PLATAFORMA DIGITAL PARA CONTROLE AVANÇADO E MITIGAÇÃO DE DESCARTES INDUSTRIAIS EM REDES DE ESGOTOS E ETEs

Pablo Montalvillo Gómez [(1)]
Ciências Ambientais, Universitat Politècnica de València (UPV)
Engenharia de Bioenergia e Energias Descentralizadas, Oulu University of Applied Sciences
Mestrado em Engenharia Ambiental pela Universitat Politècnica de València (UPV)
PMP - Project Management Professional, Escuela de Project Management (EdPM)
Consultor para Águas desde 2021 na Idrica.
Michal Klimacek [(2)]
Administração e Gestão de Empresas, City University - Bratislava, Slovak Republic
Diretor Sénior da Sensus Solutions Europa Oriental
Sonia Mucciolo[(3)]
Engenheira Materiais-Química pela Universidade Mackenzie
Mestrado em Engenharia Ambiental pelo Politecnico di Torino – Itália
Gerente de Soluções de Clientes da Xylem Brasil
20 anos na área de soluções para Água e Efluentes.

Endereço[(3)]**:** Rua Telmo Coelho Filho, 40 – Jardim Albano – São Paulo - SP - CEP: 05543-020 - Brasil - Tel: +55 (11) 3732-0150 - e-mail: Sonia.Mucciolo@xylem.com

RESUMO

Este estudo apresenta uma **plataforma digital** inovadora para monitoramento e controle de descartes industriais em redes de esgotamento. A solução integra múltiplas fontes de dados, como sensores IoT, SCADA, GIS e dados meteorológicos, oferecendo funcionalidades como rastreamento analítico, alertas configuráveis, análise hidráulica e identificação de pontos de monitoramento otimizados por meio de um algoritmo genético. Um algoritmo de detecção de anomalias em tempo real classifica padrões de qualidade, reduzindo revisões manuais e acelerando respostas a incidentes.

Foi possível demonstrar a eficácia da **plataforma**, com a instalação de 11 estações de monitoramento, em um município com mais de 20.000 habitantes. Foram detectados mais de 330 eventos de descartes não autorizados em oito meses, com confiabilidade superior a 80%, permitindo ações preventivas na ETE para conformidade ambiental. A **plataforma** otimizou a operação da ETE, possibilitou uma melhora na qualidade do esgoto tratado final pela Estação e promoveu a sustentabilidade ambiental. Os resultados representam um avanço significativo na gestão de redes de esgotamento sanitário.

PALAVRAS-CHAVE: Plataforma digital, Descartes industriais, Gestão de redes de esgoto

INTRODUÇÃO

No contexto atual, a digitalização surge como uma ferramenta fundamental para o setor da água. Tradicionalmente, o controle de descartes industriais em redes de esgoto tem sido um desafio considerável devido aos métodos de monitoramento que não detectam problemas em tempo hábil.

Essa ineficiência e falta de precisão impactam a qualidade da água e a sustentabilidade dos sistemas de esgotamento sanitário.

A integração de tecnologias de Internet das Coisas (IoT) e aprendizado de máquina permite a coleta e análise de dados em tempo real, possibilitando a detecção precoce de anomalias em descartes.

Neste artigo, apresentamos uma solução inovadora: **uma plataforma digital patenteada** para controle de descartes em redes de esgotamento sanitário, projetada para enfrentar esses desafios e ainda permitir uma gestão de água mais inteligente e sustentável.

OBJETIVOS

O principal objetivo desse desenvolvimento foi trazer uma mudança transformadora na forma como enfrentamos os desafios ambientais contemporâneos e melhorar a qualidade da água de modo amplo com a eficiência na detecção e gestão de descartes industriais irregulares que afetam negativamente a tratabilidade dos esgotos domésticos e podem trazer consequências em termos de conformidade e confiabilidade para as concessionárias que realizam a gestão dos sistemas de esgotamento sanitário.

METODOLOGIA UTILIZADA

A colaboração entre especialistas em monitoramento de efluentes industriais, operadores de redes de esgoto, operadores de ETES e autoridades locais foi crucial para desenvolver a **solução estudada e implantada**: uma ferramenta digital para controle de descartes baseada em dois pontos principais:

- Integração de múltiplas fontes de dados, incluindo informações sobre atividades industriais, resultados analíticos de laboratórios externos e internos, plataformas digitais para gerenciamento de ordens de serviço, plataformas IoT para integração de sensores no sistema de esgoto, integração com SCADAs, leitura remota, informações GIS e dados meteorológicos.

- Desenvolvimento de funcionalidades derivadas de informações coletadas de diferentes fontes de dados. As funcionalidades incluem gerenciamento de informações para todo o censo industrial conectado à rede sob monitoramento, rastreamento de resultados analíticos e leituras de sensores de qualidade de águas residuais, um sistema de alertas com limites configuráveis, um painel para visualização eficiente de resultados, comunicação bidirecional com sistemas CMMS para emissão de ordens de serviço, análise avançada de redes hidráulicas, identificação de indústrias suspeitas para alertas de descartes irregulares, estimativa do tempo de trânsito do ponto do descarte até a estação de tratamento de esgoto, estimativa do volume do descarte, entre outros.

Além do descrito acima, **a plataforma** possui duas funcionalidades avançadas apresentadas nas seções a seguir.

Identificação de Pontos de Monitoramento Ótimos em Redes de Esgoto

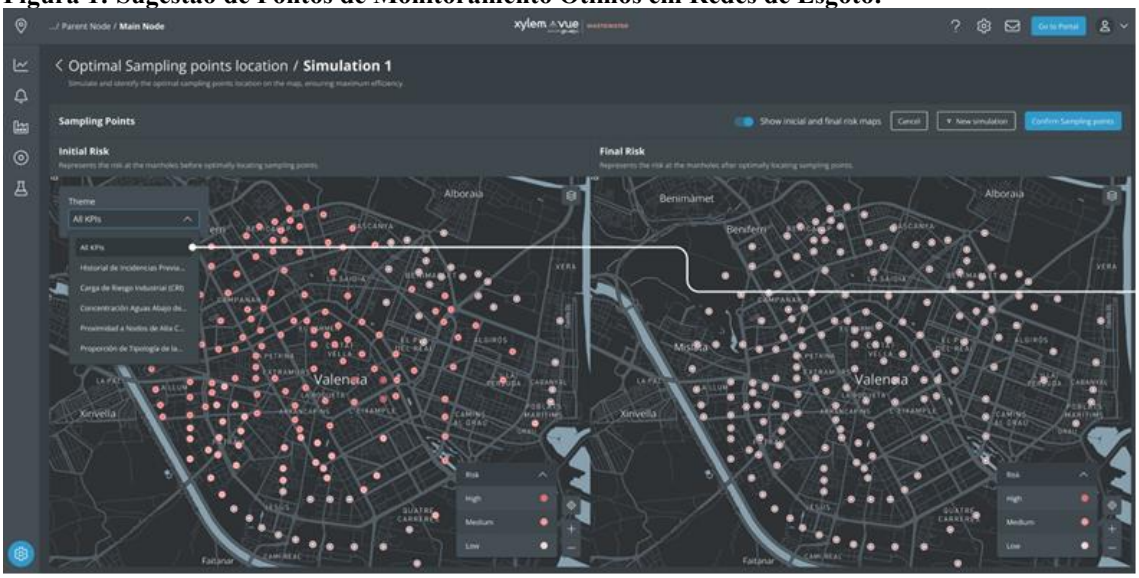
A **ferramenta de controle digital de descartes** inclui uma funcionalidade para identificar de forma otimizada os locais de monitoramento no sistema de esgoto. Ela utiliza uma abordagem de otimização multiobjetivo para determinar os melhores pontos para monitoramento contínuo da qualidade do esgoto equilibrando a ampla cobertura da rede com o foco direcionado em áreas de alto risco.

“O problema de otimização”, derivado de uma função de custo multicritério, “é resolvido por meio de um algoritmo genético” Ehsani, N., Afshar, A.(2010, p.4), que explora eficientemente desafios de solução complexa para encontrar configurações quase ótimas. Esse método permite ao sistema avaliar compensações entre diversos fatores, como níveis de risco, topologia da rede e recursos disponíveis.

O processo começa com um censo industrial e o cálculo de um índice de potencial de poluição baseado em dados de campo e bancos de dados online. O algoritmo analisa o traçado da rede de esgoto e as conexões de descargas industriais para recomendar os N principais locais de monitoramento, onde N é definido pelo usuário.

À medida que os dados de monitoramento são acumulados, a ferramenta incorpora dados históricos de alarmes para refinar a seleção futura de locais. O algoritmo genético adapta dinamicamente as recomendações, aumentando a densidade de monitoramento em áreas com incidentes frequentes e melhorando o rastreamento de descargas não autorizadas a montante. É possível visualizar uma sugestão de Pontos de Monitoramento Ótimos em redes de esgoto, indicados pela plataforma, na figura 1 abaixo.

Figura 1: Sugestão de Pontos de Monitoramento Ótimos em Redes de Esgoto.



Fonte: elaboração própria, imagem da plataforma digital.

Cada local proposto é validado quanto à viabilidade física, incluindo:

- Acessibilidade e segurança (por exemplo, sinal de celular, facilidade de manutenção),
- Adequação hidráulica (por exemplo, estabilidade de fluxo para leituras precisas),
- Condições ambientais (por exemplo, ausência de bloqueios frequentes ou detritos).

O fluxo de trabalho orienta os usuários na definição de parâmetros iniciais, atribuição de pesos aos critérios de seleção e revisão dos resultados simulados em uma interface visual. O sistema evolui com o tempo e os dados, garantindo que a rede de monitoramento permaneça responsiva e alinhada aos riscos emergentes de descargas urbanas.

Algoritmo de Detecção de Anomalias para Descartes e Falhas de Sensores

A **ferramenta de controle digital de descartes** incorpora um algoritmo de detecção de anomalias em tempo real. Esse algoritmo analisa continuamente os dados de qualidade do efluente coletados pelos pontos de monitoramento para identificar padrões e classificá-los em três categorias: comportamento normal, eventos de descarte ou falhas de sensores.

Utilizando dados históricos — geralmente de dois a três meses — o modelo aprende o comportamento esperado de cada local monitorado. Após o treinamento, ele avalia automaticamente os fluxos de dados recebidos e gera alertas quando anomalias são detectadas, notificando os usuários apropriados em tempo real.

A arquitetura do sistema permite melhorias contínuas. O algoritmo é periodicamente retreinado com novos dados históricos acumulados e feedback de usuários especialistas, permitindo que ele refine sua precisão de classificação ao longo do tempo. Essa capacidade de autoaprendizado aumenta a habilidade da ferramenta em detectar eventos de descarga sutis e diferenciá-los de falsos positivos causados por erros de sensores.

Ao automatizar a detecção de anomalias, o algoritmo reduz a necessidade de revisão manual de dados, encurta os tempos de resposta a incidentes e aumenta a confiabilidade geral no monitoramento de descartes e na manutenção de sensores.

Aplicação prática da solução: Plataforma - Estudo de Caso

Se fez a implementação dessa solução em um município com mais de 20.000 habitantes e uma rede de esgotamento sanitário de mais de 50 km. Após uma análise detalhada da rede e da atualização do censo

industrial, foram instaladas estações de monitoramento contínuo da qualidade da água nos pontos mais relevantes da rede de esgotamento. Instrumentos de diferentes fabricantes foram selecionados, pois um dos objetivos secundários deste desenvolvimento era encontrar o pacote de instrumentação e comunicação mais robusto. No entanto, todas as estações de monitoramento tinham características semelhantes, consistindo em sondas multiparamétricas de pH, EC, Redox, temperatura e nível, juntamente com um registrador de dados que enviava leituras via redes móveis 3G/4G.

A Tabela 1 traz os Parâmetros-chaves do algoritmo de detecção de descartes de acordo com sua categoria técnica para melhor compreensão.

Tabela 1 - Parâmetros-chave do algoritmo de detecção de descartes adotados na plataforma digital

Categoria Técnica	Parâmetros / Descrição Técnica
Monitoramento em tempo real	- Variáveis medidas: pH, Condutividade Elétrica (EC), Potencial Redox (ORP), Temperatura, Nível - Frequência de amostragem: a cada 15 minutos - Transmissão: Registradores de dados via redes 3G/4G
Entradas para o algoritmo de detecção de descartes	- Dados de sensores multiparamétricos localizados em pontos críticos da rede de saneamento
Parâmetros de configuração do modelo (XGBoost)	- Limites operacionais personalizados (por cliente ou regulamento) - Parâmetros ajustáveis: learning_rate, max_depth, n_estimators, subamostra, colsample_bytree

Fonte: elaboração própria

Após a instalação de 11 postos de monitoramento, esses foram integrados à **plataforma digital** juntamente com as seguintes fontes de dados: dados censitários industriais, instrumentação e equipamentos de ETES (planta SCADA), resultados laboratoriais analíticos da ETE, dados SIG da rede de esgotamento sanitário, resultados analíticos de amostras laboratoriais coletadas na rede de esgoto, um **aplicativo digital para gerenciamento de ordens de serviço**, serviços meteorológicos.

Após a fase de instalação dos equipamentos e integração da fonte de dados, iniciou-se o ajuste e parametrização **da plataforma**. Isso envolveu a inserção de todas as informações relacionadas ao censo industrial que afetam o projeto, parametrizando pontos de amostragem e pontos com estações de monitoramento contínuo, inserindo regulamentos e limites do cliente que constituem limites para geração de alarmes, inserindo detalhes das ETEs e ajustando parâmetros relacionados ao modelo hidráulico simplificado da rede. Concluído esse trabalho, a ferramenta estava totalmente disponível para uso no dia a dia dos técnicos de controle de descartes.

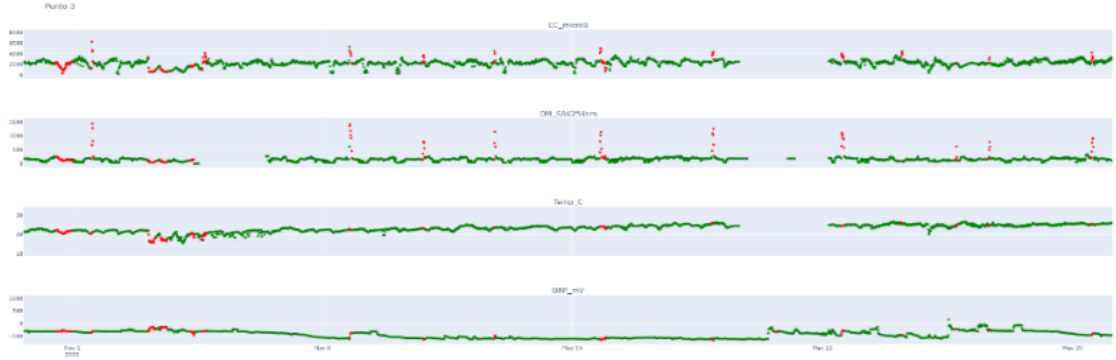
No entanto, neste projeto, o objetivo era ir mais longe, incorporando algoritmos para detecção dos descartes irregulares, permitindo ao sistema detectar anomalias na qualidade dos esgotos que não podiam ser detectadas pelos limites de alarme mencionados anteriormente.

RESULTADOS OBTIDOS

Para ajustar este algoritmo às características das águas residuais deste local, uma vez instaladas as estações da rede de monitoramento, vários especialistas em controle de descartes, juntamente com o gestor das ETES, analisaram as leituras e fizeram cruzamentos com os resultados analíticos da estação. Dessa forma, em um período de 8 meses, mais de 330 eventos (picos) foram rotulados.

Esses eventos podem ser observados na Figura 2 abaixo, onde as leituras de EC, SAK254, temperatura e redox no ponto 3 (afluente à ETE), são combinados em pontos em Vermelho para indicar os eventos de descarte provável, enquanto verde representa eventos não rotulados.

Figura 2: Leituras de maio de 2022 de EC, SAK254, temperatura e redox no ponto 3 (afluente da ETE). Vermelho indica os eventos de descarga rotulados, enquanto verde representa eventos não rotulados.



Fonte: elaboração própria, imagem da plataforma digital.

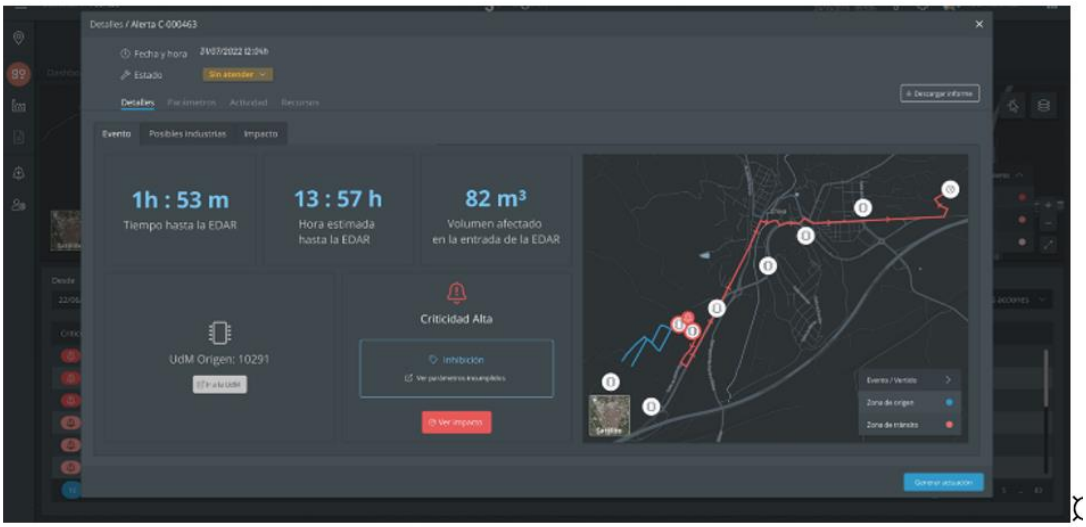
O banco de dados de registros rotulados e não rotulados foi dividido em dois conjuntos de dados, o conjunto de treinamento com 80% dos registros e o conjunto de teste com os 20% restantes. Em última análise, o modelo alcançou uma confiabilidade superior a 80% na detecção de eventos de descarte, o que pode melhorar no futuro, pois **a plataforma** permite que os técnicos confirmem o resultado produzido pelo algoritmo de detecção de descartes. Isso é registrado em um banco de dados e será levado em consideração no próximo treinamento do modelo, permitindo que o modelo se ajuste ao longo do tempo. Entre os inúmeros descartes detectados graças a este modelo, um caso notável foi a identificação de um descarte não autorizado de uma indústria que vinha afetando negativamente o processo da ETE e deteriorando a qualidade do efluente há anos.

Tabela 2 - Resultados-chave do algoritmo de detecção de descartes na plataforma digital

Categoria Técnica	Parâmetros / Descrição Técnica
Desempenho do modelo	- Eventos rotulados: >330 picos em 8 meses - Divisão do conjunto de dados: 80% de treinamento / 20% de teste - Métricas de validação: pontuação F1 = 0,82, AUC = 0,88 - Validação de campo: por técnicos de controle de picos
Recursos de aprendizado contínuo	- Banco de dados dinâmico: armazenamento de confirmações e falsos positivos - Reciclagem periódica: incorporação de novas etiquetas em ciclos sucessivos
Interpretação da figura 1	- Leituras do sensor mostradas com descargas rotuladas por algoritmo marcadas em vermelho e pontos de regime normal em verde

Fonte: elaboração própria

Figura 3: Janela de notificação de alerta dentro da plataforma digital. Mostra um descarte detectado em 31 de julho de 2022, às 12h.



Fonte: elaboração própria, imagem da plataforma digital.

Figuras 4: Janela de notificação de alerta dentro da plataforma digital. A imagem de fundo mostra o evento do descarte.



Fonte: elaboração própria, imagem da plataforma digital.

Nas Figuras 3 e 4, **a plataforma** notifica um novo alerta de descarte, fornecendo uma estimativa do volume descartado, do tempo de trânsito para a ETE e do efeito que esse descarte pode ter na ETE. Na figura seguinte, se vê como, conforme previsto pelo modelo hidráulico, o descarte chega à ETE aproximadamente 2 horas após ser detectado.

Esses alertas permitiram que o gerente da ETE tomasse ações preventivas para reduzir o impacto do descarte. Neste caso, a ETE não possuía um tanque de equalização, de emergência ou piscinão para armazenar e atenuar o descarte. No entanto, o gerente da unidade sabe que, diante de tal descarte, o impacto pode ser reduzido com o aumento de oxigênio dissolvido na primeira parte do reator biológico em conjunto com a redução da aeração na seção final do reator. Tomar essas ações com antecedência permitiu reduzir os efeitos negativos na qualidade do efluente tratado e manteve uma quantidade maior de biomassa saudável.

Figura 5: Esta seção, dentro dos detalhes do alerta da plataforma, permite selecionar as indústrias suspeitas que geram o descarte, filtrar indústrias a montante do ponto de detecção do descarte e ordená-las por meio de um sistema de pontuação proprietário.



Fonte: elaboração própria, imagem da plataforma digital.

Na seção " Possíveis Indústrias " da **ferramenta digital** (Figura 5), o monitoramento das indústrias na bacia hidrográfica da estação estudada, é facilitado por meio de uma lista organizada de indústrias, classificadas de acordo com a criticidade de sua atividade e a frequência com que foram marcadas como suspeitas em eventos passados. Este método permite um controle mais rigoroso sobre as indústrias com maiores suspeitas acumuladas. A detecção periódica de descartes e a subsequente amostragem levaram à identificação e responsabilização da indústria causadora de tais eventos para o cumprimento dos limites estabelecidos.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A implementação **da plataforma** em um município com mais de 20.000 habitantes detectou mais de 330 eventos de descargas em oito meses, com confiabilidade superior a 80% pelos algoritmos e modelagens matemáticas específicas desenvolvidas para este fim; superando métodos tradicionais de monitoramento.

Um benefício chave foi a identificação de indústrias potencialmente contaminadoras, como um caso de descarte não autorizado que impactava a ETE por anos, o que permitiu a responsabilização do causador de tais eventos e consequente a conformidade com normas ambientais. A integração de dados em tempo real, combinada ao modelo hidráulico simplificado, agilizou respostas preventivas, como ajustes no oxigênio dissolvido da ETE, preservando a qualidade do tratado e da biomassa.

“Além disso, essa solução permite que as cidades otimizem a alocação de recursos e as respostas a emergências, reduzindo os danos ambientais e os custos econômicos de longo prazo.” Singh et al. (2024-p.1-2).

CONCLUSÕES

Se demonstra que a integração de tecnologias avançadas na gestão da rede de esgotamento sanitário é essencial para uma gestão eficiente e sustentável da água de modo amplo. A implementação da **plataforma** desenvolvida mostrou uma melhora significativa na deteção e tratamento de descartes industriais não autorizados, levando a uma melhor proteção ambiental e a uma operação mais eficiente da ETE.

A plataforma também otimizou o uso dos dados oriundos de sensores, aumentando a confiabilidade nos dados.

Esses resultados destacam a capacidade da solução de promover gestão proativa, reduzir impactos ambientais e facilitar o controle regulatório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. EHSANI, N., AFSHAR, A. *Optimization of Contaminant Sensor Placement nn Water Distribution Networks; Multi-Objective Approach. Water Distribution System Analysis 2010 – WDSA2010, Tucson, AZ, USA, Sept. 12-15, 2010.* *(PDF) Optimization of Contaminant Sensor Placement in Water Distribution Networks: Multi-Objective Approach*. Último acesso em julho/2025.
2. SINGH, Vipin; LING, Tianheng; CHIABURU, *Teodor et al. Data-driven modeling of combined sewer systems for urban sustainability: an empirical evaluation.* 21 ago. 2024. Data-driven Modeling of Combined Sewer Systems for Urban Sustainability: An Empirical Evaluation, Último acesso em julho/2025.