



ANÁLISE E PERSPECTIVAS DE APLICAÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA A PROCESSOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES NO CONTEXTO BRASILEIRO E INTERNACIONAL

Juliana Neves⁽¹⁾

Engenheira Química pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com período sanduíche pela École Supérieure de Chimie Physique Électronique de Lyon (CPE Lyon). Consultora na empresa HydroInfo.

Enrico Remigi⁽²⁾

Engenheiro Ambiental, Mestre e Doutor pela Politecnico di Milano (Itália). Modelador de Processos e Consultor em otimização de Estações de Tratamento de Efluentes na DHI A/S.

Christopher Eugen Gaszynski⁽³⁾

Engenheiro Civil, Mestre e Doutor pela University of Cape Town (África do Sul). Engenheiro especialista em efluentes na DHI A/S. Atua com modelagem de processos, otimização e projetos de gêmeos digitais para Estações de Tratamento de Efluentes.

Fabio Polesel⁽⁴⁾

Engenheiro Ambiental, Mestre e Doutor pela Technical University of Denmark (Dinamarca). Engenheiro especialista em efluentes na DHI A/S. Atua com modelagem de processos, otimização e projetos de gêmeos digitais para Estações de Tratamento de Efluentes.

Rodrigo Campos de Andrade⁽⁵⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre e Doutor em Engenharia Oceânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Sócio e diretor da empresa HydroInfo.

Endereço⁽¹⁾: Rua Emílio Blum, 131, Sala 409, Bloco A - Centro - Florianópolis - SC - CEP: 88020-010 - Brasil - Tel: +55 48 3879-6888 - e-mail: jun@hydroinfo.com.br

RESUMO

A modelagem numérica de processos de tratamento de efluentes é uma ferramenta digital com grande potencial de apoio a projetos e estudos de otimização, dimensionamento e controle operacional, e tem sido aplicada atualmente tanto no Brasil quanto no exterior. Contudo, a sua aplicação no cenário nacional tem apresentado alguns desafios importantes para possibilitar uma efetiva utilização desse recurso. Uma das principais barreiras é a disponibilidade de dados com qualidade e quantidade adequados, o que pode inviabilizar a aplicação de modelos de processos para tais casos. Nesse contexto, é apresentado um breve histórico do desenvolvimento dessas ferramentas, os desafios atuais no Brasil e são descritos casos reais de aplicação de modelos no cenário internacional, evidenciando a abordagem prática com séries de dados históricos e com dados em tempo real, além da importância de disponibilização de dados dos processos e do efluente para o sucesso dessas avaliações. Como conclusão, é evidenciada a relevância da padronização da coleta de dados para a obtenção de resultados satisfatórios, o que comumente é atingido através da implementação de sensores de monitoramento em linha ou com intensiva amostragem e realização de análises laboratoriais.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem numérica, Simulação de processos, Tratamento de efluentes.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a aplicação de modelos numéricos a processos de tratamento de efluentes tem ganhado destaque no cenário internacional como uma interessante ferramenta de apoio tanto a projetos de dimensionamento como para aprendizado e avaliação operacional. Estes modelos podem desenvolver um papel fundamental na identificação de soluções para problemas existentes em estações de tratamento, além de conseguirem demonstrar resultados de diferentes cenários de forma ágil e com boa qualidade de predição.

Atualmente, a utilização de modelos numéricos em tratamento de efluentes se dá através de simuladores de processos capazes de resolverem o conjunto de equações representativas de cada operação tipicamente encontrada em uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE). Para esses modelos serem aplicados de forma efetiva e gerarem bons resultados, é necessária uma etapa de calibração posterior à implementação, a qual deve ser feita com a aplicação de estratégias conhecidas e com a disponibilização de uma base de dados do



processo que está sendo avaliado. Idealmente, após esta etapa, uma validação dos resultados deve ser feita de maneira a garantir que o modelo pode ser utilizado para a predição de desempenho do sistema sob diferentes condições (RIEGER et al, 2013).

Após algumas décadas de desenvolvimento em modelos nessa área, uma das principais dificuldades encontradas hoje ainda é o estabelecimento de um método de calibração adequado para os diferentes tipos de modelos existentes. Enquanto alguns são bastante simplistas (como os de decantação), outros são super parametrizados, o que eleva a complexidade de determinação dos parâmetros mais significativos do modelo e resulta em grande incerteza (LI, 2016).

No entanto, este não é o único desafio encontrado na aplicação da modelagem numérica em ETEs. Pontos-chave a serem observados no desenvolvimento de estudos utilizando essas ferramentas incluem principalmente a aquisição de dados suficientes e com boa qualidade. Além de ser uma parte fundamental para o prognóstico e diagnóstico de um sistema, a coleta e organização dos dados é uma das etapas que exigem maior esforço na execução de um projeto (RIEGER et al, 2013).

No Brasil, a aplicação de modelos numéricos em processos de tratamento de efluentes tem maior visibilidade no meio acadêmico, tendo ainda pouca prática de aplicações de empresas de consultoria, concessionárias de saneamento e/ou indústrias. Uma das principais razões para esse cenário no país é a escassez de dados disponíveis para possibilitar tais estudos, sejam dados de monitoramento dinâmico de vazão, de qualidade do efluente, de características do lodo ou até mesmo dados operacionais de equipamentos (SOUZA, 2021). As informações disponíveis se limitam normalmente a ensaios comuns, com pouca frequência de coleta e amostras em pontos insuficientes do processo. Nesse contexto, é evidente que esse é um obstáculo importante a ser vencido para possibilitar a aplicação de análises de simulação em ETEs no país.

O objetivo do presente trabalho é evidenciar desafios atuais e pontos de melhoria na operação e controle de ETEs para possibilitar a aplicação dessas ferramentas de análise no Brasil, contextualizando com o histórico de desenvolvimento dos modelos de tratamento biológico e fazendo um paralelo com experiências internacionais de modeladores – com casos reais aplicando somente modelos e casos mais complexos utilizando gêmeos digitais. É colocada em foco a aplicação do *software* de simulação WEST, desenvolvido pela empresa dinamarquesa DHI, o qual é uma das ferramentas disponíveis no mercado que possibilitam a utilização de modelos numéricos de tratamento de efluentes para os mais diversos objetivos.

METODOLOGIA

O desenvolvimento do presente trabalho teve como base a experiência em estudos piloto realizados em concessionárias de saneamento no Brasil, assim como relatos de modeladores profissionais com experiência internacional. Estes relatos se deram através da contribuição por escrito de suas experiências ao longo de anos de trabalho com o uso de ferramentas de modelagem aplicada a ETEs, com destaque para os desafios enfrentados na realização de estudos de otimização.

Além disso, foram realizadas pesquisas em referências bibliográficas relevantes para o estudo, de maneira a auxiliar na contextualização do assunto abordado e corroborar as recomendações indicadas para a obtenção de bons resultados provenientes da aplicação da modelagem numérica em estudos de otimização de ETEs.

BREVE HISTÓRICO

Historicamente, o desenvolvimento de modelos numéricos voltados para processos de tratamento de esgoto teve em seu início um foco maior em tratamentos biológicos, com principal destaque para os sistemas de lodos ativados. Os modelos nomeados *Activated Sludge Models (ASM)*, desenvolvidos pela equipe do “*Task Group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment*” (*International Water Association - IWA*), tiveram grande repercussão em seus lançamentos nas décadas de 1980 e 1990. Até os dias atuais, o primeiro modelo publicado, o ASM1, pode ser considerado uma referência no ramo, tendo auxiliado na aceitabilidade geral da aplicação de modelos na área de tratamento de esgoto (GERNAEY et al, 2014; VAN LOOSDRECHT et al, 2015).



Inicialmente, os modelos ASM tinham como objetivo descrever de forma numérica os processos de remoção de compostos orgânicos derivados do carbono e compostos nitrogenados aplicados em sistemas de lodos ativados de estações de tratamento de esgotos sanitários. Com o crescente interesse nesses modelos por parte de pesquisadores, outros processos foram incluídos no conjunto de equações, como a remoção biológica de fósforo, o acúmulo de substâncias nas células dos microrganismos, dentre outras modificações (GERNAEY et al, 2014; HENZE et al, 2000; VAN LOOSDRECHT et al, 2015). Assim, surgiram os modelos ASM2, ASM2d e ASM3, que foram publicados ao longo da década de 1990.

Além desse grupo, modelos de demais processos que compõem uma ETE foram sendo desenvolvidos e aperfeiçoados nos últimos anos, como os de decantação primária e secundária (TAKÁCS et al, 1991), reatores com biofilme, digestão aeróbia e anaeróbia, deságue de lodo, dentre outros. Em conjunto com os modelos de lodos ativados, eles têm possibilitado a realização de análises dos processos de uma planta de forma integrada através da simulação (RIEGER et al, 2013).

Um dos fatores que proporcionou maior viabilidade de aplicação desses modelos durante aquela época foi o desenvolvimento de hardware. Num contexto em que a capacidade computacional passou a possibilitar o avanço de diversas tecnologias, essas ferramentas tiveram papel fundamental para permitir a realização de estudos e trabalhos com a implementação de modelos numéricos complexos. Mas não somente o desenvolvimento de computadores possibilitou essas ações – a concepção de *softwares* específicos voltados para modelagem e simulação de processos facilitaram a compreensão dos modelos e das próprias ETEs, sabendo-se que essas ferramentas permitem que os usuários visualizem virtualmente o comportamento de um sistema frente a determinadas variações de parâmetros operacionais. Com isso, o desenvolvimento desses simuladores possibilitou a avaliação de cenários de dimensionamento, otimização e até mesmo o apoio para treinamento de operadores (VAN LOOSDRECHT et al, 2015).

Como exemplo dos *softwares* comerciais disponíveis atualmente, é discutida neste trabalho a aplicação do WEST, desenvolvido pela DHI e voltado principalmente à simulação e modelagem de sistemas de tratamento de esgoto urbano. Por ser versátil e apresentar grande variedade de modelos, este *software* pode ser aplicado também a tratamento de água, efluentes industriais, análises de bacias hidrográficas e corpos hídricos receptores.

A disponibilização de simuladores desse tipo no mercado, no entanto, não garantiu que estudos e projetos com aplicação de modelos obtivessem resultados com boa qualidade e fossem de fácil realização. A grande variabilidade de abordagens somada à documentação insuficiente foram importantes obstáculos a serem vencidos, além da própria capacitação adequada do usuário. De maneira a contribuir no enfrentamento deste desafio, diversos protocolos e guias práticos de modelagem aplicada a ETEs foram produzidos e publicados internacionalmente nos últimos anos, incluindo recomendações de procedimentos para caracterização do efluente ou lodo avaliado (RIEGER et al, 2013; VAN LOOSDRECHT et al, 2015).

Alguns dos protocolos mais conhecidos e aplicados hoje são: STOWA (HULSBEEK et al, 2002), BIOMATH (VANROLLEGHEM et al, 2003), WERF (MELCER et al, 2003), GMP *Unified protocol* (RIEGER et al, 2013). Além do benefício de obter resultados de melhor qualidade, a aplicação de procedimentos padronizados para simulação possibilita também reduzir esforços de trabalho, definir limitações e expectativas de um estudo, atingir resultados comparáveis, reprodutíveis e transferíveis, e auxiliar modeladores e usuários inexperientes no desenvolvimento de um projeto (RIEGER et al, 2013).

Contudo, a publicação e utilização de protocolos não soluciona por completo um dos desafios mais importantes atualmente em alguns setores e regiões: a ausência de dados sobre o processo em quantidade e qualidade suficientes. Diversos autores (RIEGER et al, 2013; VANROLLEGHEM et al, 2003; YANG et al, 2019) evidenciam que a falta de dados tanto sobre a operação de uma estação de tratamento quanto sobre as características do efluente (Figura 1) pode causar uma grande incerteza de resultados, o que prejudica a confiabilidade da análise e a sua real aplicabilidade. Modelos cujos resultados são obtidos com dados não representativos podem gerar custos significativos e outras implicações se utilizados para a tomada de decisão sobre expansões de infraestrutura ou mudança de operação (YANG et al, 2019).

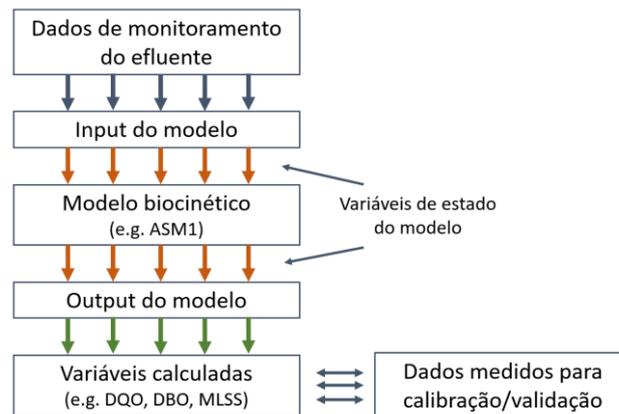


Figura 1: Fluxo de conversão de dados de monitoramento para variáveis de estado dos modelos numéricos. Adaptado de Rieger e colaboradores (2013).

Por isso, há uma relevância bastante importante com relação à aquisição de dados sobre a operação de uma ETE e sobre as características do efluente analisado, principalmente quando o objetivo é a aplicação de simulação dinâmica em um estudo de otimização. Exemplos de casos reais e seus desafios são discutidos nas sessões seguintes, com perspectivas do cenário brasileiro e do cenário internacional, incluindo recomendações de boas práticas para melhoria dos resultados obtidos e ilustração de práticas avançadas com o uso da modelagem de processos.

DO CONCEITO À PRÁTICA: EXPERIÊNCIAS E DESAFIOS NO BRASIL

A busca pela aplicação de novas tecnologias no setor do saneamento brasileiro tem tido um avanço expressivo nos últimos anos, principalmente com o crescente debate sobre conceitos como Internet das Coisas, digitalização e o novo marco legal do saneamento básico, atualizado em julho de 2020 pelo Governo Federal. Com o progresso dessas discussões, cada vez mais investimentos têm sido realizados em tecnologias como Inteligência Artificial, modelagem computacional e automações. Nesse contexto, a aplicação da modelagem numérica e *softwares* de simulação específicos para este ramo tem sido também cada vez mais procurada por empresas e concessionárias com o objetivo de atualizar seus processos e permitir maior agilidade na tomada de decisão, bem como trazer maior assertividade para as empresas e proporcionar a aplicação de melhoria contínua no dia a dia.

Por ainda não ser uma prática muito familiar no cotidiano operacional, a utilização dessas ferramentas no Brasil é pouco conhecida por muitos profissionais e, por isso, enfrenta barreiras importantes para uma aplicação adequada e com resultados satisfatórios. Primeiramente, é possível mencionar a escassez de especialistas experientes e capacitados na área, o que pode resultar na falta de confiança em profissionais com pouca ou nenhuma experiência prática. Como consequência disso, empresas do setor de saneamento muitas vezes optam ainda por soluções defasadas e ultrapassadas que geram custos significativos para a operação.

Além disso, outro desafio enfrentado atualmente é relacionado à escassez ou ausência de dados de qualidade do efluente de uma estação de tratamento (Figura 2). De acordo com a norma NBR 9897 (ABNT, 1987) e a Resolução Nº 430 (CONAMA, 2011), a seleção de pontos de amostragem e a determinação da frequência de coleta ficam a cargo do órgão ambiental competente e dependem de vários fatores característicos de cada operação e corpo hídrico receptor, como o tipo de processo empregado, o uso da água, a capacidade de autodepuração, dentre outros. Com isso, não há uma padronização efetiva de frequência de monitoramento e isso torna os estudos de modelagem no país mais complexos e prolongados. Alguns autores (RIEGER et al, 2013) mencionam que a falta de padronização no monitoramento pode ocasionar em dados insuficientes e intervalos de coleta inconsistentes. Dependendo do objetivo do estudo a ser realizado, pode ser necessária a execução de uma campanha específica de coleta de amostras em pontos adequados e com frequência determinada, ou mesmo uma análise de interpolação de dados ausentes de maneira a preencher lacunas nas séries temporais.

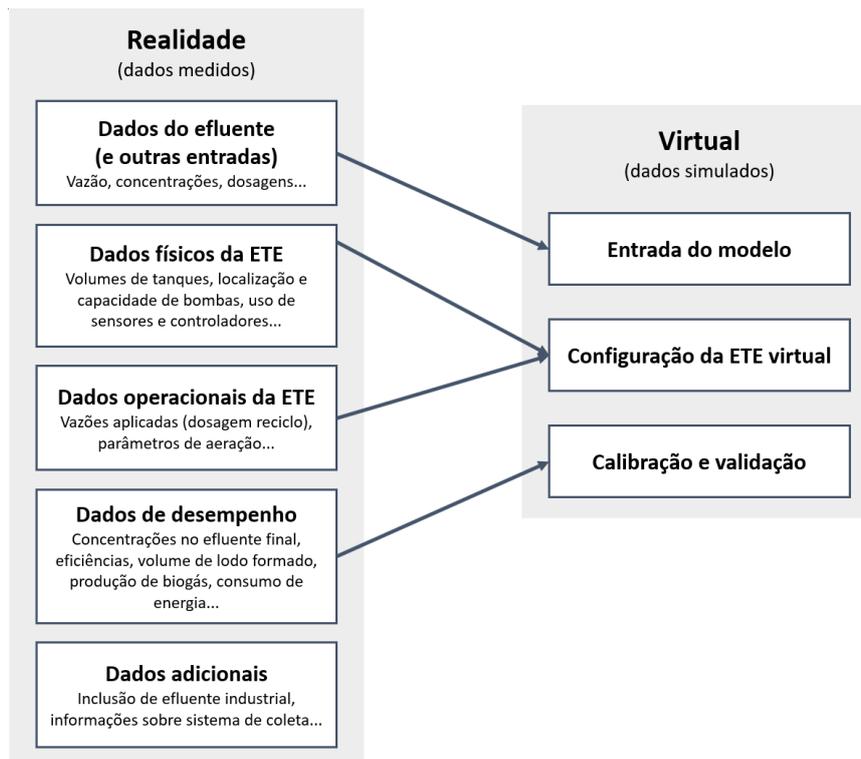


Figura 2: Dados necessários para estudos de simulação e suas aplicações. Adaptado de Rieger e colaboradores (2013).

No Brasil, no entanto, algumas dessas rotinas ainda não são prioridade para todas as estações. No cenário atual, a preocupação maior da sociedade é com a garantia de atendimento de coleta e tratamento de esgoto para toda a população brasileira. Por outro lado, o fato de a universalização do saneamento estar em foco dá destaque para novos projetos que possibilitem a aplicação de tratamentos autossustentáveis, como por exemplo aqueles que permitem o aproveitamento energético e a recuperação de subprodutos gerados. Isso traz em discussão a possibilidade de utilização de tecnologias mais modernas, incluindo modelos computacionais.

Nesse sentido, sabendo dos benefícios da aplicação da modelagem como aliada a estudos na área de otimização, dimensionamento e simulação de processos, o seu uso por especialistas do setor do saneamento pode apresentar um papel essencial como ferramenta de apoio na busca por objetivos como o atendimento universal de serviços de água e esgoto. Experiências recentes em projetos piloto no setor privado brasileiro demonstram o potencial de aplicação de softwares de simulação de ETEs para otimização de processos existentes, podendo atingir objetivos como redução de custos operacionais e melhoria da eficiência de tratamento. Contudo, novamente, dificuldades relacionadas à aquisição de dados da operação e do efluente foram enfrentadas, o que demonstra a necessidade de se aprimorar a metodologia de aquisição dessas informações.

APLICAÇÃO DE MODELAGEM DE PROCESSOS NO CONTEXTO INTERNACIONAL

Apesar de algumas dificuldades encontradas atualmente, a modelagem computacional de processos aplicada a ETEs já é encontrada hoje como ferramenta de projetos e operação tanto no Brasil quanto no exterior. Sua aplicação pode ser realizada em diferentes níveis ou estágios do ciclo de vida de uma estação de tratamento, auxiliando tanto nas etapas iniciais de projeto e dimensionamento, como também em análises de *retrofit*, estudos de otimização e, mais recentemente, em aplicações de tecnologias mais avançadas – como sistemas de controle em tempo real e gêmeos digitais (*digital twins*).

Tendo em vista a importância da qualidade e quantidade de dados disponíveis para tais projetos, os objetivos desses estudos acabam sendo traçados e adaptados de acordo com a disponibilidade de informações sobre a operação e o efluente avaliados. Análises mais simples podem ser feitas com menos dados, enquanto as mais

sofisticadas requerem uma melhor representatividade e, conseqüentemente, maior quantidade de dados. Esses objetivos podem variar conforme a necessidade do processo e da própria equipe de operação.

Com o objetivo de ilustrar aplicações práticas reais da modelagem de processos voltada a ETEs, são descritos a seguir alguns exemplos de experiências internacionais de profissionais modeladores, demonstrando um comparativo com a realidade encontrada no Brasil conforme o que foi exposto e elencando os desafios enfrentados por eles em seus projetos.

1) Caso da ETE Piombino Ferriere – Piombino, Itália

A estação de tratamento de esgoto da cidade de Piombino, na Itália, foi objeto de estudo de um dos projetos aplicando modelagem numérica e *software* de simulação, no qual o objetivo foi configurar um modelo da planta a partir de dados disponíveis da operação entre janeiro e setembro de 2020. Com isso, os modeladores pretendiam utilizá-lo para: i) avaliar a capacidade residual tanto da linha de tratamento do efluente aquoso quanto a de lodo e ii) avaliar diferentes cenários operacionais. O modelo foi implementado na interface do *software* WEST e calibrado pelo método de “tentativa e erro”, variando certas condições e/ou fazendo algumas suposições pertinentes para melhorar o ajuste dos resultados de saída do modelo às medições reais do efluente.

O processo de tratamento consistia em uma etapa preliminar (gradeamento grosso e fino, e remoção de areia), um sistema de lodos ativados com um tanque de desnitrificação (não aerado), três tanques de aeração (equipados com difusores de microbolhas), dois decantadores secundários circulares, desinfecção e posterior tratamento do lodo gerado. O conjunto de dados disponíveis para o período analisado incluiu a vazão diária acumulada, medições em frequência irregular da qualidade do efluente de entrada e saída da ETE (DQO, nitrogênio amoniacal, nitrato, nitrogênio total, fósforo total), medições também irregulares dos sólidos nos tanques de processo e medições de oxigênio dissolvido (OD) nos tanques através de sensores de monitoramento em linha. Algumas medidas do efluente de entrada com relação ao ano de 2019, mesmo que esparsas, também estavam disponíveis.

Contudo, foi observado pelos modeladores que o número limitado de medições e a variabilidade significativa entre essas medições (em particular de DQO e sólidos, conforme Figura 3) tornou seu uso particularmente problemático. Isto porque, em condições dinâmicas, cada medição pontual teria um impacto por um período muito longo no processo simulado, muito além do período real de influência desta caracterização, o que não seria uma representação realista do processo.

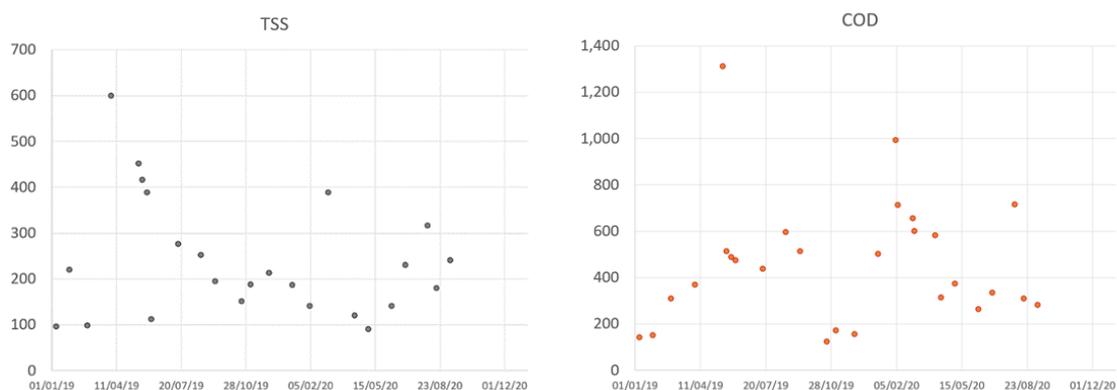


Figura 3: Dados de medição de sólidos em suspensão totais (TSS, em g/m³) e DQO (COD, em g/m³) no efluente de entrada da ETE Piombino Ferriere. Fonte: Autores.

Por outro lado, as medições de OD nos dois tanques de processo foram consistentes, mas extremamente variáveis na faixa de 2-4 g/m³ (Figura 4). Como a aeração era regulada automaticamente com base no valor de referência (*set-point*) de OD, mas não havia informações sobre o valor real do *set-point* ou quando este poderia ter sido alterado pelo operador, assumiu-se uma regulação de *set-point* de OD ideal no modelo e ajustou-se para eventualmente obter um ajuste aceitável aos dados de qualidade do efluente.

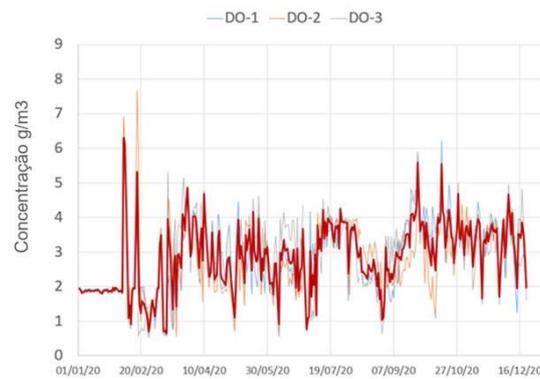


Figura 4: Oxigênio dissolvido nos tanques de aeração do processo. Linha vermelha: concentração média (em g/m³).

Na análise de simulação do processo, foi visto ainda que a razão entre o volume aerado e anóxico (7:3) combinada com as medições de oxigênio dissolvido – que indicavam disponibilidade de oxigênio mais do que suficiente – deveria resultar em uma nitrificação completa (com amônia no efluente de saída abaixo de 0,5-1 g/m³) e possivelmente uma desnitrificação insuficiente. No entanto, mesmo com uma queda substancial na DQO afluente (aproximadamente 50%) após o mês de abril, o nitrato no efluente final estava permanentemente em uma faixa de 6-10 g/m³, o que não correspondia com a simulação no modelo.

Para obter uma simulação representativa do tratamento real considerando tais situações, foram sugeridos dois cenários hipotéticos de modo a contornar esses resultados inesperados: i) assumir que o volume aerado simulado era menor que o volume aerado real; e ii) variar a caracterização (fracionamento) do efluente de entrada, chegando a assumir que alguma medição de DQO não foi detectada.

Por fim, como conclusão, apesar de as concentrações de DQO simuladas terem sido representadas de forma aceitável ao longo de todo o tempo de simulação (conforme Figura 5), a amônia e o nitrato puderam ser aceitáveis apenas nos primeiros 2 meses (conforme Figuras 6 e 7). Após esse período, claramente algumas condições mudaram – e não foram documentadas com os dados disponíveis para o projeto. Sendo assim, o modelo não conseguiu simular adequadamente o processo de tratamento.

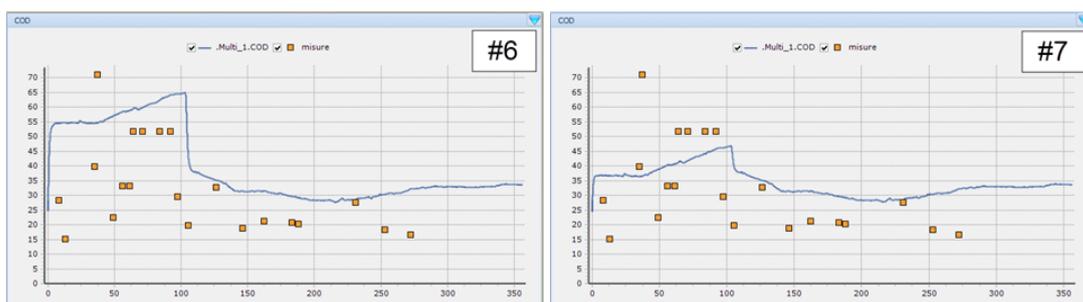


Figura 5: Comparação da concentração de DQO medida no efluente (em amarelo) e a predição do modelo (em azul).

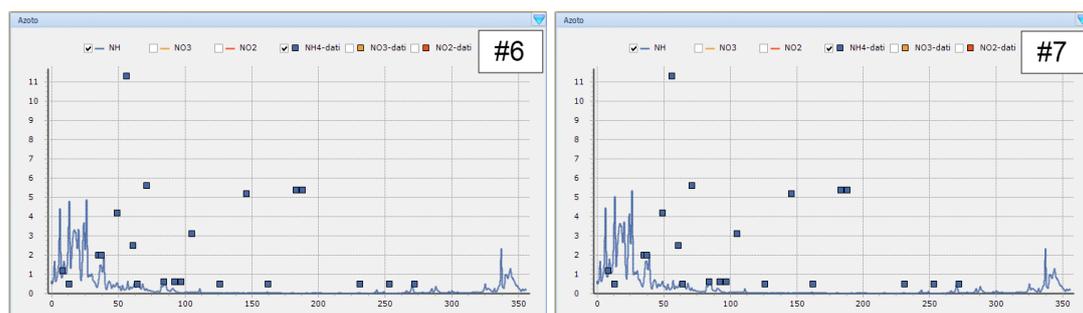


Figura 6: Comparação da concentração de amônia medida no efluente (pontos) e a predição do modelo (linha contínua).



Figura 7: Comparação da concentração de nitrato medida no efluente (pontos) e a predição do modelo (linha contínua).

2) Caso da ETE de Ravena – Ravena, Itália

A estação de tratamento de esgoto de Ravena (Itália) foi também objeto de estudo de outro projeto aplicando modelagem numérica e *software* de simulação. Esta ETE foi projetada para uma capacidade de 60.000 PE em 1983, enquanto a capacidade (baseada em vazão) no ano de estudo era de 240.000 PE. O afluente era majoritariamente composto de efluente sanitário municipal, mas também com captação de água da chuva, efluente industrial e descarga de lodo de fossas sépticas. Nesse contexto, a concessionária de saneamento responsável pela ETE tinha por objetivo mapear possibilidades de melhoria do processo, tendo em vista uma projeção de crescimento populacional para 305.000 PE, além também de buscar alternativas de redução de custo para o processo, tendo em vista os gastos elevados que estavam tendo com seus sistemas de aeração.

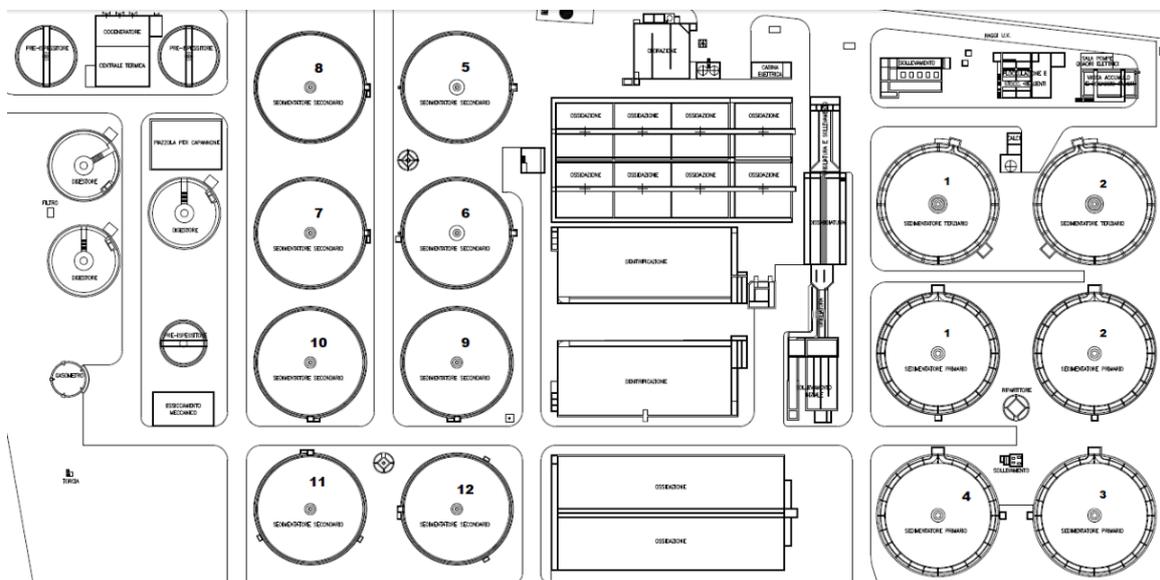


Figura 8: Layout esquemático da ETE de Ravena, composta por uma estação elevatória, uma etapa de pré-tratamento (desarenação e remoção de gorduras) seguida de decantação primária (quatro decantadores circulares), tratamento biológico por lodos ativados (dividido em duas linhas com volume total de 6.000 m³) e quatro decantadores secundários em cada linha. Por último, dois tanques de decantação terciários permitem a precipitação do fósforo, antes da desinfecção e descarga final.

Como dados disponíveis para este projeto, duas fontes principais foram utilizadas, as quais eram mantidas na própria estação de forma regular: 1) um Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA), o qual mantinha um registro em linha de vazões das bombas e oxigênio dissolvido nos tanques; e 2) um Sistema de Gerenciamento de Informações Laboratoriais (LIMS), o qual armazenava todas as medições laboratoriais feitas com amostras do efluente de entrada e saída da ETE, além de outros locais da planta. Com relação a essas medições, a caracterização do efluente de entrada era feita a cada 2 semanas e semanalmente era acompanhada a concentração de sólidos nos tanques de processo e no efluente final.

No que diz respeito à aeração nos tanques biológicos, ela era mantida fixa (isto é, não era controlada) em ambas as linhas de tratamento, sendo que as medições de oxigênio dissolvido eram registradas com alta frequência. No entanto, a localização dos sensores de OD no final de cada tanque, somada ao fato de os operadores intervirem periodicamente no processo para desativar o último conjunto de difusores – em momentos nos quais se fazia necessária maior capacidade de desnitrificação – resultou na impossibilidade de esse conjunto de dados ser utilizável ao estudo.

O modelo da ETE de Ravena foi configurado no *software* WEST e a calibração do modelo consistiu no ajuste dos parâmetros de caracterização do afluente (fracionamento) e na concentração de matéria orgânica solúvel não biodegradável, de forma a minimizar as diferenças entre as variáveis simuladas e medidas. Contudo, devido à grande incerteza em todas as medições de vazão (e distribuição), exceto nas medições de vazão afluente, uma abordagem diferente foi adotada para calibrar o modelo no WEST. Para calibrar o processo como um todo, as especificações de vazão do afluente foram utilizadas como referência para comparação aos resultados da simulação. Porém, para calibrar a geração de lodo pelos processos primário e secundário, as vazões médias calculadas foram utilizadas.

O resultado da calibração é demonstrado nas Figuras 9 e 10, as quais sugerem que, apesar das limitações de dados de entrada, o modelo do WEST foi capaz de reproduzir razoavelmente bem o conjunto de dados para o período simulado. Portanto, concluiu-se que ele pôde ser utilizado como ferramenta para avaliar os cenários de interesse, os quais permitiram a obtenção de uma aeração controlada, de modo a melhorar a qualidade do efluente e reduzir o consumo de energia, assim como reduzir a concentração de sólidos nos tanques, que possibilitou aperfeiçoar o adensamento do lodo e favorecer o processo de desnitrificação.

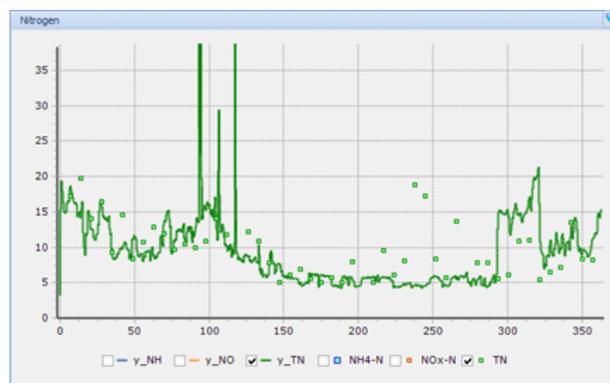


Figura 9: Comparação da concentração (em g/m³) de nitrogênio total medida no efluente (pontos) e a predição do modelo (linha contínua).

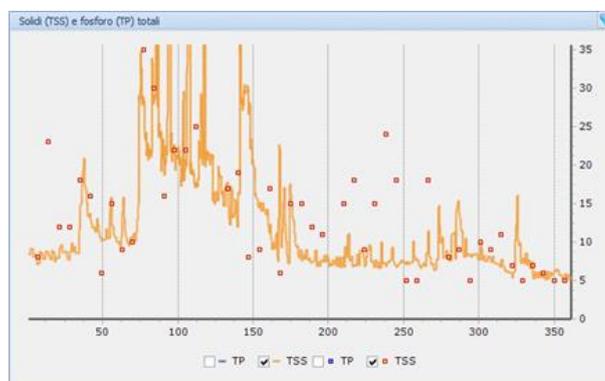


Figura 10: Comparação da concentração (em g/m³) de sólidos em suspensão totais medida no efluente (pontos) e a predição do modelo (linha contínua).

3) Caso da ETE Bjergmarken – Roskilde, Dinamarca

A estação de tratamento de esgoto de Bjergmarken (Roskilde, Dinamarca) foi também objeto de estudo de modelagem de processos usando o WEST, com o objetivo de avaliar estratégias para otimizar o uso de energia

sem comprometer a eficiência do tratamento, mantendo assim a descarga do efluente em conformidade. Escolheu-se aplicar a modelagem de processos tendo em vista a utilização de um ambiente virtual para avaliar as alternativas de estratégias operacionais, sem interferir na operação em escala real.

Em comparação com as ETEs operadas de forma semelhante na Dinamarca, Bjergmarken estava tendo uma alta demanda de energia, principalmente devido à necessidade significativa de aeração. O tratamento utilizava um sistema de lodos ativados com retorno de lodo (nomeado *activated return sludge process* – ARP) para aumentar a retenção de lodo e a capacidade de tratamento. Devido às altas concentrações de sólidos (> 10 kgSS/m³) tratadas neste processo, havia uma ineficiência na transferência de oxigênio. Essa ineficiência exigia muita energia de aeração para manter níveis suficientes de oxigênio dissolvido.

A necessidade de quantificar com precisão o potencial de otimização de energia a partir de diferentes estratégias operacionais exigiu um modelo calibrado bastante detalhado para descrever a operação sob condições básicas. Assim, a avaliação inicial teve como foco a coleta de dados históricos, a configuração de um modelo da ETE na interface do WEST e a calibração do modelo com os dados coletados. As Figuras 11 e 12 apresentam uma comparação de medições e resultados de simulação para a ETE de Bjergmarken pelo período de 1 ano (julho de 2018 a junho de 2019), indicando que o modelo calibrado pôde fornecer uma descrição precisa do comportamento do processo para condições históricas.

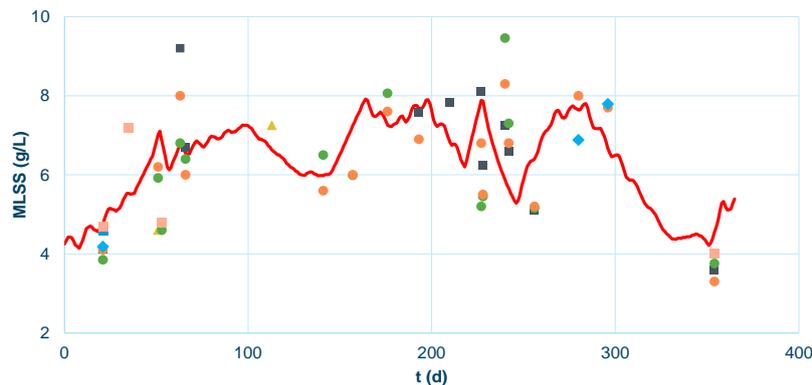


Figura 11: Comparação da concentração (em g/L) de sólidos em suspensão totais medida nos tanques de processo (pontos) e a predição do modelo (linha contínua).

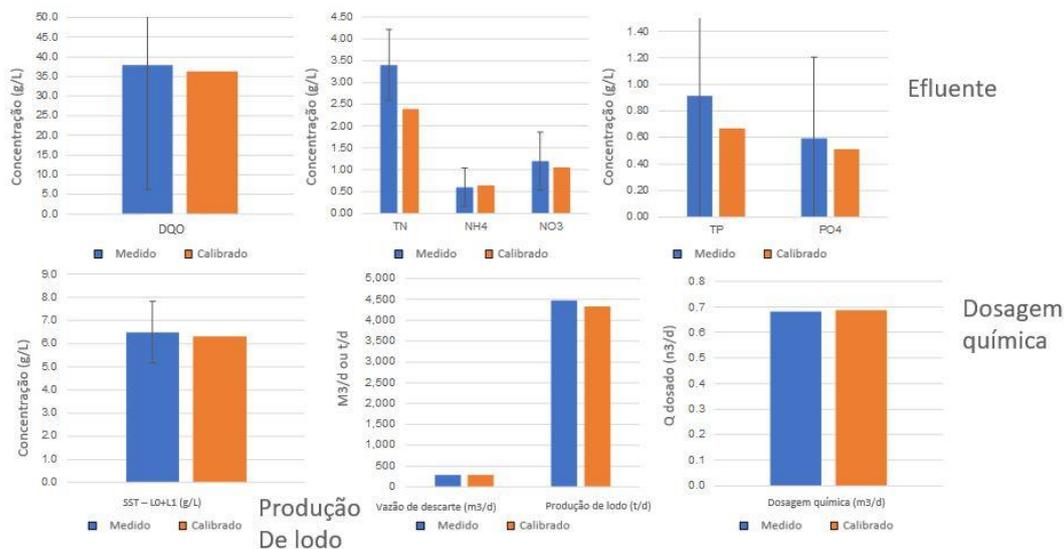


Figura 12: Comparação das concentrações de DQO, nitrogênio total (TN), NH₄-N, NO₃-N, fósforo total (TP), PO₄-P (mg/L) no efluente, SST (g/L) nos tanques de processo, geração de lodo (em m³/d e t/d) e dosagem química (m³/d) medidos (azul) e simulados pelo modelo (laranja) após a calibração.

O modelo calibrado foi posteriormente utilizado como referência para a avaliação de diferentes cenários operacionais. Especificamente, a conversão do processo ARP em uma etapa de hidrólise do lodo secundário (*side-stream hydrolysis* – SSH), com consequente desligamento da aeração, foi identificada como uma alternativa de processo relevante para alcançar a eficiência energética desejada. Conforme mostrado na Figura 13, o modelo conseguiu prever uma redução significativa no uso de energia para aeração (aproximadamente -30%) a partir da conversão de ARP em SSH, que foi próximo ao resultado observado na ETE em escala real após a implementação dessa estratégia. A solução de *retrofit* não teve impacto na eficiência do tratamento (tanto de nitrogênio quanto de fósforo), e as previsões do modelo foram mais uma vez apoiadas por medições coletadas após a implementação em larga escala da nova estratégia.

Este exemplo de aplicação mostra o potencial do uso da modelagem numérica de processos como ferramenta para otimizar a operação de ETEs, mantendo a alta eficiência de tratamento. Nesse caso, a coleta de dados e a calibração do modelo devem ser suficientemente detalhadas para fornecer uma descrição confiável do processo, que é a referência contra a qual o potencial de otimização pode ser quantificado.

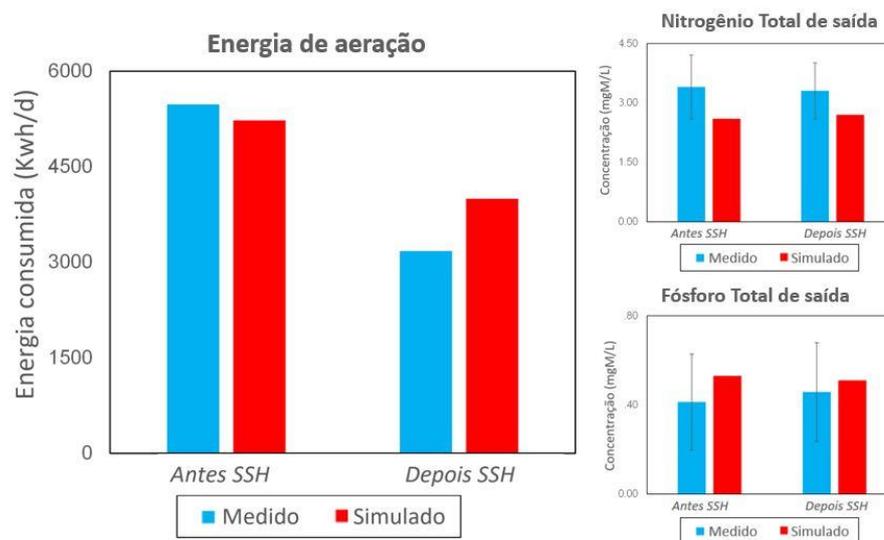


Figura 13: Comparação de medições reais e resultados de simulação com relação ao uso de energia para aeração, concentração de nitrogênio total e fósforo total no efluente com cenários antes e depois da implementação da estratégia operacional otimizada na ETE de Bjergmarken (conversão ARP para SSH).

RECOMENDAÇÕES E BOAS PRÁTICAS DE MODELAGEM DE PROCESSOS

Com os desafios atuais demonstrados tanto no Brasil quanto no cenário internacional, boas práticas de modelagem e demais recomendações já são descritas na literatura e estão disponíveis para os profissionais da área, principalmente no que se refere à coleta de dados. Por exemplo, algumas das recomendações indicam que, idealmente, para a realização de projetos com simulação dinâmica, o monitoramento do efluente deva ser feito de forma diária ou até mesmo através de uma campanha de coleta de 1 a 3 dias a cada 1 ou 2 horas para a identificação de padrões e picos diurnos do efluente (HULSBEEK et al, 2002; MANNINA et al, 2011; RIEGER et al, 2013). Por outro lado, caso a operação seja relativamente estável no tempo e as variações diárias no período avaliado não sejam relevantes para o estudo, valores médios de concentração podem ser suficientes para projetos de simulação em estado estacionário. No entanto, neste caso os dados devem ser cuidadosamente avaliados de maneira a compreender se são de fato representativos do processo e se efetivamente o sistema opera em regime permanente.

É importante mencionar também a eventual necessidade de implementação de sensores de monitoramento em linha, a depender do objetivo do estudo e do sistema de tratamento aplicado. Esse tipo de equipamento permite um monitoramento de parâmetros do efluente com alta frequência, o que é um grande benefício para projetos de simulação dinâmica. Para estudos com foco em sistema de aeração em reatores biológicos, por exemplo,

pode ser fundamental a presença de um sensor de oxigênio dissolvido nos respectivos tanques. Caso o foco seja em remoção de nitrogênio, sensores de concentração de amônia podem também ser necessários. Contudo, a manutenção desses equipamentos e o controle de qualidade dos dados gerados devem ser mantidos com regularidade adequada, para que as informações não sejam erroneamente coletadas (RIEGER et al, 2013).

Para sistemas nos quais a infraestrutura de controle do processo seja mais simplificada, investimentos em materiais de coleta e análise podem ser necessários, ou mesmo a contratação de serviços terceirizados para realização de tais tarefas. Isto pode ocorrer devido à possibilidade de dados adicionais serem necessários para permitir o estudo, principalmente nos casos em que as rotinas usuais de laboratório não tenham frequência suficiente para possibilitar boa qualidade de resultados ou não incluam a análise de parâmetros importantes para a avaliação.

Outra sugestão para melhorar a execução desses estudos diz respeito à verificação de parâmetros operacionais fundamentais de equipamentos instalados no processo. A clareza e definição destas informações é de grande importância não somente para a realização da análise com modelos numéricos, como também para a própria equipe de operação e supervisão da ETE. O desconhecimento de parâmetros operacionais traz elevada incerteza para as simulações e falta de confiança no controle do processo (VANROLLEGHEM et al, 2003). De maneira a garantir um controle adequado, é recomendável o armazenamento da documentação pertinente aos dados de equipamentos, bem como manuais e relatórios de fornecedores e projetistas (RIEGER et al, 2013).

Contudo, mais um fator se demonstra relevante nesse caminho: a adequada caracterização do efluente para conversão em variáveis dos modelos. Vários protocolos já existem atualmente para suprir esse objetivo, como os mencionados STOWA, BIOMATH e GMP *Unified protocol*, mas para a obtenção de resultados satisfatórios, os procedimentos recomendados devem ser seguidos. Como é citado pela descrição desses protocolos (HULSBEEK et al, 2002; VANROLLEGHEM et al, 2003; RIEGER et al, 2013), uma das fontes mais importantes de incerteza em simulação numérica aplicando os modelos ASM é proveniente de uma caracterização inadequada do efluente. A qualidade das predições dos modelos depende desta etapa e, por isso, atenção deve ser dedicada de modo a contribuir para bons resultados.

Outras possíveis fontes de incerteza são listadas por Rieger e colaboradores (2013), como a escolha dos modelos biológico e hidráulico utilizados, definição e calibração de parâmetros, seleção e configuração do solver aplicado, possíveis limitações da plataforma de simulação utilizada, dentre outras possibilidades. Algumas dessas incertezas podem ser reduzidas através de estratégias específicas, como por exemplo a determinação experimental de parâmetros cinéticos; mas há aquelas que são inerentes da variabilidade de um sistema, as quais devem ser observadas durante o estudo.

PRÁTICAS AVANÇADAS: MODELOS NUMÉRICOS APLICADOS A GÊMEOS DIGITAIS

Como visto, a aplicação de modelos matemáticos para simular, prever e assessorar ETes evoluiu rapidamente nos últimos anos. Além disso, os avanços na coleta, processamento e armazenamento de dados no cenário mundial têm melhorado a implementação de gerenciamento e controle em tempo real de ETes.

Nesse contexto, um gêmeo digital (ou *digital twin*) pode ser descrito como a integração da modelagem de processos com gerenciamento e análise de dados em um sistema de suporte à decisão operacional. A estrutura geral de um gêmeo digital é descrita na Figura 14. Para seu funcionamento, os dados operacionais são adquiridos em tempo real de um sistema de gerenciamento de dados (por exemplo, SCADA) e posteriormente validados e pré-processados, sendo eventualmente transferidos para uma plataforma de armazenamento.

Os dados necessários podem ser coletados de várias fontes na ETE, sendo na maioria das vezes de sensores físicos ou digitais com monitoramento em linha ou mesmo a partir de coletas frequentes de amostras do efluente. Os dados coletados são então fornecidos como entrada para um modelo de processo do tratamento, onde as simulações são executadas em intervalos regulares por meio de agendamento de tarefas na nuvem ou em uma máquina virtual. Os resultados da simulação e os dados operacionais pré-processados podem ser visualizados em uma interface gráfica de usuário online, como um serviço de rede.

Assim, o gêmeo digital permite que operadores, engenheiros de processo e outros usuários avaliem a situação em tempo real de sua ETE ou mesmo fazer previsões da operação – como, por exemplo, com base na previsão meteorológica. Desse modo, eles podem avaliar diferentes alternativas de operação testando cenários hipotéticos. Eventualmente, o gêmeo digital pode fornecer também informações sobre as configurações operacionais ideais que podem ser implementadas pelos operadores na instalação em grande escala.

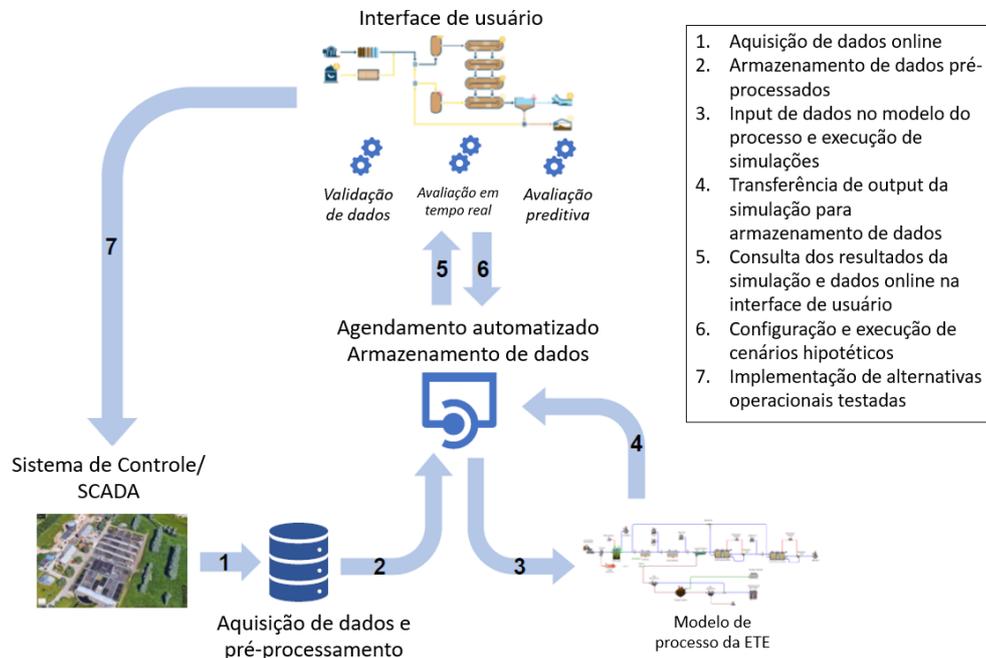


Figura 14: Diagrama do fluxo de informação em um gêmeo digital.

No Brasil, este tipo de abordagem já está sendo aplicada na prática em algumas estações de tratamento. Contudo, ainda é visto como um cenário bastante avançado de gestão dos processos, tendo em consideração as condições de infraestrutura de monitoramento atuais das ETEs no país. De forma a demonstrar possibilidades e esclarecer perspectivas de aplicação no território nacional, são ilustrados a seguir alguns casos práticos de aplicação de gêmeos digitais no cenário internacional.

a) Caso da ETE de Niguarda-Bresso – Milão, Itália

A ETE de Niguarda-Bresso trata atualmente uma vazão média de 2.550 m³/h de dois esgotos combinados na área norte de Milão, sendo que possui uma capacidade projetada de 250.000 PE e hoje trata uma carga diária de aproximadamente 210.000 PE. A estação engloba uma etapa de tratamento mecânico preliminar, sedimentação primária, sistema convencional de lodos ativados (com 4 linhas paralelas com pré-desnitrificação e nitrificação), tratamento terciário, digestão anaeróbica e desidratação de lodo. A implementação de uma solução digital que permitiria aos responsáveis avaliar estratégias alternativas de tratamento – otimizando ainda mais a eficiência do processo e o uso de energia – foi implementada através de três componentes essenciais:

1. A coleta de dados

A troca e o armazenamento de dados foram realizados em uma interface de trabalho usando a ferramenta MIKE OPERATION (DHI). A plataforma foi usada para: i) coletar dados do sistema SCADA existente, que já estava instalado e em funcionamento na ETE; ii) gerar arquivos de entrada para o modelo no WEST; e iii) recuperar dados de saída do modelo do WEST para exibição no painel localizado na interface do usuário. O sistema SCADA, que coletava os dados em tempo real, garantiu consistência através da verificação da qualidade dos dados e pré-processou as informações coletadas por mais de 60 sensores da estação.

2. O modelo do processo

Um modelo detalhado da estação foi implementado no WEST, o qual incluiu a linha do efluente aquoso, a linha de lodo, a linha de biogás gerado pela ETE e um sistema de controle personalizado. O modelo de processo escolhido para a linha do efluente aquoso foi ASM2dISS, e uma extensão do ADM1 foi usada para a linha de lodo.

3. O painel de visualização e avaliação de desempenho

O painel de visualização foi desenvolvido considerando os usuários finais e permitiu que os operadores modificassem os parâmetros operacionais presentes no modelo. O produto final era então uma representação virtual calibrada da estação de tratamento na qual poderiam ser avaliados diferentes cenários de operação em toda a planta, como por exemplo obter a eficiência de tratamento, o consumo de energia e produtos químicos, a produção de biogás e a recuperação de enxofre.

O gêmeo digital foi instalado em uma estação de trabalho da ETE de Niguarda-Bresso, onde tem fornecido aos operadores, engenheiros e gerentes um ambiente virtual no qual eles podem executar simulações e criar análises de cenário com horizonte de previsão de 24 horas e avaliar o desempenho do processo sob condições diversas. Os principais parâmetros disponíveis para os usuários são os set-points de oxigênio dissolvido e amônia no controlador de aeração, o set-point de recirculação de lodo, os set-points de dosagem de reagentes, a opção de variar a vazão e habilitar/desabilitar certas seções da instalação, a programação de descarga de lodo para os digestores anaeróbios e a utilização de biogás.

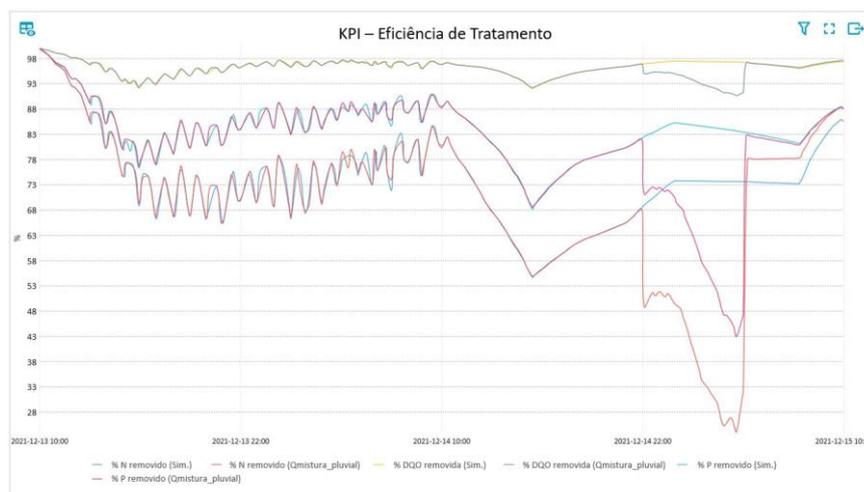


Figura 15: Análise de cenários de eficiência de tratamento para diferentes componentes com evento de chuva significativa.

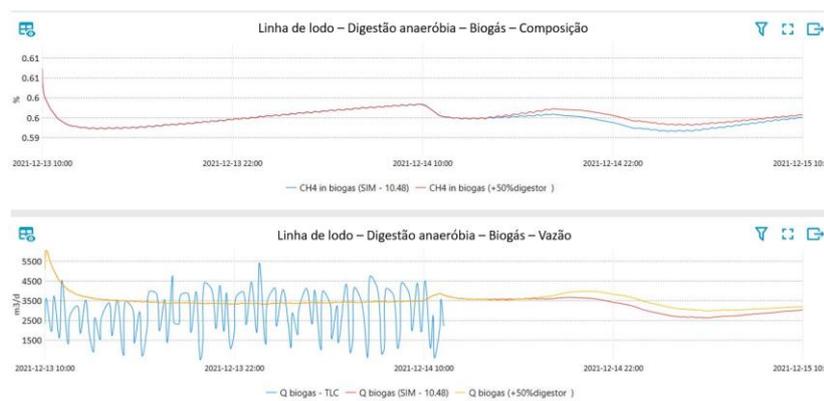


Figura 16: Indicação de aumento de 50% de carga de lodo para o digestor, resultante de evento de chuva significativa.

b) Caso da ETE Egå – Aarhus, Dinamarca

A implementação de um gêmeo digital na ETE de Egå (120.000 PE; Aarhus, Dinamarca) foi realizada em cooperação com a empresa gestora com o objetivo de melhorar a recuperação de recursos e energia e reduzir os custos energéticos da planta. Este sistema digital incluiu um modelo de processo da ETE, que descrevia a dinâmica do afluente através de um gerador dedicado, processos de tratamento baseados em extensões de modelos de lodo ativado e regras de controle automático para regular a aeração e a idade do lodo.

Além disso, a aquisição, o armazenamento e a validação de dados de sensores se deu por meio de um *software* específico (DIMS.CORE, DHI) em conjunto com algoritmos de validação de dados, de modo a garantir um fluxo de dados operacionais confiáveis, que são usados como entradas para o modelo de processo. Com isso, uma interface de usuário foi desenvolvida, na qual o desempenho da ETE pode ser visualizado em tempo real, assim como cenários futuros podem ser previstos usando um conjunto de dados medidos e indicadores chave do desempenho.

Alguns dos resultados da aplicação de gêmeos digitais na ETE de Egå estão resumidos nas Figuras 17 e 18. A Figura 17 mostra a avaliação em tempo real das concentrações de nitrogênio amoniacal (NH₄-N), OD e sólidos totais em suspensão nos tanques de processo em diferentes pontos da operação. Observa-se uma boa correspondência entre os resultados das medições reais da ETE e os da simulação, o que permite a realização de testes virtuais e comparação de cenários operacionais alternativos usando o modelo de processo. A Figura 18 mostra os principais indicadores de desempenho relacionados à eficiência energética e de custo e a pegada de carbono da ETE, que podem ser monitorados dinamicamente em tempo real usando sensores virtuais baseados em modelo.

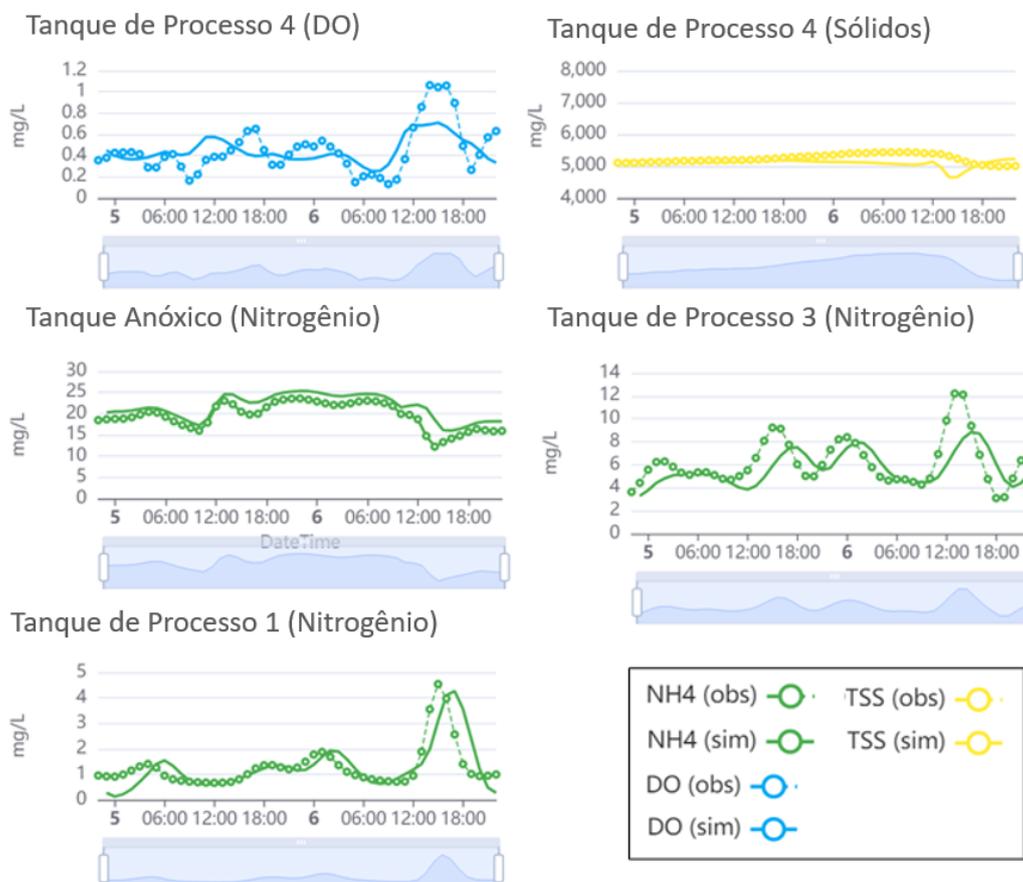


Figura 17: Concentração de oxigênio dissolvido (DO), NH₄-N e sólidos em suspensão totais (TSS) de dados de sensores de monitoramento em linha e resultados de simulações do modelo do processo em diferentes pontos da ETE de Egå. Resultados são mostrados para simulações em tempo real com tempo de atraso de 48h.



Figura 18: Indicadores chave de desempenho para eficiência energética e de custos, e pegada de carbono da ETE de Egá. As tendências apresentadas são baseadas em sensores virtuais baseados em modelo.

CONCLUSÕES

A partir da análise realizada e dos exemplos de casos práticos descritos, é possível concluir que a aplicação de modelagem numérica a processos de tratamento de efluentes apresenta benefícios importantes como ferramenta de apoio a estudos de otimização, *retrofit* e controle avançado das operações de uma ETE. As vantagens englobam desde a melhoria da qualidade do efluente e da eficiência energética, até mesmo objetivos mais avançados, como a análise de recuperação e reaproveitamento de biogás, recuperação de nutrientes, implementação de estratégias de controle avançado, avaliação de nova infraestrutura, dentre outros.

Contudo, foi observado que, para possibilitar o atingimento de tais objetivos, os modelos necessitam de dados com qualidade e quantidade suficientes para permitir uma representação adequada do processo a ser simulado. Sem esses critérios, o modelo pode obter resultados não-representativos e não conseguir prever corretamente cenários alternativos de otimização. Com isso, demonstra-se a importância de ter uma estrutura apropriada de monitoramento do efluente e o conhecimento de parâmetros operacionais fundamentais para a compreensão dos processos.

Tendo como referência as aplicações da modelagem numérica no contexto internacional e informações descritas pela literatura, é evidente que a padronização da coleta de dados comumente é realizada através da implementação de sensores nos processos e, por vezes, com intensiva amostragem e realização de análises laboratoriais. Dessa forma, como perspectiva de melhoria para o cenário brasileiro em relação à aplicação de modelos de processos a ETES, é colocada em foco a necessidade de adoção de novas estratégias e estruturas de coleta, processamento e armazenamento de dados, de maneira a promover melhor controle em tempo real e a manutenção de uma base de dados adequada para a realização de estudos de otimização utilizando ferramentas de simulação de processos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 9897: Planejamento de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores*. Rio de Janeiro, 1987.
- CONAMA. *Resolução nº 430, de 13 de Maio de 2011*, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA; “Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.”; publicada no Diário Oficial da União em 16/05/2011; Brasília, DF.
- GERNAEY, K. V. et al. Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: state of the art. *Environmental Modelling & Software*, Environmental Sciences and Artificial Intelligence. v. 19, n. 9, p. 763–783, 1 set. 2004.

4. HENZE, M. et al. *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. Londres: IWA Publishing, 2000. IWA Scientific and Technical Report Series nº 9. 121 p.
5. HULSBEEK, J. J. W. et al. A practical protocol for dynamic modelling of activated sludge systems. *Water Science and Technology*, v. 45, n. 6, p. 127–136, 1 mar. 2002.
6. LI, H. (ed.). *Global Trends & Challenges in Water Science, Research and Management: A compendium of hot topics and features from IWA Specialist Groups*. 2ª Edição. Londres: International Water Association (IWA), 2016. 149 p.
7. MANNINA, G. et al. A practical protocol for calibration of nutrient removal wastewater treatment models. *Journal of Hydroinformatics*, v. 13, n. 4, p. 575–595, 1 out. 2011.
8. MELCER, H. et al. *Methods for wastewater characterization in activated sludge modeling*. Alexandria: Water Environment Research Foundation (WERF), 2003.
9. RIEGER, L. et al. *Guidelines for Using Activated Sludge Models*. IWA Task Group on Good Modelling Practice. Londres: IWA Publishing, 2013. 281 p.
10. SOUZA, C. C. Simulação da operação de uma estação de tratamento de esgotos por lodos ativados com o modelo IWA-ASM3 (Activated Sludge Model n. 3) a partir de dados de monitoramento. São Leopoldo, 2021. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2021.
11. TAKÁCS, I. et al. A dynamic model of the clarification-thickening process. *Water Research*, v. 25, n. 10, p. 1263–1271, 1 out. 1991.
12. VAN LOOSDRECHT, M. C. M. et al. Twenty-five years of ASM1: past, present and future of wastewater treatment modelling. *Journal of Hydroinformatics*, v. 17, n. 5, p. 697–718, 1 set. 2015.
13. VANROLLEGHEM, P. A. et al. A comprehensive model calibration procedure for activated sludge models. *Proceedings of the Water Environment Federation*, v. 2003, n. 9, p. 210–237, 1 jan. 2003.
14. YANG, C. et al. How much data is required for a robust and reliable wastewater characterization? *Water Science and Technology*, v. 79, n. 12, p. 2298–2309, 15 jun. 2019.