

# Controle do Oxigênio Dissolvido no Tratamento Biológico de Esgoto Doméstico em um Reator Aeróbio usando um Controlador *FUZZY* \*

Paula Montenegro \* Anna Diva Lotufo \*  
Mara L. Martins Lopes \* Tsunao Matsumoto \*\*  
Danny Garcia \* Bruna Pardim \*

\* Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Laboratorio de Sistemas Inteligentes (SINTEL), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira-SP, BR (e-mail: paula.andrea@unesp.br)(e-mail: anna.lotufo@unesp.br).

\*\* Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira-SP, BR (e-mail: tsunao.matsumoto@unesp.br)

**Abstract:** Mathematical models that describe the behaviour of biological domestic wastewater treatment systems present high complexity, due to the number of differential equations and the number of phenomena that converge in the reactors, mainly to keep the oxygen concentration stable throughout the nitrification process and oxidation. Therefore, this paper proposes a fuzzy controller with a Mandani inference system to obtain the appropriate air injection control action of an Aerobic-type fluidized bed Pilot Reactor according to the water temperature, Dissolved Oxygen level (DO) measured after injection and the amount of Chemical Oxygen Demand (COD) present in the wastewater, thus leaving a simple model with an adequate response according to the conditions of the inflow into reactor.

**Resumo:** Os modelos matemáticos que descrevem o comportamento dos sistemas de tratamento biológico de águas residuais domésticas apresentam alta complexidade, devido à quantidade de equações diferenciais e à quantidade de fenômenos que convergem nos reatores, principalmente para manter a concentração de oxigênio estável durante todo o processo de nitrificação e oxidação das cargas contaminantes. Portanto, este artigo propõe um controlador Fuzzy utilizando um sistema de inferência Mandani para obter a ação apropriada do controle de injeção de ar em um Reator Piloto do tipo Aeróbio de leito fluidizado de acordo com a temperatura medida na água, o nível de Oxigênio Dissolvido (OD) medido após a injeção de ar e a quantidade de Demanda Química de Oxigênio (DQO) presente na água residual, obtendo assim um modelo simples com uma resposta adequada segundo as condições de entrada do afluente no reator.

**Keywords:** Wastewater; Fuzzy Controller; Aerobic Reactor; Dissolved Oxygen; Chemical Oxygen Demand; Air Injection.

**Palavras-chaves:** Controlador Fuzzy; Reator Aeróbio; Oxigênio Dissolvido; Demanda Química de Oxigênio; Injeção de Ar.

## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de tratamento biológico de águas residuais se apresentam como modelos matemáticos bastante complexos, devido às grandes interferências que podem acontecer no fluxo de afluente e na carga contaminante, além dos fatores externos como é a variação do clima ou da composição do esgoto doméstico. Embora as estações de tratamento na atualidade funcionem apesar dos fatores mencionados, é possível melhorar o controle de alguns

destes parâmetros para facilitar a operação e reduzir os custos de insumos e energia.

Os processos biológicos no tratamento são sistemas multi-variáveis, e nem sempre os modelos matemáticos existentes controlam todos os fatores que influenciam o comportamento dos microrganismos (Bequette (2006)). No tratamento biológico em reator aeróbio de leito fluidizado, como é o caso abordado neste trabalho, a concentração de Oxigênio Dissolvido (OD) é um dos parâmetros de maior importância dentro do sistema (Holenda et al. (2008)).

\* Os Autores gostariam de agradecer ao CNPq e a CAPES (Código de Financiamento 001) pelo apoio financeiro e à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista pelo apoio recebido.

Neste tipo de reatores a injeção de ar se realiza para prover de oxigênio o sistema, sendo de suma importância manter a concentração de OD em  $2mgL^{-1}$  na região

aeróbia do sistema, onde é oxidada a matéria orgânica carbonácea e acontece a nitrificação. Uma injeção de ar constante pode resultar na deficiência de OD em entradas de carga contaminante alta, em altas temperaturas ou em ambos casos, colocando em risco o funcionamento biológico adequado; como também pode representar um desperdício de energia em condições de cargas baixas e baixas temperaturas.

Em diferentes tratamentos de águas residuárias têm se adotado estratégias como aeração intermitente para minimizar os custos (Kim et al. (2000), Puta et al. (1999), Sanchez et al. (2002)), mas também têm sido abordadas pesquisas no desenvolvimento de modelos preditivos (Sanchez and Katebi (2003)), porém resultando em modelos matemáticos muito complexos. Também tem sido aplicado sistemas de controle PI e PID no controle da válvula de injeção do ar a fim de manter o OD constante dentro do reator (Blaszkiwicz et al. (2014)). Por outro lado, nos trabalhos de Belchior et al. (2012) e Belchior et al. (2010), utilizou-se um controlador Fuzzy do tipo adaptativo para o controle de oxigênio em um reator do tipo lodos ativados, respondendo às necessidades do reator, o qual foi testado para manter de forma estável o OD em valores de 1,2 e  $3mgL^{-1}$ .

Neste trabalho, utiliza-se como a estratégia de controle do OD um controlador Fuzzy que permita identificar a quantidade de oxigênio que deve ser injetada para um sistema de tratamento que foi operado previamente, para manter a concentração de OD em  $2mgL^{-1}$  na região aeróbia do sistema usando um reator aeróbio de leito fluidizado na depuração de água residuária doméstica (Ruano et al. (2010)), a fim de otimizar os processos biológicos na depuração da carga contaminante.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Reator Aeróbio de Leito Fluidizado

O Reator piloto do tipo Aeróbio de Leito Fluidizado, tem o objetivo de reduzir as cargas orgânicas carbonácea e nitrogenada presentes na água residuária doméstica. Este reator apresenta um meio trifásico composto pelo afluente, o ar injetado e a presença de partículas suporte que contém os microrganismos aderidos.

O funcionamento do reator apresenta três câmaras concêntricas, sendo as duas internas, onde ocorrem as reações de oxidação de matéria orgânica e a nitrificação, exigindo uma concentração de OD de  $2mgL^{-1}$ . O fornecimento de oxigênio se faz com injeção de ar no fundo do reator. É importante mencionar que a injeção de ar também cumpre com a função de gerar a força motriz que gera a recirculação do meio. As características da água residual tratada podem ser revisadas no trabalho de Montenegro (2017). A Fig. 1 indica o esquema do sistema de tratamento.

É importante mencionar que as características do afluente não permanecem constantes ao longo do dia, pois apresentam mudanças inesperadas de carga contaminante, OD e de temperatura. O fator climático é um papel importante no funcionamento biológico, uma vez que altera o coeficiente de transferência de oxigênio  $KLa$ , modificando

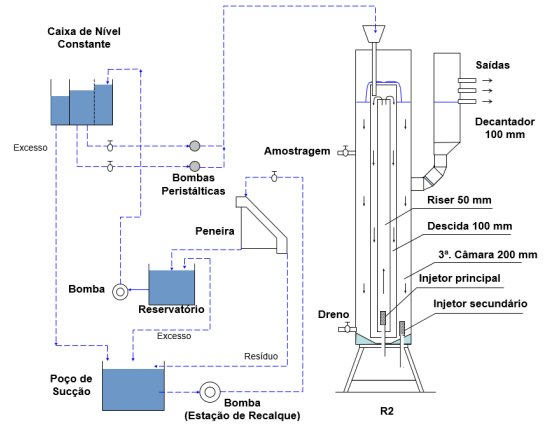


Figura 1. Esquema do Reator Piloto do tipo Aeróbio de leito fluidizado.

a taxa de transferência e, por conseguinte a concentração de oxigênio no reator (Vivekanandan et al. (2017)).

As cargas orgânica e nitrogenada representam uma demanda de oxigênio que deve ser suprido aos microrganismos para a assimilação do substrato e a transformação deste, além das atividades próprias das bactérias, o qual se traduz em consumo de oxigênio (Madigan et al. (2016)).

Por outro lado, o processo biológico de desnitrificação que se esperava ocorrer na terceira câmara (externa), devolve uma pequena quantidade de oxigênio ao sistema (Lin et al. (2009)). Para garantir que se apresente esta reação biológica é necessário garantir que a concentração nesta câmara se encontre abaixo de  $0.50mgL^{-1}$ .

O requisito de oxigênio corresponde às reações químicas e as relações estequiométricas dos processos biológicos que acontecem no sistema, que são: a assimilação do substrato, a geração de novas células, a nitrificação e a desnitrificação. A equação (1) descreve os consumos por demanda para sínteses no primeiro membro (à esquerda) e a respiração endógena no segundo membro (à direita) (von Sperling (2002)).

$$r(O_2) = a'Q(S_0 - S) + b'X_vV \quad (1)$$

$$a' = 1.46 - 1.42Y \quad (2)$$

$$b' = 1.42f_bK_d \quad (3)$$

Em que:

- $r(O_2)$ : Requisito de oxigênio ( $kgd^{-1}$ )
- $a'$ : Coeficiente estequiométrico ( $kgO_2kg^{-1}DQO$ )
- $b'$ : Coeficiente estequiométrico ( $kgO_2kg^{-1}SSV$ )
- $Q$ : Vazão do afluente ( $m^3d^{-1}$ )
- $S_0 - S$ : Substrato assimilado ( $gO_2m^{-3}$ )
- $X_v$ : Produção celular ( $kgSSV$ )
- $V$ : Volume útil do reator ( $m^3$ )
- $Y$ : Bateria heterotrófica responsável pela remoção da matéria orgânica,  $0.50gg^{-1}$
- $f_b$ : Taxa de deponimento celular (adimensional), 0.57
- $K_d$ : Típico por tipo de tratamento  $0.08d^{-1}$

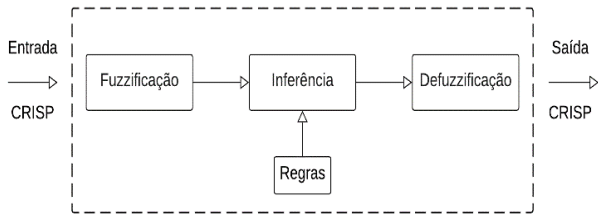


Figura 2. Representação de um sistema *Fuzzy*.

Outro consumo importante de oxigênio é o demandado no processo de nitrificação, este corresponde à relação da equação (4). No entanto, o processo de desnitrificação devolve ao sistema uma quantidade de oxigênio, conforme a equação (5).

$$r(O_2)_{NT} = 4.47QNT \quad (4)$$

$$b(O_2)_{NT} = 2.86QNT \quad (5)$$

Em que,  $r(O_2)_{NT}$ : Requisito de oxigênio por Nitrogênio oxidado ( $kgO_2d^{-1}$ )  $b(O_2)_{NT}$ : Oxigênio que retorna ao sistema por Nitrogênio removido ( $kgO_2d^{-1}$ ) NT: Nitrogênio total ( $kgm^{-3}$ )

As restrições de OD (de garantir  $2mgL^{-1}$  na região aeróbia e  $0.50mgL^{-1}$  na região anóxica) fazem com que OD seja um parâmetro de vigilância minuciosa e, portanto, seja um alvo de controle no processo.

Em vista ao anterior se propõe desenvolver um controlador Fuzzy que permita obter uma ação de controle na injeção de ar, como resposta a concentração de DQO, a temperatura do afluente e a concentração alvo na região aeróbia do reator ( $2mgL^{-1}$ ).

## 2.2 Controlador de Ar Fuzzy

Um sistema *Fuzzy* ou controlador *Fuzzy* é usado para aproximar o comportamento de um sistema que não tem funções analíticas ou relações numéricas. Ele tem um alto potencial para entender sistemas complexos, que em geral são novos sistemas ou que não foram testados (Ross (2005)). Estas abordagens são feitas através do uso de conjuntos *Fuzzy*, que apresentam o comportamento das variáveis Crisp (elementos do conjunto universo) em que o grau de associação de um elemento nesse conjunto é dado pela função de pertinência e é definido pela equação (6).

$$\mu_A(x) : U \rightarrow [0, 1] \quad (6)$$

Em que cada elemento  $x$  do conjunto universo  $U$  tem associado um valor de pertinência ao conjunto Fuzzy  $A$ . A ideia é fazer operações com os conjuntos das variáveis de entrada e obter a saída do sistema. Em geral, o sistema Fuzzy pode ser descrito em três estágios: (1) fuzzificação, (2) inferência e (3) defuzzificação (Piveli et al. (2009)), como pode ser visto na Fig. 2.

Para ser possível a construção de um controlador Fuzzy primeiro é necessário que os valores *Crisp* sejam transformados em termos qualitativos, como por exemplo: muito



Figura 3. Representação do modelo proposto.

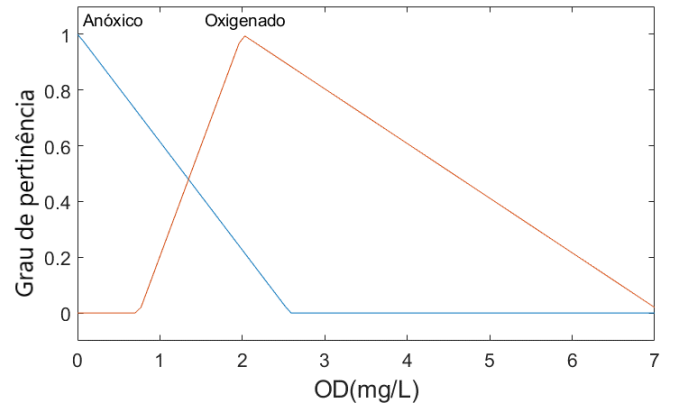


Figura 4. Funções de pertinências associada à variável de entrada OD.

baixo, baixo, normal, alto, muito alto, etc. Além disso deve-se determinar o grau de pertinência de cada variável utilizada (fuzzificação). Tipicamente na próxima etapa constrói-se uma base de regras que executa as operações utilizando os conjuntos nebulosos (inferência). Por fim a saída ou ação de controle produzida pela base de regras deve ser convertida em valores *Crisp* (defuzzificação).

A proposta desde trabalho é aplicar um controlador de ar *Fuzzy* para o tratamento de água residuária em um reator aeróbio de leito fluidizado que tem como propósito obter uma ação de controle na injeção de ar utilizando como entrada a concentração de DQO, a temperatura do afluente e principalmente OD sendo um parâmetro de vigilância alvo durante o processo. Para a construção do controlador foi utilizado o *Fuzzy Logic Toolbox*, do software *MATLAB*®. O modelo proposto é mostrado na Fig. 3

As três variáveis de entrada estão representadas por funções trapezoidais e triangulares (fuzzificação), pois são utilizadas para comportamentos de resposta repentina na saída do sistema, o que é justificado pela alteração dos valores das variáveis no decorrer de um dia. O intervalo da primeira variável de entrada, OD é de  $0mgL^{-1}$  a  $7mgL^{-1}$ , onde  $0mgL^{-1}$  significa ausência de oxigênio no reator e  $7mgL^{-1}$  o valor máximo de oxigênio que o reator pode atingir (saturação). Portanto, como o ponto ideal de OD do reator é  $2mgL^{-1}$ , ele é dividido por duas funções de pertinência: Anóxico e Oxigenado. O que significa que, acima desse valor o reator é oxigenado e a injeção de ar deve reduzir, e em caso contrário, quando o reator é anóxico, significa que é necessária a alteração da injeção de oxigênio no reator, aumentando-a acentuadamente. Estas duas funções devem ter seu valor máximo nos valores extremos de OD. A Fig. 4 mostra as funções de pertinência associadas à variável OD.

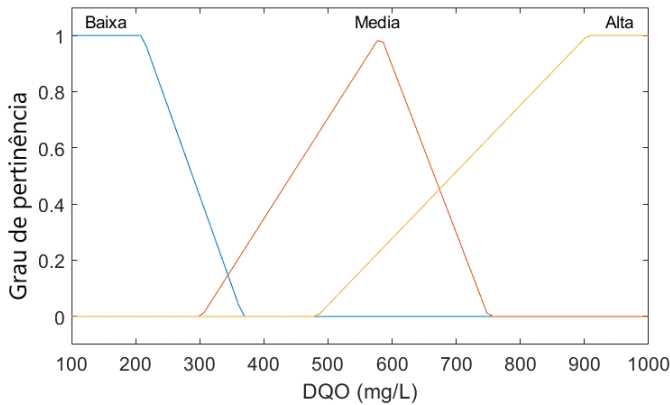


Figura 5. Funções de pertinências associada à variável de entrada DQO.

Em que:

- Anóxico:  $[0.00, 2.60]mgL^{-1}$
- Oxigenado:  $[0.20, 7.00]mgL^{-1}$

O intervalo da segunda variável de entrada, DQO mostrado na Fig. 5, varia de  $100mgL^{-1}$  a  $1000mgL^{-1}$ , seguindo os valores mínimo e máximo registrados no reator, respectivamente. Esses valores são distribuídos de acordo com a quantidade de matéria orgânica encontradas na água residual, estes são definidos como: Baixa, Média e Alta. É considerada uma DQO “Baixa” quando sua concentração é menor que  $380mgL^{-1}$ , isso ocorre quando a atividade dos habitantes da cidade é relativamente baixa, como por exemplo, durante a noite ou durante o horário de trabalho, porém estas características variam de uma cidade para outra.

Em que:

- Baixa:  $[100, 370]mgL^{-1}$
- Meia:  $[300, 750]mgL^{-1}$
- Alta:  $[497, 1000]mgL^{-1}$

Nota-se que este conjunto contém uma forma trapezoidal devido a ação de controle, e deve levar em consideração que para um valor menor que  $200mgL^{-1}$  no reator, a injeção de ar deve diminuir, a fim de manter as condições ideais de OD dentro deste. Além disso, a concentração diária de DQO no reator é dada por uma média de  $600mgL^{-1}$ , apresentados pelo conjunto “Meia”. O conjunto “Alta”, contém todos os valores para o caso em que as concentrações de DQO estão acima da média, com um grau de pertinência máximo quando a concentração chega a  $1000mgL^{-1}$ , requerendo uma maior injeção de ar quando a concentração de DQO aumenta. Estes valores podem ser atingidos durante as primeiras horas na manhã e no final da tarde, quando se espera o retorno das pessoas do trabalho para a casa, porém, como já mencionado, estas características podem mudar de uma cidade para outra.

Na Fig. 6, o intervalo da variável de entrada Temperatura é de  $14^{\circ}C$  a  $32^{\circ}C$ , que correspondem aos valores mínimo e máximo registrados em operação, respectivamente. A temperatura das águas residuais muda de acordo com os períodos do ano. Neste caso, o conjunto “Meia” contém todos os valores próximos à média que foram obtidos dos dados do reator, que é  $24^{\circ}C$ , compreendidos em um maior

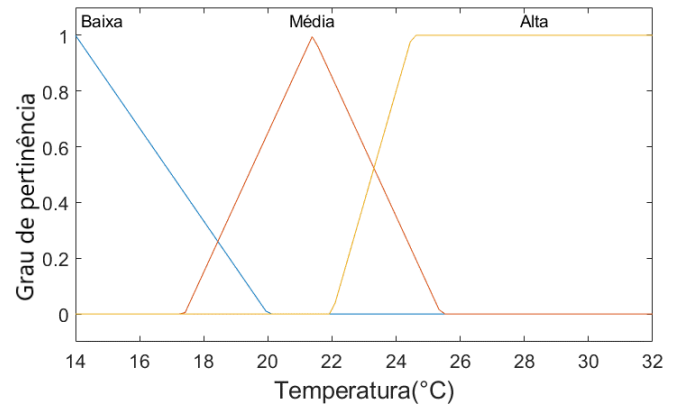


Figura 6. Funções de pertinências associada à variável de entrada Temperatura.

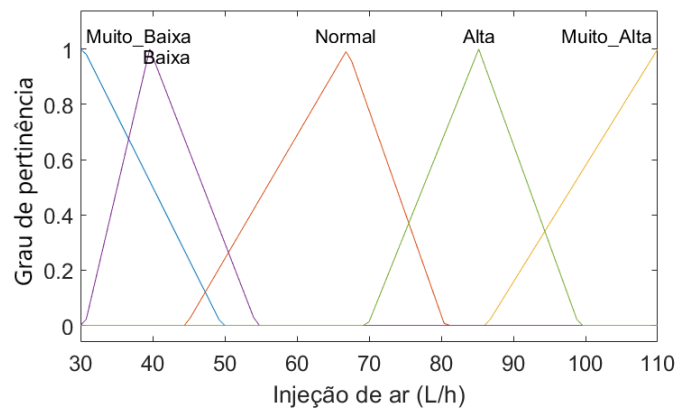


Figura 7. Funções de pertinências associada à variável de saída Injeção de ar.

tempo de operação do reator. Os elementos do conjunto universo são considerados no conjunto “Baixa” quando a temperatura é menor que  $18^{\circ}C$ , que ocorre no inverno quando a temperatura da cidade diminui, e valores acima de  $26^{\circ}C$  ocorrem quando a cidade está em período de verão.

- Baixa:  $[14, 20]^{\circ}C$
- Meia:  $[18, 26]^{\circ}C$
- Alta:  $[21, 32]^{\circ}C$

A variável de saída injeção de ar, tem um intervalo de  $30Lh^{-1}$  a  $110Lh^{-1}$ . Estes valores foram determinados segundo o modelo de requisito de oxigênio biológico conforme as equações (1), (4) e (5). A Fig. 7 indica o intervalo distribuído em cinco rótulos: Muito Baixa, Baixa, Norma, Alta e Muito Alta. Esses conjuntos são representados por funções trapezoidais e triangulares.

- Muito Baixa:  $[30, 50]Lh^{-1}$
- Baixa:  $[30, 55]Lh^{-1}$
- Normal:  $[45, 80]Lh^{-1}$
- Alta:  $[70, 100]Lh^{-1}$
- Muito Alta:  $[86, 110]Lh^{-1}$

O sistema de inferência utilizado neste trabalho, é o sistema Mandani em que as regras são baseadas na análise do sistema por meio da proposição *Fuzzy* do tipo: se

condição então ação. As proposições sempre podem ser expressadas na forma:  $x$  é  $A$ , na qual a variável  $x$  do conjunto universo está associada ao conjunto *Fuzzy*. No processo de análise tem-se a relação:

*Se  $x$  é  $A$  e  $y$  é  $B$  então  $z$  é  $C$ .*

Em que  $x$  e  $y$  são as variáveis de entrada do sistema,  $z$  a variável de saída e  $A$ ,  $B$  e  $C$  são os conjuntos *Fuzzy* previamente construídos.

Para formar o sistema de controle Fuzzy foram construídas 7 regras consideradas necessárias, definidas de acordo com o conhecimento, os dados Temperatura, DQO, OD e as análises de estudos sobre águas residuais feitos em laboratório. As regras são expressas da seguinte forma:

- (1) Se (OD é Anóxico) e (DQO é Baixa) então (Injeção de Ar é Muito Baixa);
- (2) Se (OD é Oxigenado) ou (DQO é Baixa) então (Injeção de Ar é Baixa);
- (3) Se (OD é Oxigenado) ou (DQO é Baixa) então (Injeção de Ar é Muito Baixa);
- (4) Se (OD é Oxigenado) e (DQO é Média) então (Injeção de Ar é Normal);
- (5) Se (OD é Anóxico) ou (DQO é Alta) então (Injeção de Ar é Meio Alta);
- (6) Se (Temperatura é Média) então (Injeção de Ar é Alta);
- (7) Se (Temperatura é Alta) então (Injeção de Ar é Muito Alta).

A saída nebulosa para as variáveis de ação de controle é convertida em um valor numérico *Crisp* por meio do processo que é chamado de defuzzificação. Existem diversas técnicas que realizam este processo e neste trabalho foi utilizado o método do centroide apresentado pela equação (7) Ross (2005).

$$C = \frac{\prod \mu_i(x) \cdot w_i}{\sum \mu_i(x)} \quad (7)$$

Em que  $m$  é a quantidade de regras,  $\mu_i$  o grau de pertinência da regra  $i$  e  $w_i$  a ação de controle da regra  $i$ .

### 3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados obtidos ao aplicar um controlador de Ar *Fuzzy* no tratamento de água residuária em um reator aeróbio de leito fluidizado é apresentado nesta seção, em qual foi analisado o cenário real de operação do reator, a fim de contrastar a diferença na operação do sistema sem controlador para uma vazão de ar constante, também analisando a mesma situação com o controlador *Fuzzy*.

Na Fig. 8 pode-se observar o comportamento do OD (na região aeróbia e anóxica do reator) na condição de operação com vazão de ar constante com os dados reais do funcionamento.

A situação de operação do reator indica que a concentração de OD na região aeróbia, a qual se esperava manter ao redor dos  $2 \text{ mgL}^{-1}$  foi bastante instável durante o tempo de operação, atingindo em média  $3.57 \text{ mgL}^{-1}$  e um desvio padrão de  $\pm 1.21 \text{ mgL}^{-1}$ . A mesma situação de operação foi encontrada na saída, obtendo-se uma concentração

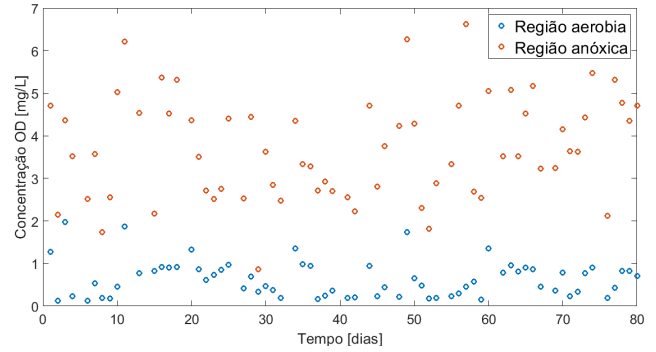


Figura 8. Comportamento do OD na operação do reator para uma vazão de ar constante.

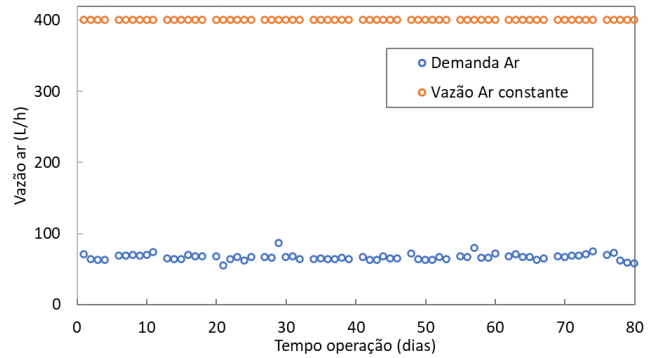


Figura 9. Requisito de Ar segundo as características de operação do reator.

média de  $1.73 \text{ mgL}^{-1}$  muito acima do valor esperado de  $0.50 \text{ mgL}^{-1}$ .

Estas situações do comportamento do OD no reator afetam o comportamento biológico e a eficiência do sistema. Foi confirmado que manter uma vazão constante de ar no reator com o objetivo de manter o leito fluidizado, altera diretamente as condições de ar, e que a quantidade de oxigênio se encontra acima das necessidades biológicas do sistema.

Analisando os resultados do controlador aplicando a técnica *Fuzzy*, foi possível verificar que as quantidades de ar requeridas ficaram abaixo da vazão usada durante a operação. A Fig. 9 indica a vazão de ar requerida para as mesmas condições de entrada de DQO e temperatura com a intenção de manter OD na região aeróbia em  $2 \text{ mgL}^{-1}$  para o mesmo tempo de operação do reator.

Como pode-se observar o ar requerido para manter o OD estável em  $2 \text{ mgL}^{-1}$  é em média de  $40.50 \text{ Lh}^{-1}$ , estando  $359 \text{ Lh}^{-1}$  abaixo da vazão de ar que foi usada durante a operação do reator, indicando assim que a vazão de  $400 \text{ Lh}^{-1}$  apesar de manter as partículas em suspensão e recirculação dentro do reator, está afetando os níveis de OD, impedindo a formação da região anóxica na câmara externa do reator ao manter o OD a  $1.23 \text{ mgL}^{-1}$  acima do máximo permitido nesta região, reduzindo assim o processo biológico de desnitrificação (Piveli et al. (2009)).

Para evitar os níveis altos de OD dentro do reator é importante reduzir a vazão de injeção, porém, isto pode resultar em um leito não fluidizado pela sedimentação das

partículas no fundo do reator, para evitar esta situação se propõe aplicar um controlador do fluxo de ar no injetor secundário do reator.

Os resultados apresentados indicaram que o controlador *Fuzzy* proposto responde muito bem segundo as condições de entrada do afluente no reator, indicando a quantidade de ar que deve ser injetada no sistema.

#### 4. CONCLUSÕES

O modelo *fuzzy* proposto contém uma alta eficiência em termos de controle de injeção de ar para manter no tubo interno uma concentração de oxigênio de  $2\text{mgL}^{-1}$ , de acordo com as quantidades de OD, DQO e temperatura da água residual.

Deve-se notar que, este modelo contém apenas sete regras no sistema de inferência, o que indica a simplicidade da modelagem, não exigindo equações complexas, modelos estocásticos ou sistemas de controle avançados para alcançar o objetivo. Além disso, este modelo pode ser modificado para qualquer reator do tipo Aeróbio de Leito Fluidizado, desde que um especialista acompanhe a modificação dos conjuntos *Fuzzy*. Este trabalho permite desenvolvimentos futuros no reator, onde se propõe adicionar um controlador na segunda injeção de ar para ressuspender as partículas suporte, que podem se sedimentar no fundo do reator após um período de operação.

Finalmente, os resultados obtidos indicam que o fluxo do reator não deve ser constante, pois em determinados momentos do dia é relativamente oxigenado, dependendo das variáveis de entrada naquele momento.

#### AGRADECIMENTOS

Os Autores gostariam de agradecer ao CNPq e a CAPES (Código de Financiamento 001) pelo apoio financeiro e à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista pelo apoio recebido.

#### REFERÊNCIAS

- Belchior, C., Araujo, R., and Landeck, J. (2010). Adaptive fuzzy control of the dissolved oxygen concentration in an activated sludge process. In *2010 IEEE 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2010)*, 1–7. IEEE.
- Belchior, C., Araujo, R., and Landeck, J. (2012). Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using stable adaptive fuzzy control. *Computers & Chemical Engineering*, 37, 152–162.
- Bequette, B. (2006). Snapshots of process control. *IEEE Control Systems Magazine*, 28, 13–16.
- Blaszkiewicz, K., Piotrowski, R., and Duzinkiewicz, K. (2014). A model-based improved control of dissolved oxygen concentration in sequencing wastewater batch reactor. *Studies in Informatics and Control*, 23(4), 323–332.
- Holenda, B., Domokos, E., Redey, A., and j. Fazakas. (2008). Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using model predictive control. *Computers and Chemical Engineering*, 32, 1270–1278.
- Kim, H., McAvoy, T., Anderson, J., and Hao, O. (2000). Control of an alternating aerobic-anoxic activated sludge system. part 2: Optimisation using a linearized model. *Control Engineering Practice*, 8, 279–289.
- Lin, Y., Tay, J., Liu, Y., and Hung, Y. (2009). Biological nitrification and denitrification processes. In *Biological treatment processes*, 539–588. Springer.
- Madigan, M., Martinko, J., Bender, K., Buckley, D., and Stahl, D. (2016). *Microbiologia de Brock-14ª Edição*. Artmed Editora.
- Montenegro, P. (2017). Desempenho de reator aeróbio de leito fluidizado com terceira câmara para remoção de nitrogênio. *Universidade Estadual Paulista (UNESP), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Campus de Ilha Solteira*.
- Piveli, R., Chernicharo, C., Mendoca, N., Neto, C.A., Jr, I.V., Almeida, P., Santos, M., et al. (2009). Nitrificação em reatores aeróbios com biomassa aderida. *Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção*.
- Putra, Reichl, H., G., and Franke, R. (1999). Model based optimisation of a waste water treatment plant. In *1999 European Control Conference (ECC)*, 1920–1925. IEEE.
- Ross, T. (2005). *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons.
- Ruano, M., Ribes, J., Gurkan, S., Seco, A., and Ferrer, J. (2010). A systematic approach for fine-tuning of fuzzy controllers applied to wwtps. *Environmental Modelling & Software*, 25(5), 670–676.
- Sanchez, A. and Katebi, M. (2003). Predictive control of dissolved oxygen in an activated sludge wastewater treatment plant. In *2003 European Control Conference (ECC)*, 2424–2429. IEEE.
- Sanchez, A., Katebi, M., and Johnson, M. (2002). Optimal control of an alternating aerobic-anoxic wastewater treatment plant. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(1), 411–416.
- Vivekanandan, B., Jeyannathann, K., and Rao, A. (2017). Sensitivity of effluent variables in activated sludge process. *Chemical Product and Process Modeling*, 13(2).
- von Sperling, M. (2002). Lodos ativados-princípios do tratamento biológico de águas residuárias. *Universidade Federal de Minas Gerais*, 4.