APLICAÇÕES DE GÊMEOS DIGITAIS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA: CONCEITOS, COMPONENTES E CASOS DE SUCESSOS

Leandro Rinaldo Merli[(1)]

Engenheiro Civil e mestrando em Engenharia Hidráulica e Ambiental pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP). Atua na Bentley Systems como Gerente Técnico de Contas, desenvolvendo planejamento estratégico técnico voltado à inovação e transformação digital para empresas de saneamento no Brasil e na América Latina.

Julio Issao, PhD

Engenheiro Ambiental, mestre e doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade de São Paulo. Atua na Bentley Systems como Engenheiro de Aplicação Sênior, apoiando tecnicamente a aplicação de soluções digitais para modelagem, operação e gestão de sistemas de saneamento.

Wilson Kobayashi, MBA

MBA pela Fundação Instituto de Administração - FIA/USP, e Bacharel em Ciências da Computação pela Universidade São Judas Tadeu, foi professor universitário na Universidade Metodista de São Paulo e nas Faculdades Anhanguera. Atua na Bentley Systems como Gerente de Contas, apoiando empresas de saneamento na identificação de oportunidades estratégicas e na adoção de soluções digitais para gestão de infraestrutura.

Endereço[(1)]**:** Av. Paulista, 2537 - Bela Vista, São Paulo - SP, CEP: 01311-300 – Brasil
Tel: (11) 93940-6617 – e-mail: Leandro.Merli@bentley.com

RESUMO

Este trabalho apresenta o conceito, os componentes e os benefícios práticos dos Gêmeos Digitais na gestão de Sistemas de Abastecimento de Água (SAAs), destacando a transição de um gerenciamento reativo para operações preditivas em tempo real. Por meio da plataforma em nuvem OpenFlows WaterSight da Bentley Systems, que federa dados de sistemas SCADA, GIS, faturamento comercial e modelagem hidráulica ativa, concessionárias de saneamento obtêm suporte qualificado à tomada de decisão. A metodologia de pesquisa exploratória e qualitativa avalia quatro estudos de caso de implementação global e nacional da tecnologia: DC Water (EUA), AEGEA Manaus (Brasil), DEYAK Kozani (Grécia) e SANEPAR Curitiba (PR). Os resultados operacionais consolidados evidenciam reduções de até 20% nas perdas de água físicas e reais, economia de até 40% em consumo elétrico de bombeamento, e decréscimo de 50% no tempo de geolocalização e reparo de novos vazamentos de água. Conclui-se que o uso de gêmeos digitais se constitui como um habilitador tecnológico de relevância para que as concessionárias de saneamento alcancem as metas de universalização e eficiência exigidas pelo Novo Marco Legal do Saneamento no Brasil.

PALAVRAS-CHAVES:

Gêmeos Digitais, Abastecimento de Água, WaterSight

INTRODUÇÃO

A gestão de sistemas de distribuição de água depara-se com desafios associados a infraestruturas antigas, perdas físicas e comerciais de água, consumo de energia elétrica e à necessidade de promover resiliência operacional frente a eventos imprevistos (BERNARD, 2024; RAMOS et al., 2023). A transformação digital, especificamente através da implementação de Gêmeos Digitais (GDs), apresenta-se como uma alternativa técnica de relevância para otimizar as operações de campo, qualificar os processos de tomada de decisão e favorecer a sustentabilidade técnica e econômica dos recursos hídricos (GRIGG, 2025; TOMIĆ; KARMOUS-EDWARDS; KAMOJJALA, 2022). O presente trabalho apresenta o conceito de Gêmeos Digitais, os respectivos benefícios para as concessionárias de saneamento, especificamente em relação a um sistema de abastecimento de água, os habilitadores de tecnologia e o caminho de implementação, ilustrando a temática por meio de casos práticos e resultados obtidos em escala global.

1. O Conceito de Gêmeos Digitais

A digitalização de infraestruturas de saneamento atua como um vetor de indução para a eficiência operacional, viabilizando o planejamento estruturado de longo prazo (GRIGG, 2025). Esse processo subsidia a substituição gradativa do gerenciamento reativo e corretivo tradicional por uma sistemática de tomada de decisões baseada em dados contínuos de campo (BONILLA et al., 2023). A transição para rotinas operacionais preditivas reduz a exposição dos ativos a regimes hidráulicos prejudiciais e otimiza a alocação de equipes de manutenção (RAMOS et al., 2023).

A indústria da água, através do *Smart Water Networks Forum* (SWAN) em colaboração com o *AWWA Digital Twin Committee*, estabelece que um Gêmeo Digital constitui-se como:

> [...] uma representação digital dinâmica de uma ou mais entidades do mundo real e de seus comportamentos, utilizando modelos com dados estáticos e dinâmicos que permitem insights e interações para impulsionar resultados acionáveis e aprimorados." (TOMIĆ; KARMOUS-EDWARDS; KAMOJJALA, 2022, p. 76)

O modelo dinâmico diferencia-se de simulações ou modelos matemáticos offline convencionais por possuir um fluxo contínuo de dados, atualizando as condições de contorno do simulador para que este espelhe em tempo real as condições físicas da rede (GHORBANI BAM et al., 2025). A consistência de um Gêmeo Digital apoia-se na federação e integração de múltiplos sistemas de informação corporativos que historicamente operavam de forma estanque em departamentos isolados (BENTLEY SYSTEMS, 2023; GHORBANI BAM et al., 2025). A convergência de informações estabelece uma plataforma integrada para a tomada de decisões, abrangendo:

- Sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*): Provêm telemetria de campo em tempo real, monitorando variáveis operacionais instantâneas como vazões, pressões e níveis de reservatórios (TOMIĆ; KARMOUS-EDWARDS; KAMOJJALA, 2022).

- Sistemas GIS (*Geographic Information System*): Registram a base espacial e as características cadastrais dos ativos lineares enterrados e nós de consumo (BONILLA et al., 2023).

- Modelagem Hidráulica Dinâmica: Executa o modelo matemático que simula o comportamento hidráulico da rede sob diferentes regimes de distribuição, por meio de softwares como WaterGEMS e SewerGEMS (TOMIĆ; KARMOUS-EDWARDS; KAMOJJALA, 2022; Bentley Systems, 2023).

- AMI (*Advanced Metering Infrastructure*) e Sensores IoT: Capturam o consumo capilarizado de clientes em alta frequência e fornecem leituras de pressão em pontos de controle (GRIGG, 2025).

- Dados Comerciais e de Faturamento: Subsidiam as análises de faturamento e volumes consumidos por ligação (BENTLEY SYSTEMS, 2023).

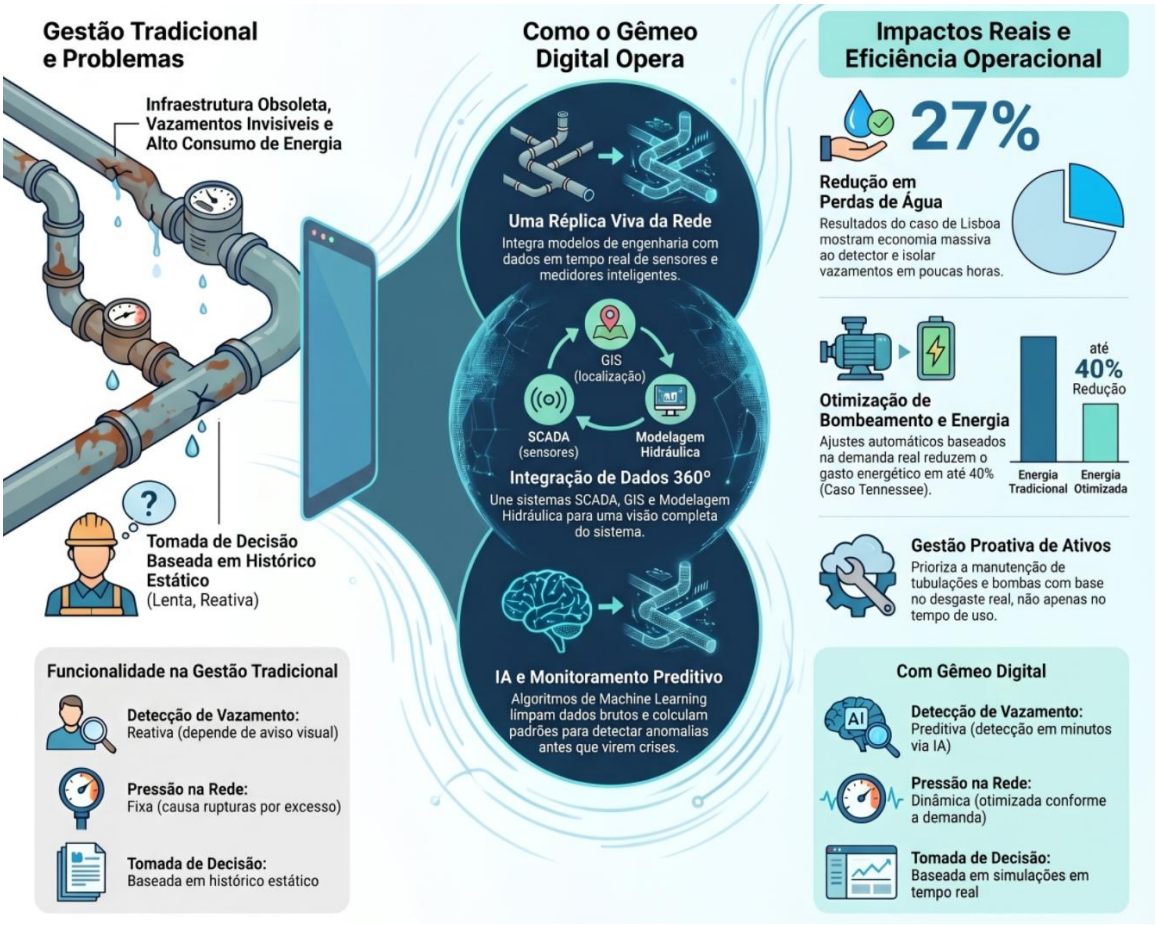
- Sistemas CMMS (*Computerized Maintenance Management System*): Centralizam o registro de ordens de serviço, falhas de ativos de campo e manutenção preditiva de equipamentos (GHORBANI BAM et al., 2025).

Nesse contexto, apresenta-se outra definição mais abrangente sobre gêmeos digitais aplicada a sistemas de água:

> "Um gêmeo digital consiste em uma representação virtual realista e dinâmica de um ativo físico, processo ou sistema. A criação de um gêmeo digital para um sistema de abastecimento de água envolve a integração de modelos e dados existentes. Isso pode incluir modelos de engenharia (modelos hidráulicos da rede de distribuição e representações tridimensionais da estação de tratamento de água e das estações elevatórias de bombeamento), novos modelos de realidade virtual (caso as representações tridimensionais sejam inadequadas, obsoletas ou inexistentes), além de dados de GIS, de gestão de ativos e de cadastro de clientes. Adicionalmente, os gêmeos digitais são continuamente atualizados com dados operacionais provenientes de sistemas SCADA, sensores, medidores e outras fontes de medição, constituindo um modelo em tempo real passível de utilização em rotinas de operação e manutenção." (BENTLEY SYSTEMS, 2025).

A transição do modelo de gerenciamento convencional para a operação orientada por representações virtuais de alta fidelidade é evidenciada a partir das discrepâncias de engenharia observadas entre os métodos reativos e preditivos. Ilustra-se na **Figura 1,** o exemplo da gestão tradicional de perdas em SAAs, em que se caracteriza pelo uso de dados offline isolados e estáticos e rotinas de caça-vazamentos reativas que dependem de manifestações visuais ou reclamações de usuários para o início de reparos corretivos. Em contrapartida, o gêmeo digital atua como uma réplica dinâmica e contínua do sistema físico, processando o fluxo de dados em 360 graus por meio da federação do GIS, SCADA e modelagem hidráulica ativa, utilizando inteligência artificial para o tratamento de ruídos e filtragem de *outliers* telemétricos.

Figura 1 - Comparativo estrutural e benefícios operacionais do Gêmeo Digital frente ao modelo de gestão reativo para gestão de perdas



Desenvolvido pelo Autor.
Fontes de dados: BENTLEY SYSTEMS, 2025; RAMOS et al., 2022; BERNARD, 2024.

2. Benefícios Chaves dos Gêmeos Digitais na Gestão de Sistemas de Abastecimento de Água

Os benefícios associados à implementação de gêmeos digitais a SAAs, demonstrados em ambientes de integração e federação de dados como a plataforma OpenFlows WaterSight da Bentley, fundamentam-se na consolidação de dados outrora dispersos em subsídios estruturados para a tomada de decisões diárias (BENTLEY SYSTEMS, 2025). Essa integração de processos de engenharia, comerciais e operacionais viabiliza impactos mensuráveis nas esferas de gerenciamento apresentadas a seguir.

2.1 Monitoramento de Rede

O monitoramento contínuo e em tempo real de variáveis de campo (como pressões, vazões, níveis de reservatórios e parâmetros físico-químicos) apoia a identificação rápida de comportamentos anômalos no SAA (BENTLEY SYSTEMS, 2025). O processamento de dados históricos por meio de algoritmos de aprendizado de máquina viabiliza o cálculo de padrões diários de consumo, estabelecendo limites estatísticos de normalidade (percentis de confiança por dia e hora) para comparação automática com as leituras instantâneas (TOMIĆ; KARMOUS-EDWARDS; KAMOJJALA, 2022).

Em cenários de falhas de comunicação de instrumentos ou perda de sinal, o gêmeo digital projeta estimativas baseadas em previsões matemáticas para suprir a lacuna temporária, o que mantém a consistência das análises operacionais (BENTLEY SYSTEMS, 2025). O sistema avalia simultaneamente o estado de integridade dos sensores de campo, classificando-os de forma visível entre dados normais, parciais ou ausentes (TOMIĆ; KARMOUS-EDWARDS; KAMOJJALA, 2022).

2.2 Gestão de Eventos e Geolocalização de Vazamentos

A redução de perdas de água físicas e reais baseia-se na geração antecipada de alertas baseados em desvios hidráulicos das zonas de medição de controle. Ao correlacionar as informações de GIS, telemetria SCADA e simulações do modelo hidráulico calibrado (como o WaterGEMS), o gêmeo digital identifica e geolocaliza no mapa os pontos com maior probabilidade de rompimento ativo (*hotspots*), o que restringe a área de busca física em campo (BENTLEY SYSTEMS, 2025).

A redução no tempo necessário para detecção e localização de vazamentos invisíveis e fraudes minimiza o volume de água não faturada e otimiza a alocação de equipes de reparo (RAMOS et al., 2022). Estudos empíricos demonstram que a sincronização automática de dados viabiliza a localização e a resolução de vazamentos em poucas horas, mitigando os impactos econômicos decorrentes de perdas reais e os riscos de erosão do solo público (FERRÀ MESQUIDA, 2021).

2.3 Avaliação de Desempenho de Bombas

O gêmeo digital monitora o desempenho de estações elevatórias comparando os pontos reais medidos de vazão, altura manométrica e consumo elétrico com as curvas teóricas dos fabricantes (BENTLEY SYSTEMS, 2025). O processamento de dados do SCADA viabiliza a determinação contínua da eficiência hidráulica dos conjuntos motobombas, o que mensura os custos operacionais de eventuais ineficiências (BERNARD, 2024).

Essa análise dinâmica orienta a programação preditiva de manutenções de campo e apoia o ajuste da rotação de inversores de frequência para manter os equipamentos operando dentro de sua faixa de operação preferencial. A manutenção das bombas sob regime adequado reduz a ocorrência de falhas mecânicas em rolamentos e selos, contraindo as despesas com manutenção corretiva emergencial e eletricidade (BERNARD, 2024).

2.4 Avaliação de Reservatórios

A análise integrada de reservatórios auxilia no monitoramento de níveis, emitindo notificações automáticas para prevenir transbordamentos e sinalizando quedas rápidas de volume que indicam desvios de consumo locais (BENTLEY SYSTEMS, 2025).

O monitoramento das taxas de renovação e características de mistura interna do reservatório apoia a conservação da qualidade físico-química da água, minimizando os tempos de residência e reduzindo a perda de cloro residual por evaporação ou estagnação (BENTLEY SYSTEMS, 2025). Essa checagem sistemática contribui para a

identificação prévia de vazamentos na rede de distribuição antes que estes resultem em desabastecimento localizado ou danos à qualidade da água fornecida (BENTLEY SYSTEMS, 2022).

2.5 Auditoria de Água

A apuração automatizada e quantitativa dos índices de perda de água e água não faturada (do inglês *Non-Revenue Water - NRW*) baseia-se na correlação de dados telemétricos de macro-medição com os registros de faturamento comercial de clientes (GRIGG, 2025).

Essa rotina digital calcula a divisão dos índices de perda em perdas reais (físicas) e perdas aparentes (comerciais), apontando os distritos com maior prioridade para detecção de vazamentos ou fiscalização de ligações irregulares (BENTLEY SYSTEMS, 2025). O cálculo em tempo real simplifica os relatórios e auditorias exigidas por órgãos reguladores nacionais, reduzindo o tempo de compilação manual de planilhas pelas equipes corporativas de saneamento (GRIGG, 2025; RAMOS et al., 2023).

2.6 Análise de Hidrômetros de Clientes

O processamento do histórico comercial de ligações de consumo permite a segmentação do parque de hidrômetros instalados de acordo com parâmetros de diâmetro, marca, idade física e consumo médio. Essa análise estatística apoia a identificação de medidores sob regimes de sobredimensionamento ou subdimensionamento técnico em relação à real demanda física dos ramais (BENTLEY SYSTEMS, 2025).

A correção dessas distorções eleva a receita operacional da concessionária ao reduzir os volumes submedidos de grandes consumidores e otimiza as tomadas de decisões relativas a planos de substituição e renovação periódica de aparelhos (RAMOS et al., 2023).

2.7 Simulação em Tempo Real

A qualificação de planos de contingência é viabilizada pela execução de simulações em tempo real de eventos operacionais extremos, tais como rompimentos de grandes adutoras, paralisações intempestivas de conjuntos elevatórios e demandas súbitas para combate a incêndios. Diretamente no painel de controle de nuvem, operadores realizam análises preditivas (*what-if scenarios*) para antecipar as consequências hidráulicas de manobras de válvulas, mapeando registros necessários para o isolamento técnico do trecho afetado e identificando clientes sensíveis (*e.g*. hospitais e creches) sujeitos a pressões limítrofes (BENTLEY SYSTEMS, 2025).

A simulação integrada a dados continuamente atualizados por telemetria eleva a acurácia dos resultados em comparação a rotinas tradicionais de simulação offline desconectadas de campo (RAMOS et al., 2023).

2.8 Painéis de Controle e Conectividade PowerBI

A unificação das informações dos SAAs em painéis visuais intuitivos facilita a interpretação das condições de contorno de operação de rede. A integração com o PowerBI viabiliza a criação de relatórios gerenciais personalizados de acordo com as necessidades específicas de cada departamento da concessionária (BENTLEY SYSTEMS, 2025).

Essa visualização estende a compreensão do status dinâmico do SAA para funcionários e stakeholders de áreas administrativas que não possuem treinamento operacional avançado em engenharia hidráulica, promovendo o alinhamento de processos e a colaboração qualificada entre os setores de manutenção e operação de campo (TOMIĆ; KARMOUS-EDWARDS; KAMOJJALA, 2022).

2.9 Planejamento de Capital

O gêmeo digital apoia o gerenciamento preventivo de investimentos correlacionando as informações cadastrais do GIS, o histórico de ocorrências de rompimentos e a performance hidráulica estimada das redes lineares. Ao correlacionar a probabilidade de falha estrutural de cada tubo físico com as consequências financeiras e sociais associadas a um colapso hídrico, o sistema calcula uma escala prioritária para intervenção de reabilitação ou substituição preventiva de ativos (BENTLEY SYSTEMS, 2025).

Essa alocação otimizada orienta o direcionamento de recursos para ativos em condições desfavoráveis de operação, maximizando o Retorno sobre o Investimento (ROI) de capital das concessionárias (BERNARD, 2024).

2.10 Administração do Gêmeo Digital

A governança das informações é viabilizada por meio de um módulo administrativo unificado, projetado para permitir que os gestores de dados configurem e atualizem os elementos sistêmicos do gêmeo digital. Esse painel possibilita a inserção e edição de dados espaciais (*e.g.* arquivos *shapefiles*), parâmetros de bombas, volumes de reservatórios, hidrômetros cadastrados, níveis de alertas operacionais e conexões com bases SCADA e PowerBI (BENTLEY SYSTEMS, 2025). Essa centralização simplifica os processos de limpeza de bases de dados heterogêneas e apoia a integridade do modelo virtual sincronizado com o campo (TOMIĆ; KARMOUS-EDWARDS; KAMOJJALA, 2022).

2.11 Modelagem Hidráulica em Tempo Real

A modelagem hidráulica ativa constitui a maturidade analítica em relação aos modelos de simulação estática tradicionais e telas rígidas dos sistemas SCADA, integrando o simulador de período estendido (EPS) diretamente aos limites fornecidos pela telemetria física de campo. Essa arquitetura possibilita prever o desempenho hidráulico e sanitário (como pressões, vazões, idade da água e concentração de cloro residual) em qualquer ramal ou nó não monitorado fisicamente por sensores (BENTLEY SYSTEMS, 2025). O motor hidráulico de cálculo dinâmico, baseado nas equações lógicas do WaterGEMS, promove a autocalibração contínua do sistema, elevando a precisão das previsões e estendendo a compreensão global do comportamento da rede em tempo integral.

3. Casos de aplicação de gêmeos digitais em SAAs por meio do WaterSight

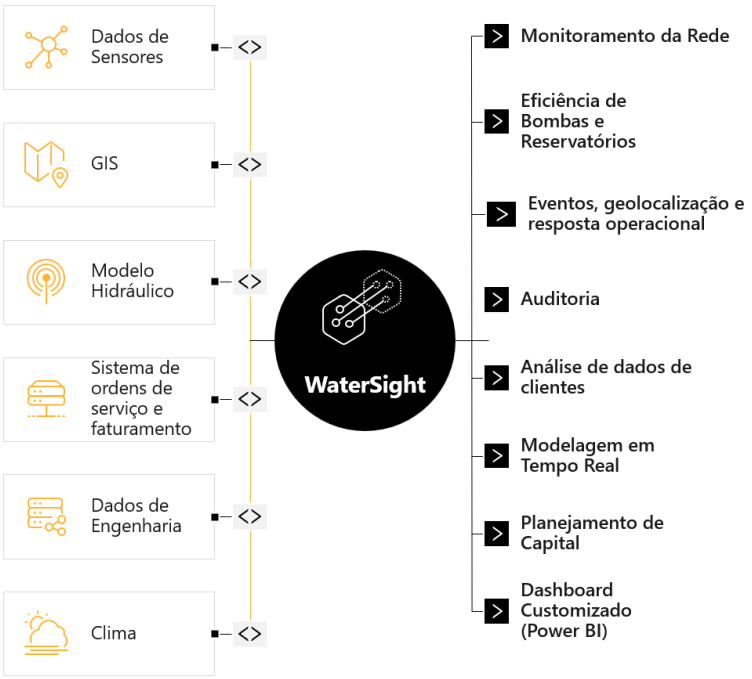
Para o presente trabalho, são apresentados quatro estudos de caso de aplicação de gêmeos digitais em sistemas de abastecimento de água utilizando a plataforma OpenFlows WaterSight da empresa Bentley Systems. O OpenFlows WaterSight, aplicativo de gêmeos digitais para infraestruturas de saneamento (água, esgoto e drenagem), integra dados de SCADA, GIS, modelagem hidráulica, informações de cadastro e faturamento de clientes e histórico de falhas de equipamentos em um ambiente de dados conectados, viabilizando a elaboração de estratégias operacionais em tempo real com maior eficiência de custos.

Esse ambiente escalonável fornece à concessionária o acesso às análises de desempenho globais do sistema e de ativos individuais, em conjunto com indicadores de risco, o que subsidia as tomadas de decisões relativas à operação, manutenção e planejamento de investimentos de capital. A ferramenta emite notificações de alerta sobre ativos sob baixa performance ou condições de contorno hidráulico anômalas na rede, fornecendo uma análise estruturada do comportamento atual, histórico e previsto para dar suporte à avaliação dos impactos operacionais decorrentes de ações de manutenção.

Adicionalmente, a plataforma viabiliza a execução de múltiplos cenários hipotéticos, de risco e de planejamento de longo prazo, com o objetivo de elevar os níveis de serviço e desempenho operacional ao mesmo tempo em que mitiga riscos físicos ao sistema de distribuição.

A **Figura 2** ilustra o fluxo de dados de entrada no WaterSight e as principais capacidades analíticas viabilizadas pela ferramenta. As **Figura 3** a **Figura 6** ilustram algumas das telas do ambiente da plataforma do gêmeo digital desenvolvido pela Bentley Systems.

Figura 2 - Dados de entrada no WaterSight e as principais capacidades analíticas



Fonte: Adpatado de BENTLEY SYSTEMS, 2025.

Abaixo, apresenta-se a explicação técnica e resumida de cada uma das fontes de dados representadas na imagem, detalhando como se conectam e alimentam a inteligência analítica central do OpenFlows WaterSight (BENTLEY SYSTEMS, 2025):

- Dados de Sensores: Sinais dinâmicos e contínuos coletados diretamente de campo por meio de sistemas SCADA, dispositivos IoT ou telemetrias de medidores inteligentes (AMI). Compreendem leituras periódicas de vazão, pressão na rede e níveis de reservatórios, as quais passam por um processo automatizado de limpeza de dados e preenchimento de lacunas assistido por inteligência artificial.

- GIS: Cadastro georreferenciado e espacial dos ativos lineares (tubulações) e pontuais (nós de consumo, tanques, bombas e válvulas) do sistema de abastecimento. Funciona como a base geométrica e de conectividade que viabiliza a visualização em mapa e subsidia as priorizações de substituição no planejamento de capital.

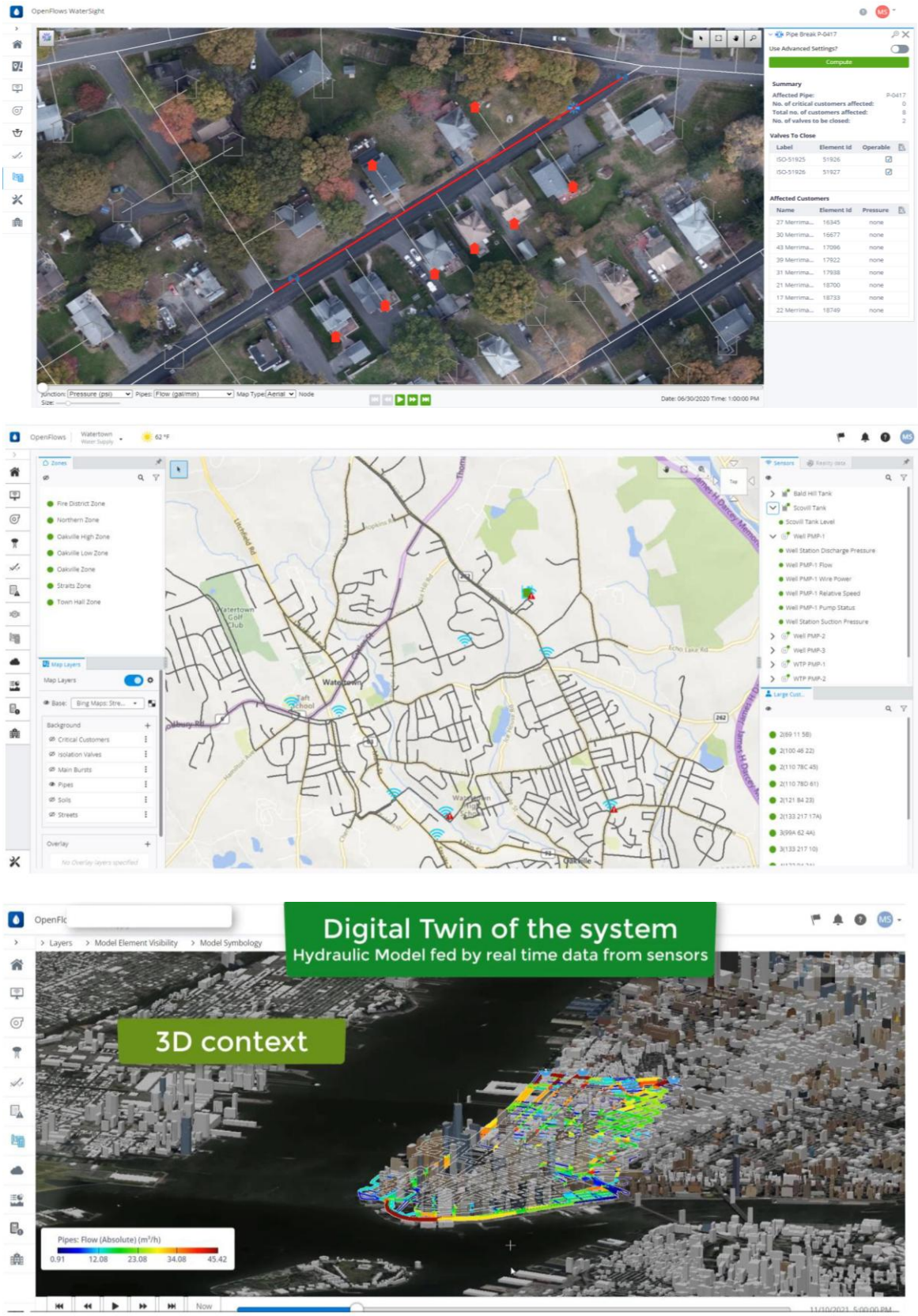
- Modelo Hidráulico: Arquivo de simulação hidráulica (gerado no OpenFlows WaterGEMS ou SewerGEMS caso um gêmeo digital para sistemas de esgotamento). Utiliza as leituras do SCADA como condições de contorno dinâmicas para gerar predições hidráulicas de tempo real em trechos não instrumentados da rede.

- Sistema de Ordens de Serviço e Faturamento: Integração de bases de dados de faturamento mensal comercial dos consumidores (utilizada para o cálculo automatizado mensal do balanço hídrico por distrito) e de dados de manutenção de ativos, que registram ordens de serviço históricas e ativas de rompimentos de tubulações.

- Dados de Engenharia: Parâmetros físicos e características eletromecânicas complementares necessários para qualificar as simulações, englobando as dimensões de seções de tanques de armazenamento e as curvas teóricas de performance hidráulica e de eficiência energética das estações de bombeamento.

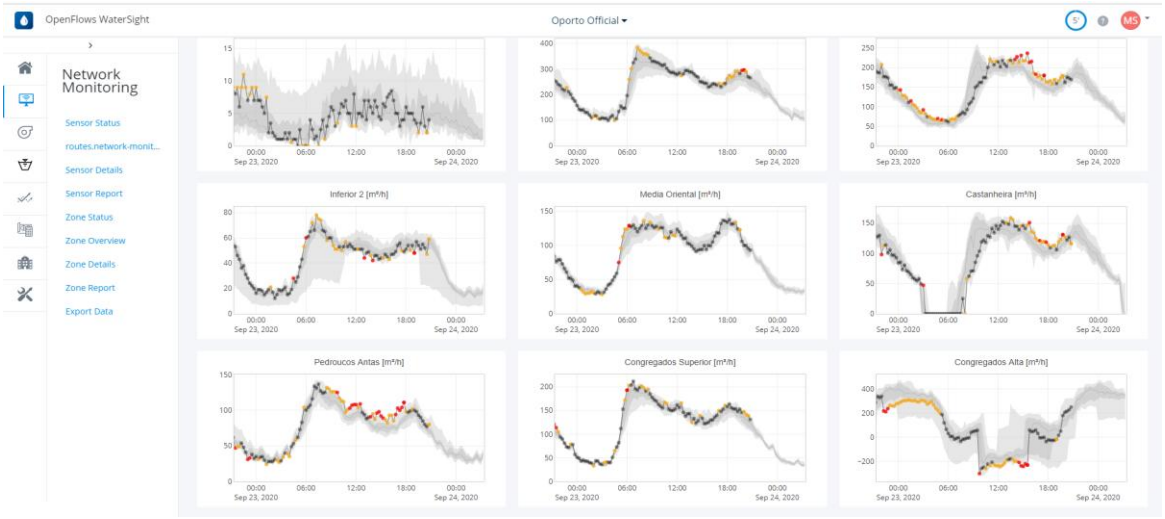
- Clima: Ingestão de variáveis meteorológicas históricas e previstas (como temperatura de bulbo úmido, taxas de precipitação e radiação solar) processadas por algoritmos de aprendizado de máquina para calibrar e prever oscilações e picos de demanda de água na rede.

Figura 3 - Ilustrações de telas do WaterSight da visualização em mapa que reúne todas as informações (sensores, zonas, grandes consumidores, GIS e dados de realidade) em um único mapa.



Fonte: BENTLEY SYSTEMS, 2025.

Figura 4 – Ilustração da tela do WaterSight que mostra o painel de monitoramento de rede fornece uma visão geral em tempo real de todos os sensores, zonas e grandes consumidores.



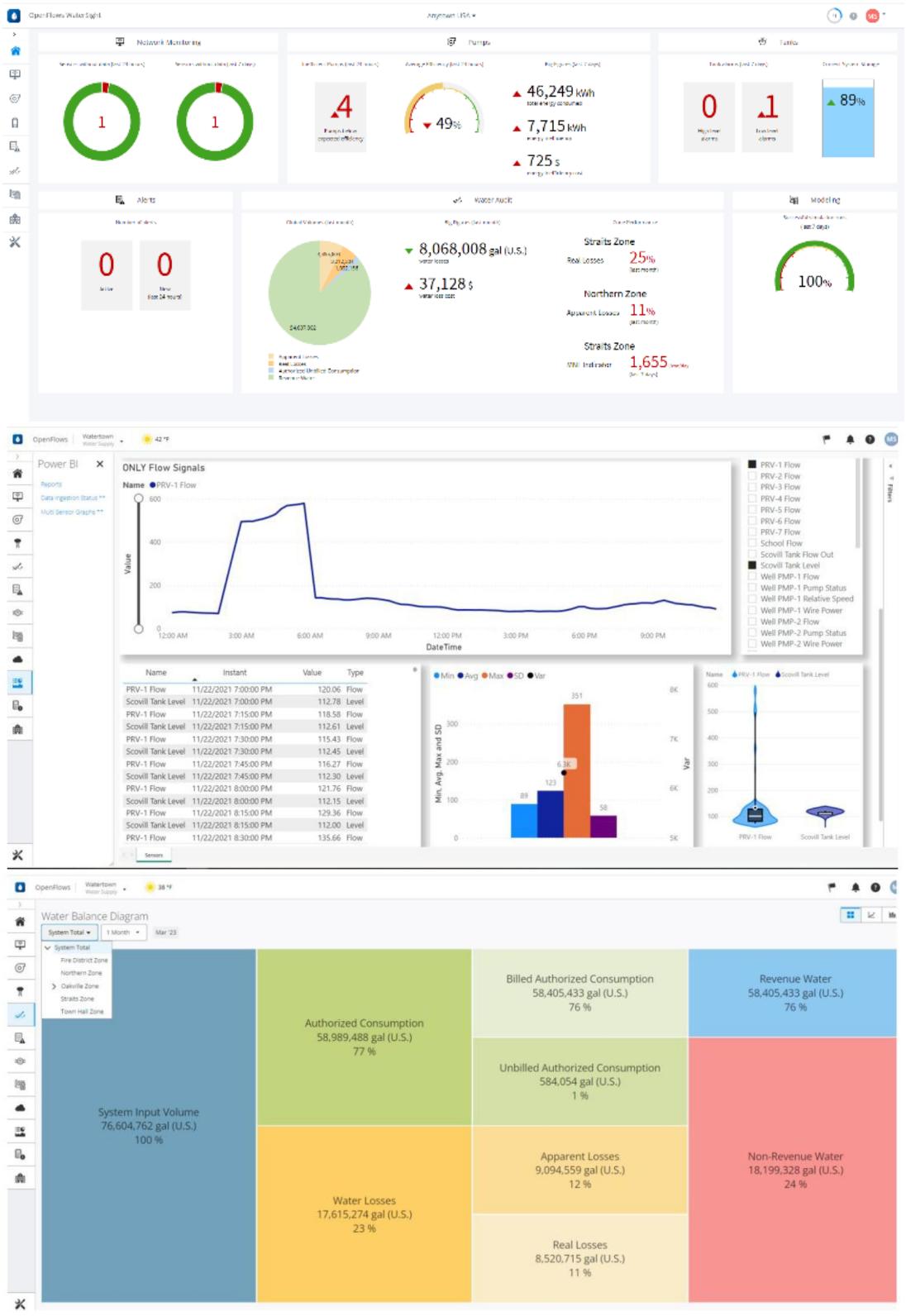
Fonte: BENTLEY SYSTEMS, 2025.
Nota: As faixas cinzas representam os padrões, enquanto as linhas pretas com pontos coloridos (vermelho, amarelo e preto) representam os dados reais de séries temporais reamostrados intervalados.

Figura 5 – Ilustração de um evento detectado pelo sistema (pontos vermelhos) e as configurações de alarme definidas pelo usuário no WaterSight.



Fonte: BENTLEY SYSTEMS, 2025.

Figura 6 - Ilustração de dashboard e relatórios criados no ambiente do WaterSight.



Fonte: BENTLEY SYSTEMS, 2025.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Apresentar de forma concisa o conceito de gêmeos digitais, as principais aplicações operacionais e os benefícios obtidos na gestão de sistemas de abastecimento de água, demonstrando a viabilidade técnica da tecnologia por meio do exame de estudos de caso estruturados sob a plataforma de nuvem OpenFlows WaterSight da Bentley Systems.

Objetivos Específicos

- Definir os requisitos tecnológicos, as principais fontes de dados corporativas e as camadas de integração que apoiam a consolidação de um gêmeo digital em concessionárias de saneamento.
- Demonstrar os impactos operacionais decorrentes da simulação hidráulica ativa em tempo real para a redução de perdas físicas e conservação de energia.
- Relatar os resultados práticos obtidos com a aplicação da plataforma em cenários operacionais globais de diferentes escalas geográficas e populacionais.

METODOLOGIA UTILIZADA

O método de pesquisa adotado para a elaboração deste estudo caracteriza-se como exploratório e qualitativo, estruturado em três eixos de desenvolvimento técnico:

- Pesquisa Bibliográfica: Levantamento e síntese de literatura científica internacional sobre simulação dinâmica, modelos acoplados a sensores IoT e métodos probabilísticos para gerenciamento de redes.
- Análise Documental de Engenharia: Avaliação de especificações técnicas da plataforma OpenFlows WaterSight e compilação de relatórios de desempenho e implantação fornecidos por concessionárias.
- Consolidação de Vivência Técnica: Integração da experiência prática adquirida no acompanhamento técnico e especificação de projetos de gêmeos digitais de saneamento no cenário brasileiro.

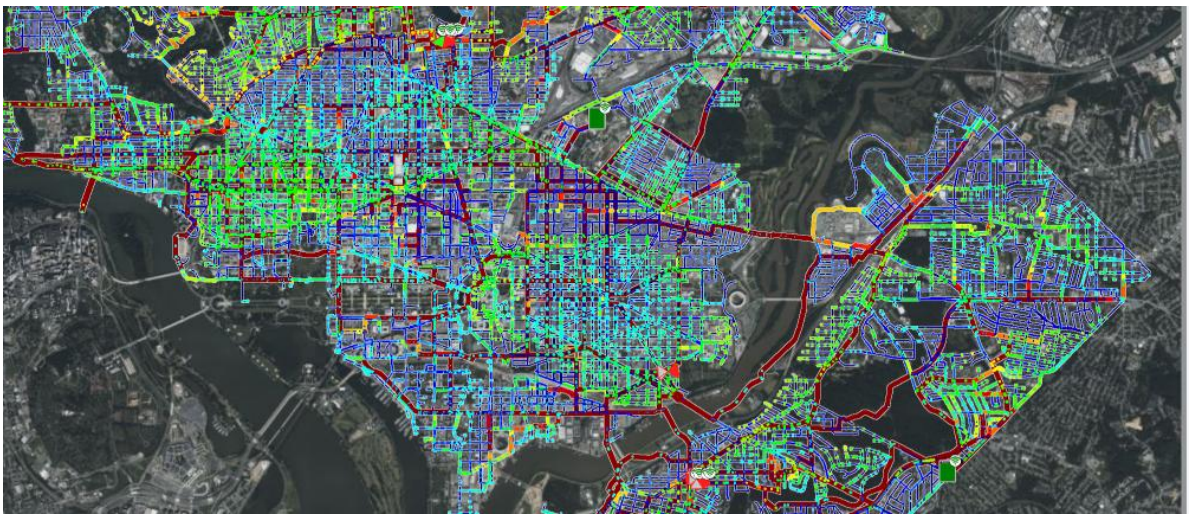
A avaliação prática da metodologia apoia-se no exame de quatro experiências de implantação da ferramenta:

- DC Water (Estados Unidos): Integração de sistemas de faturamento, GIS e SCADA focada na elevação da resiliência financeira e operacional no planejamento de ações contra quebras e rupturas de redes de distribuição (BENTLEY SYSTEMS, 2023).
- AEGEA Manaus (Brasil): Implantação de projeto-piloto no distrito de São Jorge (61,4 km de rede) para monitoramento de pressões, controle de tempo de residência da água para preservação da qualidade e detecção ativa de perdas reais de água (BENTLEY SYSTEMS, 2022).
- DEYAK Kozani (Grécia): Automação e acoplamento do modelo dinâmico com sensores de pressão de campo que resultaram na redução de 50% no tempo de resposta e reparo de novos vazamentos na rede municipal (BENTLEY SYSTEMS, 2024).
- SANEPAR Curitiba (Brasil): Implantação de gêmeo digital na zona norte para monitoramento de pressões, geolocalização de perdas por algoritmos e detecção ativa de perdas reais no sistema de distribuição de água.

RESULTADOS OBTIDOS

DC Water (Estados Unidos)

Figura 7 - Ilustração do WatrSight da DC Water



A concessionária DC Water gerencia os serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário para mais de 672 mil residentes e 17,8 milhões de visitantes anuais no Distrito de Colúmbia, nos Estados Unidos. Diante de uma infraestrutura de grande escala, a organização enfrentava o desafio de conferir visibilidade técnica aos dados e análises em toda a empresa, além de demandar a redução de despesas operacionais (OPEX) e de capital (CAPEX), o controle das perdas de água não faturada e a melhoria contínua da qualidade da água, das pressões de rede e da rapidez de resposta a campo.

Para mitigar essas limitações, a concessionária iniciou em 2020 a implementação do gêmeo digital OpenFlows WaterSight, cuja Fase 1 (etapa de pré-implantação corporativa global) tornou-se ativa no primeiro trimestre de 2021. A solução adotada consistiu na aplicação de rotinas de monitoramento da integridade física dos sensores de campo, automação de alertas inteligentes para detecção de anomalias hidráulicas e visualização gráfica da performance operacional de conjuntos elevatórios de bombeamento. Adicionalmente, a integração contínua entre o modelo hidráulico dinâmico e o sistema SCADA qualificou os parâmetros de calibração em tempo real e forneceu suporte ao plano de ação e isolamento de rompimentos de tubulações através de um simulador de rede executado via navegador web.

Como benefício prático imediato, a plataforma viabilizou a acessibilidade web segura e simplificada ao modelo hidráulico ativo, disponibilizando as simulações e dados de saída para diferentes departamentos e tomadores de decisão da empresa. O cruzamento de dados permitiu deprimir incertezas técnicas operacionais, otimizar a aplicação de recursos financeiros em CAPEX/OPEX e conter as perdas de água na rede de distribuição. O gêmeo digital promoveu, dessa forma, a redução do tempo de paralisação no fornecimento por falhas na rede, qualificando a distribuição de água sob níveis adequados de segurança e resiliência.

AEGEA Manaus (AM)

A concessionária AEGEA, uma das maiores operadoras privadas de saneamento do Brasil atendendo a mais de 21 milhões de pessoas, implantou um projeto-piloto de gêmeo digital baseado no OpenFlows WaterSight no distrito de medição de São Jorge, em Manaus (AM), rede que atende a aproximadamente 10 mil clientes e possui 61,4 km de extensão. Em virtude do isolamento geográfico e das particularidades de relevo da região amazônica, a concessionária demandava um sistema de monitoramento remoto capaz de reduzir os custos logísticos associados a vistorias preventivas presenciais de campo (BENTLEY SYSTEMS, 2022).

O gêmeo digital integrou bases de dados de sensores armazenadas em servidores distintos (Oracle e SQL Server), transmitindo informações operacionais de vazão, pressão e nível de tanques de armazenamento a intervalos de 15 minutos. O acoplamento dinâmico ao modelo hidráulico em WaterGEMS permitiu aos operadores simular eventos de rompimento, paradas de bombas, manobras de válvulas e demandas de combate a incêndio em tempo real, o que diminuiu o tempo de resposta técnica a incidentes. Adicionalmente, as curvas de consumo geradas pelo sistema permitiram emitir alarmes automáticos baseados em padrões históricos de comportamento de vazão noturna mínima, o que contribuiu para o controle de perdas reais físicas e para a preservação do tempo de residência interna da água armazenada para manutenção de cloro residual.

DEYAK Kozani (Grécia)

Diante de índices elevados de perdas de água na Grécia, onde a média de perdas atinge aproximadamente 26% ao ano, a concessionária municipal DEYAK, na cidade de Kozani (população atendida de 60 mil habitantes espalhada em 63 povoados), buscou a automatização e digitalização de sua rede de distribuição através do ecossistema de gêmeos digitais da Bentley. Em parceria com especialistas de engenharia, foi estruturado um modelo hidráulico dinâmico em tempo real associado a sensores telemétricos de pressão, vazão e qualidade integrados à plataforma OpenFlows.

A adoção do sistema integrado viabilizou que a equipe de operação despendesse 40% menos tempo em tarefas de controle de pressão da rede. Com a aplicação de algoritmos de localização baseados em gradientes de pressão e vazão nas DMCs, o tempo médio para a geolocalização e o reparo de vazamentos e rompimentos não reportados reduziu-se em 50%. A melhoria na rapidez de resposta às ocorrências e a otimização dinâmica das VRPs mitigararam as perdas físicas reais da rede, resultando em uma redução direta de 20% no volume total de água injetado e distribuído no SAA.

SANEPAR Curitiba (Paraná)

No cenário nacional, destaca-se também a iniciativa de implantação da plataforma OpenFlows WaterSight pela Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), na cidade de Curitiba (PR). A concessionária utiliza a tecnologia de gêmeos digitais com o objetivo de otimizar a verificação periódica do balanço hídrico por distrito e estruturar a configuração de alertas preditivos para monitoramento da saúde dos sensores de campo. Adicionalmente, o sistema auxilia na localização de vazamentos ativos por meio do módulo de geolocalização probabilística, que integra de forma dinâmica as leituras de vazão e pressão do sistema SCADA com as equações físicas do modelo hidráulico calibrado, favorecendo a redução do tempo de varredura e resposta técnica das equipes de manutenção.

No início de 2026, a equipe da SANEPAR utilizou a plataforma WaterSight para identificar vazamentos por meio da ferramenta de geolocalização. Os pontos indicados pela plataforma como prováveis locais de ocorrência apresentaram uma diferença de aproximadamente uma quadra em relação ao ponto real do vazamento, reduzindo significativamente o trabalho de busca em campo.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A análise técnica dos resultados obtidos nos diferentes estudos de caso demonstra que a transição do gerenciamento convencional para a operação apoiada por gêmeos digitais promove melhorias mensuráveis na eficiência operacional, na conservação de recursos e na moderação de custos das concessionárias de saneamento.

Convergência Tecnológica e Redução de Incertezas Operacionais

A unificação de bancos de dados isolados em um Ambiente de Dados Comuns (*Common Data Environment*, CDE), estruturado pela plataforma OpenFlows WaterSight, modifica a dinâmica de análise de redes de distribuição. Historicamente, as concessionárias de saneamento geravam um expressivo volume de dados operacionais que permaneciam inacessíveis ou fragmentados em setores distintos, uma condição que impunha lentidão à tomada de decisão das equipes de campo.

A consolidação de dados cadastrais de GIS, medições telemétricas do SCADA, faturamento comercial de clientes e o modelo de simulação hidráulica viabiliza a criação de uma representação virtual dinâmica de alta fidelidade. No caso da DC Water, no Distrito de Colúmbia, a implantação da plataforma em nuvem permitiu que os dados de saída do modelo dinâmico fossem compartilhados de forma simplificada por meio de um navegador web para múltiplos departamentos da empresa (Impacto Operacional). Essa visualização conjunta reduz as incertezas técnicas relativas ao comportamento hidráulico instantâneo da rede, reduzindo despesas operacionais (OPEX) e despesas de investimento de capital (CAPEX) associadas a reparações emergenciais.

Controle Ativo de Perdas de Água e Geolocalização de Vazamentos

O controle do tempo de exposição do sistema de distribuição a vazamentos constitui um dos principais retornos operacionais gerados pelo gêmeo digital dinâmico. A plataforma WaterSight utiliza algoritmos de aprendizado de máquina para tratar séries históricas de pressão e vazão, definindo padrões típicos de consumo diário por zonas de medição e controle.

A aplicação de gatilhos automáticos combinados de telemetria de vazão de entrada e queda de pressão de ponta de rede detecta anomalias no fornecimento de água no intervalo de 1 a 2 horas após a sua ocorrência física. No caso da concessionária municipal DEYAK, em Kozani (Grécia), a automação do gêmeo digital reduziu em 50% o tempo médio de resposta e reparo de novos vazamentos não reportados em nível de distrito de medição de controle (DMC). Essa agilidade no reparo, somada ao gerenciamento dinâmico de pressões, reduziu as perdas físicas reais da rede de Kozani, resultando em uma diminuição direta de 20% no volume total de água injetado no SAA municipal.

Premissas semelhantes de controle orientam o projeto em estruturação pela Sanepar, na cidade de Curitiba (PR), onde a integração dinâmica de dados do SCADA com as equações físicas do modelo hidráulico calibrado visa apoiar as análises de balanço hídrico e agilizar a localização de vazamentos invisíveis no sistema metropolitano de distribuição por meio do módulo de geolocalização probabilística.

Mitigação de Falhas e Otimização da Gestão de Ativos

A manutenção preventiva de equipamentos mecânicos apoia-se no acompanhamento da faixa de operação preferencial das estações de bombeamento. O gêmeo digital correlaciona as leituras reais de SCADA com as curvas características das bombas hidráulicas instaladas, monitorando o ponto de trabalho elétrico e hidráulico instantâneo.

O diagnóstico preditivo de degradação de rotores ou entupimentos de crivos de sucção permite planejar e priorizar as rotinas de manutenção com base no desgaste físico real do ativo, em substituição aos planos de manutenção estritamente temporais ou por horas de funcionamento acumuladas. Conforme documentado no caso da AEGEA, em Manaus (AM), o monitoramento remoto contínuo das bombas e níveis de tanques de armazenamento a intervalos de 15 minutos de telemetria reduziu a necessidade de vistorias técnicas preventivas presenciais de campo, as quais demandavam elevados recursos de mão de obra e geravam despesas com veículos e combustíveis em regiões isoladas. Em termos mundiais, a aplicação contínua dessas diretrizes de inteligência operacional de ativos pela plataforma WaterSight converge estatisticamente para uma redução de 20% nos

custos operacionais diretos das concessionárias de saneamento, em conjunto com uma redução de 25% nas interrupções de serviço prestado aos consumidores.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A transição para rotinas operacionais baseadas em Gêmeos Digitais representa uma mudança de patamar na gestão de sistemas de abastecimento de água, substituindo rotinas essencialmente corretivas por ações preditivas apoiadas em dados contínuos de campo. O cruzamento automatizado de dados telemétricos com simulação hidráulica ativa em tempo real viabiliza a redução das perdas de água reais e do consumo de energia elétrica nas estações de bombeamento, promovendo a eficiência operacional dos ativos existentes.

No cenário brasileiro, a relevância dessa tecnologia é ampliada frente aos prazos e metas de universalização estabelecidos pelo Novo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020), que impõe a necessidade de estender a cobertura dos serviços de água e esgoto concomitante à redução dos índices de perdas físicas e comerciais de água tratada. Diante desse cenário de investimentos intensivos, o suporte tecnológico é um fator estratégico para viabilizar a sustentabilidade das operações e otimizar os planos de expansão das concessionárias. A plataforma OpenFlows WaterSight atua como um habilitador tecnológico para esse propósito, fornecendo um ambiente integrado de análise preditiva capaz de subsidiar decisões ágeis de campo e orientar a priorização de investimentos em reabilitação de redes.

Para concessionárias que buscam implementar essas soluções, recomendam-se as seguintes diretrizes de planejamento e governança:

- Parceria com Empresas Especializadas e Roteiros Estruturados: Recomenda-se que as entidades de saneamento selecionem parceiros de engenharia consultiva com conhecimento técnico consolidado em plataformas de nuvem, como o OpenFlows WaterSight. Esses especialistas devem demonstrar a habilidade de estruturar um roteiro de caminho (*roadmap*) de maturidade digital gradativo e escalonável, minimizando riscos operacionais durante as fases de implantação técnica.

- Planejamento de Engenharia Integrado e Alocação de Recursos: O desenvolvimento do gêmeo digital exige um planejamento técnico prévio que envolva a administração de dados GIS, a alocação de instrumentação física de campo (como macromedidores e sensores de pressão de ponta de rede) e a alocação de recursos dedicados à modelagem hidráulica contínua por meio de softwares consagrados como o OpenFlows WaterGEMS para água ou OpenFlows SewerGEMS para redes de esgoto.

- Aliança Estratégica com o Departamento de TI: O departamento de Tecnologia da Informação (TI) atua como um parceiro de relevância na implantação do sistema. O suporte de TI viabiliza e mantém canais de comunicação seguros e robustos para a transferência de dados em tempo real originados das frentes operacionais de campo (SCADA/IoT) para a infraestrutura de simulação em nuvem, mantendo a conformidade com as regras corporativas de segurança de dados e reduzindo vulnerabilidades cibernéticas.

- Capacitação Técnica Conjunta e Unificada: Recomenda-se a promoção de rotinas de capacitação contínua que englobem de forma conjunta as equipes de engenharia de planejamento e os técnicos e operadores de campo. Esse alinhamento de competências favorece a correta interpretação dos parâmetros hidráulicos simulados em tempo real, acelera a resposta a alarmes automáticos de anomalias e maximiza a probabilidade de aproveitamento prático de todo o potencial de suporte à decisão fornecido pelo gêmeo digital

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BENTLEY SYSTEMS. *AEGEA Implements a Digital Twin at Manaus' São Jorge District to Improve Water Quality and Asset Management Decisions*. Exton: Bentley Systems, 2022. 2 p. Case Study.

2. BENTLEY SYSTEMS. *DC Water's Digital Twin Solution: Improving Operational and Financial Resilience by Implementing a Water Infrastructure Digital Twin*. Exton: Bentley Systems, 2023. v. 1, p. 1-2. Article.

3. BENTLEY SYSTEMS. *DEYAK Water Utility Drives Technology Advancement for Water Systems in Greece*. Exton: Bentley Systems, 2024. 2 p. Case Study.

4. BENTLEY SYSTEMS. *OpenFlows WaterSight Technical Specifications Guide*. Exton: Bentley Systems, 2025. 44 p. Technical Guide.

5. BERNARD, M. *Using Digital Twins to Improve Pumping and Distribution System Operations*. Journal AWWA, Denver, v. 116, n. 1, p. 6-15, 2024.

6. BONILLA, C.; BRENTAN, B.; MONTALVO, I.; AYALA-CABRERA, D.; IZQUIERDO, J. *Digitalization of Water Distribution Systems in Small Cities, a Tool for Verification and Hydraulic Analysis: A Case Study of Pamplona, Colombia*. Water, Basileia, v. 15, n. 21, p. 3824, 2023.

7. FERRÀ MESQUIDA, M. *Digital Twin in Water Distribution Networks*. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2021.

8. GHORBANI BAM, P. et al. *Digital Twin Applications in the Water Sector: A Review*. Water, Basileia, v. 17, n. 20, p. 2957, 2025.

9. GRIGG, N. S. *Digital Transformation in Water Utilities: Status, Challenges, and Prospects*. Smart Cities, Basileia, v. 8, n. 99, p. 1-19, 2025.

10. RAMOS, H. M. et al. *New Challenges towards Smart Systems' Efficiency by Digital Twin in Water Distribution Networks*. Water, Basileia, v. 14, n. 8, p. 1304, 2022.

11. RAMOS, H. M. et al. *Smart Water Grids and Digital Twin for the Management of System Efficiency in Water Distribution Networks*. Water, Basileia, v. 15, n. 6, p. 1129, 2023.

12. TOMIĆ, S.; KARMOUS-EDWARDS, G.; KAMOJJALA, S. *Digital Twins: Case Studies in Water Distribution Management*. Journal AWWA, Denver, v. 114, n. 8, p. 44-56, 2022.