



XI SILUBESA

Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

28/03 a 02/04/2004 - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil

II-085 - IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA ESPECIALISTA DIFUSO EM REATOR SEQUENCIAL EM BATELADA NA REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA E NITROGÊNIO

Gilson Arimura Arima

Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professor no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Católica Dom Bosco. Gerente de Expansão da Empresa de Saneamento de Mato Grosso do Sul - Campo Grande MS / Brasil.

Luiz Fernando de Abreu Cybis⁽¹⁾

Professor, orientador, pesquisador e consultor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Doutor em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade de Leeds, Inglaterra.

Paulo Martins Engel

Professor, orientador, pesquisador do Instituto de Informática da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Doutor em Engenharia pela Universidade de Munique, Alemanha.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Bento Gonçalves, 9500 – Caixa Postal: 15029 – CEP: 91501-970 – Porto Alegre – RS. Telefone: (51) 3316-6668, Fax: (51) 3316-7291

 lfcybis@iph.ufrgs.br.

RESUMO

Os esforços de preservar os recursos hídricos crescem diariamente no mundo. Vários são os meios capazes de preservar e minimizar os impactos ambientais sobre este, tais como: a gestão ambiental integrada e a redução de cargas poluidoras lançadas nos corpos receptores.

Atualmente, os processos de remoção de nitrogênio e fósforo das águas residuárias mostram-se, ainda, pouco viáveis economicamente. A remoção biológica de matéria orgânica e nitrogênio em reator seqüencial em batelada (RSB), através da nitrificação e desnitrificação, é uma modalidade capaz de ser empregada com uma minimização dos impactos ambientais.

É neste cenário que este trabalho vem contribuir com o desenvolvimento de uma metodologia para implementação de um sistema especialista difuso na operação de RSB, em escala de bancada, com o objetivo de remover biologicamente a matéria orgânica e o nitrogênio das águas residuárias domésticas, utilizando parâmetros inferenciais, como: o potencial hidrogeniônico, o potencial de oxi-redução e o oxigênio dissolvido, onde a variável controlada é a duração das reações aeróbia e anóxica.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema Especialista, Lógica Difusa, RSB, Remoção Nitrogênio, Lodos Ativados.

INTRODUÇÃO

Os compostos de nitrogênio e de fósforo estão entre os poluentes que necessitam melhores e mais econômicos meios de tratamento. Estas substâncias estão presentes em maior ou menor quantidades, nas águas residuárias de origem

doméstica ou não. Se não removidas adequadamente, poderão causar uma série de problemas ambientais, entre os quais podemos citar: eutrofização, toxicidade a biota aquática e risco à saúde humana.

A remoção biológica das formas de nitrogênio está entre os processos capazes de serem empregados para minimizar os problemas acima mencionados. Os processos envolvidos são conhecidos como nitrificação e desnitrificação. Na nitrificação as bactérias autotróficas aeróbias fazem a oxidação de nitrogênio-amoniaco a nitrogênio-nitrito e a nitrogênio-nitrato. Estas formas de nitrogênio oxidadas serão utilizadas sequencialmente no processo de desnitrificação, por bactérias heterotróficas facultativas, na ausência de oxigênio livre, sendo reduzidas a nitrogênio gasoso (Van Haandel e Marais, 1999).

Os processos, mencionados acima, podem ser otimizados a partir de técnicas de automação e controle de processo. Afortunadamente, a tecnologia existente atualmente nos fornece as ferramentas necessárias para tanto. Os computadores, temporizadores, válvulas solenóides e sensores de potencial hidrogeniônico (pH), oxi-redução (REDOX), oxigênio dissolvido (OD), amônia, nitrato, entre outros, já existem há algum tempo.

A operação de processos biológicos para o tratamento de águas residuárias, utilizando-se, medições on-line, de parâmetros tais como pH, REDOX e OD, para o controle do processo de lodos ativados, irá possibilitar a otimização do mesmo, tanto em termos de eficiência na qualidade do efluente, quanto em termos de custos (Cybis, 1992).

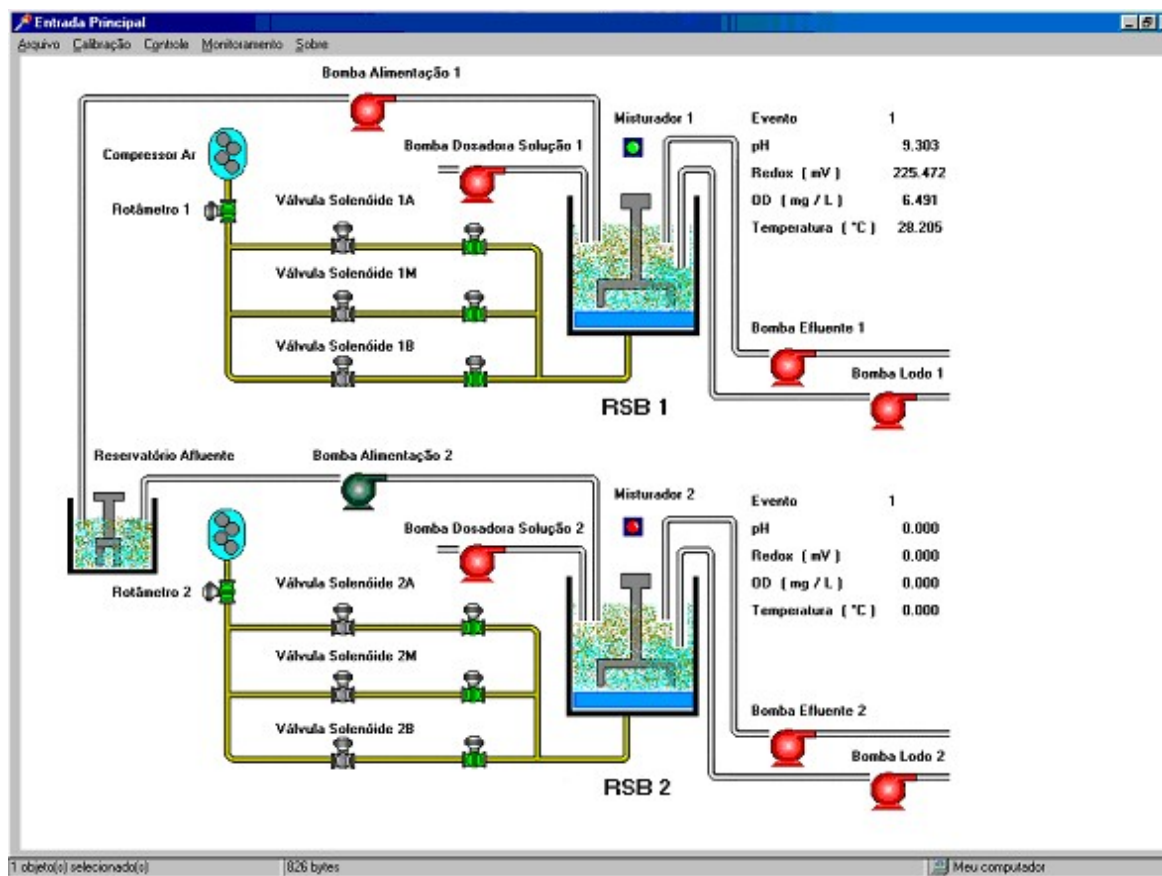
MATERIAIS E MÉTODOS

Para implementar o sistema especialista difuso nos processos biológicos da remoção da matéria orgânica, nitrificação e desnitrificação em RSB's foram desenvolvidas as etapas descritas a seguir.

Primeiro, foi necessário projetar e montar os reatores, em escala de bancada de forma a operar regular e confiavelmente, sob as condições de variações ambientais que ocorrem no processo de nitrificação e desnitrificação. Os reatores foram construídos em acrílico, em formato cilíndrico. Nas laterais foram instalados quatro orifícios, onde foram acopladas as rolhas de borrachas removíveis com as sondas, proporcionando a limpeza das mesmas.

Nos experimentos cada RSB foi operado com o volume mínimo antes do enchimento de 6 litros, e o volume máximo de 10 litros, portanto 4 litros foram alimentados, em cada reator. A figura 1 mostra o diagrama dos reatores.

Figura 1 – Diagrama dos reatores.



O pH foi medido com um eletrodo potenciométrico combinado, com encapsulamento de vidro e eletrólito tipo difusão. No REDOX foi utilizado um eletrodo combinado, com fio de platina, usando o Ag/AgCl como elemento de referência. O OD foi medido com sondas polarográficas de "Clark", com ânodo de Ag e cátodo de Pt, em eletrólito Na_3PO_4 , com membrana de ptfe. Para a temperatura foi utilizada o sensor com termoresistência, tipo PT100, com transmissor acoplado, produzindo uma corrente elétrica de 4 a 20 mA para a interface A/D. Os sinais das sondas de pH, REDOX e OD foram direcionados aos seus respectivos amplificadores/transmissores, na qual geravam correntes elétricas de 4 a 20 mA para a interface A/D.

A placa PCI-DAS 1200/Jr, 330 KHz de "clock", 12 bits, fabricada pela Computer Boards Corporation, foi utilizada como interface A/D. Integrada junto ao computador pessoal (PC), converteu os sinais analógicos dos sensores em sinal digital, compatível com o PC. Esta placa possui 16 entradas analógicas, sendo usada apenas 8 entradas de forma "single-ended".

O sistema de aquisição e controle foi constituído de um computador pessoal digital (PC), processador AMD K6 II, com 56 Mb de memória RAM, equipado com placas de interface de entrada analógica/digital (A/D) e de saída digital.

A placa DIO-24, fabricada pela ICP DAS Corporation, desempenhou como interface de saída digital. Integrada junto ao PC, comandou o acionamento dos motores de agitação, da bomba de ar, da bomba do afluente, da bomba do efluente e da bomba de lodo. Esta placa possui 8 entradas normalmente abertas e 8 entradas normalmente fechadas, sendo usadas somente as 8 entradas normalmente abertas. Como os acionamentos exigiram correntes elétricas superiores ao suportado pela placa DIO-24, foi instalada uma placa contatora auxiliar de relés.

O programa de supervisão e controle dos reatores sequenciais em batelada foi implementado em software, com o compilador Borland Delphi V 5.0, de forma a operar dois RSB's simultaneamente, com ciclos diferenciados de forma pré-estabelecida das fases ou ciclos automatizados pelo sistema especialista difuso, o que possibilitou a obtenção de durações das fases aeróbias e anóxicas de forma otimizada. Foram medidas as variáveis de pH, dos REDOX, dos OD e das temperaturas, indicando e registrando em meio magnético estas informações. A sua aplicação poderá ser feita em estudos com duração de longo prazo e curto prazo, como é o caso de ensaios de respirometria e toxicidade de efluente de águas residuárias.

As considerações a seguir são válidas para os estudos de longo prazo. A particularidade do estudo de curto prazo, restringe-se ao ajuste do sub menu configurações do reator.

Alguns requisitos estão incorporados no programa de supervisão e controle, como a continuação da fase do ciclo, até a sua completa duração, quando da interrupção da energia elétrica do experimento, tanto no caso do controle pré-estabelecido ou no sistema especialista difuso. Na segunda situação, após reiniciado o ciclo, se o controle identificar as condições notáveis para a interrupção da fase, este o realizará normalmente. É importante informar que a duração do ciclo do reator jamais é alterada em ambos os casos, assim na operação do sistema especialista difuso as diminuições, na duração das fases de reações, são transferidas para a última fase, o descanso.

Quando a programação do reator foi realizada através do sistema especialista difuso, durante todas reações do ciclo, não houve as condições notáveis para a interrupção da fase e, portanto, o ciclo foi realizado conforme a configuração pré-estabelecida das fases.

A Figura 1 mostra a tela principal com o diagrama geral dos reatores sequenciais em batelada, nos aspectos hidráulicos e eletromecânicos. Neste diagrama os conjuntos motores-bombas das alimentações, os conjuntos motores-bombas dos efluentes, os conjuntos motores-bombas dos lodos, os conjuntos motores dos misturadores e as válvulas solenóides apresentam os seus estados de funcionamento com a indicação de cor verde e de não funcionamento com a indicação de cor vermelha, permitindo a verificação instantânea das condições operacionais de acordo com a fase (evento) do ciclo do reator. A fase do ciclo (evento), as leituras instantâneas dos pH's, dos REDOX's, dos OD's e das temperaturas, nos respectivos reatores também são indicadas nesta tela.

O sistema especialista difuso adotado foi com base heurística (regras), visto que este pode ser amparado linguisticamente por um operador experiente. Neste determina-se o "singleton" controle de saída a partir das variáveis controladas "singletons" de entrada, tendo como inferência uma base de regras.

A arquitetura do sistema de controle difuso é composta pelos módulos de "fuzzificação", inferência, "defuzzificação" e o banco de dados. Sendo mais específico podemos definir os seguintes procedimentos: a obtenção dos valores "crisp" com o sistema de aquisição de dados, a normalização dos valores "crisp", a "fuzzificação", a inferência com base de regras, a "defuzzificação", a desnormalização dos valores "crisp" e os valores "crisp" de controle (DRIANKOV et al., 1996).

Inicialmente, foram desenvolvidas pesquisas para a escolha dos parâmetros inferenciais "crisp" mais adequados, onde destacaram o pH, o REDOX e o OD. As sondas de pH e REDOX são as mais versáteis podendo identificar as evoluções dos processos biológicos nas reações aeróbias e anóxicas, enquanto a sonda de OD fornece informações somente nas reações aeróbias. Os usos de sondas capazes de produzirem interferências elétrica ou magnéticas foram descartadas, como é o caso do parâmetro condutividade, pela necessidade de haver uma boa reprodutibilidade das informações e o experimento ser realizado em escala de bancada.

As diferenciais em relação ao tempo do pH (dpH_t e dpH_{t-1}) e o valor real do pH formaram as variáveis de entrada do sistema especialista difuso, para a fase da reação aeróbia. As variáveis de entrada do sistema especialista difuso, para a fase da reação anóxica, foram as diferenciais em relação ao tempo do REDOX e o valor real do OD.

A normalização transformou as variáveis de entrada para o universo de discurso. Para isto foram identificados os valores extremos de máximo e mínimo no domínio da variável "crisp", a partir destes valores buscou-se expressões algébricas capazes de transformar no universo de discurso [0,1].

Na "fuzzificação" das variáveis do sistema especialista difuso, para a fase da reação aeróbia, utilizou-se três conjuntos difusos triangulares, representando as variáveis lingüísticas de entrada. Na fase da reação anóxica aplicou-se, também, três conjuntos difusos triangulares para representar as variáveis lingüísticas de entrada.

Nas estruturações das implicações (regras de produção) difusas foram usadas dezoito expressões simbólicas para a fase da reação aeróbia e o mesmo número de expressões simbólicas para a fase da reação anóxica. A implicação empregada foi a de "Mandani", baseada na operação de intersecção. As implicações difusas foram do tipo: SE (dpH_t é NE) E (dpH_{t-1} é NE) E (pH é Grande) ENTÃO (saída é NA), onde NA significa ponto notável não encontrado.

A máquina de inferência abordada foi o "Modus Ponens" Generalizado, onde cada regra de produção foi individualmente disparada, no final os valores controles de saída, de cada regra agregada, formaram o valor controle geral da saída.

O método dos centros das áreas foi aplicado na "defuzzificação", onde o único valor de saída é obtido a partir dos

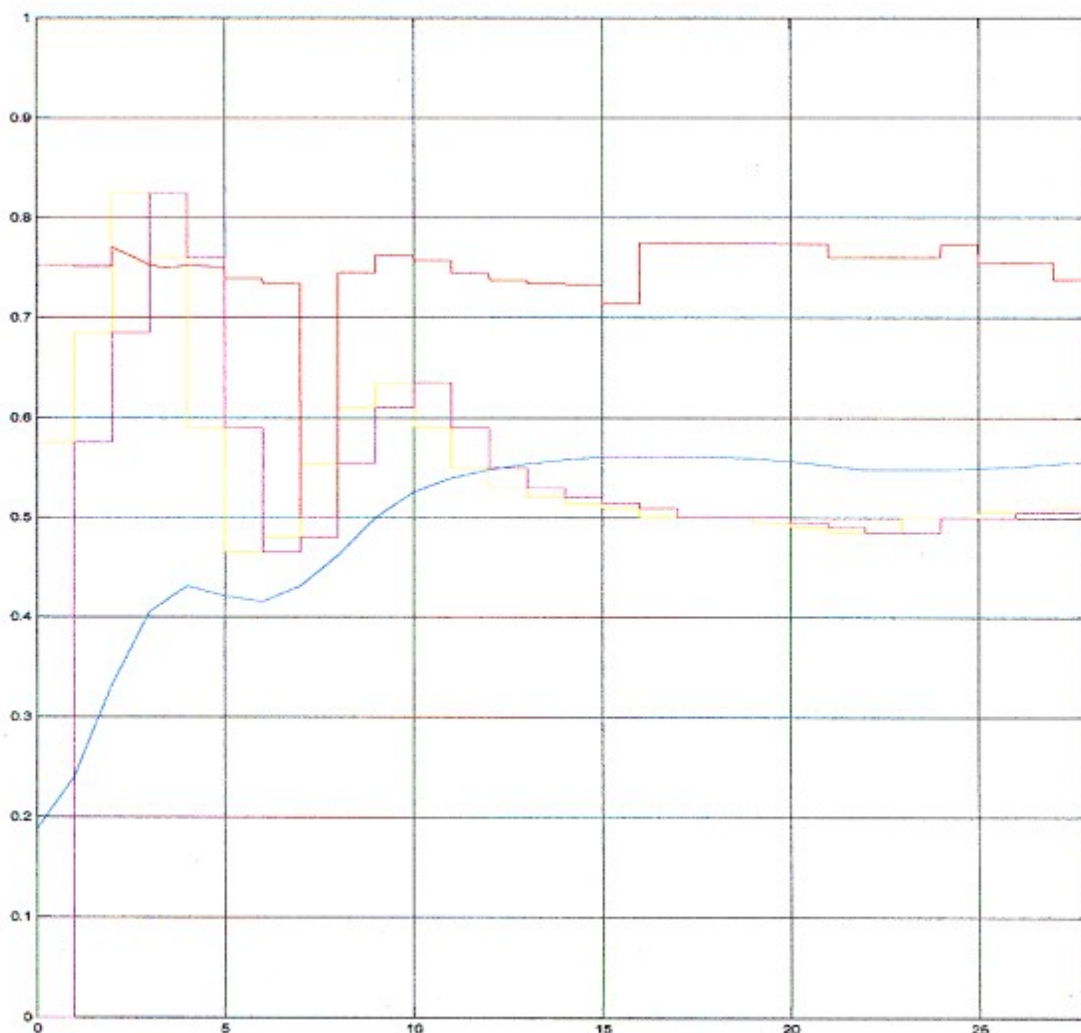
conjuntos difusos cortados.

A desnormalização converteu o valor de saída da "defuzzificação", para o domínio físico da variável "crisp" de controle (liga ou desliga dispositivo).

Para o sistema especialista difuso operar on-line, realizou-se a sintonia dos conjuntos e das implicações difusas em ciclos do RSB, na qual o processo de remoção da matéria orgânica, a nitrificação e a desnitrificação se estabeleceram.

A Figura 2 mostra o resultado da sintonia, da fase da reação aeróbia, no sistema especialista difuso. A linha cor turquesa, rosa, amarela e vermelha mostram, respectivamente, a evolução do pH, da diferencial do pH no instante t (dpH_t / dt), da diferencial do pH no instante $t-1$ (dpH_{t-1} / dt) e a vermelha o resultado da "defuzzificação". As simulações foram realizadas com o auxílio do MathWorks MATLAB, versão 12. Na curva em vermelho nota-se a identificação do ponto notável vale da amônia, que marca o fim da reação de nitrificação. No procedimento da normalização ocorre a segregação, na qual o ponto notável esta fora do domínio de $[0,7, 0,8]$.

Figura 2 – Sintonia da reação aeróbia com o pH e suas diferenciais em relação ao tempo.

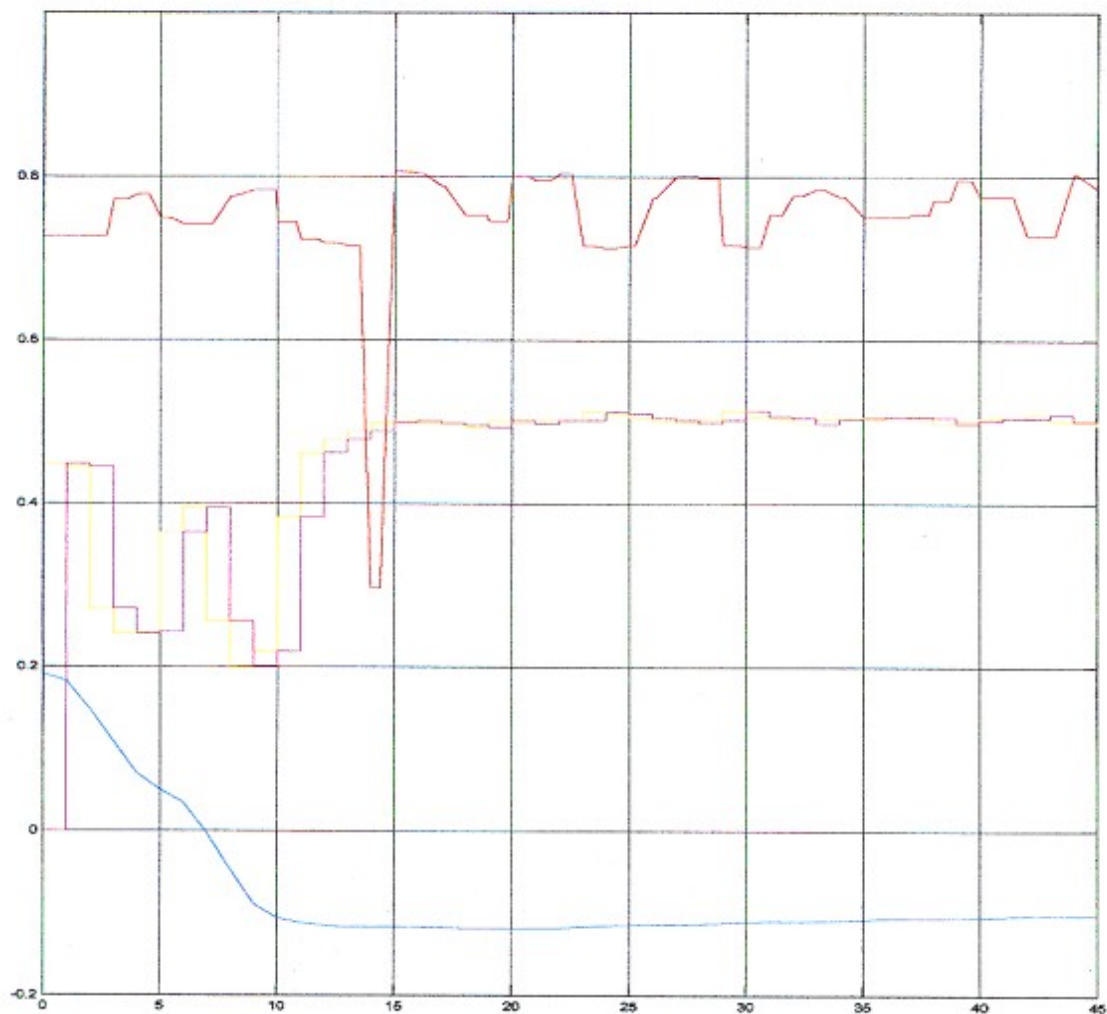


A Figura 3 mostra o resultado da sintonia, da fase da reação anóxica, no sistema especialista difuso. A linha cor turquesa, rosa, amarela e vermelha mostram, respectivamente, a evolução do REDOX, da diferencial do REDOX no instante t ($dORP_t / dt$), da diferencial do REDOX no instante $t-1$ ($dORP_{t-1} / dt$) e a vermelha o resultado da "defuzzificação". Na curva em vermelho nota-se a identificação das atividades sulfato-redutivas iniciadas (Plisson-Saune et al., 1996), que marca o fim da reação de desnitrificação. No procedimento da normalização ocorre a segregação, na

qual o ponto notável esta fora do domínio de $[0,6, 0,9]$.

Após a sintonia do sistema especialista difuso, as informações das simulações das fases de reação aeróbia e anóxica foram transportadas para o programa de supervisão e controle dos reatores seqüenciais em batelada, na qual operou o experimento por mais 15 ciclos, de 12 horas. No ciclo final foi realizado o perfil temporal do RSB, onde as determinações físico-químicas foram feitas conforme o Standard Methods (1995). As fases (eventos) que compuseram o ciclo foram: enchimento, reação aeróbia, reação anóxica, sedimentação, esvaziamento e descanso.

Figura 3 – Sintonia da reação anóxica com o REDOX, suas diferenciais em relação ao tempo.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da operação durante o período de 42 dias, com dois ciclos diários, mostraram eficiências máximas na remoção da matéria orgânica (DQO) de 97,6 %, com 98,8 % de nitrificação e 97,8 % de desnitrificação.

A redução na duração da fase aeróbia em relação a operação pré-estabelecida foi de 60,7 % e da fase anóxica foi de 48,5 %, proporcionando uma economia no custo energético da aeração, ao mesmo tempo que manteve um floco biológico de média a boa sedimentabilidade, com índice volumétrico de lodo na ordem de 100 mL/g.

A aplicação dos conjuntos difusos triangulares representou satisfatoriamente as incertezas das variáveis inferenciais.

A implicação de "Mandami" mostrou-se bem adaptada na formação das regras de produção.

O método de "defuzzificação" pelos centros das áreas comportou-se de forma eficaz, em termo de tempo de processamento, durante a aplicação do controle on-line.

CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO

Concluindo, pode-se comprovar: a atuação robusta do sistema especialista difuso, em relação as falhas, na detecção dos pontos de notáveis; o grande potencial do pH como parâmetro inferencial na fase aeróbia e do REDOX durante a fase anóxica; e a flexibilidade operacional, a simplicidade construtiva do RSB na remoção de nitrogênio.

Recomenda-se: a aplicação do sistema especialista difuso em RSB, em escala real, na remoção da matéria orgânica e nitrogênio; a pesquisa de parâmetros inferenciais para serem usados na remoção conjunta de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo; e o desenvolvimento de métodos para geração das regras de produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CYBIS, L. F. An Innovative Approach to the Control of Sequencing Batch Reactors Used for Nitrification and Denitrification. Leeds: Departament of Civil Engineering. University of Leeds, 1992. 240 p. Tese (Doutorado) - University of Leeds, Leeds, England,1992.
2. DRIANKOV, D.; HELLENDORF, H.; REINFRANK, M. An Introduction to Fuzzy Control. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 316 p.
3. PLISSON-SAUNE, S.; CAPDEVILLE,B.; MAURET M.; DEGUIN A.; BAPTISTE. Real-time control of nitrogen removal using three ORP bending-point: signification, control strategy and results. Water Science & Technology. v. 33, n. 1, 1996. p.275-280.
4. STANDARD Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19o Ed. Washington DC: American Public Health Association, 1995.
5. VAN HAANDEL, A. C., MARAIS, G. v. R. O Comportamento do Sistema de Lodo Ativado: teoria e aplicações para projetos e operações. Campina Grande: epgraf, 1999. 472 p.