

## I-044 - ANÁLISE DE OD PARA RESERVATORIO ESTRATIFICADO UMA ABORDAGEM FUZZY

**Maria Patrícia Sales Castro**<sup>(1)</sup>

Engenheira Química e Mestre em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC).  
Doutoranda em Recursos Hídricos no DEHA/UFC.

**Patrícia Freire Chagas**<sup>(2)</sup>

Engenheira Civil da CAERN. Mestre e Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Gerente de Qualidade de produto e Meio Ambiente da CAERN -RN.

**Fernando José Araújo da Silva**<sup>(3)</sup>

Engenheira Civil, Mestre e Doutor em Saneamento Ambiental. Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC).

**Silvia Helena Lima dos Santos**<sup>(4)</sup>

Graduada em Matemática pela Universidade Estadual do Ceará (UECE). Mestre e Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Professora da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB).

**Rejane Felix Pereira**<sup>(5)</sup>

Engenheira Civil, Mestre e Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Professora da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB).

**Endereço**<sup>(1)</sup>: Endereço(1): Campus do Pici - Bloco 713 - CEP 60455-900- Brasil - e-mail: [patricia.sales@gmail.com](mailto:patricia.sales@gmail.com)

### RESUMO

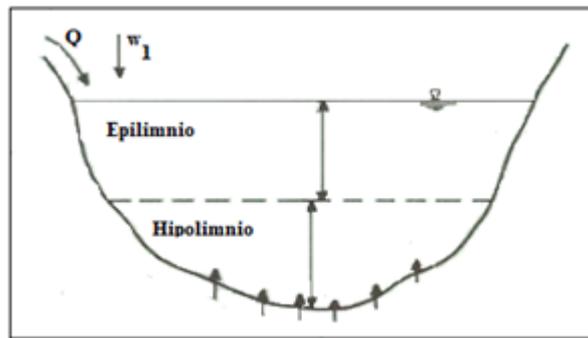
Este projeto tem como objetivo desenvolver uma metodologia que permita avaliar o comportamento da demanda bioquímica de oxigênio e do oxigênio dissolvido em um reservatório estratificado em cenários extremos de mudanças hidráulicas/hidrológicas, verificando quais são os parâmetros determinantes na dinâmica de um reservatório, assim como avaliar de que forma estas mudanças irão afetar os principais aspectos de qualidade de água do sistema como um todo. Para tal, foi utilizada modelagem matemática computacional estruturada para fornecer uma descrição matemática bem próxima da realidade. Foi criada uma metodologia com aplicação de lógica *fuzzy* para investigar o quão essas mudanças podem interferir no estado ótimo de operação de um reservatório, com o intuito de aprimorar a compreensão e a gestão dos recursos hídricos, através de diferentes simulações computacionais, sem a necessidade de demandar grandes gastos. Dentre as simulações realizadas, resultados mostraram que quanto maior a vazão de água na entrada, a concentração de OD aumenta, por consequência da diminuição de DBO. Em outro cenário, para lançamentos de carga orgânica maiores que  $W = 2.000 \text{ kg/dia}$ , mostrou que, devido a diminuição da concentração de oxigênio ocasionada pela degradação da matéria orgânica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Qualidade de água, Reservatório, OD.

### INTRODUÇÃO

O comportamento de um reservatório pode ser estudado levando em conta a estratificação, mas considerando somente duas camadas. Esta é uma forma intermediária de simplificação do problema que atende a estudos onde a estratificação de concentração não apresenta grandes gradientes ou este fator não é limitante (Li et al., 2016).

A Figura 1 mostra um reservatório dividido em duas camadas: epilímnio (superior) e hipolímnio (inferior).



**Figura 3: Turbidez em função do tempo durante teste na ETA-Morrinhos.**  
Fonte: Adaptado Esteves (2011)

Essa “divisão” ocorre quando as diferenças de temperatura geram camadas d’água com diferentes densidades, formando uma barreira física que impede que se misturem e se a energia do vento não for suficiente para misturá-las, o calor não se distribui uniformemente na coluna d’água, criando assim a condição de estabilidade térmica. Quando ocorre este fenômeno, o ecossistema aquático está estratificado termicamente. Os estratos ou camadas formadas frequentemente estão diferenciados física, química e biologicamente.

Para tal, foi criada uma metodologia através do uso de modelagem computacional com aplicação de lógica *fuzzy* para investigar como diferentes cargas de lançamento de poluente, diferentes vazões de entrada e diferentes temperaturas da água podem interferir no estado ótimo de operação de um reservatório, com o intuito de aprimorar a compreensão e a gestão dos recursos.

Desta forma, foi desenvolvida uma metodologia para avaliar o risco de falha de um reservatório estratificado em cenários extremos de mudanças hidráulicas/hidrológicas, verificando o comportamento do oxigênio dissolvido, que são parâmetros determinantes na dinâmica do sistema, assim como avaliar de que forma estas mudanças irão afetar os principais aspectos de qualidade de água do sistema como um todo.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Como o trabalho trata de uma investigação sobre o perfil de OD em reservatório estratificado, há a necessidade de se aplicar o balanço de massa nas diferentes camadas do corpo hídrico. Para isso, algumas hipóteses foram estabelecidas:

- O reservatório foi dividido em duas camadas, sendo a primeira, a região de superfície (camada 1 - epilimnio) e a segunda, compreendendo a camada de fundo (camada 2 - hipolimnio). Sendo válido ressaltar, que para cada uma dessas camadas possuem características próprias;
- Em cada camada, as concentrações são consideradas iguais em toda a extensão das mesmas, ou seja, o sistema é considerado bem misturado;
- É considerado que há lançamento apenas na camada superior. Não havendo entrada de afluente na camada inferior (lançamento igual a zero na camada 2);
- A vazão regularizada tem saída apenas pela camada superior;
- A área horizontal é considerada constante com a profundidade;
- A fotossíntese ocorre apenas na camada superior;
- A respiração ocorre nas duas camadas;
- As concentrações de DBO e OD são consideradas constantes no tempo, ou seja, o sistema, no que se refere a concentração, se encontra em estado estacionário;
- O volume do reservatório é considerado constante no tempo.

A nomenclatura utilizada para os parâmetros calculados através do programa foi: DBO 1 para a demanda bioquímica na camada 1, DBO2 para a demanda na camada 2, OD1 para a concentração de oxigênio dissolvido na camada 1 e finalmente, OD2 para a concentração de oxigênio na camada 2.



A simulação do comportamento de DBO e OD em lagos e reservatórios através de um modelo em duas camadas utiliza a formulação mostrada em Thomann & Müller (1987) acrescida da equação para o OD.

Para DBO1 e DBO2, os valores “fuzzyficados” são expressos por:

$$\tilde{L}_1 = \frac{\frac{\tilde{W}_1}{\tilde{P}_1} + \frac{\tilde{E}'_{12}}{\tilde{P}_1 \tilde{P}_2}}{1 - \frac{\tilde{E}'_{12}}{\tilde{P}_1 \tilde{P}_2}} \quad (eq1)$$

$$\tilde{L}_2 = \frac{\tilde{W}_2}{\tilde{P}_2} + \frac{\tilde{E}'_{12}}{\tilde{P}_2} \left[ \frac{\frac{\tilde{W}_1}{\tilde{P}_1} + \frac{\tilde{E}'_{12}}{\tilde{P}_1 \tilde{P}_2}}{1 - \frac{\tilde{E}'_{12}}{\tilde{P}_1 \tilde{P}_2}} \right] \quad (eq2)$$

Onde:

$L_1$  = concentração de DBO na camada 1

$L_2$  = concentração de DBO na camada 2

$W_1$  = carga total que entra no reservatório, definido por:

$$W_1 = q_w L_w + Q_{in} L_{in}$$

$$P_1 = Q_{in} + q_w - E_v + E'_{12} - V_1 K_1$$

$Q_{in}$  = vazão de entrada

$q_w$  = taxa de lançamento de poluentes

$E_v$  = vazão evaporada

$E'_{12}$  = coeficiente de dispersão volumétrica 1, definido por  $E'_{12} = \frac{A_{12} E_{12}}{z_{12}}$

$A_{12}$  = áreas entre as camadas

$z_{12}$  = distância vertical do centro da camada 1 até igual distância na camada 2

$V_1$  = volume de água na camada 1

$k_1$  = decaimento de DBO na camada 1



Para OD1 e OD2, os valores *fuzzyficados* são expressos por:

$$\tilde{C}_1 = \frac{\frac{\tilde{z}_1}{\tilde{PO}_1} - \left[ \frac{\tilde{z}_2}{\tilde{E}_{12}} + \frac{\tilde{k}_{d2} \tilde{V}_2 \tilde{L}_2}{\tilde{E}'_{12}} \right]}{1 - \frac{\tilde{E}_{12}'}{\tilde{PO}_1}} \quad (eq3)$$

$$\tilde{C}_2 = \frac{\frac{\tilde{z}_1}{\tilde{PO}_1} - \left[ \frac{\tilde{z}_2}{\tilde{E}_{12}} + \frac{\tilde{k}_{d2} \tilde{V}_2 \tilde{L}_2}{\tilde{E}'_{12}} \right]}{1 - \frac{\tilde{E}_{12}'}{\tilde{PO}_1}} - \frac{\tilde{z}_1}{\tilde{z}_2} - \frac{\tilde{k}_{d2} \tilde{V}_2 \tilde{L}_2}{\tilde{E}'_{12}} \quad (eq4)$$

Em que:

- $C_1$ =Concentração de oxigênio dissolvido na camada 1
- $C_2$ = concentração de oxigênio dissolvido na camada 2
- $z_1=Q_{in}C_{in}+KLAC_s+pV_1-RV_1$
- $PO_1=Q_{in} +q_w-Ev+KLA+E'_{12}$
- $Q_{in}$ =vazão de entrada
- $C_{in}$ =concentração de OD na entrada
- $K_L$ =coeficiente de oxigenação
- $C_s$ =concentração de saturação do OD
- $A$ =área horizontal da camada
- $P$ =taxa de produção
- $R$ =taxa de respiração
- $K_{d1}$ =coeficiente de decaimento

Para esta pesquisa, foi desenvolvido um programa computacional com a finalidade de resolver as equações diferenciais que compõe o modelo matemático. Este programa, escrito em linguagem FORTRAN, permite calcular os campos de concentração de DBO e OD, em forma de funções de pertinências, bem como permite calcular as funções marginais de segurança ao longo do reservatório.

## RESULTADOS

Para este cenário, estabeleceu-se que a vazão de entrada é igual a vazão de saída ( $Q_e=Q_s$ ) e que a vazão evaporada é zero ( $Q_{ev}=0$ ), a fim de verificar como os parâmetros se comportam quando o nível do reservatório não varia com o tempo. A princípio, foram consideradas as seguintes condições para as simulações (Tabela 1):

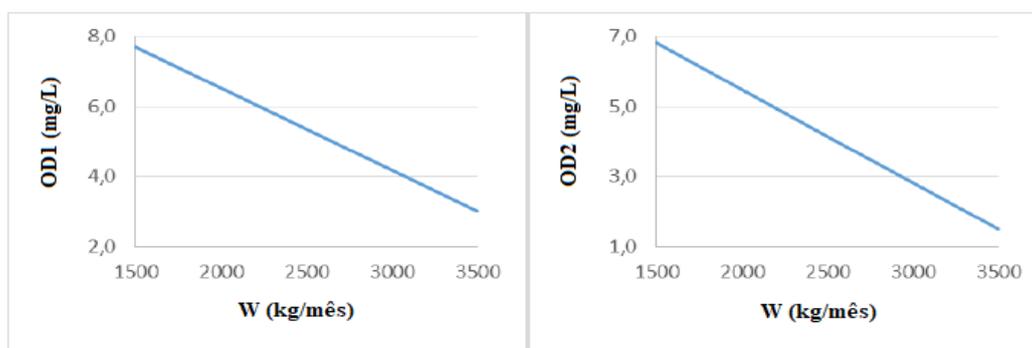
**Tabela 1 – Valores utilizados para as simulações neste cenário**

PARAMETRO	SÍMBOLO		UNIDADE
Pertinência	$\mu$	1	
Vazão de entrada	$Q_e$	15.000	m <sup>3</sup> /mês
Vazão de saída	$Q_s$	15.000	m <sup>3</sup> /mês
Vazão de evaporada	$Q_{ev}$	0	m <sup>3</sup> /mês
Carga de poluente	$W$	2.500.000	g/mês
Temperatura	$T$	27	°C
Velocidade do vento	$u$	4,5	m/s
Coefficiente de dispersão	$E$	300	m <sup>2</sup> /mês

Para a simulação, variou-se cada um desses parâmetros por vez ( $W$  e  $T$ ), mantendo-se os demais fixos e observando como cada variável é capaz de interferir no sistema. As concentrações utilizadas para a realização de análise gráfica foram aquelas que apresentaram maior pertinência ( $\mu = 1$ ), pois são as mais prováveis de ocorrer no sistema aqui proposto.

### Lançamento de carga poluente ( $W$ )

O objetivo desta simulação foi verificar o perfil de OD de acordo com a variação do lançamento de cargas poluentes ( $W$ , em kg/mês) na camada 1 do reservatório. O lançamento variou de 1500 a 3500 kg/mês, mantendo-se os demais parâmetros fixos, encontra-se os seguintes valores de OD para as respectivas camadas (Figura 2)



**Figura 2: Perfil de OD para diferentes lançamentos, nas camadas 1 e 2.**

Fonte: Autor(2018)

Nota-se que na camada 1, o OD vai caindo com o aumento do lançamento de carga poluente, pois a matéria orgânica presente faz com que espécies decompositoras consumam o oxigênio disponível na água para realizar suas funções metabólicas. Com lançamentos a partir de  $W = 1500$  kg/mês, para as duas camadas, verifica-se a diminuição de oxigênio, na camada 1, a concentração cai de 8,0 para 3,0 mg/L, enquanto que na camada 2, o OD passa de 7,0 para aproximadamente 1,0 mg/L.

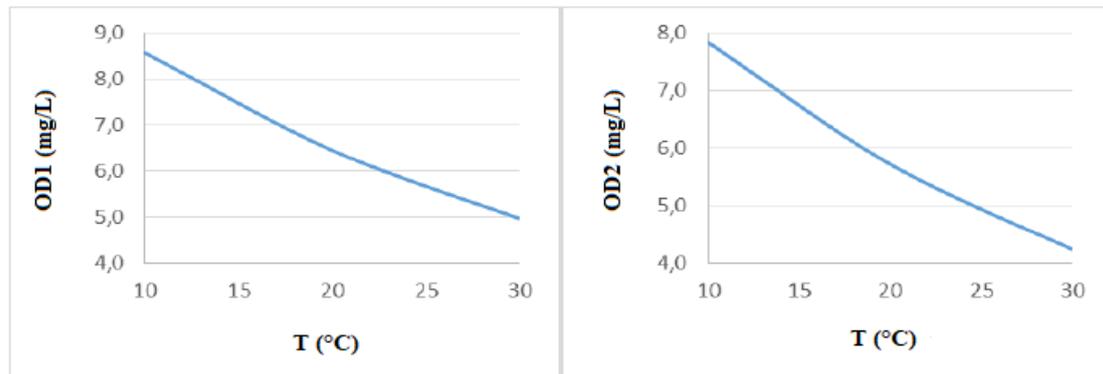
Espera-se que concentração de OD na camada inferior seja sempre menor que a concentração encontrada na camada superior, pois esta região é pouco afetada por processos de produção e bastante afetada por processos de respiração e degradação de matéria orgânica de fundo, fazendo com que o oxigênio presente seja consumido.

De acordo com Petruf, Sacco & Lucio (2011), ambientes com baixa concentração de oxigênio dissolvido proporcionam um habitat com características adversas para a fauna e a flora aquática. Nestas condições pode

ocorrer mortandade de peixes e invertebrados. Além disso, a amônia que se origina da atividade bacteriana, pode ser liberada dos sedimentos para a água sob condições de baixa concentração do oxigênio, deteriorando ainda mais a qualidade da água (Lee, 2012).

#### *Temperatura da água (T)*

O objetivo desta simulação foi verificar o perfil de concentração de OD de acordo com a variação da temperatura (T, em °C) da água do reservatório. A temperatura variou de 10 a 30°C, mantendo-se os demais parâmetros fixos, encontra-se os seguintes cenários para OD nas suas respectivas camadas (Figura 3).



**Figura 3: Comportamento do OD para temperaturas, nas camadas 1 e 2.**

Fonte: Autor (2018)

Para OD1, a concentração saiu de 8,5 mg/L e caiu até cerca de 5,0 mg/L para a maior temperatura simulada, que foi de 30°C. Para OD2, observa-se concentrações ainda mais baixas (próximas de 4,0 mg/L), pois como a concentração deste parâmetro tende a ser menor na camada inferior, com o aumento da temperatura, essa concentração diminui ainda mais.

Desta forma, para as duas camadas, nota-se que a temperatura tem interferência direta na concentração de oxigênio dissolvido, de modo que quanto maior a temperatura, menor a concentração de oxigênio na água, pois sabe-se que a solubilidade dos gases em água é inversamente proporcional à elevação da temperatura.

## **CONCLUSÕES**

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

A metodologia proposta é capaz de produzir resultados satisfatórios. Para lançamentos maiores que  $W=2.000$  kg/dia na camada 1, o risco de falha aumentou significativamente, devido a diminuição da concentração de oxigênio ocasionada pela degradação da matéria orgânica. Na camada 2, mesmo para os menores valores de carga simulados, esta intensidade de lançamento já foi capaz de interferir nas concentrações de oxigênio, diminuindo-as ainda mais. E para os lançamentos maiores que  $W= 70$  kg/dia, foram observadas condições de anoxia.

A temperatura exerce influência direta sob a solubilidade do oxigênio na água, sendo a partir de 20°C interfere de forma significativa no risco de falha do sistema, apresentando riscos maiores que 50%.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores gostariam de expressar um agradecimento especial ao professor Dr. Raimundo Oliveira de Souza (*in memoriam*) pelo seu valioso apoio e ajuda na produção deste artigo além da compreensão e amizade a nós dispensada. Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.



## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. COSTA, E. R. H. Estudo de Polímeros Naturais como Auxiliares de Flocculação com Base no Diagrama de Coagulação do Sulfato de Alumínio. São Carlos. 1992. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1992.
2. COSTA, E. R. H. Metodologia para o uso combinado de polímeros naturais como auxiliares de coagulação. XVII CONGRESSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA. 1993. Anais. Natal, RN, 1993.
3. COSTA, E. R. H. Aumento da capacidade de estações de tratamento de água através da seleção de coagulantes e auxiliares de flocculação especiais. XVIII CONGRESSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL 1995. Anais. Salvador, BA, 1995.
4. DI BERNARDO, L. Métodos e Técnicas de tratamento de Água - V. I e II. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, Brasil, 1993.
5. DI BERNARDO, L. Comparação da Eficiência da Coagulação com Sulfato de Alumínio e com Cloreto Férrico - Estudo de Caso - VI SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 1994. Anais. Florianópolis, 1994.
6. DI BERNARDO, L. Comunicação pessoal sobre Técnicas de Tratabilidade. 1993/1995.