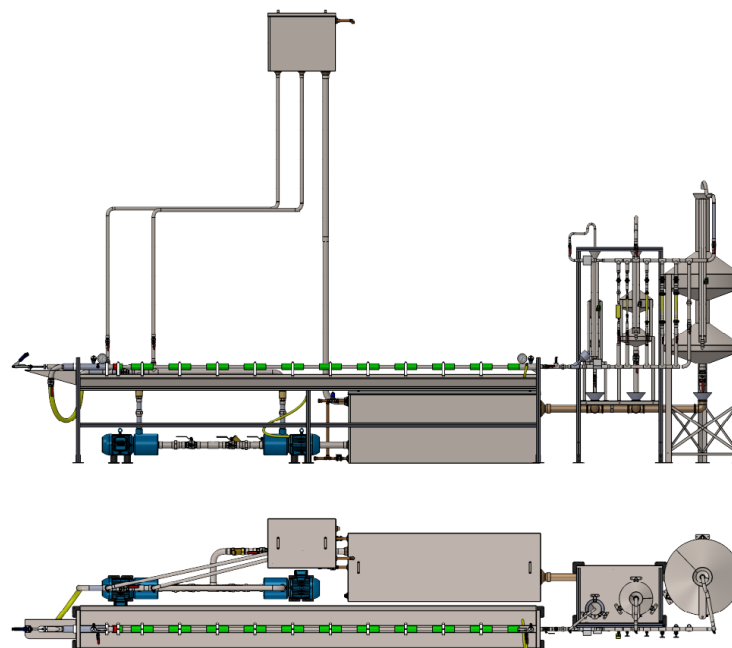
acionada manualmente. Nas Figuras 23 a 28 apresentam-se desenhos esquemáticos da bancada, bem como de sua operação. As Figuras 29 e 30 apresentam registros internos do laboratório, e na Figura 31, a área externa.

Figura 23 - Desenho esquemático da bancada volumétrica – Vista isométrica



Fonte: Autor (2022).

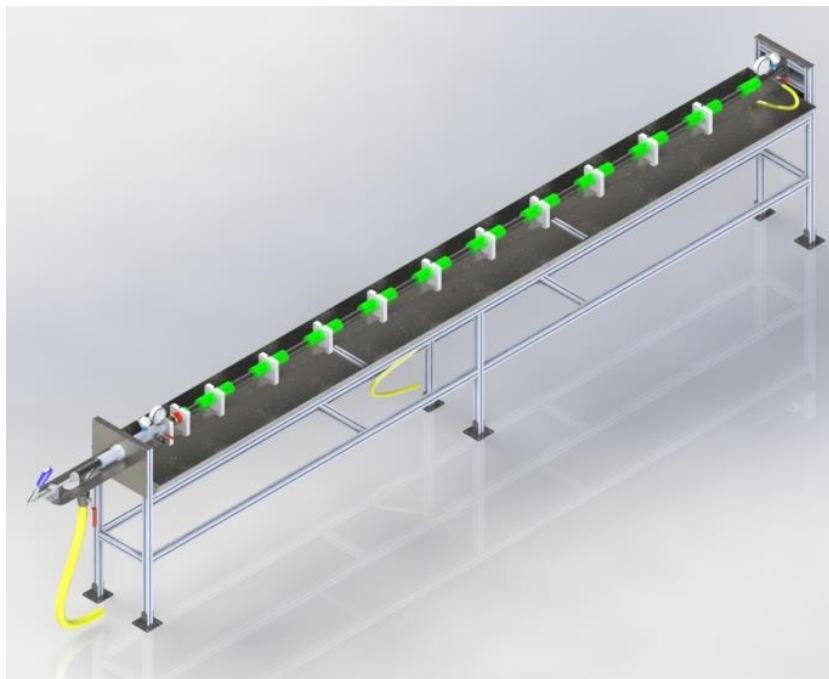
Figura 24 - Desenho esquemático da bancada volumétrica– Vista lateral e planta



Fonte: Autor (2022).

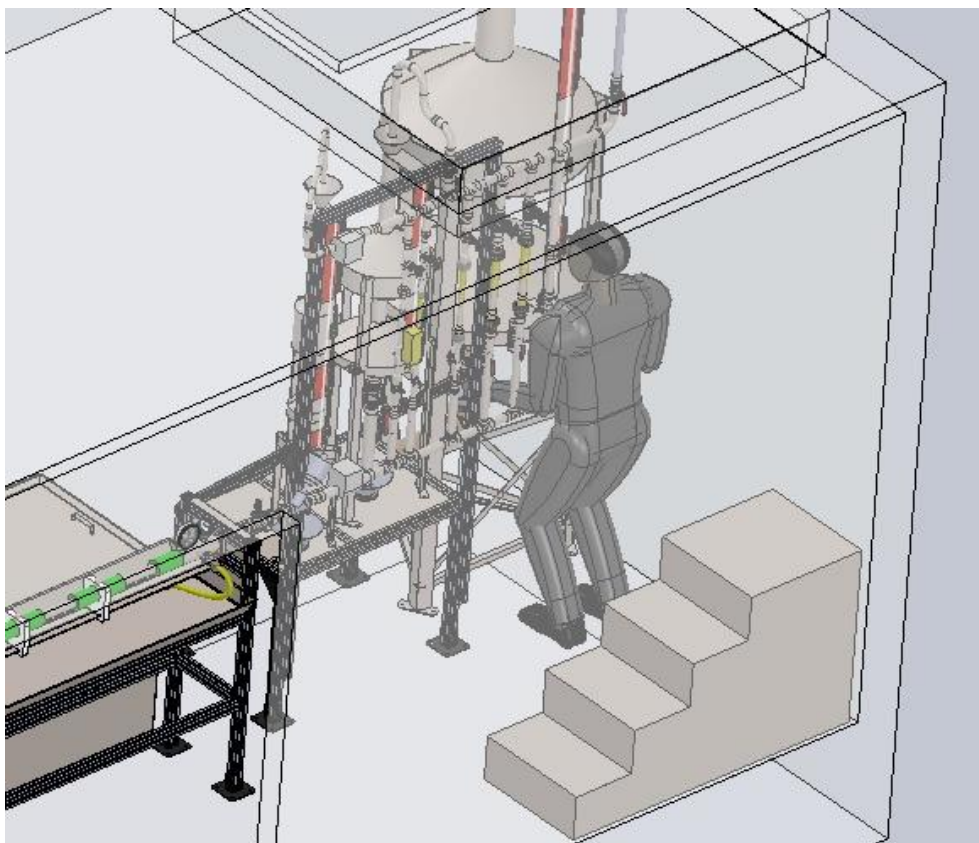


Figura 25 - Desenho esquemático da linha de calibração para posicionamento dos hidrômetros



Fonte: Autor (2022).

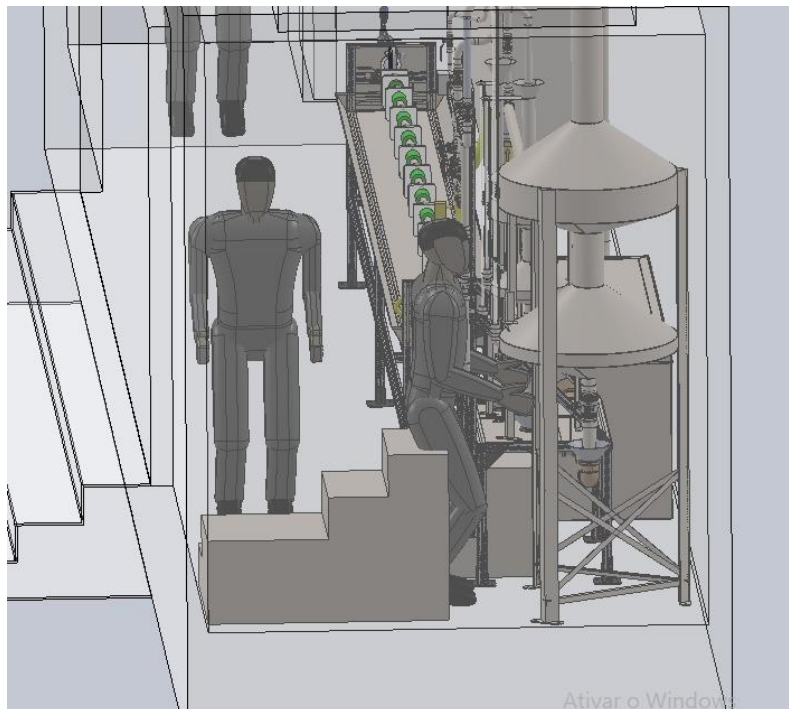
Figura 26 - Desenho esquemático da operação da bancada e ajuste de vazões



Fonte: Autor (2022).

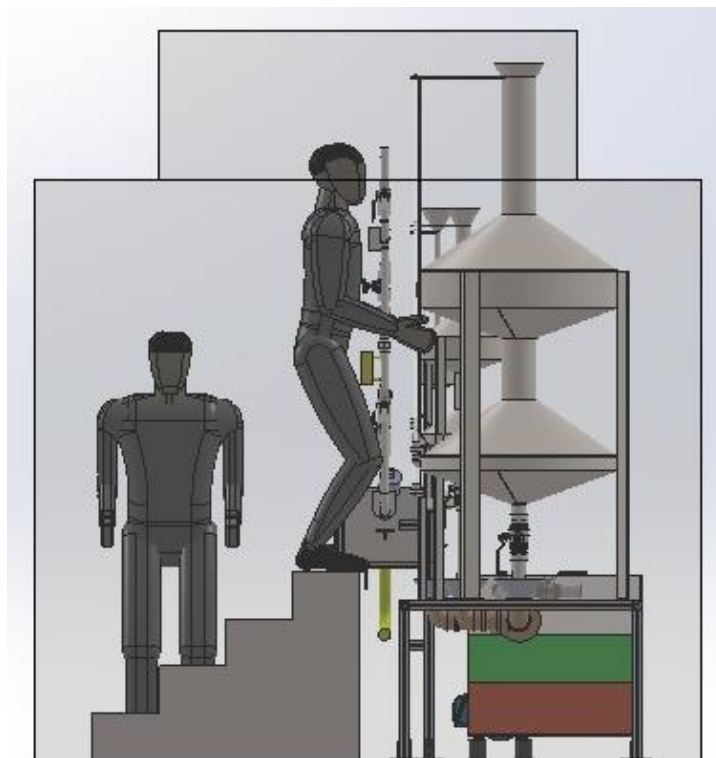


Figura 27 - Desenho esquemático da operação da bancada e leitura do volume de referência



Fonte: Autor (2022).

Figura 28 - Desenho esquemático da operação da bancada e leitura do volume de referência, evitando erro de paralaxe



Fonte: Autor (2022).

Figura 29 - Laboratório de Hidrometria da Companhia Águas de Joinville –  
Instalações internas



Fonte: Autor (2022).

Figura 30 - Bancada volumétrica para ensaios em hidrômetros – registro de ensaios



Fonte: Autor (2022).



Figura 31 - Vista da área externa do laboratório



Fonte: Autor (2022).

### 3.2. ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS PARA APURAÇÃO DO IDM

Uma importante etapa do planejamento de experimentos se refere à análise de dados usando ferramentas estatísticas e interpretação dos resultados (JANKOVIC *et al.*, 2021). Neste estudo são comparadas as marcas e faixas de volumetria para identificação se estas apresentam influência no desempenho do medidor de água. Para tal finalidade foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis. Este teste se trata de um método não paramétrico usado para comparar amostras independentes de tamanhos iguais ou diferentes, porém não assume uma distribuição normal dos resíduos, diferentemente da análoga análise de variância de um fator - ANOVA (MONTGOMERY; RUNGER, 2018). Em outras palavras o procedimento estatístico citado determina se existem diferenças entre médias de grupo em uma amostra e se essas diferenças existem apenas devido à aleatoriedade ou podem ser atribuídos a uma causa (MONTGOMERY; RUNGER, 2018).

Nas ocorrências de populações não normais, porém com distribuições contínuas, e mesma forma e dispersão, Montgomery e Runger (2018),

recomendam utilização do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney. Para os autores este teste possibilita a comparação de múltiplos grupos em amostras independentes. Tal teste também foi utilizado neste trabalho para comparação entre múltiplas marcas e faixas de volumetria.

### 3.3. MODELO DE APURAÇÃO DO DESEMPENHO

Após os ensaios para apuração do IDM, a etapa subsequente se referiu à formulação de modelagem estatística. Optou-se pela confecção de modelagens distintas para os diferentes tipos de medidores estudados (taquimétrico e volumétrico), ou seja, uma para cada tipo, afim de se obterem modelos mais precisos, dadas as diferenças de tecnologia dos projetos de produto. Os modelos de perda de desempenho foram concebidos em função da volumetria total registrada e da marca. A hipótese a ser testada é de que haja relação entre estas variáveis e o IDM.

A compilação dos ensaios realizados em laboratório foi realizada em planilhas eletrônicas. Para o tratamento estatístico dos dados, com a finalidade de sintetizar e organizar as variáveis, foi realizada a análise exploratória usando métodos descritivos e gráficos com auxílio da linguagem de programação do software R versão 4.1.1 por meio da interface RStudio versão 1.4 (R TEAM, 2009), bem como software Microsoft Excel. Uma importante etapa da análise de dados se refere ao tratamento, ou eliminação de dados atípicos ou outliers, os quais devem ser identificados uma vez que podem resultar em uma análise tendenciosa, ou seja, com vieses impróprios (GARCIA, 2020). Outliers (dados espúrios) podem ser entendidos como observações com grande afastamento das demais ou que são inconsistentes (TUFFÉRY, 2011; GHOSH *et al.*, 2018). A análise exploratória tem por objetivo apurar as principais características dos dados com o auxílio de tabelas, gráficos e medidas descritivas (BARBETTA *et al.*, 2010). Foram utilizadas técnicas para descrever os dados coletados por meios gráficos, incluindo confecção de boxplots, histogramas e gráficos de dispersão. Ademais, sumários estatísticos incluindo amplitude, média, mediana, e desvios padrão foram levantados.

A partir dos gráficos de boxplot e de dispersão produzidos e analisados podem ser detectadas visualmente tendências e relações entre as variáveis. Nas

análises bivariadas, uma técnica útil para verificar a associação entre duas variáveis quantitativas é o gráfico de dispersão (GARCIA, 2020).

Na sequência foram apurados modelos que prevêm o decaimento do desempenho dos medidores de água taquimétricos e volumétricos por meio de regressão linear. Os modelos foram produzidos utilizando-se a linguagem R (R TEAM, 2009), aplicando-se a função de regressão linear múltipla nativa da plataforma.

Para Montgomery e Runger (2018), a regressão linear é amplamente utilizada no campo da engenharia, para situações que envolvem regressores que possam explicar fenômenos. Caso haja mais de um regressor, passa a ser chamado de modelo de regressão múltipla (MONTGOMERY; RUNGER, 2018). Montgomery e Runger (2018), apresentam modelo genérico de regressão linear múltipla, cuja variável resposta  $Y$  se apresenta em função das variáveis preditoras e seus respectivos coeficientes, conforme apresentado na equação 5.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (5)$$

Onde:

$Y$  é a variável resposta (dependente); representa o que o modelo tenta prever;  
 $\beta_0$  é uma constante, que representa a interceptação da reta com o eixo vertical;  
 $\beta$  representa a inclinação (coeficiente angular) em relação à variável explicativa;  
 $X$  é a variável explicativa (independente);

Especificamente em relação ao modelo proposto neste estudo, a regressão linear possui a variável preditora volumetria, se tratando de uma variável numérica. Outra variável preditora é a marca, que se trata de uma variável categórica, que representa o fabricante do medidor.

Montgomery e Runger (2018) afirmam que uma importante etapa da verificação de quanto um modelo está adequado, é a realização de testes estatísticos de hipóteses em relação aos parâmetros do modelo. Para tanto foi realizado o teste t dos parâmetros do modelo. Como todo teste estatístico, o teste t tem como produto a medida do valor de p, ou seja, analisa a probabilidade do resultado ter sido originado ao acaso (aleatoriedade) (MONTGOMERY; RUNGER, 2018). Se esse valor for menor que 5% ( $p < 0,05$ ), rejeita-se a

hipótese de que as diferenças sejam ao acaso, alegando-se diferença estatisticamente significativa.

Para a validação global nesta pesquisa foi utilizado o pacote gvlma (PEÑA e SLATE, 2006), do software R (R TEAM, 2009). Com este pacote avalia-se as relações da linearidade entre a variável resposta e variáveis independentes. A rejeição da hipótese nula da linearidade ( $p < 0,05$ ) indica uma relação não linear entre uma ou mais variáveis independentes para com a variável dependente (PEÑA e SLATE, 2006).

O pacote avalia ainda a distorção, ou seja, se a distribuição encontra-se distorcida positiva ou negativamente, e a necessidade de eventuais transformações para atender à suposição da normalidade. A rejeição do nulo na avaliação da distorção ( $p < 0,05$ ) indica necessidade de transformação dos dados (PEÑA e SLATE, 2006).

Avalia-se ainda a curtose da distribuição (presença de alto pico ou muito superficial), e nestes casos indicando uma necessidade de transformação para atender à suposição da normalidade. A rejeição do nulo para a análise curtótica indica necessidade de transformação de dados (PEÑA e SLATE, 2006).

O pacote aponta ainda se a variável dependente é realmente contínua ou é categórica. A rejeição do nulo neste caso indica que se deve usar uma forma alternativa do modelo linear generalizado (por exemplo, regressão logística ou binomial) (PEÑA e SLATE, 2006).

Por fim na última análise proposta por Peña e Slate (2006), o pacote avalia a heteroscedasticidade, ou seja, se a variância do modelo residual é constante em toda a faixa para as variáveis independentes (presunção de homoscedasticidade). A rejeição do nulo indica aqui que os resíduos são heteroscedásticos e, portanto, não constantes em toda a faixa das variáveis independentes (PEÑA e SLATE, 2006).

Hidrômetros ensaiados e que não tiveram seus resultados de IDM inseridos no banco de dados para a formulação do modelo de regressão foram utilizados para para estimação dos parâmetros do modelo. Desta forma, 27 hidrômetros taquimétricos e 18 hidrômetros volumétricos foram utilizados para validação dos modelos obtidos.

### 3.4. APURAÇÃO DO INDICADOR DE SUBMEDIÇÃO DO PARQUE DE MEDIDORES E CÁLCULO DA RECUPERAÇÃO DE RECEITA

A partir do desempenho individual teórico de cada hidrômetro, calculado em função da modelagem da perda de desempenho, foi apurado o desempenho de forma coletiva, ou seja, o desempenho global do parque de medidores da CAJ. O indicador utilizado para cálculo de desempenho do parque foi o índice de submedição. Foi apurada ainda a evolução histórica do desempenho do parque de medidores para um histórico de 5 anos.

No contexto das concessionárias de saneamento, o índice de submedição é um importante indicador de gestão dos ativos da hidrometria. A apuração do desempenho individual, se deu pela seleção da equação de decaimento de desempenho adequada a cada tipo de modelo identificado, e posterior cálculo da submedição global.

Foi apurado ainda, para fins de análise, a evolução histórica do quantitativo dos tipos de medidores presentes no parque, para traçar-se um paralelo entre o resultado atingido da submedição global, com as características do parque. A partir da estimativa do IDM individual, a estimativa de consumo real de cada ligação foi calculada por meio da equação 6.

$$MdR = Md \times IDM \times 100 \quad (6)$$

Onde:

*MdR* é a mediana de consumo real;

*Md* é a mediana de consumo micromedido;

*IDM* é o índice de desempenho metrológico.

O desempenho global do parque foi calculado para um histórico de 2018 a 2022, intervalados em 6 meses, para uma avaliação da evolução. Foi realizado, por fim, cálculo da recuperação de receita decorrente da variação do índice de submedição do parque de medidores. Para tanto adotou-se como valor médio da água, 0,80 dólares/m<sup>3</sup>. O quantitativo de volume global recuperado foi estimado pela diferença da queda do índice de submedição no período estudado (5 anos). Este volume por sua vez foi multiplicado pelo valor adotado para o metro cúbico da água. O cálculo foi realizado para cada 1 (um) milhão de metros cúbicos consumidos na cidade de Joinville.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. ANÁLISE DOS ÍNDICES DE DESEMPENHO METROLÓGICO APURADOS NOS ENSAIOS E ELABORAÇÃO DO MODELO DE DESEMPENHO

#### 4.1.1. Análise dos resultados de IDM e elaboração do modelo para medidores taquimétricos

Conforme descrito no capítulo 3 - Materiais e Métodos, optou-se pela construção de modelos distintos para medidores dos tipos volumétrico e taquimétrico. Ressalta-se ainda que os medidores foram ensaiados de acordo com a NBR 15.538 (ABNT, 2014), e foram consideradas, para concepção dos modelos, as variáveis marca (fabricante do produto) e volumetria (volume medido pelo hidrômetro). As variáveis e seus respectivos tipo e descrição, para os medidores taquimétricos, foram organizadas conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Descrição e classificação das variáveis utilizadas na modelagem – Hidrômetros taquimétricos

Sequência	Nome da variável (Fatores)	Tipo	Descrição e níveis	
1	Fabricante	Categórica	Fabricante do medidor	0
				1
				2
2	Volumetria	Numérica	Volumetria registrada no início dos testes	0 - 0 a 600 m <sup>3</sup>
				1 - 600 a 1200 m <sup>3</sup>
				2 - Mais de 1200 m <sup>3</sup>

Fonte: Autor (2022).

Os resultados de valores de IDM para os hidrômetros do tipo taquimétrico, para a o planejamento fatorial completo, são apresentados na Tabela 6.

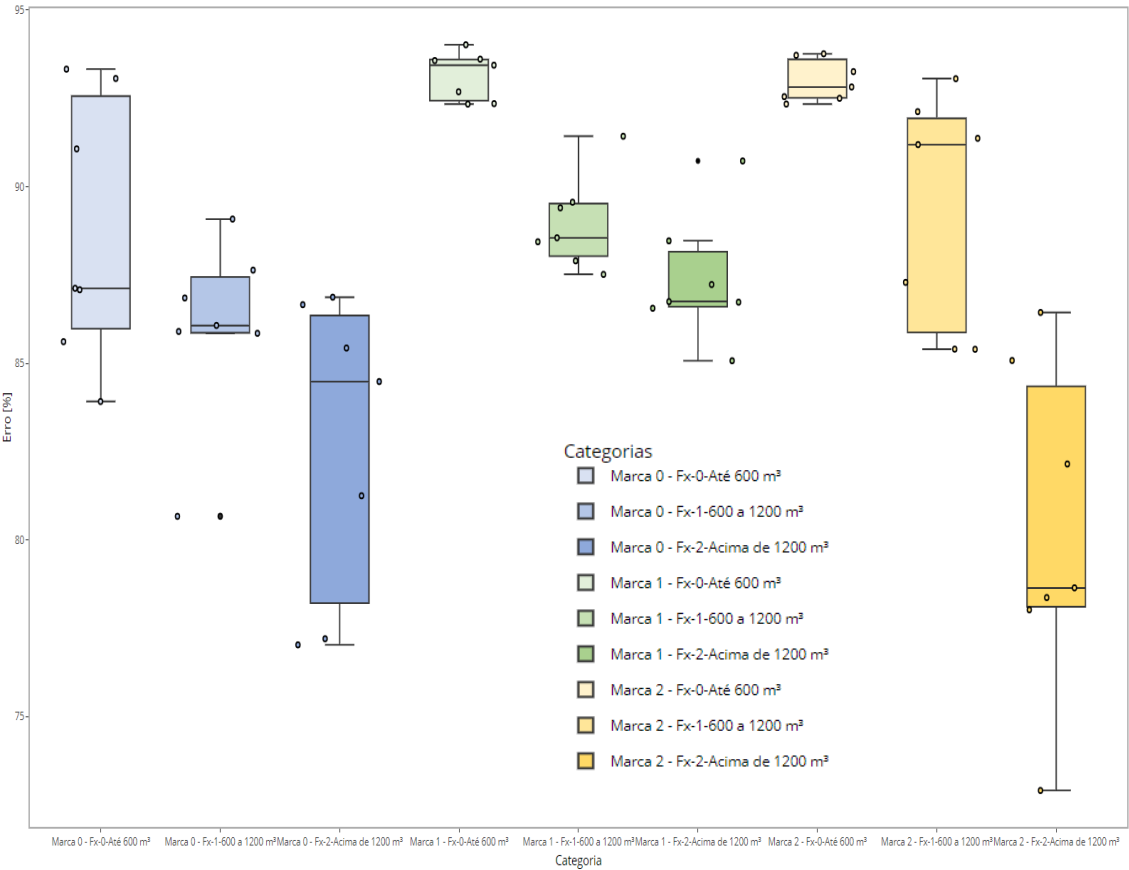
Tabela 6 – Resultado de valores de IDM dos hidrômetros taquimétricos ensaiados, respectivos fabricantes e faixa de volumetria, e volumetria total

HD.Instalado	Fabricante	Faixa de Volumetria	IDM [%]	Volumetria [m³]
Medidor 1	0	0	87,08	329,07
Medidor 2	0	0	91,07	554,36
Medidor 3	0	0	93,33	559,77
Medidor 4	0	0	83,92	598,04
Medidor 5	0	0	85,61	525,67
Medidor 6	0	0	93,06	397,08
Medidor 7	0	0	87,12	373,41
Medidor 8	0	1	86,07	775,73
Medidor 9	0	1	86,85	870,93
Medidor 10	0	1	87,64	1192,54
Medidor 11	0	1	85,90	991,74
Medidor 12	0	1	85,85	606,48
Medidor 13	0	1	89,08	1007,96
Medidor 14	0	1	80,67	1146,19
Medidor 15	0	2	81,25	1781,17
Medidor 16	0	2	84,48	1432,67
Medidor 17	0	2	86,66	1953,41
Medidor 18	0	2	77,20	1507,36
Medidor 19	0	2	77,03	1438,26
Medidor 20	0	2	86,87	1256,24
Medidor 21	0	2	85,43	1238,54
Medidor 22	1	0	92,69	310,00
Medidor 23	1	0	93,57	215,00
Medidor 24	1	0	93,44	291,81
Medidor 25	1	0	94,02	446,53
Medidor 26	1	0	93,61	272,00
Medidor 27	1	0	92,34	358,00
Medidor 28	1	0	92,35	134,00
Medidor 29	1	1	88,55	698,87
Medidor 30	1	1	87,90	622,94
Medidor 31	1	1	88,44	734,44
Medidor 32	1	1	87,52	689,47
Medidor 33	1	1	89,40	644,00
Medidor 34	1	1	91,43	832,00
Medidor 35	1	1	89,56	803,14
Medidor 36	1	2	87,23	1331,71
Medidor 37	1	2	88,47	1238,14
Medidor 38	1	2	90,73	1581,71
Medidor 39	1	2	86,75	1238,09
Medidor 40	1	2	86,56	1328,86
Medidor 41	1	2	85,07	1404,82
Medidor 42	1	2	86,73	1353,70
Medidor 43	2	0	93,76	386,72
Medidor 44	2	0	92,55	355,08
Medidor 45	2	0	92,34	206,00
Medidor 46	2	0	92,82	277,00
Medidor 47	2	0	93,72	341,00
Medidor 48	2	0	93,26	350,57
Medidor 49	2	0	92,50	198,00
Medidor 50	2	1	91,19	845,31
Medidor 51	2	1	93,06	994,85
Medidor 52	2	1	85,40	994,28
Medidor 53	2	1	92,12	965,78
Medidor 54	2	1	91,37	611,93
Medidor 55	2	1	93,33	862,24
Medidor 56	2	1	87,29	705,32
Medidor 57	2	2	78,37	1366,00
Medidor 58	2	2	78,02	2128,17
Medidor 59	2	2	85,08	2635,00
Medidor 60	2	2	82,15	2184,16
Medidor 61	2	2	78,64	1506,41
Medidor 62	2	2	86,44	2310,59
Medidor 63	2	2	72,91	3165,28

Fonte: Autor (2022).

Além dos dados tabulares, apresentam-se os resultados na forma de gráfico de boxplot (Figura 32), em que ficam melhor evidenciadas as diferenças entre os desempenhos para as marcas, bem como uma nítida queda de valor absoluto de mediana, na medida em que a faixa de volumetria cresce. Isso denota a esperada queda de desempenho com o aumento do volume total registrado (hipótese do trabalho), e apresenta coerência com o resultado previsto, já que como instrumento mecânico, conjectura-se que haja desgaste das engrenagens internas do medidor com o passar do volume pela câmara de medição (TARDELLI FILHO, 2006; COELHO, 2009). Como instrumentos mecânicos, os medidores de água estudados neste trabalho apresentam vida útil atrelada à intensidade de seu uso (TARDELLI FILHO, 2006; COELHO, 2009). Ressalta-se o citado por Coelho (2009), que o envelhecimento dos hidrômetros é um fator de perda gradativa de precisão de medição por sua utilização em campo.

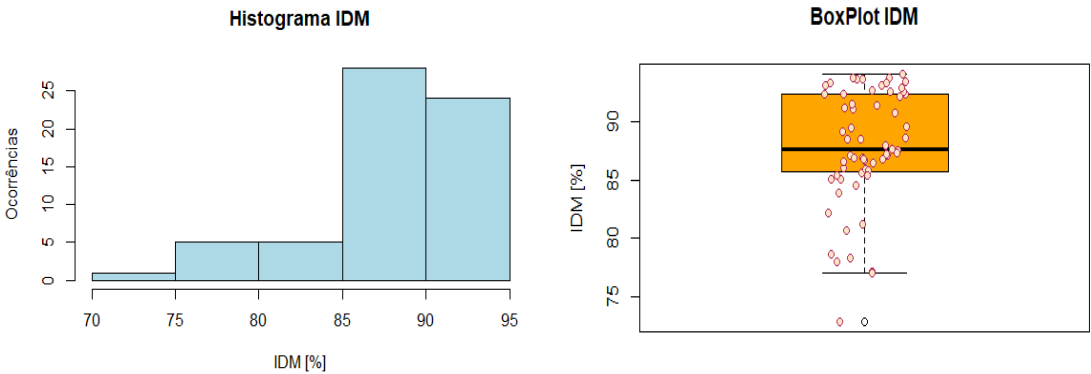
Figura 32 - Boxplot de resultado de IDM de medidores ensaiados por categorias – Hidrômetros taquimétricos



Fonte: Autor (2022).

Apresentam-se na sequência histograma e gráfico boxplot do IDM (%) para os medidores taquimétricos (Figura 33).

Figura 33 - Histograma e grafico de boxplot – Hidrômetros taquimétricos



Fonte: Autor (2022).

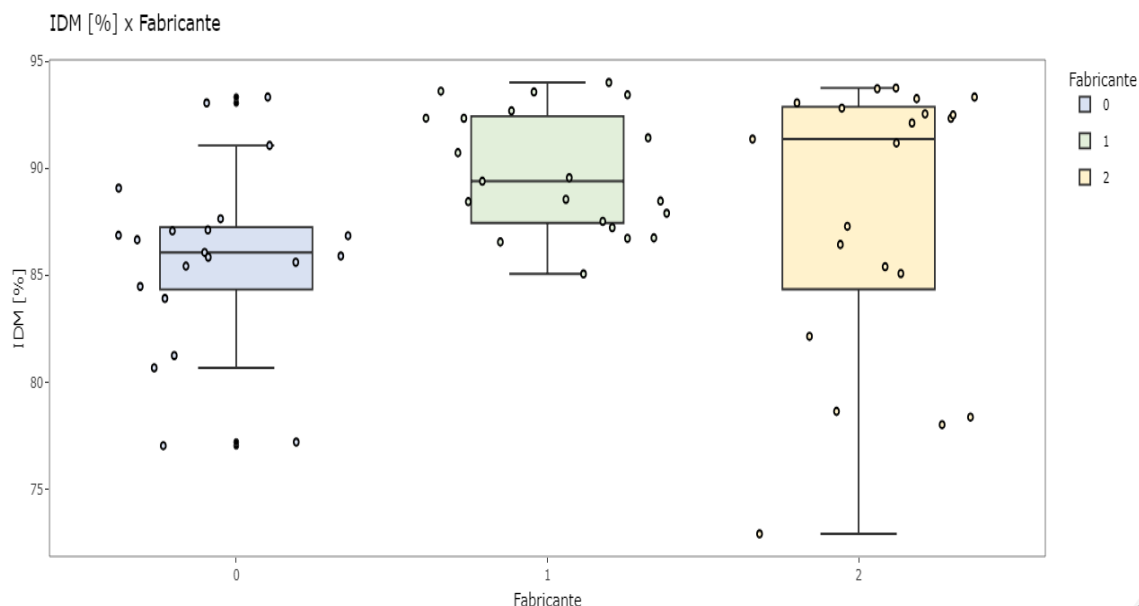
As ocorrências indicam assimetria negativa e faixa pequena de amplitude de resultados. Os valores de média e mediana resultaram em, 87,85% e 87,64%, respectivamente. As estatísticas descritivas e gráfico boxplot do IDM para os medidores taquimétricos, para os três fabricantes, são apresentados na Tabela 7 e na Figura 34.

Tabela 7 - Estatísticas descritivas do IDM (%) para hidrômetros taquimétricos dos três fabricantes

	Mínimo	1º quartil	Mediana	Média	3º quartil	Máximo	Desv. Pad.
<b>Marca 0</b>	77,03	84,48	86,07	85,82	87,12	93,33	4,25
<b>Marca 1</b>	85,07	87,52	89,40	89,83	92,35	94,02	2,80
<b>Marca 2</b>	72,91	85,08	91,37	87,92	92,82	93,76	6,44
<b>Global</b>	72,91	85,73	87,64	87,85	92,35	94,02	4,95

Fonte: Autor (2022).

Figura 34 - Gráfico boxplot para para hidrômetros taquimétricos para os três fabricantes

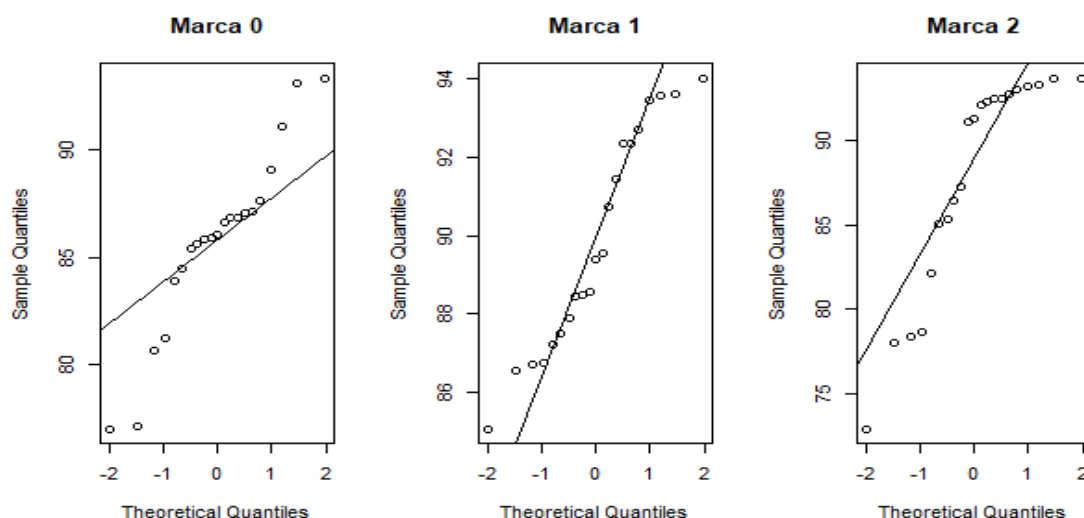


Fonte: Autor (2022).

Ao se comparar os valores de IDM obtidos para os três fabricantes de hidrômetros taquimétricos estudados, percebem-se valores distintos mínimos (77,03%; 85,07%; 72,91%), assim como de medianas (86,07%; 89,40%; 91,37%), e valores máximos (93,33%; 94,02%; 93,76%). Fica indicada assim, pelo resultado dos ensaios da amostra, que a marca é um fator de relevância para o valor do IDM. Conduto, a questão foi analisada para se verificar se as diferenças encontradas realmente são significativas do ponto de vista estatístico, aplicando-se teste Kruskal-Wallis. Pelo teste Kruskal-Wallis, obteve-se um p-valor de 0,01, indicando que as diferenças são significativas. O teste de Wilcoxon-Mann-Whitney foi utilizado para comparação múltipla de significância entre as marcas, em que se constatou diferenças significativas apenas entre as marcas 0 e 1, com resultado de p-valor de 0,0014. Os p-valores obtidos na comparação entre os resultados de IDM para as marcas 0 e 2, e 1 e 2, foram 0,32 e 1,00, respectivamente, indicando não haver diferença significativa.

No gráfico da Figura 35 pode-se observar a ocorrência dos pontos para uma análise visual da normalidade. Apesar de observadas distâncias entre a ocorrência de alguns pontos com a linha de tendência, os gráficos indicam normalidade para os três fabricantes estudados. A normalidade será avaliada mais adiante, do ponto de vista estatístico.

Figura 35 - Análise da normalidade dos dados de IDM dos hidrômetros taquimétricos para as três marcas



Fonte: Autor (2022).

Os gráficos boxplot da Figura 34 apresentam configurações diferentes, sendo que para as marcas 0 e 1, existe uma distribuição mais simétrica, enquanto que para a marca 2 existe uma assimetria positiva, no que se refere a ocorrências de pontos.

A curva de ocorrência de pontos é mais platicúrtica para a marca 2, e a da marca 0 se destaca por ser mais leptocúrtica, ou seja com mais incidências de ocorrências no centro da distribuição. Tal fato se dá por uma amplitude de incidências bastante menor para a marca 1.

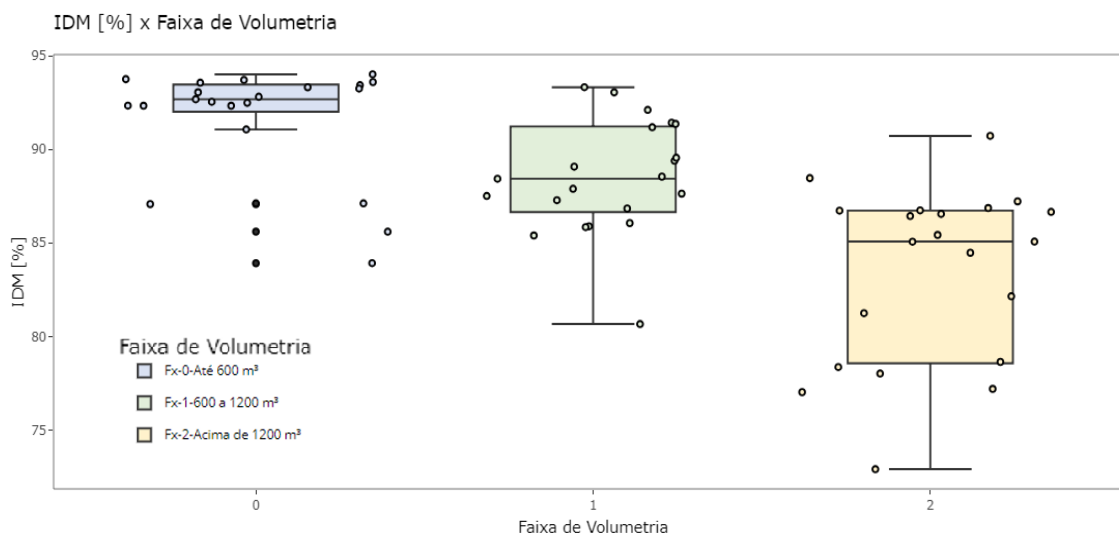
Na sequência apresentam-se as estatísticas descritivas dos valores de IDM dos hidrômetros taquimétricos e gráfico de boxplot, para as três faixas de volumetria (Tabela 8 e Figura 36).

Tabela 8 - Estatísticas descritivas do IDM (%) para hidrômetros taquimétricos para as três faixas de volumetria

	Mínimo	1º quartil	Mediana	Média	3º quartil	Máximo	Desv. Pad.
Faixa de volume 0-600 m³	83,92	92,34	92,69	91,63	93,44	94,02	2,96
Faixa de volume 600-1200 m³	80,67	86,85	88,44	88,51	91,19	93,33	3,01
Faixa de volume acima de 1.200 m³	72,91	78,64	85,08	83,43	86,73	90,73	4,70
<b>Global</b>	72,91	85,73	87,64	87,85	92,35	94,02	4,95

Fonte: Autor (2022).

Figura 36 - Gráfico boxplot para hidrômetros taquimétricos para as três faixas de volumetria



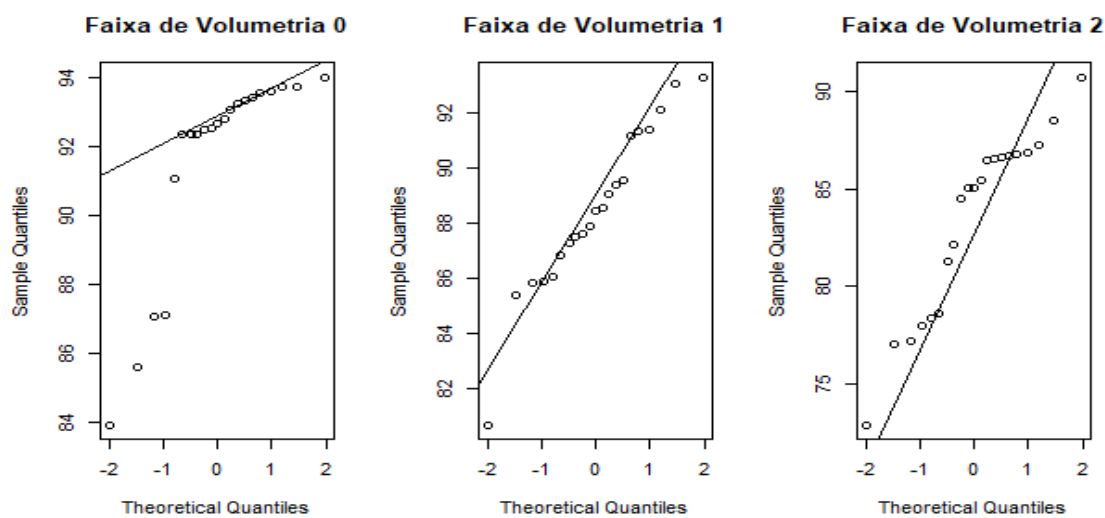
Fonte: Autor (2022).

Na comparação dos valores de IDM para as três faixas de volumetria, ou seja, 0 a 600, 600 a 1.200, e acima de 1.200 m³ de volume totalizado, para os hidrômetros do tipo taquimétrico estudados, percebem-se valores distintos de IDM mínimos (83,92%; 80,67%; 72,91%), assim como de medianas (92,69%; 88,44%; 85,08%), e valores máximos (94,02%; 93,33%; 90,73%). Aqui fica indicada, pelo resultado dos ensaios da amostra, que a volumetria apresenta-se como um fator inversamente proporcional ao IDM, ou seja, quanto maior a volumetria, maior a tendência de obtenção de valores mais baixos de IDM.

Do ponto de vista estatístico observou-se diferenças significativas entre as faixas de volumetria, através da aplicação do teste Kruskal-Wallis em que se obteve um p-valor < 0,001. O teste de Wilcoxon-Mann-Whitney foi utilizado para comparação múltipla de significância entre as faixas de volumetria, em que se constatou diferenças significativas entre todas as faixas, com p-valores de 0,003, 2e-07 e 0,00022, na comparação entre hidrômetros com volumetria até 600 m³ e de 600 a 1200 m³; até 600 m³ e acima de 1200 m³; e de 600 a 1200 m³ e acima de 1200 m³, respectivamente.

No gráfico da Figura 37 pode-se observar a ocorrência dos pontos para uma análise visual da normalidade, relacionada a faixa de volumetria. Apesar de observadas distâncias entre a ocorrência de alguns pontos com a linha de tendência, os gráficos indicam normalidade para as três faixas de volumetria.

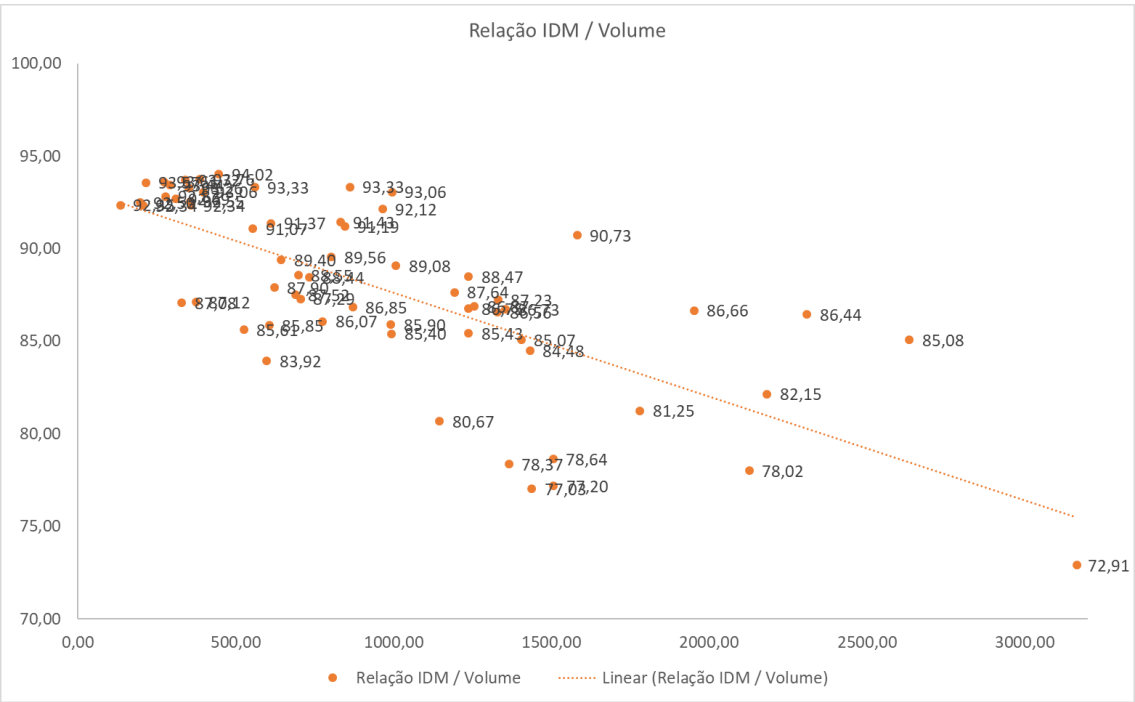
Figura 37 - Análise da normalidade dos dados de IDM dos hidrômetros taquimétricos, comparando as três faixas de volumetria



Fonte: Autor (2022).

Os gráficos boxplot apresentam configurações diferentes, sendo a distribuição mais assimétrica para a primeira faixa, além de incidência leptocúrtica. A Figura 38 apresenta o gráfico de dispersão do IDM pela volumetria para os hidrômetros taquimétricos.

Figura 38 - Dispersão do IDM, pela volumetria – Hidrômetros taquimétricos



Fonte: Autor (2022).



A configuração da dispersão do IDM pela volumetria indica que existe uma forte correlação negativa entre as variáveis, ou seja, quanto maior a volumetria, menor o IDM. A análise visual da dispersão indica ainda distâncias equivalentes de valores acima e abaixo da linha de tendência. O coeficiente de correlação de Pearson entre a volumetria e o IDM tem o valor  $r = 0,73$ . O modelo de regressão (Equação 6), e respectivas validações estatísticas são apresentados na sequência para o medidor taquimétrico.

$$IDM = 91,240347 + 2,952007X_1 + 2,856742X_2 - 0,005546X_3 \quad (6)$$

Onde:

$IDM$  é a variável resposta, índice de desempenho metrológico;

$X_1$  se refere à marca ( $X_1 = 1$  para a marca 1, e  $X_1 = 0$  para as marcas 0 e 2);

$X_2$  se refere à marca ( $X_2 = 1$  para a marca 2, e  $X_2 = 0$  para as marcas 0 e 1);

$X_3$  é a variável explicativa volumetria, dada em metros cúbicos.

A Tabela 9 apresenta os coeficientes do modelo de regressão para os hidrômetros taquimétricos.

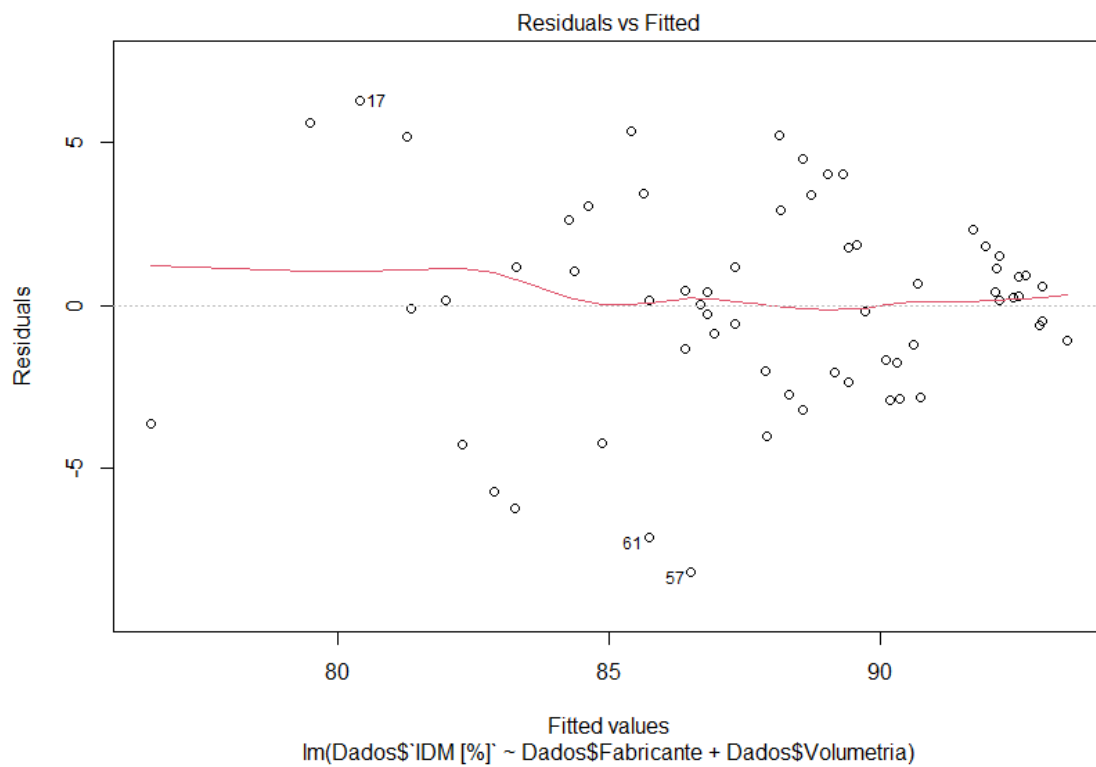
Tabela 9 - Tabela de coeficientes da regressão – Hidrômetros taquimétricos

	Estimativa	Erro Padrão	t valor	Pr(> t )
(Intercepto)	91,240347	0,939405	97,126	< 0,001
$X_1$	2,952007	0,990947	2,979	0,00419
$X_2$	2,856742	0,987159	2,894	0,00532
$X_3$	-0,005546	0,000646	-8,585	< 0,001

Fonte: Autor (2022).

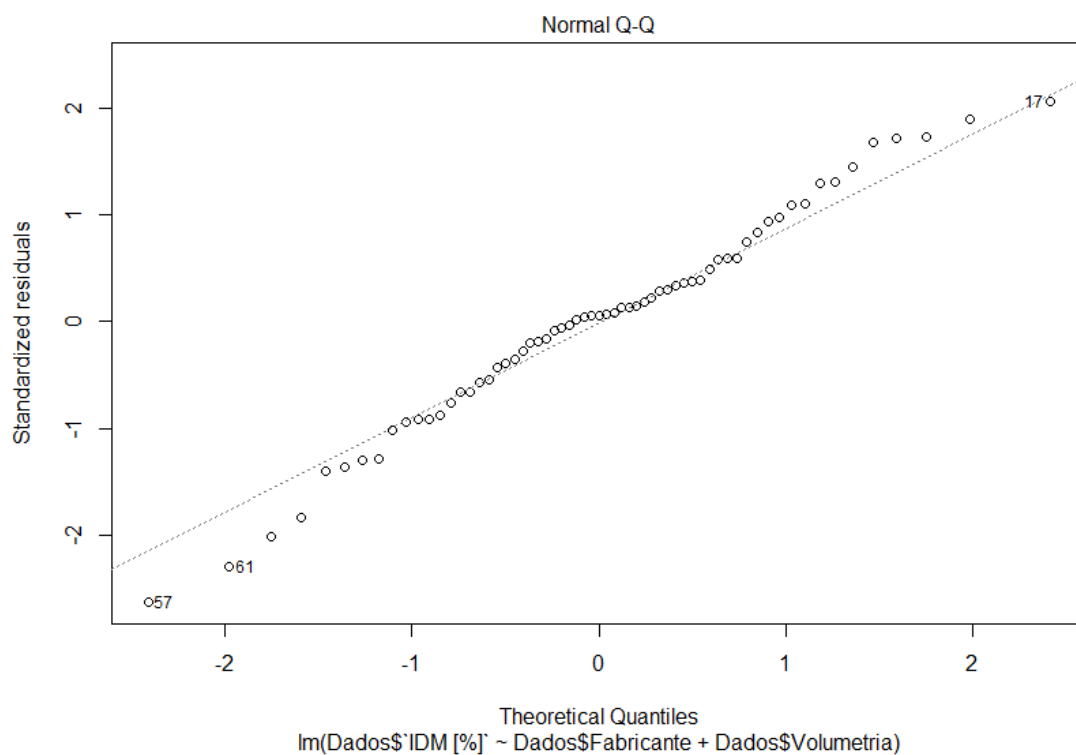
O valor de R-quadrado resultou em 0,61, e R-quadrado ajustado de 0,58. O valor do R-quadrado ajustado indica que marca e volumetria conseguem explicar cerca de 60% da variabilidade nos valores do IDM. Na sequência são apresentados os gráficos dos resíduos do modelo, normalidade dos erros, distribuição dos pontos entre variáveis independentes, e distância de Cook (Figuras 39 a 42).

Figura 39 - Erros residuais ajustados – Hidrômetros taquimétricos



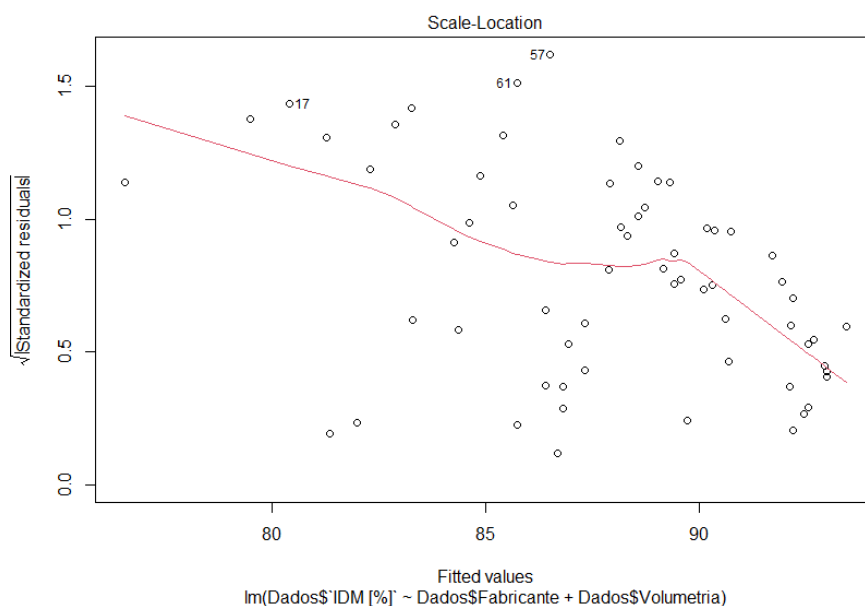
Fonte: Autor (2022).

Figura 40 - Normalidade dos erros – Hidrômetros taquimétricos



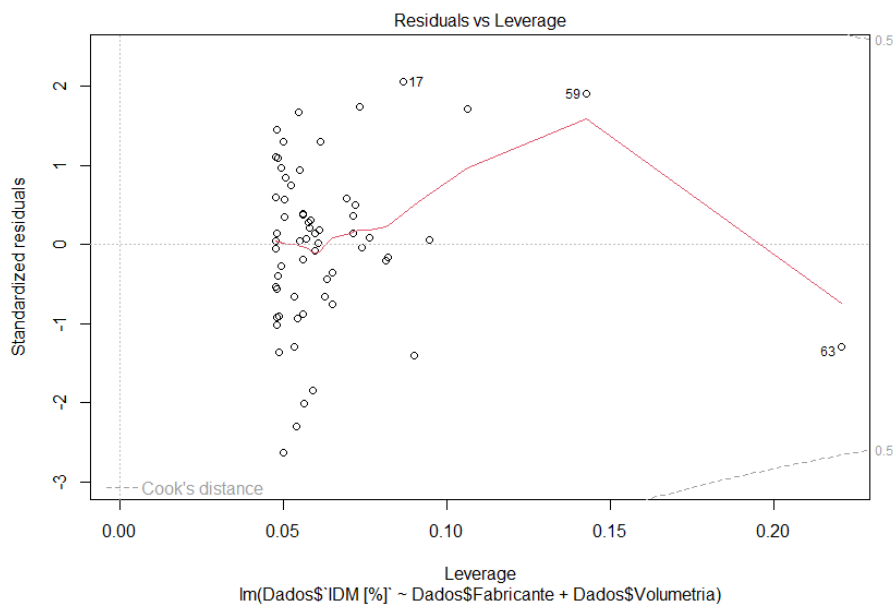
Fonte: Autor (2022).

Figura 41 - Distribuição dos pontos entre variáveis independentes –  
Hidrômetros taquimétricos



Fonte: Autor (2022).

Figura 42 - Distância de Cook – Hidrômetros taquimétricos



Fonte: Autor (2022).

Ao analisar os gráficos, percebe-se visualmente que os erros residuais resultantes (Figura 39) encontram-se próximos a zero, bem como há uma distribuição equânime dos mesmos. Visualmente fica evidenciada uma distribuição normal dos pontos (Figura 40). Em relação à distância de Cook (Figura 42), esta é uma medida que informa o quanto um ou poucos casos

podem ser influentes na estimativa do modelo de regressão, estando relacionada, portanto, com a presença de outliers (MONTGOMERY; RUNGER, 2018). A distância de Cook resultou abaixo de 0,5 para todos os pontos que entraram na composição do modelo, assim, indicando um modelo ajustado.

Os resultados da modelagem indicaram que a marca influenciou o IDM inicial em aproximadamente 3%, o que é bastante representativo. Em termos práticos, indica que caso uma concessionária venha a optar por determinados fornecedores de medidores, isso pode representar uma grande perda de desempenho de saída, afetando o balanço hídrico e o faturamento da empresa. A validação geral do modelo foi realizada segundo Peña e Slate (2006) (Tabela 10).

**Tabela 10 - Análise da validação geral do modelo – Hidrômetros taquimétricos**

	<b>Valor</b>	<b>p-valor</b>	<b>Decisão</b>
Estatística global. A rejeição do nulo ( $p < 0,05$ ) indica uma relação não linear entre uma ou mais variáveis independentes para com a dependente. O resultado de p-valor obtido indica uma relação linear.	2,68	0,61	Suposições aceitáveis.
Distorção - Assimetria. Não há necessidade de transformação de dados. A rejeição do nulo ( $p < 0,05$ ) indicaria necessidade de transformação dos dados.	0,78	0,38	Suposições aceitáveis.
Curtose. Não há necessidade de transformação de dados. A rejeição do nulo ( $p < 0,05$ ) indicaria necessidade de transformação dos dados.	0,002	0,97	Suposições aceitáveis.
Função de ligação. Verificação se a variável dependente é contínua ou categórica. A rejeição do nulo ( $p < 0,05$ ) indicaria necessidade de forma alternativa para modelo linear.	0,31	0,58	Suposições aceitáveis.
Heteroscedasticidade. A rejeição do nulo ( $p < 0,05$ ) indicaria resíduos heteroscedásticos e, portanto, não constantes em toda a faixa de X, o que não é o caso.	1,60	0,21	Suposições aceitáveis.

Fonte: Autor (2022).

#### **4.1.2. Resultado de IDM e modelo para medidores volumétricos**

De forma análoga, apresenta-se na sequência a organização dos fatores e níveis para os medidores do tipo volumétrico (Tabela 11).

Tabela 11 - Descrição e classificação das variáveis utilizadas na modelagem – Hidrômetros taquimétricos

Sequência	Nome da variável (Fatores)	Tipo	Descrição e níveis	
1	Fabricante	Categórica	Fabricante do medidor	0
				1
2	Volumetria	Numérica	Volumetria registrada no início dos testes	0 - 0 a 600 m³
				1 - 600 a 1200 m³
				2 - Mais de 1200 m³

Fonte: Autor (2022).

Os resultados de IDM para os hidrômetros do tipo volumétrico são apresentados a seguir. A Tabela 12 apresenta o IDM e as características dos hidrômetros ensaiados.

Tabela 12 - Resultado de IDM dos hidrômetros volumétricos ensaiados, respectivos fabricantes e faixa de volumetria, e volumetria total

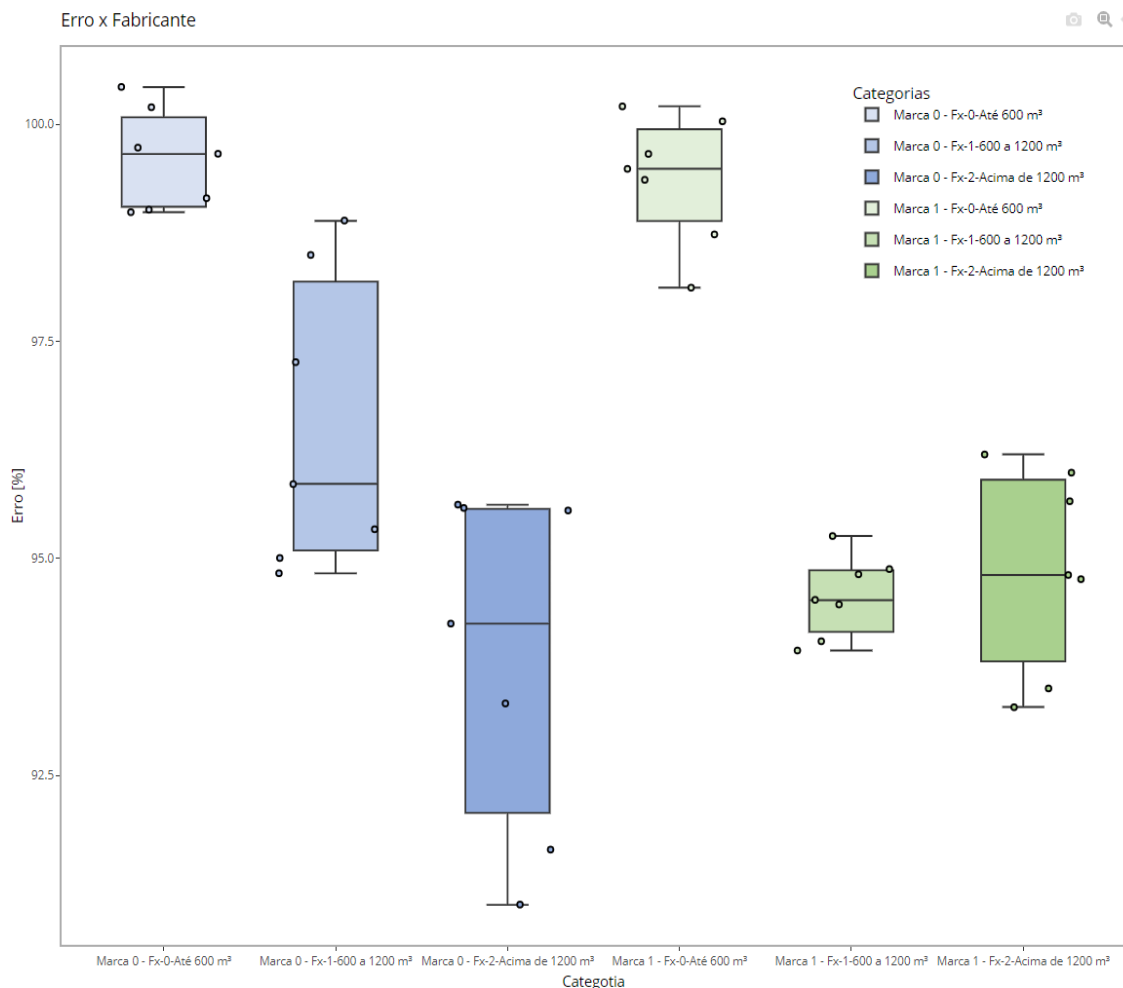
HD.Instalado	Fabricante	Faixa de Volumetria	IDM [%]	Volumetria
Medidor 64	0	0	99,73	181,59
Medidor 65	0	0	99,15	223,49
Medidor 66	0	0	99,02	217,42
Medidor 67	0	0	99,66	190,65
Medidor 68	0	0	100,20	145,55
Medidor 69	0	0	98,99	230,05
Medidor 70	0	0	100,43	155,26
Medidor 71	0	1	98,89	609,49
Medidor 72	0	1	97,26	1031,50
Medidor 73	0	1	98,50	685,97
Medidor 74	0	1	95,86	649,00
Medidor 75	0	1	94,83	1057,43
Medidor 76	0	1	95,01	1061,19
Medidor 77	0	1	95,34	1167,33
Medidor 78	0	2	93,33	1495,25
Medidor 79	0	2	95,62	1254,76
Medidor 80	0	2	91,65	2070,00
Medidor 81	0	2	94,88	1726,25
Medidor 82	0	2	94,25	1827,68
Medidor 83	0	2	95,55	1592,28
Medidor 84	0	2	93,80	1744,23
Medidor 85	1	0	100,21	471,33
Medidor 86	1	0	99,49	314,29
Medidor 87	1	0	100,04	326,71
Medidor 88	1	0	98,73	484,41
Medidor 89	1	0	98,12	397,61
Medidor 90	1	0	99,36	437,55
Medidor 91	1	0	99,66	389,61
Medidor 92	1	1	94,82	1025,39
Medidor 93	1	1	94,47	861,00
Medidor 94	1	1	94,52	971,73
Medidor 95	1	1	94,82	819,78
Medidor 96	1	1	95,26	711,23
Medidor 97	1	1	94,88	1025,36
Medidor 98	1	1	93,94	1172,06
Medidor 99	1	2	95,92	1367,97
Medidor 100	1	2	94,35	1222,85
Medidor 101	1	2	96,20	1216,17
Medidor 102	1	2	94,76	1376,00
Medidor 103	1	2	93,50	1833,21
Medidor 104	1	2	94,81	1229,55
Medidor 105	1	2	93,29	1387,79

Fonte: Autor (2022).

Igualmente para os medidores volumétricos, apresentam-se ainda os resultados na forma de gráfico boxplot. Percebe-se, mais uma vez, evidências de diferença de desempenho entre fabricantes, bem como queda de valor absoluto de mediana de desempenho, na medida em que a faixa de volumetria aumenta (Figura 43).

A queda de desempenho entre a faixa de 600 a 1200 m<sup>3</sup>, e a faixa acima de 1200 m<sup>3</sup>, para o medidor da marca 1, não foi evidenciada. Este fato pode indicar que esta marca apresenta uma perda de desempenho mais acentuada da primeira para a segunda faixa de consumo.

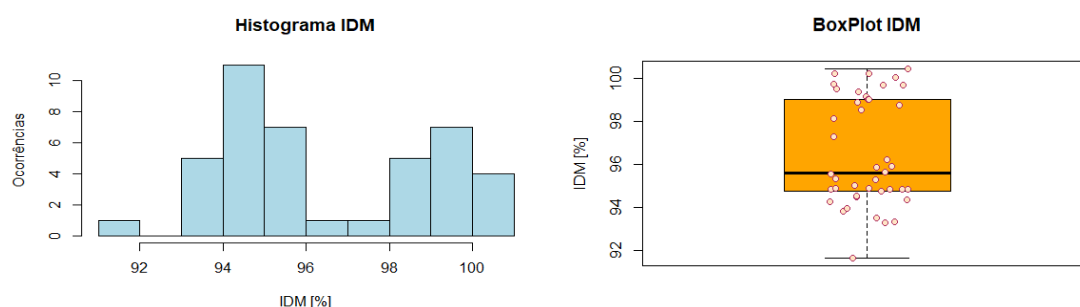
Figura 43 - Boxplot de resultado de IDM de medidores ensaiados por categorias – Hidrômetros volumétricos



Fonte: Autor (2022).

Apresentam-se na Figura 44 o histograma e o gráfico boxplot do IDM para os medidores volumétricos ensaiados.

Figura 44 - Histograma e grafico de boxplot – Hidrômetros volumétricos



Fonte: Autor (2022).

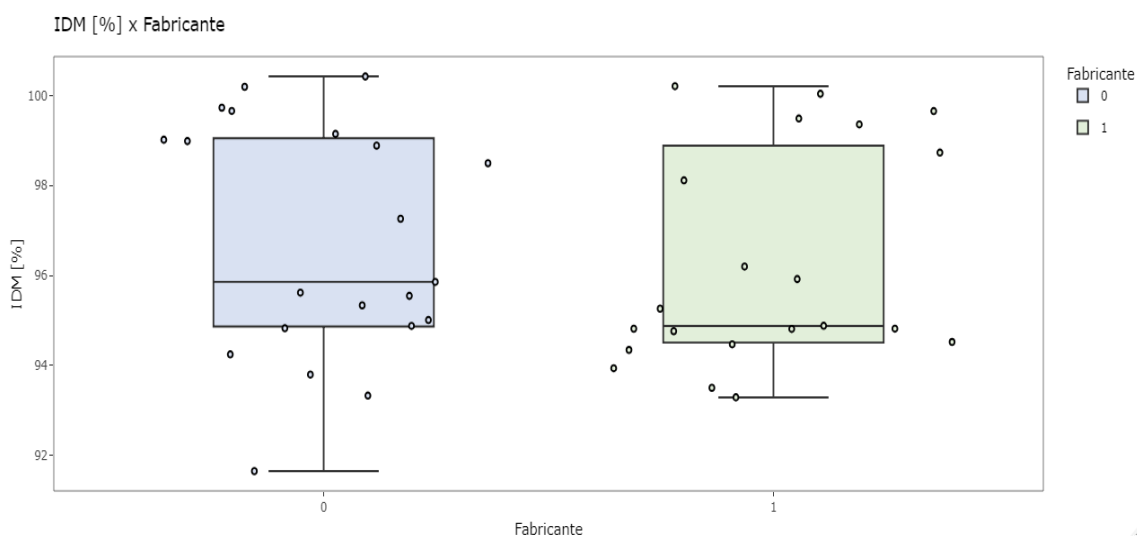
As ocorrências mostram uma curva bimodal. Os valores de média e mediana resultaram em 96,50% e 95,59%, respectivamente. As estatísticas descritivas e gráfico boxplot do IDM ensaiadas em hidrômetros volumétricos para os dois fabricantes são apresentadas na Tabela 13 e Figura 45.

Tabela 13 – Estatísticas descritivas do IDM (%) para hidrômetros volumétricos dos dois fabricantes

	Mínimo	1º quartil	Mediana	Média	3º quartil	Máximo	Desv. Pad.
<b>Marca 0</b>	91,65	94,88	95,86	96,76	99,02	100,43	2,60
<b>Marca 1</b>	93,29	94,52	94,88	96,24	98,73	100,21	2,39
<b>Global</b>	91,65	94,77	95,59	96,50	99,01	100,43	2,48

Fonte: Autor (2022).

Figura 45 - Gráfico boxplot para para hidrômetros volumétricos para os dois fabricantes

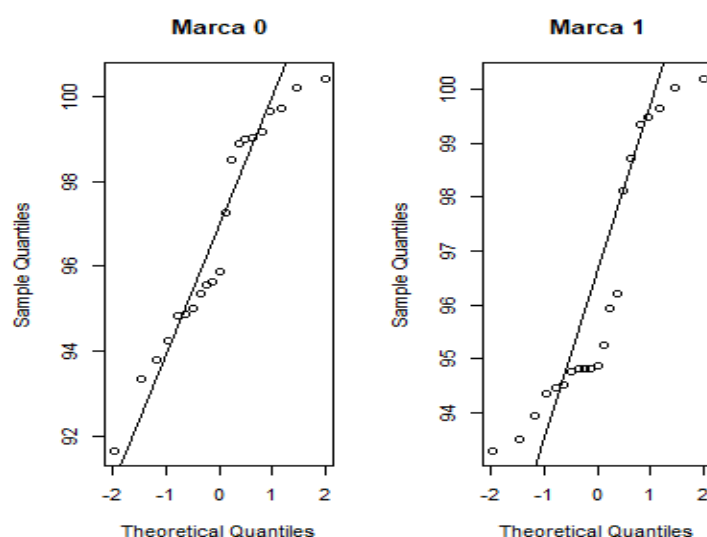


Fonte: Autor (2022).

Do mesmo modo tal como nos hidrômetros taquimétricos, percebe-se aqui, ao se comparar os dois fabricantes elencados para este estudo, valores distintos de mínimos (91,65%; 93,29%) de IDM, assim como de medianas (95,86%; 94,24%), e valores máximos (100,43%; 100,21%). No entanto, analisada a estatística Kruskal-Wallis, obteve-se um p-valor de 0,36, indicando não haver diferença estatísticas entre as marcas.

No gráfico da Figura 46 pode-se observar a ocorrência dos pontos para uma análise visual da normalidade por marca. Apesar de observadas distâncias entre a ocorrência de alguns pontos e a linha de tendência, os gráficos indicam normalidade para ambos os fabricantes estudados.

Figura 46 - Análise da normalidade dos dados de IDM dos hidrômetros volumétricos, comparando ambas as marcas



Fonte: Autor (2022).

Os valores mínimos, médios e máximos, encontram-se ainda bem acima dos resultados obtidos para os hidrômetros taquimétricos, indicando que estes medidores possuem maior eficiência na medição, especialmente no início de funcionamento, o que é corroborado por Coelho, 2009. De fato, os medidores estudados do tipo volumétricos possuem classe metrológica superior aos taquimétricos, classes C e B respectivamente, o que representa um maior campo de medição com erros menores, especialmente em baixas vazões, fato que eleva o resultado geral do IDM (TARDELLI FILHO, 2006; TSUTIYA, 2006; COELHO, 2009).



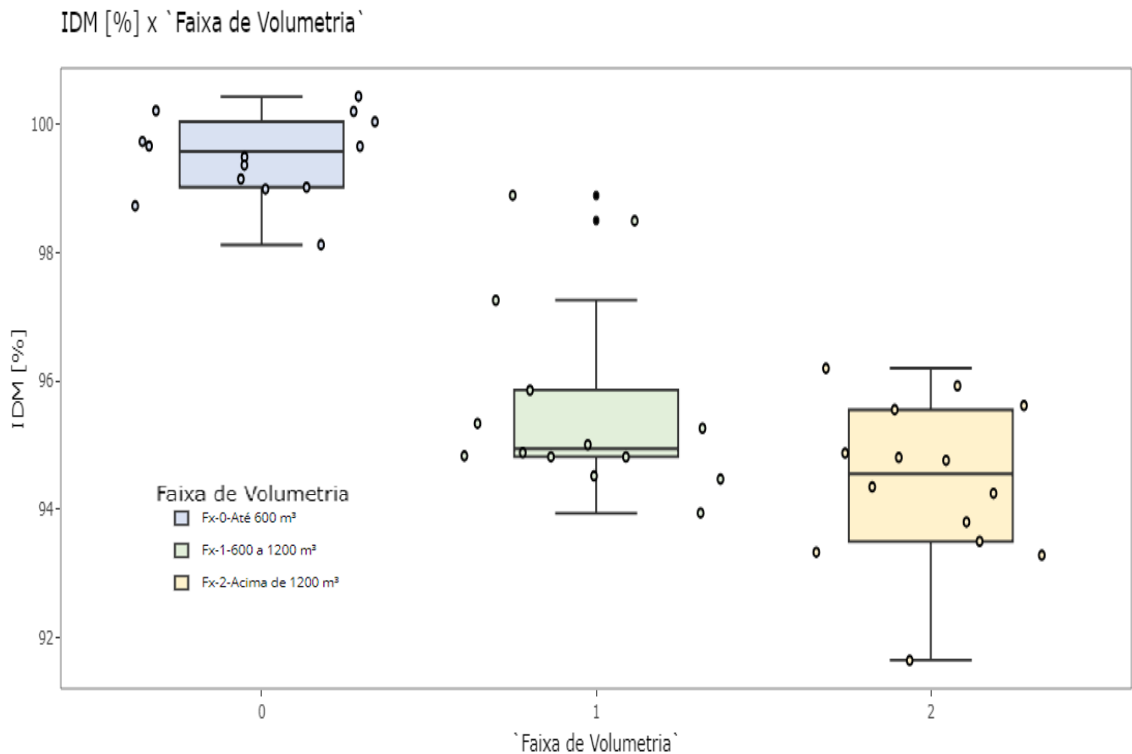
Os gráficos de boxplot apresentam comportamento de ocorrências em locais muito semelhantes e distribuição equânime de resultados dentro da amplitude de cada qual, contudo os dados do fabricante 1 apresentam uma leve assimetria positiva. Na sequência apresentam-se as estatísticas descritivas dos valores de IDM dos hidrômetros volumétricos e gráfico de boxplot, para as três faixas de volumetria (Tabela 14 e Figura 47).

Tabela 14 - Estatísticas descritivas do IDM (%) para hidrômetros taquimétricos para as três faixas de volumetria

	Mínimo	1º quartil	Mediana	Média	3º quartil	Máximo	Desv. Pad.
<b>Faixa de vol 0-600 m³</b>	98,12	99,05	99,58	99,49	99,96	100,43	0,64
<b>Faixa de vol 600-1200 m³</b>	93,94	94,82	94,94	95,60	95,73	98,89	1,52
<b>Faixa de vol acima de 1.200 m³</b>	91,65	93,57	94,55	94,42	95,38	96,20	1,24
<b>Global</b>	91,65	94,77	95,59	96,50	99,01	100,43	2,48

Fonte: Autor (2022).

Figura 47 - Gráfico boxplot para hidrômetros taquimétricos para as três faixas de volumetria

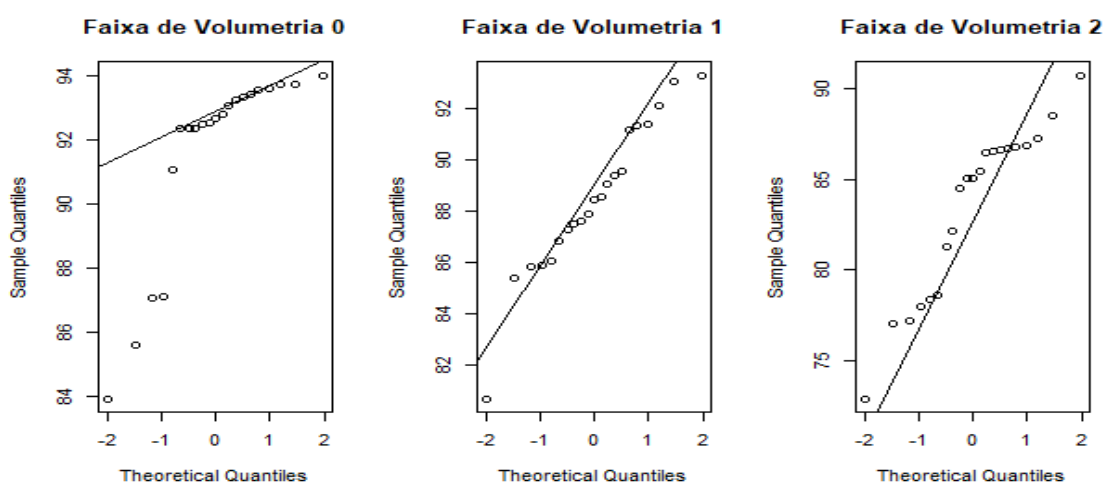


Na comparação das três faixas de volumetria para os hidrômetros volumétricos, ou seja, 0 a 600, 600 a 1.200, e acima de 1.200 m<sup>3</sup> de volume totalizado, percebe-se uma amplitude grande de valores mínimos (98,12%; 93,94%; 91,65%) e valores máximos (100,43%; 98,89%; 96,20%) de IDM. O valor da mediana foi atípico (99,58%; 94,94%; 94,55%), uma vez que se esperava igualmente, assim como para mínimos e máximos, uma redução mais acentuada, ao passo que a volumetria crescesse.

Do ponto de vista estatístico observaram-se diferenças significativas entre as faixas de volumetria, por meio da aplicação do teste Kruskal-Wallis, em que se obteve p-valor < 0,001. O teste de Wilcoxon-Mann-Whitney foi utilizado para comparação múltipla de significância entre as faixas de volumetria, em que se constatou diferenças significativas apenas entre as faixas de volumetria até 600 m<sup>3</sup> e de 600 a 1200 m<sup>3</sup>, e, entre as faixas de volumetria até 600 m<sup>3</sup> e acima de 1200 m<sup>3</sup>, com resultados de p-valores de 1,0e-06 e 1,5e-07, respectivamente. Já no caso da comparação entre as faixas de volumetria de 600 a 1200 m<sup>3</sup> e acima de 1200 m<sup>3</sup>, obteve-se o p-valor de 0,17.

No gráfico da Figura 48 pode-se observar a ocorrência dos pontos para uma análise visual da normalidade, relacionada à faixa de volumetria. Apesar de observadas distâncias entre a ocorrência de alguns pontos e a linha de tendência, os gráficos indicam normalidade para as três faixas de volumetria.

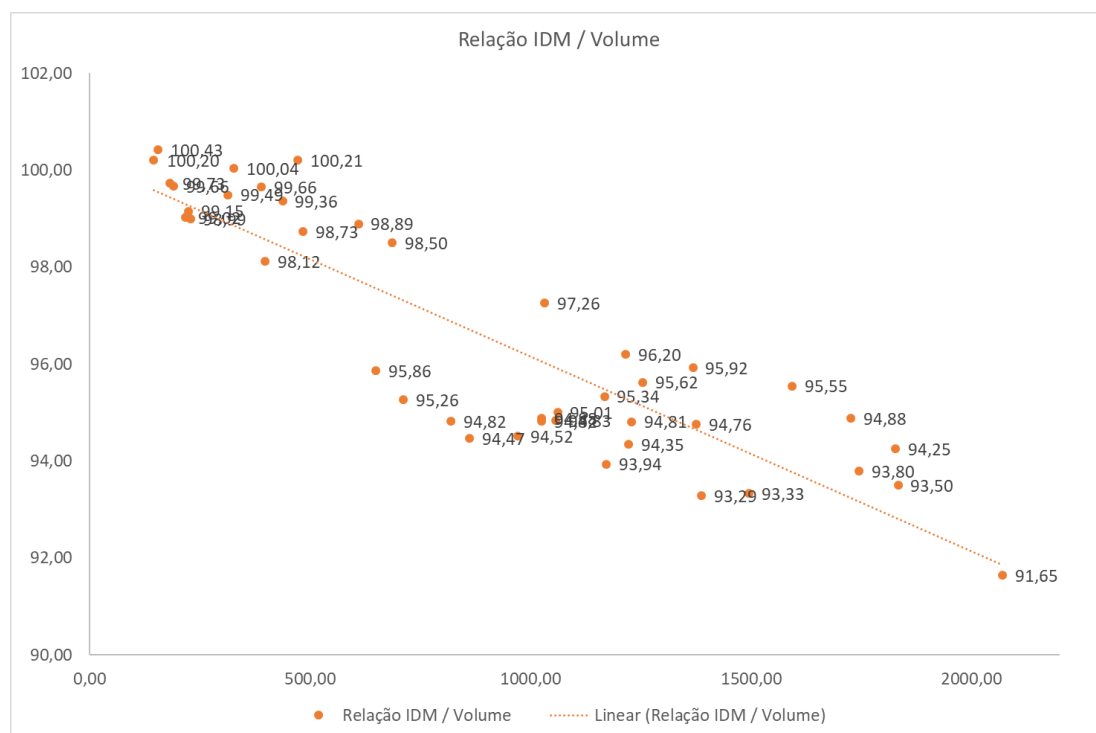
Figura 48 - Análise da normalidade dos dados de IDM dos hidrômetros volumétricos, comparando as três faixas de volumetria



Fonte: Autor (2022).

Em linhas gerais, também fica aqui indicada, pelo resultado dos ensaios da amostra, que a volumetria apresenta-se como um fator inversamente proporcional ao IDM, ou seja, quanto maior a volumetria, maior a tendência de obtenção de valores mais baixos de IDM. A Figura 49 apresenta o gráfico de dispersão do IDM pela volumetria para os medidores volumétricos.

Figura 49 - Dispersão do IDM, pela volumetria – Hidrômetros volumétricos



Fonte: Autor (2022).

A configuração da dispersão do IDM pela volumetria indica, mais uma vez, que existe uma forte correlação entre estas variáveis, de modo inversamente proporcional. A análise visual da dispersão indica ainda distâncias equivalentes de valores acima e abaixo da linha de tendência. A correlação de Pearson entre a volumetria e o IDM apresenta valor de 0,88. O modelo de regressão (Equação 7), e respectivas validações estatísticas são apresentadas na sequência para o medidor volumétrico.

$$IDM = 100,463866 - 0,568821X_1 - 0,004026X_2 \quad (7)$$

Onde:

*IDM* é a variável resposta, índice de desempenho metrológico, em %;  
 $X_1$  se refere à marca ( $X_1=1$  para a marca 1, e  $X_1=0$  para a marca 0);  
 $X_2$  é a volumetria, dada em metros cúbicos.

A seguir apresenta-se o sumário dos resíduos, bem como coeficientes do modelo (Tabela 15):

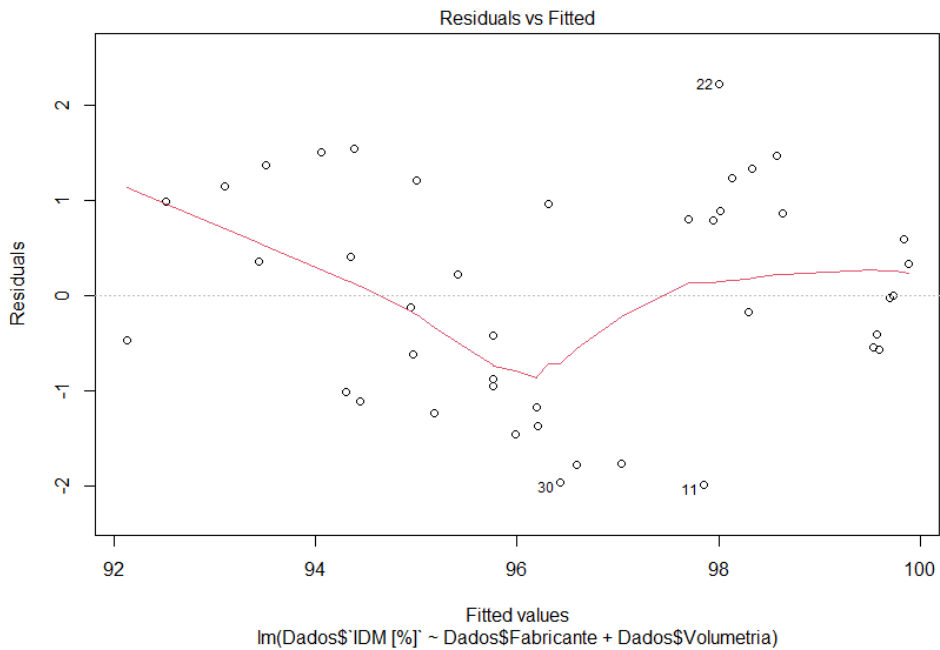
Tabela 15 - Tabela de coeficientes da regressão – Hidrômetros volumétricos

	Estimativa	Erro Padrão	t valor	Pr(> t )
(Intercepto)	100,463866	0,3935	255,292	< 0,001
$X_1$	-0,568821	0,3551	-1,602	0,117
$X_2$	-0,004026	3,294e-04	-12,222	< 0,001

Fonte: Autor (2022).

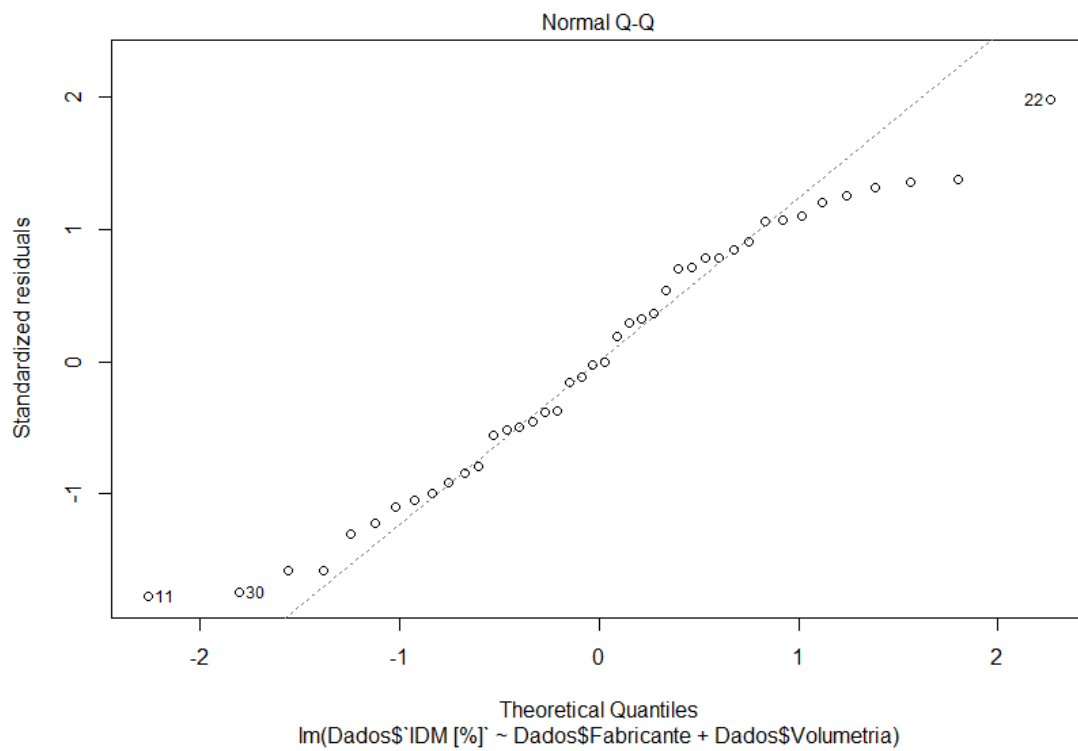
O valor de R-quadrado resultou em 0,80, e R-quadrado ajustado de 0,78, indicando que marca e volumetria explicam quase 80% da variabilidade nos valores do IDM. Na sequência são apresentados os gráficos dos resíduos do modelo, normalidade dos erros, distribuição dos pontos entre variáveis independentes, e distância de Cook (Figuras 50 a 53).

Figura 50 - Erros residuais ajustados – Hidrômetros volumétricos



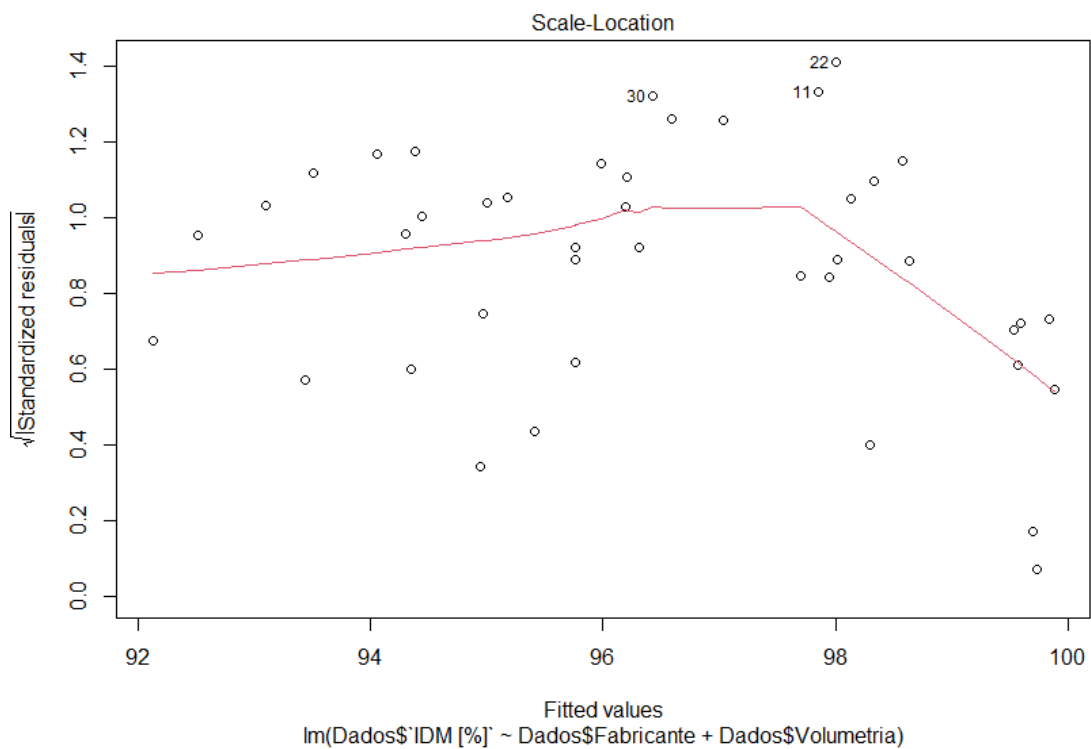
Fonte: Autor (2022).

Figura 51 - Normalidade dos erros – Hidrômetros volumétricos



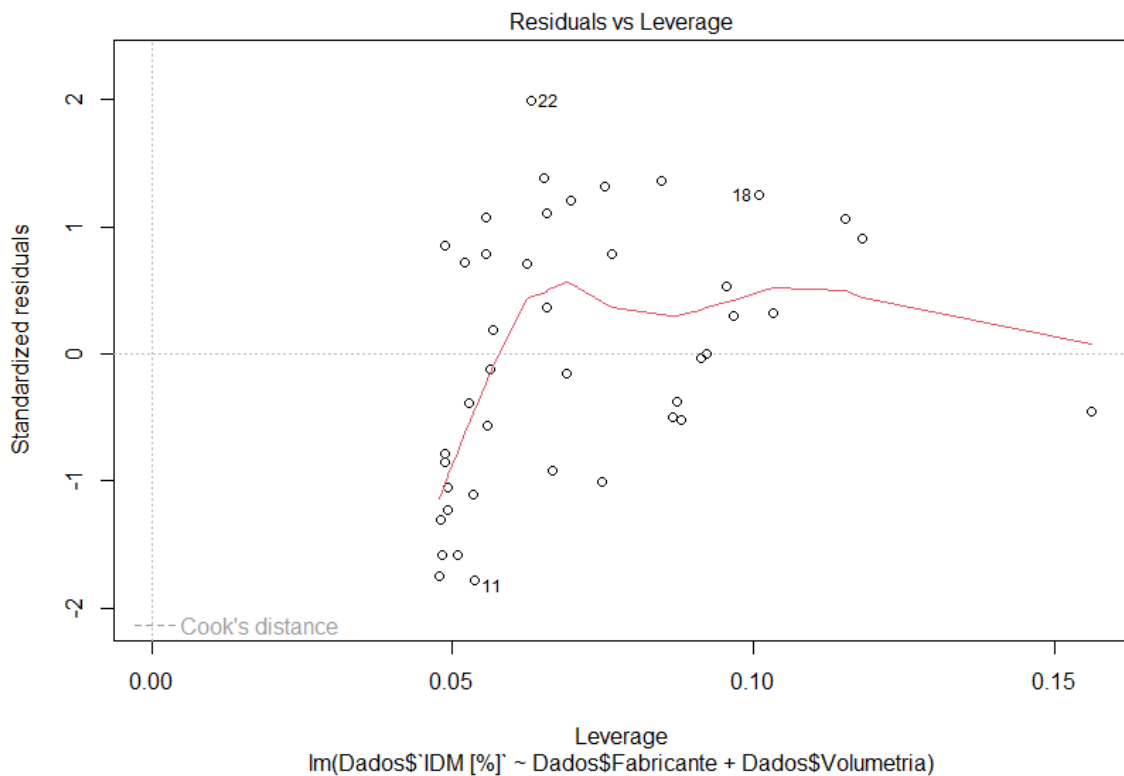
Fonte: Autor (2022).

Figura 52 - Distribuição dos pontos entre variáveis independentes – Hidrômetros volumétricos



Fonte: Autor (2022).

Figura 53 - Distância de cook – Hidrômetros volumétricos



Fonte: Autor (2022).

Igualmente como no modelo para os hidrômetros taquimétricos, percebe-se visualmente que os erros residuais resultantes (Figura 50) encontram-se próximos a zero, bem como verifica-se a existência de uma distribuição equânime dos mesmos.

A distribuição normal dos pontos (Figura 51) também é percebida ao analisar o gráfico. Em relação à distância de Cook (Figura 53), esta resultou abaixo de 0,5 para todos os pontos que entraram na composição do modelo, assim, indicando um modelo ajustado. A validação geral do modelo foi realizada segundo Peña e Slate (2006) (Tabela 16).

Tabela 16 - Análise da validação geral do modelo – Hidrômetros volumétricos

	Valor	p-valor	Decisão
Estatística global. A rejeição do nulo ( $p < 0,05$ ) indica uma relação não linear entre uma ou mais variáveis independentes para com a dependente. O resultado de p-valor obtido indica uma relação linear.	6,95	0,14	Suposições aceitáveis.
Distorção - Assimetria. Não há necessidade de transformação de dados. A rejeição do nulo ( $p < 0,05$ ) indicaria necessidade de transformação dos dados.	0,06	0,81	Suposições aceitáveis.
Curtose. Não há necessidade de transformação de dados. A rejeição do nulo ( $p < 0,05$ ) indicaria necessidade de transformação dos dados.	1,98	0,16	Suposições aceitáveis.
Função de ligação. Verificação se a variável dependente é contínua ou categórica. A rejeição do nulo ( $p < 0,05$ ) indicaria necessidade de forma alternativa para o modelo linear generalizado.	3,68	0,06	Suposições aceitáveis.
Heteroscedasticidade. A rejeição do nulo ( $p < 0,05$ ) indicaria resíduos heteroscedásticos e, portanto, não constantes em toda a faixa de X, o que não é o caso.	1,24	0,27	Suposições aceitáveis.

Fonte: Autor (2022).

Pelos resultados práticos aqui apresentados, evidenciou-se que a submedição dos hidrômetros tende a crescer com o gradativo aumento do uso do equipamento, bem como a taxa em que isso ocorre, corroborando estudos de Aguiar (2019); Arregui *et al.* (2010); Tardelli Filho (2016); e Yazdandoost *et al.* (2018). Corrobora-se ainda as afirmações de Silva (2015), em que é ressaltado, que em grande parte os erros dos medidores são negativos, detectados em faixas de vazão abaixo do campo de medição.

Ao passo que a volumetria total registrada cresce, em decorrência dos fluxos passantes pelo equipamento, as taxas de submedição tendem a aumentar, como apontado por Yazdandoost *et al.* (2018). Isso ficou aqui evidenciado, comprovando, mais uma vez, a necessidade da manutenção dos programas de trocas preventivas de medidores por parte das concessionárias de saneamento.

## 4.2. VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Para realizar a validação dos modelos propostos foram apurados os erros absolutos e erros relativos de uma amostra separada para tal finalidade, a qual não foi utilizada para construção dos modelos. O objetivo desses testes é verificar se os modelos possuem de fato capacidade de predição do desempenho dos medidores de água, para os dois tipos de hidrômetros estudados. Na Tabela 17 apresentam-se os resultados da validação para os medidores taquimétricos.

Tabela 17 - Validação do modelo – Hidrômetros taquimétricos

HD.Instalado	Fabricante	Faixa de Volumetria	IDM Predito [%]	IDM Real [%]	Erro Absoluto	Erro Relativo
Medidor 106	0	0	89,23	90,19	0,97	1,08%
Medidor 107	0	0	88,96	90,75	1,79	2,01%
Medidor 108	0	0	88,76	88,19	-0,57	-0,64%
Medidor 109	0	1	84,70	85,41	0,71	0,83%
Medidor 110	0	1	86,69	85,82	-0,88	-1,01%
Medidor 111	0	1	85,75	86,35	0,59	0,69%
Medidor 112	0	2	84,58	83,67	-0,91	-1,07%
Medidor 113	0	2	84,37	85,43	1,06	1,26%
Medidor 114	0	2	84,15	85,88	1,73	2,05%
Medidor 115	1	0	91,92	91,83	-0,10	-0,10%
Medidor 116	1	0	92,34	92,30	-0,04	-0,04%
Medidor 117	1	0	92,43	87,62	-4,80	-5,20%
Medidor 118	1	1	90,05	88,06	-2,00	-2,22%
Medidor 119	1	1	89,70	86,90	-2,79	-3,11%
Medidor 120	1	1	89,95	87,66	-2,29	-2,54%
Medidor 121	1	2	86,93	86,78	-0,15	-0,17%
Medidor 122	1	2	86,82	87,54	0,72	0,82%
Medidor 123	1	2	87,49	87,63	0,14	0,16%
Medidor 124	2	0	92,64	92,66	0,02	0,02%
Medidor 125	2	0	92,83	92,90	0,07	0,07%
Medidor 126	2	0	92,83	94,52	1,70	1,83%
Medidor 127	2	1	89,41	91,19	1,78	1,99%
Medidor 128	2	1	89,32	93,33	4,02	4,50%
Medidor 129	2	1	89,27	93,91	4,64	5,20%
Medidor 130	2	2	86,82	88,84	2,02	2,33%
Medidor 131	2	2	83,38	78,51	-4,86	-5,83%
Medidor 132	2	2	76,54	72,91	-3,63	-4,75%
Média	-	-	88,07	88,03	-0,04	-0,07%

Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 18 apresentam-se os resultados da validação para os medidores volumétricos.



Tabela 18 - Validação do modelo – Hidrômetros volumétricos

HD.Instalado	Fabricante	Faixa de Volumetria	IDM Predito [%]	IDM Real [%]	Erro Absoluto	Erro Relativo
Medidor 133	0	0	99,21	97,94	1,27	1,29%
Medidor 134	0	0	99,41	98,88	0,53	0,54%
Medidor 135	0	0	99,79	99,56	0,22	0,23%
Medidor 136	0	1	97,87	99,39	-1,52	-1,53%
Medidor 137	0	1	96,51	94,58	1,93	2,04%
Medidor 138	0	1	95,83	94,99	0,84	0,88%
Medidor 139	0	2	94,02	95,86	-1,84	-1,92%
Medidor 140	0	2	95,46	96,89	-1,43	-1,47%
Medidor 141	0	2	94,20	93,16	1,04	1,12%
Medidor 142	1	0	98,45	100,14	-1,69	-1,69%
Medidor 143	1	0	98,53	99,74	-1,21	-1,21%
Medidor 144	1	0	98,17	99,54	-1,37	-1,37%
Medidor 145	1	1	95,92	99,45	-3,53	-3,55%
Medidor 146	1	1	96,80	95,63	1,18	1,23%
Medidor 147	1	1	96,39	94,87	1,52	1,61%
Medidor 148	1	2	93,88	95,99	-2,10	-2,19%
Medidor 149	1	2	93,63	93,16	0,47	0,51%
Medidor 150	1	2	94,39	95,92	-1,53	-1,60%
Média	-	-	96,58	96,98	-0,40	-0,39%

Fonte: Autor (2022).

Aqui pode-se perceber baixos valores de erro absoluto e relativo entre o resultado real do IDM e o IDM predito, para ambos os modelos. Para uma análise mais detalhada dos erros apurados no processo de validação, procedeu-se com a sumarização estatística dos erros absolutos, tanto para o medidor taquimétrico, como para o volumétrico. Os resultados são apresentados nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19 - Sumário estatístico dos erros absolutos – Hidrômetros taquimétricos

Mínimo	1º quartil	Mediana	Média	3º quartil	Máximo	Desv. Padrão
-4,86	-0,89	0,07	-0,04	1,38	4,64	2,30

Fonte: Autor (2022).

Tabela 20 - Sumário estatístico dos erros absolutos – Hidrômetros volumétricos

Mínimo	1º quartil	Mediana	Média	3º quartil	Máximo	Desv. Padrão
-3,53	-1,53	-0,49	-0,40	0,99	1,93	1,57

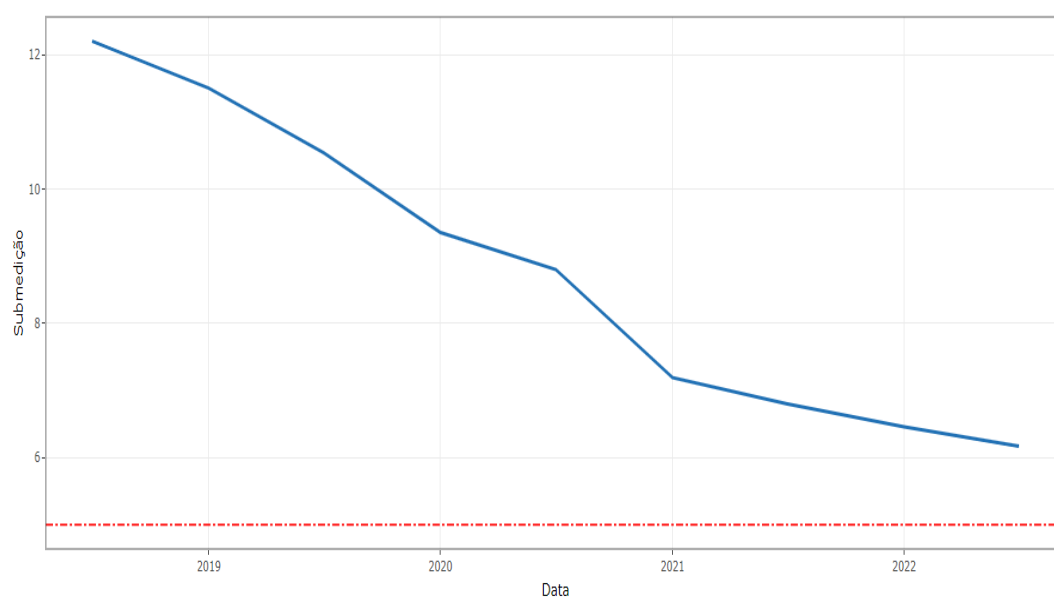
Fonte: Autor (2022).

A variação máxima negativa foi de -4,86% para o medidor taquimétrico, enquanto a máxima positiva foi de 4,64%. A média dos erros foi bastante satisfatória para os hidrômetros taquimétricos, resultando em apenas -0,04%. Já para os hidrômetros volumétricos, apesar da média ter sido maior, atingindo o valor de -0,40%, a amplitude de resultados foi menor, variando de -3,53% a 1,93%. Estes resultados estão condizentes com os coeficientes de determinação dos modelos obtidos, com R-quadrado de 0,61 e R-quadrado ajustado de 0,58 para hidrômetros taquimétricos; e R-quadrado de 0,80 e R-quadrado ajustado de 0,78 para hidrômetros volumétricos.

#### 4.3. CÁLCULO DA RECUPERAÇÃO DE RECEITA

Na sequência dos resultados, apresenta-se o cálculo do índice de submedição do parque de medidores da CAJ para o histórico de 5 anos, ou seja, a partir do ano de 2018 até 2022. O índice foi calculado com base nos modelos obtidos para os hidrômetros taquimétricos e volumétricos. Percebe-se que, em decorrência das campanhas anuais de substituições preventivas com migração de tecnologia de medição, conforme visto na Tabela 21 e Figura 54, a submedição gradativamente foi sendo reduzida.

Figura 54 - Evolução do índice de submedição (%) do parque da CAJ



Fonte: Autor (2022).

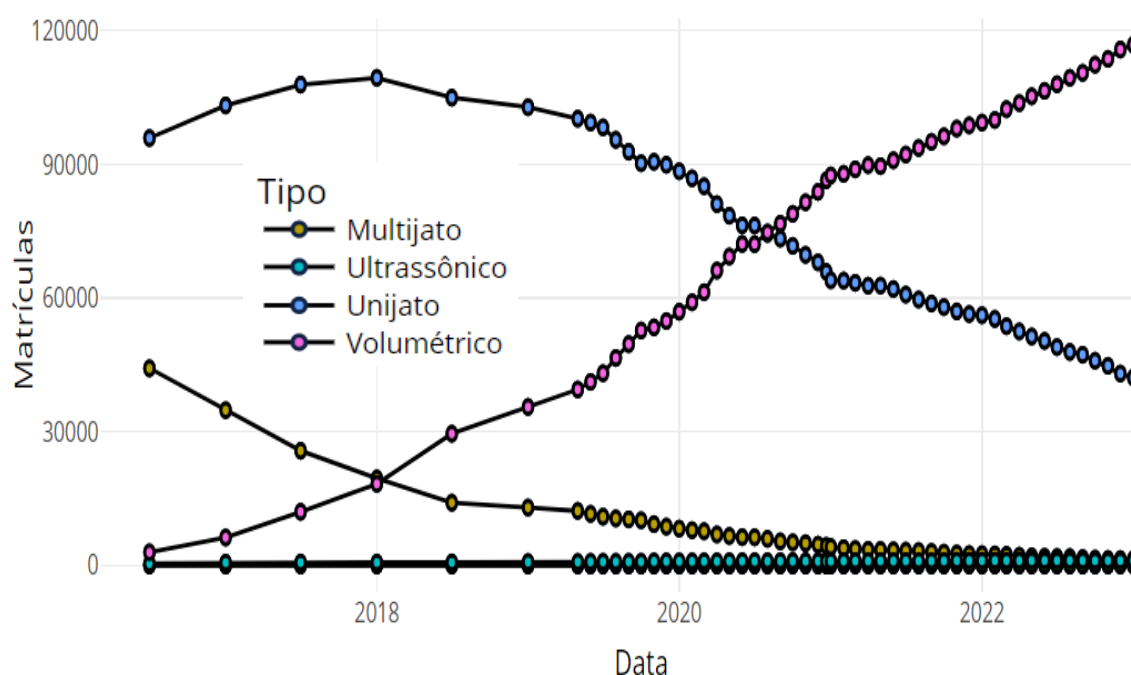
Tabela 21 - Evolução do índice de submedição (%) do parque da CAJ

jul/18	jan/19	jul/19	jan/20	jul/20	jan/21	jul/21	jan/22	jul/22
12,2	11,5	10,5	9,4	8,8	7,2	6,8	6,5	6,2

Fonte: Autor (2022).

O histórico do quantitativo de hidrômetros por tipo de medidores pode ser visualizado na Figura 55. Percebe-se uma migração de medidores do tipo taquimétrico, sejam unijatos ou multijatos, para medidores volumétricos, os quais como apurou-se neste estudo, apresentam um desempenho melhor do que o taquimétrico, seja no IDM inicial (quando novo), ou a perda de desempenho (a qual é mais suave, denotando uma vida útil mais longa).

Figura 55 - Evolução do quantitativo de tipos de medidores do parque da CAJ



Fonte: Autor (2022).

A Tabela 22 mostra a evolução da receita gerada em dólares para o consumo real de 1 milhão de m<sup>3</sup> de água e a perda respectiva.

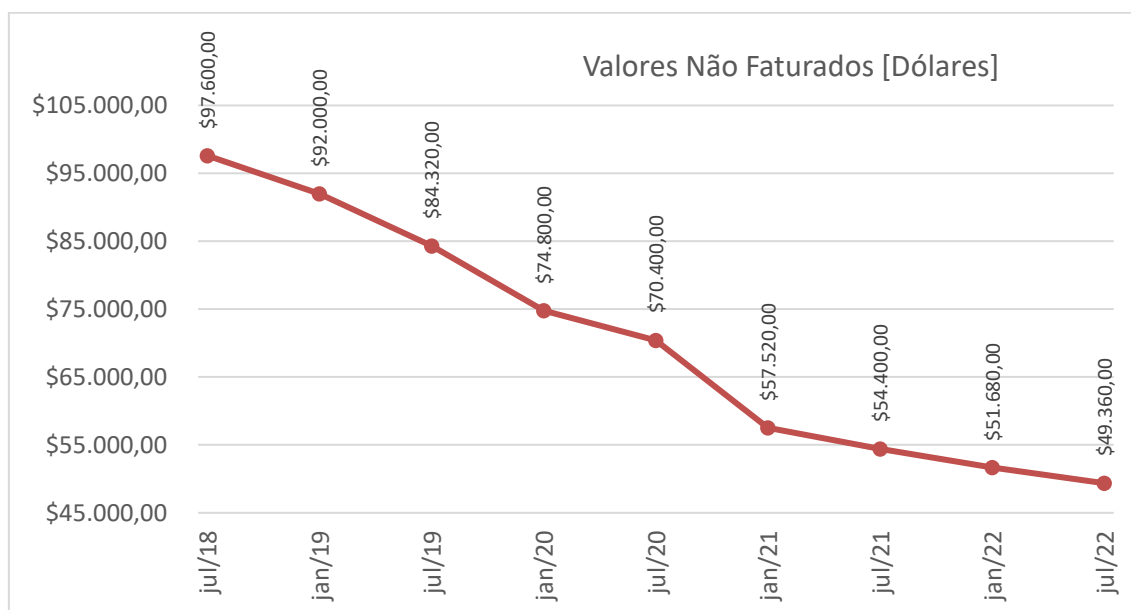
Tabela 22 - Evolução do percentual de submedição, e respectivos consumos e valores faturados e não faturados

Referência	Percentual de submedição [%]	Consumo real [m³]	Consumo não registrado calculado [m³]	Consumo registrado calculado [m³]	Valor faturado calculado [Dólares]	Perda financeira calculada [Dólares]
jul/18	12,20%	1.000.000	122.000	878.000	\$702.400,00	\$97.600,00
jan/19	11,50%	1.000.000	115.000	885.000	\$708.000,00	\$92.000,00
jul/19	10,54%	1.000.000	105.400	894.600	\$715.680,00	\$84.320,00
jan/20	9,35%	1.000.000	93.500	906.500	\$725.200,00	\$74.800,00
jul/20	8,80%	1.000.000	88.000	912.000	\$729.600,00	\$70.400,00
jan/21	7,19%	1.000.000	71.900	928.100	\$742.480,00	\$57.520,00
jul/21	6,80%	1.000.000	68.000	932.000	\$745.600,00	\$54.400,00
jan/22	6,46%	1.000.000	64.600	935.400	\$748.320,00	\$51.680,00
jul/22	6,17%	1.000.000	61.700	938.300	\$750.640,00	\$49.360,00

Fonte: Autor (2022).

Dada a submedição de 12,2%, para cada 1 (um) milhão de metros cúbicos de água consumidos na cidade, estima-se que havia uma submedição absoluta de 122 mil m³, resultando em um volume registrado de 878 mil m³. Ao passo que a submedição gradativamente foi sendo reduzida, esta perda final, durante este período do estudo, é estimada em 64,7 mil m³, com conseqüente registro de 938 mil m³ (Figura 56).

Figura 56 - Evolução dos valores não faturados estimados



Fonte: Autor (2022).

Evidencia-se, mais uma vez, a importância dos hidrômetros como ativos fundamentais das redes de distribuição, já que a receita das concessionárias é proveniente do somatório do volume registrado nas unidades consumidoras por meio dos medidores (YAZDANDOOST *et al.*, 2018). O entendimento das curvas de decaimento de desempenho e o cálculo das montas financeiras decorrentes, necessitam ser observados pelas concessionárias de saneamento, para que as mesmas possam vir a otimizar seus planos de gestão de ativos reduzindo perdas e maximizando receitas.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou a apuração dos índices de desempenho metrológico de medidores, com base na ABNT NBR 15.538/2014, e posterior estabelecimento de modelagem estatística de queda de desempenho dos hidrômetros, considerando as variáveis marca e volumetria total registrada, para hidrômetros taquimétricos unijato classe metrológica B, e hidrômetros volumétricos classe metrológica C. Os modelos encontrados permitiram entender que os desgastes no medidor repercutem na perda de seu desempenho, considerando o aumento da volumetria registrada, em diferentes modelos e marcas estudados. Os satisfatórios resultados de variabilidade entre IDM predito *versus* IDM real apurado, com erro absoluto médio de -0,07% para os hidrômetros taquimétricos, e -0,39% para os hidrômetros volumétricos, permitem concluir que a modelagem atendeu o almejado objetivo da pesquisa.

A pesquisa permitiu evidenciar que a marca mostrou influenciar o IDM, para ambos os medidores estudados. A taxa de decaimento de desempenho para os medidores taquimétricos unijato foi apurada em -0,0055% por m<sup>3</sup>. Para este modelo, o IDM inicial foi apurado em 91,24% até 94,19%, dependendo do fabricante. O medidor volumétrico apresentou um desempenho superior ao taquimétrico, tendo um decaimento de -0,0040% por m<sup>3</sup>, com IDM inicial de 99,90% a 100,46%, dependendo do fabricante.

Dados os resultados dos modelos, apurando-se o índice de submedição dos medidores do parque da Companhia Águas de Joinville, foi possível perceber que, com o aumento da utilização dos medidores volumétricos, o índice de submedição estimado para o parque reduziu de 12,2 a 6,2%, uma queda de aproximadamente 50%.

Em termos práticos, por meio da modelagem estatística presente na pesquisa, possibilita-se viabilizar a efficientização da gestão de parques de hidrômetros de concessionárias de saneamento, auxiliando na tomada de decisão das campanhas de substituições preventivas, ao passo que a previsibilidade do IDM permite levantar as melhores oportunidades de recuperação de receita e redução de perdas aparentes.

Ressalta-se aqui a importância do hidrômetro no contexto das concessionárias de abastecimento de água, para medir o consumo dos usuários,

e com base nisso permitir efetuar o faturamento pela água consumida, além de avaliar o balanço hídrico do sistema de distribuição, e identificar falhas na rede, furto de água, bem como comportamentos anômalos por parte dos usuários.

Outro ponto a ser destacado se trata da possibilidade de uma gestão mais precisa dos recursos hídricos extraídos da natureza, impactando na gestão da demanda no contexto da segurança hídrica, já que a adequada medição implica em faturamento mais apurado (minimizando a submedição). Neste contexto contribui-se para um consumo consciente do recurso, ainda que haja uma elasticidade de preço baixa para este insumo.

No que se refere à recomendação para futuros trabalhos sugere-se a análise de outras variáveis que poderiam influenciar o desempenho de medidores, tais como a padronização da ligação, inclinação do medidor, ocorrências de intermitências de abastecimento, dentre outras. Ademais, outros tipos de hidrômetros e fabricantes poderiam ser utilizados na base de composição dos modelos estatísticos. Perfis diferentes de consumo poderiam ainda ser utilizados em contraponto ao apresentado pela ABNT NBR 15.538/2014, para ensaios de apuração do desempenho dos medidores. Ainda como sugestão para futuras pesquisas, sugere-se um aprofundamento da avaliação do medidor para identificação das causas das diferenças identificadas entre marcas e faixas de volumetria, as quais podem ser provenientes de processos de fabricação, qualidade de matérias-primas, projeto de produto, dentre outros fatores.

O conhecimento da perda de desempenho de hidrômetros contribui com os programas de gestão de ativos do parque de medidores das concessionárias de saneamento. Com um melhor equilíbrio do balanço hídrico obtido pela redução de perdas aparentes, importantes recursos financeiros são gerados, e este caixa adicional permite por sua vez investimentos, os quais são necessários para universalização dos serviços de água e esgoto, e melhorias operacionais que retroalimentam o sistema de geração de receitas, gerando um círculo virtuoso.

## 6. REFERÊNCIAS

ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Controle e Redução de Perdas nos Sistemas Públicos de Abastecimento de Água: Posicionamento e Contribuições Técnicas da ABES**. São Paulo, 2015. Disponível em: [http://abes-dn.org.br/pdf/28Cbesa/Perdas\\_Abes.pdf](http://abes-dn.org.br/pdf/28Cbesa/Perdas_Abes.pdf). Acesso em: 11 fev. 2020.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.538/2014: Hidrômetros para água fria - Ensaio para avaliação de desempenho de hidrômetros em altas e baixas vazões em hidrômetro até 2,5 m³/h de vazão nominal para água fria**. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5.626/2020: Sistemas prediais de água fria e água quente - Projeto, execução, operação e manutenção**. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.194/2019: Medidores de água potável — Padronização**. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 61439-1:2016 Versão Corrigida:2017: Conjuntos de manobra e comando de baixa tensão, Parte 1: Regras gerais**. Rio de Janeiro, 2017.

AGRESTI, Alan; FRANKLIN, Christine; KLINGENBERG, Bernhard; POSNER, Michael. **Statistics – The Art and Science of Learning from Data**. 4º ed. Pearson Education. 2018.

AGUIAR, Ludmilla Costa de. **Avaliação de perdas aparentes de água potável por erros de medição em hidrômetros de economias da Grande Vitória – ES**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019. Disponível em: [http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese\\_13830\\_Defesa%20Ludmila\\_PPGES-%20Revisado%20%282%29.pdf](http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_13830_Defesa%20Ludmila_PPGES-%20Revisado%20%282%29.pdf). Acesso em: 09 fev. 2021.

ALMANDOZ, Javier; CABRERA, Enrique; ARREGUI, Francisco; CABRERA JR., Enrique. COBACHO, Ricardo. Leakage Assessment through Water Distribution Network Simulation. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 131, n. 6, 2005.

AL-WASHALI, Taha; MAHARDANI, Meidy; SHARMA, Saroj; ARREGUI, Francisco; KENNEDY, Maria. Impact of float-valves on water meter performance under intermittent and continuous supply conditions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 163, n.105091, 2020.

AL-WASHALI, Taha; SHARMA, Saroj; KENNEDY, Maria. Methods of Assessment of Water Losses in Water Supply Systems: a Review. **Water Resources Management**, v. 30, n. 4985-5001. 2016.



ARREGUI, F.; CABRERA JR.; Enrique, COBACHO, R. **Integrated Water Meter Management**. IWA Publishing. 2007. 282 p. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=2onbCwAAQBAJ&dq=velocity+water+meter&lr=&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.br/books?id=2onbCwAAQBAJ&dq=velocity+water+meter&lr=&source=gbs_navlinks_s). Acesso em: 21 fev. 2021.

ARREGUI, F.; GARCÍA, J.; PATIÑO, G.; SOLANO, J. **Metodología para la Evaluación del Error de Medición de um Parque de Contadores**. Grupo Mecânica de Fluídos – Departamento de Ingeniera Hidráulica y Medio Ambiente – Universidade Politécnica de Valencia, v. 5, nº 4, 1998. Disponível em: <https://riunet.upv.es/handle/10251/119082>. Acesso em: 05 mar. 2021.

ARREGUI, F.; JORDAN, R. C.; OLIVARES, J. S.; GARCÍA, J. G. **Calculating the optimum level of apparent losses due to meter inaccuracies**. In: Water Loss 2010, São Paulo. 2010. Disponível em: <https://ita.upv.es/idi/fichaarticulo-en.php?id=216>. Acesso em: 26 fev. 2021.

AWWA - American Water Works Association. **The State of Water Loss Control in Drinking Water Utilities – A White Paper from the American Water Works Association**. 2016. Disponível em: <https://www.awwa.org/Portals/0/AWWA/ETS/Resources/WLCWhitePaper.pdf?ver=2017-09-11-153507-487>. Acesso em: 12 fev. 2021.

BAGULEY, Thom. **Serious Stats – A Guide to Advanced Statistics for the Behavioral Sciences**. Palgrave Macmillan. 2012.

BAKER, R. **Flow Measurement Handbook**. 2<sup>o</sup> ed. Nova York: Cambridge University Press. 2016. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/flow-measurement-handbook/5D42EDD07C801BA0E051BB9C68E82AFE>. Acesso em: 09 fev. 2021

BARBETTA, Pedro Alberto; REIS, Marcelo Menezes; BORNIA, Antonio Cezar. **Estatística para Cursos de Engenharia e Informática**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

BILLINGS, R.; JONES, C. Forecasting Urban Water Demand. **American Water Works Association**. Denver, Colorado, Estados Unidos da América. 2008. Disponível em: <https://www.awwa.org/Store/Forecasting-Urban-Water-Demand-Second-Edition/ProductDetail/6395>. Acesso em: 09 fev. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de saneamento** / Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. – 5.ed. Brasília: Funasa, 2019. ISBN 978-85-7346-060-5

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

CHUNG, Jong-Hee; LIM, Yong-Bin; KIM, Donghoh. BDEsize: An R package for efficient determination of sample size in a balanced design of experiments. **SoftwareX**, v. 16, p. 100837, 2021.

COELHO, Adalberto Cavalcanti. **Medição de água, política e prática—Manual de consulta**. Comunicarte. Pernambuco: Recife, 1996.

COELHO, Adalberto Cavalcanti. **Micromedicação em sistemas de abastecimento de água**. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2009.

COELHO, Edumar Ramos Cabral; BIASUTTI, Saulo. Water loss indicators used in public water supply services in Brazil: Literature research and review. **International Sustainable Built Environment Conference**, Vitória. Sustainable Urban Communities towards a Nearly Zero Impact Built Environment, v. 2. pp. 963-972, 2016.

COMPANHIA ÁGUAS DE JOINVILLE, CAJ, 2018. **Relatório de Sustentabilidade, 2018**. Joinville: Prefeitura Municipal, 2018. 27p. Disponível em: <https://www.aguasdejoinville.com.br/wp-content/uploads/2019/01/Relatorio-deSustentabilidade-leitura-web.pdf>. Acesso em: 01/09/2019.

CRIMINISI, A. et al. Evaluation of the apparent losses caused by water meter under-registration in intermittent water supply. **Water Science and Technology**, v. 60, n. 9, p. 2373-2382, 2009.

DE PÁDUA, Valter Lúcio. **Abastecimento de água para consumo humano**. Editora UFMG, 2006.

EMPINOTTI, Vanessa Lucena et al. Desafios de governança da água: conceito de territórios hidrossociais e arranjos institucionais. **Estudos Avançados**, v. 35, p. 177-192, 2021.

EUROPEAN COMMISSION. **Good Practices on Leakage Management** - Documento de Referência da União Européia. 2015. Disponível em: [https://circabc.europa.eu/sd/a/1ddfba34-e1ce-4888-b031-6c559cb28e47/Good%20Practices%20on%20Leakage%20Management%20-%20Main%20Report\\_Final.pdf](https://circabc.europa.eu/sd/a/1ddfba34-e1ce-4888-b031-6c559cb28e47/Good%20Practices%20on%20Leakage%20Management%20-%20Main%20Report_Final.pdf). Acesso em: 09 fev. 2021.

FONTANAZZA, Chiara M. et al. A composite indicator for water meter replacement in an urban distribution network. **Urban Water Journal**, v. 9, n. 6, p. 419-428, 2012.

FONTANAZZA, Chiara M. et al. The apparent losses due to metering errors: a proactive approach to predict losses and schedule maintenance. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 3, p. 229-239, 2015.

FORMIGA-JOHNSON, Rosa Maria; BRITTO, Ana Lucia. Segurança hídrica, abastecimento metropolitano e mudanças climáticas: considerações sobre o caso do Rio de Janeiro. **Ambiente & Sociedade**, v. 23, 2020.

FRAUENDORFER, Rudolf; LIEMBERGER, Roland. **The issues and challenges of reducing non-revenue water**. Asian Development Bank, 2010. Disponível em: <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/27473/reducing-nonrevenue-water.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2021.

GARCIA, JANINE. **Determinação dos fatores influentes no consumo de água em residências unifamiliares de Joinville**. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2020. Disponível em: [https://www.udesc.br/arquivos/cct/id\\_cpmenu/706/2020\\_07\\_24\\_Janine\\_Garcia\\_16020234225632\\_706.pdf](https://www.udesc.br/arquivos/cct/id_cpmenu/706/2020_07_24_Janine_Garcia_16020234225632_706.pdf)

GHOSH, Aindrila; NASHAAT, Mona; MILLER, James; QUADER, Shaikh; MARSTON, Chad. A comprehensive review of tools for exploratory analysis of tubular industrial datasets. **Visual Informatics**, v. 2, n. 4, p. 235-253, dez. 2018.

GONÇALVES, E.; ITONAGA, LCH. Curso de perdas de distribuição de água: nível 3. **RECESA**. Brasília, 2007.

GULARTE, C. B. **Um Estudo sobre a Submedição em Hidrômetros para Aplicação no Controle de Perdas Aparentes no Sistema de Abastecimento de Água de Blumenau**. 2005. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/103013>. Acesso em: 16 fev. 2021.

HEINER, Bryan; BARFUSS, Steven L.; JOHNSON, Michael C. Conditional assessment of flow measurement accuracy. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 137, n. 6, p. 367-374, 2011.

HORNE, James. Water demand reduction to help meet SDG 6: learning from major Australian cities. **International Journal of Water Resources Development**, v. 36, n. 6, p. 888-908, 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa nacional de saneamento básico: abastecimento de água e esgotamento sanitário**. Brasil, IBGE, Coordenação de População e Indicadores Sociais. 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101734.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2021.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Portaria nº 246, de 17 de outubro de 2000**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC000667.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2021.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Portaria n.º 436, de 16 de novembro de 2011**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001755.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2021

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Inspeção de bancadas de ensaios de hidrômetros NIT-SEFLU-007**. 2017. Disponível em: [http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/pesquisa\\_link.asp?seq\\_tipo\\_documento=4&co\\_d\\_uo\\_numeracao=00875&num\\_documento=007](http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/pesquisa_link.asp?seq_tipo_documento=4&co_d_uo_numeracao=00875&num_documento=007). Acesso em: 21/02/2021.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Portaria nº 295, de 29 de junho de 2018**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002515.pdf>. Acesso em: 11 out. 2021.

ISO 4064-1 (ISO, 2014). **ISO/TC 30 Measurement of fluid flow in closed conduits. Water meters for cold potable water and hot water — Part 1: Metrological and technical requirements.** 26/05/2014

JANKOVIC, Aleksandar; CHAUDHARY, Gaurav; GOIA, Francesco. Designing the design of experiments (DOE)—An investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems. **Energy and Buildings**, v. 250, p. 111298, 2021.

KANAKOUDIS, V. et al. Assessing the performance of urban water networks across the EU Mediterranean area: The paradox of high NRW levels and absence of respective reduction measures. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 13, n. 4, p. 939-950, 2013.

KELLEY, Kate et al. Good practice in the conduct and reporting of survey research. **International Journal for Quality in health care**, v. 15, n. 3, p. 261-266, 2003.

KINGDOM, B.; LIEMBERGER, R.; MARIN, P. **The challenge of reducing non-revenue water (NRW) in developing countries: How the private sector can help: A look at performance-based service contracting.** Water Supply and Sanitation Sector Board Discussion Paper, The World Bank Group, Series Paper n. 8, 2006. Disponível em: <https://ppiaf.org/documents/2076/download>. Acesso em 11 fev. 2021.

LAMBERT, A. O. et al. A review of performance indicators for real losses from water supply systems. **Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA**, v. 48, n. 6, p. 227-237, 1999.

LAMBERT, Allan; HIRNER, Wolfram. **Losses from Water Supply Systems: Astandard Terminology and Recommended Performance Measures.** IWA, 2000.

LARSON, Ron; FARBER, Betsy. **Estatística Aplicada.** 4<sup>o</sup> ed. Pearson Education do Brasil, 2010.

LEE, Chul-Ho; JEON, Hye-Kyung; HONG, Youn-Sik. An implementation of ultrasonic water meter using dToF measurement. **Cogent Engineering**, v. 4, n. 1, p. 1371577, 2017.

LOENERT, Marcelo Augusto. **Análise de Modelo de Gestão da Qualidade em Companhias de Saneamento: Um estudo de caso.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/86290/224475.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 08 fev. 2021.

LOPES, Ney Procópio; LARA, Márcia; LIBÂNIO, Marcelo. Quantificação em escala de bancada do volume de ar em ligações prediais de água. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 16, p. 343-352, 2011.

LOUREIRO, D. et al. A new approach to improve water loss control using smart metering data. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 14, n. 4, p. 618-625, 2014.

MARNEWICK, Annlizé; MOAHLOLI, Aluta; PRETORIUS, J. H. C. Domestic water meter optimal replacement period to minimize water revenue loss. **Water SA**, v. 45, n. 2, p. 165-173, 2019.

MARTIN, André Luís Sotero Salustiano. **Avaliação do Desempenho de um Medidor de Vazão Eletromagnético em Situações Práticas Reais de Instalação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2005. Disponível em: [http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/257855/1/Martim\\_AndreLuisSoteroSalustiano\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/257855/1/Martim_AndreLuisSoteroSalustiano_M.pdf). Acesso em: 24 fev. 2021.

MELATO, Débora Soares. **Discussão de uma metodologia para diagnóstico e ações para redução de perdas de água: aplicação no sistema de abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MENDOZA, Andrés A.; BENAVIDES-MUÑOZ, Holger. Evaluation of domestic water measurement error: a case study. **Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua**, v. 70, n. 2, p. 217-225, 2021.

MIERZWA, José Carlos; HESPANHOL, Ivanildo. **Água na Indústria: uso racional e reuso**. Editora Oficina de Textos. São Paulo, 2005.

MIRANDA, E. C. Indicadores de perdas de água em sistemas de abastecimento: Qual o nível de credibilidade dos valores obtidos. In: **XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**. Campo Grande, Brasil: ABES, 2005.

MIRANDA, EC de; KOIDE, S. Indicadores de perdas de água: O que, de fato, eles indicam. In: **XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**. São Paulo, Brasil: ABES, 2003.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. 629 p.

MORAIS, Danielle Costa; ALMEIDA, Adiel Teixeira de. Modelo de decisão em grupo para gerenciar perdas de água. **Pesquisa Operacional**, v. 26, p. 567-584, 2006.

MORAIS, Gislane Mendes. **Avaliação Metrológica de Hidrômetros Utilizados em Perímetros Irrigados do Brasil e Espanha**. Teste (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2019. Disponível em: [http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/55329/3/2019\\_tese\\_gmdmorais.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/55329/3/2019_tese_gmdmorais.pdf). Acesso em: 26 fev. 2021.

MUSAAZI, Isaac G. et al. Assessing the impact of working pressure on water meter registration. **Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua**, v. 70, n. 6, p. 822-831, 2021.

MUTIKANGA, H. E.; SHARMA, S. K.; VAIRAVAMOORTHY, K. Assessment of apparent losses in urban water systems, **Water Environ. J**, v. 25, n. 3, p. 327-335, 2011.

OIML R 120 Edition 2010 (E) (Edition 1996 with updated references). **Standard capacity measures for testing measuring systems for liquids other than water**. ORGANISATION INTERNATIONALE DE MÉTROLOGIE LÉGALE.

OLIVEIRA, Gesner; MARCATO, Fernando S; SCAZUFCA, Pedro; PIRES, Rodrigo Cintra. **Perdas de Água 2018 (SNIS 2016): Desafios para disponibilidade hídrica e avanço da eficiência do saneamento básico**. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, São Paulo, 2018. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/images/estudos/itb/perdas-2018/estudo-completo.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2021.

PEÑA, Edsel A.; SLATE, Elizabeth H. **Global validation of linear model assumptions**. Journal of the American Statistical Association, v. 101, n. 473, p. 341-354, 2006.

PENG, Zhicong et al. Influence of installation angle of electromagnetic flowmeter on measurement accuracy. In: **2012 8th IEEE International Symposium on Instrumentation and Control Technology (ISICT) Proceedings**. IEEE, 2012. p. 195-199.

PEREIRA, Leonel Gomes; DE OLIVEIRA ILHA, Marina Sangoi. Avaliação da submedição de água em edificações residenciais unifamiliares: o caso das unidades de interesse social localizadas em Campinas, no estado de São Paulo. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 2, p. 7-21, 2008.

PNCDA - Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água. **Documento Técnico de Apoio - DTA A2: Indicadores de Perdas nos Sistemas de Abastecimento de Água**. Brasília: MCIDADES.SNSA, 2003.

PUUST, Raimo et al. A review of methods for leakage management in pipe networks. **Urban Water Journal**, v. 7, n. 1, p. 25-45, 2010.

R TEAM. Development Core. A language and environment for statistical computing. <http://www.R-project.org>, 2009.

RAJITA, G.; MANDAL, Nirupama. Review on transit time ultrasonic flowmeter. In: **2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC)**. IEEE, 2016. p. 88-92.

RÍOS, J. Canto et al. Methodology for the identification of apparent losses in water distribution networks. **Procedia Engineering**, v. 70, p. 238-247, 2014.

SCALIZE, Paulo Sérgio; DE ALMEIDA LEITE, Wellington Cyro. Variação na micromedicação do consumo de água no funcionamento correto e reversível do hidrômetro. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 6, n. 1, 2013.

SCALIZE, Paulo Sérgio; DE ALMEIDA LEITE, Wellington Cyro; CAMPOS, Marcus André Siqueira. Substituição racional de hidrômetros em sistemas de abastecimento de água. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 9, n. 3, 2014.

SILVA, Alberto César do Nascimento. **Panorama de Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água no Brasil**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual da Paraíba, Campo Grande, 2015. Disponível em: <http://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/bitstream/123456789/7101/1/PDF%20-%20Alberto%20C%C3%A9sar%20do%20Nascimento%20Silva.pdf/>. Acesso em 11 fev. 2021.

SILVA, C. M. **Análise das perdas de água em um sistema público de abastecimento: enfoque na influência da classe metrológica e do tempo de uso dos hidrômetros**. 2014. 121 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Escolha de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-9KYJ7B>. Acesso em: 28 fev. 2021.

SILVA, CRISTINA MENDES; PÁDUA, VALTER LÚCIO DE; BORGES, JORGE. Contribuição ao estudo de medidas para redução da perda aparente de água em áreas urbanas. **Ambiente & Sociedade**, v. 19, p. 249-268, 2016.

SILVA, Maria Almeida; AMADO, Conceição; LOUREIRO, Dália. Propagation of uncertainty in the water balance calculation in urban water supply systems—A new approach based on high-density regions. **Measurement**, v. 126, p. 356-368, 2018.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto. Ministério do Desenvolvimento Regional, Secretaria Nacional de Saneamento – SNS**. 2022. Disponível em: [http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2020/DIAGNOSTICO\\_TEMATICO\\_GESTAO\\_TECNICA\\_DE\\_AGUA\\_AE\\_SNIS\\_2022.pdf](http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2020/DIAGNOSTICO_TEMATICO_GESTAO_TECNICA_DE_AGUA_AE_SNIS_2022.pdf). Acesso em: 04 nov. 2022.

NSA – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Ações de assistência técnica em redução e controle de perdas de água e uso eficiente de energia elétrica**. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/downloads/publicacoes-acertar/perdas/Vol.4-Perdas-Aparentes.pdf>. 2018. Acesso em: 09 fev. 2021.

SZILVESZTER, Szabolcs; BELTRAN, Raul; FUENTES, Arturo. Performance analysis of the domestic water meter park in water supply network of Ibarra, Ecuador. **Urban Water Journal**, v. 14, n. 1, p. 85-96, 2017.

TARDELLI FILHO, Jairo. Aspectos relevantes do controle de perdas em sistemas públicos de abastecimento de água. **Revista Dae**, v. 64, n. 201, p. 6-20, 2016.

TARDELLI FILHO, Jairo; TSUTIYA, MILTON T. **Controle e redução de perdas**. Abastecimento de Água. 3ª ed. São Paulo: Departamento de

Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, p. 457-525, 2006.

THORNTON, J.; RIZZO, A. Apparent losses, how low can you go. In: **Proceedings of the leakage management conference**. 2002. p. 20-22.

THORNTON, Julian; STURM, Reinhard; KUNKEL, George. **Water loss control**. McGraw-Hill Education, 2008.

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

TSUTIYA, M. T. **Gerenciamento de Perdas de Água e Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento – Guia do Profissional em Treinamento**. Núcleo Regional Nordeste – NURENE, 2018. Disponível em: [http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/livros/gerenciamento\\_perdas/livro\\_gerenciamento\\_perdas.pdf](http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/livros/gerenciamento_perdas/livro_gerenciamento_perdas.pdf). Acesso em 25 fev. 2021.

TUFFÉRY, Stéphane. **Data mining and statistics for decision making**. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2011. 689 p.

UEDA, Satoru; BENOUAHI, Mohammed. Accountable water and sanitation governance: Japan's experience. **Water in the Arab World**, p. 131, 2009.

UNESCO - A Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura. **The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy**. Paris. 2003. Disponível em: [http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015\\_03.pdf](http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015_03.pdf). Acesso em: 08 fev. 2021.

UNESCO – A Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura. **The United Nations World Water Development Report: Water for People Water for Life**. United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization, Nova York. 2003. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000129556>. Acesso em: 08 fev. 2021.

VICENTINI, Lilian Pedroso. **Componentes do Balanço Hídrico para Avaliação de Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Hidráulica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-03072013-151444/publico/Dissertacao\\_Perdas\\_LPV.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-03072013-151444/publico/Dissertacao_Perdas_LPV.pdf). Acesso em 12 fev. 2021.

WINARNI, Winarni. Infrastructure leakage index (ILI) as water losses indicator. **Civil Engineering Dimension**, v. 11, n. 2, p. pp. 126-134, 2009.

XIN, Kunlun et al. Apparent losses analysis in district metered areas of water distribution systems. **Water resources management**, v. 28, p. 683-696, 2014.

YAZDANDOOST, Farhad; IZADI, Ardalán. An asset management approach to optimize water meter replacement. **Environmental Modelling & Software**, v. 104, p. 270-281, 2018.