PLANO ESTRATÉGICO DE REDUÇÃO DE PERDAS REAIS: UMA EXPERIÊNCIA REPLICÁVEL COM BASE NA MODELAGEM HIDRÁULICA

Everaldo Ulbinski Schuch[(1)]
Especialista e instrutor em modelagem hidráulica, com formação em Engenharia Civil, Gestão Pública e Ciências Econômicas e Técnico em Edificações. Atua no planejamento e otimização de sistemas de abastecimento de água, com foco em controle de pressões e redução de perdas operacionais na Sanepar.
Eduardo Luiz Arrosi[(2)]
Engenheiro civil – Gerente GESO– gerência de engenharia Sudoeste
Priscila de Oliveira Souza Donadello[(3)]
Engenheiro civil – Coordenador de Engenharia GESO

Endereço[(1)]**:** Rua Guanabara, 168 – Sanepar – La Salle - Toledo – Paraná - CEP: 85902-580 - País - Tel: +55 (45) 99107-8968 - Fone: +55 (45) 3421-2615 - e-mail: everaldous@sanepar.com.br; ulbinski@hotmail.com.

RESUMO

O presente estudo aborda a redução de perdas reais utilizando a modelagem hidráulica como ferramenta decisória. A estratégia aplicada envolve segmentação da rede em zonas de pressão, metodologia MASP-P (método de análise de solução de problemas de perda), análise de vazões dependente da pressão que utilizam algoritmos genéticos para a detecção de vazamentos e conexões *Scada*. Como base para o plano mostrar-se-á o trabalho desenvolvido no SAA de Toledo – PR, que sofreu uma reestruturação organizacional em seu sistema de distribuição visando melhoria nos controles, redução de pressões médias com vistas a melhoria da eficiência operacional. Após a implantação das obras observou-se melhoria significativa na gestão e controle do sistema com redução significativa nos indicadores de perdas. Dessa forma, a correção dos desvios em contínua utilização da modelagem hidráulica, tornou-se mais simples e previsível. Estes resultados deram credibilidade a metodologia utilizando a modelagem hidráulica. Dessa forma, nasceu a oportunidade de replicação do conhecimento para engenheiros e técnicos da Sanepar garantindo a escalabilidade e sustentabilidade dos resultados expandindo a utilização das ferramentas de modelagem hidráulica.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Hidráulica, redução de perdas, eficiência operacional

INTRODUÇÃO

Sistemas urbanos de abastecimento de água (SAA) enfrentam desafios crescentes relacionados à redução de perdas, ao uso eficiente de energia e à confiabilidade operacional. Até o final da década de 1990, o Sistema modelo operava com elevada pressão média, baixa setorização e pouca visibilidade operacional - cenário típico de sistemas com elevada perda real e gestão reativa, ou o popularmente falado “apagar fogo com gasolina”. A partir de 2000, iniciou-se um processo contínuo de transformação técnica, tendo na modelagem hidráulica a base para o planejamento e execução de ações estruturantes e operacionais. A adoção de ferramentas de modelagem, associada a uma filosofia baseada no controle de variáveis operacionais (pressão, vazão, níveis) por zonas estanques, permitiu romper com a lógica tradicional de operação e evoluir para uma estrutura controlada, monitorada e gerenciável. Essa abordagem consolidou um novo paradigma técnico-operacional, transformando-se em um plano estratégico de expansão regional orientado pela replicação estruturada do conhecimento técnico e mudança cultural estratégica no combate a ineficiência operacional. Estudos consagrados demonstram que o controle de pressão é uma das estratégias mais eficazes para redução de perdas reais (Lambert, 2002; Farley & Trow, 2003). Colaborando com isso, a metodologia MASP-P cita a importância de que o gerenciamento das perdas deve ser realizado em áreas distintas e estanques da rede de distribuição (DMCs) conhecendo-se o comportamento de cada setor (BÁGGIO; MAÓSKI,2015).

OBJETIVOS

Objetivo geral

Apresentar a origem e implementação de um plano estratégico para redução de perdas reais em sistemas de abastecimento de água, estruturado na modelagem hidráulica complementada com a setorização em áreas estanques demonstrando o potencial como experiência replicável para outros sistemas de abastecimento.

Objetivos específicos

1. Desenvolver e calibrar modelo hidráulico utilizando dados provenientes de sistemas *SCADA* e medições em campo, assegurando representatividade do comportamento real do sistema.

2. Implementar setorização piezométrica visando delimitar pressões operacionais entre 15 e 30 mca, garantindo maior estabilidade hidráulica e controle sobre perdas reais.

3. Solucionar o modelo hidráulico considerando as novas delimitações definidas com uso do software de modelagem buscando não alterar o que foi pré-definido.

4. Demonstração da viabilidade técnica de aplicação prática da ferramenta *leakage detection* na modelagem hidráulica para identificação de vazamentos ocultos.

5. Mostrar resultados do que já foi replicado da metodologia para outros sistemas de abastecimento de água.

METODOLOGIA

Para elaboração, validação, calibração do modelo hidráulico foi utilizado o *OpenFlows WaterGEMS* da Bentley Systems. Para calibrar o modelo hidráulico, que dispões de recursos que aplicam algoritmos genéticos para a calibração (Wu, Z.Y. et al, 2002; Walski, T et al 2004) dos modelos e também para a identificação de *hotspots* de vazamentos (Wu, Z.et al, 2010). Nesta fase, extremamente importante adicionar as conexões *Scada Signals* que obtém dados de medição de pressões, vazões e níveis, que permite tornar o modelo hidráulico uma cópia mais próxima possível do comportamento real do sistema. Esta conexão do modelo aos dados observados é crucial, de acordo com Walski, T et al. (2004), a calibração dos modelos hidráulicos é eficaz quando há uma disponibilidade de dados de boa qualidade, para poder estimar com precisão parâmetros como rugosidade e demandas.

Esta capacidade do modelo hidráulico de responder como uma réplica do SAA, permite que ele possa ser utilizado como um Gêmeo Digital, para analisar, e prever o comportamento do mesmo a cada atualização das condições iniciais dos dados de campo para dentro do modelo.

Com a utilização da altimetria, usando ferramentas do próprio WaterGEMS, avalia-se a melhor divisão piezométrica buscando os limites ideais de pressões no sistema de distribuição entre 15 e 30 mca, aproveitando-se ao máximo a estrutura existente de anéis de distribuição para minimizar os custos de implantação das novas obras. De acordo com a NBR 12218/17, recomenda-se que as pressões dos sistemas de distribuição não sejam inferiores a 10 mca em qualquer condição e não superior a 50 mca tolerando em condições especiais até 60 mca. Na maioria das vezes, as pressões resultantes em um determinado ponto do sistema de distribuição, está mais relacionada com as perdas de carga das tubulações antecedentes do que com as diferenças altimétricas. Dessa forma, qualquer trabalho de melhoria deve ser precedido de uma análise dos fluxos de água no sistema e a verificação dos gargalos. Essa ação também é uma ferramenta extremamente importante que o *software* de modelagem mostra ao analista, numericamente ou com cores temáticas.

Outra ação importante dentro dessa metodologia para gerar novas delimitações é a ação estratégica de buscar oportunidades de reduzir áreas abastecidas por recalque, transferindo essas áreas para dentro dos limites abastecidos a gravidade por reservatórios de superfície, que comumente chamamos de RAP (Reservatório apoiado), em que sua maior finalidade é possuir reserva para 1/3 da demanda diária (NBR 12218, 2017).

Dessas novas delimitações obtém-se diferentes cenários operacionais para em seguida evoluir-se até as melhores escolhas com foco no atendimento hidráulico das novas delimitações.

Enfim, as melhorias propostas foram baseadas em análise técnica das condições hidráulicas, como pressão, vazão e coeficientes de perdas de carga, aproveitando a estrutura existente e propondo novas estruturas para solucionar problemas apontados no modelo criados pelas novas setorizações.

O precursor dessa proposta metodológica foi o MASP-P, adaptado para combate a perdas na Sanepar por Bággio, teve seu início de aplicação em 2006 e já é amplamente utilizado e difundido na empresa. É uma estratégia completa com foco no desenvolvimento do gerenciamento e controle inteligente dos sistemas para redução de perdas, mas que, para ser aproveitado em seu mais amplo potencial, precisa ser aplicado em sistemas que estejam estruturados o mais próximo possível em condições onde se possa confiar nas entradas e saídas para avaliação (BÁGGIO; MAÓSKI,2015). E essa ação estruturante foi o objetivo e implantação real na estruturação do sistema de abastecimento de água de Toledo durante um período de aproximadamente 20 anos de evolução.

Já o *leakage detection* é outra ferramenta disponível no *software* OpenFlows WaterGEMS com a proposta de localizar vazamentos ocultos através da análise pela técnica nominada de algoritmos genéticos, onde busca-se o melhor resultado evolutivo e descartando os demais menos significativos, conforme evolução dos cálculos. A modelagem hidráulica vem sendo cada vez mais utilizada no setor de saneamento para simular componentes do sistema, como tubulações e válvulas. Um dos avanços recentes na modelagem hidráulica integra esses modelos com algoritmos genéticos (GAs) para detectar pontos críticos de vazamento com mais eficiência (Wu,Z.. & Paul, S.,2008).
Como os vazamentos são dependentes da pressão, eles são modelados por meio de equações de fluxo de emissores, nas quais o coeficiente do emissor indica a possibilidade de vazamento (Wu, Z. et al, 2010). Em vez de otimizar todos os nós da rede, o GA identifica de forma eficiente um número limitado de nós propensos a vazamentos e seus respectivos coeficientes, o que melhora a escalabilidade em sistemas de grande porte.
Esse método, incorporado em ferramentas como o *Darwin Calibrator*, respeita o comportamento hidráulico dos vazamentos e permite uma calibração prática e orientada pela pressão. Embora o usuário precise estimar o número máximo de vazamentos possíveis, é possível validar os locais consistentes de vazamento por meio de múltiplas execuções de otimização, tornando essa solução poderosa e acessível para aplicação em sistemas reais de distribuição de água.

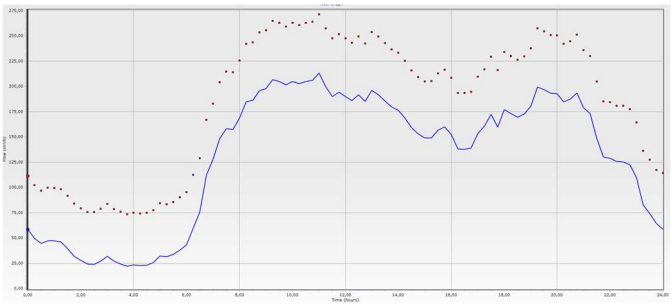
RESULTADOS

Desenvolvimento e Calibração do Modelo Hidráulico

A primeira etapa para o desenvolvimento de um modelo hidráulico representativo é a consolidação de um banco de dados confiável. Para isso, é necessário realizar o levantamento e a validação das informações cadastrais da rede de distribuição, incluindo tubulações, conexões, válvulas, reservatórios e estações elevatórias. A utilização de dados em formato GIS (*Geographic Information System*) otimiza esse processo, pois permite a importação automática de atributos diretamente para o *software* de modelagem, reduzindo erros de entrada manual.
Além dos dados da infraestrutura física, devem ser incorporadas ao modelo as informações dos consumidores, preferencialmente com pontos georreferenciados, e a altimetria da área de estudo. Também é imprescindível as informações operacionais dos elementos ativos da rede (como bombas, válvulas redutoras de pressão – VRPs – e registros de manobra), bem como os limites operacionais definidos por zonas de pressão e ou setores de distribuição e ou Distritos de Medição e Controle (DMCs).
Após a consistência estrutural do modelo, realiza-se a integração com os dados operacionais obtidos por meio do sistema *SCADA*, especialmente as séries temporais de pressão, vazão e níveis dos reservatórios. Nos trechos da rede sem monitoramento, devem ser instalados registradores de pressão, preferencialmente conectados diretamente à tubulação e posicionados em nós representativos da malha. Os dados coletados em campo devem ser convertidos em planilhas compatíveis com o *software* de modelagem WaterGEMS, assegurando uma integração eficiente.
Um primeiro cálculo do sistema deve ser elaborado para obter os padrões operacionais de vazões do sistema com base nas demandas do medidor de saída para o sistema de distribuição. Para isso, seleciona-se um dia típico de operação e extrai-se a série de vazões do *SCADA*, em intervalos regulares definido pelo analista. Com esses dados, calcula-se a média diária e o peso relativo de cada intervalo, construindo-se o padrão de variação de demanda (*Pathern Demand*), essencial para simulações dinâmicas no *software*.
Na sequência, é possível comparar os resultados do modelo com os dados reais observados em campo. Essa comparação permite avaliar a representatividade do modelo frente ao comportamento real do sistema, etapa fundamental para a posterior calibração.
A calibração é realizada por meio da ferramenta *Darwin Calibrator*, que permite ajustar os parâmetros de demanda e condições hidráulicas do modelo até que haja uma boa correlação entre os dados simulados e observados. Os principais métodos empregados são: a)Multiplicador de Demanda (*Multiply Original Demand*): permite ajustes pontuais da demanda em cada nó, com elevado controle sobre as correções aplicadas; b)Detecção de Vazamentos (*Detect Leakage Node*): método automatizado que identifica pontos com *emitter* Coefficient (l/s/Mh2o) diferenciados indicando possíveis fugas, sendo eficiente para localização de vazamentos, desde que o modelo esteja previamente bem ajustado.
A combinação sequencial dessas duas abordagens é recomendada: inicialmente utiliza-se a detecção de vazamentos para obter uma aproximação global ou uma aproximação manual das curvas e em seguida do refinamento com multiplicadores de demanda para ajuste fino. Essa metodologia assegura que o modelo hidráulico reflita com fidelidade o comportamento real do sistema de abastecimento, sendo uma ferramenta confiável para promoção das melhores intervenções de melhorias.
No gráfico 1 abaixo, observa-se as vazões do modelo com linha contínua azul e as vazões reais obtidas do sistema de controle operacional pontilhado em vermelho com intervalo de 15 minutos. Nota-se uma *gap* entre

os dados do modelo e os dados reais de campo. Dessa forma, sem uma análise mais aprofundada, podemos afirmar que essa diferença representa as perdas, já que o modelo foi rodado conforme padrão de funcionamento do medidor principal, mas considerando apenas o que os consumidores realmente demandaram.

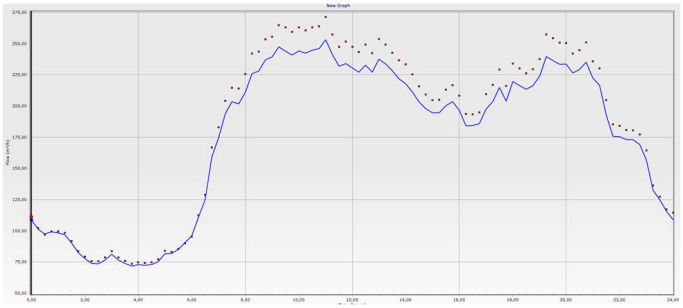
Imagem 1 – Gráfico de vazões do modelo x Vazões reais do sistema



Fonte: *Software* WaterGEMS.

A figura abaixo mostra o resultado de uma calibração de vazões a partir do *leakagem detection*. Observa-se um grau de aproximação muito preciso nos horários das vazões mínimas noturnas, que foram os dados considerados na definição do modelo e uma maior distorção, apesar de minimizada em relação a curva inicial, nos horários de maior consumo.

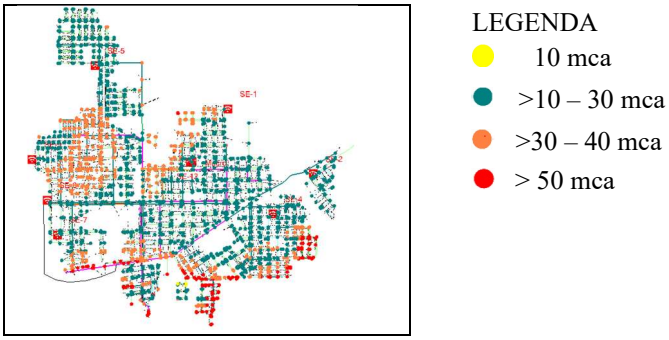
Imagem 2 – Gráfico de vazões do modelo x Vazões reais do sistema



Fonte: *Software* WaterGEMS.

A análise dos resultados pode ser facilitada pelo próprio *software* WaterGEMS, por meio da configuração de alertas operacionais e da aplicação de legendas por cores. Os alertas permitem identificar automaticamente inconsistências no modelo ao longo do período simulado, destacando pontos críticos em horários específicos. Por exemplo, é possível configurar o sistema para sinalizar pressões fora da faixa desejada (como acima de 30 mca ou abaixo de 10 mca), ou perdas de carga excessivas (por exemplo, superiores a 10 m/km). De outra forma, a legenda de cores cumpre uma função visual essencial, possibilitando o mapeamento imediato de intervalos de pressão, vazão ou qualquer outra variável hidráulica, facilitando a interpretação espacial dos dados e a identificação de padrões operacionais ou anomalias. A figura abaixo mostra em destaque as faixas de pressões em um setor de distribuição de Toledo.

Imagem 3 – mapa de pressões do modelo hidráulico



Fonte: *Software* WaterGEMS.

Setorização piezométrica

A setorização piezométrica é definida com base na altimetria do sistema e na posição altimétrica dos reservatórios de distribuição. As áreas a serem abastecidas por recalque devem delimitadas considerando as curvas de nível, entre zero a 15 e 20 metros abaixo da cota do terreno dos reservatórios, o que permite que as pressões operacionais mínimas e máximas sejam determinadas, respectivamente, pelo nível operacional de água no reservatório elevado ou pelo ponto de operação das bombas, especialmente aquelas controladas por inversores de frequência.

As demais regiões, devem ter suas áreas transferidas ou agregadas ao abastecimento por gravidade a partir de reservatórios apoiados, devem ser organizadas preferencialmente em zonas de pressão com limites alvos de presão entre 10 e 30 metros de coluna d'água (mca) — faixa considerada ideal para garantir eficiência hidráulica, segurança operacional e controle de perdas. No entanto, essa faixa não deve ser tratada de forma absoluta: em alguns casos, a elevação do limite superior de pressão pode ser necessária para evitar fragmentações excessivas no sistema, que implicariam em investimentos significativos para implantação de dispositivos como novas VRPs, válvulas de bloqueio, recalques adicionais ou reservatórios intermediários. Nesses casos, pressões de até 50 mca podem ser admitidas, desde que justificadas tecnicamente e sob controle operacional em pequenas regiões.

Em todas as áreas com potencial de redução de pressão, identificadas por meio de modelagem hidráulica e análise operacional, recomenda-se a instalação de válvulas redutoras de pressão (VRPs). Sempre que viável, deve-se priorizar o uso de VRPs com modulação do tipo "*day-night*", que ajustam automaticamente os níveis de pressão ao longo do dia conforme o perfil de consumo. Durante o período diurno, mantém-se pressões ligeiramente superiores, assegurando atendimento adequado mesmo nos pontos críticos. Já no período noturno, com queda nas demandas, é possível operar com pressões mais baixas, minimizando perdas reais sem comprometer o abastecimento. Essa estratégia representa uma forma eficaz e tecnicamente viável de controle de pressões, desde que acompanhada de monitoramento contínuo e que não gere reclamações de desabastecimento por parte dos clientes finais. Esta última análise promove um melhor aproveitamento dos resultados da modelagem hidráulica que poderão inclusive ter estes padrões de regulação mínima ser simulado no modelo hidráulico.

Resolução do modelo hidráulico a partir das novas delimitações

A partir das delimitações atualizadas das zonas de pressão, deve-se proceder à resolução do modelo hidráulico com base em cenários logicamente estruturados dentro do ambiente do WaterGEMS. Para garantir a rastreabilidade das decisões e preservar os cenários originais do sistema, é obrigatória a criação de múltiplos cenários filhos, cada um com variações específicas nas configurações operacionais, topológicas e de demanda, dessa forma, promove-se as melhorias sem prejudicar o cenário-base devidamente calibrado.

A proposição de melhorias não pode deixar de considerar as projeções de crescimento dos sistemas obtidos a partir de análise de indicadores internos e ou de projeções demográficas oficiais, com intervalo de tempo de acordo com as experiências da própria companhia e ou seguindo as recomendações normatizadas. Dessa forma, todo cenário filho deverá ter configurado com essas vazões projetadas.

Salientando que a nível de projeto, pode-se imaginar e ou pensar em todas as possibilidades e experiências dos operadores de campo, e testar essas hipóteses no *software*, pois a robustez dos algoritmos do WaterGEMS e sua capacidade de representar com assertividade o comportamento dinâmico do sistema fornecem um ambiente confiável para a simulação e tomada de decisões.

Progressivamente, na análise de cada resultado, busca-se ajustes do modelo, que podem rapidamente serem percebidas as deficiências e onde os gargalos ocorrem os gargalos de vazões pela análise de fluxo e das perdas de carga excessivas em pontos específicos. Essa flexibilidade permitirá que as novas delimitações sejam efetivamente atendidas sem preocupação com retrocessos. Em resumo, essa confiança permite que as margens de segurança que encarece qualquer empreendimento sejam minimizadas, e se depois de implantado, algo não saiu bem, sempre é possível resolver com pequenos ajustes no modelo hidráulico.

Entre as soluções a serem consideradas, destaca-se o reforço das linhas de distribuição primária por meio da criação ou duplicação de anéis tronco, promovendo maior flexibilidade hidráulica, redução de trajetos preferenciais e uniformização das pressões sempre buscando aproveitar anéis subutilizados já existente, mas não se prendendo somente a isso, já que o que mais se deseja é uma efetiva eficiência hidráulica para reduzir as perdas. Como resultado, espera-se um incremento no número de zonas de pressão bem definidas e com controle eficiente das faixas de operação.

Para assegurar os resultados da modelagem hidráulica, torna-se imprescindível a implantação de sistemas de telemetria para o monitoramento contínuo das vazões e pressões tanto nos limites das zonas quanto nas válvulas redutoras de pressão (VRPs). Cada VRP deve ser parametrizada de acordo com os padrões específicos de

consumo e pressão do seu respectivo ponto de controle, de forma a evitar falhas operacionais decorrentes de configurações que não considere características próprias do ponto ou características inadequadas.
O maior controle operacional, aliado à redução sistemática das pressões por meio de VRPs corretamente configuradas, promove um significativo aproveitamento da modelagem hidráulica como ferramenta estratégica para a gestão do sistema, contribuindo diretamente para a eficiência energética, redução de perdas reais e segurança operacional a longo prazo.

Uso da técnica *Leakage Detection*

A preparação dos dados para usar a técnica do *leakage detection* presente no *Darwin Calibrator* do WaterGEMS vai além do uso da modelagem hidráulica. O uso da técnica tem uma eficácia maior ao se trabalhar com a vazão mínima noturna, horários com as menores vazões e consequentemente as maiores pressões. Dessa forma, o efeito das demandas é minimizado e o efeito do vazamento é maximizado dentro do sistema de distribuição. Explicando mais detalhadamente, quando as demandas de consumo são maiores durante um dia, de certa forma elas mascaram os efeitos dos vazamentos, já que ocorre uma queda natural das pressões devido ao aumento de fluxo e consequentemente aumento das velocidades no interior das tubulação que geram uma maior perda de carga.
A aplicação da funcionalidade de *leakage detection* do módulo *Darwin Calibrator*, presente no *software* WaterGEMS, requer o conhecimento preciso dos padrões de consumo dos usuários durante o período de análise, geralmente focado nas horas de menor demanda, como o período noturno. Segundo orientações da Bentley Systems (2023) e estudos associados à International Water Association (IWA), a acurácia na estimativa da mínima vazão noturna (*Minimum Night Flow* – MNF) é um fator crítico para que o algoritmo consiga distinguir corretamente o consumo legítimo de possíveis indícios de perdas reais ocultas. A literatura especializada (Serafeim et al., 2022; Lee et al., 2022) destaca que padrões de consumo variam significativamente com o horário, o dia da semana, a estação do ano e o perfil socioeconômico da população dentre outros fatores, o que dificulta a aplicação de uma curva de demanda única para todo o sistema.
Como alternativa prática para estimar a vazão mínima noturna, adota-se a definição de um padrão de consumo com base em uma população representativa e geograficamente delimitada dentro do setor, com perfil predominantemente residencial. Esse padrão foi então replicado para as demais áreas do sistema, seguindo a abordagem proposta por Farah & Shahrour (2017), que recomendam a combinação de balanço hídrico e MNF automatizado como base para a detecção inteligente de vazamentos. Embora eficaz, esse método pode ser aprimorado com a implantação de infraestrutura IoT (*internet of Things*), que viabiliza a telemetria contínua do consumo em tempo real, tanto em ligações individuais quanto em DMCs.
O uso de sensores distribuídos e medidores inteligentes permite comparar o consumo real agregado com a vazão na entrada dos setores, gerando alertas automáticos em caso de discrepâncias (Lee et al., 2022). A plataforma WaterSight que atua nesse contexto como ferramenta de monitoramento inteligente, integrando dados operacionais (telemetria, *SCADA*, AMR/AMI) com modelos hidráulicos calibrados para estimativa contínua de perdas. Sua atuação complementar ao *Darwin Calibrator* — que realiza a calibração do modelo e a localização de vazamentos com base em ajustes de emissores — pode potencializar a confiabilidade e a precisão do diagnóstico de perdas reais (Bentley, 2023).
A aplicação da técnica de detecção de vazamentos via *Darwin Calibrator* requer, além de um modelo hidráulico calibrado, dados confiáveis de pressão e vazão em pontos estratégicos da rede. Inicialmente, haviam apenas medições de vazão e nível na saída do reservatório, obtidas via *SCADA*. Para permitir a identificação mais precisa de perdas ocultas, foi necessário ampliar a malha de monitoramento com a instalação de sete outros pontos de medição de pressão com *dataloggers*, estrategicamente distribuídos para abranger os extremos do sistema, que atende cerca de 7.300 ligações. Os locais foram definidos com base em critérios técnicos e nas recomendações da Bentley Systems. Testes iniciais com instalação dos sensores nos cavaletes das ligações prediais revelaram instabilidades causadas por perdas de carga durante o enchimento das caixas d'água ou consumos pontuais.
Diante das limitações observadas nas instalações iniciais, os *dataloggers* foram realocados para caixas do tipo ligações de passeio com tampa plástica, próximas a cruzamentos viários e conectadas diretamente à rede de distribuição. Essa configuração proporcionou medições mais representativas da pressão real do sistema, minimizando interferências. A escolha dos pontos seguiu recomendações da Bentley Systems, evitando instalações próximas a bombas de recalque ou imediatamente a jusante de válvulas redutoras de pressão (VRPs), onde fenômenos transitórios podem gerar leituras distorcidas, conhecidas como "pressões fictícias".
A correta estruturação dessa malha de monitoramento foi essencial para fornecer ao modelo hidráulico dados observados de alta qualidade. A boa distribuição espacial dos sensores, aliada à confiabilidade das medições, fortaleceu a aplicação do *Darwin Calibrator*, permitindo que o algoritmo genético ajustasse com maior precisão

os coeficientes de emissores e identificasse com eficácia os nós mais prováveis de apresentarem vazamentos ocultos.
Outra ação para garantir a precisão do modelo hidráulico, foi a contratação de um levantamento topográfico específico com o objetivo de determinar com exatidão as diferenças altimétricas entre os reservatórios e os pontos de instalação dos *dataloggers*.
Outro aspecto crítico foi a verificação da estanqueidade hidráulica do setor analisado. O sistema opera com registros de manobra fechados que mantêm isolados os diferentes Distritos de Medição e Controle (DMCs). Algumas vezes ocorreram falhas nas tentativas de localizar vazamento. Em verificações de campo constatou-se alteração no padrão de funcionamento desses registros. Após correção, o *leakage detection* voltou a ficar coerente. Observa-se que este é um problema frequente nos sistemas de abastecimento de água, promove-se melhorias e mantém-se determinados registros fechados ao invés de elimina-lo. A sugestão é tentar-se ao máximo fazer da maneira correta para manter estanqueidade dos setores eliminando-se ao máximo a possibilidade de perder-se a estanqueidade.
O setor escolhido como área de estudo possuía um histórico perda elevada dentro do sistema de abastecimento de água de Toledo. Abastecido por reservatório elevado com 31 metros de altura, gerava pressões elevadas no sistema. Foi um dos únicos setores que não se conseguia aplicar um projeto mais amplo de redução de pressões, pois a localização do centro de reservação não está em um ponto com cota ideal com maior elevação.
Passando para a aplicação prática da metodologia, não bastava que fossem localizados os vazamentos, mas era necessário a real busca em campo para viabilizar a sua consistência, por isso juntamente com a gerência regional buscou-se aliar a parte teórica com a prática. Dessa forma, os estudos com resultados mais consistentes avaliados com base nos números de acurácia do próprio *Darwin Calibrator* como um baixo *fitness* combinado com uma aproximação entre os dados modelados e reais de campo. Com base nisso, eram repassados para as equipes de pesquisa de campo, mapas com raio de abrangência de pesquisa de até 100 metros para os pontos apontados no mapa conforme imagem 5 abaixo.
Conforme tabela 4 abaixo, foram localizados e consertados 106 vazamentos. Na tabela são mostrados alguns protocolos gerados pelas equipes de geofone indicando o código da solicitação ao lado do código da execução, a descrição do serviço finalizado, a data de lançamento do protocolo e na última coluna a data de execução do conserto.

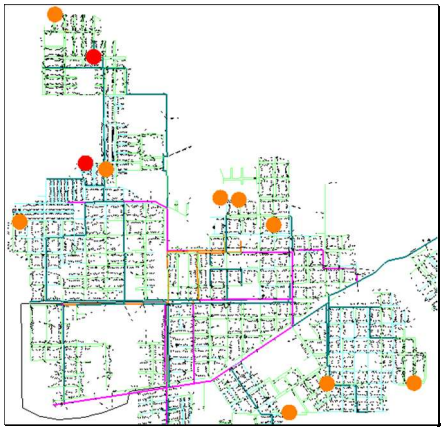
Imagem 4 – Tabela de acompanhamento dos consertos

PROTOCOLO	Cod sol	Cod exec	Descrição serviço	Data	obs	Data execução
ASE20230224164818751	1840	1750	Vazamento de rede Jardim - Beata Angelina	22/02/2023	Eq Geofone	2/24/2023
ASE20230403083618751	1520	1520	RD pr 182_ agricola daloglio	03/04/2023	Eq Geofone	4/20/2023
ASE20230404145518751	1840	1750	Rua Antonio Heiss 331	04/04/2023	Eq Geofone	4/26/2023
ASE20230410151007979	1380	1380	Rua São João 7645	10/04/2023	Eq Geofone	10/04/2023
ASE20230410084707979	1430	1380	Rua Ijui 0048	10/04/2023	Eq Geofone	10/04/2023
ASE20230410085107979	1430	1380	Rua Maria do carmo gozzo 88	10/04/2023	Eq Geofone	10/04/2023
ASE20230410084807979	1520	1520	Rua João Paulo I 685	10/04/2023	Eq Geofone	4/12/2023
ASE20230410084607979	1565	1565	Rua Foz do Iguaçú 485	10/04/2023	Eq Geofone	5/11/2023
ASE20230411082207979	1520	1520	Rua Visconde de Guarapuava 41	11/04/2023	Eq Geofone	13/04/2023
ASE20230411082107979	1520	1105	Rua Henrique Bombardelli 734	11/04/2023	Eq Geofone	13/04/2023
ASE20230411082007979	1430	1380	R OLIVO BEAL 00070	11/04/2023	Eq Geofone	11/04/2023

Fonte: Elaborado pelo autor conforme informações Sanepar.

A imagem 5 a seguir mostra os apontamentos resultantes de um dos estudos do *Leakage Detection*.

Imagem 5 – Mapa de apontamentos de vazamentos de um estudo



Fonte: Elaborado pelo autor a partir do modelo hidráulico.

A imagem 6 a seguir é a foto de um conserto de vazamento encontrado pela aplicação da técnica do *leakage detection.*

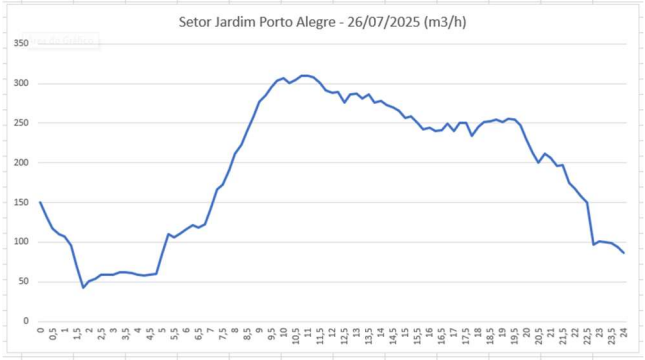
Imagem 6 – Imagem de vazamento encontrado a partir do *leakage detection*



Fonte: SGM Sanepar.

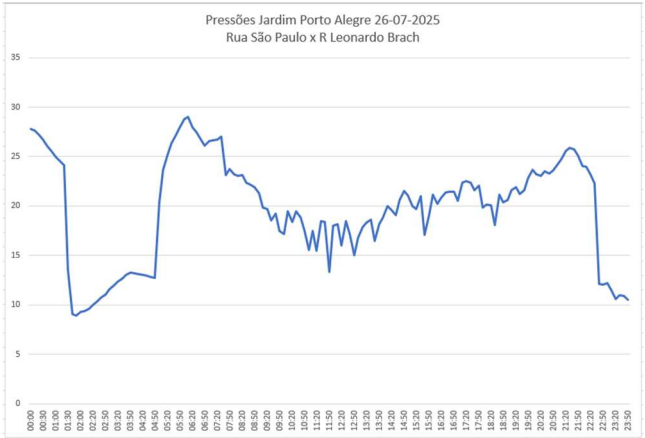
Apesar da técnica ter sido aplicada com sucesso, não se conseguiu reduzir as perdas no setor de estudo. Logo após a conclusão de estudo com conserto dos vazamentos as vazões mínimas noturnas reduziam para algo em torno de 50 m³/h, mas em poucos dias voltava para o normal de 75m³/h.
Após os estudos implantou-se um outro projeto para reduzir a pressão nos horários entre as 01:00 e 05:00 da madrugada e o resultado podem ser visto no gráfico 7 abaixo, demonstrando que o processo de baixar pressões nas redes é muito mais eficiente para a redução de perdas e é um processo muito simples de ser implantado. Observa-se no gráfico 7 que as vazões mínimas noturna chegaram a ficar abaixo de 50 m3/h com uma redução de pressão de aproximadamente 20 mca. Na imagem 8 observa-se as pressões de um ponto no mesmo dia, demonstrando a redução de pressões no intervalo de tempo citado acima.

Imagem 7 – Gráfico atual de vazões do setor de estudo após redução de pressões noturnas.



Fonte: *Scada* Sanepar.

Imagem 8 – Gráfico atual de Pressões do setor de estudo após redução de pressões noturnas.



Fonte: Telelog Sanepar.

SAA de Toledo

O SAA de Toledo passou de 10 zonas de pressão para 59 em 2025. Conforme tabela 1 abaixo, o sistema passou por uma grande reestruturação de pressões médias. As pressões abaixo de 15 mca representavam 2,21% e passaram a representar 0,56%, entre 15 e 40 mca passaram de 52,03% para 77,16%, pressões de 40 a 50 mca reduziram o percentual de 17,19% para 15,53% e as pressões maiores que 50 mca reduziram participação de 28,57% para 6,75%.

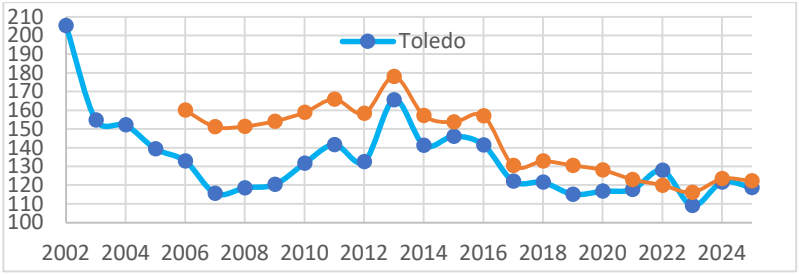
Tabela 1 – Alterações das pressões médias do sistema de Toledo entre 2002 e 2025.

2002			2025		
Área (ha)	**Limites (mca)**	**%Part**	**Área (ha)**	**Limites (mca)**	**%Part**
14,8	10 a 15	2,2	24	10 a 15	0,56
2.104	>15 a 40	52,0	3.376	15 a 40	77,16
95,40	>40 a 50	17,19	659	40 a 50	15,53
1.155	>50	28,57	286	>50	6,75

Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico 1 abaixo mostra os resultados com a implantação das melhorias operacionais no sistema. O controle de pressões e a setorização teve papel fundamental no controle de perdas. Observa-se alguns períodos de descontrole, mas rapidamente consegue-se fazer o índice de perdas retornar para valores cada vez mais baixos.
O gráfico 1 abaixo também mostra o comportamento das perdas da Gerência Regional de Toledo como um todo.
O SAA de Toledo representa atualmente 50.500 ligações e toda a gerência regional representa 134.400 ligações.
Os projetos de modelagem hidráulica já foram replicados para os sistemas mais significativos da GRTO e aqueles que possuíam um caráter de emergência em função dos riscos de falta de água.
Exemplos de outros SAA: Palotina, Assis Chateaubriand, Nova Aurora, Guaíra, Jesuítas, São Pedro do Iguaçu, Diamante do Oeste, dentre outros.

Gráfico 1: Histórico de IPL de Toledo 2002 a 2025



Fonte: elaboração pelo autor.

A tabela 2 mostra os valores do ipl ao longo do período. Em 2002 o valor foi de 205,22 atualmente, em 2025, apesar dos dados ainda serem parciais, o IPL foi de 118,71 litros por ligação dia. Observa-se que em 2023 foi atingido o menor valor com 109,05 litros, mostrando que ainda há possibilidades do sistema continuar performando muito bem ao longo do tempo.

Tabela 2 – Alterações das pressões médias do sistema de Toledo entre 2002 e 2025.

Ano	**GRTO IPL**	**TOLEDO** IPL	**Ano**	**GRTO IPL**	**TOLEDO IPL**	**Ano**	**GRTO IPL**	**TOLEDO** IPL
2002	*	205,22	2010	158,87	131,64	2018	132,89	121,54
2003	*	154,75	2011	165,96	141,67	2019	130,53	115,18
2004	*	152,18	2012	158,43	132,65	2020	128,09	116,80
2005	*	139,42	2013	178,04	165,60	2021	123,01	117,77
2006	160,08	132,90	2014	157,21	141,33	2022	119,98	127,87
2007	151,2	115,56	2015	153,77	146,15	2023	116,19	109,05
2008	151,45	118,58	2016	157,08	141,52	2024	123,47	121,55
2009	154,17	120,41	2017	130,51	122,11	2025	122,3	118,71**

Fonte: Sanepar, 2025 (*sem dados históricos**ano 2025 – parcial até junho).

Replicação demais SAAs

A partir dos resultados apresentados no SAA de Toledo, a metodologia já está sendo replicada para outros sistemas da Sanepar na GGSO – Gerência Geral Sudoeste. Já há modelagem desenvolvida para diversos sistemas da regional com demandas oriunda da modelagem já em planejamento de execução, como: Cascavel, Foz do Iguaçu, Francisco Beltrão, Pato Branco, Palmas, Céu Azul, Rio do Salto, Toledo, Nova Aurora, Guaíra, Renascença, Pérola do Oeste e Nova Esperança do Sudoeste. As tabelas 3 e 4 abaixo mostram dados do SAA de Cascavel.

Tabela 3 – SAA Cascavel - Aumentos projetados para abastecimento por gravidade

Centro de reservação	Nº Lig Antes	Nº Lig Depois	ZP Antes	Zp Depois	Novas VRPs	Novas redes
Norte	9573	10961	13	25	12	7.300
Gramado	10536	17133	16	28	19	16.825
Consolata - FT04	1519	1519	1	3	2	3.000
Consolata - FT05	1189	1966	2	6	4	2.200
Consolata - FT03	464	1501		2	1	1.100
Sul	6972	9056	9	12	4	3.650
Esmeralda		4106	0	4	4	6.100
Rio Grande do Sul	2147	4405	6	8	3	4.050
TOTAIS	**32.400**	**50.647**	**47**	**88**	**49**	**44.225m**

Fonte: Modelagem hidráulica SAA de Cascavel.

O SAA de Cascavel atende 112 mil ligações de água. A modelagem hidráulica do SAA está concluída e funcional. Foram percebidas inúmeras oportunidades de melhorias visando a melhoria da gestão de perdas com redução de pressões e criação de novos limites controláveis. As propostas já consolidadas são mostradas na Tabela 3 acima – referente aos aumentos de áreas abastecidas sem consumo de energia elétrica, ou seja, a gravidade. Na tabela 3 observa-se que a modelagem hidráulica apontou para o SAA de Cascavel um aumento no número de ligações abastecidas por gravidade de 56,30% observando-se os totais. Aumento no número de zonas de pressão de 47 para 88, aumento em 49 novas VRPs e implantação de 44.225 metros redes de distribuição e anéis de reforço.

Tabela 4 – SAA Cascavel – Reduções projetadas abastecimento por recalque

Centro de reservação	Nº Lig Antes	Nº Lig Depois	ZP Antes	Zp Depois	Novas redes
Gramado	5.389	2.517	5	4	1.430
Florais – Novo Booster	-	394		1	350
Jorge Lacerda	3.263	1.814	1	1	3.400
Sul	4.923	2.570	5	1	1.190
EET-02	3.750	2.234	1	1	20
Esmeralda	10.624	4.028	1	1	1.220
Rio Grande do Sul	3.733	2.473	1	1	900
TOTAIS	**31.682**	**16.030**	**18**	**10**	**8.510 m**

Fonte: Modelagem hidráulica SAA de Cascavel.

Na tabela 4 mostra as reduções das áreas abastecidas por recalque, redução total de 49,4% no número de ligações abastecidas por recalque com implantação de 8.510 metros de rede e anéis de distribuição.
As tabelas 5 e 6 mostram os resultados para o SAA de Foz do Iguaçu.
A Tabela 5 mostra na linha totais que o número de ligações abastecidas por gravidade pode ser aumentada de 28.781 para 48.894 ligações, ou 69,90% de aumento. Aumento no número de Zonas de pressões de 45 para 88, instalação de 43 novas VRPs e 71.495 metros de redes e anéis de distribuição.

Tabela 5 – SAA Foz do Iguaçu – Aumento de áreas abastecidas a gravidade

Centro de reservação	Nº Lig Antes	Nº Lig Depois	ZP Antes	Zp Depois	Novas VRPs	Novas redes
Vila "C"	6.294	7.368	9	19	7	9.140
Vila "A"	7.120	17.236	16	37	16	35.620
Panorama	7.508	7.508	14	14	3	10.435
Portal	7.859	16.782	6	18	17	16.300
TOTAIS	**28.781**	**48.894**	**45**	**88**	**43**	**71.495 m**

Fonte: Modelagem hidráulica SAA de Cascavel.

A tabela 6 mostra as reduções de áreas abastecidas por recalque. Na linha de totais pode-se ver que a redução de ligações abastecidas por recalque pode chegar a 56,4%, instalação de 4 novas VRPs e 6.065 metros de redes e anéis de distribuição.

Tabela 6 – SAA Foz do Iguaçu – Reduções projetadas abastecimento por recalque

Centro de reservação	Nº Lig Antes	Nº Lig Depois	ZP Antes	Zp Depois	Novas VRPs	Novas redes
Vila "C" – EET-10	3.302	2.528	1	1		165
Vila "A" – EET-7	12.344	5.892	1	1		1.400
Vila "A" – EET-08	4.868	0	0	0		0
Panorama – EET-14	11.695	4.959	1	1		1.650
Portal	6.553	3.508	5	7	4	2.850
TOTAIS	**38.762**	**16.887**	**8**	**10**	**4**	**6.065,00 m**

Fonte: Modelagem hidráulica SAA de Cascavel.

Em todos os estudos apontados acima foram aplicados a modelagem hidráulica com o *software* WaterGEMS utilizando-se da mesma metodologia do modelo de estudo. O WaterGEMS além de mostrar resultados consistentes, proporciona um aumento significativo na produtividade profissional, desde que se tenha as informações bem definidas, organizadas e preparadas para obter-se o melhor do *software*.

Treinamentos das equipes

Esta forma de trabalhar obteve credibilidade ao longo do tempo e atualmente está se transformando numa ferramenta aliada para avaliação dos sistemas de abastecimento de água e planejamento da tomada de decisões para resolver problemas do dia a dia. Na diretoria de operações da Sanepar foi estabelecido no planejamento estratégico um compromisso como todas as gerências da necessidade de uso da modelagem hidráulica e isso foi oficializado num contrato de gestão entre a diretoria e as gerências. Com isso, atualmente a modelagem hidráulica é uma das discussões presentes na câmara técnica de perdas da empresa.

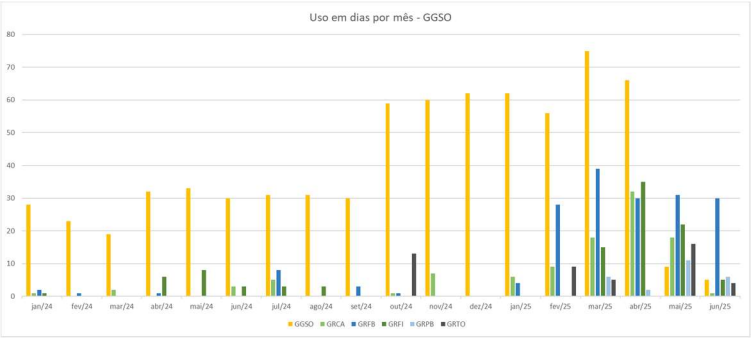
Como a gerência regional de Toledo já possuía um longo histórico de modelagem hidráulica com uma vasta experiência e resultados favoráveis, a Gerência Geral do Sudoeste com sede em Cascavel assumiu a estrutura da GRTO para dar apoio a todo o Sudoeste.

Como o nível de demandas aumentou muito, a GGSO incentivou a montagem de treinamento para outros engenheiros e técnicos para disseminar e incentivar a adoção da modelagem hidráulica.

Dessa forma, na GGSO já foram treinados 20 profissionais para conhecerem a ferramenta e passar a utiliza-la no dia a dia na resolução dos problemas.

O gráfico 2 abaixo mostra a evolução do uso da ferramenta nas gerências pertencentes a GGSO antes e depois dos treinamentos. Os treinamentos na GGSO foram desenvolvidos a partir de fevereiro e mostram uma maior adoção da ferramenta a partir do mês de fevereiro.

Gráfico 2: Histórico de uso do WaterGEMS na GGSO



Fonte: Gerencia processos água - Sanepar.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A análise dos resultados obtidos demonstra a eficácia da modelagem hidráulica como ferramenta estratégica para a gestão técnica-operacional dos sistemas de abastecimento de água. A aplicação da metodologia no SAA de Toledo permitiu a transformação de um sistema com elevada pressão média e baixa setorização em uma estrutura controlada e eficiente, refletida na redução consistente dos indicadores de perdas reais.

A criação de zonas de pressão com controle efetivo, associada à aplicação de válvulas redutoras de pressão (VRPs) evoluindo para válvula com modulares *day night*, contribuiu e estão contribuindo para redistribuição equilibrada de pressões e reduções significativas nas faixas superiores, notadamente acima de 50 mca, que passaram de 28,57% em 2002 para apenas 6,75% em 2025. Paralelamente, houve um aumento expressivo das áreas operando na faixa ideal de 15 a 40 mca, o que reafirma a efetividade do planejamento baseado em altimetria e análise de cargas hidráulicas.

A calibração do modelo utilizando algoritmos genéticos mostrou-se extremamente sensível à qualidade dos dados. A boa representatividade dos sensores de pressão, georreferenciados e bem distribuídos, foi determinante para o sucesso do processo. A ferramenta de *leakage detection*, aplicada com foco em períodos de vazão mínima noturna, confirmou sua capacidade de localizar vazamentos ocultos, ainda que, na prática, os consertos realizados tenham apresentado efeitos passageiros na redução do índice de perdas. Isso evidencia a relevância do controle de pressões como ação prioritária para mitigação permanente de perdas reais, superando até mesmo a localização pontual de vazamentos.

A replicação da metodologia em outros sistemas, como Cascavel e Foz do Iguaçu, mostra resultados coerentes: aumento substancial das ligações abastecidas por gravidade, redução da dependência de recalques e multiplicação das zonas de pressão. Esses ganhos estruturais estão diretamente associados à padronização das ações de modelagem e ao fortalecimento institucional da cultura técnica baseada em dados.

O envolvimento das equipes técnicas, através de treinamentos específicos e da institucionalização da modelagem hidráulica como ferramenta obrigatória nas decisões operacionais, evidencia a mudança cultural em curso dentro da organização. A modelagem, antes aplicada apenas em sistemas críticos ou por iniciativa isolada, agora passa a integrar o planejamento sistemático e colaborativo da empresa, sustentando decisões de curto, médio e longo prazo.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A aplicação da modelagem hidráulica como ferramenta estruturante de gestão e planejamento demonstrou-se altamente eficaz na redução de perdas reais nos sistemas de abastecimento de água analisados, sobretudo no SAA de Toledo. O processo de transformação técnica, baseado em diagnóstico detalhado, calibração precisa e uso estratégico de funcionalidades como zoneamento piezométrico, controle de pressões e *leakage detection*, resultou em melhorias operacionais consistentes, com destaque para:

- Redução expressiva nas áreas com pressões acima de 50 mca, minimizando o risco de vazamentos e rompimentos;
- Ampliação das zonas operando na faixa ideal de pressão (15 a 30 mca), com reflexo direto na eficiência e segurança do abastecimento;
- Diminuição progressiva do índice de perdas reais, mesmo em sistemas com alta complexidade e extensão.

A metodologia MASP-P, adaptada ao ambiente digital da modelagem hidráulica, possibilitou não apenas intervenções localizadas, mas a construção de um programa estratégico replicável, com expansão progressiva

para outros sistemas da GGSO. A experiência acumulada em Toledo serviu como laboratório técnico, cujo conhecimento foi padronizado e disseminado por meio de capacitações internas e suporte institucional contínuo. Com base nesses aprendizados, recomenda-se:

1. Consolidação da modelagem hidráulica como ferramenta permanente de gestão dos sistemas de abastecimento, integrando-a ao ciclo de planejamento, operação e manutenção;
2. Manutenção e expansão dos programas de capacitação técnica das equipes operacionais e de engenharia, garantindo a autonomia e a qualidade nas análises realizadas em campo;
3. Reciclagem contínua dos treinamentos para que as equipes assimilem cada vez mais e o manuseio da ferramenta de modelagem se torne rotineira e promova ganhos contínuos de eficiência e produtividade;
4. Implantação sistemática de zonas de pressão controladas, priorizando o abastecimento por gravidade e a instalação de VRPs com controle dinâmico (modulação day-night);
5. Ampliar e modernizar a infraestrutura de telemetria, com sensores de pressão, vazão e nível estrategicamente posicionados para alimentar os modelos e permitir diagnósticos em tempo real e também permitir o controle operacional de perdas priorizando as ações de acordo com a metodologia MASP-P;
6. Aprimoramento e utilização rotineira da técnica de *leakage detection*, com vistas a adoção de metodologia de aprendizado de máquina tipo Watersignt da Bentley que pode dar velocidade na análise dos processos;
7. Atualização constante dos modelos hidráulicos na base visando a integração automática de alterações cadastrais aos modelos hidráulicos, assegurando sua confiabilidade como Gêmeo Digital do sistema.
8. Buscar como direção de ação corporativa a estanqueidade dos setores de distribuição. Observa-se em muitos sistemas a interdependência direta entre sistemas de produção e distribuição tornando os sistemas de controles mais difíceis e complexos. Dessa forma, deve-se caminhar no sentido de simplificar tudo para poder aplicar a metodologia MASP-P com todo potencial.
9. Direcionar esforços para implanta IOTs no sistema de micromedição de cliente para integrar os volumes consumidos em tempo real a modelagem hidráulica. Essa utopia já vem sendo implementada com a adoção de micro medidores inteligentes. Com certeza um aumento da demanda e o desenvolvimento tecnológico pode tornar essas soluções cada vez mais viáveis.

Essas recomendações visam consolidar uma cultura organizacional baseada em conhecimento técnico, eficiência operacional e sustentabilidade, permitindo que os resultados obtidos se mantenham e evoluam ao longo do tempo, mesmo diante de novos desafios operacionais ou demandas crescentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12218:2017 – Projeto de redes de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

2. BÁGGIO, Mário Augusto; MACHADO, Ricardo Röver. Controle e redução de perdas nos sistemas públicos de abastecimento de água. Apresentação na ABESSP, capítulo sobre zoneamento piezométrico: compartimentação da rede em áreas estanques. São Paulo: ABESSP, 2015.

3. BENTLEY SYSTEMS**.** Darwin Calibrator – Leakage Detection Technical Guide. Bentley Knowledge Base, 2023. Disponível em: https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article_view&sysparm_article=KB0057938. Acesso em: jul. 2025.

4. BENTLEY SYSTEMS. WaterSight Overview – Real-Time Operational Intelligence Platform. Bentley Systems, 2023. Disponível em: https://www.bentley.com/*software*/watersight. Acesso em: jul. 2025.

5. FARAH, J.; SHAHRUR, I. Leakage detection using smart water system: combination of water balance and automated minimum night flow. Procedia Engineering, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318679206. Acesso em: jul. 2025.

6. LAMBERT, Allan. What do we know about pressure management? IWA Conference Proceedings, 2002.

7. FARLEY, M.; TROW, S. Losses in Water Distribution Networks: A Practitioner's Guide to Assessment, Monitoring and Control. IWA Publishing, 2003.

8. LEE, Y.; CHANG, D.; JUNG, D. Minimum Night Flow Prediction for Leakage Control in Water Distribution Systems Using Deep Learning Models. Applied Sciences, v.12, n.13, 6467, 2022. DOI: 10.3390/app12136467

9. SERAFEIM, P.; MAKRI, E.; GIOKO, K.; et al. A Probabilistic Approach for Estimating Minimum Night Flow and Leakage in District Metered Areas of Water Distribution Systems. Water, v.14, n.1, 98, 2022. DOI: 10.3390/w14010098

10. WU, Z. Y.; Walski, T. M.; et al. Leakage detection and calibration using genetic algorithms in a water distribution system. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 2002.

11. WU, Z.; PAUL, S. Optimal sensor placement for leak detection using GA and hydraulic simulation. Bentley Systems Conference Proceedings, 2008.

12. WU, Z.; et al**.** Leak detection and calibration using emitter coefficients with pressure-dependent demands. Bentley Systems, 2010.

13. OPENAI. ChatGPT – Modelo GPT-4o como apoio técnico para estruturação de textos científicos e análises em engenharia hidráulica. OpenAI, 2025. Disponível em: https://chat.openai.com. Acesso em: jul. 2025.