

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL · UFC · 28 DE JUNHO DE 2026

Hybrid computational fluid dynamics model for dissolved oxygen field prediction in a full-scale wastewater aeration basin

Por Petri Ukkonen, Michela Mulas e Anna Mikola

Fonte: OpenAlex · UFC · [Publicação original](#)

INOVAÇÃO	APLICABILIDADE	POTENCIAL ECONÔMICO	MATURIDADE
8/10	9/10	9/10	Média

Desenvolvimento de um modelo híbrido (CFD + Deep Learning) para previsão em tempo real de oxigênio dissolvido em tanques de aeração de estações de tratamento de esgoto. A tecnologia reduz o tempo de simulação de 30 minutos para milissegundos, permitindo controle operacional ativo e significativa economia de energia.

NÚCLEO DA ANÁLISE

Ideia de startup ou produto

DeepAqua - SaaS para Otimização Energética de ETEs. Solução B2B que integra o modelo surrogado ao SCADA existente das estações para ajustar automaticamente a aeração baseada na previsão espacial de oxigênio, garantindo conformidade regulatória com menor gasto de energia.

Aplicações práticas

Controle automatizado e preditivo de sopradores de ar em ETEs, validação virtual de sensores, criação de gêmeos digitais para plantas de tratamento, e otimização energética em tempo real na indústria de saneamento.

Potencial de mercado

Alto. O setor de saneamento básico no Brasil e no mundo está sob pressão para modernização (Indústria 4.0) e redução de custos. Soluções de 'Smart Water' que reduzem o consumo de energia têm demanda imediata de grandes operadoras, como a Cagece no Ceará.

FUNDAMENTO CIENTÍFICO

Problema abordado

A ineficiência energética no processo de aeração de ETEs (que pode representar até 70% do custo energético) e a limitação de modelos de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) tradicionais, que são computacionalmente custosos demais para uso em tempo real ou controle de processo.

Metodologia

Construção de um modelo CFD bifásico (água-ar) no COMSOL Multiphysics para uma bacia real de 12,6m de profundidade. Treinamento de uma Rede Neural Profunda (DNN) como modelo substituto (surrogate) utilizando dados gerados pelo CFD e otimização de hiperparâmetros bayesiana. Validação contra dados reais de campo.

Principais descobertas

Aceleração de aproximadamente 27.900x no tempo de previsão (de 1.856s para 61-67ms). Erro médio absoluto (MAE) entre 0,11 e 0,40 mg/L. O modelo demonstra alta precisão e viabilidade para operação em tempo real, suportando o monitoramento espacial e controle de aeração.

LEITURA PARA GESTÃO PÚBLICA

Implementação em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) municipais e estaduais no Ceará para redução de custos operacionais e cumprimento de metas de eficiência energética e sustentabilidade (descarbonização) no saneamento básico.

PARCERIA UNIVERSIDADE × EMPRESA

Parceria tecnológica entre a UFC (detentora do know-how do modelo), empresas de automação industrial (para hardware/integração) e companhias de saneamento (Cagece) para validação em escala real e desenvolvimento de produtos comerciais.

OPORTUNIDADES DERIVADAS

4 direções estratégicas identificadas

STARTUP · IMPACTO ALTO · INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

DeepAqua Smart Aeration

Spin-off para comercializar software de controle preditivo baseado no modelo híbrido, focado em redução de contas de luz em ETEs.

POLÍTICA PÚBLICA · IMPACTO ALTO · GOVTECH

Programa de Eficiência Energética no Saneamento

Uso da tecnologia em ETEs públicas do Ceará para reduzir custos operacionais e liberar verbas para expansão da rede.

Módulo de Digital Twin para Saneamento

Incorporação do algoritmo surrogado em sistemas de SCADA industriais para grandes players de engenharia e automação.

Núcleo de Inovação UFC-Indústria Água 4.0

Cooperação técnico-científica para evoluir o modelo com Big Data de operações reais e transferir tecnologia.

ABSTRACT ORIGINAL

ABSTRACT Graphical abstract showing that calibrated CFD of a full-scale 12.6 m aeration basin was converted into a deep-learning surrogate, reducing dissolved-oxygen prediction time from 1,856 s to 61–67 ms with 0.11–0.40 mg/L error. This study aimed to develop a fast surrogate model for spatial dissolved oxygen prediction in a deep, full-scale activated sludge aeration basin and to evaluate its suitability for operational use. A two-phase water-air computational fluid dynamics model was built in COMSOL Multiphysics 6.3 for a basin with a water depth of 12.6 m using a realizable k-epsilon turbulence model. A computational fluid dynamics-informed deep neural network was then trained on computational fluid dynamics-generated datasets using Bayesian hyperparameter optimization. Model performance was evaluated against measured dissolved oxygen data from two independent 24-hour field campaigns. Bootstrap analysis yielded 95% confidence intervals of 0.11–0.40 mg/L for the MAE and 6.0–17.7% for the normalized root mean square error. The surrogate reduced evaluation time from 1,856 seconds to 61–67 milliseconds, corresponding to an average speed-up of about 27,900-fold. These results indicate that the framework can provide real-time spatial dissolved oxygen estimates and show strong potential for plant-specific monitoring and aeration control support.

MATÉRIA PARA LEIGOS

Para leigos: IA torna previsão de oxigênio em estações de tratamento quase 30 mil vezes mais rápida

O cenário atual

O tratamento de esgoto depende de tanques de aeração, onde o oxigênio é misturado à água para ajudar as bactérias a removerem poluentes. Em tanques profundos de escala real, como o de 12,6 metros estudado, prever como o oxigênio se espalha é complexo. Geralmente, usa-se simulação computacional (física de fluidos), mas esse método é demorado, levando cerca de 31 minutos (1.856 segundos) para fazer uma previsão. Essa lentidão dificulta o controle em tempo real da operação.

O que os pesquisadores fizeram

Os pesquisadores da UFC desenvolveram um modelo híbrido para resolver esse problema de velocidade. Eles criaram um "substituto" (surrogate) inteligente combinando a simulação física tradicional com Inteligência Artificial. O objetivo foi treinar uma rede neural profunda para prever os níveis de oxigênio dissolvido no tanque, mantendo a precisão da física, mas com a velocidade da IA.

Como funciona na prática

Primeiro, foi construído um modelo detalhado de duas fases (água e ar) usando simulação computacional (CFD) no software COMSOL. Esse modelo gerou um conjunto de dados ensinando à IA como o fluido se comporta. Em seguida, uma rede neural profunda foi treinada com esses dados, usando otimização de parâmetros para refinar o aprendizado. O resultado é um sistema que estima a distribuição espacial de oxigênio sem precisar recalcular toda a física complexa a cada vez.

Resultados e evidência

A abordagem foi testada contra dados reais coletados em duas campanhas de campo de 24 horas. O modelo híbrido mostrou um erro médio absoluto (MAE) entre 0,11 e 0,40 mg/L. O destaque foi a performance: o tempo de previsão caiu de 1.856 segundos para apenas 61 a 67 milissegundos. Isso representa um aumento de velocidade médio de cerca de 27.900 vezes.

Implicações práticas

Com essa velocidade, é possível ter estimativas espaciais de oxigênio em tempo real. A tecnologia tem forte potencial para ser usada no monitoramento específico de estações de tratamento e para apoiar o controle da aeração. Isso pode ajudar os operadores a ajustarem o sistema de forma muito mais rápida e eficiente.

Limitações e próximos passos

O estudo focou na validação do modelo para uso operacional em um tanque específico. O paper não detalha outras limitações técnicas ou cenários onde o modelo possa falhar. Os próximos passos sugeridos pelos resultados são a aplicação prática desse framework para auxiliar no controle diário das plantas de tratamento.

QUEM SÃO OS PESQUISADORES

Quem são os pesquisadores

O estudo foi conduzido por Petri Ukkonen, Michela Mulas e Anna Mikola, pesquisadores vinculados à Universidade Federal do Ceará (UFC). O paper não detalha a formação acadêmica específica, trajetória profissional, prêmios ou papéis individuais (se líder ou assistente) de cada autor na pesquisa. Limita-se a informá-los como os responsáveis pelo desenvolvimento do modelo híbrido e pela análise dos resultados apresentados.

PALAVRAS-CHAVE

Aeration · Computational fluid dynamics · Multiphysics · Artificial neural network · Wastewater · Structural basin · Current (fluid)