

2. Microbiologia dos Lodos Ativados

Os flocos biológicos constituem um micro-sistema formado por bactérias, fungos, protozoários e micrometazoários (Mckinney, 2004; Bento et al., 2005).

A estrutura do floco é dividida em dois níveis: macroestrutura e microestrutura. A macroestrutura é responsável pela estruturação do lodo, sendo formada principalmente por bactérias filamentosas. A microestrutura é constituída por bactérias formadoras do floco, bem como protozoários, micrometazoários e fungos, que manterão o equilíbrio do floco (Bento et al., 2005).

Fatores abióticos significantes em processos de lodos ativados incluem: alcalinidade, amônia ionizada (NH_4^+), oxigênio dissolvido, tempo de retenção hidráulica (TRH), nutrientes, micronutrientes, pH, concentrações e tipos de substratos, taxa de reciclo de lodo, temperatura, substâncias tóxicas, e turbulência. Fatores bióticos significantes incluem as bactérias desnitrificantes, organismos filamentosos, bactérias formadoras de floco, idade do lodo, concentração de sólidos suspensos voláteis (SSV), bactérias nitrificantes, e relativa abundância de grupos de protozoários (Gerardi, 2006).

A teoria clássica da origem do lodo, criada em 1935 por Butterfield, parte do princípio de que a bactéria *Zooglea ramigera*, abundante em processos de lodos ativados, é a bactéria formadora do floco que fica imersa em uma matriz de polissacarídeos. Entretanto, com o desenvolvimento de diversos estudos, certificou-se que outros micro-organismos formam o floco do lodo ativado e, além disso, os protozoários possuem papel bastante importante, relacionado à redução das bactérias dispersas, sendo os responsáveis pela diminuição da turbidez (Mckinney, 2004).

Estudos adicionais certificaram que a bactéria não flocula mediante excesso de nutrientes. Bento et al. (2003) explicam, à luz das descobertas de Mckinney, que o fato de não haver flocação com excesso de nutrientes está relacionado com a atividade locomotora:

A intensidade locomotora está relacionada com a quantidade de matéria nutritiva disponível, mantendo as bactérias nutridas, sendo estas capazes de vencer a força de van der Waals com a sua própria energia de locomoção, permitindo a floculação. De fato, provou-se que não se produz floculação em fase exponencial de crescimento dos micro-organismos, quando há ainda bastante quantidade de matéria orgânica e nutriente. Quando a matéria orgânica é degradada, fica escassa, as bactérias menos resistentes começam a morrer, ocorrendo a liberação de polissacarídeos, oriundos da membrana plasmática, ocorrendo a floculação das bactérias. Assim sendo, a floculação está relacionada, além de fatores físico-químicos (forças de van der Waals), à capacidade energética do meio em que vivem e principalmente aos polímeros (polissacarídeos).

2.1. Crescimento Microbiano

O crescimento dos micro-organismos pode ser observado nas seguintes etapas descritas por Monod (1941) e citadas por Vazollér et al. (1991):

- *Aclimação*: não ocorre aumento do número de micro-organismos devido à elaboração do arsenal enzimático necessário ao consumo dos substratos;
- *Fase de aceleração*: inicia-se o crescimento microbiano face ao consumo de substrato;
- *Fase exponencial*: em face das boas condições microbianas: substrato abundante, baixa concentração de metabólitos tóxicos, nutrientes etc., os micro-organismos crescem com velocidade máxima;
- *Fase de desaceleração*: a velocidade passa a diminuir uma vez que o substrato disponível começa a decair e já existe acúmulo de excretas tóxicos;
- *Fase estacionária*: a velocidade de crescimento volta a ser nula devido ao esgotamento dos substratos e acúmulo de substâncias tóxicas em níveis incompatíveis com o desenvolvimento microbiano;
- *Fase de declínio*: ocorre a diminuição do número de micro-organismos (velocidade de crescimento negativa) causada pela morte e lise.

A fase endógena no processo de lodos ativados é bastante importante, pois os micro-organismos continuam utilizando oxigênio apenas para manterem as células vivas, sem, contudo, proporcionar degradação de material orgânico. Além disso, é responsável pelas condições em que ocorre a floculação bacteriana proporcionada pelo metabolismo endógeno (Vazollér et al., 1991).

2.2. Bactérias

As bactérias ocupam o grupo que possui a forma mais simples e são os organismos mais numerosos com respeito ao número de espécies e biomassa total. Possuem reduzidos tamanhos e são organismos procariontes unicelulares. As bactérias são classificadas pela estrutura (morfologia), nutrição e metabolismo (Mckinney, 2004).

Exceto para as bactérias filamentosas, cianobactérias e espiroquetas, a variação no tamanho da maioria das bactérias é de 0,3 a 3 μm . As bactérias filamentosas como, por exemplo, *Sphaerotilus natans*, usualmente são maiores que 100 μm em comprimento. A cianobactéria, que possui apenas uma célula, possui pigmentos fotossintéticos nas membranas da célula e variação do tamanho entre 5 e 50 μm (Gerardi, 2006).

Os elementos principais (macromoléculas) que fazem parte da composição das células das bactérias incluem C, H, N, O, P e S. Grandes quantidades destes elementos são requeridos para a síntese e manutenção de material celular (Tabela 1). Elementos secundários (microelementos) tais quais Ca, Fe, K, Mg e Na são requeridos em pequenas quantidades, bem como elementos traço incluindo Co, Mn, Mo, Ni e Zn; estes últimos são necessários para a maioria das bactérias em pequenas quantidades. O elemento Ca é requisitado em grandes quantidades pelas bactérias Gram-positivas para a síntese da parede celular (Gerardi, 2006).

Tabela 1: Composição típica das células bacterianas (% em peso seco)

Elemento	Composição Média (%)	Varição na Composição (%)
Carbono	50	45 – 55
Oxigênio	20	16 – 22
Nitrogênio	14	12 – 16
Hidrogênio	8	7 – 10
Fósforo	3	2 – 5
Enxofre	1	0,8 – 1,5
Potássio	1	
Sódio	1	
Cálcio	0,5	
Cloro	0,5	
Magnésio	0,5	
Ferro	0,2	
Elementos Traço	0,1	

Adaptado de Gerardi, 2006

2.2.1. Bactérias Hidrolíticas

Bactérias hidrolíticas consistem de um grupo de bactérias Gram-positivas que degradam complexos insolúveis de carboidratos, lipídeos e proteínas em moléculas simples e solúveis: sacarose, ácidos graxos, glicerina e aminoácidos. Os compostos oriundos da hidrólise tornam-se disponíveis para absorção e degradação por numerosas bactérias. Além disso, a taxa de hidrólise determina a taxa média de degradação do substrato orgânico particulado (Eliosov e Argaman, 1995).

Hidrólise é a adição de água (“hidro”) à molécula complexa, realizada pela bactéria, para quebra (“lise”) das ligações químicas das macromoléculas; dessa forma, permite-se a produção de moléculas solúveis e simples.

A adição de água e quebra das ligações químicas são catalisadas por exoenzimas, tais quais a amilase e celulase (hidrólise de amidos ou carboidratos), lipase (hidrólise de lipídeos), e protease (hidrólise de proteínas) (Tabela 2). O

processo de hidrolisação ocorre lentamente, sendo proporcional à complexidade da estrutura da molécula, e à demanda de nutrientes e moléculas carregadoras de elétrons tais quais oxigênio molecular livre e o íon nitrato (Gerardi, 2006).

A hidrólise possui duas importantes funções no tratamento biológico. A primeira decorre do fato de que muitas estações recebem apenas substratos complexos. Neste caso, a hidrólise é essencial para prover substratos solúveis à biomassa, pois somente compostos solúveis podem ser absorvidos e degradados pelas bactérias. A segunda função configura-se no fato que em qualquer unidade de tratamento biológico, as bactérias morrem, e a hidrólise permite a solubilização e degradação dos componentes das células (Eliosov e Argaman, 1995).

A qualidade operacional, como citado por Gerardi (2006), de qualquer sistema de tratamento biológico para a degradação de substratos é dependente da presença de adequada quantidade de enzimas.

As bactérias degradam primeiramente os compostos mais solúveis e simples e, uma vez esgotados, os substratos complexos e insolúveis.

Tabela 2: Exemplos de Exoenzimas

<i>Exoenzimas (especificidade ou compostos)</i>	<i>Função</i>
Amilase (carboidrato)	Converte amido em maltose
Caseinase (proteína do leite)	Converte proteína do leite em peptídeos e aminoácidos
Celulase (carboidrato)	Converte celulose em celobiose
Lipase (lipídeos)	Converte lipídeos em glicerol e ácidos graxos
Maltase (glicose)	Converte maltose em duas moléculas de glicose
Protease (proteínas)	Converte proteína em peptídeos e aminoácidos

Adaptado de Gerardi, 2006

2.2.1.1. Enzimas

As bactérias hidrolíticas apresentadas no item anterior utilizam para degradação dos substratos orgânicos particulados as enzimas, que são produzidas por estes micro-organismos.

As enzimas possuem uma superfície ou sítio ativo, formando ligações fracas com os substratos, por meio das quais as reações químicas ocorrem. Além disso, são específicas para determinados tipos de substratos que podem ser degradados, ou compostos que elas podem sintetizar. Assim, compostos que não tenham “afinidade” com a enzima não são degradados (Stryer, 1992).

Quando um substrato encontra um sítio apropriado na enzima, um complexo enzima-substrato é formado. Uma vez originado o complexo, ligações químicas no substrato são enfraquecidas, podendo ser degradado, formando moléculas mais simples (catabolismo), ou assimilado, produzindo moléculas mais complexas (anabolismo). As enzimas usualmente têm um alto grau de especificidade, pois são específicas a certos tipos de (a) substratos que podem ser degradados e (b) compostos e íons que podem ser assimilados. Dessa forma, algumas enzimas podem degradar grandes quantidades de carboidratos, enquanto outras enzimas degradam somente pequenas quantidades de carboidratos e, outras ainda, são capazes de degradar apenas um único tipo de macromolécula (Stryer, 1992).

Dessa forma, a especificidade das reações químicas que uma enzima pode catalisar é devido à forma e carga elétrica do sítio ativo da enzima. A forma de uma enzima é produzida através de ligações dos grupos tiois ($-SH$), enquanto a carga elétrica é devida à ionização de ligações de hidrogênio. Se uma enzima é capaz de atuar em mais de um substrato, irá atuar no substrato com o mesmo grupo funcional [carboxila ($-COOH$) ou hidroxila ($-OH$)] ou com o mesmo tipo da ligação química (Tabela 3) (Gerardi, 2006).

Tabela 3: Exemplo de Enzimas

<i>Enzima</i>	<i>Função</i>
Hidrolase	Adiciona água e quebra macromoléculas em moléculas menores
Isomerase	Rearranjo atômico na molécula
Ligase	Junta duas moléculas
Lipase	Degrada lipídeos
Protease	Degrada ligações peptídicas
Óxidorredutase	Oxida uma molécula enquanto reduz outra molécula

Adaptado de Gerardi, 2006

Como todas as enzimas são produzidas intracelularmente, estas são aplicadas onde se deseja atuar; desse modo, as endoenzimas (intracelular) agem dentro da célula, e as exoenzimas (extracelular) atravessam a membrana da célula para atuar na região externa à mesma. Tempos significantes são requeridos para as células de modo a produzir e liberar as exoenzimas (Gerardi, 2006).

A taxa de hidrólise é consideravelmente menor que a taxa de utilização do substrato rapidamente biodegradável, o que a torna o fator limitante quando um substrato lentamente biodegradável está presente no reator. Assim, a taxa de hidrólise está condicionada à concentração do acceptor de elétrons presente e é menor sob condições anaeróbias (Henze et al., 1987; Li e Chróst, 2006). Karahan et al. (2006) concluem que adsorção é o mecanismo dominante para a remoção de compostos orgânicos, tais como o amido, particulados e solúveis. Além disso, a etapa de adsorção é muito mais rápida que a etapa de hidrólise, sendo esta considerada a etapa limitante.

Experimentos indicam que a hidrólise é influenciada principalmente pelos parâmetros de operação do sistema e abundância ou escassez de alimentos fora da célula, condições estas que são criadas no sistema (Majone et al., 1996).

2.2.2. Bactérias Filamentosas

Embora existam algas e fungos filamentosos em processos de lodos ativados, a maioria dos organismos filamentosos encontrados é constituída de bactérias filamentosas.

As bactérias filamentosas apresentam vantagens e desvantagens. As vantagens incluem (1) degradação de DBO solúvel, (2) melhora na formação do floco, e (3) degradação de formas complexas de compostos orgânicos. Desvantagens citam-se (1) problemas de sedimentação, (2) perda de sólidos, e (3) produção de espuma. Organismos filamentosos que produzem espuma incluem: *Nocardioforms* (Figura 1) e *Microthrix parvicella* (Figura 2) (Gerardi, 2006; Martins et al., 2004).

Algumas espécies de bactérias filamentosas são heterotróficas, removendo a matéria orgânica do meio, e outras são capazes de oxidar compostos reduzidos de enxofre, como é o caso dos gêneros *Thiothrix sp* e *Beggiatoa sp*. (Maciel, 2002).

Apesar das bactérias filamentosas terem grande importância na estrutura do floco e na degradação da matéria orgânica, seu crescimento deve ser controlado, pois quando ocorrem em grande excesso não permitem a sedimentação do lodo no decantador secundário, resultando no fenômeno de intumescimento filamentoso do lodo ou *bulking* (Martins et al., 2004).

As condições operacionais que provocam a proliferação destes micro-organismos são principalmente: concentração deficiente de oxigênio dissolvido, deficiência de nutrientes, presença de compostos reduzidos de enxofre, diminuição da razão alimento micro-organismos (A/M) (Gaval e Pernelle, 2003; Martins et al., 2004).

Quando estes micro-organismos ocorrem em pequena quantidade, observa-se também má sedimentação do lodo devido à formação de flocos pequenos conhecidos como *pin-point*. Entretanto, pode estar relacionado a outros fatores tais como o aumento de um tipo de bactéria, *Zooglea ramigera*, ou de fungos filamentosos (Vazollér et al., 1991).

Diversas hipóteses sobre a formação do *bulking* foram formuladas, mas nenhuma levou a uma solução definitiva para o problema. Muitas das teorias desenvolvidas ainda necessitam de confirmações experimentais.

Martins et al. (2004) selecionaram as principais causas da teoria do *bulking* filamentoso:

1. Diversos pesquisadores mostraram que o modelo de difusão consiste em experimentações feitas que permitem visualizar que concentrações baixas de substrato originam aumento da quantidade de filamentosos;

2. O modelo teórico de base cinética comprova que em sistemas em que há baixa disponibilidade de substrato, bactérias filamentosas possuem alta taxa de crescimento específico, maior que a taxa de crescimento das bactérias formadoras de floco, o que as fazem ganhar a competição por substrato;
3. Tradicionalmente, os micro-organismos não-filamentosos exibem habilidade de estocar substrato sob condições em que há altas concentrações. Entretanto, recentes estudos mostraram que os filamentosos poderiam ter igual ou maior capacidade de armazenamento. O substrato armazenado pode ser metabolizado para geração de energia ou produção proteica durante os períodos de escassez de alimentos, que representam grande vantagem seletiva para esses micro-organismos em competição com outros.

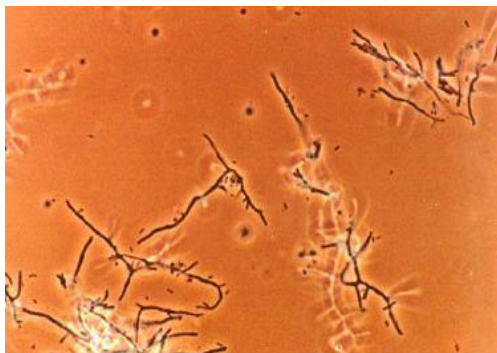


Figura 1 Nocardia spp. 1000x

Fonte: Abreu, 2004



Figura 2 Microthrix parvicella 1000x

Fonte: Abreu, 2004

2.2.3. Bactérias Formadoras de Flocos

Segundo Gerardi (2006), a formação do floco em processo de lodos ativados é essencial para o seu correto funcionamento, permitindo o “empacotamento” de uma grande e diversificada população de bactérias nos flocos que (1) podem ser separadas no decantador secundário, e (2) podem ser retornadas ao processo. As principais funções proporcionadas pelas bactérias formadoras de flocos em tanques de aeração incluem:

- Remoção de matéria orgânica;
- Remoção de nitrogênio;

- Remoção de fósforo;
- Remoção de sólidos finos;
- Desenvolvimento de diversos organismos (protozoários ciliados, rotíferos, nematoides de vida livre), que aumentam a eficiência do tratamento;

Propriedades estruturais também são desempenhadas por essas bactérias:

- Promovem estrutura firme, resistente à ação cisalhante ou turbulência;
- Imprime estrutura densa que contribui para a sedimentação adequada.

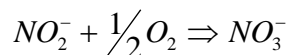
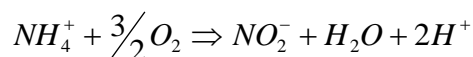
A formação do floco ocorre naturalmente com o aumento do Tempo de Retenção, sendo iniciada pelas bactérias formadoras de floco. Estas, por sua vez, são capazes de produzir os componentes necessários à célula que a permitem aglutinar: grânulos de polissacarídeos (amido, glicogênio).

2.2.4. Bactérias Nitrificantes

Nitrificação é a oxidação biológica responsável pela passagem da amônia a nitrito e pela oxidação de nitrito a nitrato. As bactérias pertencentes ao gênero *Nitrossomonas* oxidam amônia, originando nitrito, enquanto as bactérias pertencentes ao gênero *Nitrobacter* oxidam nitrito a nitrato. Ambos os gêneros somente desenvolvem atividade bioquímica na presença de oxigênio dissolvido (Abreu et al., 2000).

As bactérias nitrificantes oxidam amônia a nitrito a fim de obterem energia para a atividade celular, incluindo a reprodução, que consome 42% da energia total necessária (Mckinney, 2004). Estas bactérias são muito eficientes na oxidação de amônia a nitrito.

As reações de nitrificação estão indicadas a seguir:



As bactérias nitrificantes são ineficientes na formação de flocos, sendo incorporadas às partículas dos flocos eletrostaticamente, através das cargas elétricas, entre as bactérias nitrificantes e as partículas do floco. Estas bactérias

representam usualmente < 10% da população bacteriana presente no lodo ativado (Gerardi, 2006).

Há diversas formas de toxicidade às bactérias nitrificantes, expressas na Tabela 4:

Tabela 4: Formas de toxicidade às bactérias nitrificantes

<i>Forma</i>	<i>Descrição ou Exemplo</i>
Cloro Livre Residual	Ácido hipocloroso (HOCl) ¹ ou íon hipoclorito (OCl ⁻) ¹
Inorgânico	Metais pesados ^{1,2}
Orgânico	Fenois ^{1,2} , DBO solúvel tóxica ¹
pH	< 5 ¹
Luz Solar	Radiação ultravioleta ¹
Temperatura	< 5°C ¹

Adaptado de ¹ Gerardi, 2006; ² Ren, 2004

Estudos na literatura reportaram que *Nitrossomonas* são mais sensíveis a compostos tóxicos que *Nitrobacter* (Blum e Speece, 1991). A densidade de espécies do gênero *Nitrossomonas*, segundo estudos desenvolvidos por Gunditz e Dalhammar (2001), é três vezes superior à densidade das espécies do gênero *Nitrobacter*.

2.2.5. Bactérias Desnitrificantes

As bactérias desnitrificantes são capazes de utilizar oxigênio molecular livre, nitrato, ou nitrito para degradar matéria orgânica, com o objetivo de obter carbono e energia para o crescimento celular e atividade celular. Embora possa utilizar oxigênio molecular, nitrato ou nitrito, somente é capaz de processar um a cada momento, sendo que sua preferência é para o oxigênio molecular livre que, comparado à utilização de nitrato para a degradação de matéria orgânica, provê maior crescimento e energia para as células (Gerardi, 2006).

A densidade das bactérias desnitrificantes é de bilhões por grama de partícula de floco, sendo que estas representam aproximadamente 80% de todas as bactérias floculadas e dispersas no lodo ativado. Existem diversos gêneros que contém espécies de bactérias desnitrificantes, entre os quais: *Alcaligenes*, *Bacillus*

e *Pseudomonas*, este último sendo o mais comum dos gêneros de desnitrificantes (Payne, 1981).

2.3. Protozoários

Os protozoários são micro-organismos unicelulares, microscópicos. Algumas espécies formam colônias, sendo suas células fundamentalmente independentes e similares na estrutura e função. Alimentam-se de bactérias, outros protozoários e de matéria orgânica dissolvida e particulada. De acordo com o tipo de organela utilizada para a locomoção e captura de alimentos, os protozoários podem ser subdivididos nos seguintes grupos: amebas, flagelados, ciliados livres e natantes, ciliados fixos e ciliados predadores de flocos (Bento et al., 2003; Mckinney, 2004).

Os protozoários ciliados formam o mais importante grupo de protozoários em processos de lodos ativados, pois possuem cílios que se movimentam a fim de produzir uma corrente de água para locomoção e coleta de alimentos. Estas estruturas (cílios) são responsáveis pela captura passiva de presas que, por descuido, as tocam (Gerardi, 2006).

Madoni (1994) relaciona as condições operacionais do sistema de lodos ativados com os protozoários predominantes encontrados nos tanques de aeração e classifica cada grupo de acordo com a eficiência de depuração do sistema.

Papadimitriou et al. (2007) concluíram nos experimentos relacionando compostos tóxicos com a microfauna que a presença de fenol como elemento intoxicante resultava em mudanças das espécies predominantes no lodo ativado, favorecendo o domínio da *Opercularia* sp. O fenol aumenta a presença de *Podophrya* sp. e do ciliado livre-natante *Colpidium* sp., sendo este último típico de plantas de estações de tratamento de efluentes. A presença de *Podophrya* sp. pode indicar a boa eficiência na tratabilidade de fenol.

Nicolau et al. (2005) concluíram que a presença de cobre não afeta apenas a eficiência do processo de tratamento de lodos ativados mas, também, a microfauna presente no lodo, alterando a densidade e as espécies presentes. Além disso, estes mesmos pesquisadores verificaram que em baixas concentrações do íon Cu^{2+} houve aumento da remoção de DQO e de algumas espécies específicas,

destacando as livre natantes. *Acineria incinata* e *Aspidisca cicada* apresentaram tolerância a baixas concentrações do íon Cu^{2+} .

Por outro lado, *Opercularia* sp. (Figura 3) demonstrou excepcional tolerância ao cobre, o que comprova a alta resistência deste micro-organismo a condições ambientais contendo compostos tóxicos, como tem sido reportado em diversos trabalhos investigativos (Esteban et al., 1990). Outro protozoário encontrado é a *Vorticella convallaria* (Figura 4).

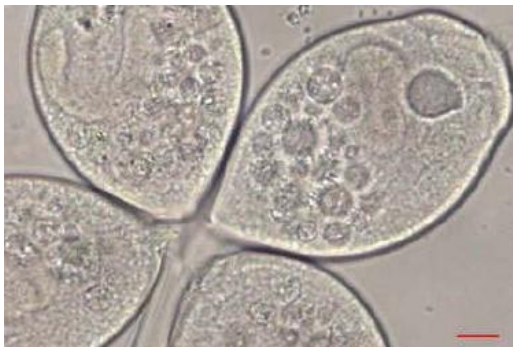


Figura 3 *Opercularia* sp. C. C. Barra = 10 μm

Fonte: Abreu, 2004



Figura 4 *Vorticella convallaria* C. C. Barra = 10 μm

Fonte: Abreu, 2004

2.4. Fungos

Os fungos usualmente são organismos saprofiticos e classificados pelo seu modo de reprodução. A maioria dos fungos é de vida livre e incluem leveduras, cogumelos e bolores. Grande parte é estritamente aeróbia e pode tolerar ambientes ácidos e baixas concentrações de nitrogênio. Embora os fungos possam crescer em ambientes com alta variação de pH (2-9), o pH ótimo para a maioria das espécies de fungo situa-se ao redor de 5,6, e a quantidade de nitrogênio exigida para o crescimento é metade que a necessária para as bactérias, oferecendo-lhes grande vantagem em relação a estas (Mckinney, 2004).

Em lodos ativados os fungos filamentosos podem proliferar e contribuir para a má sedimentabilidade do lodo em decantadores secundários. A proliferação dos fungos filamentosos está associada a baixos valores de pH (< 6,5), acentuado aumento da acidez e a baixas quantidades de nutrientes. A presença de fungos filamentosos pode ocasionar problemas no tratamento, embora a presença de

grande e diversificada população de fungos seja desejada para o tratamento de esgotos e efluentes industriais contendo matéria orgânica. Os fungos têm a propriedade de degradar celulose, tolerar baixos níveis de nutrientes, e crescer na presença de baixa umidade e ambientes ácidos (Gerardi, 2006).

Baseado em informações de Cochrane, citado por Mckinney (2004), os fungos contém de 85 a 90% de água na sua composição. A matéria seca é correspondente a 95% de compostos orgânicos. A fração orgânica dos fungos contém entre 40 e 50% de carbono e entre 2 e 7% de nitrogênio. Análises proteicas mostraram que a massa das células é composta por entre 20 e 25% de proteínas. As proteínas constituem a maior diferença entre fungos e bactérias. Possuem, além disso, entre 1,0 e 1,5% de fósforo na fração mássica das células.

2.5. Micrometazoários

Os rotíferos e nematoides são animais microscópios multicelulares (metazoa) presentes no lodo, que também oferecem inúmeros benefícios ao processo. Além disso, estes animais quebram as partículas do floco, permitindo o contato entre o substrato e as bactérias localizadas no centro das partículas, bem como facilitam a penetração de oxigênio dissolvido, nitrato (NO_3^-), substratos e nutrientes (Gerardi, 2006; Mckinney, 2004).

2.6. Natureza da Microfauna

A natureza da microfauna presente é característica da idade do lodo, que é o tempo médio de permanência do lodo no reator. É também característica da qualidade da água, o que é refletido pelas espécies constituintes da comunidade (Vazollér et al., 1991).

A microfauna do lodo ativado é indicadora do conjunto de parâmetros de funcionamento do processo, uma vez que sua natureza varia com o nível de depuração, com a concentração de oxigênio dissolvido, com a presença de substâncias tóxicas etc., dentro do tanque de aeração (Vazollér et al., 1991).

2.7. Fatores Limitantes do Crescimento dos Micro-Organismos

2.7.1. Potencial Hidrogeniônico (pH)

A faixa de pH tolerável para os micro-organismos do lodo ativado, segundo a literatura disponível, situa-se entre 7 e 8, sendo que a eficiência do tratamento alcança valores máximos em pH $7 \pm 0,2$ (Mckinney, 2004; Gerardi, 2006).

A literatura cita as faixas referenciadas anteriormente como as ideais no que concerne ao crescimento e boa manutenção do lodo ativado. Entretanto, estudos realizados por Beranger (2009) certificaram que em variações agudas de pH na faixa entre 4,5 e 11, a comunidade microbiana mantém-se respirando, o que diverge da faixa bastante aceita pela comunidade científica situada entre 6,8 e 7,2. O comportamento da respiração dos micro-organismos não foi verificado posteriormente aos testes.

Há três grupos de bactérias que podem tolerar condições de acidez ou alcalinidade. Esses grupos são: acidófilos, neutrófilos e alcalinófilos. Acidófilos crescem em ambientes com valores de pH menores que 5,4. *Thiobacillus* e *Sulfolobus* crescem em valores de pH menores que 2, como, também, muitos fungos em valores de pH menores que 5. Neutrófilos crescem em valores de pH entre 5,4 e 8,5. A maioria das bactérias em sistemas de tratamento de efluentes são neutrófilas. Alcalinófilos são organismos que podem sobreviver em valores de pH muito elevados, entre 7 e 11,5; *Nitrossomas* e *Nitrobacter* são exemplos de gêneros deste grupo de bactérias (Gerardi, 2006).

2.7.2. Temperatura

A temperatura exerce dois efeitos significantes sobre a população microbiana no lodo: (1) afeta a taxa de difusão de substratos e nutrientes na célula bacteriana e (2) afeta a taxa da atividade enzimática. As taxas de difusão e atividade enzimática diminuem com a redução da temperatura (Gerardi, 2006).

Há três grupos de bactérias: psicrófilas, mesófilas, e termófilas.

Bactérias psicrófilas são adaptáveis em condições de temperatura entre 12°C e 18°C. A faixa de temperatura para crescimento está situada entre 10°C e 30°C. Estas bactérias são capazes de crescer em baixas temperaturas, pois as suas células contêm grande quantidade de ácidos graxos insaturados, que ajudam a manter a membrana fluida em baixas temperaturas.

As bactérias mesófilas participam do maior grupo de organismos; o crescimento ideal se dá em temperaturas em faixas de 25°C a 40°C. A variação da temperatura em que ainda ocorre crescimento bacteriano se dá entre 20°C a 50°C. Estes micro-organismos estão presentes em densidade significativa nos lodos ativados.

As bactérias termófilas são organismos que suportam altas temperaturas, podendo alcançar níveis de temperatura da ordem de 50°C a 65°C. A faixa de temperatura na qual ocorre crescimento bacteriano se dá entre 35 e 75°C. Estas bactérias são capazes de crescer em altas temperaturas, pois, em suas células, contêm grande quantidade de ácidos graxos saturados, que mantêm a membrana fluida em altas temperaturas.

Estudos executados por Vogelaar et al. (2002) com efluente de indústria de papel demonstraram que os micro-organismos mesofílicos apresentaram maiores remoções de DQO comparados com os termofílicos, indicando que a faixa ideal de manutenção do reator de lodos ativados compreende-se entre 20 e 30°C (Mckinney, 2004).

A relação entre a temperatura e a taxa de reação pode ser expressa da seguinte forma, citado por Von Sperling (2002):

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$$

Onde

K_T = coeficiente de reação a uma temperatura T (dia⁻¹)

K_{20} = coeficiente de reação a uma temperatura de 20°C

θ = coeficiente de temperatura (-)

T = temperatura do meio (°C)

O item 4.3 discorre através de gráficos os efeitos da temperatura na cinética dos micro-organismos do lodo ativado. Pode-se verificar e concluir que acima de 40°C a velocidade de crescimento e degradação de substrato começa a declinar-se, causando a morte da maior parte da microbiota.

2.7.3. Nutrientes e Micronutrientes

Há seis macronutrientes necessários para processos metabólicos: carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e fósforo, e os nutrientes primários são nitrogênio, fósforo e carbono (Beardsley e Coffey, 1985). A disponibilidade de nitrogênio e fósforo pode ser o fator limitante na degradação de hidrocarbonetos (Leahy et al., 1990).

A função dos micronutrientes no processo biológico de lodos ativados não é tão bem conhecida quanto para os macronutrientes (Wood e Tchobanoglous, 1975).

Além dos seis macronutrientes, os micro-organismos necessitam de elementos em baixas concentrações tais quais: manganês, zinco, cobalto, molibdênio, níquel, cobre, vanádio, boro, ferro e iodo (Wood e Tchobanoglous, 1975; Metcalf e Eddy, 2003). Os micronutrientes são necessários em concentrações inferiores a 1 mg/L, o que demonstra a dificuldade para aplicação das doses requeridas (Burgess et al., 1999).

Pequenas quantidades de alguns íons metálicos como cobre, zinco, ferro, níquel, cobalto, são requeridos para os micro-organismos do lodo ativado como cofatores para as atividades enzimáticas (Pamukoglu e Kargi, 2007).

2.7.4. Oxigênio Disponível

Segundo estudos realizados por Wilén e Balmér (1999), analisando concentrações de oxigênio dissolvido com a forma e estrutura dos flocos de lodos ativados, concluíram que concentrações de oxigênio dissolvido menores que 2 mg/L produzem lodos com baixa sedimentabilidade e adensamento, o que pode estar relacionado com o excessivo crescimento de bactérias filamentosas e formação de flocos porosos. Entretanto, em altas concentrações de oxigênio dissolvido a compactação do lodo e a qualidade do efluente tornam-se elevadas, indicando a necessidade de manter a concentração de OD em reatores de lodos ativados entre 2 e 5 mg/L de O₂.