MONITORAMENTO PREDITIVO DE BOMBAS DE ÁGUA E ESGOTO USANDO ANÁLISE DE ASSINATURA ELÉTRICA OTIMIZADA POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: ESTUDOS DE CASO NA SABESP

Yves Luduvico Coelho[1]
Diretor de Tecnologia da 2Neuron
Gabriel Coimbra Carvalho[2]
Diretor Executivo da 2Neuron
José Carlos Basilio[3]
Engenheiro Eletricista na Sabesp - Dep. de Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual
Floriano Nascimento[4]
Engenheiro de Manutenção na Sabesp

Endereço[1]: Rua Gelu Vervloet dos Santos, 590 - Jardim Camburi - Vitória - ES - CEP: 29090-100 - Brasil - e-mail: yves@2neuron.com

RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação do sistema Ultronline no monitoramento preditivo de bombas em estações elevatórias de água bruta e esgoto bruto da Sabesp, no município de Franca-SP. A solução utiliza a análise de assinatura elétrica otimizada por inteligência artificial e, dessa forma, realiza uma diversidade de diagnósticos de falhas elétricas, mecânicas e hidráulicas. Entre novembro de 2024 e junho de 2025, foram detectadas diversas anomalias, incluindo cavitação, excentricidade de rotor, desbalanceamento de corrente, sobrecarga elétrica, obstruções hidráulicas e degradação de isolamento. Três estudos de caso ilustram a eficácia do sistema na detecção precoce de falhas, permitindo que a equipe técnica tomasse decisões mais precisas. Os resultados demonstram como o monitoramento preditivo contínuo contribui para o aumento da confiabilidade e eficiência operacional, alinhando-se às exigências do Novo Marco Legal do Saneamento.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Assinatura Elétrica, Inteligência Artificial, Manutenção Preditiva.

INTRODUÇÃO

O saneamento básico é um conjunto de serviços essenciais que inclui o fornecimento de água potável, a coleta e o tratamento de esgoto, a gestão de resíduos sólidos e o manejo adequado das águas pluviais (ANA, 2025). Esses serviços são fundamentais não apenas para a proteção ambiental, mas também para a prevenção de doenças e a promoção da saúde pública, sendo diretamente relacionados à qualidade de vida da população (INSTITUTO TRATA BRASIL; KPMG, 2025).

As estações elevatórias de água bruta (EEAB) são instalações responsáveis por bombear a água captada em mananciais naturais (rios, lagos, represas ou poços) até as unidades de tratamento ou para reservatórios intermediários em sistemas de abastecimento público. Elas são utilizadas quando a diferença de altitude ou a distância entre o ponto de captação e o destino da água não permite o escoamento por gravidade.

No contexto do esgotamento sanitário, destaca-se a importância de um sistema eficiente e contínuo para a coleta, o transporte e o tratamento dos efluentes gerados diariamente por domicílios, indústrias e comércios. Esse sistema é composto por redes coletoras, estações elevatórias de esgoto (EEE) e estações de tratamento de esgoto (ETE), que operam de forma integrada para garantir que o esgoto seja devidamente tratado antes de seu retorno ao meio ambiente (CODEVASF, 2025).

As estações elevatórias de esgoto bruto (EEEB), em particular, desempenham um papel estratégico na movimentação dos efluentes, principalmente em regiões cuja topografia impede o escoamento por gravidade. Esses sistemas, formados por poços e bombas submersas, transportam o esgoto de áreas mais baixas para pontos mais elevados até sua chegada à ETE (CODEVASF, 2025). Contudo, o funcionamento contínuo e eficiente dessas estruturas depende de uma operação cuidadosa e de ações de manutenção bem planejadas.

Problemas como obstruções causadas por resíduos sólidos, falhas mecânicas nas bombas e intervenções corretivas emergenciais comprometem não só a eficiência do sistema, mas também geram riscos ambientais, aumentam os custos operacionais e impactam diretamente a população atendida (BRK AMBIENTAL, 2025). Diante disso, soluções tecnológicas voltadas à manutenção preditiva e ao monitoramento inteligente das estações elevatórias tornam-se cada vez mais relevantes para o setor de saneamento.

Este artigo apresenta dois estudos de caso da aplicação de um sistema de monitoramento preditivo on-line de bombas de água e esgoto na Sabesp. O trabalho descreve a solução inovadora adotada pela empresa, a metodologia de diagnóstico de falhas em bombas, e os resultados obtidos com a tecnologia.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar estudos de caso da aplicação de um sistema de monitoramento preditivo on-line de bombas de água e esgoto baseado em análise de assinatura elétrica (ESA, do inglês *Electrical Signature Analysis*) otimizada por inteligência artificial (IA) na Sabesp, na cidade de Franca, São Paulo.

JUSTIFICATIVA

A operação segura e contínua das bombas de esgoto das elevatórias de água ou esgoto bruto depende de um sistema de manutenção eficiente. Em muitos casos, a limpeza da estação e a retirada de sólidos acumulados fazem parte da manutenção preventiva, enquanto falhas mais graves exigem a remoção das bombas para reparo ou substituição, caracterizando uma manutenção corretiva, frequentemente mais demorada e custosa (BRK AMBIENTAL, 2025).

Adicionalmente, há problemas técnicos intrínsecos às bombas, como a cavitação, fenômeno causado pela formação e colapso de bolhas de vapor no interior da bomba, geralmente associado a baixa pressão na sucção. A cavitação provoca danos às superfícies metálicas, perda de desempenho e redução da vida útil do equipamento, sendo uma das falhas mais críticas em sistemas de bombeamento de esgoto.

Neste cenário, o Novo Marco Legal do Saneamento impõe metas ambiciosas: até 31 de dezembro de 2033, 99% da população brasileira deve ter acesso à água potável, e 90% à coleta e tratamento de esgoto. Para alcançar esses objetivos, os contratos de prestação de serviços deverão seguir diretrizes que priorizam a universalização do acesso, a eficiência operacional, e a expansão dos investimentos (BRASIL, 2025). Esse novo ambiente regulatório estimula a participação do setor privado e promove uma mudança significativa na dinâmica do setor, exigindo eficiência operacional, redução de perdas e maior confiabilidade dos ativos.

Nesse contexto competitivo e orientado por metas, torna-se imprescindível o investimento em tecnologias de monitoramento preditivo, capazes de antecipar falhas e otimizar a manutenção, substituindo abordagens reativas e preventivas por estratégias baseadas em dados. Investir em manutenção preditiva inteligente contribui para aumentar a disponibilidade das estações elevatórias, reduzir custos operacionais e atender às exigências regulatórias e à sustentabilidade econômica do setor.

MANUTENÇÃO PREDITIVA NO SANEAMENTO

Dentre as estratégias de manutenção de bombas de água e esgoto, a preditiva destaca-se por ir além da manutenção corretiva, realizada após falhas já ocorridas, e da manutenção preventiva, executada com base em intervalos pré-estabelecidos. Na era da Indústria 4.0, a manutenção preditiva utiliza grandes volumes de dados históricos e em tempo real para detectar antecipadamente comportamentos anômalos em equipamentos. Essa abordagem prevê o estado futuro dos ativos industriais, permitindo a elaboração de planos pró-ativos de manutenção, capazes de mitigar ou eliminar as falhas previstas (HRIBERNIK et al., 2018; BOUSDEKIS et al., 2019).

Entre as principais técnicas utilizadas na manutenção preditiva estão a análise de vibração e temperatura, e a análise de assinatura elétrica (ESA, do inglês *Electrical Signature Analysis*). A primeira é uma técnica madura, aplicada há mais de 80 anos para monitorar condições operacionais das máquinas. Tradicionalmente, analisa-se o espectro de frequência de vibração utilizando processamento de sinais de acelerômetros para identificar frequências características de falhas mecânicas específicas. Já a ESA utiliza exclusivamente sinais de corrente e tensão elétrica do acionamento do motor para identificar assinaturas específicas nos sinais elétricos geradas por defeitos elétricos ou mecânicos (BALAKRISHNA; KHAN, 2021).

Com o avanço proporcionado pela indústria 4.0, pela Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) e pela IA, o monitoramento com sensores de vibração e temperatura evoluiu para sistemas em tempo real e sem fio. Entretanto, essa abordagem ainda apresenta uma série de limitações relevantes: exige a utilização de múltiplos sensores distribuídos ao longo do motor e do conjunto mecânico acionado, requer acesso físico direto aos equipamentos para instalação, está sujeita às condições adversas do ambiente industrial, como poeira, vibrações e temperaturas extremas, além de não ser aplicável em diversos tipos de ativos, como bombas submersíveis. Além disso, a instalação desses sensores costuma ser complexa e, em alguns casos, pode interferir no funcionamento correto dos próprios sensores.

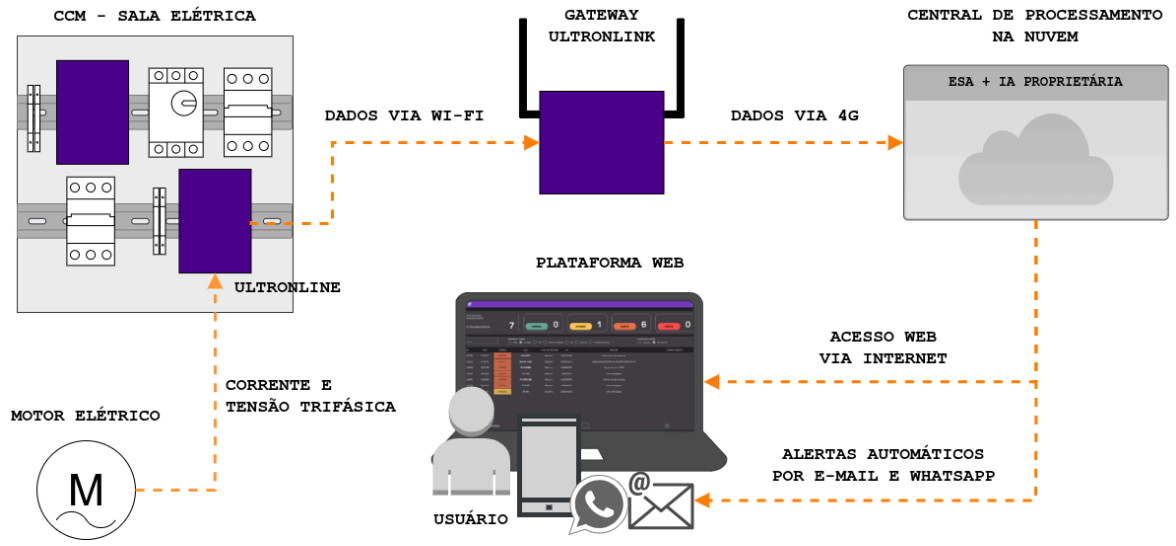
Por outro lado, o monitoramento on-line em tempo real por meio da ESA possibilita o diagnóstico automático de falhas mecânicas e elétricas a partir do acionamento do motor elétrico, ou seja, desde o painel elétrico. Isso simplifica significativamente a instalação e amplia o leque de aplicações possíveis, incluindo equipamentos situados em ambientes críticos, sujeitos a altas vibrações e temperaturas extremas, áreas classificadas e até bombas submersíveis.

ARQUITETURA DO SISTEMA

O sistema de manutenção preditiva escolhido para monitorar as bombas de esgoto foi o Ultronline, da empresa 2Neuron, baseado na técnica de ESA otimizada pela IA proprietária da empresa. A Figura 1 mostra a arquitetura completa do sistema Ultronline. O módulo coletor de dados é instalado no painel elétrico e coleta dados de corrente e tensão elétrica trifásica do motor elétrico, sem necessidade de instalar qualquer sensor nos equipamentos, garantindo maior segurança e praticidade em relação a outros tipos de sensoriamento.

Os sinais de corrente elétrica são adquiridos por meio de transformadores de corrente (TCs) com núcleo bipartido, que permitem instalação simples e segura, abrindo-se para envolver o cabo de alimentação sem a necessidade de desconexões. Já os sinais de tensão são capturados diretamente pelo módulo Ultronline, sendo previamente protegidos por um disjuntor tripolar antes da conexão ao sistema. Após a aquisição, os dados são transmitidos ao gateway Ultronlink, também desenvolvido e fornecido pela 2Neuron.

Figura 1 - Arquitetura do sistema Ultronline



Fonte: Elaborado pelos autores com uso do software draw.io, 2025

O gateway Ultronlink atua como concentrador e ponto de comunicação dos módulos Ultronline instalados na sala elétrica. Ele é responsável por estabelecer uma rede Wi-Fi local que conecta os diversos coletores de dados, garantindo a transferência contínua das medições. Ao receber os dados de cada módulo, o gateway executa rotinas de pré-processamento e cálculos iniciais. As informações processadas são armazenadas localmente e, a cada 10 minutos, são enviadas para a nuvem via comunicação celular 4G para análises avançadas por algoritmos de inteligência artificial.

METODOLOGIA

Os estudos de caso apresentados neste artigo foram realizados a partir da aplicação do sistema Ultronline em diversas bombas de água e esgoto bruto da Sabesp, na cidade de Franca-SP, com foco em máquinas específicas selecionadas para análise detalhada. A metodologia abrange todas as etapas do processo, desde a instalação dos módulos de monitoramento até o processamento automatizado dos dados e a emissão de diagnósticos em tempo real, permitindo à equipe de manutenção atuar de forma proativa com base na condição dos ativos.

- **Instalação dos módulos e dos gateways**: os módulos Ultronline foram instalados diretamente nos painéis elétricos de acionamento das bombas, utilizando TCs com núcleo bipartido para facilitar a instalação sem necessidade de interrupção do funcionamento dos equipamentos. A medição de tensão é feita por meio de conexão trifásica protegida por disjuntores, assegurando a integridade elétrica da instalação. Todas as medições são feitas sem necessidade de contato direto com a máquina monitorada, o que viabiliza o uso da tecnologia em ambientes hostis e equipamentos de difícil acesso.

  Cada módulo Ultronline atua como uma unidade de aquisição de dados, sendo conectado ao gateway Ultronlink via rede Wi-Fi local. O gateway, por sua vez, concentra os dados de todos os módulos da sala elétrica, realiza cálculos adicionais e armazena temporariamente os dados, que são transmitidos para a nuvem a cada 10 minutos para análises mais avançadas.

- **Monitoramento e diagnóstico em tempo real:** o sistema realiza o monitoramento contínuo da condição das máquinas, com análise dos sinais elétricos de corrente e tensão. O processamento de dados é dividido em etapas. Inicialmente, são aplicados filtros específicos para atenuação de ruído e de artefatos. Em seguida, os sinais são submetidos a transformações matemáticas e estatísticas, incluindo análise espectral no domínio da frequência.

  São extraídos diversos atributos relacionados a parâmetros elétricos e mecânicos, como harmônicos de corrente e tensão, torque, amplitude e tendência de frequências características associadas a falhas em componentes como rolamentos, redutores e acoplamentos etc. Esses atributos alimentam algoritmos de inteligência artificial desenvolvidos pela 2Neuron, que avaliam desvios em relação ao comportamento normal da máquina, com base em modelos supervisionados e não supervisionados, capazes de identificar anomalias mesmo em estágios iniciais.

  O ruído espectral, citado anteriormente, é um indicador proprietário da solução Ultronline, desenvolvido para sintetizar, em uma única variável de tendência, a presença e a intensidade de componentes anômalos no espectro de frequência da corrente elétrica. Esse indicador é calculado após a aplicação de rotinas de pré-processamento e filtragem específicas, permitindo uma avaliação sensível e confiável de alterações no comportamento eletromecânico do motor e de todo o conjunto mecânico acionado.

- **Comunicação de alertas e atuação proativa do cliente:** Os diagnósticos gerados pelo Ultronline são apresentados de forma automatizada em uma plataforma web acessível à equipe de manutenção, e alertas são enviados por e-mail e por Whatsapp indicando a descrição e a criticidade das anomalias detectadas. Nos estudos de caso apresentados, o sistema realizou diferentes diagnósticos e a comunicação dos alertas foi fundamental para prevenir danos nas máquinas.

ESTUDOS DE CASO

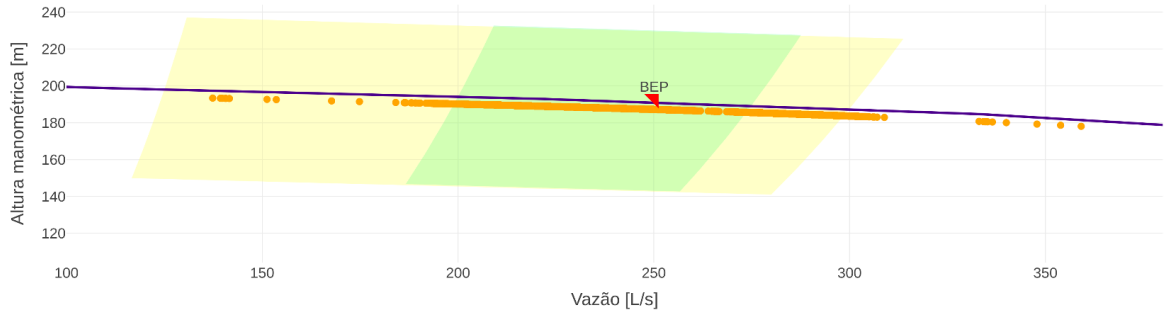
Desde novembro de 2024 até o presente momento (junho de 2025), o sistema Ultronline foi responsável por monitorar de forma contínua bombas de água e esgoto em diferentes unidades EEAB e EEEB da Sabesp, em Franca-SP, identificando uma série de falhas incipientes e condições adversas de operação. Os dados coletados e o diagnóstico por IA revelaram falhas elétricas, mecânicas e hidráulicas, como desbalanceamento de corrente, excentricidade do rotor, aumento de vibração, cavitação, sobrecarga elétrica, além de indícios de obstrução e degradação de isolamento em motores. Esses eventos refletem a importância de um acompanhamento preditivo sistemático para garantir a confiabilidade e a continuidade do serviço.

PRIMEIRO ESTUDO DE CASO - CAVITAÇÃO

O sistema Ultronline reconstrói, de forma automática, a curva de desempenho hidráulico da bomba com base nos sinais elétricos coletados do motor, na velocidade de rotação da bomba, e em leis fundamentais da mecânica dos fluidos. A partir desses dados, é possível estimar grandezas como potência mecânica, vazão e altura manométrica, e dessa forma, torna-se possível avaliar a saúde operacional da bomba em tempo real.

A Figura 2 ilustra a curva de desempenho gerada pelo Ultronline, e os pontos de operação (pontos na cor de laranja) de uma bomba monitorada pelo sistema em boas condições. Ainda que alguns pontos estão fora da faixa ideal, a maior parte da operação ocorreu próximo ao ponto de máxima eficiência (BEP, do inglês *Best Efficiency Point*) da bomba, de acordo com o fabricante. A faixa verde indica uma região de trabalho preferencial (entre 80% e 110% da vazão no BEP), enquanto a faixa amarela indica uma região de operação máxima aceitável (entre 50% e 120% da vazão no BEP).

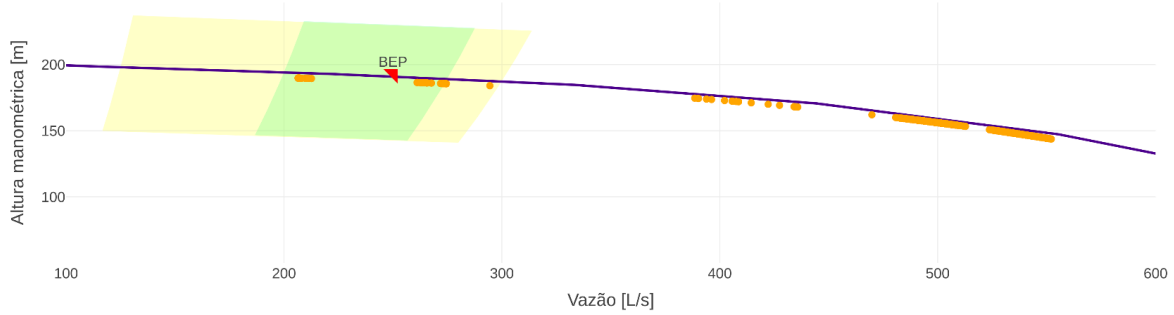
Figura 2 - Curva de desempenho de uma bomba em boas condições



Fonte: Elaborado pelos autores com uso de Python (biblioteca Plotly), 2025

Durante o mês de dezembro de 2024, uma bomba centrífuga bipartida horizontal de 1700 cv de uma EEAB da Sabesp começou a apresentar múltiplos episódios de operação fora da faixa ideal na curva de desempenho, como mostra a Figura 3, com fortes indícios de cavitação. O Ultronline identificou que o ponto de operação frequentemente se deslocava para regiões da curva onde a pressão na sucção era insuficiente, favorecendo a formação de bolhas de vapor.

Figura 3 - Curva de desempenho de uma bomba operando em cavitação



Fonte: Elaborado pelos autores com uso de Python (biblioteca Plotly), 2025

Com os alertas preditivos gerados, a equipe de manutenção da Sabesp pôde atuar proativamente, evitando danos às pás da bomba e interrupções prolongadas no bombeamento. Este caso demonstra como a reconstrução da curva de desempenho baseada em dados elétricos permite diagnósticos antecipados e precisos, contribuindo para uma gestão mais eficiente e segura das estações elevatórias.

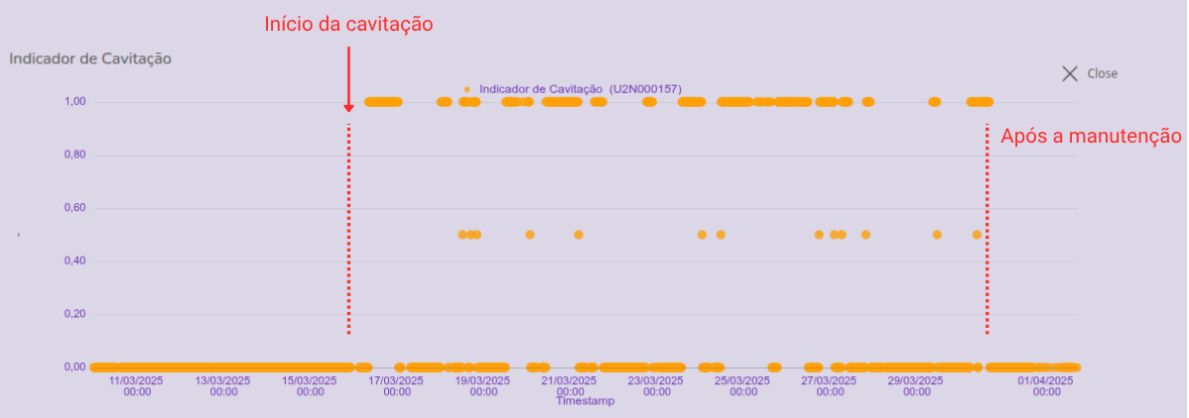
SEGUNDO ESTUDO DE CASO - CAVITAÇÃO

Nesta mesma EEAB, uma outra bomba de 1700 cv apresentou um episódio de cavitação prolongada, detectada por um indicador específico desenvolvido pela 2Neuron com o objetivo de tornar a visualização mais intuitiva e acessível às equipes de operação e manutenção. Esse indicador proprietário da 2Neuron, baseado na ESA

otimizada pela IA e em modelos de comportamento hidráulico, apontou que a bomba entrou em regime de cavitação no dia 16 de março de 2025 e permaneceu nessa condição crítica até o final do mês de março, como mostra a Figura 4, quando foi possível realizar a manutenção programada. O valor 0 no indicador representa uma condição de operação normal, enquanto o valor 1 sinaliza que a bomba está operando em cavitação. O valor 0,5 indica que o ponto de operação está próximo da zona de cavitação, exigindo atenção.

Durante a inspeção, constatou-se que o impelidor estava erodido (Figura 5), resultado direto da operação em cavitação e agravado pela recirculação de areia no interior do equipamento. Após o reparo, o indicador de cavitação confirmou que a condição anormal havia cessado, com a bomba operando novamente dentro da faixa hidráulica ideal. Esse caso reforça o valor de indicadores preditivos capazes de guiar intervenções no momento certo e evitar danos estruturais severos.

Figura 4 - Gráfico do indicador de cavitação da bomba



Fonte: Elaborado pelos autores com uso de Python (biblioteca Plotly), 2025

Figura 5 - Fotos do impelidor da bomba danificado



Fonte: Acervo dos autores, 2025

TERCEIRO ESTUDO DE CASO - EXCENTRICIDADE DO ROTOR

Em uma das EEAB monitoradas, o sistema Ultronline identificou um comportamento anômalo progressivo compatível com excentricidade de rotor em uma bomba centrífuga de 1350 cv. A excentricidade ocorre quando o centro de rotação do rotor não coincide com o eixo geométrico do estator, o que pode ser resultado de desgaste mecânico de elementos girantes, desalinhamento ou desbalanceamento.

O indicador específico de excentricidade do Ultronline apresentava tendência de decrescimento contínuo ao longo de vários dias, sinalizando uma deterioração do alinhamento da bomba. Paralelamente, o sistema também detectou um crescimento na amplitude de frequências anômalas no espectro elétrico compatíveis com

aumento da vibração da bomba. Essas frequências, que inicialmente estavam em baixos níveis, mostraram tendência clara de crescimento, reforçando o diagnóstico de falha em desenvolvimento.

Apesar dos alertas preditivos emitidos pelo sistema, por razões operacionais a bomba não pôde ser desligada para manutenção, sendo mantida em operação por necessidade de continuidade no escoamento. Como consequência, cerca de 20 dias após o início da detecção dos sintomas, houve a quebra completa do rotor, provocando a parada abrupta da bomba e a necessidade de substituição do rotor.

O Ultronline cumpriu seu papel de identificar e acompanhar a evolução do problema com antecedência, fornecendo dados técnicos para apoiar a tomada de decisão. No entanto, a restrição operacional impediu a intervenção proativa, o que resultou em uma falha importante.

CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentada a aplicação do sistema Ultronline no monitoramento preditivo de bombas em estações elevatórias de água bruta (EEAB) e esgoto bruto (EEEB) operadas pela Sabesp na cidade de Franca-SP. O objetivo foi demonstrar, por meio de estudos de caso reais, como a ESA otimizada pela IA proprietária da 2Neuron pode antecipar falhas mecânicas, elétricas e hidráulicas, permitindo uma gestão mais eficiente dos ativos críticos do sistema de saneamento.

Os casos apresentados demonstram, na prática, a capacidade do sistema Ultronline como uma ferramenta estratégica de manutenção preditiva para sistemas de bombeamento em estações elevatórias de água e esgoto. Por meio da análise contínua de sinais elétricos e do uso de modelos baseados em IA, o sistema foi capaz de diagnosticar precocemente falhas críticas como cavitação, excentricidade de rotor, sobrecarga e desbalanceamentos elétricos, muitas vezes com dias ou semanas de antecedência. Além disso, os indicadores desenvolvidos pela 2Neuron contribuíram para uma interpretação mais direta dos dados por parte das equipes operacionais, facilitando a tomada de decisão.

A experiência com a Sabesp mostra que a adoção de soluções preditivas inteligentes pode não apenas evitar falhas catastróficas e reduzir custos operacionais, mas também aumentar a confiabilidade do sistema de saneamento, um aspecto cada vez mais estratégico diante das exigências do Novo Marco Legal do Saneamento. O monitoramento não intrusivo e em tempo real, aliado a alertas técnicos precisos, posiciona o Ultronline como uma tecnologia-chave para as operadoras que buscam eficiência, sustentabilidade e continuidade operacional em seus ativos críticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Panorama do Saneamento no Brasil. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/saneamento-basico/saneamento-basico-no-brasil/panorama-do-saneamento-no-brasil-1. Acesso em: 2 jun. 2025.

2. BALAKRISHNA, P.; KHAN, U. An autonomous electrical signature analysis-based method for faults monitoring in industrial motors. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 70, p. 1–9, 2021.

3. BOUSDEKIS, A. et al. A RAMI 4.0 view of predictive maintenance: software architecture, platform and case study in steel industry. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INFORMATION SYSTEMS ENGINEERING, 2019, Cham. Proceedings [...]. Cham: Springer, p. 95–106.

4. BRASIL. Ministério das Cidades. Marco Legal do Saneamento. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/assuntos/saneamento/marco-legal-do-saneamento. Acesso em: 02 jun. 2025.

5. BRK AMBIENTAL. Conheça a estação elevatória de esgoto e como ela funciona. Disponível em: https://blog.brkambiental.com.br/estacao-elevatoria-de-esgoto/. Acesso em: 2 jun. 2025

6. COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA (CODEVASF). Manual de Comunicação e Organização Social: Esgotamento Sanitário. Brasília:

Codevasf, 2015. Disponível em: https://www.codevasf.gov.br/acesso-a-informacao/institucional/biblioteca-geraldo-rocha/publicacoes/manuais/manual-de-comunicacao-e-organizacao-social-esgotamento-sanitario.pdf. Acesso em: 2 jun. 2025.

7. HRIBERNIK, K. et al. Towards a unified predictive maintenance system: a use case in production logistics in aeronautics. Procedia Manufacturing, v. 16, p. 131–138, 2018.

8. INSTITUTO TRATA BRASIL; KPMG. ESG e Tendências no Setor de Saneamento do Brasil. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2023. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/esg-e-tendencias-no-setor-de-saneamento-do-brasil/. Acesso em: 2 jun. 2025