USO DE TECNOLOGIA DE VARREDURA INTELIGENTE PARA REDUÇÃO DE PERDAS NO SISTEMA DE ABASTECIMENTO MARAMBAIA EM PONTA PORÃ/MS

Natalia Pereira[(1)]
Pós-doutoranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Tecnóloga em Saneamento Ambiental na Empresa de Saneamento de Mato Grosso do Sul (SANESUL).
Celio Poveda Filho[(2)]
Engenheiro Eletricista. Gerente Regional na Empresa de Saneamento de Mato Grosso do Sul (SANESUL).
Alan Artigas Barbosa[(3)]
Mestrando em Eficiência Energética e Sustentabilidade pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD).
Daniel Soriano Gonçalves[(4)]
Engenheiro Civil, pós-graduado em Engenharia de Estruturas e em Engenharia Ambiental e Saneamento Básico. Coordenador Técnico na Empresa de Saneamento de Mato Grosso do Sul (SANESUL). Mestrando em Eficiência Energética e Sustentabilidade pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS)

Endereço[(1)]**:** Rua General Osório, 32 - Centro – Ponta Porã - MS - CEP: 79904-664 - Brasil - Tel: +55 (67) 3018-0387 - e-mail: natalia.pereira@sanesul.ms.gov.br

RESUMO

O controle de perdas em sistemas de distribuição de água representa desafio técnico e financeiro de escala global. No Brasil, o índice de perdas na distribuição (IN049) atingiu 37,78% em 2022, cerca de 20 pontos percentuais acima da média dos países desenvolvidos. Este artigo apresenta os resultados de um trabalho conduzido na Sanesul no setor Marambaia, em Ponta Porã (MS), usando a tecnologia 4Fluid Móvel — sistema de detecção acústica de vazamentos assistido por inteligência artificial. O setor compreende dois Distritos de Medição e Controle: Área Pressurizada (~4.610 ligações, com subsetor de ~1.661 regulado por Válvula Redutora de Pressão - VRP) e Área Gravidade (~1.010 ligações). Em 40 dias, foram inspecionados 88 km de rede, identificando 221 vazamentos visíveis, 45 não visíveis confirmados e 59 irregularidades comerciais. O índice de perdas consolidado reduziu-se de 51,86% para 42,89% (−8,97 p.p.). Na Área Gravidade, o IPL recuou 45,9%, de 366,9 para 198,5 L/lig./dia (R^2 = 0,842; p = 0,028). Na Área Pressurizada, a desativação temporária da VRP durante a varredura provocou elevação transitória nos indicadores, revertida após sua reativação. Os resultados demonstram a eficácia da integração entre tecnologia vibroacústica com IA, gestão de pressão por VRP e controle ativo de perdas por DMC.

PALAVRAS-CHAVE: controle de perdas; varredura inteligente; detecção acústica de vazamentos.

1. INTRODUÇÃO

O gerenciamento de água não faturada (Non-Revenue Water – NRW) constitui um dos principais desafios operacionais e financeiros dos prestadores de serviços de saneamento no mundo. Embora a International Water Association (IWA) reconheça a inevitabilidade de um patamar mínimo de perdas em qualquer sistema de distribuição, estimativas globais indicam que cerca de 30% a 40% do volume produzido não chega a ser faturado, com impactos severos sobre a sustentabilidade econômica das companhias, a segurança hídrica e o uso eficiente dos recursos naturais (FARLEY; TROW, 2003; FRAUENDORFER; LIEMBERGER, 2010). No contexto de países em desenvolvimento, os índices de NRW tendem a ser ainda mais elevados, refletindo déficits históricos de investimento em infraestrutura, envelhecimento das redes e insuficiência de sistemas de monitoramento (OGATA et al., 2024).

No Brasil, o Estudo de Perdas de Água 2024, elaborado pelo Instituto Trata Brasil, apurou que o Índice de Perdas na Distribuição (IN049) atingiu 37,78% em 2022, diferencial de aproximadamente 20 p.p. em relação à média dos países desenvolvidos (INSTITUTO TRATA BRASIL; GO ASSOCIADOS, 2024). A Portaria do Ministério de Desenvolvimento Regional MDR n. 490/2021 estabeleceu meta nacional de 25% até 2033, condicionando a alocação de recursos federais ao seu cumprimento (BRASIL, 2021). A Lei n. 14.026/2020 reforça a eficiência operacional como requisito de sustentabilidade para os prestadores (BRASIL, 2020).

Na dimensão tecnológica, a detecção acústica de vazamentos assistida por inteligência artificial e o controle de pressão por Válvulas Redutoras de Pressão (VRP) constituem, em conjunto, duas das intervenções de maior custo-efetividade para a redução de perdas reais (FARLEY; TROW, 2003; THORNTON; STURM; KUNKEL, 2008). Revisão sistemática recente demonstrou que algoritmos de aprendizado de máquina aplicados a sinais vibroacústicos alcançam acurácia de classificação superior a 94% em implantações urbanas de grande escala (BYKERK; VALLS MIRO, 2022; LIU; ZAYED, 2025). A gestão de pressão por VRP, por sua vez, reduz tanto o caudal de perda em vazamentos existentes quanto a taxa de surgimento de novos vazamentos, atuando sobre o mecanismo físico fundamental que governa as perdas reais (THORNTON; STURM; KUNKEL, 2008).

A relação entre pressão e perda em redes de distribuição é bem estabelecida na literatura e fundamenta a estratégia de gestão de pressão por Válvulas Redutoras de Pressão (VRP). O modelo potência (power law) de Leakage-Pressure (THORNTON; STURM; KUNKEL, 2008) estabelece que a vazão de perda (Q_L) varia com a pressão (P) segundo $Q_L \propto P^{N1}$, onde o expoente N1 pode variar de 0,5 (orifícios em tubulações metálicas) a valores superiores a 1,5 (trincas em tubulações plásticas). Portanto, reduções de pressão têm efeito amplificado sobre o volume perdido, especialmente em redes com predominância de tubulações de PVC e PEAD, como é o caso do setor estudado.

Adicionalmente tem-se o controle ativo de perdas que se baseia na busca proativa de vazamentos não visíveis por métodos vibroacústicos de detecção de ruídos na rede (FARLEY; TROW, 2003). A incorporação de algoritmos de aprendizado de máquina ao processamento desses sinais vibroacústicos representa avanço em relação à interpretação manual tradicional, reduzindo a subjetividade e aumentando a produtividade da varredura (BYKERK; VALLS MIRO, 2022). Fares et al. (2023) reportaram acurácia superior a 90% na detecção de vazamentos em redes reais. Ogata et al. (2024), em Kigali (Ruanda), demonstraram que intervenções coordenadas de controle ativo de perdas podem reduzir o NRW em mais de 10 p.p. em ciclos de dois a três anos com relação custo-benefício favorável.

Isto posto, implantou-se um estudo que integrou varredura eletrônica sistematizada com a tecnologia 4Fluid Móvel e análise do impacto da gestão de pressão por VRP no setor Marambaia, em Ponta Porã (MS). O setor é composto por dois DMC distintos — Área Pressurizada (com subsetor VRP) e Área Gravidade, o que permitiu análise comparativa do comportamento das perdas em função do modo de abastecimento e da gestão de pressão. O presente trabalho teve como objetivos: (i) descrever a metodologia; (ii) analisar os indicadores operacionais e comerciais por DMC; (iii) avaliar o efeito da desativação temporária da VRP sobre os indicadores da Área Pressurizada; e (iv) discutir os resultados à luz da literatura técnico-científica.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo: setor Marambaia – Ponta Porã/MS

Ponta Porã é um município localizado na faixa de fronteira entre o Brasil e o Paraguai, no estado de Mato Grosso do Sul, com população estimada de aproximadamente 98.500 habitantes no núcleo urbano brasileiro (Figura 1). O estudo foi conduzido no âmbito da Empresa de Saneamento de mato Grosso Sul (SANESUL) que é a prestadora dos serviços de abastecimento de água no Município de Ponta Porã/MS. Foi selecionado o setor de abastecimento de água no município denominado Marambaia. O setor é composto por dois Distritos de Medição e Controle com características operacionais distintas, conforme a Tabela 1 e Figuras 2 e 3.

A Área Pressurizada (EAT-002) é o maior dos dois DMC, com aproximadamente 4.610 ligações abastecidas por bombeamento a partir de estação elevatória EAT-002. Dentro dessa área existe um subsetor com aproximadamente 1.661 ligações cuja pressão de entrada é regulada por uma Válvula Redutora de Pressão (VRP), dispositivo que atua reduzindo à pressão a jusante em 50% — pressão a montante de 32 m.c.a e pressão a jusante de 16 m.c.a. — de forma a mantê-la dentro dos limites operacionais adequados, reduzindo as

perdas reais por vazamentos nos pontos de maior pressão da rede. A Área Gravidade possui aproximadamente 1.010 ligações abastecidas por reservatório apoiado sem bombeamento adicional, apresentando perfil de pressão residual mais homogêneo ao longo da rede.

Figura 1 – Localização do município de Ponta Porã, Mato Grosso do Sul, Brasil

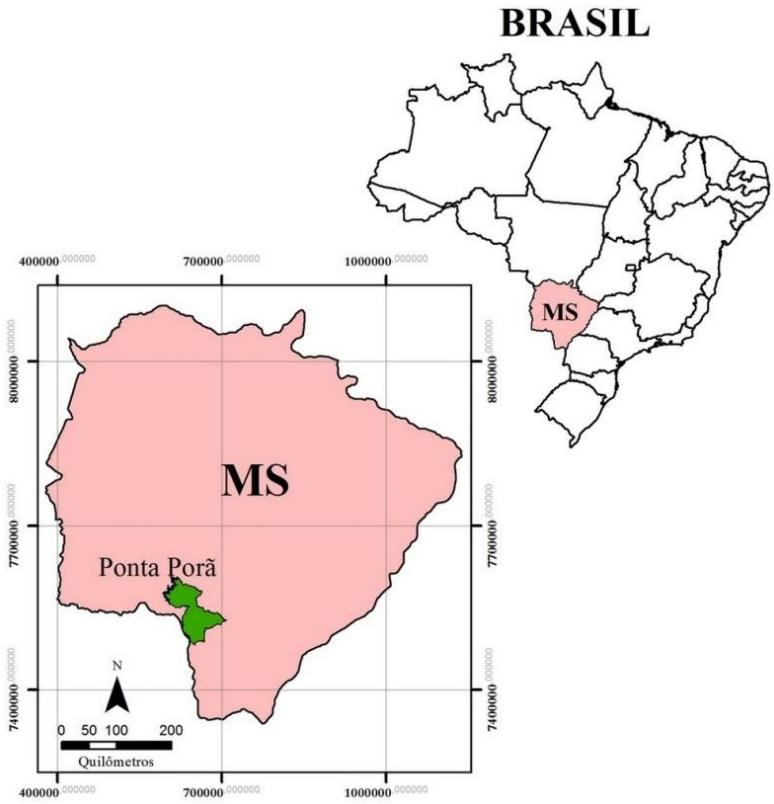
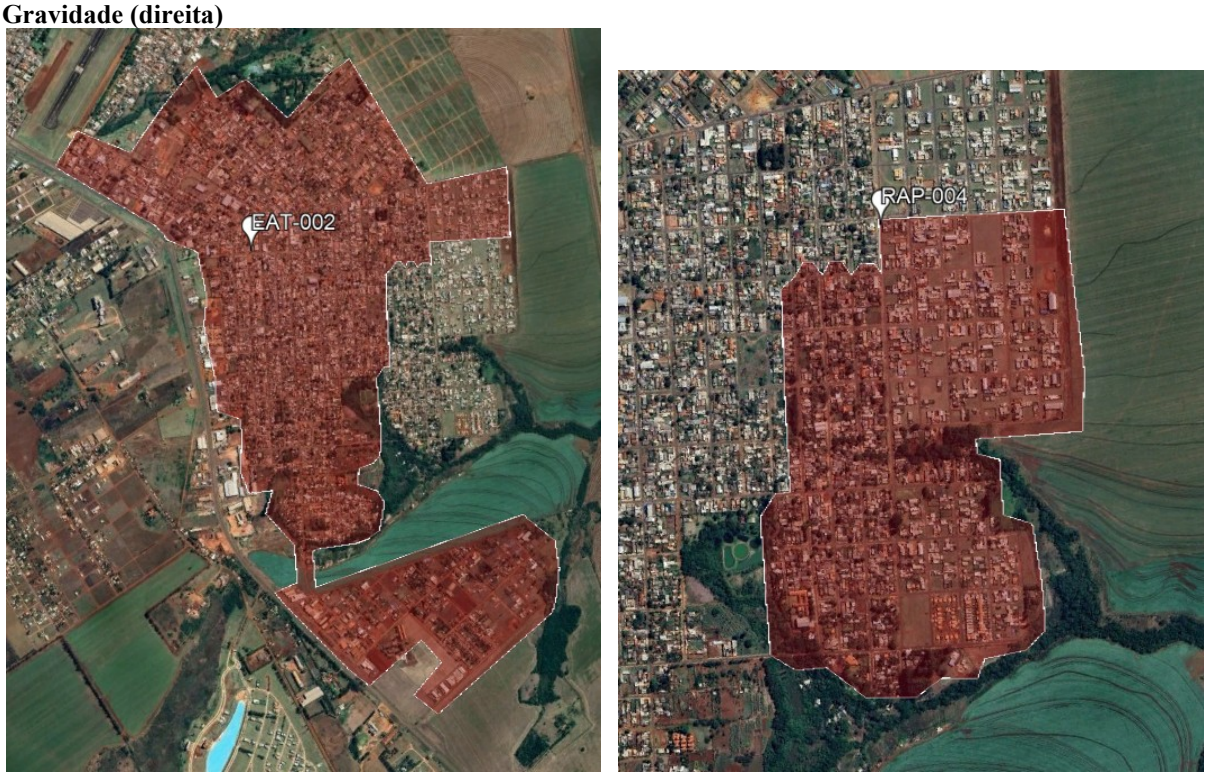


Tabela 1 - Caracterização dos DMCs do setor Marambaia e subsetor com atuação de VRP.

INDICADOR	DMC 01- ÁREA PRESSURIZADA	Subsetor VRP	DMC-002 - ÁREA GRAVIDADE
Sistema de abastecimento	Bombeamento	Bombeamento + VRP	Gravidade
Ligações ativas (referência)	~4.610 (total)	~1.661 (subsetor)	~1.010
% Perda inicial (mai./2025)	60,70%	(incluído no total)	52,95%
IPL inicial (L/lig./dia)	416,97	—	366,86
VRP ativa	—	Sim (desativada jan.–fev./2026 para varredura)	—
Extensão de rede	88 km (setor consolidado)		

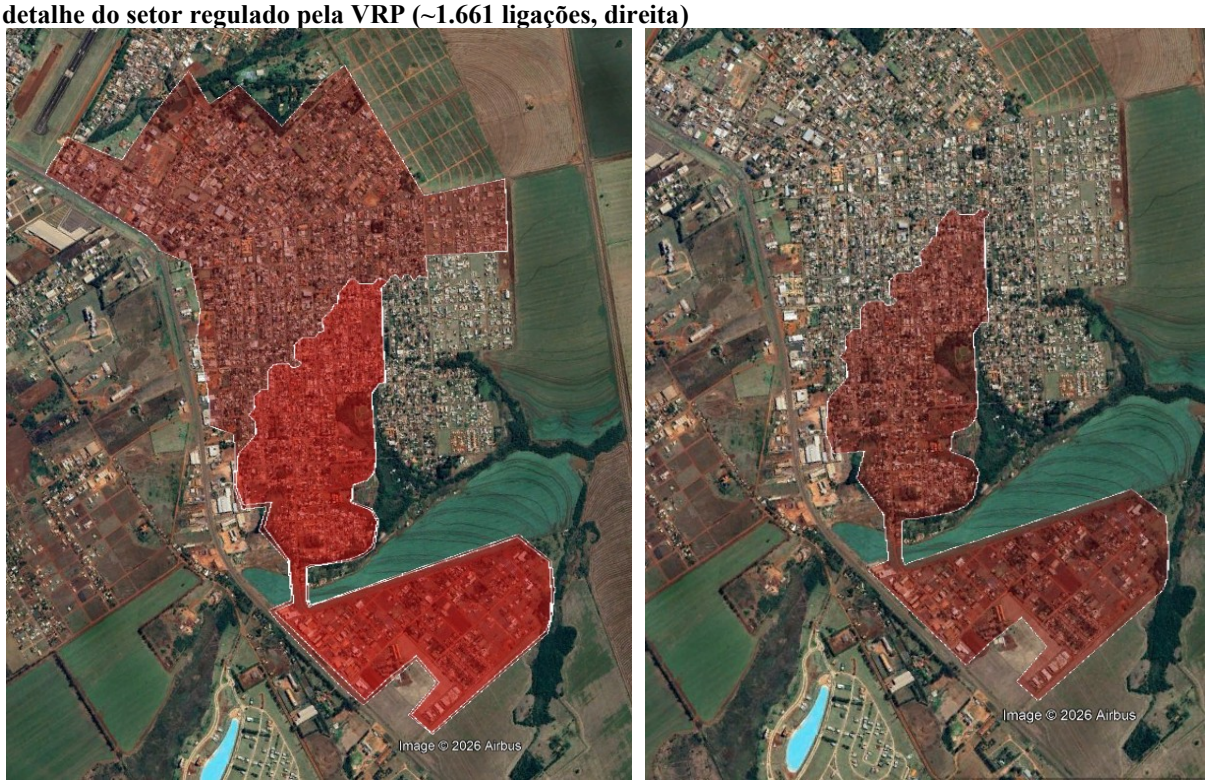
Fonte: elaboração própria a partir de dados operacionais da Sanesul (2026).

Figura 2 – Delimitação dos DMCs: DMC 01- Área Pressurizada (EAT-002, esquerda) e DMC-02 Área Gravidade (direita)



Fonte: elaboração própria a partir de imagem do Google Earth 2026.

Figura 3 – Delimitação do subsetor VRP dentro da Área Pressurizada: visão geral da área (esquerda) e detalhe do setor regulado pela VRP (~1.661 ligações, direita)



Fonte: elaboração própria a partir de imagem do Google Earth 2026.

2.2 Protocolo de desativação da VRP para a varredura

A execução da varredura eletrônica foi realizada ponto a ponto e isso requer pressão mínima suficiente em todos os hidrômetros e caixas de ramal para que o sinal vibroacústico gerado pelos eventuais vazamentos fosse detectável pelo sensor. Em regiões reguladas por VRP, a pressão a jusante do dispositivo pode ser insuficiente para garantir a qualidade do sinal da haste de escuta eletrônica nos pontos mais distantes do ponto de regulação. Por essa razão, a VRP do subsetor Marambaia foi desativada durante o período de varredura, compreendida entre janeiro e fevereiro de 2026, sendo reativada em 10 de março de 2026, após o término de todas as coletas.

A desativação da VRP pode implicar em aumento do caudal de perda pelos vazamentos preexistentes, fenômeno previsto pelo modelo potência de Leakage-Pressure e que pode, ao menos parcialmente, gerar a elevação dos volumes de macromedição e do IPL observados. Esse efeito é intrínseco ao protocolo de varredura em áreas reguladas e deve ser considerado na interpretação dos indicadores de perda no período.

2.3 Tecnologia empregada

A tecnologia empregada nesse trabalho foi a 4Fluid Móvel desenvolvida pela Stattus4 que consiste em um sistema de detecção de vazamentos baseado em geofonia digital com suporte de inteligência artificial. O operador acopla um sensor de haste eletrônica ao hidrômetro, pressiona o acionador e aguarda aproximadamente 10 segundos enquanto os ruídos vibroacústicos são capturados e transmitidos via bluetooth a um dispositivo móvel. O algoritmo de IA analisa os padrões de frequência coletados e classifica o ponto como "vazamento", "suspeito" ou "sem vazamento", em seguida uma ordem de serviço (OS) georreferenciada é gerada no sistema de gestão corporativo da SANESUL.

A abordagem opera em modo mobile point-to-point, dispensando sensores fixos e permitindo cobertura extensiva de redes de grande extensão (FARES et al., 2023). Os pontos classificados como "suspeitos" foram submetidos a verificação presencial adicional antes da geração da OS, garantindo maior assertividade nos resultados finais.

2.4 Estrutura do estudo

O projeto foi estruturado em quatro fases sequenciais:

(a) Planejamento: delimitação geográfica do setor Marambaia, definição dos KPIs de linha de base, criação de códigos exclusivos de OS no sistema de gestão e elaboração do cronograma de varredura.

(b) Treinamento: capacitação das equipes de campo e do núcleo de gestão da Sanesul quanto ao manuseio do equipamento 4Fluid Móvel, protocolos de geração de OS e acompanhamento das OS geradas.

(c) Varredura e ação em campo: execução da varredura ponto a ponto em todos os cavaletes do setor, com acompanhamento virtual em tempo real pelo supervisor técnico. Ao detectar vazamento, o operador da haste eletrônica gera imediatamente uma OS categorizada por tipo de serviço. A varredura ocorreu entre 26/01/2026 e 06/03/2026 (40 dias) e a execução das OS entre 06/02/2026 e 31/03/2026 (64 dias).

(d) Análise de resultados: consolidação dos KPIs finais, comparação com os valores de linha de base.

2.5 Indicadores de desempenho (KPIs)

Os principais indicadores monitorados foram: (i) índice de perdas na distribuição (IN049, %); (ii) volume recuperado (m^3/mês); (iii) densidade de vazamentos (vazamentos/km); e (iv) produtividade de varredura (km/dia/equipe).

2.5 Análise estatística

A análise quantitativa dos indicadores operacionais e comerciais do projeto piloto foi conduzida com o software Python 3.12, utilizando os pacotes pandas 2.2, NumPy 1.26 e SciPy 1.13 para processamento, análise e inferência estatística, e Matplotlib 3.8 para visualização gráfica. O conjunto de dados compreende duas séries temporais independentes: (i) Área Gravidade (n = 5 observações mensais, dez./2025 a abr./2026) e (ii)

Área Pressurizada (n = 5 observações mensais, dez./2025 a abr./2026). Todos os procedimentos adotaram nível de significância $\alpha = 0,05$.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados da varredura

Durante os 40 dias de varredura foram inspecionados os 88 km de rede do setor Marambaia, gerando um total de 397 ordens de serviço (todas com situação "Baixada" ao término do período de análise em 31/03/2026). Foram identificados e corrigidos 279 vazamentos, distribuídos entre vazamentos visíveis e não visíveis em ramal e cavalete. A Tabela 2 apresenta o comparativo completo dos KPIs antes e após a intervenção.

Tabela 2 - Comparativo de KPIs – Antes vs. Depois do projeto piloto

KPI	Antes	Depois	Variação
Densidade de vazamentos (vaz./km)[1]	0,87	1,25	+31,67%
Produtividade de varredura (km/dia/equipe)	1,34	3,27	+59,02%
Índice de perdas – IN049 (%)	51,86%	42,89%	−8,97 p.p.
Volume recuperado (m³/mês)[2]	14.130	22.499	+59,22%

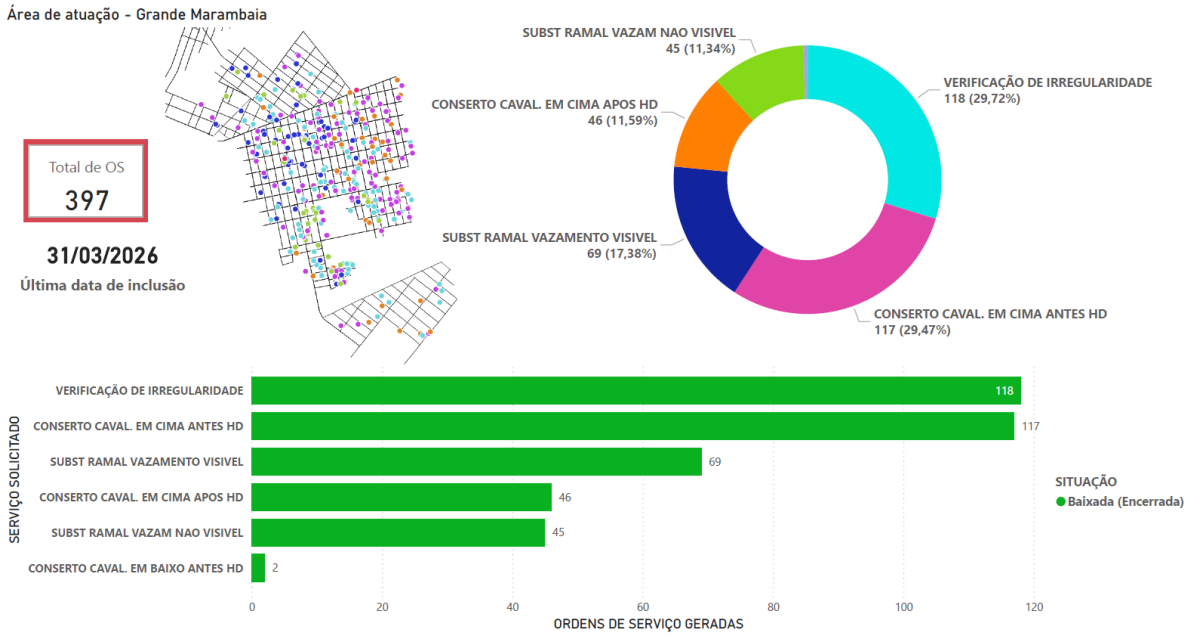
[1] Considerados apenas vazamentos em ramal e rede para comparação precisa. [2] Comparação dez./2025 (pré) vs. mar./2026 (pós).

A variação positiva na densidade de vazamentos/km (de 0,87 para 1,25 vazamentos/km) não representa deterioração do sistema, mas sim o efeito da detecção qualificada: a tecnologia de varredura inteligente identificou pontos de perda que anteriormente não eram registrados no cadastro operacional, revelando o verdadeiro estado da rede. À medida que essas ocorrências são reparadas, espera-se queda progressiva desse indicador nas varreduras subsequentes.

A Figura 4 apresenta a distribuição das 397 OS geradas por tipo de serviço, evidenciando que "Verificação de Irregularidade" (118 OS; 29,72%) e "Conserto de Cavalete acima– antes do hidrômetro" (117 OS; 29,47%) foram as categorias mais demandadas, seguidas por "Substituição de ramal com vazamento visível" (69 OS; 17,38%), "Conserto de Cavalete acima – após o hidrômetro" (46 OS; 11,59%) e "Substituição de ramal com vazamento não visível" (45 OS; 11,34%). Das 118 irregularidades geradas, 59 foram confirmadas como fraudes comerciais que caracterizam perda de água aparente.

A distribuição dos 234 vazamentos visíveis, 45 não visíveis e 59 irregularidades confirmadas revela que os vazamentos visíveis em ramais e cavaletes corresponderam à parcela mais volumosa das intervenções, o que é esperado em áreas com elevado IPL inicial e infraestrutura envelhecida. Por outro lado observou-se tempo médio de resolução das OS de 6 dias (da inclusão da OS ao encerramento) e isso reflete a integração eficiente entre a equipe de varredura e a equipe de execução, possibilitada pela geração automática e georreferenciada das OS diretamente no sistema corporativo da Sanesul.

Figura 4 - Distribuição das OS por tipo de serviço



Fonte: Dashboard Power BI – Sanesul, 2026.

3.2 Análise temporal do impacto da varredura inteligente nos indicadores de perda

A análise dos resultados observados na área de abastecimento pressurizado demonstram que os meses de janeiro e fevereiro de 2026 apresentaram volumes de macromedição significativamente elevados (91.054 m³ e 117.012 m³, respectivamente), superiores à média histórica dos demais meses do período de análise (94.680 m³/mês, excluindo esses dois meses) (Tabela 3). Essa elevação é atribuída primariamente ao aumento dos caudais de perda pelos vazamentos preexistentes, decorrente da elevação da pressão residual no subsetor de 1.661 ligações com VRP desativada, em conformidade com o modelo teórico de Leakage-Pressure (THORNTON; STURM; KUNKEL, 2008).

Tabela 3 - Série histórica mensal — Área Pressurizada (DMC 01). Período VRP desativada: jan.–fev./2026

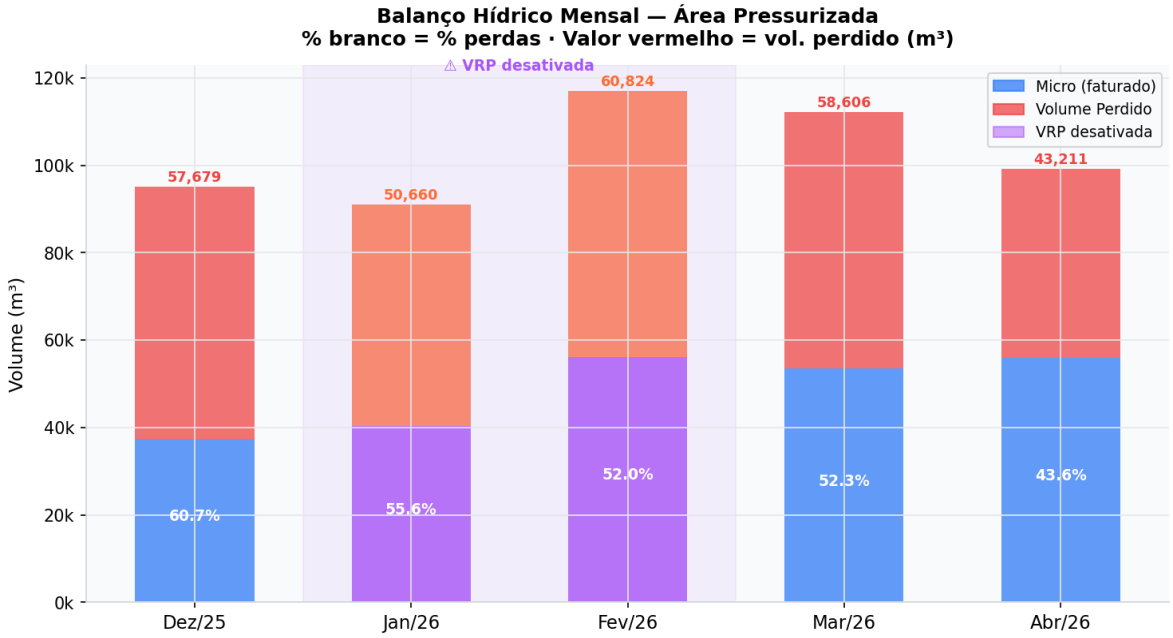
Mês/Ano	Ligações	Macro (m³)	Micro (m³)	Vol. Perda (m³)	% Perda	IPL
dez./2025	4.611	95.030	37.351	57.679	60,70%	417,0
jan./2026	4.606	91.054	40.394	50.660	55,64%	366,6
fev./2026	4.612	117.012	56.188	60.824	51,98%	439,6
mar./2026	4.610	112.111	53.505	58.606	52,27%	423,8
abr./2026	4.604	99.202	55.991	43.211	43,56%	312,9

Legenda: Fundo roxo = VRP desativada (jan.–fev./2026). IPL = L/lig./dia.

Adicionalmente, a simultaneidade da execução dos reparos com a varredura implica que os vazamentos identificados nas primeiras semanas já estavam sendo corrigidos enquanto novos pontos eram detectados, gerando sobreposição de efeitos que dificulta a isolação do impacto da VRP nos indicadores mensais.

A reativação da VRP em 10/03/2026 produziu efeito imediato sobre os indicadores de março/2026: o IPL reduziu-se para 423,8 L/lig./dia e o % de perdas para 52,27%, tendência que se consolidou em abril/2026 (IPL = 312,9; % perda = 43,56%), mês com condições operacionais plenas de VRP ativa e pós-varredura (Figura 5). Essa trajetória confirma que a elevação observada em janeiro–fevereiro/2026 foi predominantemente de natureza transitória e associada à desativação do dispositivo de gestão de pressão.

Figura 5 - Volumes mensais empilhados — Área Pressurizada. Barras roxas = meses com VRP desativada (jan.–fev./2026), com pico de macro de 117.012 m³ em fev./2026

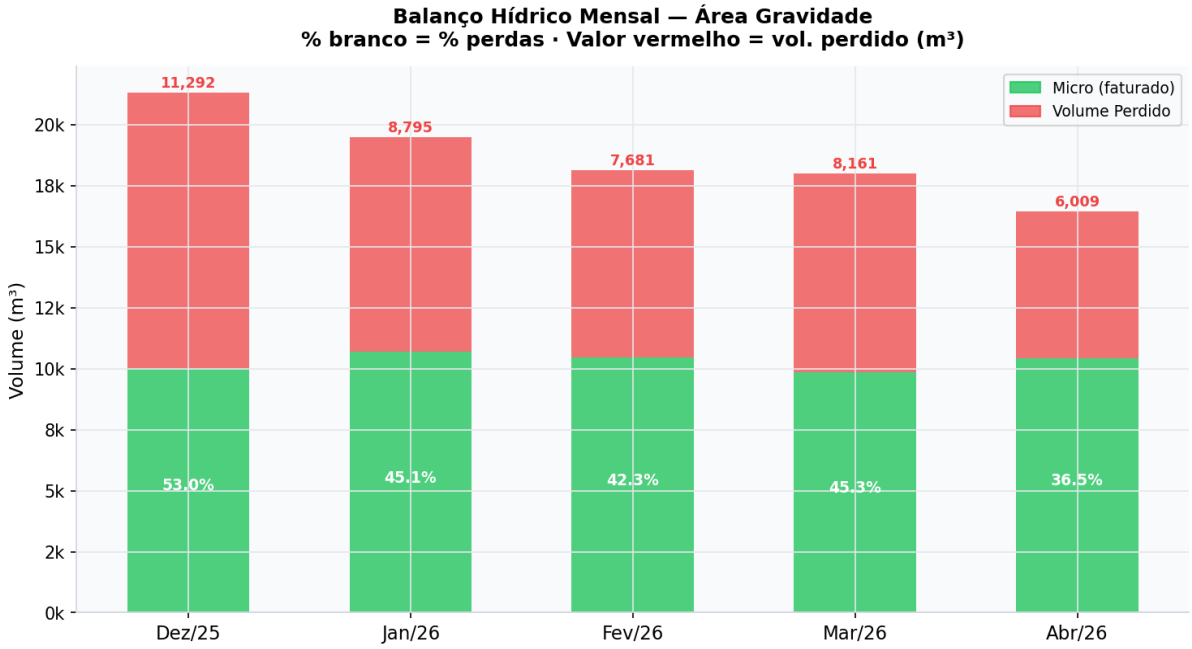


A análise dos resultados observados na área abastecida por gravidade apresentou queda expressiva e consistente nos indicadores de perda: IPL de 366,9 L/lig./dia (dez./2025) para 198,5 L/lig./dia (abr./2026), redução de 168,4 L/lig./dia (−45,9%) em quatro meses (Tabela 4). O índice de perdas recuou de 52,95% para 36,52% (−16,43 p.p.) no mesmo período (Figura 6).

Tabela 4 - Série histórica mensal — Área Gravidade (DMC 01). Período: dez/2025 a abr./2026

Mês/Ano	Ligações	Macro (m³)	Micro (m³)	V. Perda (m³)	% Perda	IPL
dez./2025	1.026	21.325	10.033	11.292	52,95%	366,9
jan./2026	1.027	19.483	10.688	8.795	45,14%	285,5
fev./2026	1.027	18.143	10.462	7.681	42,34%	249,3
mar./2026	1.026	18.016	9.855	8.161	45,30%	265,1
abr./2026	1.009	16.453	10.444	6.009	36,52%	198,5

Figura 6 - Volumes mensais empilhados — Área Gravidade. Percentual branco = % perdas do mês; valor acima = volume perdido (m³)



4. DISCUSSÃO

A análise dos resultados permite discussão em quatro eixos: (a) a magnitude e significado dos indicadores da varredura; (b) o efeito da VRP sobre os indicadores mensais e sua interpretação; (c) o comportamento diferenciado dos dois DMCs; e (d) as implicações regulatórias e gerenciais.

Em relação à magnitude dos resultados operacionais, as coletas via varredura inteligente realizada em 40 dias representam um volume de dados expressivo para análise estatística de confiabilidade da tecnologia. A taxa de confirmação de 58,4% (45 confirmados de 77 suspeitos) está em linha com os valores reportados por Fares et al. (2023), que indicam taxas entre 50% e 70% como adequadas para detecção acústica em redes urbanas diversificadas, refletindo a variabilidade natural dos sinais vibroacústicos em ambientes com múltiplas fontes de ruído. Os 221 vazamentos visíveis detectados durante a varredura reforçam que uma parcela significativa das perdas era de natureza visível, mas sem registro prévio no sistema operacional, evidenciando a insuficiência do controle passivo convencional para a captura sistemática dessas ocorrências.

A desativação da VRP durante a varredura de janeiro e fevereiro de 2026 constitui o principal fator de confundimento na análise dos indicadores mensais da Área Pressurizada. O aumento do volume de macromedição para 117.012 m³ em fevereiro/2026 — 23% acima da média histórica dos demais meses — é coerente com o modelo de Leakage-Pressure de Thornton, Sturm e Kunkel (2008), que prevê incremento proporcional dos caudais de perda com a elevação da pressão no subsetor anteriormente regulado. A reativação da VRP em 10/03/2026 e a subsequente queda confirmam a natureza transitória do fenômeno. Esse achado tem implicação metodológica importante: em futuros projetos de varredura em áreas com VRP, recomenda-se o planejamento de estratégias alternativas para manutenção da pressão durante a coleta — como reativação noturna da VRP para os reparos e desativação apenas nas janelas de varredura para minimizar o impacto sobre os indicadores mensais.

O contraste entre os dois DMCs permanece o achado mais relevante para o refinamento da metodologia. A Área Gravidade, com redução de 45,9% no IPL em quatro meses (dez./2025 a abr./2026) e tendência linear significativa (R^2 = 0,842; p = 0,028) (Figura 7), demonstra que a varredura inteligente e sistematizada é particularmente eficaz em redes abastecidas por gravidade, nas quais a pressão residual menos controlada

favorece o acúmulo de vazamentos lentos e difusos de longa duração (FRAUENDORFER; LIEMBERGER, 2010). O IPL final de 198,5 L/lig./dia aproxima-se do intervalo de referência para sistemas bem gerenciados em países de renda média (100–200 L/lig./dia), conforme documentado por Frauendorfer e Liemberger (2010).

Figura 7 - Evolução mensal do IPL por DMC com regressão linear e banda de destaque para o período de VRP desativada (jan.–fev./2026)

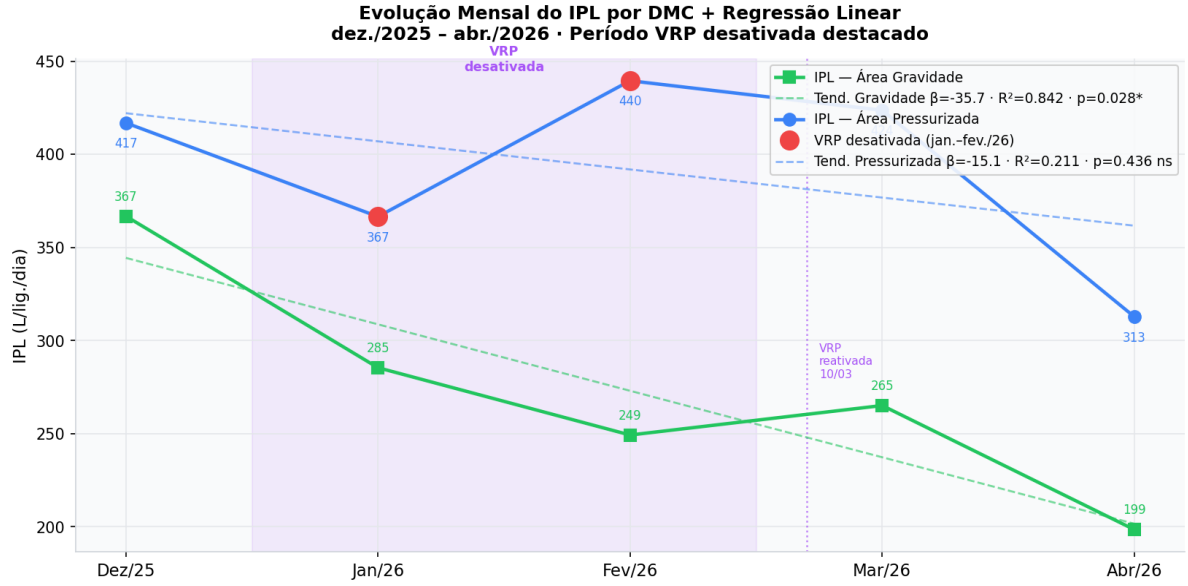
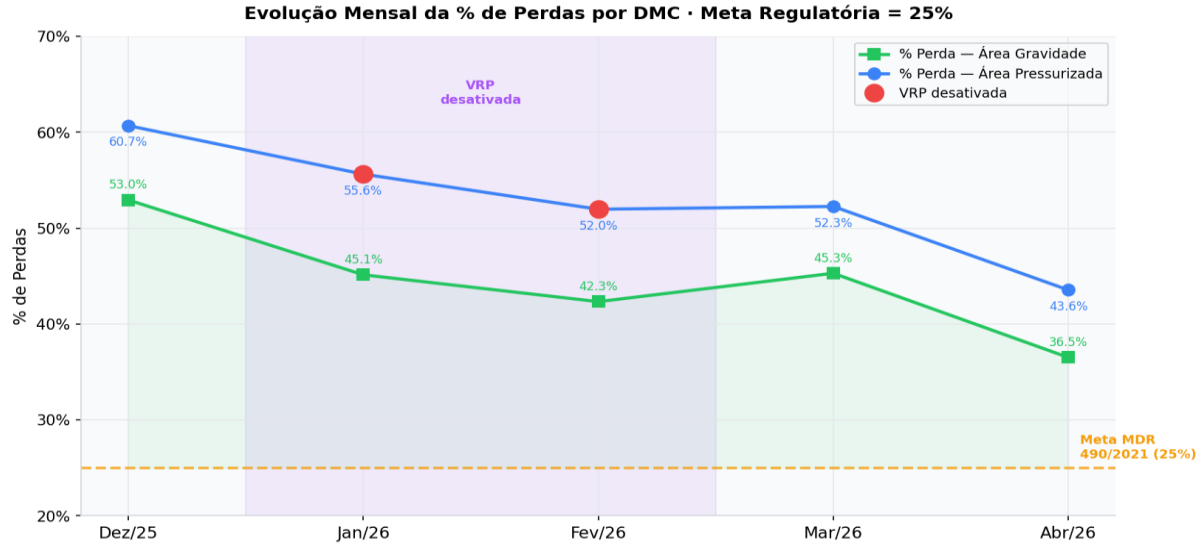


Figura 8 - % de Perdas mensais por DMC com meta regulatória de 25% (Portaria MDR n. 490/2021)



Sob a perspectiva regulatória, o IN049 de 43,6% para área pressurizada e 36,5% para a área gravidade ainda está acima da meta de 25% da Portaria MDR n. 490/202 (Figura 8). Entretanto, a combinação de intervenções de controle ativo de perdas com a manutenção do controle de pressão por VRP constitui a estratégia com maior potencial de redução sustentada no médio prazo, conforme demonstrado por estudos de gerenciamento integrado de pressão e perdas (THORNTON; STURM; KUNKEL, 2008; RAMOS et al., 2023). Ciclos anuais de varredura, aliados ao monitoramento contínuo por DMC e à operação permanente da VRP, devem conduzir o sistema à conformidade regulatória no horizonte previsto. Esses resultados são consistentes com os achados de Sousa, Souza e Fouto (2025), que, em análise hierárquica multinível com 310 municípios brasileiros,

demonstraram a importância de se considerar as especificidades regionais para redução de NRW, além de reforçar a pertinência de intervenções focadas tecnologias de monitoramento, sistema de controle de pressão e manutenção proativa das redes, como o adotado no presente estudo.

5. CONCLUSÕES

O estudo de varredura inteligente com tecnologia 4Fluid Móvel no setor Marambaia em Ponta Porã (MS) demonstrou resultados expressivos em um ciclo de 40 dias de varredura com execução simultânea de ordens de serviço. As coletas com haste de escuta digital realizadas identificaram 221 vazamentos visíveis, 45 vazamentos não visíveis confirmados e 59 irregularidades comerciais confirmadas.

A análise por Distrito de Medição e Controle revelou comportamentos distintos entre as duas áreas. Na Área Gravidade, o Índice de Perdas por Ligação recuou 45,9%, de 366,9 para 198,5 L/lig./dia, o que evidencia a alta eficácia da varredura inteligente em redes abastecidas por gravidade, onde a pressão residual menos controlada favorece o acúmulo silencioso de vazamentos de longa duração. Na Área Pressurizada, a desativação temporária da Válvula Redutora de Pressão provocou elevação transitória nos volumes de macromedição e no IPL. A reativação do dispositivo após a varredura restaurou a trajetória descendente do indicador, confirmando a natureza pontual do efeito e reforçando a importância de protocolos específicos de gestão de pressão durante ações de varredura em áreas reguladas por VRP.

O conjunto dos resultados reforça que a integração de tecnologia de escuta digital assistida por inteligência artificial, gestão de pressão por VRP e controle ativo de perdas por DMC configura abordagem de alta eficácia para o cumprimento das metas estabelecidas pelo Marco Legal do Saneamento Básico no Brasil.

REFERÊNCIAS

1. BRASIL. Lei n. 14.026, de 15 de julho de 2020. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 jul. 2020.
2. BRASIL. Portaria MDR n. 490, de 21 de setembro de 2021. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 set. 2021.
3. BYKERK, L.; VALLS MIRO, J. *Vibro-Acoustic Distributed Sensing for Large-Scale Data-Driven Leak Detection on Urban Distribution Mains. Sensors*, v. 22, n. 18, p. 6897, 2022. DOI: 10.3390/s22186897.
4. EMPRESA DE SANEAMENTO DE MATO GROSSO DO SUL S.A. – SANESUL. Resumo Executivo: Projeto Piloto 4Fluid – Ponta Porã. Ponta Porã: GERPP/COCOM, 2026.
5. FARES, A.; TIJANI, I. A.; RUI, Z.; ZAYED, T. *Leak detection in real water distribution networks based on acoustic emission and machine learning. Environmental Technology*, v. 44, n. 25, p. 3850–3866, 2023. DOI: 10.1080/09593330.2022.2074320.
6. FARLEY, M.; TROW, S. Losses in Water Distribution Networks. London: IWA Publishing, 2003.
7. FRAUENDORFER, R.; LIEMBERGER, R. The Issues and Challenges of Reducing Non-Revenue Water. Mandaluyong City: ADB, 2010.
8. INSTITUTO TRATA BRASIL; GO ASSOCIADOS. *Estudo de Perdas de Água 2024* (SNIS, 2022). São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2024.
9. LIU, R.; ZAYED, T. *A critical systematic review of machine learning based models for water leak detection using vibroacoustic technology. Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2025. DOI: 10.1016/j.engappai.2025.110889.
10. MINISTÉRIO DAS CIDADES. SNIS: *Diagnóstico Temático de Serviços de Água e Esgoto 2023*. Brasília: MCid/SNSA, 2023.
11. OGATA, N. et al. *Cost-effective non-revenue water reduction in Kigali City, Rwanda. Water Practice & Technology*, v. 19, n. 11, p. 4328–4344, 2024. DOI: 10.2166/wpt.2024.271.
12. RAMOS, H. M. et al. *Smart Water Grids and Digital Twin for Water Distribution Networks. Water*, v. 15, n. 6, p. 1129, 2023. DOI: 10.3390/w15061129.

13. SOUSA, C. O. M.; FÁVERO, L. P. L.; FOUTO, N. M. M. D. *Key drivers of non-revenue water in developing countries. npj Clean Water*, v. 8, n. 1, 2025. DOI: 10.1038/s41545-025-00416-8.

14. THORNTON, J.; STURM, R.; KUNKEL, G. *Water Loss Control. 2. ed. New York: McGraw-Hill*, 2008.