

Estimativa fuzzy da geração de metano em um reator UASB submetido a diferentes carregamentos de água residuária da indústria frigorífica

Por Allan Bruno Dantas Gonçalves, Maria Gorethe de Sousa Lima Brito, Flávio César Brito Nunes, Antonio Alex Matias Lêu, Dayane de Andrade Lima e Fernando José Araújo da Silva

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

INOVAÇÃO	APLICABILIDADE	POTENCIAL ECONÔMICO	MATURIDADE
6/10	9/10	8/10	Média

O estudo apresenta uma abordagem metodológica que integra a lógica Fuzzy (aritmética triangular) a modelos estequiométricos para estimar a produção de metano em reatores UASB tratando efluentes frigoríficos. A técnica demonstrou alta precisão (erros entre -1% e 9%) ao incorporar a incerteza e variabilidade dos dados operacionais, validando-se como uma ferramenta superior aos modelos deterministas tradicionais para previsão de biogás em condições reais.

NÚCLEO DA ANÁLISE

Ideia de startup ou produto

Desenvolvimento de uma SaaS de 'Digital Twin para Biogás' focada em frigoríficos de pequeno e médio porte, utilizando algoritmos fuzzy para prever a produção de energia a partir de resíduos, otimizando a operação de reatores e viabilizando a comercialização de créditos de carbono.

Aplicações práticas

Implementação de 'soft sensors' para previsão em tempo real de geração de biogás em Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) industriais; otimização do aproveitamento energético do metano gerado; e automação do controle de carga orgânica em reatores anaeróbios.

Potencial de mercado

Alto potencial, especialmente no setor de frigoríficos e agroindústria, que buscam conformidade ambiental e eficiência energética. A capacidade de converter resíduos em energia (biogás) com previsibilidade financeira é um diferencial competitivo crucial em mercados regulados.

FUNDAMENTO CIENTÍFICO

Problema abordado

A imprecisão dos modelos matemáticos deterministas na estimativa de produção de metano, causada pela variabilidade qualitativa e quantitativa dos dados de monitoramento (vazão, temperatura, DQO) em reatores anaeróbios, o que dificulta a previsão eficiente de geração de energia e controle de processos.

Metodologia

Aplicação de números fuzzy triangulares às variáveis de entrada (vazão, temperatura, DQO de entrada/saída) de um modelo estequiométrico. O estudo utilizou dados de um reator UASB operando com cargas orgânicas de 6,6 e 8,5 kg DQO/m³.d, comparando a produção teórica fuzzy com dados experimentais reais para validar a aderência do modelo.

Principais descobertas

A modelagem fuzzy apresentou excelente aderência aos dados experimentais, superando modelos rígidos. O reator manteve estabilidade com eficiências de remoção de DQO entre 75% e 76%. A abordagem provou ser eficaz para gerenciar incertezas inerentes aos processos biológicos de tratamento de efluentes.

LEITURA PARA GESTÃO PÚBLICA

Adoção da metodologia como requisito técnico em licenciamentos ambientais para novos frigoríficos, permitindo estimativas mais realistas de pega de carbono e potencial de geração de energia renovável, além de subsidiar políticas de incentivo à bioeconomia no estado.

PARCERIA UNIVERSIDADE × EMPRESA

Parceria entre o IFCE e grandes empresas de saneamento ou frigoríficos (ex: JBS, Marfrig) para integrar este algoritmo aos sistemas SCADA existentes, transformando dados brutos de operação em previsões financeiras e ambientais confiáveis.

OPORTUNIDADES DERIVADAS

3 direções estratégicas identificadas

PRODUTO CORPORATIVO · IMPACTO ALTO · INDÚSTRIA 4.0

Sistema de Previsão de Biogás Industrial

Solução corporativa para monitoramento e previsão de rendimento energético de reatores UASB na indústria de alimentos, utilizando lógica fuzzy para reduzir custos de instrumentação física.

FuzzyWaste Analytics

Startup focada em analytics para tratamento de efluentes, oferecendo modelos preditivos baseados em lógica fuzzy para otimização de biogás em ETEs municipais e industriais.

Protocolo de Verificação de Bioenergia

Uso da metodologia para refinamento dos protocolos estaduais de verificação de eficiência energética em projetos de saneamento básico financiados pelo governo.

ABSTRACT ORIGINAL

A aplicação de modelos matemáticos na estimativa da produção de metano em reatores Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) nem sempre se mostra uma ferramenta plenamente adequada para representar as condições reais de produção, devido à variabilidade qualitativa e quantitativa dos dados experimentais. Este estudo objetivou integrar a aritmética fuzzy triangular a um modelo de estimativa de base estequiométrica da produção de metano a partir da demanda química de oxigênio (DQO) degradada em um reator UASB, considerando diferentes carregamentos de água residuária provenientes de uma indústria frigorífica. A contribuição metodológica do estudo consistiu em representar as variáveis experimentais de entrada do modelo - vazão, temperatura e concentrações de DQO de entrada e de saída - por números fuzzy triangulares, permitindo incorporar a variabilidade dos dados de monitoramento ao cálculo da produção teórica de metano. Para a aplicação da aritmética fuzzy, foram selecionados dois estágios operacionais, com cargas orgânicas volumétricas de $6,6 \pm 0,2$ kg DQO $m^{-3} d^{-1}$ (estágio I) e $8,5 \pm 0,2$ kg DQO $m^{-3} d^{-1}$ (estágio II), por apresentarem o conjunto mínimo de dados necessário à representação por números fuzzy triangulares. Para avaliar a aderência da estimativa, a produção teórica de metano em regime fuzzy foi comparada à produção experimental. Os resultados experimentais indicaram boa estabilidade operacional. O desempenho operacional do reator foi considerado satisfatório, uma vez que as eficiências mais prováveis de remoção de DQO foram de 75% no estágio I e de 76% no estágio II. A produção teórica fuzzy de metano apresentou boa aderência aos valores obtidos experimentalmente, com erros relativos mais prováveis de 9% no estágio I e de -1% no estágio II. Assim, nas condições operacionais avaliadas, a aplicação da aritmética fuzzy triangular ao modelo de estimativa da produção de metano mostrou-se adequada para representar a variabilidade dos dados experimentais de entrada e gerar estimativas próximas aos valores experimentais.

MATÉRIA PARA LEIGOS**Para leigos: Lógica fuzzy ajuda a prever a produção de gás em estações de tratamento****O cenário atual**

Modelos matemáticos são comuns para tentar prever quanto metano será produzido em reatores de tratamento de esgoto, como os reatores UASB (manta de lodo anaeróbia). O problema é que esses modelos tradicionais muitas vezes falham em representar a realidade. Isso acontece porque os dados coletados no dia a dia das operações variam muito, tanto em qualidade quanto em quantidade, o que dificulta as previsões exatas.

O que os pesquisadores fizeram

Os autores do estudo buscaram uma solução para essa imprecisão. Eles integraram a "aritmética fuzzy triangular" a um modelo matemático existente. O objetivo era estimar a produção de metano a partir da decomposição da matéria orgânica (DQO) em um reator UASB. O estudo analisou o funcionamento do reator ao tratar água residuária proveniente de uma indústria frigorífica, testando a técnica em dois cenários de carregamento de resíduos.

Como funciona na prática

Em vez de usar números fixos para calcular a estimativa, os pesquisadores usaram números fuzzy. Isso significa que as variáveis de entrada do sistema — como vazão, temperatura e a quantidade de matéria orgânica na entrada e na saída — foram representadas por faixas de valores. Essa técnica permite incluir a incerteza e a variabilidade natural do monitoramento dentro do cálculo teórico. Eles compararam essa estimativa "fuzzy" com os dados reais coletados experimentalmente em dois estágios: um com carga orgânica menor e outro com carga maior.

Resultados e evidência

O reator apresentou boa estabilidade durante os testes. A eficiência na remoção de poluentes (DQO) foi de 75% no primeiro estágio e 76% no segundo. A novidade é que a estimativa teórica feita com a lógica fuzzy funcionou muito bem. Quando comparada com a produção real de metano, a técnica apresentou erros pequenos: cerca de 9% no primeiro estágio e apenas -1% no segundo.

Implicações práticas

O uso da aritmética fuzzy triangular mostrou-se uma ferramenta adequada para o setor. Ela consegue representar a variabilidade dos dados de entrada de forma eficaz, gerando previsões teóricas que estão muito próximas do que acontece na prática. Isso pode tornar o controle e a avaliação de reatores industriais mais precisos.

Limitações e próximos passos

Para aplicar o método, o estudo selecionou apenas dois estágios operacionais que possuíam o conjunto mínimo de dados necessário. O paper não detalha outras limitações ou quais seriam os próximos passos para a pesquisa além da validação realizada nestes cenários específicos.

QUEM SÃO OS PESQUISADORES

Quem são os pesquisadores

O estudo foi conduzido por Allan Bruno Dantas Gonçalves, Maria Gorethe de Sousa Lima Brito, Flávio César Brito Nunes, Antonio Alex Matias Lêu, Dayane de Andrade Lima e Fernando José Araújo da Silva. A pesquisa está vinculada ao Instituto Federal do Ceará (IFCE). O paper não informa detalhes sobre a formação acadêmica específica dos autores, suas trajetórias profissionais ou papéis individuais (como quem orientou o estudo).

PALAVRAS-CHAVE

Fuzzy logic · Hydrology (agriculture) · Evaluation methods