

## **9 PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REATORES ANAERÓBIOS – UMA ANÁLISE CRÍTICA**

Pedro Alem Sobrinho, Eduardo Pacheco Jordão

### **9.1 INTRODUÇÃO**

No Brasil, até a década de 70, o uso de processos anaeróbios para o tratamento de esgotos era restrito basicamente às lagoas anaeróbias, aos decanto-digestores (fossas sépticas e tanques Imhoff, para a estabilização do lodo retido) e aos digestores de lodos produzidos no tratamento da fase líquida de estações de tratamento de esgotos. O tratamento de esgotos era quase que exclusivamente através de lagoas de estabilização, de filtros biológicos, ou de processo de lodos ativados.

O uso de fossas sépticas, para solução individual ou de pequenos aglomerados populacionais, era normalmente associado a uma posterior infiltração no terreno, através de sumidouros ou ainda, raramente, através de valas de infiltração. A partir da década de 80, o uso de filtros anaeróbios como tratamento complementar às fossas sépticas se tornou bastante popular, com a promulgação, em 1982, da NBR 7229 - Construção e Instalação de Fossas Sépticas e Disposição dos Efluentes Finais, da ABNT.

O uso intensivo de sistemas de fossa séptica seguida de filtro anaeróbio ocorreu, principalmente, devido ao fato desse sistema ser extremamente simples de construir e operar e também de se projetar com o uso da NBR 7229/82, que dispensava a necessidade de especialistas em tratamento de esgotos, além de ter custo aceitável de implantação. Ainda hoje (já com a nova NBR-7229/1993 – Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos e a mais recente NBR 13969/1997 – Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação), os sistemas depuradores de esgotos sanitários com fossa séptica e filtro anaeróbio continuam sendo intensivamente utilizados para novos loteamentos com populações inferiores a 1.000 habitantes.

Os tanques Imhoff, com câmara de decantação na parte superior e câmara de digestão de lodo na parte inferior, normalmente utilizado em conjunto com leitos de secagem de lodo, foi inicialmente utilizado como única unidade de tratamento de esgotos, porém, como a qualidade do efluente não era boa, passou a ser utilizado tendo como tratamento complementar o filtro biológico seguido de decantador secundário. O lodo produzido no filtro biológico e retido no decantador secundário era encaminhado ao tanque Imhoff para digestão, em conjunto com o lodo removido na câmara de sedimentação desse tanque. Esta foi, possivelmente, a primeira combinação de sistema depurador de esgoto sanitário com o uso de pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Nas décadas de 30 a 50, várias ETEs com essa concepção foram implantadas no Estado de São Paulo, para populações inferiores a 10.000 habitantes, tendo sido a maioria abandonada, após relativamente pouco tempo de implantação, por falta de operação adequada.

Os tanques Imhoff, desde vários anos atrás, praticamente não são mais construídos no Brasil, uma vez que podem ser substituídos por outros sistemas anaeróbios mais econômicos e de maior eficiência.

No começo da década de 80, iniciavam-se no Brasil estudos para a utilização do reator anaeróbio do fluxo ascendente e manta de lodo (reator UASB), desenvolvido na década anterior na Holanda (Lettinga e colaboradores), para o tratamento de esgotos sanitários. Por sua

simplicidade, altas taxas de tratamento e eficiência bem maior que nos tratamentos primários (embora não equivalente ao tratamentos aeróbios), produzindo lodo já estabilizado e a um custo bastante atraente, os reatores UASB passaram a merecer a atenção de vários grupos de pesquisadores e engenheiros da área de tratamento de esgotos, destacando-se inicialmente o da CETESB, da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo e especialmente o da Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR, que foi o responsável pelo início e profusão da aplicação prática desses reatores anaeróbios.

A exploração inadequada dos reatores UASB para o tratamento de esgotos sanitários e despejos industriais, por alguns profissionais com conhecimento deficiente a respeito desse sistema depurador, que apregoavam uma qualidade do efluente desses reatores equivalente ao do tratamento por processos biológicos aeróbios, e uma operação livre de problemas de odores, levou a alguns resultados bem inferiores àqueles prometidos, levando inclusive ao desgaste da credibilidade dos reatores UASB junto a vários órgãos estaduais e municipais de saneamento básico e a órgãos de controle de poluição das águas.

Todavia, com a continuidade dos estudos e pesquisas de tratamento anaeróbio por reatores UASB, bem como da seleção de melhores concepções desses reatores dentre as desenvolvidas pela equipe da SANEPAR (que os denomina RALF), com elevado número de unidades implantadas no Paraná, na década de 90, e mais recentemente os trabalhos de pesquisa e de divulgação da UFMG e do Grupo do PROSAB – Tema 2 (Tratamento de Esgotos), os reatores UASB vêm retomando a sua credibilidade para o tratamento de esgotos sanitários, com a sua utilização em vários estados do país.

As lagoas anaeróbias, por serem os reatores anaeróbios mais econômicos, desde que o terreno para a sua implantação seja adequado, começaram a ser utilizadas no Brasil na década de 60, e foi estudada particularmente na Escola Politécnica da USP (Prof. Benoit A. Victoretti), na CETESB (Hideo Kawai e colaboradores) e na Universidade Federal da Paraíba (Prof. Salomão Anselmo da Silva e colaboradores).

Os procedimentos de projeto de lagoas anaeróbias, inicialmente utilizados, sofreram algumas modificações sensíveis e essas lagoas vêm sendo bastante utilizadas para o tratamento de esgotos domésticos, quase sempre precedendo a lagoas fotossintéticas, em um sistema denominado no Brasil, pelo Prof. Benoit A. Victoretti, de sistema australiano.

Com a comprovação das vantagens econômicas decorrentes do uso de reatores anaeróbios para o tratamento de esgotos sanitários, mesmo quando associados a tratamentos complementares aeróbios, para se obter um efluente de melhor qualidade, e especialmente agora, em épocas de escassez de energia no país, o uso de reatores anaeróbios vem ganhando cada vez maior destaque. Além disso, hoje já é bem dominado tecnicamente (porém, com algumas instalações implantadas de forma inadequada, o que prejudica a sua avaliação por parte da população), e começa a ser mais intensamente aplicado no tratamento de esgotos sanitários, normalmente seguido de um tratamento complementar para atender às exigências da legislação ambiental em vigor.

## 9.2 USOS MAIS FREQUENTES DOS PROCESSOS ANAERÓBIOS NO TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS

### 9.2.1 Decanto-digestores (*fossas sépticas e tanques Imhoff*)

As fossas sépticas são normalmente utilizadas para soluções individuais, precedendo a infiltração de efluente no terreno ou precedendo filtros anaeróbios. Para populações de até cerca de 500 a 1.000 habitantes, as fossas sépticas são normalmente utilizadas precedendo filtros anaeróbios. Por terem remoção de lodo no máximo uma vez por ano, as fossas sépticas devem ter um volume razoavelmente grande para armazenamento de lodo, o que limita a sua aplicação à faixa de população referida.

Os tanques Imhoff, que têm remoção de lodo mais freqüente e são, em realidade, fossas com câmaras sobrepostas, também podem ser utilizados precedendo filtros anaeróbios, porém, para populações que não ultrapassem 1.000 a 2.000 habitantes. Para populações maiores, os reatores UASB têm se mostrado mais vantajosos do que os tanques Imhoff.

O lodo removido nos decanto-digestores é considerado estabilizado.

### 9.2.2 Filtros anaeróbios

Até há pouco tempo os filtros anaeróbios eram limitados a pequenas populações, tratando efluentes de decanto-digestores. Hoje, a sua utilização após reatores UASB, para se garantir efluente final com  $\text{DBO} < 60 \text{ mg/L}$ , mesmo para cidades de população superior a 50.000 habitantes, já vem sendo praticada. Nestes casos, os parâmetros atuais de dimensionamento dos filtros anaeróbios, apresentados no capítulo 4, são baseados em trabalhos de pesquisas em escala piloto e em resultados de campo, e são bem menos restritivos que aqueles propostos pela NBR 13.969/1997, que levam a unidades superdimensionadas. Instalações de reatores UASB seguidos de filtros anaeróbios já estão implantados no Paraná e em Minas Gerais (ver Figuras 4.26 e 4.27). No âmbito do PROSAB, os filtros anaeróbios foram estudados como pós-tratamento de reatores UASB na UFMG e na UFRN, sendo que esta última vem pesquisando diferentes tipos de material de enchimento. O efluente final sempre apresenta  $\text{DBO} < 60 \text{ mg/L}$ , mesmo em condições operacionais que resultam um tempo de detenção, no filtro, metade daquele recomendado pela NR 13.969/1997, da ABNT, para efluentes de fossa séptica.

### 9.2.3 Reatores UASB

Estes sistemas anaeróbios vêm demonstrando grande aplicabilidade para qualquer população esgotada, com eficiência de remoção de  $\text{DBO}$  razoavelmente boa e a um custo relativamente baixo. Embora boa parte das unidades instaladas não seja seguida de pós-tratamento, e também não atenda ao limite de  $\text{DBO}$  de  $60 \text{ mg/L}$ , por solicitação dos órgãos de controle ambiental alguns reatores UASB já possuem tratamento complementar, através de lagoas de estabilização fotossintéticas. Outros reatores UASB já vêm sendo projetados e instalados, seguidos de tratamento biológico aeróbio complementar, com o lodo, gerado nesta fase de pós-tratamento, sendo encaminhado para estabilização no reator UASB. São exemplos pioneiros:

- os filtros biológicos percoladores, já instalados nas três ETEs de Londrina – Paraná (ver Figura 4.11);
- os sistemas de lodos ativados instalados na ETE Piracicamirim, de Piracicaba, e da ETE Botucatu (em implantação) – São Paulo;
- os biofiltros aerados submersos instalados no Espírito Santo e em Minas Gerais, em pequenas bacias (ver Fig. 4.20 e 4.22).

Também, reatores UASB seguidos de tratamento físico-químico, com aplicação de cloreto férrico e polieletrólito, e separação dos flocos por flotação com ar dissolvido já se encontram em operação em Campo Largo – Paraná (ver Figura 6.9), e em Uberlândia – Minas Gerais, e um sistema com separação dos flocos por decantação com lamelas se encontra em operação em Cascavel - Paraná. Outras duas instalações de porte, Atuba Sul e Santa Quitéria, em Curitiba – Paraná, acham-se com o sistema de pós-tratamento em projeto (aplicação de coagulantes e separação dos flocos por flotação).

Existe hoje grande tendência na utilização de reatores UASB seguidos de sistemas biológicos aeróbios para a remoção de matéria orgânica (DBO efluente inferior a 30 mg/L) e mesmo para a nitrificação do efluente final (N-amoniaco  $< 5$  mg/L). Este assunto será tratado mais detalhadamente a seguir neste capítulo.

Uma das maiores objeções ao uso dos reatores UASB em zonas urbanas é o possível odor resultante dos processos anaeróbios. Embora seja possível minimizar tais problemas, cobrindo os reatores e tratando o gás produzido, várias das unidades já implantadas não cuidaram adequadamente do controle de odores gerados, fato que já vem produzindo alguma rejeição ao uso desses reatores junto a áreas urbanas.

Um cuidado especial com os reatores UASB deve ser em relação à corrosão das estruturas de concreto, próximo e acima do nível do líquido. Várias unidades implantadas, sem a devida proteção do concreto, já se apresentam bastante comprometidas. A proteção do concreto nos reatores UASB é apresentada em outro livro do PROSAB, “Tratamento de esgoto sanitário por processo anaeróbio e disposição controlada no solo”.

#### **9.2.4 Lagoas anaeróbias**

As lagoas anaeróbias são geralmente utilizadas precedendo lagoas de estabilização fotossintéticas. Não existe basicamente um limite de população para a sua utilização, desde que se tenha área e solo adequados à sua implantação. Quando se tem essas condições, as lagoas resultam no sistema de tratamento mais econômico e, por isso mesmo, são bastante utilizadas. Por problemas de odores, recomenda-se que as lagoas anaeróbias estejam a, pelo menos, 500 metros de residências.

O uso de lagoas anaeróbias precedendo lagoas fotossintéticas é claramente vantajoso. Demonstra-se que a área ocupada pelo conjunto das lagoas em série é menor do que a necessária para apenas uma lagoa fotossintética. Além disso, a lagoa anaeróbia inicial, mais profunda, é mais adequada para eventuais acúmulos de areia, e é também mais favorável para eventuais cargas de choque afluentes. Já existem, também, alguns estudos para o uso de lagoas anaeróbias precedendo lagoas aeradas.

### 9.3 PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REATORES ANAERÓBIOS, POR PROCESSOS BIOLÓGICOS AERÓBIOS

Como já referido, existe tendência no Brasil à utilização da combinação de processos anaeróbios, particularmente reatores UASB, e processos aeróbios, para se ter um efluente final com as características equivalentes a de sistemas de tratamento biológico somente aeróbio, com DBO < 20 a 30 mg/L, sólidos suspensos totais < 30 mg/L e, se necessário, N-amoniacal < 5 mg N/L.

Em comparação a uma ETE convencional, constituída de decantador primário seguido de tratamento biológico aeróbio (lodos ativados, filtro biológico percolador, biofiltro aerado submerso ou biodisco), com os lodos primário e secundário passando por adensadores de lodo e por digestores anaeróbios, antes do desaguamento (ou desidratação), uma ETE constituída de reator UASB seguido do tratamento biológico aeróbio, com o lodo secundário encaminhado para digestão no próprio reator UASB e daí, direto para a desaguamento, pode apresentar as seguintes vantagens:

- Os decantadores primários, adensadores de lodo e digestores anaeróbios podem ser substituídos, com todos os seus equipamentos, por reatores UASB, que dispensam equipamentos. Nessa configuração, os reatores UASB passam a cumprir, além da função precípua de tratamento dos esgotos, também as funções de digestão e adensamento do lodo aeróbio, sem a necessidade de qualquer volume adicional.
- Pelo fato do reator UASB apresentar eficiência de remoção de DBO cerca do dobro dos decantadores primários, o volume dos reatores biológicos aeróbios (tanque de aeração, ou filtro biológico, ou biofiltro aerado submerso, ou biodisco) poderá ser reduzido para cerca de metade do volume dos tanques ou reatores das ETEs convencionais. Os decantadores secundários, por receberem um afluente com menor concentração de sólidos em suspensão, podem sofrer uma redução de área superficial.
- Para o caso de sistemas de lodos ativados, o consumo de energia para aeração cairá para cerca de 45 a 55% daquela ETE convencional, quando não se tem nitrificação, e para cerca de 65 a 70%, quando se tem nitrificação quase total.
- O custo de implantação da ETE com reator UASB seguido de tratamento biológico aeróbio será, no máximo, 80% daquele de uma ETE convencional e o custo operacional, devido à maior simplicidade e menor consumo de energia do sistema combinado, anaeróbio-aeróbio, pode representar, ainda, uma maior vantagem para este sistema (SILVA, 1993).

Por outro lado, experimentos realizados na CETESB/EPUSP com reator UASB seguido de lodos ativados de concepção tradicional, com decantador secundário para esgoto sanitário contendo grande parte de sua carga orgânica de origem industrial, mostraram problemas de crescimento excessivo de organismos filamentosos no sistema de lodos ativados. Entretanto, em operação de sistema piloto, com esgoto sanitário predominantemente doméstico, esse problema foi contornado quando a operação do sistema foi efetuada com cerca de 20% do volume inicial do reator biológico não aerado, e sem nitrificação no sistema.

Mais recentemente, estudos desenvolvidos por VON SPERLING et al. (2000) na UFMG, com bom desempenho, mostraram, também, o eventual desenvolvimento de organismos filamentosos em sistemas de lodos ativados, em reatores de mistura completa, em escala de laboratório. O desempenho geral foi amplamente satisfatório, em termos de remoção de DQO, e os organismos filamentosos predominaram apenas quando o reator de lodos ativados entrou em sobrecarga, devido a by-pass do esgoto bruto (teste efetuado no experimento).

Em sistemas de lodos ativados, a nitrificação parece ser mais difícil de ocorrer, com efluente de reator anaeróbio, do que com efluente de decantador primário ou com despejo bruto. A idade de lodo, que parece garantir a nitrificação para as nossas temperaturas, é de cerca de 7 dias.

Em vista de várias teorias existentes a respeito de intumescimento de lodos ativados, existe certa preocupação com o uso de reatores UASB seguidos por lodos ativados.

Em Piracicaba (SP), já está em operação uma ETE com reator UASB seguido de um sistema de lodos ativados dimensionado para baixa concentração de sólidos suspensos no tanque de aeração. Este tanque foi construído em talude de terra, revestido com manta plástica e com decantador laminar anexo. Nesse sistema, não se tem observado problemas de filamentosos e, como o sistema de aeração implantado é limitado, não ocorre a nitrificação. De acordo com as informações obtidas em visita à ETE, o efluente final vem apresentando  $\text{DBO}_5 < 30 \text{ mg/L}$  e  $\text{SST} < 30 \text{ mg/L}$ . O custo de implantação da ETE foi de R\$ 50/habitante (CAMPOS, 1998).

Ainda na CETESB, SALOMÃO JR. (1996) operou um sistema piloto de lodos ativados por batelada, com efluente de reator UASB, sem problemas de crescimento de filamentosos e com boa nitrificação, com idade de lodo de referência igual ou superior a 10 dias. Também, em experimentos em Campina Grande, na UFPB, dentro do PROSAB, utilizando sistema de lodo ativado em batelada, com cargas de alimentação em período de tempo muito curto, resultando em relação Alimento/Microrganismo bastante elevada ao início de cada ciclo, van Haandel e colaboradores não tiveram qualquer problema com o aparecimento de organismos filamentosos. Todavia, o uso de lodos ativados para tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, com concentrações relativamente baixas de matéria orgânica biodegradável, resulta em um volume destinado ao lodo sedimentado muito pequeno em relação ao volume destinado à alimentação, resultando normalmente em operação com elevada variação de nível no reator, o que pode ser um fator negativo em relação à escolha dos equipamentos de aeração. Ainda, no âmbito do PROSAB, na UFRGS, foi estudado o sistema de lodos ativados em batelada, em escala piloto, visando a remoção biológica de nutrientes, tendo-se conseguido efluente com  $\text{DBO} < 30 \text{ mg/L}$  e nitrificação superior a 80%, porém, a remoção de N e P foi muito pobre sem a utilização de uma fonte externa de carbono. Nestes experimentos todos, tem-se observado também que a nitrificação é mais difícil de ocorrer do que em sistemas que recebem esgoto decantado.

ETEs com reator UASB seguido de filtro biológico percolador de alta taxa, com leito de pedras, já foram projetadas. Destaca-se o caso do sistema de esgotos sanitários de Londrina e Cambé, da SANEPAR, onde 3 ETEs foram implantadas com esta concepção, sendo que a ETE Caçadores já está operando desde agosto de 1998 e as outras duas entraram em operação em 2000. Os resultados de operação da ETE Caçadores vêm apresentando um efluente com  $\text{DBO} < 30 \text{ mg/L}$ , sendo que no filtro biológico a eficiência de remoção de DBO é um pouco superior a 70%, para taxas de aplicação até  $1,0 \text{ kg DBO/m}^3 \cdot \text{dia}$ . Não se observa nitrificação nesta ETE. No PROSAB, o uso de filtros biológicos percoladores vem sendo estudado na PUC-PR e na UFMG, com resultados bem compatíveis com os observados na ETE Caçadores. A implantação de filtros biológicos percoladores é mais favorável em terrenos de topografia razoavelmente acidentada, de modo a que estes possam usufruir naturalmente da carga que necessitam.

Várias pequenas ETEs contendo reator UASB seguido de biofiltro aerado submerso, com enchimento granular, sem uso de decantador secundário e com remoção de lodo do biofiltro por retrolavagem estão em operação, principalmente no Espírito Santo e em Minas Gerais. As ETEs normalmente foram projetadas para remoção de matéria orgânica, sem nitrificação, produzindo um efluente com  $\text{DBO} < 30 \text{ mg/L}$ . Uma ETE, implantada na UFES dentro do PROSAB, com reator UASB seguido de biofiltros aerados submersos em série, vem sendo estudada com o objetivo de se obter as condições operacionais para uma eficiente nitrificação. Os primeiros resultados indicam maior dificuldade de nitrificação do que para efluentes de decantador primário.

Outra alternativa de pós-tratamento de efluentes de reatores UASB, que vem sendo estudada na EPUSP e, dentro do PROSAB, pela PUC-PR, é o uso de filtros biológicos aerados submersos, com enchimentos semelhantes aos utilizados em filtros percoladores, seguidos de decantadores secundários. Os resultados dos experimentos em escala piloto são similares àqueles obtidos para os filtros biológicos percoladores. Três sistemas de tratamento com essa concepção já estão projetados para implantação pela SANEPAR, em ETEs de relativamente pequeno porte, onde não se tem desnível disponível no terreno para o uso de filtros percoladores.

ETEs com reatores UASB seguidos de biodiscos modificados, com rodas montadas de mangueiras plásticas corrugadas, e de decantadores secundários, foram implantadas, principalmente nos Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, obtendo-se efluentes com  $DBO \leq 50$  mg/L, com 01 estágio de biodisco, e  $DBO \leq 30$  mg/L, com 02 estágios.

Sistemas de tratamento com lagoas anaeróbias ou reatores UASB, seguidos de lagoa aerada aeróbia e de lagoa de decantação, já vêm recebendo atenção de engenheiros e pesquisadores, pelas vantagens que tal combinação pode trazer, especialmente pela facilidade de implantação, de operação (exceto no trato do lodo) e de possibilidade de minimização dos gastos com energia elétrica, já que, por apresentar volume de reator razoavelmente grande, a lagoa aerada permite que se pare o sistema de aeração durante as três horas de pico de consumo de energia, podendo resultar em economia superior a 40%. Estudos em escala piloto mostraram que, para os esgotos da cidade de Jundiaí, a utilização de reator UASB a montante da lagoa aerada resultaria em um tempo de detenção no conjunto lagoa aerada/lagoa de decantação de cerca de 60% e consumo de oxigênio de cerca de 40% dos necessários sem o reator UASB (ALEM SOBRINHO *et al.*, 1993). Sistemas com esta concepção estão projetados para implantação em uma das ETEs da Região Metropolitana de Curitiba, PR, e no litoral paranaense, com o aproveitamento de uma lagoa existente. São esperados efluentes com  $DBO < 40$  mg/L. Uma desvantagem do uso de lagoa aerada seguida de lagoa de decantação é que a cada 4 a 5 anos é necessário remover o lodo da lagoa de decantação e tem-se que manipular altas quantidades de lodo em tempo relativamente curto. Ainda, na lagoa de decantação ocorre a estabilização do lodo aí retido, em condições anaeróbias, liberando N-amoniaco, que se incorpora ao efluente final, resultando em uma remoção de N, no sistema, extremamente baixa. Em Brasília, a CAESB já possui um sistema operando com reator UASB seguido de lagoa aerada.

Atualmente, algumas concepções de ETEs por lodos ativados de alta taxa não fazem uso de decantador primário, nem de estabilização biológica do lodo (uma vez que é prevista a estabilização do lodo desidratado com cal, para a qual se requer uma quantidade superior a 20%, em relação à quantidade de sólidos do lodo, este em peso seco). Essas concepções visam minimizar o investimento na implantação da ETE.

Os processos biológicos aeróbios como pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios tem-se mostrado muito deficientes na remoção de coliformes fecais, e normalmente requerem desinfecção do efluente final, para atendimento à legislação ambiental em vigor.

Considerando o exposto, serão apresentadas na Tabela 9.1 algumas características relativas ao uso de sistemas clássicos de tratamento de esgotos sanitários e de sistemas com reator UASB utilizando-se processo aeróbio como pós-tratamento, tendo em vista, principalmente, a remoção de matéria carbonácea, com e sem nitrificação, de modo a se poder ter uma primeira comparação entre as alternativas referidas neste texto.



**Tabela 9.1 - Principais características relativas ao uso de sistemas clássicos de tratamento de esgotos sanitários  
e de sistemas com reator UASB seguido de pós-tratamento**

Sistema	Idade do lodo $\theta_c$ (dia)	Qualidade esperada do efluente (mg/L)			Produção de lodo			Tipo de lodo	Custo de implantação (R\$/hab)	Energia para aeração (kWh/hab.ano)	Demanda de área (m <sup>2</sup> /hab)	Fluxograma
		DBO <sub>5</sub>	SST	N-amoniaco	gSS/hab.d	g lodo/hab.d <sup>(a)</sup>	L lodo/hab.d <sup>(a)</sup>					
1a	< 3	≤ 30	≤ 30	> 15	35 a 40	140 a 160	0,14 a 0,16	Digerido	100 a 130 <sup>(b)</sup>	10 a 15	0,03 a 0,10	9.1
1b	4 a 7	≤ 30	≤ 30	> 15	30 a 35	120 a 140	0,12 a 0,14	Digerido	130 a 180 <sup>(b)</sup>	18 a 22	0,03 a 0,10	9.1
2	-	≤ 30	≤ 30	> 15	35 a 40	140 a 160	0,14 a 0,16	Digerido	120 a 150 <sup>(b)</sup>	-	0,03 a 0,10	9.2
3	18 a 30	≤ 20	≤ 40	< 5	38 a 43	150 a 170	0,15 a 0,17	Estabilizado <sup>(f)</sup>	70 a 100 <sup>(c)</sup>	33 a 37	0,03 a 0,10	9.3
4	1,5 a 2	≤ 30	≤ 30	> 15	60 a 65	(nota g)	(nota g)	Não digerido <sup>(g)</sup>	90 a 110 <sup>(b)</sup>	13 a 17	0,02 a 0,05	9.4
5a	< 4	≤ 30	≤ 30	> 20	22 a 30	90 a 120	0,09 a 0,12	Digerido	70 a 100 <sup>(d)</sup>	5 a 7	0,03 a 0,10	9.5
5b	~ 7	≤ 20	≤ 30	< 5	19 a 27	76 a 110	0,08 a 0,11	Digerido	80 a 110 <sup>(d)</sup>	15	0,03 a 0,10	9.5
6	-	≤ 30	≤ 30	> 20	25 a 30	100 a 120	0,10 a 0,12	Digerido	60 a 90 <sup>(e)</sup>	-	0,03 a 0,10	9.6
7	-	≤ 30	≤ 30	> 20	25 a 30	100 a 120	0,10 a 0,12	Digerido	70 a 120 <sup>(e)</sup>	-	0,03 a 0,10	9.7
8	-	≤ 30	≤ 30	> 20	25 a 30	100 a 120	0,10 a 0,12	Digerido	65 a 100 <sup>(e)</sup>	5 a 7	0,03 a 0,10	9.8
9	-	≤ 30	≤ 40	> 25	15 a 25 <sup>(h)</sup>	60 a 100 <sup>(h)</sup>	0,06 a 0,10 <sup>(h)</sup>	Digerido <sup>(h)</sup>	65 a 100 <sup>(e)</sup>	20 a 24	0,40 a 0,70	9.9
10	-	≤ 30	≤ 40	> 25	20 a 25 <sup>(i)</sup>	80 a 100 <sup>(i)</sup>	0,08 a 0,10 <sup>(i)</sup>	Digerido <sup>(i)</sup>	60 a 90 <sup>(e)</sup>	7 a 9	0,20 a 0,30	9.10
11	-	≤ 60	≤ 60	> 20	15 a 20	60 a 80	0,06 a 0,08	Digerido	40 a 70 <sup>(e)</sup>	0	1,0 a 1,5	-
12	-	≤ 60	≤ 40	> 25	15 a 25	60 a 100	0,06 a 0,10	Digerido	40 a 60 <sup>(e)</sup>	0	0,03 a 0,10	-
13	-	≤ 40	≤ 20	> 25	33 a 40	130 a 160	0,13 a 0,16	Digerido	60 a 80 <sup>(e)</sup>	8 a 12	0,03 a 0,10	-
14	-	≤ 30	≤ 30	> 20	10 a 15	40 a 60	0,04 a 0,06	Digerido	40 a 70 <sup>(e)</sup>	0	1,5 a 3,0	-
15	-	≤ 20	≤ 20	> 20	10 a 15	40 a 60	0,04 a 0,06	Digerido	60 a 90 <sup>(e)</sup>	0	0,8 a 1,2	-
16	-	≤ 20	≤ 20	> 15	10 a 15	40 a 60	0,04 a 0,06	Digerido	70 a 100 <sup>(e)</sup>	0	3,0 a 5,0	-
17	-	≤ 20	≤ 20	> 15	10 a 15	40 a 60	0,04 a 0,06	Digerido	70 a 100 <sup>(e)</sup>	0	3,0 a 5,0	-

Sistema 1: ETE convencional com sistema de lodos ativados (com decantador primário, tanque de aeração e decantador secundário, adensador de lodo e digestor anaeróbio)

Sistema 2: ETE convencional com filtro biológico de alta taxa (com decantador primário, filtro biológico e decantador secundário, adensador de lodo e digestor anaeróbio)

Sistema 3: ETE com sistema de lodos ativados por aeração prolongada ( $\theta_c$  = 18 a 30 dias, sem decantador primário)

Sistema 4: ETE com sistema de lodos ativados de alta taxa ( $\theta_c$  = 1,5 a 2,0 dias), sem decantador primário e sem digestor de lodo; tanque de aeração com oxigênio puro, ou através de poço profundo tipo deep shaft)

Sistema 5: ETE com reator UASB seguido de sistema de lodos ativados

Sistema 6: ETE com reator UASB seguido de filtro biológico de alta taxa

Sistema 7: ETE com reator UASB seguido de filtro aerado submerso ou biodisco (sem nitrificação)

Sistema 8: ETE com reator UASB e biofiltro aerado submerso, com material de enchimento granular (sem nitrificação) e sem decantador secundário

Sistema 9: ETE com lagoas aeradas aeróbias (mistura completa) seguidas de lagoas de decantação

Sistema 10: ETE com reator UASB seguido de lagoa aerada aeróbia (mistura completa) e de lagoas de decantação

Sistema 11: ETE com reator UASB seguido de lagoa de polimento

Sistema 12: ETE com reator UASB seguido de filtro anaeróbio

Sistema 13: ETE com reator UASB seguido de flotação por ar dissolvido

Sistema 14: ETE com reator UASB seguido de escoamento superficial no solo

Sistema 15: ETE com reator UASB seguido de vala de filtração

Sistema 16: ETE com reator UASB seguido de terras úmidas (wetlands)

Sistema 17: ETE com reator UASB seguido de escoamento subsuperficial

- (a) considerando o lodo seco com 25% de teor de sólidos
- (b) faixa usual de custo para sistemas com populações acima de 200.000 habitantes
- (c) faixa usual de custo para sistemas com populações entre 50.000 e 100.000 habitantes
- (d) faixa usual de custo para sistemas com populações acima de 50.000 habitantes
- (e) faixa usual de custo para sistemas com populações entre 20.000 e 100.000 habitantes
- (f) lodo estabilizado, mas de difícil desidratação
- (g) para a estabilização do lodo com cal do lodo desidratado ( $\text{pH} > 11$ ), chega-se a 75 a 85 gSST/hab.d, que corresponde a 300 a 340 g lodo/hab.d ou 0,30 a 0,34 L lodo/hab.d. Se houver percolação de água pelo lodo, o mesmo volta a ficar não estabilizado
- (h) considerando a remoção do lodo digerido da lagoa de decantação a cada 4 a 5 anos
- (i) considerando a remoção do lodo digerido da lagoa de decantação a cada 4 a 5 anos e remoção mais freqüente do lodo do reator UASB

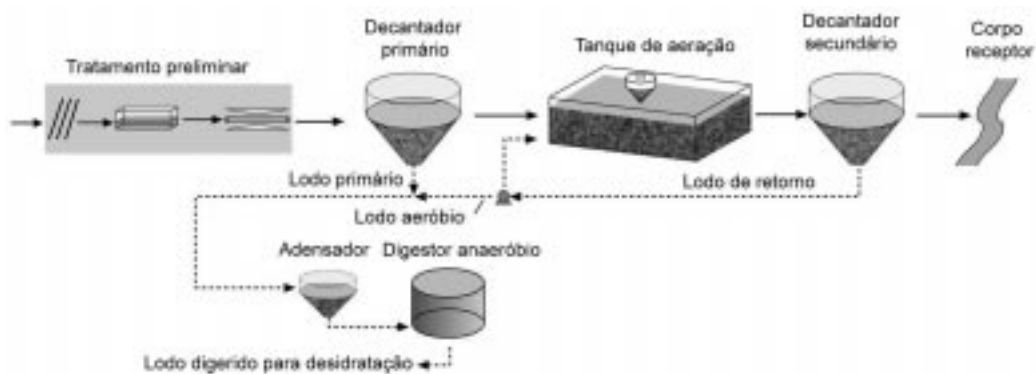


Figura 9.1 - ETE convencional com sistema de lodos ativados



Figura 9.2 - ETE convencional com filtro biológico de alta taxa

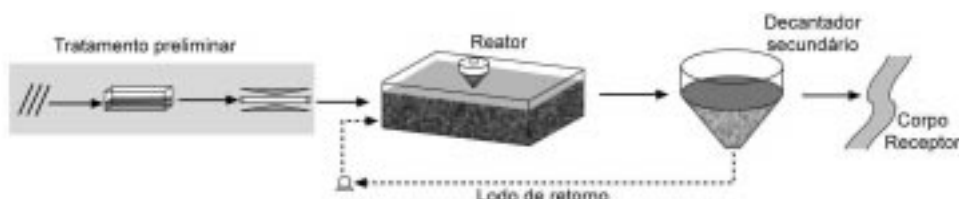


Figura 9.3 – ETE com sistema de lodos ativados por aeração prolongada

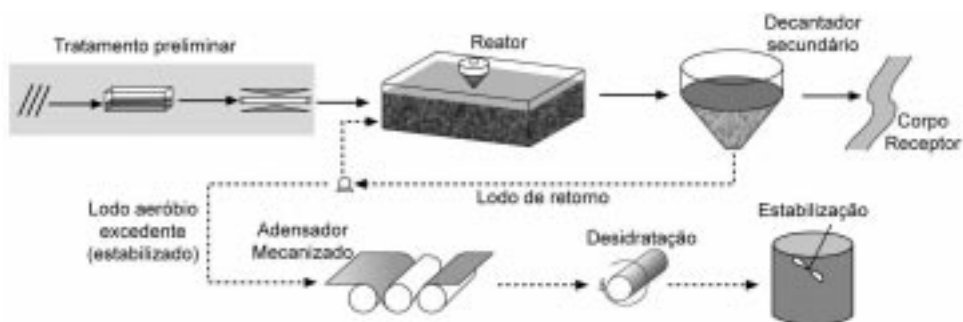


Figura 9.4 - ETE com sistema de lodos ativados de alta taxa

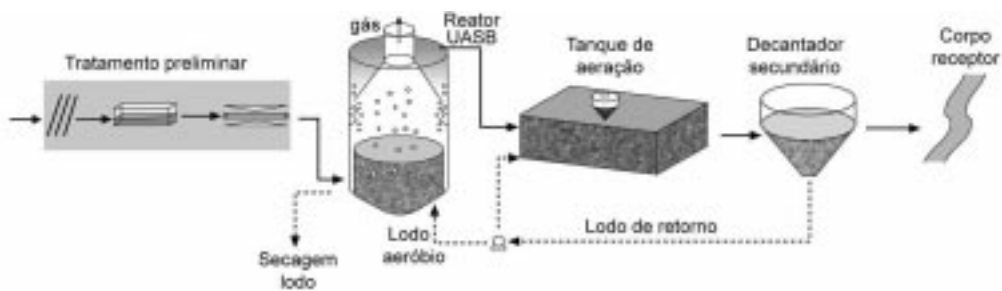


Figura 9.5 - ETE com reator UASB seguido de sistema de lodos ativados

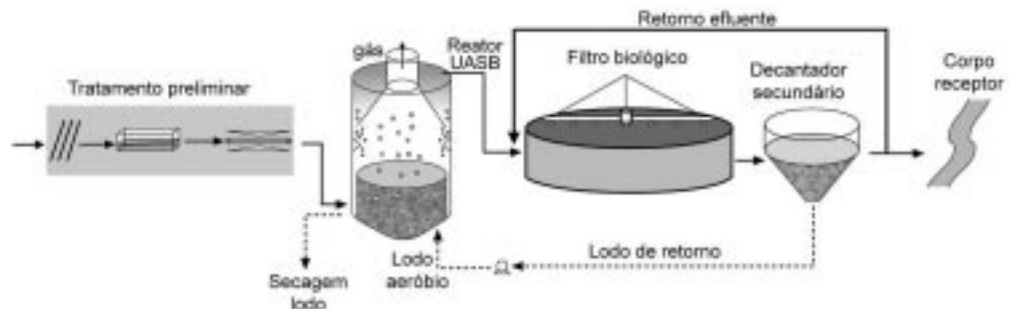


Figura 9.6 - ETE com reator UASB seguido de filtro biológico de alta taxa

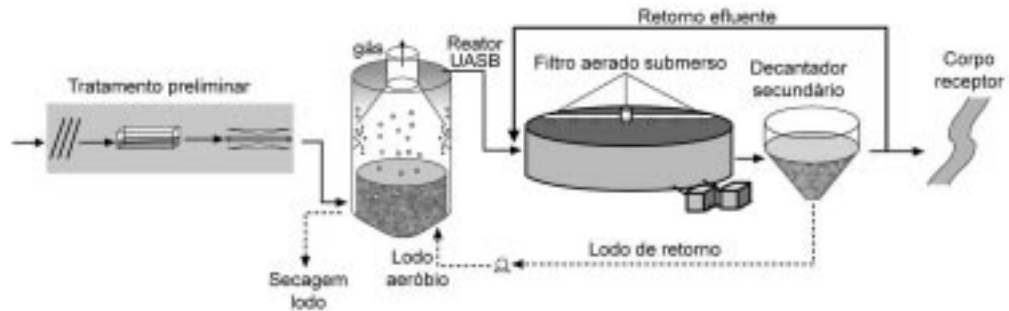


Figura 9.7 - ETE com reator UASB seguido de filtro aerado submerso ou biodisco

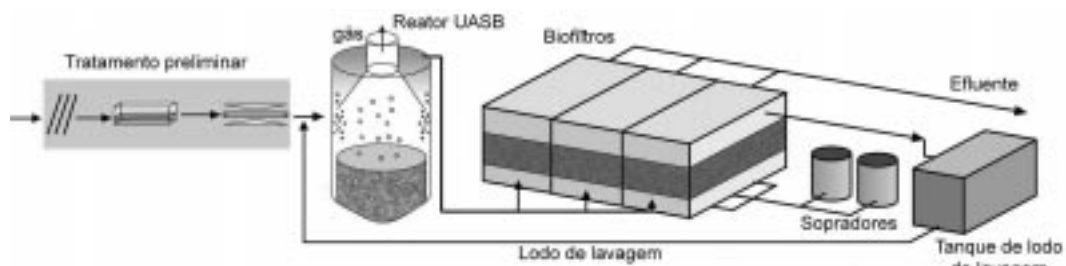


Figura 9.8 - ETE com reator UASB e biofiltro aerado submerso

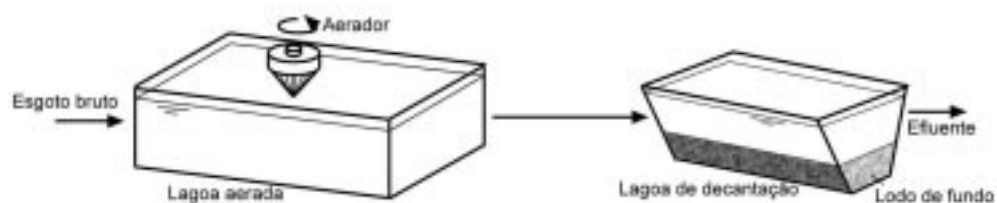


Figura 9.9 - ETE com lagoas aeradas aeróbias (mistura completa) seguidas de lagoas de decantação

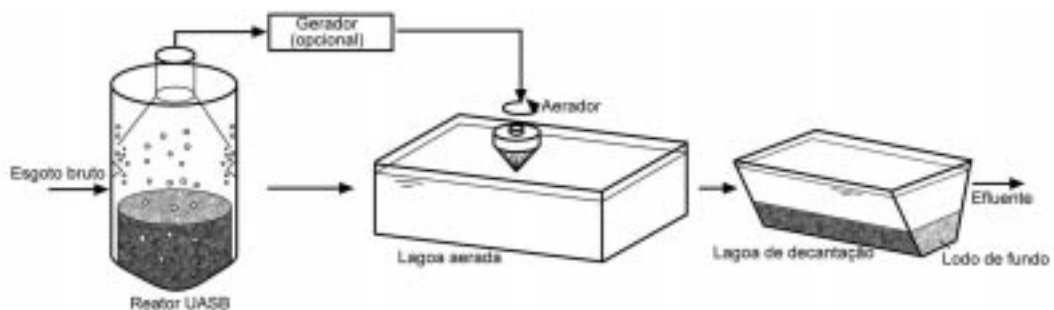


Figura 9.10 - ETE com reator UASB seguido de lagoa aerada aeróbia (mistura completa) e de lagoas de decantação

#### **9.4 EFEITO DO USO DE REATORES ANAERÓBIOS A MONTANTE DE SISTEMAS AERÓBIOS, PARA REMOÇÃO BIOLÓGICA DE NUTRIENTES**

Nitrogênio e fósforo podem ser removidos dos esgotos por via biológica. A remoção de nitrogênio se dá pela nitrificação/desnitrificação, sendo que a desnitrificação ocorre em reator com oxigênio dissolvido nulo e com consumo de matéria orgânica. A remoção biológica de fósforo se dá pela sua incorporação na massa de lodo (em sistema biológico em que se mantém a parte inicial do reator biológico anaeróbia e outra parte do reator aeróbia). Isso indica a necessidade de matéria orgânica no esgoto afluente, para uma boa produção de lodo e, conseqüentemente, boa remoção de fósforo, mesmo tendo-se nesse tipo de sistema biológico uma incorporação de fósforo no lodo bem superior àquela observada em sistemas biológicos totalmente aeróbios (percentagem de fósforo no lodo volátil superior a 4 e 6% em sistema com câmaras anaeróbia e aeróbia, contra 2,0 a 2,5%, em sistemas totalmente aeróbios).

De modo geral, sistemas biológicos com câmaras anóxica e aeróbia têm apresentado excelente remoção de nitrogênio (podendo atingir eficiência superior a 90%), com esgoto apresentando relação  $N/DQO < 0,08$ , que é comum em esgoto sanitário tipicamente doméstico, bruto ou mesmo decantado. A remoção de fósforo em sistemas biológicos com câmara anaeróbia seguida de câmara aeróbia apresenta bons resultados, com concentração de fósforo total no efluente inferior a 1 mg/L (com fósforo solúvel inferior a 0,2 mg/L), quando se tem no afluente a esse sistema biológico uma relação  $P/DQO < 0,03$ .

O uso de reator UASB, que apresenta boa remoção de matéria orgânica biodegradável (55 a 75%) e praticamente nenhuma eficiência de remoção de N e P, seguramente terá efeito negativo sobre sistemas de tratamento biológico com objetivo de boa remoção desses nutrientes, pois o efluente do reator UASB terá relações  $N/DQO$  e  $P/DQO$  bem superiores aos valores desejados para o bom desempenho desse sistemas depuradores.

Quando o objetivo do tratamento de esgoto é também o de boa remoção de N, o reator UASB deve ser usado para tratar inicialmente uma parcela do esgoto bruto afluente à ETE (possivelmente não mais de 50%), devendo o restante ser encaminhado diretamente ao tratamento biológico complementar com nitrificação e desnitrificação, de modo a se ter matéria orgânica suficiente para a desnitrificação. Nesse caso, a grande vantagem do uso do reator UASB é a de receber e estabilizar o lodo gerado no tratamento complementar, eliminando a necessidade de uso de digestor anaeróbio de lodo.

Por outro lado, quando tem-se por objetivo a remoção biológica do fósforo, o uso de reator UASB não é recomendável, pois além de aumentar bastante a relação  $P/DBO$  do afluente ao sistema biológico para remoção de fósforo, prejudicando o seu desempenho, se o lodo gerado neste tratamento, rico em fósforo, for encaminhado ao reator UASB para a sua estabilização, haverá aí, sob condições anaeróbias, liberação de fósforo incorporado a esse lodo, que também sairá no efluente do reator UASB. Este fato inviabiliza a remoção eficiente de fósforo em uma ETE com reator UASB seguido de tratamento complementar com remoção biológica de fósforo.

A remoção de fósforo em ETE com o uso de reator UASB somente será efetiva se forem utilizados produtos químicos para a remoção do fósforo. Neste caso, o uso do reator UASB apresenta a vantagem de poder ser utilizado para estabilizar o lodo gerado no tratamento complementar (biológico aeróbio, com adição de sais de alumínio ou ferro).

## **9.5 uso de reatores anaeróbios seguidos DE TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO PARA REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA E FÓSFORO**

Tratamentos físico-químicos com o uso de sais de metais trivalentes e mesmo polieletrólitos, com separação dos flocos por decantação ou flotação com ar dissolvido, são normalmente eficientes na remoção da matéria em suspensão e coloidal do esgoto e na remoção de fósforo. Todavia, a eficiência desses tratamentos em relação à matéria orgânica solúvel é basicamente nula. Para esgoto bruto, a eficiência de tais tratamentos não ultrapassa os 60 – 65%, em relação à DBO e DQO.

Ao se utilizar o tratamento biológico anaeróbio a montante de unidades de tratamento físico-químico, tem-se uma boa redução da matéria orgânica solúvel do esgoto, permitindo que o sistema combinado tenha uma boa eficiência final em relação à matéria orgânica e também em relação ao fósforo.

No PROSAB, o uso de reatores UASB seguidos por sistema de flotação com ar dissolvido, foi estudado em escala piloto pela equipe da EESC-USP, e em escala real, pela PUC-PR, em conjunto com a SANEPAR, que tem um sistema com esta concepção implantado em Campo Largo, PR. Em Uberlândia, MG, está implantado um sistema composto de reator UASB seguido de flotação com ar dissolvido, porém com a câmara de flotação em forma de um canal. O coagulante normalmente utilizado é o cloreto férrico, em dosagens que variam de 50 a 80 mg/L, e com efluente final com DBO < 30 mg/L e P ≤ 1 mg/L.

ETE com reator UASB seguido de tratamento físico-químico, com o uso de cloreto férrico como coagulante, e decantador lamelar, para separação dos flocos, foi implantada pela SANEPAR na cidade de Cascavel, PR, com capacidade para uma vazão de 75 L/s. Atualmente, o sistema de tratamento opera com cerca de 30 L/s e o efluente se apresenta com DBO < 30 mg/L e P ≤ 1 mg/L.

## **9.6 uso de reatores anaeróbios seguidos DE LAGOAS FOTOSSINTÉTICAS, VISANDO A REMOÇÃO DE ORGANISMOS PATOGÊNICOS**

O uso de lagoas fotossintéticas para pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios é largamente utilizado após lagoas anaeróbias, em sistema conhecido como sistema australiano, ou sistema de lagoas em série. O uso desses sistemas apresenta como grande vantagem a remoção de organismos patogênicos presentes no esgoto, já que a presença de elevadas concentrações de algas no efluente dessas lagoas, que representam demanda de oxigênio no teste de DBO, sofre sérias restrições por parte de alguns órgãos de controle ambiental, e também quando se pretende o uso desses efluentes em atividades que requeiram água de melhor qualidade. Os efluentes de lagoas fotossintéticas são especialmente interessantes para usos na agricultura, em reflorestamento e em piscicultura.

O uso do reator UASB substituindo lagoas anaeróbias, a montante de lagoas fotossintéticas (que, nestes casos, vem sendo denominada lagoa de polimento), quando se tem área disponível e terreno adequado à construção de sistema somente de lagoas, deve ser analisado cuidadosamente, verificando se a diminuição de área conseguida para a lagoa facultativa apresenta vantagens econômicas em relação à substituição da lagoa anaeróbia pelo reator UASB.

Todavia, quando se tem limitações de área para a implantação de lagoas apenas, ou mesmo quando os problemas de odores provenientes de lagoas anaeróbias representam objeções a seu uso, uma ETE composta de reator UASB (que pode ser implantado com controle de odor), seguido de lagoa de polimento, pode se tornar uma alternativa atraente, especialmente quando o

efluente da lagoa for utilizado em atividades agrícolas, como seria desejável para as regiões mais afetadas pela seca. E neste caso, o uso da lagoa de polimento deve visar principalmente a remoção de organismos patogênicos.

A utilização de lagoas de polimento e lagoas de alta taxa para o pós-tratamento de efluentes de reatores UASB vem sendo pesquisada dentro do PROSAB, inclusive visando a remoção de nutrientes, pelo aumento de pH nas lagoas. Porém, os resultados não são animadores para este objetivo. Ainda, a remoção de algas de efluentes de lagoas fotossintéticas tem se mostrado difícil (os melhores resultados são com o uso de coagulantes de sais de metal trivalente) e onerosa.

## **9.7 USO DO SOLO PARA PÓS-TRATAMENTO E/OU DISPOSIÇÃO DE EFLUENTES DE REATORES ANAERÓBIOS**

A aplicação de esgotos no solo constitui a forma mais simples e econômica para tratamento e disposição final de efluentes líquidos. É também um dos mais eficientes sistemas de tratamento por processos naturais. Pode-se entender a aplicação de esgotos no solo como um conjunto de processos naturais, físicos, químicos e biológicos, ocorrendo no meio solo-planta-esgoto.

Embora muito econômico, com muito baixo custo de investimento e de operação, tem contra si a extensa área ocupada, e a forma intermitente de utilização, obrigando a períodos de aplicação e de descanso, o que limita este método de depuração a pequenas comunidades e a áreas isoladas.

No âmbito do PROSAB foram estudados, como pós-tratamento de unidades anaeróbias, sistemas com escoamento superficial no solo (UNICAMP), sistemas com escoamento sub-superficial (UFRN), sistemas com “wetlands” construídos (UFPB), e com bacia de infiltração e coluna de areia (UFRN e PUC-PR).

Os resultados encontrados nas pesquisas confirmam outras experiências relatadas na literatura, podendo-se resumir os seguintes parâmetros de eficiência:

- No caso de escoamento superficial: remoção de DBO de 91 e 94%, com taxas de aplicação de 0,10 e 0,20 m<sup>3</sup>/h.m., para o sistema filtro anaeróbio-rampa de escoamento.
- No caso de escoamento sub-superficial em área com cobertura vegetal: remoção de DQO média, no “tabuleiro”, de 53%, e de nutrientes de 94% para nitrogênio amoniacal e de 91% para fósforo.
- No caso de “wetland” construído: remoção da DQO, no sistema UASB + “wetland”, de 79 a 83%, de NTK de 59 a 87%, e de fósforo variando de 66<sup>a</sup> até 100%.

A opção para utilização de qualquer forma de aplicação do efluente de um reator UASB ou filtro anaeróbio no solo, deve levar em conta a capacidade de recebimento e depuração do sistema a ser usado, bem como os aspectos relativos à proteção ambiental e à saúde pública, em particular os que implicam em eventual contaminação dos aquíferos. Com estas considerações, as técnicas próprias de irrigação, associadas com as de engenharia sanitária, deverão compor uma solução econômica, simples, e aplicável a pequenas contribuições.

## **9.8 CONCLUSÕES**

Embora os processos anaeróbios de tratamento de esgotos mais difundidos, particularmente lagoas anaeróbias e reatores UASB, apresentem boa remoção de matéria orgânica biodegradável a custos atraentes, os seus efluentes não atendem às exigências de vários órgãos estaduais de controle ambiental, requerendo, nesses casos um pós-tratamento. Por outro lado, sistemas anaeróbios compostos de reator UASB seguido de filtro anaeróbio, que produzem efluentes com

$DBO \leq 60$  mg/L (limite para efluentes exigido em alguns Estados), têm sido aceitos por vários órgãos de controle ambiental, especialmente quando a capacidade de diluição do corpo receptor é boa e propicia manter os parâmetros de qualidade de água compatível com o seu enquadramento.

Um efluente com características típicas de efluentes de ETEs com tratamento biológico aeróbio convencional ( $DBO < 30$  mg/L e  $SST < 30$  mg/L), precedido de decantador primário, e com estabilização anaeróbia do lodo gerado, pode ser conseguido, com vantagens econômicas e operacionais, por sistema composto de reator UASB seguido de tratamento biológico aeróbio. Nesta última concepção, o reator biológico aeróbio e o consumo de energia para remoção de matéria orgânica são bem inferiores aos de ETE convencional, e o lodo gerado no tratamento biológico aeróbio é estabilizado no próprio reator UASB, eliminando a necessidade de digestores de lodo. ETEs com esta nova concepção já vêm merecendo maior atenção dos projetistas especializados em tratamento de esgotos sanitários.

Quando elevada remoção de nitrogênio é requerida, o sistema composto de reator UASB seguido de tratamento biológico aeróbio complementar pode ser utilizado, devendo boa parte do esgoto, dependendo da relação N/DQO, ser enviado diretamente para o tratamento aeróbio complementar e todo o lodo ser estabilizado no reator UASB.

Para se conseguir elevado nível de remoção biológica de fósforo, não se recomenda o uso de reator UASB a montante do sistema biológico com remoção de fósforo. O uso de reator anaeróbio em ETEs que necessitam elevado nível de remoção de fósforo implica na adição de produtos químicos em tratamento complementar, que poderá ser biológico aeróbio, flotação por ar dissolvido ou mesmo coagulação-floculação, decantação e filtração. O lodo gerado no tratamento complementar, com o uso de produtos químicos, poderá ser estabilizado no reator anaeróbio.

Os sistemas de tratamento compostos de reatores anaeróbios e pós-tratamento que não seja lagoa ou uso do solo, que eventualmente podem apresentar remoção elevada de organismos coliformes fecais, são todos pouco eficientes na remoção de organismos patogênicos e requerem, normalmente, desinfecção final do efluente para atender à legislação ambiental em vigor.

O uso de lagoas de polimento para tratamento de efluentes de reatores UASB é mais indicado quando se pode praticar o uso desses efluentes na agricultura ou na piscicultura.

O uso de sistemas compostos de reator anaeróbio seguido de tratamento no solo é uma alternativa com estudos em desenvolvimento, e é tratado em outro capítulo deste livro.

Outros sistemas anaeróbios, como o de leito fluidificado ou de leito expandido estão em estudos, devendo em futuro próximo representar novas alternativas para o tratamento de esgotos sanitários.

Os grandes problemas envolvidos com o uso de reatores anaeróbios seguidos de pós-tratamento são relativos à produção de maus odores e aos efeitos do processo de corrosão que ocorrem nos reatores UASB. Negligenciar esses aspectos pode desgastar, de maneira até irreparável, concepções de tratamento de esgotos sanitários que vêm-se mostrando eficiente e mais econômica que os sistemas clássicos de depuração de esgotos.

## 9.9 BIBLIOGRAFIA

- ABNT (1963). Norma para construção e instalação de fossa séptica. *NB 41*. ABNT. Rio de Janeiro. 18 p.
- ABNT (1982). Construção e instalação de fossas sépticas e disposição dos efluentes finais. *NBR 7229*. ABNT. Rio de Janeiro. 15 p.
- ABNT (1993). Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. *NBR 7229*. ABNT. Rio de Janeiro. 15 p.
- ABNT (1997). Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação. *NBR 13969*. ABNT. Rio de Janeiro. 60 p.
- CAMPOS, J.R. (1994). Alternativas para tratamento de esgotos. Pré-tratamento de águas para abastecimento. *Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari*, nr. 9. 112 p.
- CAMPOS, J.R., coordenador (1999). *Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo*. PROSAB. Rio de Janeiro. 435 p.
- CAMPOS, J.R., coordenador (2000). *Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo – Coletânea de trabalhos técnicos*. PROSAB. Rio de Janeiro. 332 p.
- CHERNICHARO, C.A.L. coordenador (2000). *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios - Coletânea de trabalhos técnicos*. Volume 1. PROSAB. B. Horizonte. 220 p.
- CONAMA (1986). *Resolução 20/86*. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente.
- LETTINGA, G., VAN NELSEN, A.F.M., HOBMA, S.W., DE ZEEUW, W. e KLAPWIJK, A. (1980). Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering* 22: 699-734.
- LETTINGA, G., ROERSMA, R. e GRIN, P. (1983). Anaerobic treatment of raw domestic sewage at ambient temperature using a granular bed UASB reactor. *Biotechnology and Bioengineering* 25: 1701-1723.
- METCALF & EDDY, INC. (1991). *Wastewater engineering. Treatment, disposal and reuse*. 3<sup>rd</sup> edition. McGraw-Hill. Nova York. 1334 p.
- SALOMÃO JR., A. (1996). *Post-treatment of UASB effluent using SBR system*. Dissertação de mestrado. E.E. 257. IHE. Delft, Holanda.
- SILVA, S.M.C.P. (1993). *Desenvolvimento de uma nova concepção de tratamento de águas residuárias pela associação de processos anaeróbios e aeróbios*. Tese de doutoramento. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- SOUSA, J.T. (1996). *Pós-tratamento de efluente de reator anaeróbico de fluxo ascendente em reator aeróbio sequencial em batelada e coluna de lodo anaeróbio para desnitrificação*. Tese de doutoramento. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo.
- VICTORETTI, B.A. (1973). *Contribuição ao emprego de lagoas de estabilização como processo para depuração de esgotos domésticos*. CETESB. São Paulo. 131 p.
- VON SPERLING, M. Performance evaluation of an UASB – activated sludge system treating municipal wastewater. In: *1<sup>st</sup> World Water Congress of the International Water Association (IWA)*, Paris, 3–7 Julho 2000, Conference Preprint Book 4, p. 94-100.