

*PRINCÍPIOS DO TRATAMENTO BIOLÓGICO  
DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS*

VOLUME 4

4ª edição revista e ampliada

---

# *Lodos Ativados*

---

**MARCOS VON SPERLING**

Belo Horizonte  
Editora UFMG  
2016

© 1997, 2002, Marcos von Sperling  
© 2012, Editora UFMG, da 3. ed.  
© 2016, Editora UFMG, da 4. ed. rev. e ampl.

Este livro ou parte dele não pode ser reproduzido por qualquer meio sem autorização escrita do Editor.

V9481 von Sperling, Marcos  
Lodos ativados / Marcos von Sperling. 4. ed. rev. e  
ampl. – Belo Horizonte : Editora UFMG, 2016.  
  
461 p.: il. – (Princípios do tratamento biológico de águas  
residuárias ; v. 4)  
  
Inclui bibliografia.  
ISBN: 978-85-423-0173-1  
  
1. Águas residuais – Purificação – Tratamento biológico.  
2. Águas residuais – Purificação – Processo de lodo ativado.  
I. Título. II. Série.

CDD: 628.3

CDU: 628.3

Elaborada pela DITTI – Setor de Tratamento da Informação  
Biblioteca Universitária da UFMG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

REITOR Jaime Arturo Ramírez

VICE-REITORA Sandra Regina Goulart Almeida

EDITORA UFMG

DIRETOR Flavio de Lemos Carsalade

VICE-DIRETOR Roberto Alexandre do Carmo Said

CONSELHO EDITORIAL Flavio de Lemos Carsalade (presidente)

Danielle Cardoso de Menezes, Eduardo de Campos Valadares, Êlder Antônio Sousa Paiva, Fausto Borém,  
Maria Cristina Soares de Gouvêa, Roberto Alexandre do Carmo Said

COORDENAÇÃO EDITORIAL Camila Figueiredo

DIREITOS AUTORAIS Anne Caroline Silva e Maria Margareth de Lima

COORDENAÇÃO DE TEXTOS Lira Córdova

REVISÃO DE PROVAS Beatriz Trindade

PRODUÇÃO GRÁFICA Warren Marilac

PROJETO GRÁFICO E CAPA SEGRAC

EDITORA UFMG

Av. Antônio Carlos, 6.627 CAD II Bloco III

Campus Pampulha 31270-901 Belo Horizonte-MG Brasil

Tel. +55 31 3409-4650 Fax +55 31 3409-4768

www.editoraufmg.com.br editora@ufmg.br

*À  
família Guerra de Moura*



## Prefácio da Quarta Edição

---

Ao longo dos 18 anos de existência de *Lodos ativados*, tivemos a grata satisfação de vê-lo largamente utilizado, o que motivou várias reimpressões e quatro edições. Vimos também o livro ganhar uma edição em inglês, pela International Water Association, e uma em espanhol, pela Editora da Universidad Nariño, na Colômbia. A partir da terceira edição, passou a ser integralmente produzido pela Editora UFMG. É um grande orgulho prosseguir nessa parceria, uma vez que todos os volumes da série Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias são feitos por essa prestigiosa editora.

O processo de lodos ativados completou seu centenário em 2014 e continua avançando tanto na expansão do número de variantes quanto na compreensão do sistema, principalmente nos aspectos de microbiologia e modelagem matemática. No entanto, a proposta desta quarta edição é apresentar apenas os aspectos fundamentais do processo, sem entrar em detalhamentos que alterem sua ideia básica de ser um livro de compreensão mais fácil. Esta edição mantém boa parte do texto da anterior, mas atualiza alguns conceitos e dados, à luz da literatura mais recente, sempre preservando a simplicidade e a informação já consolidada.

É importante ressaltar alguns pontos que fizeram parte dos prefácios das edições anteriores. Este é o volume 4 da série Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, cuja conceituação básica foi apresentada no volume 1, *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*, no qual se ressalta a importância dedicada aos fundamentos e conceitos, por acreditar que, sem eles, o profissional não pode exercer a prática de uma forma totalmente consciente, independente e crítica. Pelo esforço dedicado aos aspectos didáticos, acredita-se que esta série tenha como primeiro público os estudantes de cursos de extensão e pós-graduação, mas também com a possibilidade de alcançar cursos de graduação. Verifica-se que a quantidade de informações apresentada tem sido útil a profissionais da área de Engenharia Sanitária e Ambiental que desejam ser introduzidos nos aspectos básicos do tratamento de esgotos.

Os dois volumes iniciais da série centram-se nos aspectos introdutórios e fundamentais do tratamento de esgotos. A partir do terceiro, abordam-se sistemas de tratamento específicos.

Neste volume apresentam-se conceitos, dados e informações relativos à teoria e à prática, cobrindo projeto e operação, do sistema de lodos ativados. Descrevem-se os princípios básicos da remoção da matéria carbonácea e dos nutrientes nitrogênio e fósforo, da sedimentação e da aeração. Em termos de dimensionamento, examinam-se os reatores de fluxo contínuo, os decantadores secundários, os sistemas com

remoção biológica de nutrientes, os seletores, os reatores de operação intermitente e o sistema de lodos ativados como pós-tratamento de efluentes anaeróbios. Com relação à operação, abordam-se as principais estratégias de controle operacional, o monitoramento e a solução de problemas operacionais.

Em virtude da maior complexidade do processo de lodos ativados, comparado a outros processos de tratamento de esgotos, este volume possui um maior grau de aprofundamento que os outros da série. Além disso, para cada unidade, apresenta-se um exemplo completo de dimensionamento, a fim de obter as grandes dimensões para alocação no terreno, bem como uma estimativa das características do efluente a ser lançado no corpo receptor. Como em todos os volumes da série, não há grande preocupação com o detalhamento dos projetos, para o qual há outras referências disponíveis, além de catálogos de fabricantes.

Por fazer parte de uma série, *Lodos ativados* pressupõe uma continuidade temática com os volumes que o precederam, principalmente o 1 e o 2. No entanto, procurou-se dar certa autossuficiência, de forma a reduzir o número de consultas cruzadas aos demais.

Retomando um comentário do prefácio do volume 1, deve-se encarar Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias apenas como uma contribuição, dentro de um esforço mais amplo, abraçado por todos nós, de implantar no país uma infraestrutura sanitária que permita a melhoria das condições ambientais e da qualidade de vida da nossa população.

Considero como totalmente bem-vindos comentários e sugestões para a melhoria deste volume ou de quaisquer outros da série.

Finalmente, gostaria de agradecer a todos aqueles que contribuíram e que prosseguem contribuindo para a realização desta série. No âmbito individual, um agradecimento a todos que se motivaram, juntamente comigo, a dar forma e conteúdo aos livros. No institucional, ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (DESA-UFMG) e à Editora UFMG.

**Marcos von Sperling**  
Julho 2016

---

# SUMÁRIO

## CAPÍTULO 1

### Introdução

---

|                     |    |
|---------------------|----|
| 1. Introdução ..... | 11 |
|---------------------|----|

## CAPÍTULO 2

### Variantes do processo de lodos ativados

---

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Introdução .....                                                             | 15 |
| 2.2. Lodos ativados convencional (fluxo contínuo).....                            | 16 |
| 2.3. Aeração prolongada (fluxo contínuo) .....                                    | 18 |
| 2.4. Fluxo intermitente (reatores sequenciais por batelada) .....                 | 20 |
| 2.5. Lodos ativados para o pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios ... | 22 |
| 2.6. Outras configurações do processo de lodos ativados.....                      | 25 |
| 2.7. Remoção biológica de nutrientes .....                                        | 27 |
| 2.8. Tratamento do lodo .....                                                     | 28 |
| 2.9. Comparação entre as principais variantes do processo de lodos ativados.....  | 31 |

## CAPÍTULO 3

### Princípios da remoção da matéria carbonácea em sistemas de lodos ativados de fluxo contínuo

---

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. O reator biológico e a recirculação de sólidos .....                                      | 35 |
| 3.2. Representação do substrato e dos sólidos .....                                            | 39 |
| 3.3. Produção de sólidos biológicos.....                                                       | 44 |
| 3.4. Tempo de detenção hidráulica e tempo de residência celular.....                           | 49 |
| 3.5. Tempo de varrimento celular .....                                                         | 54 |
| 3.6. Relação alimento/microrganismo .....                                                      | 56 |
| 3.7. Relação entre a taxa de utilização do substrato (U) e a idade do lodo ( $\theta_c$ )..... | 60 |
| 3.8. Distribuição dos sólidos no tratamento.....                                               | 64 |
| 3.9. Concentração de sólidos em suspensão no reator .....                                      | 74 |
| 3.10. Cálculo do volume do reator.....                                                         | 76 |
| 3.11. Remoção de substrato .....                                                               | 79 |
| 3.12. DBO solúvel e DBO total do efluente .....                                                | 82 |
| 3.13. Estabilização do lodo no reator.....                                                     | 86 |

|                                                     |     |
|-----------------------------------------------------|-----|
| 3.14. Recirculação do lodo ativado.....             | 89  |
| 3.15. Produção e retirada do lodo excedente .....   | 95  |
| 3.16. Requisitos de oxigênio.....                   | 102 |
| 3.17. Requisitos de nutrientes .....                | 111 |
| 3.18. Influência da temperatura .....               | 115 |
| 3.19. Relações funcionais com a idade do lodo ..... | 116 |

## **CAPÍTULO 4**

### **Dimensionamento do reator biológico de fluxo contínuo para a remoção da matéria carbonácea**

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| 4.1. Seleção da idade do lodo.....          | 127 |
| 4.2. Critérios e parâmetros de projeto..... | 130 |
| 4.3. Configuração física do reator.....     | 131 |
| 4.4. Detalhes de projeto .....              | 136 |

## **CAPÍTULO 5**

### **Sistemas de aeração**

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1. Introdução .....                                                       | 141 |
| 5.2. Sistemas de aeração mecânica .....                                     | 141 |
| 5.3. Sistemas de aeração por ar difuso.....                                 | 145 |
| 5.4. Cinética da aeração .....                                              | 150 |
| 5.5. Fatores de influência na transferência de oxigênio.....                | 151 |
| 5.6. Taxa de transferência de oxigênio no campo e em condições padrão ..... | 155 |
| 5.7. Outros coeficientes de aeração.....                                    | 158 |
| 5.8. Testes de aeração.....                                                 | 164 |

## **CAPÍTULO 6**

### **Princípios da sedimentação e adensamento nos decantadores secundários**

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1. Introdução .....                                             | 179 |
| 6.2. Sedimentação zonal em uma coluna .....                       | 181 |
| 6.3. A teoria do fluxo limite de sólidos.....                     | 182 |
| 6.4. Determinação da velocidade de sedimentação da interface..... | 187 |
| 6.5. Índice volumétrico de lodo .....                             | 191 |
| 6.6. Determinação do fluxo limite de sólidos .....                | 194 |

## **CAPÍTULO 7**

### **Dimensionamento do decantador secundário**

---

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1. Tipos de decantadores .....                                                    | 203 |
| 7.2. Determinação da área superficial requerida para os decantadores secundários .. | 207 |
| 7.3. Detalhes de projeto de decantadores secundários .....                          | 229 |
| 7.4. Dimensionamento de decantadores primários .....                                | 234 |

## **CAPÍTULO 8**

### **Exemplos de dimensionamento de lodos ativados para remoção da matéria carbonácea (com nitrificação, mas sem remoção de nutrientes)**

---

|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| 8.1. Introdução .....                                    | 239 |
| 8.2. Parâmetros e coeficientes do modelo .....           | 240 |
| 8.3. Sistema de lodos ativados convencional .....        | 241 |
| 8.4. Sistema de aeração prolongada .....                 | 257 |
| 8.5. Resumo dos dimensionamentos dos dois sistemas ..... | 271 |

## **CAPÍTULO 9**

### **Princípios da remoção biológica de nutrientes**

---

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.1. Introdução .....                                                                            | 275 |
| 9.2. O nitrogênio no esgoto bruto e as principais transformações no processo de tratamento ..... | 277 |
| 9.3. Fundamentos da nitrificação biológica .....                                                 | 290 |
| 9.4. Fundamentos da desnitrificação biológica .....                                              | 310 |
| 9.5. Fundamentos da remoção biológica de fósforo .....                                           | 319 |

## **CAPÍTULO 10**

### **Dimensionamento de sistemas de fluxo contínuo para a remoção biológica de nutrientes**

---

|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| 10.1. Remoção biológica de nitrogênio .....           | 333 |
| 10.2. Remoção biológica de nitrogênio e fósforo ..... | 352 |

## **CAPÍTULO 11**

### **Sistemas de operação intermitente (batelada sequencial)**

---

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 11.1. Introdução .....               | 361 |
| 11.2. Princípios do processo .....   | 361 |
| 11.3. Modificações do processo ..... | 365 |

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11.4. Critérios e parâmetros de dimensionamento de sistemas por batelada .....  | 371 |
| 11.5. Metodologia de cálculo para o dimensionamento de reatores por batelada .. | 375 |
| 11.6. Exemplo de dimensionamento de reator por batelada .....                   | 382 |

## **CAPÍTULO 12**

### **Seletores biológicos**

---

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| 12.1. Introdução .....                        | 387 |
| 12.2. Tipos de seletores .....                | 390 |
| 12.3. Critérios de projeto de seletores ..... | 396 |

## **CAPÍTULO 13**

### **Controle operacional**

---

|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| 13.1. Introdução .....                                | 399 |
| 13.2. Conceitos básicos de controle operacional ..... | 401 |
| 13.3. Controle do oxigênio dissolvido .....           | 403 |
| 13.4. Controle dos sólidos .....                      | 405 |
| 13.5. Monitoramento do sistema .....                  | 411 |

## **CAPÍTULO 14**

### **Problemas operacionais e suas soluções**

---

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 14.1. Introdução .....                                                 | 413 |
| 14.2. Elevadas concentrações de sólidos em suspensão no efluente ..... | 413 |
| 14.3. Elevadas concentrações de DBO no efluente .....                  | 432 |
| 14.4. Elevadas concentrações de amônia no efluente .....               | 435 |

## **CAPÍTULO 15**

### **Lodos ativados como pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**

---

|                                                      |     |
|------------------------------------------------------|-----|
| 15.1. Introdução .....                               | 437 |
| 15.2. Experiência da ETE Betim Central .....         | 438 |
| 15.3. Projeto do Sistema UASB - Lodos Ativados ..... | 439 |

|                                         |            |
|-----------------------------------------|------------|
| <b>Referências bibliográficas .....</b> | <b>453</b> |
|-----------------------------------------|------------|

# CAPÍTULO 1

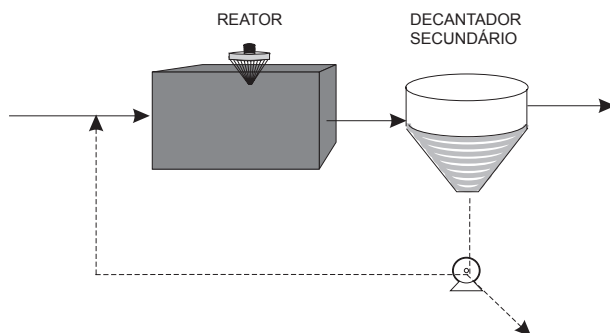
## Introdução

O sistema de tratamento de esgotos por lodos ativados foi concebido no Reino Unido, por Arden e Lockett, em 1914. A primeira versão do sistema era por tanques que operavam com ciclos de enchimento e esvaziamento, similares aos reatores de batelada sequenciais atuais. Posteriormente foi concebida a versão de fluxo contínuo, mais utilizada atualmente.

O sistema de lodos ativados é amplamente utilizado, em nível mundial, para o tratamento de despejos domésticos e industriais, em situações em que são necessários uma elevada qualidade do efluente e reduzidos requisitos de área. No entanto, o sistema de lodos ativados inclui um índice de mecanização superior ao de outros sistemas de tratamento, implicando uma operação mais sofisticada e maiores consumos de energia elétrica.

As seguintes unidades são parte integrante da etapa biológica do sistema de lodos ativados (fluxo do líquido) (Figura 1.1):

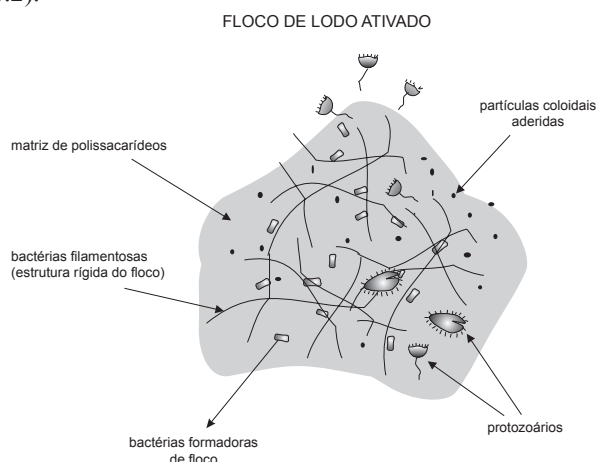
- *tanque de aeração (reator)*
- *tanque de decantação (decantador secundário)*
- *recirculação de lodo*



**Fig. 1.1.** Esquema das unidades da etapa biológica do sistema de lodos ativados

No reator ocorrem as reações bioquímicas de remoção da matéria orgânica e, em determinadas condições, da matéria nitrogenada. A biomassa se utiliza do substrato presente no esgoto bruto para se desenvolver. No decantador secundário ocorre a sedimentação dos sólidos (biomassa), permitindo que o efluente final saia clarificado. Os sólidos sedimentados no fundo do decantador secundário são recirculados para o reator, aumentando a concentração de biomassa no mesmo, o que é responsável pela elevada eficiência do sistema.

A biomassa consegue ser facilmente separada no decantador secundário devido à sua propriedade de flocular. Isso se deve ao fato de as bactérias possuírem uma matriz gelatinosa, que permite a aglutinação das bactérias e de outros microrganismos, como protozoários. O floco possui maiores dimensões, o que facilita a sedimentação (ver Figura 1.2).



**Fig. 1.2.** Esquema de um floco de lodo ativado

Em virtude da recirculação do lodo, a concentração de sólidos em suspensão no tanque de aeração nos sistemas de lodos ativados é mais de 10 vezes superior à de uma lagoa aerada de mistura completa, sem recirculação (ver Volume 3 da presente série) (von Sperling, 1996c). Nos sistemas de lodos ativados, o tempo de detenção do líquido é bem baixo, da ordem de horas, fazendo com que o volume do tanque de aeração seja bem reduzido. No entanto, devido à recirculação dos sólidos, estes permanecem no sistema por um tempo superior ao do líquido. O tempo de retenção dos sólidos é denominado idade do lodo. É essa maior permanência dos sólidos no sistema que garante a elevada eficiência dos sistemas de lodos ativados, já que a biomassa tem tempo suficiente para metabolizar praticamente toda a matéria orgânica dos esgotos. Devido à sua importância, o conceito de idade do lodo é amplamente discutido ao longo deste volume.

No tanque de aeração, devido à entrada contínua de alimento, na forma de DBO dos esgotos, os microrganismos crescem e se reproduzem continuamente. Caso fosse permitido que a população dos mesmos crescesse indefinidamente, eles tenderiam a atingir concentrações excessivas no tanque de aeração, dificultando a transferência de oxigênio a todas as células. Ademais, o decantador secundário ficaria sobrecarregado, e os sólidos não teriam mais condições de sedimentar satisfatoriamente, vindo a sair com o efluente final, deteriorando a sua qualidade. Para manter o sistema em equilíbrio, é necessário que se retire aproximadamente a mesma quantidade de biomassa que é aumentada por reprodução. Este é, portanto, o lodo biológico excedente, que pode ser extraído diretamente do reator ou da linha de recirculação. O lodo excedente deve sofrer tratamento adicional, na linha de tratamento do lodo, usualmente compreendendo adensamento, estabilização e desidratação.

O sistema de lodos ativados pode ser adaptado para incluir remoções biológicas de nitrogênio e fósforo, atualmente praticadas de forma sistemática em diversos países. Este texto enfoca com maior profundidade a remoção de matéria carbonácea. No entanto, devido à sua importância nas condições de um país tropical como o Brasil, analisam-se também os aspectos de nitrificação e desnitrificação (remoção de nitrogênio). A remoção biológica de fósforo é um tópico mais especializado, sendo analisado de forma menos detalhada neste volume. Com relação à remoção de coliformes, devido aos reduzidos tempos de detenção nas unidades do sistema de lodos ativados, tem-se que a eficiência não é elevada, e é usualmente insuficiente para atender aos requisitos de qualidade dos corpos receptores. Por essa razão, a remoção de coliformes não é abordada neste texto.

O presente volume centra-se nas duas unidades integrantes da etapa biológica da fase líquida do sistema de lodos ativados: reator biológico e decantador secundário. A etapa de tratamento do lodo encontra-se abordada no Volume 6 da presente série (*Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*). Fundamentos do tratamento biológico dos esgotos são cobertos no Volume 2 (*Princípios básicos do tratamento de esgotos*), mas, sempre que necessário, são reapresentados aqui, para tornar este volume autossuficiente.